

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

(Mersen, 2020) melalui studi *Carbon Dust Collection Systems for Hydro Generators*, yang menunjukkan bahwa sistem pengumpulan debu berbasis *vacuum extraction* efektif mencegah kontaminasi komponen internal generator dan menurunkan frekuensi perawatan korektif.

Selanjutnya, artikel *Brush Collectors* dari (CCJ Team, 2019) menekankan bahwa pemasangan *brush collector* pada titik sumber debu berperan penting dalam menjaga kebersihan area generator dan meningkatkan stabilitas operasi. Hal ini sejalan dengan temuan (Hongsheng Su, 2024) bahwa optimasi strategi *preventive maintenance* yang mempertimbangkan keadaan nyata komponen, bukan hanya interval waktu, dapat meminimalkan kerusakan berlebih dan memastikan operasi yang lebih stabil melalui penyesuaian perawatan berdasarkan kondisi aktual peralatan, yang akhirnya juga membantu mendukung kestabilan operasi mesin secara keseluruhan. Dengan kata lain, selain pengendalian debu secara fisik seperti pemasangan *brush collector*, pendekatan perawatan yang cerdas dan responsif terhadap kondisi sistem juga dibutuhkan untuk meningkatkan keandalan dan umur pakai komponen generator.

Dari perspektif karakteristik material, penelitian pada (Wang, 2021) menunjukkan bahwa mekanisme *fretting wear* menghasilkan partikel aus mikro yang relevan dengan fenomena pembentukan debu karbon pada sistem *slip-ring*. Sementara itu, studi pada (Pavlik, 2020) menemukan bahwa perlakuan permukaan seperti *nitriding* mampu meningkatkan ketahanan aus material dan menurunkan laju pembentukan partikel debu, sehingga mendukung upaya peningkatan keandalan komponen yang bekerja pada kondisi gesekan berulang.

Pendekatan analisis risiko dan prioritas pemeliharaan turut dibahas oleh (Rizqi, 2020) melalui integrasi metode ANP dan FMEA untuk menentukan komponen yang memiliki tingkat risiko tertinggi dalam suatu sistem operasional. (Gonzalez, 2020) menambahkan bahwa konsistensi penilaian dalam FMEA sangat diperlukan agar keputusan pemeliharaan yang diambil benar-benar mencerminkan kondisi risiko aktual dan mendukung peningkatan efektivitas strategi perawatan.

Menurut (Attia, 2025) menekankan bahwa penerapan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) berbasis teknologi Industri 4.0 dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan aset melalui penggunaan sensor pintar dan analisis data secara *real-time*. (Ritonga, 2019) menunjukkan bahwa penentuan interval *preventive maintenance* berbasis *criticality analysis* mampu mengurangi potensi kerusakan mendadak pada turbin, sedangkan (Wicaksono, 2021) menemukan bahwa gangguan pada generator PLTA sering dipengaruhi oleh ketidakseimbangan beban, degradasi isolasi, dan penumpukan debu karbon sehingga diperlukan penguatan inspeksi rutin dan pengendalian kontaminan.

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian sebelumnya, ditemukan beberapa kesenjangan penelitian yang menjadi dasar dilakukannya studi ini. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada strategi pemeliharaan tingkat sistem, seperti penerapan RCM berbasis teknologi, pemeliharaan berbasis risiko, serta pemanfaatan sensor pintar dan machine learning, tanpa membahas secara spesifik permasalahan teknis pada subsistem tertentu, khususnya Motor *Carbon Dust System* pada area *slip ring* generator PLTA.

Kajian terkait gangguan generator PLTA umumnya menyoroti kerusakan isolasi, sistem eksitasi, dan ketidakseimbangan beban, sementara aspek debu *carbon* hanya disebut sebagai faktor pendukung gangguan tanpa analisis mendalam terhadap mekanisme kegagalan maupun solusi teknis yang aplikatif. Penelitian mengenai sistem pengendalian debu *carbon* juga masih berfokus pada rekomendasi teknis desain, dan belum dikaitkan langsung dengan keandalan aset, frekuensi kegagalan, *downtime*, dan kehilangan produksi di lingkungan industri.

Selain itu, meskipun metode FMEA telah banyak digunakan dalam pemetaan risiko, penerapannya secara khusus pada Motor *Carbon Dust System* sebagai dasar pengambilan keputusan penggantian sistem masih jarang dibahas. Dengan demikian, terdapat gap penelitian terkait objek, metode, dan konteks aplikasi.

Sebagai respon terhadap kesenjangan tersebut, penelitian ini melakukan analisis kegagalan Motor *Carbon Dust System* menggunakan FMEA berbasis data historis pemeliharaan dan operasional, serta menyusun rekomendasi penggantian sistem sebagai upaya peningkatan keandalan Unit Generator LGS#3 PLTA Larona.

Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka

Peneliti	Objek Penelitian	Permasalahan	Alternatif Solusi	Alternatif Metode	Hasil Penelitian
Mersen (2020)	<i>Carbon Dust Collection System</i> pada <i>hydro generator</i>	Kontaminasi debu karbon pada komponen internal generator	<i>Vacuum extraction dust collection system</i>	Evaluasi kinerja sistem pengumpul debu	Sistem penghisap debu berbasis vakum mampu mengurangi masuknya debu ke bagian dalam generator dan menurunkan kebutuhan perawatan korektif.
CCJ Team (2019)	<i>Brush collector</i> pada area <i>slip ring</i>	Penumpukan debu di sekitar generator	Pemasangan <i>brush collector</i> di titik sumber debu	Kajian teknis penerapan <i>brush collector</i>	Penggunaan <i>brush collector</i> membantu menjaga area generator tetap bersih dan berkontribusi pada operasi yang lebih stabil.
Hongsheg Su (2024)	<i>Preventive maintenance</i> berbasis kondisi aktual	PM berbasis waktu kurang sesuai dengan kondisi komponen	Optimasi <i>preventive maintenance</i> berbasis kondisi	Pendekatan <i>condition-based maintenance</i>	Penyesuaian jadwal perawatan berdasarkan kondisi nyata peralatan mampu menurunkan potensi kerusakan dan meningkatkan kestabilan operasi mesin.

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti	Objek Penelitian	Permasalahan	Alternatif Solusi	Alternatif Metode	Hasil Penelitian
Wang (2021)	Mekanisme <i>fretting wear</i> material	Terbentuknya partikel aus mikro pada komponen gesek	Analisis mekanisme pembentukan partikel aus	Studi <i>mekanisme fretting wear</i>	<i>Fretting wear</i> menghasilkan partikel aus berukuran mikro yang berkaitan dengan pembentukan debu karbon pada sistem <i>slip-ring</i> .
A. Pavlik (2020)	Perlakuan permukaan material	Tingkat keausan komponen masih tinggi	<i>Nitriding</i> pada permukaan material	Uji ketahanan aus material	Perlakuan <i>nitriding</i> meningkatkan daya tahan aus material dan mengurangi laju pembentukan partikel debu.
Rizqi (2020)	Penentuan komponen prioritas pemeliharaan	Kesulitan menentukan komponen paling berisiko	Integrasi ANP dan FMEA	ANP–FMEA	Perbaikan konsistensi penilaian pada FMEA menghasilkan keputusan pemeliharaan yang lebih akurat dan sesuai kondisi risiko lapangan.

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti	Objek Penelitian	Permasalahan	Alternatif Solusi	Alternatif Metode	Hasil Penelitian
Gonzalez (2020)	Konsistensi penilaian FMEA	Ketidakselarasan hasil penilaian risiko	Peningkatan konsistensi evaluasi FMEA	Analisis konsistensi keputusan risiko	Perbaikan konsistensi penilaian pada FMEA menghasilkan keputusan pemeliharaan yang lebih akurat dan sesuai kondisi risiko lapangan.
Attia (2025)	RCM berbasis teknologi Industri 4.0	Pengelolaan aset belum responsif terhadap kondisi real-time	Penerapan sensor pintar & data analytics	RCM berbasis Industry 4.0	Integrasi sensor cerdas dan analitik data mampu meningkatkan efektivitas strategi pemeliharaan aset.
Ritonga (2019)	Penentuan interval preventive maintenance	Risiko failure akibat interval PM yang kurang tepat	Criticality-based maintenance scheduling	Criticality analysis	Penentuan interval PM berbasis tingkat kritikalitas komponen dapat menurunkan potensi kerusakan mendadak.
Wicaksono (2021)	Gangguan pada generator PLTA	Ketidakseimbangan beban, degradasi isolasi, penumpukan debu karbon	Penguatan inspeksi & pengendalian kontaminan	Analisis gangguan operasi generator	gangguan generator banyak dipengaruhi oleh penurunan kualitas isolasi, serta akumulasi debu karbon. diperlukan peningkatan inspeksi rutin.

2.2. Dasar Teori

Bagian ini berisi uraian mengenai teori-teori yang menjadi landasan dalam penelitian ini. Teori tersebut digunakan sebagai acuan untuk menganalisis permasalahan dan merumuskan solusi yang tepat.

2.2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan fasilitas yang memanfaatkan energi potensial air untuk menghasilkan energi listrik. Prinsip dasar PLTA adalah mengubah energi kinetik air yang mengalir menjadi energi mekanik melalui turbin, yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik. PLTA memiliki beberapa komponen utama, di antaranya bendungan yang berfungsi untuk menampung air, saluran air yang mengarahkan air ke turbin, turbin yang mengubah energi air menjadi energi mekanik, generator yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dan sistem transmisi yang menyalurkan listrik ke jaringan. PLTA merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang penting, meskipun operasionalnya juga memiliki dampak lingkungan yang perlu dikelola. Dalam konteks penelitian ini, PLTA Karebbe di PT Vale Indonesia Tbk menjadi fokus utama, yang mengandalkan generator hidro untuk menghasilkan listrik.

