

**MODEL PEMELIHARAAN BERKELANJUTAN PADA SISTEM
PEMELIHARAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SIDRAP**

**SUSTAINABLE MAINTENANCE MODEL IN
SIDRAP WIND POWER PLANT MAINTENANCE SYSTEM**



**MUHAMMAD ARIS
D022221016**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**MODEL PEMELIHARAAN BERKELANJUTAN PADA SISTEM
PEMELIHARAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SIDRAP**

MUHAMMAD ARIS

D022221016



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

MODEL PEMELIHARAAN BERKELANJUTAN PADA SISTEM
PEMELIHARAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SIDRAP

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD ARIS

D022221016

kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

TESIS**MODEL PEMELIHARAAN BERKELANJUTAN PADA SISTEM
PEMELIHARAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SIDRAP****MUHAMMAD ARIS****D022221016**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Magister pada tanggal 29 Oktober

2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Magister Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Gowa

Mengesahkan:

Pembimbing Utama



**Prof. Dr. Ing. Ir. Wahyu H. Piarah,
MSME.**

NIP. 196003021986091001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, M.T.
NIP. 196803011997022001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran
Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN. Eng.**
NIP. 197911122008122002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



**Dr. Eng. Novriany Amaliyah,
S.T., M.T.**
Nip. 197309262000121002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul "**Model Pemeliharaan Berkelanjutan pada Sistem Pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap**" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Prof. Dn Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, M.T. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan sedang tidak diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya Yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari tesis ini telah dipublikasikan di "*The International Conference on Research in Engineering and Science Technology (IC-REST) 2024*" pada tanggal 25 September 2024" sebagai artikel dengan judul "**Strategy for Implementing Sustainable Maintenance in the Maintenance System of Sidrap Wind Power Plant**". Dan, akan dipublikasikan di "*The International Conference on Energy Manufacture, Advanced Material, and Mechantronics (IC-EMAMM) 2024*" pada tanggal 9 November 2024" sebagai artikel dengan judul "**Sustainable Maintenance Model for Wind Power Plant Systems in Sidrap**". Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain. Maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 31 Oktober 2024
Yang menyatakan,



Muhammad Aris
NIM D022221016

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah S.W.T., yang telah memberikan karunia-Nya, sehingga penulis telah menyelesaikan tesis “Model Pemeliharaan Berkelanjutan pada Sistem Pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap”.

Penghargaan yang sangat tinggi saya haturkan kepada Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME. sebagai pembimbing utama atas bimbingan dan arahan yang diberikan sehingga penelitian dan penyusunan tesis ini dapat terlaksana dengan baik. Ucapan dan penghargaan yang sama juga saya sampaikan kepada Ibu Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, M.T., sebagai pembimbing pendamping yang telah memberikan arahan, bimbingan dan motivasi kepada saya. Dengan penuh kerendahan hati saya mengucapkan terima kasih dan penghormatan yang setinggi-tingginya atas bimbingan yang telah diberikan.

Saya menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada: Rektor Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.; Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN. Eng.; Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST., MT.; Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, Ibu Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T., yang telah memberikan arahan dan pendampingan akademik selama proses studi saya, dan juga Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/Ibu staf Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang sangat membantu dalam proses administrasi, saya haturkan banyak terima kasih.

Terima kasih yang tak terhingga saya haturkan kepada keluarga: orang tua saya Ibu dan Ibu Mertua, Istri dan Anak-Anak tercinta yang senantiasa memberikan doa dan motivasi yang sangat luar biasa. Terima kasih juga saya sampaikan kepada teman-teman Angkatan 2022 Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas kebersamaan yang terjalin selama ini.

Sebagaimana pepatah "tak ada gading yang tak retak" saya sadar sepenuhnya dengan segala keterbatasan sumber daya yang dimiliki, penelitian ini masih memiliki kekurangan, namun hal itu tidak akan menghambat kelanjutan proses belajar untuk mendapatkan pengalaman yang berharga. Hanya dengan Rahmat Allah S.W.T., dzat Yang Maha Pengasih, Maha Penyayang, Maha Mengetahui dan Maha Menguasai ilmu dunia akhirat, yang mampu membalas semua kebaikan mereka. Aamiin Aamiin Ya Robbal Alamin.

Gowa, 31 Oktober 2024

Penulis,

Muhammad Aris

ABSTRAK

MUHAMMAD ARIS. **Model Pemeliharaan Berkelanjutan Pada Sistem Pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.** (Dibimbing oleh Wahyu H. Piarah, Zuryati Djafar)

Latar Belakang. Pemeliharaan berkelanjutan merupakan tantangan bagi perusahaan untuk mewujudkan pembangunan berkelanjutan yang dinyatakan dalam bentuk konsep terpadu yang mencakup aspek teknis, ekonomi, lingkungan, sosial, sistem informasi dan manajemen operasional. Konsep ini merupakan pengembangan berkelanjutan dan perbaikan secara terus-menerus dari proses pemeliharaan, peningkatan efisiensi, keselamatan dalam operasi dan perawatan, baik pada objek teknis maupun instalasi yang berfokus pada karyawan. **Tujuan.** Penelitian ini dimaksudkan untuk mempromosikan konsep pemeliharaan berkelanjutan dengan membuat model kriteria kinerja pemeliharaan berkelanjutan di PLTB Sidrap. **Metode.** Mengintegrasikan *structural equation modeling-partial least square* (SEM-PLS) serta menentukan strategi implementasi pemeliharaan berkelanjutan. Indikator kinerja pemeliharaan berkelanjutan yang diteliti terdiri dari enam aspek yaitu: aspek teknis (X1), aspek ekonomi (X2), aspek lingkungan (X3), aspek sosial (X4), aspek sistem informasi (X5), dan aspek manajemen operasional (X6). **Hasil.** Penelitian ini menghasilkan *Model Pemeliharaan Berkelanjutan* $Y = -0,357X1 + 1,197X2 + 0,588X3 - 0,627X4 + 0,214X5 - 0,185X6$. **Kesimpulan.** Model ini menunjukkan bahwa karakteristik pemeliharaan berkelanjutan di PLTB Sidrap mengutamakan variabel aspek ekonomi pada biaya pemeliharaan per mesin (X2.10) sebagai indikator utama. Tujuan indikator ini untuk mengetahui sejauh mana biaya pemeliharaan per mesin berpengaruh terhadap kinerja pemeliharaan berkelanjutan di PLTB Sidrap. Adapun strategi implementasi dengan analisis SWOT menghasilkan strategi agresif yang berada pada kuadran I (pertama) diagram cartesius model analisis SWOT. Strategi Strengths-Opportunities (S-O) mengutamakan inovasi dalam aliran pendapatan, diferensiasi pasar melalui praktik berkelanjutan, dan membangun kemitraan strategis untuk kemajuan teknologi. Strategi berikutnya secara berurutan berdasarkan tingkat prioritas yang dapat diterapkan adalah strategi Strengths-Threats (S-T), strategi Weaknesses-Opportunities (W-O), dan strategi Weaknesses-Threats (W-T).

Kata Kunci: Kriteria pemeliharaan berkelanjutan, kinerja pemeliharaan berkelanjutan, PLTB Sidrap, structural equation modeling, partial least square, analisis SWOT.

ABSTRACT

MUHAMMAD ARIS. Sustainable Maintenance Model in Sidrap Wind Power Plant Maintenance System. (Supervised by Wahyu H. Piarah and Zuryati Djafar)

Background. Sustainable maintenance is a key challenge for companies aiming to achieve sustainable development, framed as an integrated approach involving technical, economic, environmental, social, information systems, and operational management dimensions. This approach centers on the ongoing enhancement of maintenance processes to improve efficiency, operational safety, and the maintenance of both technical assets and installations, with a strong focus on employees. **Aim.** This study aims to advance sustainable maintenance by developing a model for assessing sustainable maintenance performance criteria at Sidrap Wind Power Plant (WPPs). **Methods.** The study employs *structural equation modeling-partial least square* (SEM-PLS) analysis to define a sustainable maintenance model and implementation strategy. Six performance indicators are examined, covering technical (X1), economic (X2), environmental (X3), social (X4), information systems (X5), and operational management (X6) aspects. **Results.** The resulting Sustainable Maintenance Model is represented by the equation $Y = -0.357X1 + 1.197X2 + 0.588X3 - 0.627X4 + 0.214X5 - 0.185X6$. **Conclusion.** The model indicates that at Sidrap WPPs, the economic aspect—specifically the maintenance cost per machine (X2.10)—is a primary factor in sustainable maintenance. This indicator assesses the impact of maintenance cost per machine on sustainable maintenance performance. A SWOT analysis of the implementation strategy reveals an aggressive approach, occupying the first quadrant of the SWOT model's Cartesian diagram. The leading Strengths-Opportunities (S-O) strategy focuses on revenue stream innovation, market differentiation through sustainable practices, and strategic partnerships for technological advancement. Following this, strategies prioritized by importance are the Strengths-Threats (S-T), Weaknesses-Opportunities (W-O), and Weaknesses-Threats (W-T) strategies.

Keywords: sustainable maintenance criteria, sustainable maintenance performance, Sidrap WPPs, structural equation modeling, partial least square, SWOT analysis.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN PENGAJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
1.7 Keterbaruan/Novelty	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian yang Relevan	6
2.1.1 Operation Research Model (ORM)	10
2.1.2 Stochastic Model	11
2.1.3 Markov Model.....	11
2.1.4 Petri Net Model (Model Jaring Petri).....	11
2.1.5 Analytical Model	11
2.1.6 Simulation Models	11
2.1.7 Bayesian Networks Model.....	12
2.1.8 Fuzzy Models	12
2.1.9 Data Mining Model	12
2.1.10 Intelligent Based.....	12
2.1.11 Multiple Objective Model (Model multi-tujuan)	12
2.1.12 Overhaul.....	13
2.1.13 Corrective	13
2.1.14 Periodic (Inspeksi Rutin)	13

2.1.15	Performance-based (Time based, Age based, Use based).....	13
2.1.16	Failure-Limit Policy	13
2.1.17	Reliability Centered Maintenance (RCM).....	14
2.1.18	Pemeliharaan Berbasis Kondisi (CBM).....	14
2.1.19	Pemeliharaan prediktif (PdM).....	14
2.1.20	Pemeliharaan Berbasis Risiko (RBM).....	14
2.1.21	Group dan Opprtunistic Maintenance	15
2.2	State of The Art.....	15
2.3	Pemeliharaan Berkelanjutan (<i>Sustainable Maintenance</i>).....	37
2.4	<i>Structural Equation Modeling</i> (SEM).....	39
2.5	Analisis SWOT	41
BAB III.	METODE PENELITIAN	42
3.1	Pendekatan dan Jenis Penelitian.....	42
3.1.1	SmartPLS	43
3.1.2	Analisis SmartPLS.....	44
3.2	Strategi Penelitian	46
3.3	Model Operasional Penelitian	47
3.4	Konsep Penelitian	48
3.5	Variabel Penelitian	48
3.6	Definisi Operasional	49
3.7	Strategi Penerapan Sustainable Maintenance	56
3.8	Desain Penelitian	59
BAB IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	64
4.1	Hasil Analisis Karakteristik Responden	64
4.1.1	Distribusi Responden Berdasarkan Jenis Kelamin	64
4.1.2	Distribusi Responden Berdasarkan Umur.....	64
4.1.3	Distribusi Responden Berdasarkan Tingkat Pendidikan.....	65
4.2	Hasil Uji Model Pengukuran (<i>Outer Model</i>)	66
4.2.1	Hasil Uji Convergent Validity.....	66
4.2.2	Hasil Uji Discriminant Validity.....	74
4.2.3	Hasil Uji Reliability.....	74
4.3	Hasil Uji Inner Model (Structural).....	75
4.3.1	Hasil Uji Koefisien Determinasi (<i>R-Square</i>)	75
4.3.2	Hasil Uji Path Coefficients.....	75
4.3.3	Hasil Uji Signifikansi <i>T-Statistic</i> dan <i>P-Value</i>	76

4.3.4 Hasil Uji <i>Model Fit</i>	83
4.4 Strategi Penerapan <i>Pemeliharaan Berkelanjutan (Sustainable Maintenance)</i>	84
4.4.1 Pengolahan Data SWOT	84
4.5 Justifikasi Novelty	103
BAB V. PENUTUP	104
5.1 Kesimpulan	104
5.2 Saran	105
DAFTAR PUSTAKA	106

