

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih menjadi salah satu tulang punggung penyedia energi listrik di Indonesia. Salah satu tipe PLTU yang banyak digunakan di wilayah kepulauan dan daerah khususnya daerah Indonesia Timur dengan ketersediaan batu bara berkalori rendah adalah PLTU chain stoker. PLTU tipe ini bekerja dengan cara membakar batu bara di atas grate yang bergerak (*stoker*) sehingga menghasilkan energi panas untuk mengubah air menjadi uap, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Salah satu pembangkit non BBM yang menopang kebutuhan listrik di sistem Ternate-Tidore yaitu PLTU Tidore. Pembangkit ini memiliki kapasitas sebesar 2 x 7 MW. PLTU Tidore menopang sekitar 35% dari kebutuhan sistem jaringan listrik Ternate-Maitara-Tidore dengan beban puncak sistem saat ini adalah sekitar 36 MW. PLTU Tidore harus tetap dijaga kehandalannya jika sewaktu-waktu sub sistem Ternate-Maitara - Tidore mengalami gangguan/defisit.

PLTU Tidore menggunakan teknologi chain stoker boiler, yaitu metode pembakaran batu bara di atas grate bergerak (*stoker*) yang menghasilkan energi panas untuk mengubah air menjadi uap dan selanjutnya dimanfaatkan untuk memutar turbin guna menghasilkan energi listrik. Dalam operasinya, PLTU chain stoker menghasilkan emisi partikulat yang cukup tinggi akibat pembakaran batu bara. Seperti halnya PLTU lain, PLTU Tidore menghasilkan emisi partikulat yang signifikan akibat pembakaran batu bara. Untuk menjaga agar emisi tetap memenuhi baku mutu lingkungan, digunakanlah *cloth bag filter* sebagai sistem pengendali debu (El *et al.*, 2024). Perangkat ini berfungsi menyaring partikel halus dari gas buang sebelum dilepas ke atmosfer. Saat terjadi kerusakan pada *cloth bag filter*, aliran gas buang yang mengandung partikulat padat tidak dapat difilter dengan baik (Hou *et al.*, 2024). Akibatnya, emisi yang keluar melalui cerobong akan langsung membawa debu batu bara dengan konsentrasi tinggi. Saat hal itu terjadi, PLTU Tidore harus sepenuhnya berhenti beroperasi (*forced outage*) untuk menghindari

pelanggaran batas emisi yang diizinkan oleh pemerintah sekaligus untuk melakukan perbaikan pada *cloth bag filter*.

Zhang *et al.* (2024) menyatakan bahwa umur pakai *bag filter* berbahan dasar PPS (*Polyphenylene Sulfide*) pada pembangkit listrik tenaga uap umumnya jauh lebih pendek dari umur rancangannya akibat komposisi gas buang yang kompleks, khususnya karena pengaruh gabungan antara gas SO₂ dan O₂. Proses oksidasi pada ikatan C–S dalam rantai molekul PPS menyebabkan terbentuknya gugus sulfonat dan degradasi struktur molekul, yang berakibat pada kerusakan permukaan serius dan penurunan kekuatan mekanik filter. Dalam hal ini diketahui bahwa penyebab kegagalan *cloth bag filter* yaitu terpapar reaksi kimia yang menyebabkan umur dari *cloth bag filter* lebih cepat mengalami kerusakan. Dengan begitu, perlunya sistem redundansi *cloth bag filter* untuk mencegah *shutdown* akibat kerusakan material.

Parker Hannifin Corporation (2020) menyatakan bahwa penerapan filter berbasis PPS dengan lapisan membran ePTFE (*expanded polytetrafluoroethylene*) mampu menjaga kestabilan *pressure drop* dan memperpanjang masa pakai filter hingga dua kali lipat dibandingkan filter konvensional. Hal ini menegaskan bahwa efisiensi *cloth bag filter* dijaga melalui optimasi desain sistem redundansi dan kontrol tekanan diferensial yang akurat.

U.S. Environmental Protection Agency (2013) menyatakan bahwa sistem *fabric filter* dapat mencapai efisiensi penyaringan filter lebih dari 99% untuk berbagai ukuran partikel apabila dirancang dan dioperasikan dengan tepat. Namun, pembersihan yang berlebihan (*over-cleaning*) dan pengendalian tekanan yang kurang baik dapat memperbesar risiko kerusakan dari *cloth bag filter* itu sendiri sehingga akan berdampak terhadap operasional pembangkit. Dengan begitu, akan diperlukan sistem redundansi *cloth bag filter* untuk mencegah *shutdown* akibat kerusakan *cloth bag filter*.