2.2.2. Slip Ring, Carbon Brush dan Pembentukan Carbon Dust

Pada generator dengan sistem eksitasi tertentu, *slip ring* berfungsi sebagai media penghantar arus dari sumber eksitasi menuju rotor melalui *carbon brush*. Interaksi mekanis antara *brush* dan permukaan *slip ring* menimbulkan gesekan yang dapat menghasilkan serbuk karbon (*carbon dust*). Akumulasi debu ini berisiko memicu kontaminasi area internal generator, meningkatkan potensi *tracking*, menurunkan kualitas isolasi, serta memicu gangguan operasi apabila tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian debu yang bekerja efektif dan andal.

2.2.3. Motor Carbon Dust System (CDS) sebagai Sistem Pengendalian Debu

Motor *Carbon Dust System* merupakan perangkat pendukung yang dirancang untuk mengendalikan akumulasi debu *carbon* pada area *slip ring* dengan cara menghisap partikel hasil gesekan antara *slip ring* dan *carbon brush*. Sistem ini berfungsi menjaga area komponen tetap bersih sehingga kontaminasi partikel tidak menyebar ke bagian internal generator dan tidak mengganggu kinerja isolasi listrik. Apabila proses penghisapan tidak berjalan efektif, debu akan menumpuk

dan berpotensi memicu gangguan operasional, peningkatan suhu, hingga kerusakan pada komponen terkait. Oleh karena itu, performa Motor *Carbon Dust System* perlu dipertahankan dalam kondisi maksimal melalui evaluasi berkala, karena penurunan kinerja motor akan berdampak langsung pada efektivitas pengendalian debu serta kestabilan operasi generator secara keseluruhan.

2.2.4. Keandalan Aset dan Sistem Pemeliharaan

Konsep keandalan aset menggambarkan kemampuan suatu peralatan untuk beroperasi sesuai fungsinya tanpa mengalami kegagalan dalam periode tertentu. Dalam lingkungan pembangkit listrik, keandalan sangat dipengaruhi oleh strategi pemeliharaan yang diterapkan, mulai dari perawatan pencegahan, pemeliharaan berbasis kondisi, hingga tindakan perbaikan setelah terjadi kerusakan. Pemilihan pendekatan pemeliharaan perlu mempertimbangkan tingkat kritikalitas komponen, risiko kegagalan, serta dampaknya terhadap proses produksi. Penerapan strategi pemeliharaan yang tepat dapat menurunkan waktu henti peralatan, mengurangi biaya perbaikan berulang, dan menjaga ketersediaan operasi unit pembangkit. Pada kasus Motor *Carbon Dust System*, pengelolaan pemeliharaan yang tidak tepat berpotensi menyebabkan gangguan pada area *slip ring* yang kemudian berdampak pada keandalan generator dan kestabilan suplai listrik.

2.2.5. *Physical Availability (PA)* sebagai Indikator Kinerja Peralatan

Physical Availability (PA) digunakan untuk mengukur tingkat ketersediaan teknis suatu aset berdasarkan waktu operasi aktual dibandingkan dengan total waktu kalender dikurangi waktu berhenti karena perawatan maupun kegagalan. Nilai PA yang tinggi mencerminkan keandalan operasi peralatan serta efektivitas program pemeliharaan. Dalam konteks penelitian ini, PA digunakan sebagai indikator dampak penggantian Motor *Carbon Dust System* terhadap peningkatan kinerja unit generator.

2.2.6. Analisis Risiko Kegagalan Peralatan

Dalam evaluasi kondisi peralatan, metode analisis risiko seperti *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan potensial, dampaknya terhadap sistem, serta prioritas penanganannya. Penilaian dilakukan melalui parameter tingkat keparahan, kemungkinan kejadian, dan kemampuan deteksi. Hasil analisis membantu menentukan komponen kritis yang perlu mendapat tindakan perbaikan atau penggantian untuk menurunkan risiko

gangguan operasi.

2.2.7. Optimalisasi Keandalan melalui Tindakan Penggantian Komponen

Optimalisasi keandalan peralatan dilakukan melalui evaluasi menyeluruh terhadap kondisi komponen yang telah menunjukkan tanda degradasi kinerja dan berpotensi menimbulkan gangguan berulang. Dalam penelitian ini, tindakan penggantian Motor *Carbon Dust System* diposisikan sebagai bagian dari strategi pembaruan aset yang bertujuan menurunkan risiko kegagalan sistem serta meningkatkan efektivitas pengendalian debu *carbon* pada area *slip ring*. Keputusan penggantian tidak hanya didasarkan pada aspek teknis kerusakan, tetapi juga mempertimbangkan dampaknya terhadap nilai *Physical Availability*, potensi *downtime*, dan konsekuensi kehilangan produksi apabila komponen tetap dipertahankan dalam kondisi menurun. Melalui pendekatan tersebut, penggantian komponen diharapkan mampu meningkatkan stabilitas operasi generator, memperkuat keandalan sistem pembangkit, dan mendukung keberlangsungan proses produksi secara lebih aman dan efisien.