DAFTAR TABEL

Tabel 1. State of the Art	16
Tabel 2. Klasifikasi Aplikasi Structural Equation Modeling	40
Tabel 3. Aturan-Aturan Praktis Evaluasi Outer Model	44
Tabel 4. Model Operasional Penelitian	47
Tabel 5. Variabel Penelitian	48
Tabel 6. Indikator Aspek Teknis.....	49
Tabel 7. Indikator Aspek Ekonomi	51
Tabel 8. Indikator Aspek Lingkungan.....	53
Tabel 9. Indikator Aspek Sosial	54
Tabel 10. Indikator Aspek Sistem Informasi	55
Tabel 11. Indikator Aspek Manajemen Operasional.....	56
Tabel 12. Matriks SWOT Kearns dengan Pendekatan Kualitatif.....	58
Tabel 13. Distribusi Responden Berdasarkan Jenis Kelamin.....	64
Tabel 14. Distribusi Responden Berdasarkan Umur	65
Tabel 15. Distribusi Responden Berdasarkan Tingkat Pendidikan	65
Tabel 16. Hasil Hitung Iterasi Pertama Nilai Loading Factor	66
Tabel 17. Hasil Hitung Iterasi Kedua Nilai Loading Factor	69
Tabel 18. Hasil Hitung Nilai Cross Loading	72
Tabel 19. Hasil Hitung Nilai Average Variance Extracted (AVE).....	74
Tabel 20. Hasil Hitung Nilai Composite Reliability	74
Tabel 21. Hasil Hitung Nilai R-Square	75
Tabel 22. Hasil Hitung Nilai Path Coefficients	76
Tabel 23. Nilai Path Coefficient Hubungan Kausal Indikator terhadap Aspek Pemeliharaan Berkelanjutan.....	77
Tabel 24. Nilai Path Coefficient Hubungan Kausal Variabel terhadap Kinerja Pemeliharaan Berkelanjutan di PLTB Sidrap	80
Tabel 25. Variabel Aspek Ekonomi.....	81
Tabel 26. Variabel Aspek Lingkungan	82
Tabel 27. Variabel Aspek Sistem Informasi.....	82
Tabel 28. Variabel Aspek Manajemen Operasional	82
Tabel 29. Variabel Aspek Teknis	82
Tabel 30. Variabel Aspek Sosial	83
Tabel 31. Hasil Hitung SRMR	84
Tabel 32. Data Hasil Kuesioner dan Pemberian Rating dari Faktor Internal.....	84
Tabel 33. Data Hasil Kuesioner dan Pemberian Rating dari Faktor Eksternal.....	86
Tabel 34. Hasil Perhitungan Bobot Faktor Internal-Kekuatan	87
Tabel 35. Hasil Perhitungan Bobot Faktor Internal-Kelemahan	88
Tabel 36. Total Faktor Internal.....	89
Tabel 37. Hasil Perhitungan Bobot Faktor Eksternal-Peluang	89
Tabel 38. Hasil Perhitungan Bobot Faktor Eksternal-Ancaman	90
Tabel 39. Total Faktor Eksternal.....	91
Tabel 40. Hasil Perhitungan Matriks IFAS-Kekuatan	91
Tabel 41. Hasil Perhitungan Matriks IFAS-Kelemahan	92
Tabel 42. Total Faktor IFAS.....	92
Tabel 43. Hasil Perhitungan Matriks EFAS-Peluang	93
Tabel 44. Hasil Perhitungan Matriks EFAS-Ancaman	94
Tabel 45. Total Faktor EFAS	94

Tabel 46. Analisis SWOT Penerapan Pemeliharaan Berkelanjutan di PLTB Sidrap	96
Tabel 47. Matriks Perencanaan Kombinasi Strategi Kuantitatif Penerapan Pemeliharaan Berkelanjutan di PLTB Sidrap	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Komponen Generator Turbin Angin (PT UPC Sidrap Bayu Energi, 2015)	9
Gambar 2. State of The Art.....	36
Gambar 3. Pemeliharaan sebagai Fungsi Kinerja Berkelanjutan	38
Gambar 4. SmartPLS Versi 3.2.9	43
Gambar 5. Main Window (Software) SmartPLS versi 3.2.9.....	44
Gambar 6. Konsep Teoritis Penelitian	48
Gambar 7. Desain Penelitian	60
Gambar 8. Diagram Path Awal	61
Gambar 9. Rancangan Penelitian.....	62
Gambar 10. Bagan Alir Penelitian.....	63
Gambar 11. Diagram Distribusi Responden Berdasarkan Jenis Kelamin	64
Gambar 12. Diagram Distribusi Responden Berdasarkan Umur.....	65
Gambar 13. Diagram Distribusi Responden Berdasarkan Tingkat Pendidikan	66
Gambar 14. Grafik Hubungan Path Coeficient dengan Hubungan Kausal	79
Gambar 15. Model Fit Indikator Kinerja Pemeliharaan Berkelanjutan PLTB Sidrap	84
Gambar 16. Diagram Cartesius SWOT	95

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan *Paris Agreement* menjadi upaya penting Indonesia dalam bertransisi menuju pemanfaatan sumber energi terbarukan dengan tujuan utama mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Pemerintah telah memastikan komitmennya untuk mengurangi emisi GRK melalui adopsi teknologi rendah karbon atau dekarbonisasi di sektor energi. Langkah-langkah konkrit dalam mencapai target ini melibatkan efisiensi energi, peningkatan penggunaan energi terbarukan, dan elektrifikasi pada tahap penggunaan akhir. Sebagai contoh, pada tahun 2014, Uni Eropa telah mengadopsi rencana iklim dan energi yang bertujuan mengurangi emisi GRK sebesar minimal 40% dari tingkat emisi tahun 1990 dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan menjadi 27% dari total energi primer. Negara-negara maju juga telah mulai menetapkan target pencapaian net zero emisi paling lambat pada tahun 2050, menggambarkan keseriusan dalam menghadapi perubahan iklim (BPPT, 2021).

Indonesia sedang mengalami tahap transisi energi yang dimulai dengan peralihan dari penggunaan batubara ke gas bumi. Meskipun demikian, langkah-langkah menuju pencapaian net zero emisi untuk jangka panjang yang akan mencapai 100% pemanfaatan sumber energi terbarukan, masih merupakan tujuan yang dikejar. Ketergantungan yang tinggi pada sumber energi fosil tetap menjadi tantangan utama dalam pemenuhan kebutuhan energi nasional. Pada tahun 2019, sekitar 90,7% dari pasokan energi primer Indonesia berasal dari batubara, minyak bumi, dan gas bumi (Lambang Priandaru & Pambudi, 2019).

Penurunan produksi energi fosil, khususnya minyak bumi, dan komitmen global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca telah mendorong Pemerintah untuk terus meningkatkan peran energi baru dan terbarukan sebagai langkah krusial dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan di Indonesia pada tahun 2025 diharapkan mencapai paling tidak 23%, sementara target untuk tahun 2050 ditetapkan sebesar 31%. Potensi besar dari sumber energi baru dan terbarukan di Indonesia diharapkan dapat mendukung pencapaian target tersebut, dan pada tahun 2021, dilakukan pemutakhiran data mengenai potensi Energi Baru dan Terbarukan (KESDM Dirjen Ketenagalistrikan, 2021).

Meskipun potensi total energi terbarukan untuk pembangkit listrik mencapai 3.687 GW, hanya sekitar 0,3% atau 12,6 GW yang saat ini dimanfaatkan (Dewan Energi Nasional, 2023). Tidak optimalnya pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan dalam sektor ketenagalistrikan disebabkan oleh tingginya biaya produksi pembangkit berbasis Energi Baru dan Terbarukan, sehingga sulit bersaing dengan pembangkit

fosil, terutama yang menggunakan batubara. Faktor lain yang ikut menyulitkan adalah minimnya dukungan dari industri dalam negeri terkait komponen pembangkit energi terbarukan dan kesulitan dalam mendapatkan pendanaan dengan suku bunga rendah. Sementara itu, meningkatnya permintaan akan energi listrik menjadi kendala tambahan, mengingat pentingnya peran energi listrik dalam berbagai sektor seperti industri, komersial, dan kehidupan sehari-hari (Dewan Energi Nasional, 2022) .

Meningkatnya permintaan akan energi listrik mendorong kebutuhan pembangunan pusat-pusat pembangkit energi listrik dengan kapasitas besar dan jumlah yang memadai. Ketidakseimbangan antara pertumbuhan beban listrik dan pembangunan pusat-pusat pembangkit dapat mengakibatkan gangguan dalam penyaluran energi listrik kepada konsumen, mengancam stabilitas sistem tenaga. Permintaan yang terus-menerus dan tingkat kualitas yang tinggi untuk konsumsi energi listrik menjadi suatu kebutuhan, namun sebagian besar pembangkitan saat ini masih bergantung pada energi fosil yang tidak terbarukan. Sementara ketersediaan energi fosil semakin berkurang, pemerintah merespon dengan menggencarkan investasi untuk membangun pembangkit listrik di berbagai wilayah di Indonesia. Dalam mengatasi tantangan pemenuhan kebutuhan listrik, diperlukan adopsi sumber energi baru yang dapat memenuhi kebutuhan listrik nasional yang terus meningkat (Jamaludin et al., 2020).

EMD International, Denmark, sedang mengembangkan potensi energi angin di Indonesia dengan pendanaan dari Environmental Support Program 3 (ESP3) yang diberikan kepada Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia. Penelitian menunjukkan bahwa sumber energi angin dapat diakses di sepanjang pantai selatan Pulau Jawa, Indonesia bagian timur seperti Nusa Tenggara Timur (NTT) dan Maluku, serta sebagian wilayah selatan Pulau Sulawesi. Meskipun demikian, wilayah-wilayah di Sumatera, Kalimantan, dan Papua juga memiliki potensi energi angin yang dapat dimanfaatkan, khususnya untuk memenuhi kebutuhan listrik di pedesaan dan daerah terpencil yang masih memiliki keterbatasan akses listrik. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia, terutama di daerah yang masih membutuhkan akses yang lebih baik terhadap fasilitas listrik (Martosaputro & Murti, 2014) (Fauzy et al., 2021).

Salah satu langkah dalam memanfaatkan energi angin adalah melalui pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Proses pemanfaatan energi angin untuk menghasilkan listrik ini melibatkan dua tahap konversi energi, yaitu pertama-tama mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik melalui rotor sudu atau baling-baling, dan selanjutnya mengonversi energi mekanik tersebut menjadi energi listrik melalui penggunaan generator (Dirjen EBTKE, 2021). Sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 8398:2017, PLTB didefinisikan sebagai sistem pembangkit listrik yang terdiri dari turbin angin beserta sistem transmisi, distribusi, dan fasilitas pendukung lainnya (Direktorat Jenderal Energi Baru, 2019).

Pembangkit Listrik ini mengubah energi angin menjadi energi listrik melalui penggunaan turbin angin (Lyatkher, 2014) (Zulfikar Adytia Vernanda, 2018). Penggunaan tenaga angin sebagai sumber energi terbarukan telah meluas selama beberapa dekade terakhir. Pertumbuhan ini didorong oleh peningkatan efisiensi yang

signifikan, perkembangan manufaktur yang terstruktur, dan peningkatan reliabilitas teknologi secara keseluruhan (Dirjen Ketenagalistrikan KESDM et al., 2021). Saat ini, kapasitas tenaga angin yang terpasang di Eropa mencapai 255 GW, dengan 225 GW di darat dan 30 GW di lepas pantai. Di Uni Eropa-27, kapasitas terpasang sebesar 204 GW, terdiri dari 188 GW di darat dan 16 GW di lepas pantai (WindEurope, 2023).

Pada bulan Juli 2018, telah diresmikan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) sebagai pembangkit listrik tenaga angin skala komersial pertama dan terbesar di Indonesia. PLTB ini berlokasi di Desa Mattirotasi, Desa Lainungan, Kelurahan Lawawoi, dan Kelurahan Uluale, Kecamatan Watang Pulu, Kabupaten Sidenreng Rappang (Sidrap), Provinsi Sulawesi Selatan. Terdapat 30 menara baja kincir angin raksasa di PLTB ini, dengan tinggi masing-masing mencapai 80-meter dan panjang baling-baling 57-meter. Setiap turbin memiliki kapasitas untuk menghasilkan energi listrik sebesar 2,5 MW, sehingga kapasitas terpasang total mencapai 75 MW (KESDM, 2018).

Energi listrik yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) tersebut dialirkan ke Perusahaan Listrik Negara (PLN) melalui jaringan interkoneksi Sulawesi Selatan. Sistem jaringan ini terhubung ke saluran transmisi PLN dengan kapasitas 150 kV. PLTB ini telah terintegrasi dengan sistem kelistrikan Sulawesi Selatan sejak tahun 2020, sesuai dengan informasi yang tercantum dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2017-2026 (Dewan Energi Nasional, 2021).

Dalam memastikan kelangsungan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), diperlukan upaya pemeliharaan dan perawatan secara rutin (Johansah Liman et al., 2020). Saat ini, PLTB Sidrap beroperasi secara optimal dengan puncak produksi energi listrik terjadi pada periode April hingga Oktober. Periode November hingga Maret, produksi cenderung lebih rendah karena kecepatan angin lebih rendah. Keadaan ini dimanfaatkan untuk melakukan pemeliharaan periodik (inspeksi rutin) secara terencana atau dikenal dengan pemeliharaan preventif berbasis waktu atau berbasis kondisi (PT PLN (Persero), 2021).

Pada model berbasis waktu, operator Pembangkit Listrik Tenaga Bayu umumnya lebih fokus pada profitabilitas keseluruhan pembangkit listrik tenaga bayu daripada keandalan turbin angin secara individual, terutama karena adanya jumlah turbin yang banyak di dalam pembangkit listrik tenaga angin (Rademakers et al., 2010). Pendekatan ini berbeda dengan sistem tenaga konvensional, di mana sumber energi listrik berasal dari sumber yang tidak terbarukan dan menerapkan redundansi untuk mengurangi risiko kegagalan aset (Yildirim et al., 2016). Dengan mempertimbangkan ketergantungan antara pemeliharaan dan operasionalitas semua turbin, dapat memberikan keuntungan yang signifikan baik dalam hal profitabilitas maupun keandalan turbin.

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyajikan sebuah konsep berkelanjutan dengan merumuskan Model Pemeliharaan Berkelanjutan pada Sistem Pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap. Pendekatan ini melibatkan integrasi *Structural Equation Modeling* (SEM) dengan memanfaatkan

perangkat lunak *smartPLS*. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur indikator kunci yang relevan dalam melaksanakan pemeliharaan, dengan harapan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai interaksi dan bagaimana faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap sistem di Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap. Diharapkan, temuan dari penelitian ini akan berkontribusi pada pengembangan proses pengambilan keputusan terkait pemeliharaan PLTB.

1.2 Rumusan Masalah

Setelah menguraikan beberapa hal pada bagian latar belakang, penelitian ini merumuskan masalah untuk diteliti sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik indikator kinerja pemeliharaan berkelanjutan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.
2. Bagaimana memodelkan suatu pemeliharaan berkelanjutan yang bersifat holistik yang dapat diimplementasikan secara mudah terutama pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.
3. Bagaimana strategi yang tepat dalam implementasi model pemeliharaan berkelanjutan di Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan di atas, maka dapat disimpulkan tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik model pemeliharaan berkelanjutan di Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.
2. Mendesain model usul pemeliharaan berkelanjutan secara mudah terutama pada pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.
3. Merumuskan strategi yang tepat dalam implementasi model pemeliharaan berkelanjutan di Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.

1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian ini, dibatasi pada beberapa hal.

1. Pengambilan data dilakukan secara khusus di lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap
2. Objek penelitian ini secara khusus pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.
3. Mengkaji dengan pendekatan pemeliharaan berkelanjutan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam sisi teoretis dan praktis. Adapun rincian manfaat yang diharapkan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah penelitian dan tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai pedoman dan pendekatan teknis operasional untuk melakukan agenda pemeliharaan terencana.
2. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan model indikator pemeliharaan terencana.
3. Dapat memberikan masukan bagi para stakeholder (pemangku kepentingan) mengenai peran dan kontribusi selaku penyedia jasa dalam pelaksanaan pemeliharaan.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tesis ini, sistematika penulisannya adalah sebagai berikut:

Bab I. Pendahuluan; bab ini berisikan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian, manfaat penelitian, sistematika penulisan dan kebaruan penelitian.

Bab II. Tinjauan Pustaka; bab ini meliputi dasar teori, kajian hasil penelitian sebelumnya dari beberapa sumber bacaan serta berisi langkah-langkah atau metode yang akan dipakai dalam penelitian.

Bab III. Metode Penelitian; bab ini membahas metode pengumpulan data-data yang diperlukan baik data primer maupun data sekunder dan metode pemecahan permasalahan dengan menyusun langkah-langkah guna memecahkan permasalahan dengan teori yang ada.

Bab IV. Hasil dan Pembahasan; bab ini berisikan pembahasan hasil analisis secara detail dan memberikan gambaran mengenai kondisi saat ini dari pokok permasalahan yang ada

Bab V. Kesimpulan dan Saran; bab ini berisikan kesimpulan berdasarkan analisis data, hasil dan bukti yang disajikan sebelumnya, kemudian menjadi dasar untuk menyusun suatu saran sebagai suatu usulan yang berhubungan dengan analisis yang telah dilakukan.

1.7 Keterbaruan/Novelty

Keterbaruan atau novelty dari penelitian ini adalah desain model dan strategi penerapan pemeliharaan berkelanjutan sebagai bagian "*Sustainable Energy*" sehingga dapat diimplementasikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Pemeliharaan merupakan bagian terbesar dari upaya, biaya, dan risiko operasional dan perawatan. Kegiatan pemeliharaan adalah perawatan dan perbaikan fisik dan sistem. Pemeliharaan ini terbagi menjadi pemeliharaan preventif dan pemeliharaan korektif. Pemeliharaan preventif mencakup perbaikan proaktif, atau penggantian komponen yang sudah aus berdasarkan pemeriksaan rutin atau informasi dari sistem pemantauan kondisi, mencakup survei dan inspeksi rutin. Pemeliharaan korektif mencakup perbaikan reaktif atau penggantian komponen yang gagal atau rusak (Scottish Enterprise & The Crown Estate, 2013).

Pengalaman operasi yang minim di bidang energi angin dan biaya besar yang terkait dengan pemeliharaan ladang angin, berdampak pada kebutuhan untuk mengembangkan model operasi dan pemeliharaan yang akurat untuk tujuan perencanaan strategis. Memverifikasi model simulasi dan mendemonstrasikannya serta menjelaskan proses verifikasi dalam berbagai model. (Dinwoodie et al., 2015).

Dalam melakukan perencanaan pemeliharaan, sangat penting untuk mempertimbangkan variasi musiman dalam kondisi angin tertentu di suatu lokasi, baik variasi angin harian maupun per jamnya. Dengan demikian, proses pemilihan turbin angin pada suatu lokasi, perlu memahami kondisi turbulen jangka pendek dalam skala waktu per detik untuk memastikan bahwa mesin akan bertahan tingkatan tertentu selama masa pakainya (Watson, 2023).

Industri tenaga angin telah mengalami pertumbuhan besar dalam beberapa tahun terakhir. Pertumbuhan terutama berfokus pada kondisi ekonomi, pengembangan turbin angin skala besar dan turbin angin lepas pantai. Dalam industri tenaga angin, manajemen pemeliharaan yang paling umum adalah Sistem Pemantauan Kondisi (CMS). Sistem ini digunakan untuk mendapatkan pemantauan secara konstan dari setiap kondisi dengan menggunakan teknologi canggih untuk memantau kondisi komponen dan memprediksi kegagalan. Teknik yang digunakan dalam sistem ini berupa analisis getaran dan metode analisis oli. CMS banyak digunakan dalam sistem energi lain seperti tenaga air dan nuklir (Nilsson, 2006).

Jumlah total turbin angin yang beroperasi di setiap periode produksi berkembang dari periode ke periode lainnya sesuai dengan permintaan dan tingkat layanan yang diperlukan. Selain itu, turbin angin mengalami kegagalan serta laju degradasi yang dipengaruhi oleh fluktuasi produksi energi. Akibatnya, tingkat kegagalan masing-masing turbin angin meningkat seiring dengan waktu dan jumlah energi yang dihasilkan. Perlunya optimalisasi pemeliharaan terpadu dan pengelolaan suku cadang dari sistem turbin angin dengan meminimalkan biaya pemeliharaan dan pengelolaan suku cadang secara bersamaan (Abderrahmane et al., 2022).

Informasi dari pemberi getaran dikumpulkan oleh unit di nacelle, kemudian dikirim ke unit kerja computer berupa informasi tentang batas getaran bantalan dan

konten frekuensi melalui Internet. Teknik ini digunakan untuk memeriksa komposisi kimia unsur serta konsentrasi pada masing-masing elemen yang terdeteksi. Unsur-unsur utama yang ada dalam sampel dihasilkan dari keausan komponen logam besi dan non-besi, masuknya bahan asing seperti debu dan pelumas dengan aditif yang terkait. Ukuran partikel sisa aus yang terkandung dalam sampel pelumas seringkali menentukan jenis teknik spektrometri yang digunakan (Nilsson, 2006).

Ladang angin yang membentang 5–10 km, diperlukan suatu model yang menangani gelombang tunggal dan ganda serta interaksi ladang angin dengan lapisan batas atmosfer, model yang menangani susunan geometri turbin angin dan jarak yang sama antar unit di setiap baris dan jarak yang sama antar baris (Frandsen et al., 2006).

Fakta bahwa gearbox memiliki tingkat kegagalan dan waktu perbaikan yang tinggi menunjukkan bahwa gearbox menjadi salah satu kontributor terbesar untuk keseluruhan biaya O&M (Castellà, 2020). Gearbox dipantau melalui suhunya. Setelah mencapai tingkat ambang yang telah ditentukan, laju produksi dikurangi secara drastis dengan memperlambat turbin angin sambil mendinginkan gearbox untuk jangka waktu tertentu sebelum memulihkan laju keluaran yang diinginkan. Metode analitik dan numerik dikembangkan untuk mengoptimalkan periode pembaruan gearbox dengan mempertimbangkan keseimbangan antara biaya kehilangan produksi dan pendinginan setiap kali temperatur ambang tercapai, dan biaya pembaruan (Aafif et al., 2022).

Beberapa perusahaan telah melakukan kegiatan yang mengarah pada standar berkelanjutan dengan melakukan desain *Sustainable Lean Maintenance* berdasarkan indikator pilar ekonomi, lingkungan dan sosial. Kemudian dilanjutkan dengan membuat *Current Sustainability Maintenance Value Stream Mapping* (Current Sust-MVSM) dan melakukan waste analysis. Pemborosan yang terjadi adalah pemborosan waktu tunggu antar kegiatan pemeliharaan yang terjadi karena keterlambatan operator dalam memperbaiki mesin dan keterlambatan mencari mekanik dan alat yang dibutuhkan. Selain itu, terdapat pemborosan dalam kegiatan pemeliharaan karena kelebihan kegiatan pemeriksaan. Analisis dilakukan dalam penerapan metode 5S (seiri, seiton, seiso, seiketsu, shitsuke) atau 5R (Ringkas, Rapi, Resik, Rawat, dan Rajin) yang merupakan lima langkah penataan dan pemeliharaan (Marie et al., 2020) (Nugraha et al., 2015).

Ladang angin cenderung menghasilkan peningkatan jumlah energi. Untuk mencapai target tersebut, banyak ladang angin dioperasikan dengan desain tata letak dengan banyak turbin yang ditempatkan berdekatan satu sama lain di area terbatas menyebabkan hilangnya energi yang besar karena 'efek bangun'. Termasuk munculnya kendala lain seperti topologi, faktor kapasitas minimum, jarak antar turbin, kebisingan, dll. Metode yang digunakan untuk memecahkan masalah ini dengan metodologi pengoptimalan hibrid untuk menentukan jumlah total turbin yang optimal yang akan ditempatkan di ladang angin secara optimal. Metode ini merupakan kombinasi dari algoritma genetik probabilistik dan metode optimasi berbasis gradien deterministik. Penerapan metode ini menghasilkan *Annual Energy Production* (AEP) yang lebih tinggi dari sebelumnya (Mittal et al., 2016).

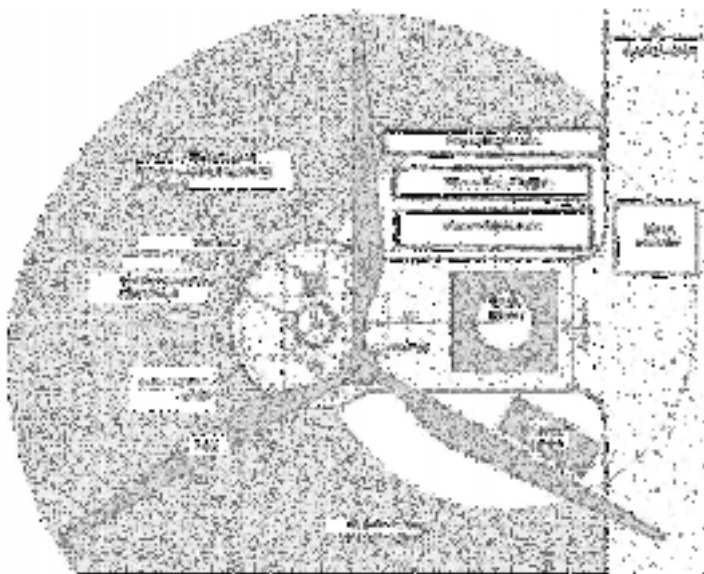
Dalam menjaga turbin angin tetap beroperasi, dilakukan pemeliharaan secara preventif dan korektif. Pemeliharaan preventif berbasis waktu atau berbasis kondisi. Pemeliharaan berbasis waktu jauh lebih mudah direncanakan daripada pemeliharaan berbasis kondisi yang biasanya tidak dapat diprediksi. Kedua jenis pemeliharaan tersebut memerlukan persiapan dan penghentian turbin angin yang mengakibatkan kerugian produksi. Tingkat kehilangan produksi sangat bergantung pada kecepatan angin yang bervariasi sepanjang tahun. Model Komponen Tunggal untuk optimalisasi pemeliharaan dengan biaya bervariasi terhadap waktu berupa kebijakan penggantian usia standar (ARP), kebijakan penggantian blok (BRP), dan kebijakan penggantian blok yang dimodifikasi (MBRP) untuk mengatasi biaya yang bervariasi waktu telah menunjukkan penghematan hingga 23% (Schouten et al., 2022).

Konsep Eco-Maintenance dilakukan untuk memperpanjang masa pakai sistem demi mempertahankan sekaligus meminimalkan kerugian lingkungan akibat pemeliharaan. Konsep ini dikembangkan untuk Sistem Produksi Energi Terbarukan (REPS) seperti Turbin Angin atau Panel Fotovoltaik. REPS menghasilkan energi yang bersih dan berkelanjutan. Namun produksi energi ini tidak dapat diprediksi karena bergantung pada cuaca. Pentingnya merancang dan mengoptimalkan pemeliharaan Sistem Produksi Energi Terbarukan (REPS) untuk mengurangi biaya dan masalah lingkungan (Tchertchian et al., 2016), termasuk memperpanjang lifetime dari inverter dan baterai menjadi salah satu solusi sekaligus menurunkan potensi dampak lingkungan (Rifka Sofianita, 2019).

Meskipun demikian, mengingat infrastruktur Indonesia yang terbatas untuk proyek angin saat ini, penelitian di masa yang akan datang harus merancang serta mengoptimalkan strategi Operation and Maintenance dengan mempertimbangkan peningkatan infrastruktur. Potensi ekonomi hampir tidak berubah dengan berbagai ketinggian hub karena efek penetralan dari produksi listrik dan biaya Menara (Langer et al., 2022).

Turbin dengan *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) memiliki biaya operasional dan pemeliharaan per megawat jam lebih tinggi daripada turbin dengan *Permanent Magnet Generator* (PMG). Tipe turbin penggerak langsung dengan PMG memiliki kinerja terbaik serta biaya operasional dan pemeliharaan yang rendah (Carroll et al., 2017).

Pengurangan biaya operasional dan pemeliharaan (O&M) dan peningkatan keandalan telah menjadi prioritas utama dalam strategi pemeliharaan turbin angin. Biaya operasional dan pemeliharaan biasanya mencapai 20% hingga 25% dari total *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) dari sistem tenaga angin saat ini. LCOE pada proyek angin darat mengalami penurunan sebesar 45%, sedangkan pada proyek lepas pantai mengalami penurunan sebesar 28%. Biaya O&M proyek angin darat turun 52%, sementara dalam kasus proyek lepas pantai turun menjadi 45% (Costa et al., 2021) (Dewan & Stehly, 2017).



Gambar 1. Komponen Generator Turbin Angin (PT UPC Sidrap Bayu Energi, 2015)

Simlox merupakan alat simulasi berbasis peristiwa stokhastik berdasarkan teknik Monte Carlo. Alat ini menganalisis kinerja sistem dari waktu ke waktu yang biasanya digunakan untuk menganalisis pengaruh sumber daya pemeliharaan yang terbatas pada kemampuan memenuhi profil operasional yang diminta untuk menentukan solusi desain yang paling hemat biaya. Simlox adalah alat yang ideal untuk menemukan hambatan dan titik lemah dalam organisasi pendukung selama fase operasional (Hersenius & Möller, 2011).

Menetapkan strategi pemeliharaan terbaik menjadi masalah optimisasi yang rumit dengan beberapa tujuan dan fungsi kendala. Masalah optimasi multi-objektif didefinisikan dan diselesaikan untuk studi kasus nyata dengan menggunakan Algoritma Genetika dan *Particle Swarm Optimization* untuk meminimalkan biaya operasional dan memaksimalkan kinerja turbin angin. Hasil kedua algoritma dibandingkan dengan mempertimbangkan beberapa skenario dalam studi kasus nyata. Kinerja *Particle Swarm Optimization* menunjukkan hasil yang lebih baik untuk mencapai biaya optimal, dan biaya komputasi yang lebih sedikit untuk menyelesaikannya. Selanjutnya, pengaruh parameter model dipelajari dengan melakukan studi sensitivitas, yang menunjukkan pentingnya pemeliharaan preventif dan pengurangan tugas pemeliharaan korektif (Peinado Gonzalo et al., 2022).

Pemeliharaan merupakan tindakan potensial yang dapat mengurangi biaya energi yang dihasilkan oleh ladang angin, dengan melakukan penjadwalan pemeliharaan yang efisien. Penjadwalan merupakan masalah optimasi non-linear dengan kompleksitas tinggi. Algoritma heuristik, *Ant Colony Optimization* (ACO), yang dimodifikasi menjadi multi-ACO menemukan penjadwalan dan perutean armada pemeliharaan yang optimal, metodologi ini cukup efektif dan kuat untuk menemukan solusi optimal (Z. Zhang, 2018).

Kombinasi antara teknologi informasi dan konsep manajemen pada platform informasi operasi dan pemeliharaan tenaga angin. Operasi dan pemeliharaan cerdas yang terpusat dengan jangkauan jarak jauh untuk meningkatkan efisiensi serta mengurangi biaya. Melalui karakteristik teknologi 5G dalam melakukan pemeliharaan yang mampu memberikan solusi baru operasi dan pemeliharaan ladang angin (Z. Wang et al., 2022).

Sebuah strategi pemeliharaan mencakup seperangkat kebijakan dan tindakan yang digunakan untuk mempertahankan dan atau mengembalikan peralatan serta sistem pendukung keputusan di mana kegiatan pemeliharaan direncanakan, atau dapat memilih strategi pemeliharaan yang sesuai dengan karakteristik peralatannya, atau meningkatkan strategi pemeliharaan yang ada berdasarkan kebutuhan aktual (Zhao et al., 2022).

Manajemen pemeliharaan yang inferior menyebabkan dampak ekonomi, lingkungan, dan sosial yang tidak dapat diabaikan serta hambatan terhadap paradigma berkelanjutan. Beberapa pemangku kepentingan perusahaan produksi menunjukkan rendahnya tingkat kesadaran para pemangku kepentingan akan dampak pemeliharaan terhadap keberlanjutan. Pemangku kepentingan pemeliharaan terutama berfokus pada faktor teknis dan ekonomi, sedangkan pemangku kepentingan lingkungan, kualitas dan keselamatan kesadaran akan dampak pemeliharaan terhadap faktor lingkungan dan sosial menjadi lebih baik. Namun, meski kedua kelompok ini membutuhkan panduan untuk menentukan indikator keberlanjutan untuk menilai dampak tersebut (Franciosi et al., 2020). Disamping memberikan dampak yang positif bagi pelaku usaha, Pemerintah Daerah, terlebih masyarakat setempat (Wafik, 2023).

Salah satu bidang penelitian penting dalam optimasi pemeliharaan adalah studi tentang berbagai kebijakan pemeliharaan yang digunakan untuk meningkatkan ketersediaan sistem. Ada banyak cara yang mungkin untuk mengklasifikasikan praktik pemeliharaan energi angin saat ini. Beberapa teknik dan strategi pemeliharaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

2.1.1 Operation Research Model (ORM)

Model ini terdiri atas Integer Programming (IP) yang merupakan pemrograman bilangan bulat mengasumsikan bahwa variabel keputusan hanya mengambil nilai bilangan bulat, disebut Mixed-Integer Programming (MIP) karena melibatkan variabel keputusan integer dan continuous seperti model MIP untuk mengoptimalkan manajemen pemeliharaan ladang angin berdasarkan fungsi biaya linier termasuk biaya pemeliharaan dan kerugian produksi (Nilsson, 2009), Non-Linier Programming (NLP) adalah metode pemecahan masalah yang melibatkan fungsi nonlinier, Dynamic Programming (DP) untuk memecahkan masalah dengan memecahnya menjadi sub-masalah agar menjadi lebih sederhana (Byon, 2013). Studi lebih lanjut mengenai Model Riset Operasi lihat (Ding, 2010) (Amayri et al., 2011), (Kovács et al., 2011), (Hameed & Vatn, 2012), (Bharadwaj et al., 2012), (Benmessaoud et al.,

2013), (Fathi Aghdam & Liao, 2014), (Stålthane et al., 2015), (Molina Gómez et al., 2022), (Pérez-Rúa et al., 2023).

2.1.2 Stochastic Model

Model ini mengidentifikasi faktor acak untuk memprediksi kondisi sistem dan parameter lainnya yang mempengaruhi beban kelelahan pada turbin angin, sekaligus menentukan kebijakan pemeliharaan yang optimal untuk turbin angin. (Veldkamp, 2008), (Carlos et al., 2013), (P. Zhang et al., 2014), (Gundegjerde et al., 2015), (Kerres et al., 2015), (H. Su et al., 2023).

2.1.3 Markov Model

Model Markov digunakan untuk memantau kondisi sistem turbin angin dan memodelkan kerusakan suatu sistem serta mengevaluasi dampak pemeliharaan terhadap komponen turbin angin pada waktu henti, sekaligus mendeteksi risiko kegagalan untuk meminimalkan biaya pemeliharaan. Model ini terbagi atas discrete/continuous Markov model, semi-Markov dan hidden Markov. (Flory, 2000), (SU, 2012), (Besnard, Fischer, et al., 2013), (D'Amico et al., 2013), (Besnard, Chalmers tekniska högskola, et al., 2013), (Kumudu Abeygunawardane, 2013), (Dawid et al., 2015), (Świdorski et al., 2020), (Itkin, 2023).

2.1.4 Petri Net Model (Model Jaring Petri)

Pendekatan matematis yang digunakan untuk menggambarkan dan menganalisis sistem yang melibatkan keadaan, perubahan keadaan, dan interaksi antara berbagai elemen dalam sistem. Mendeskripsikan struktur, fungsi, dan pengoperasian sistem pitch hidrolik dengan bahasa grafik untuk mendiagnosa kesalahan dan mengevaluasi keandalan turbin angin. Mengoptimalkan pemeliharaan turbin angin dengan tiga jenis tindakan yaitu; periodik, kondisional, korektif serta kondisi cuaca untuk menentukan aksesibilitas turbin. (Duggan, 2006), (Yang et al., 2011), (dos Santos et al., 2013), (Leigh & Dunnett, 2016), (Santos et al., 2019), (Yan & Dunnett, 2021), (Lotovsky et al., 2022), (Saleh et al., 2023).

2.1.5 Analytical Model

Model yang menggunakan pendekatan analisis data dan teknologi untuk mengelola dan merawat turbin angin. Model ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi downtime, dan mencegah kegagalan aset dengan memanfaatkan data dan analisis prediktif. (Mensah & Dueñas-Osorio, 2012), (El-Thalji & Liyanage, 2012), (Yildirim et al., 2017), (Ali et al., 2023).

2.1.6 Simulation Models

Model ini merupakan representasi matematis atau teknik komputasi kuantitatif paling fleksibel yang dapat digunakan untuk menganalisis keandalan sistem yang kompleks. Mampu memperhitungkan semua ketidakpastian yang ada di bidang O&M ladang angin serta mengeksplorasi kelayakan strategi pemeliharaan baru. (Netland

et al., 2014), (Y. Li et al., 2014), (Dalgic et al., 2015), (Dinwoodie et al., 2015), (Welte et al., 2017), (Dao et al., 2021), (Van Der Laan et al., 2023).

2.1.7 Bayesian Networks Model

Model ini merupakan model statistik dan grafis yang digunakan untuk merepresentasikan hubungan probabilistik antara berbagai variabel acak dalam bentuk grafik berarah untuk mendiagnosa kegagalan dan mengoptimalkan pemeliharaan turbin angin. (Rangel-Ramirez & Sørensen, 2008), (Sønderkær Nielsen, 2013), (Florian & Sørensen, 2015) (Florian & Sørensen, 2017), (Asgarpour & Sorensen, 2018), (Hlaing et al., 2023), (Bempedelis & Magri, 2023).

2.1.8 Fuzzy Models

Pendekatan matematis yang digunakan untuk mengatasi ketidakpastian dalam pemodelan dan pengambilan keputusan, terutama dalam pemantauan kondisi dan diagnosis kesalahan turbin angin. (Dinmohammadi & Shafiee, 2013), (Cross & Ma, 2015), (Amrina et al., 2019), (Zarte et al., 2018), (Olugu et al., 2021), (Taghvaei et al., 2022), (Bounar et al., 2023).

2.1.9 Data Mining Model

Mengekstraksi data dan membangun model untuk mengetahui bagaimana perubahan dalam satu atau beberapa variabel yang mempengaruhi kinerja sistem. Menggabungkan data dari berbagai sumber dan mengumpulkan informasi dalam mengoptimalkan strategi pemeliharaan turbin angin serta merancang sistem pemantauan kondisi untuk turbin angin., (Kusiak & Verma, 2011), (Verma & Kusiak, 2012), (Ouyang et al., 2017), (Santolamazza et al., 2021), (W. Wang & Cai, 2023).

2.1.10 Intelligent Based

Berperan penting dalam prediksi sisa umur sistem dan merupakan salah satu faktor kunci keberhasilan dalam penerapan sistem pemantauan kondisi untuk ladang angin. Umumnya melibatkan pengembangan algoritma penalaran yang kuat dan teknik prediksi seperti machine learning (ML), Neural Network (NN), Artificial Intelligence (AI), dan Expert Systems (ES). (Tian, Ding, et al., 2011), (Kremers et al., 2011) (Hameed & Wang, 2012), (Schlechtingen et al., 2013) (Hameed & Wang, 2013), (Pattison et al., 2016) (Dumitru & Gligor, 2017), (Lin & Liu, 2020), (Elyasichamazkoti & Khajehpoor, 2021), (Masoumi, 2023), (Granados et al., 2023).

2.1.11 Multiple Objective Model (Model multi-tujuan)

Model ini dikenal juga sebagai Multiple Objective Optimization (MOO), adalah pendekatan matematis yang digunakan untuk mengatasi situasi dimana ada lebih dari satu tujuan yang perlu dicapai dalam sebuah masalah atau keputusan. Dalam situasi seperti itu, terdapat serangkaian tujuan yang seringkali saling bertentangan atau konflik satu sama lain untuk menentukan ukuran peralatan, penempatan, dan jadwal pemeliharaan dari sistem pembangkit sehingga biaya sistem diminimalkan dan keandalannya dimaksimalkan. (Hilber, 2008), (K. Wang et al., 2013), (Jin et al.,

2013), (Réthoré et al., 2014), (Jin et al., 2015), (Rokni Nakhi & Ahmadi Kamarposhti, 2020), (J. Li & Zhao, 2021), (Pourrajabian et al., 2023).

2.1.12 Overhaul

Proses perbaikan yang ekstensif secara signifikan dan komprehensif yang melibatkan pembongkaran, desain ulang, pembersihan, perbaikan, penggantian komponen yang signifikan, untuk memulihkan atau meningkatkan fungsi, kinerja, atau keandalan sistem pembangkit listrik. Meskipun itu tidak dapat dianggap sebagai pendekatan jangka panjang, umumnya perbaikan turbin angin menelan biaya hampir 20% dari investasi awal. (Dewan & Stehly, 2017) (Shafiee & Sørensen, 2019), (Costa et al., 2021).

2.1.13 Corrective

Tindakan perbaikan yang dilakukan setelah terjadi kegagalan turbin angin atau penurunan produksi. Perbaikan dan pemeliharaan yang tidak direncanakan pada turbin angin merupakan bagian yang signifikan dari biaya O&M tahunan. Lebih cocok untuk ladang angin kecil di darat dengan beberapa turbin angin, atau untuk turbin angin lepas pantai yang terletak dekat dengan pantai di perairan dangkal. (Kühn & Instituut voor Windenergie (Delft), 1998), (Kühn et al., 1999), (Verbruggen et al., 2002), (Tian & Zhang, 2022) (Peng et al., 2023).

2.1.14 Periodic (Inspeksi Rutin)

Sebagian besar ladang angin menjalani pemeriksaan rutin harian selama operasi, pemeriksaan besar setiap dua hingga tiga minggu. Beberapa cacat seperti kebocoran dan korosi dapat dideteksi melalui inspeksi visual. Namun, deteksi banyak kesalahan seperti retakan permukaan pada sudu, korsleting listrik pada generator, dan panas berlebih pada kotak roda gigi memerlukan penggunaan metode pemeriksaan yang lebih canggih seperti pengujian non-destruktif (NDT). (Shafiee & Sørensen, 2019), (García Márquez & Peco Chacón, 2020), (Dimitrova et al., 2022), (E. Singh et al., 2023), (Yu et al., 2023), (Petersen et al., 2023).

2.1.15 Performance-based (Time based, Age based, Use based)

Pendekatan dalam manajemen pemeliharaan di mana pemeliharaan turbin angin didasarkan pada kinerja aktual dan kondisi peralatan, pendekatan biasa juga disebut periodic maintenance berbasis waktu, usia, dan penggunaan. (Andrawus et al., 2008), (Deng et al., 2011), (Karyotakis, 2011), (Igba et al., 2015), (Yu et al., 2023).

2.1.16 Failure-Limit Policy

Kebijakan pemeliharaan failure-limit merupakan kebijakan yang bergantung pada angka di mana keputusan pemeliharaan dibuat berdasarkan jumlah kegagalan sistem. Misalnya, kru pemeliharaan dikirim ke ladang angin untuk melakukan perbaikan atau penggantian ketika jumlah turbin angin yang gagal mencapai jumlah yang telah ditentukan sebelumnya. (Tian, Jin, et al., 2011), (Shafiee et al., 2013), (Ding, 2010).

2.1.17 Reliability Centered Maintenance (RCM)

Metodologi dan pendekatan sistematis yang digunakan dalam manajemen pemeliharaan untuk memastikan bahwa pemeliharaan turbin angin dilakukan dengan benar dan efisien. Meningkatkan keandalan, mencegah tingkat keandalannya turun di bawah nilai tertentu serta mengoptimalkan biaya pemeliharaan. RCM biasanya diterapkan pada komponen/sub sistem kritis yang kegagalannya dapat mengakibatkan kegagalan yang parah atau kehilangan produksi daya yang tinggi (Andrawus et al., 2006), (Fischer et al., 2012), (Igba et al., 2013), (Gonzalez Sainz & Sebastián, 2014), (McMillan & Ault, 2014), (S. Singh et al., 2015), (Aafif et al., 2022).

2.1.18 Pemeliharaan Berbasis Kondisi (CBM)

Strategi pemeliharaan yang didasarkan pada pemantauan terus-menerus terhadap kondisi fisik atau kinerja turbin angin. Tujuannya adalah untuk melakukan perawatan hanya ketika ada indikasi bahwa peralatan memerlukan pemeliharaan, berbeda dengan prediktif atau preventive maintenance yang dilakukan secara berkala terlepas dari kondisi aktual peralatan. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan untuk mengoptimalkan biaya pemeliharaan, menghindari perawatan yang tidak perlu, dan memaksimalkan kinerja peralatan serta menentukan tugas perawatan yang diperlukan. (Nilsson & Bertling, 2007), (McMillan & Ault, 2007), (McMillan & Ault, 2008), (Wiggelinkhuizen et al., 2008), (Van Horenbeek et al., 2013), (Haddad et al., 2014), (May et al., 2015), (J. Wang et al., 2021), (Toftaker et al., 2022).

2.1.19 Pemeliharaan prediktif (PdM)

Strategi pemeliharaan yang memanfaatkan teknologi pemantauan dan analisis data untuk memprediksi kapan peralatan atau sistem akan mengalami kegagalan atau memerlukan perawatan. Tujuan utama dari predictive maintenance adalah untuk mengidentifikasi masalah atau potensi kegagalan sebelum terjadi, sehingga perawatan pada turbin angin dapat dilakukan pada waktu yang paling tepat, menghindari gangguan operasional, dan mengoptimalkan biaya pemeliharaan. Strategi ini mencakup penggunaan pengukuran modern dan metode pemrosesan sinyal untuk memprediksi dan mendiagnosis kondisi sistem secara akurat selama operasi. PdM sering disebut sebagai CBM dalam industri energi angin. (Kusiak & Verma, 2011), (Tracht et al., 2013), (Van Horenbeek, 2013), (Ren et al., 2021), (Tian & Zhang, 2022), (Vidal et al., 2023).

2.1.20 Pemeliharaan Berbasis Risiko (RBM)

Pendekatan dalam manajemen pemeliharaan yang berfokus pada penilaian dan pengelolaan risiko yang terkait dengan kegagalan peralatan atau sistem. Dalam strategi pemeliharaan ini, pemeliharaan diarahkan pada komponen atau peralatan yang memiliki risiko kegagalan tinggi, yang memiliki dampak yang signifikan terhadap operasi, keselamatan, atau lingkungan. bertujuan untuk mengurangi risiko keseluruhan yang terkait dengan kegagalan tak terduga dari turbin angin. (Rangel-Ramirez & Sørensen, 2008), (Deng et al., 2011), (Rangel-Ramírez & Sørensen, 2012), (de Andrade Vieira & Sanz-Bobi, 2013), (Nielsen & Sørensen, 2014), (Florian

& Sørensen, 2015), (Sinha & Steel, 2015), (Gintautas et al., 2016), (Yeter et al., 2020).

2.1.21 Group dan Opprtunistic Maintenance

Pendekatan pemeliharaan yang melibatkan perbaikan peralatan atau sistem hanya ketika ada kesempatan atau ketika peralatan tersebut sedang dalam kondisi rusak atau tidak berfungsi dengan baik. Ini adalah tipe pemeliharaan yang umumnya bersifat reaktif, di mana tindakan dilakukan sebagai tanggapan terhadap kegagalan atau masalah yang terjadi secara acak, tanpa jadwal pemeliharaan terencana. Pemeliharaan ini biasa juga dilakukan dalam bentuk grup yang mirip atau serupa. Pendekatan ini sering digunakan untuk mengoptimalkan sumber daya, efisiensi, dan koordinasi dalam pengelolaan dan pemeliharaan aset yang serupa. (Sangroudi, 2018), (H. Li et al., 2018), (Izquierdo et al., 2019), (Xie et al., 2019), (M. Li et al., 2020), (Xia et al., 2021), (C. Su & Wu, 2023).

2.2 State of The Art

State of the Art merupakan suatu ungkapan yang menggambarkan teknologi, metode, atau pendekatan dalam suatu bidang pada saat ini. Tidak hanya terbatas pada teknologi, tetapi juga dapat merujuk pada praktek, metode, atau teknik. Konsep ini bersifat dinamis dan terus berubah seiring dengan perkembangan dalam berbagai bidang. Dengan memahami, menghargai, dan menerapkan konsep ini, kita dapat memastikan bahwa penelitian kita tidak hanya relevan, tetapi juga berkontribusi pada perkembangan dan inovasi di masa depan. Untuk mengetahui perkembangan ilmu pada topik atau bidang yang diteliti, state of the art pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1 dan gambar 2 berikut.

Tabel 1. State of the Art

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
1	Faranak Fathi Aghdam & Haitao Liao.	Prognostics-Based Two-Operator Competition in Proactive Replacement and Service Parts Procurement. https://doi.org/10.1080/0013791X.2014.940563	The Engineering Economist	Mengkoordinasikan ketersediaan suku cadang dengan pemeliharaan terjadwal.	Penerapan Model operasi numerik untuk operasi turbin angin dalam pengambilan keputusan dalam memecahkan masalah logistik pemeliharaan.	Memberikan acuan aspek manajemen operasional sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
2	Magnus Stalhane, Lars Magnus Hvattum, Vidar Skaar.	Optimization of routing and scheduling of vessels to perform maintenance at offshore wind farms. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.411	Energy Procedia Volume 80, 2015, Pages 92-99	Mengidentifikasi rute dan jadwal dalam melakukan operasi pemeliharaan di ladang angin.	Model operasi matematika dalam meningkatkan efisiensi operasi pemeliharaan, dan mengurangi biaya energi.	Memberikan acuan aspek teknis dan manajemen operasional sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
3	Andrea Molina G´omez, Kateryna Morozovska, Tor Laneryd,	Optimal sizing of the wind farm and wind farm transformer using MILP and dynamic transformer rating.	Electrical Power and Energy Systems 136	Mengidentifikasi efisiensi transformator saat beban dan cuaca berubah secara terus menerus.	Model riset operasi dengan menerapkan dynamic transformer rating (DTR) sebagai input pada Mixed-	Memberikan referensi aspek teknis indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Patrik Hilber.	https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107645	(2022) 107645		Integer Linear Programming (MILP).		
4	Juan-Andrés Pérez-Rúa, Mathias Stolpe, and Nicolaos Antonio Cutululis.	A neighborhood search integer programming approach for wind farm layout optimization. DOI: 10.5194/wes-2022-82	Wind Energy Science, 8, 1453–1473, 2023.	Menganalisis pendekatan pemrograman bilangan bulat dalam melakukan optimasi tata letak ladang angin.	Model Algoritma heuristik optimasi tata letak ladang angin dengan formulasi pemrograman bilangan bulat linier.	Memberikan referensi aspek lingkungan dan teknis sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
5	Hongshe ng Su, Xuping Duan, Dantong Wang.	Optimization of periodic maintenance for wind turbines based on stochastic degradation model. DOI: 10.24425/aee.2021.137575	Archives of Electrical Engineering Vol. 70(3), pp. 585 –599 (2021) Archives Of Electrical Engineering Vol.70 (3), pp.585 –	Menganalisis biaya perawatan turbin angin yang tinggi. Pemeliharaan turbin angin yang dilakukan secara rutin dapat dengan mudah menyebabkan pemeliharaan yang berlebihan dan tidak efisien.	Model degradasi stokastik (SDE, stochastic differential equation) diusulkan untuk mensimulasikan perubahan kondisi turbin angin.	Memberikan referensi aspek ekonomi sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
			599 (2021).				
6	Andrzej Świdorski, Anna Borucka, Małgorzata Grzelak and Leszek Gil.	Evaluation of Machinery Readiness Using Semi-Markov Processes. https://doi.org/10.3390/app10041541	Applied Sciences 2020, 10(4), 1541	Menganalisis perbandingan proses distribusi non-parametrik bentuk eksponensial dalam masalah proses optimasi.	Model Markov dan semi-Markov diusulkan dalam kesiapan dan keandalan untuk mengevaluai elemen-elemen individual maupun keseluruhan sistem.	Memberikan referensi aspek teknis dalam indikator pemerliiharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
7	Rundong Yan and Sarah Dunnett.	Improving the Strategy of Maintaining Offshore Wind Turbines through Petri Net Modelling. https://doi.org/10.3390/app11020574	Applied Sciences 2021, 11(2), 574.	Menganalisis pemeliharaan berkala untuk memastikan turbin angin dioperasikan secara ekonomis, memungkinkan pemanfaatan sumber daya pemeliharaan yang efisien.	Model pemeliharaan turbin angin berbasis Petri net (PN) diusulkan dalam melakukan pemeliharaan berkala.	Memberikan referensi aspek teknis sebagai indikator pemerliiharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
8	Eduard Lotovsky, Angelo P. Teixeira	Availability Analysis of an Offshore Wind Turbine Subjected to AgeBased	<i>Journal of Marine Science and Engineeri</i>	Menganalisis ketersediaan produksi dan biaya perawatan turbin angin	Model Petri Nets dengan Simulasi Monte Carlo. Diimplementasikan dalam	Memberikan acuan referensi aspek teknis dan ekonomi sebagai indikator	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	and C. Guedes Soares.	Preventive Maintenance by Petri Nets. https://doi.org/10.3390/jmse10071000	ng 2022, 10 (7), 1000.	dengan konfigurasi sumbu horisontal.	karakterisasi keandalan dan pemeliharaan komponen, logistik operasi produksi termasuk distribusi, waktu, biaya, dan cuaca.	pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	analisis SWOT.
9	Ali Saleh, Manuel Chiachio & Juan Chiachio.	Optimized Petri Net Model for Condition-Based Maintenance of a Turbine Blade. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2_61	World Congress on Engineering Asset Management 2022: 16th WCEAM Proceedings pp 657–664.	Mengidentifikasi kegagalan aset dan kekurangan model pemeliharaan berbasis kondisi dalam rangka mengurangi biaya operasional.	Model Petri net (PN) digabungkan dengan metode Monte Carlo Reinforcement Learning (MCRL) menghasilkan pemeliharaan yang optimal dan interval inspeksi yang optimal untuk bilah turbin angin.	Memberikan acuan referensi aspek teknis indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
10	Kashif Ali, Zuraiz Rana, Ashfaq Niaz, and Chen Liang.	Fault Tree Analysis for Reliability Analysis of Wind Turbines Considering the Imperfect Repair Effect. https://doi.org/10.59324/ejtas.2023.1(4).62	Vol. 1 No. 4 (2023): European Journal of Theoretical and Applied Sciences.	Mengidentifikasi fenomena pemeliharaan yang tidak sempurna, yang dapat mengurangi keandalan turbin	Fault tree analysis (FTA) dengan model intensitas proporsional log linear (LPIM) untuk menganalisis perawatan yang tidak sempurna.	Memberikan referensi aspek teknis indikator dalam pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
				angin dari waktu ke waktu.			
11	Cuong D. Dao, Behzad Kazemtabrizi, Christopher J. Crabtree, and Peter J. Tavner.	Integrated condition-based maintenance modelling and optimisation for offshore wind turbines. https://doi.org/10.1002/we.2625	Wind Energy Volume 24, Issue 11 November 2021 Pages 1180-1198.	Mengidentifikasi berbagai model pemeliharaan yang tidak sempurna untuk turbin angin lepas pantai.	Optimalisasi model berbasis kondisi untuk menyelidiki mekanisme kegagalan dan degradasi komponen-komponen turbin angin.	Memberikan referensi aspek teknis indikator dalam pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT
12	Maarten Paul van der Laan, Camille Dubreuil-Boisclair, Oscar García-Santiago, Mark Kelly, Alexander Meyer Forsting, Niels Nørmark Sørensen, Knut	New RANS-based wind farm parameterization and inflow model for wind farm cluster modeling. DOI: 10.5194/wes-2022-112	Wind Energy. Science, 8, 819–848, 2023.	Menganalisis interaksi antara pembangkit listrik tenaga angin yang dapat menyebabkan hilangnya energi.	Model simulasi mengusulkan metode Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) yang secara efisien mensimulasikan pengaruh pembangkit listrik tenaga angin di sekitarnya terhadap tenaga pembangkit listrik tenaga angin dan produksi energi tahunan.	Memberikan referensi aspek teknis dan lingkungan indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Sponheim Seim, Marc Imberger, Alfredo Peña, and Pierre-Elouan Réthoré.						
13	Nandar Hiaing, Pablo G. Morato and Philippe Rigo	Farm-wide virtual load monitoring for offshore wind structures via Bayesian neural networks. https://doi.org/10.1177/14759217231186048	Structural Health Monitoring. August 24, 2023.	Mengkaji Struktur pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai yang terpapar pada lingkungan laut yang keras dan mengalami mekanisme kerusakan sepanjang masa operasionalnya.	Mengusulkan kerangka pemantauan beban virtual yang diformulasikan melalui jaringan saraf Bayesian (BNN) dan implementasi relevan yang diperlukan untuk konstruksi, pelatihan, dan penerapan model pemantauan virtual berbasis data BNN.	Memberikan referensi aspek lingkungan dan sistem informasi indikator pemerliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
14	Nikolaos Bempedelis & Luca Magri.	Bayesian Optimization of the Layout of Wind Farms with a High-	Computational Science – ICCS	Optimalisasi desain PLTB dengan memperhitungk	Pendekatan model bayesian dan simulasi untuk	Memberikan referensi aspek teknis indikator pemerliharaan	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
		Fidelity Surrogate Model. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36027-5_26	2023. ICCS 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 10476. Springer, Cham.	an fenomena dan interaksi turbin dengan atmosfer.	mengoptimalkan keluaran daya PLTB.	berkelanjutan di PLTB.	PLS dan analisis SWOT.
15	Monire Taghvaei, Mojtaba Gilvanejad, dan Mostafa Sedighizade	Cooperation of large-scale wind farm and battery storage in frequency control: An optimal Fuzzy-logic based controller. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103834	Journal of Energy Storage Volume 46, February 2022, 103834.	Mengkaji solusi alternatif kurangnya dukungan dinamika frekuensi sistem pada sistem tenaga listrik.	Model Fuzzy yang diusulkan kemudian dirancang melalui optimalisasi parameter, untuk meningkatkan efisiensi dalam penyediaan kontrol frekuensi serta kontrol daya aktif.	Memberikan referensi aspek teknis dan sistem informasi sebagai indikator pemerlihaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
16	Naamane Bounar, Abdessellem Boulkroune and Larbi	Fixed-time fuzzy adaptive control scheme for doubly fed induction generator-based wind turbine.	Transactions of the Institute of Measurement and	Menganalisis efisiensi kontrol turbin angin berbasis generator induksi umpan ganda.	Model fuzzy sebagai pendekatan universal untuk memperkirakan ketidakpastian	Memberikan referensi aspek teknis sebagai indikator pemerlihaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Chrifi-Alaoui.	https://doi.org/10.1177/01423312231197443	Control. 2023.		fungsional yang berkelanjutan.		
17	Annalisa Santolamazza, Daniele Dadi, and Vito Introna.	A Data-Mining Approach for Wind Turbine Fault Detection Based on SCADA Data Analysis Using Artificial Neural Networks. https://doi.org/10.3390/en14071845	Energies 2021, 14(7), 1845.	Mengkaji metodologi pemantauan untuk mengidentifikasi kesalahan, Namun, alat ini memiliki kelemahan utama yaitu adanya biaya tambahan karena memerlukan pemasangan sensor lain untuk memberikan kontrol sistem secara real-time.	Model data mining dengan Supervisory Control and Data Acquisition untuk mengkarakterisasi perilaku beberapa komponen utama turbin angin.	Referensi aspek teknis dan ekonomi sebagai indikator pemerliiharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
18	Weilong WANG and Hongxia Cal.	Research on Wind Turbine Maintenance Based on Data-Physical Fusion Modeling.	Advances in Transdisciplinary Engineeri	Mengidentifikasi patahan yang terjadi secara tiba-tiba dan beragam, serta	Makalah ini mengusulkan metode pemeliharaan turbin angin	Memberikan referensi aspek teknis dan sistem informasi sebagai indikator	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
		DOI: 10.3233/ATDE230313	ng Volume 38: Green Energy, Environment and Sustainable Development.	pengoperasian turbin angin yang tidak stabil.	dengan pemodelan fusi mekanisme data.	pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	analisis SWOT.
19	Farhad Elyasichamzaki, and Abolhasan Khajepour.	Application of machine learning for wind energy from design to energy-Water nexus: A Survey. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100011	Energy Nexus Volume 2, December 2021, 100011.	Menganalisis ketidakpastian kecepatan angin, volatilitas yang tinggi, yang berdampak pada pasar.	Makalah ini menyajikan tinjauan komprehensif tentang model kecerdasan buatan yang digunakan dalam sistem energi angin,	Memberikan referensi aspek teknis dan ekonomi sebagai indikator pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
20	Masoud Masoumi.	Machine Learning Solutions for Offshore Wind Farms: A Review of Applications and Impacts. https://doi.org/10.3390/jmse11101855	Journal of Marine Science and Engineering 2023, 11, 1855.	Tinjauan dan dampak penerapan dari kemampuan prediktif pembelajaran mesin, dan penilaian dampak lingkungan.	Model basis kecerdasan berupa Machine-Learning ini secara efektif memantau, memelihara, mengidentifikasi potensi kegagalan	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan sebagai indikator pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
					yang lebih akurat dan lebih presisi.		
21	David Pérez Granados , Mauricio Alberto Ortega Ruiz, Joel Moreira Acosta, Sergio Arturo Gama Lara, Roberto Adrián González Domínguez and Pedro Jacinto Páramo Kañetas.	A Wind Turbine Vibration Monitoring System for Predictive Maintenance Based on Machine Learning Methods Developed under Safely Controlled Laboratory Conditions. https://doi.org/10.3390/en16052290	<i>Energies</i> 2023, 16(5), 2290.	Menganalisis turbin angin yang saat ini memiliki struktur ramping dan elastis yang mudah rusak akibat getaran dan membahayakan kesehatan.	Menggunakan metode pembelajaran mesin seperti: Medium Trees, Cubic SVN, Logistic Regression Kernel, Optimized Neural Network, dan Bagged Trees, dengan akurasi yang tinggi.	Memberikan referensi aspek teknis, dan sosial sebagai indikator pemerliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
22	Payam Rokni Nakhi, and Mehrdad Ahmadi	Multi objective design of type II fuzzy based power system stabilizer for power system with wind farm turbine	International Transaction on Electrical	Menganalisis dampak ketidakpastian pembangkit listrik tenaga angin yang	Pendekatan model multi-tujuan untuk mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan margin stabilitas	Referensi aspek teknis dan ekonomi sebagai indikator pemerliharaan	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Kamarposhti.	considering uncertainty. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12285	Energy Systems Volume 30, Issue4 April 2020 e12285.	tinggi terkait dengan unit pembangkitan, sistem transmisi, dan permintaan.	dinamis sistem tenaga angin.	berkelanjutan di PLTB.	analisis SWOT.
23	Jingyun Li, and Hong Zhao.	Multi-Objective Optimization and Performance Assessments of an Integrated Energy System Based on Fuel, Wind and Solar Energies. https://doi.org/10.3390/e23040431	Entropy 2021, 23, 431.	Makalah ini mengusulkan sistem energi terintegrasi berdasarkan energi bahan bakar, angin, dan matahari, mengikuti studi optimasi yang berfokus pada penentuan kapasitas perangkat yang optimal.	Hasil optimasi Model multi-menunjukkan tingkat penghematan energi primer, tingkat penghematan biaya tahunan, dan tingkat penurunan emisi karbon dioksida.	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi, lingkungan dan sosial sebagai indikator pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
24	Ángel M. Costa, José A. Orosa, Diego Vergara, and Pablo	New Tendencies in Wind Energy Operation and Maintenance. https://doi.org/10.3390/app11041386	Applied Science. 2021, 11(4), 1386.	Studi terhadap pengurangan biaya pengoperasian dan pemeliharaan (O&M) serta peningkatan	Kecenderungan mengembangkan model pemeliharaan baru dalam pengoperasian dan pemeliharaan energi angin.	Memberikan referensi pentingnya mengembangkan dan menemukan model pemeliharaan baru tenaga angin.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Fernández-Arias.			keandalan turbin angin.			
25	Zhigang Tian, and Han Zhang	Wind farm predictive maintenance considering component level repairs and economic dependency. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.060	Renewable Energy, Volume 192, June 2022, Pages 495-506	Analisis asumsi mengenai perbaikan besar dan kecil mengenai biaya dan dampaknya terhadap fungsi sistem.	Dalam karya ini, pendekatan pemeliharaan prediktif pembangkit listrik tenaga angin dikembangkan dengan mempertimbangkan perbaikan tingkat komponen dan ketergantungan ekonomi.	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi, dan teknis sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
26	Han Peng, Hai Zhang, Yisa Fan, Linjian Shangguang, and Yang Yang	A Review of Research on Wind Turbine Bearings' Failure Analysis and Fault Diagnosis. https://doi.org/10.3390/lubricants11010014	Lubricants 2023, 11, 14.	Studi terhadap kegagalan dan keausan bantalan turbin angin.	Model pemeliharaan korektif memberikan gambaran serta analisis kesalahan, kegagalan, dan memperpanjang umur bantalan.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
27	Ekamdeep Singh, Sajad Saraygord	Wind Turbine Optimal Preventive Maintenance Scheduling	Journal of Dynamics, Monitorin	Studi mengenai penjadwalan pemeliharaan untuk	Model ini menggunakan kerangka optimasi dua lapis:	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Afshari, and Xihui Liang.	Using Fibonacci Search and Genetic Algorithm. https://doi.org/10.37965/jdmd.2023.158	g and Diagnosti c Vol. 2 No. 3 (2023).	menghindari kerusakan dan mengurangi biaya pemeliharaan.	Fibonacci dan Genetic Algorithm (GA) dengan melakukan Simulasi Monte Carlo untuk memperkirakan waktu kegagalan komponen turbin angin.	pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	PLS dan analisis SWOT.
28	Quanjian Yu, Ola Carlson and Serik Sagitov.	Optimal Maintenance Schedule for a Wind Power Turbine with Aging Components. https://doi.org/10.3390/a16070334	Algorithms 2023, 16(7), 334.	Analisis pemeliharaan tenaga angin untuk meminimalkan biaya yang tidak perlu.	Penjadwalan aktivitas pemeliharaan preventif yang optimal dengan model matematika tingkat lanjut.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
29	Christian Rosenberg Petersen, Søren Fæster, Jakob Ilsted Bech, Kristine Munk Jespersen, Niels	Non-destructive and contactless defect detection inside leading edge coatings for wind turbine blades using mid-infrared optical coherence tomography. https://doi.org/10.1002/we.2810	Wind Energy Volume 26, Issue 5 May 2023 Pages 458-468.	Studi erosi pada bilah turbin angin dalam produksi energi angin, yang mengakibatkan penurunan efisiensi, serta peningkatan biaya pemeliharaan dan waktu henti.	Dalam karya ini, Optical Coherence Tomography (OCT) inframerah-tengah (MIR) untuk inspeksi non-destruktif dan tanpa kontak terhadap komposit serat kaca yang dilapisi untuk	Referensi aspek teknis dan sistem informasi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Møller Israelsen and Ole Bang.				mengidentifikasi cacat lapisan bawah permukaan.		
30	Zhigang Tian, Tongdan Jin, Bairong Wu, and Fangfang Ding.	Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.028	Renewable Energy 36 (2011) 1502-1509	Studi pemeliharaan ekonomis terhadap penggantian komponen secara bersamaan yang menunjukkan kerusakan pada beberapa turbin angin.	Model pemeliharaan berbasis kondisi yang dioptimalkan dan berkelanjutan.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
31	Mahmood Shafiee, Michael Patriksson, and Ann-Brith Strömberg	An Optimal Number-Dependent Preventive Maintenance Strategy for Offshore Wind Turbine Blades Considering Logistics. https://doi.org/10.1155/2013/205847	Hindawi Publishing Corporation Advances in Operations Research Volume 2013, Article ID	Studi pada turbin angin lepas pantai, baling-baling merupakan salah satu komponen paling kritis dan mahal yang mengalami berbagai jenis kerusakan akibat	Model pemeliharaan preventif yang bergantung pada angka (NDPM) yang optimal diusulkan, untuk mengatasi distribusi logistik sekaligus menangani kerusakan kecil dan besar.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
			205847, 12 pages	lingkungan laut yang keras dan beban yang tinggi.			
32	Fang Fang Ding.	Comparative Study of Maintenance Strategies for Wind Turbine Systems. https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/7438/	Presented In Partial Fulfillment of The Requirements For The Degree of Master of Applied Science (Quality System Engineering) At Concordia University Montréal, Québec, Canada, November 2010.	Studi optimalisasi pengoperasian dan pemeliharaan untuk mengurangi waktu henti, meningkatkan ketersediaan, dan mengurangi biaya operasional.	Model optimasi pemeliharaan korektif dan preventif untuk membatasi jumlah kegagalan serta mengurangi biaya dan meningkatkan ketersediaan.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
33	Yazid Aafif, Anis Chelbi, Lahcen	Optimal preventive maintenance strategies for a wind turbine gearbox.	Energy Reports Volume 8, Suppleme	Studi condition monitoring terhadap ambang batas	Model pemeliharaan korektif dan preventif yang	Referensi aspek teknis dan ekonomi sebagai indikator	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-

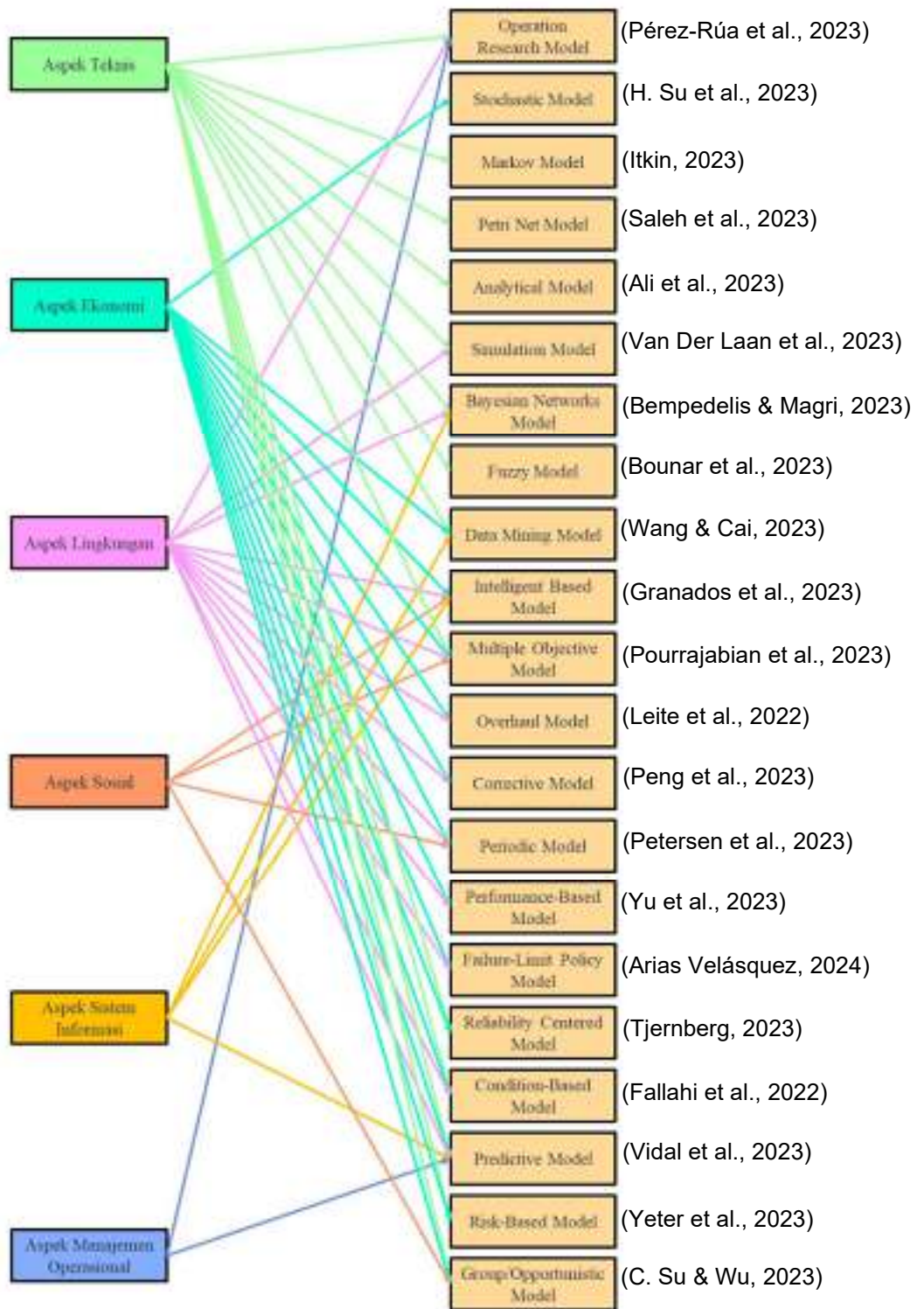
NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Mifdal, Sofiene Dellagi, dan Ilias Majdouline.	https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.084	nt 9, November 2022, Pages 803-814.	penggunaan gearbox.	padukan untuk mengoptimalkan usia gearbox.	pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	PLS dan analisis SWOT.
34	Lina Bertling Tjernberg.	Reliability-Centered Asset Management with Models for Maintenance Optimization and Predictive Maintenance: Including Case Studies for Wind Turbines. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29724-3_5	Women in Engineering and Science Women in Power pp 87–155 19 July 2023.	Studi penanganan dalam mengurangi biaya pengoperasian dan pemeliharaan untuk memastikan investasi yang baik.	Model reliability-centered management (RCM), dan metode reliability-centered asset management (RCAM), untuk mengoptimalkan upaya pemeliharaan.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
35	Jinhe Wang, Xiaohong Zhang, dan Jianchao Zeng.	Optimal group maintenance decision for a wind farm based on condition-based maintenance. https://doi.org/10.1002/we.2644	Wind Energy Volume 24, Issue 12 December 2021 Pages 1517-1535.	Studi ini menyelidiki strategi pemeliharaan kelompok (GM) berdasarkan pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) dari ladang angin paralel dengan	Model group maintenance (GM) lebih optimal dalam hal manfaat biaya dan kemudahan dalam implementasi.	Referensi aspek teknis, lingkungan dan ekonomi, sebagai indikator pemerlihaaran berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
				beberapa turbin angin yang identik.			
36	Hakon Toftaker, Espen Flo Bodal and Iver Bakken Sperstad.	Joint optimization of preventive and condition-based maintenance for offshore wind farms. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2362/1/012041	Journal of Physics: Conference Series 2362 (2022) 012041.	Analisis tingginya biaya pemeliharaan dan hilangnya produksi selama waktu henti, serta optimalisasi efisiensi biaya.	Optimalisasi model preventif dan berbasis kondisi dalam memaksimalkan produksi listrik dan membatasi degradasi turbin.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemerliiharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
37	Zhengru Ren, Amrit Shankar Verma, Ye Li, Julie J.E. Teuwen, and Zhiyu Jiang.	Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110886	Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 144, July 2021, 110886.	Analisis dampak pemeliharaan terhadap siklus hidup pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai yang kompleks dan tidak pasti dengan biaya relatif tinggi.	Tinjauan dari berbagai perspektif dalam menangani masalah sistem informasi, lingkungan, teknis, dan ekonomi.	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan manajemen sebagai indikator pemerliiharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
38	Zhigang Tian, and Han Zhang	Wind farm predictive maintenance considering component level repairs and economic dependency.	Renewable Energy Volume 192, June 2022,	Studi model pemeliharaan prediktif, perlunya dibuat asumsi perbaikan besar	Model optimasi pemeliharaan prediktif dikembangkan untuk menemukan	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi, sebagai indikator pemerliiharaan	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
		https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.060	Pages 495-506.	dan kecil mengenai biaya dan dampaknya terhadap fungsi sistem.	kebijakan pemeliharaan yang optimal selanjutnya metode berbasis simulasi dikembangkan untuk evaluasi biaya pemeliharaan.	berkelanjutan di PLTB.	analisis SWOT.
39	Y Vidal, B Puruncaja, F Castellani, and C Tutiven	Predictive maintenance of wind turbine's main bearing using wind farm SCADA data and LSTM neural networks. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2507/1/012024	WindEurope Annual Event 2023 Journal of Physics: Conference Series 2507 (2023) 012024.	Analisis kegagalan bantalan turbin angin menyebabkan waktu henti yang tidak diinginkan dan biaya pemeliharaan yang signifikan.	Model prediktif dengan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) yang terintegrasi mendeteksi dini kegagalan bantalan terintegrasi dengan jaringan saraf Long-Short-Term Memory (LSTM).	Memberikan referensi aspek teknis, dan sistem informasi sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
40	B. Yeter, Y. Garbatov, and C.	Risk-based maintenance planning of offshore wind turbine farms.	Reliability Engineering & System Safety	Studi keandalan dan siklus hidup turbin angin untuk memperkirakan	Model Perencanaan pemeliharaan berbasis risiko yang	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
	Guedes Soares.	https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107062	Volume 202, October 2020, 107062.	biaya dan investasi sebagai resiko struktural.	dikembangkan terintegrasi dengan Metode pohon peristiwa.	berkelanjutan di PLTB.	analisis SWOT.
41	Mingxin Li, Mian Wang, Jichuan Kang, Liping Sun, Peng Jin.	An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine system considering optimal maintenance intervals of subsystems. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108067	Ocean Engineering Volume 216, 15 November 2020, 108067.	Analisis strategi mengurangi biaya pengoperasian dan pemeliharaan (O&M) yang menyumbang sebagian besar dari total biaya energi angin lepas pantai.	Pendekatan model pemeliharaan oportunistik dengan penerapan metode markov yang menunjukkan biaya pemeliharaan berkurang.	Referensi aspek teknis dan ekonomi, sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.
42	Tangbin Xia, Yifan Dong, Ershun Pan, Meimei Zheng, Hao Wang, and Lifeng Xi.	Fleet-level opportunistic maintenance for large-scale wind farms integrating real-time prognostic updating. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.072	Renewable Energy Volume 163, January 2021, Pages 1444-1454.	Studi kebijakan operasional dan pemeliharaan untuk armada dan setiap komponen yang mengalami degradasi yang berbeda-beda.	Model pemeliharaan oportunistik untuk armada dan ladang angin skala besar yang mengintegrasikan pembaruan prognostik waktu nyata terbukti memberikan keuntungan ekonomi untuk	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi dan sosial sebagai indikator pemeliharaan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT.

NO	PENULIS	JUDUL	SUMBER	RUMUSAN MASALAH	HASIL PENELITIAN	PERSAMAAN PENELITIAN	PERBEDAAN PENELITIAN
					pembangkit listrik tenaga angin skala besar di masa depan.		
43	Chun Su dan Lin Wu.	Opportunistic maintenance optimisation for offshore wind farm with considering random wind speed. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2202280	International Journal of Production Research Volume 62, 2024 - Issue 5.	Analisis perbandingan berbagai strategi model pemeliharaan oportunistik dalam mengurangi biaya pemeliharaan yang efektif.	Pendekatan rantai Markov Monte Carlo diterapkan untuk mensimulasikan distribusi waktu tunggu kapal perbaikan pemeliharaan, dengan mempertimbangkan dampak kecepatan angin terhadap ketersediaan pemeliharaan dan model pemeliharaan oportunistik berbasis usia (ABOM) dianggap yang paling baik.	Memberikan referensi aspek teknis, ekonomi sebagai indikator pemerliharan berkelanjutan di PLTB.	Lokasi penelitian, metode analisis SEM-PLS dan analisis SWOT



Gambar 2. State of The Art

2.3 Pemeliharaan Berkelanjutan (*Sustainable Maintenance*)

Manajemen pemeliharaan yang buruk menyebabkan dampak teknis, ekonomi, lingkungan dan sosial yang tidak dapat diabaikan serta hambatan terhadap paradigma berkelanjutan. Pentingnya studi dalam mengevaluasi dampak pemeliharaan terhadap keberlanjutan (Franciosi et al., 2020). Tesis ini menyelidiki indikator yang digunakan perusahaan untuk mengukur dampak pemeliharaannya. Pemeliharaan berkelanjutan merupakan salah satu wujud pembangunan berkelanjutan. Pembangunan berkelanjutan, pertama kali dilaporkan oleh *World Commission on Environment and Development* (WCED) pada tahun 1987, selanjutnya dinyatakan dalam bentuk konsep terpadu yang mencakup kesejahteraan lingkungan, ekonomi, dan sosial (Samuel et al., 2013). Termasuk aspek pemerintah, investasi, sumber daya manusia dan kearifan lokal (Debora Grace Pangemanan, 2022), manajemen operasional, finansial dan sistem informasi (Ningrat et al., 2024), keselamatan dan keamanan, aksesibilitas dan infrastruktur (Waris et al., 2024).

Pemeliharaan berkelanjutan merupakan pengembangan berkelanjutan dan perbaikan secara terus-menerus dari proses pemeliharaan, peningkatan efisiensi, keselamatan dalam operasi dan perawatan, baik pada objek teknis maupun instalasi yang berfokus pada karyawan. Selain itu meminimalkan biaya operasi dan mengoptimalkan daya tahan peralatan, karena pemeliharaan yang tepat akan berdampak positif terhadap kinerja perusahaan secara keseluruhan (Amrina et al., 2019).

Agar konsep berkelanjutan dapat diwujudkan, maka perlu menyusun strategi yang melibatkan semua fungsi bisnis dan pemeliharaan. Dimana tujuan pemeliharaan harus diselaraskan dengan strategi bisnis dengan mendefinisikan ukuran kinerja utama di setiap tingkatan (Sari et al., 2015).

Pemeliharaan berkelanjutan sebagai pilar utama memberikan kemampuan untuk menjaga sistem produksi tetap efisien untuk memenuhi kebutuhan akan produk yang berkualitas. Pengaruhnya terhadap volume dan biaya produksi, kinerja aset, ketersediaan peralatan, kualitas produk akhir, kesehatan dan keselamatan pekerja dan pengguna akhir, lingkungan alam sekitar, kesejahteraan sosial (Marie et al., 2020), evaluasi fase siklus hidup produksi (Zarte et al., 2018) dan energi (Nezami & Yildirim, 2013) serta menjaga keseimbangan antara lingkungan hidup, sosial dan ekonomi (Bhanot et al., 2015).

Kemudian indeks pemeliharaan berkelanjutan juga didasarkan pada pilar ekonomi, lingkungan dan sosial (Marie et al., 2020). Perusahaan menghadapi tantangan yang menuntut adanya laporan berkelanjutan yang jelas dan konsisten, dimana kinerja strategi baru telah diusulkan berdasarkan aspek teknis, lingkungan, ekonomi dan sosial (Olugu et al., 2021).

Energi - Audit Energi: standar ini dapat digunakan untuk melakukan audit energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PNS ISO, 2014); ISO 14001 - Manajemen Lingkungan (Haslinda & Chan, 2010). Meskipun standar ini lebih berkaitan dengan manajemen lingkungan tapi dapat membantu perusahaan dalam mempertimbangkan dampak lingkungan dari operasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dan mengadopsi praktik pemeliharaan berkelanjutan.

Selain ISO, *International Electrotechnical Commission* (IEC), organisasi yang juga telah mengembangkan beberapa standar dan panduan umum yang relevan dalam pemeliharaan berkelanjutan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu. Beberapa panduan yang dapat digunakan dalam konteks ini, seperti: IEC 61400-12-1 Ed. 2.0 - Wind turbines - Part 12-1, standar ini membahas pengukuran kinerja daya pembangkit listrik tenaga bayu untuk memastikan bahwa turbin angin menghasilkan energi yang diharapkan; IEC 61400-23 Ed. 3.0 - Wind turbines - Part 23, standar yang membahas pengujian struktur baling-baling rotor pada turbin angin untuk memastikan keamanan kinerja baling-baling rotor selama operasi dan pemeliharaan; IEC 61400-24 Ed. 2.0 - Wind turbines - Part 24, standar ini membahas perlindungan petir untuk turbin angin.; IEC 61400-25-1 Ed. 3.0, standar yang berfokus pada komunikasi dalam pemantauan dan pengendalian Pembangkit Listrik Tenaga Bayu; IEC 61400-26-1 Ed. 1.0 - Wind turbines - Part 26-1, standar ini membahas parameter-parameter pengendalian yang diperlukan untuk mendapatkan sertifikasi tipe untuk turbin angin; IEC 61400-27-1 Ed. 1.0 - Wind turbines - Part 27-1, standar yang membahas model simulasi listrik untuk turbin angin; IEC 61400-40 Ed. 1.0 - Wind turbines - Part 40, standar ini memberikan persyaratan desain yang perlu dipertimbangkan dalam pemeliharaan dan operasi PLTB *offshore*.

Demi mencapai tujuan tersebut, fungsi pengawasan dan penelitian secara holistik perlu dilakukan dalam rangka menjaga keseimbangan aktivitas pemeliharaan dan aktivitas berkelanjutan berjalan sebagaimana mestinya, baik ditinjau dari aspek teknis, ekonomi, lingkungan, sosial, sistem informasi maupun manajemen operasional.

2.4 Structural Equation Modeling (SEM)

SEM adalah kumpulan teknik analisis yang terintegrasi seperti analisis jalur (analisis regresi) dan analisis faktor. Dimana analisis faktor digunakan untuk memperkirakan faktor laten dari variabel yang diamati. Analisis jalur, di sisi lain, memperkirakan pengaruh satu atau lebih variabel terhadap variabel lain dan karenanya memungkinkan penyelidikan berbagai hipotesis dalam satu model. SEM dapat memuat data dari studi eksperimental, non-eksperimental, dan observasional. SEM mampu secara bersamaan memperkirakan beberapa hubungan yang saling terkait antara variabel endogen dan eksogen, dan memperhitungkan kesalahan pengukuran, serta memberikan statistik yang sesuai untuk mengevaluasi implikasi asumsi atau hubungan teoritis (Schubert et al., 2022)

Pendekatan ini cocok untuk pemeriksaan holistik dan hipotesis dari berbagai disiplin ilmu, sekaligus memahami fenomena kompleks seperti perilaku konsumsi

energi dengan sejumlah faktor yang dinyatakan signifikan menjadi tidak signifikan (Schubert et al., 2022). Tabel 2 berikut menunjukkan beberapa aplikasi SEM dalam berbagai penelitian (Mardani et al., 2017).

Tabel 2. Klasifikasi Aplikasi Structural Equation Modeling

Application Areas	Frequency	Percentage of Frequency
Green and Sustainable Supply Chain Management (SCM)	50	29,24%
Corporate Social Responsibility (CSR)	8	4,68%
Renewable and Sustainable Energies	7	4,09%
Green and Ecological Innovation	11	6,43%
Green and Environmental Human Resource Management (HRM)	32	18,71%
Environmental Information Technology and Systems	8	4,68%
Other Green and Sustainable Operation Management	28	16,37%
Green and Environmental Marketing	27	15,79%
Total	171	100%

Sumber: Mardani, A., Streimikiene, D., Zavadskas, E. K., Cavallaro, F., Nilashi, M., Jusoh, A., & Zare, H. (2017). Application of Structural Equation Modeling (SEM) to solve environmental sustainability problems: A comprehensive review and meta-analysis. *Sustainability* (Switzerland), 9(10). <https://doi.org/10.3390/su9101814>

Structural Equation Modeling (SEM) merupakan suatu jenis analisis banyak variabel (*multivariate analysis*) yang mampu menelaah relasi antar variabel (peubah) secara simultan atau serempak secara utuh (Y. A. Wang & Rhemtulla, 2021). Hubungan yang dimaksud antara lain peubah laten dengan indikatornya, peubah laten satu dengan peubah laten lain, dan mampu meneliti error pada pengukuran dengan jelas. Hubungan dapat didasari oleh satu atau sejumlah konstruk dependen dengan satu atau sejumlah konstruk independent (Santoso, 2011). Tiap-tiap peubah dependen dan independen bisa berupa faktor dari sejumlah peubah indikator. SEM dapat menganalisis tiga aktivitas pada waktu yang bersamaan, yakni menguji validitas dan reliabilitas instrumen (*confirmatory factor analysis*), menguji model relasi antara konstruk laten (*path analysis*), dan memperoleh model yang bernilai guna memprediksi (*structural model* atau *regression analysis*) (Dachlan, 2014). Oleh karena itu, Metode SEM saat ini diperkirakan sebagai metode multivariate yang paling dominan karena mampu menutupi kelemahan yang terdapat pada analisis regresi (Haryono & Wardoyo, 2013). Terdapat dua jenis peubah pada SEM, yaitu:

1. Variabel Laten; peubah laten (*unobserved variable* atau konstruk laten) adalah peubah yang tidak mampu dinilai langsung, namun melewati suatu atau lebih konstruk manifes. Sebaiknya peubah laten dijelaskan dari minimal tiga variabel manifes. Peubah laten sendiri terdapat dua jenis, yaitu:
 - a. Peubah eksogen yakni peubah yang tidak mampu dikontrol oleh peubah lain atau peubah independen yang dapat mengontrol peubah dependen (*endogen*) (Santoso, 2011). Peubah ini dapat diketahui dengan anak panah dari peubah tersebut ke peubah endogen.
 - b. Peubah endogen yakni peubah yang dapat dikontrol oleh peubah lain atau peubah dependen yang dikontrol oleh peubah independen (*eksogen*)

(Santoso, 2011). Peubah endogen dapat berperan menjadi variabel independen jika dapat mempengaruhi variabel lain (Ghozali, 2014). Peubah ini dapat diketahui dengan anak panah ke peubah tersebut.

2. Variabel Manifes; peubah manifes (observed variable, measured variable, atau indicator) adalah peubah yang bisa diteliti secara nyata. Peubah manifes yaitu besaran dari peubah laten karena dapat digunakan untuk menggambarkan variabel laten. Peubah manifes dapat digambarkan tanpa wajib menggambarkan peubah laten. SEM ialah konsepsi analisis faktor melewati model pengukuran (measurement model) serta konsepsi regresi melewati model struktural (structural model) dengan diintegrasikan. Berikut merupakan penjelasannya (Santoso, 2011):
 - a. Model Struktural.
Structural model merupakan gambaran dari relasi antar peubah laten yang secara umum bersifat linear, akan tetapi memungkinkan juga hubungan yang tidak linear.
 - b. Model Pengukuran.
Measurement model adalah merelasikan peubah laten dengan peubah-peubah manifes dalam bentuk factor analysis. Pada model ini, peubah laten dirancang menjadi sebuah faktor yang mendasari peubah-peubah manifes terkait.

2.5 Analisis SWOT

Analisis SWOT adalah sebuah metode perencanaan strategis yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan (*Strength*), kelemahan (*Weakness*), peluang (*Opportunity*) dan ancaman (*Threat*) yang terjadi dalam proyek atau di sebuah usaha bisnis, atau mengevaluasi lini-lini produk sendiri maupun pesaing. Metode ini mengadopsi konsep yang menggunakan skema multi-layer untuk menyederhanakan permasalahan yang rumit (Chang & Huang, 2006). Kekuatan dan kelemahan dikelompokkan ke dalam faktor internal, sedangkan peluang dan ancaman diidentifikasi sebagai faktor eksternal (Rangkuti, 2003). Analisis ini secara logis dapat diandalkan dalam proses pengambilan keputusan yang berkelanjutan (Pereira et al., 2021). Proses pengambilan keputusan berkaitan dengan visi dan misi perusahaan serta tujuan perusahaan. Sehingga analisis SWOT dapat digunakan sebagai alat efektif untuk menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi perusahaan, sebagai proses pengambilan keputusan untuk menentukan strategi (Longsheng et al., 2022).