Jena *et. al* (2023) menyatakan bahwa tingkat kegagalan *bag filter* mengikuti pola kurva *bathtub*, yang menunjukkan kegagalan awal tinggi akibat cacat desain, kemudian diikuti periode operasi stabil yang panjang, dan peningkatan tajam tingkat kegagalan setelah 10-15 tahun masa pemakaian. Efisiensi *bag filter* juga menurun dari 99,998% menjadi 95,05% selama periode tersebut. Hasil ini

mengindikasikan bahwa seiring waktu, efisiensi sistem bag filter akan menurun akibat degradasi *cloth bag filter* dan penurunan efektivitas pembersihan debu (*pulse-jet cleaning*). Tanpa adanya sistem cadangan atau desain redundansi, kondisi tersebut berpotensi menyebabkan *downtime* berkepanjangan dan penurunan efisiensi pembangkit secara keseluruhan.

Keluarnya PLTU Tidore dari sistem menyebabkan hilangnya kapasitas daya yang sebelumnya dipasok oleh PLTU Tidore. Kekurangan pasokan ini, harus segera digantikan oleh pembangkit lain seperti PLTD (yang lebih boros bahan bakar serta lebih polutif) maupun PLTMG yang memiliki *merit order* / konsumsi bahan bakar per kWh jauh lebih tinggi dibanding dengan PLTU Batubara. Hal tersebut terjadi karena sistem *cloth bag filter* PLTU Tidore saat ini masih menggunakan jalur tunggal. Hal ini menimbulkan kerentanan operasional yang tinggi. Apabila terjadi kerusakan pada *cloth bag filter*, maka PLTU Tidore harus dihentikan (*forced outage*) agar perbaikan dapat dilakukan. Melihat kondisi tersebut, sistem *cloth bag filter* dengan satu jalur di PLTU Tidore dapat dikategorikan sebagai *bottleneck* yang berpotensi menurunkan keandalan dan efisiensi pembangkitan. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis dan perancangan ulang sistem ini dengan menerapkan sistem redundant *cloth bag filter*. Dengan adanya jalur ganda, ketika salah satu jalur mengalami gangguan, PLTU tetap dapat beroperasi dengan jalur cadangan, sementara jalur yang rusak diperbaiki. Dalam kondisi seperti ini menyebabkan PLTU melanggar Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 15 tahun 2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal. Dengan begitu, untuk memenuhi baku mutu lingkungan dan mengurangi dampak polusi udara, digunakanlah sistem pengendali emisi berupa *cloth bag filter*. Perangkat ini berfungsi menyaring partikel halus dari gas buang sehingga emisi yang dilepaskan ke atmosfer tetap berada dalam batas aman.

Keandalan PLTU dipengaruhi oleh pola operasi dan pemeliharaan, baik itu pemeliharaan *preventive* dan *overhaul* (pemeliharaan besar). Pada Tahun 2022 Realiasi kinerja CF PLTU Tidore sampai agustus hanya 50.29% dari target 69.32% dan EAF 78.31% dari target 79.53%. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa material/peralatan yang mengalami penurunan performa dan mempengaruhi kinerja

PLTU Tidore. Untuk menunjang ketercapaian kinerja pembangkit diusulkan pengadaan peningkatan kehandalan PLTU Tidore yang bertujuan untuk meningkatkan kehandalan unit dengan mengganti material yang sudah absolut dan improvement peralatan untuk kehandalan dan efisiensi Pembangkit.

1.2 Perumusan Masalah

Sistem *cloth bag filter* pada PLTU Tidore yang masih menggunakan jalur tunggal menyebabkan unit harus berhenti beroperasi ketika terjadi kerusakan pada *bag filter*, sehingga menurunkan efisiensi pembangkit, meningkatkan risiko *forced outage*, serta berdampak pada kenaikan penggunaan PLTD sebagai pembangkit substitusi. Kondisi ini juga berpotensi menyebabkan pelanggaran baku mutu emisi partikulat. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan kajian mengenai penerapan sistem *redundant cloth bag filter* sebagai solusi peningkatan keandalan dan pengendalian emisi. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kerusakan *cloth bag filter* terhadap efisiensi pembangkit?
2. Bagaimana rancangan sistem *redundant cloth bag filter* dapat diterapkan pada PLTU Tidore untuk mengurangi potensi forced outage akibat kerusakan filter?
3. Sejauh mana penerapan sistem *redundant cloth bag filter* berpengaruh terhadap efisiensi pembangkitan, khususnya dalam mengurangi ketergantungan pada PLTD sebagai pembangkit pengganti?
4. Bagaimana kontribusi sistem *redundant cloth bag filter* dalam menekan dampak lingkungan, khususnya terkait pengendalian emisi partikulat dari PLTU Tidore?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis, merancang, dan mengevaluasi penerapan sistem *redundant cloth bag filter* pada PLTU Tidore sebagai upaya

peningkatan keandalan pembangkitan serta pengendalian emisi. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kerusakan *cloth bag filter* terhadap efisiensi pembangkit pada PLTU Tidore dan menghasilkan output berupa efisiensi yang didapat setelah penerapan sistem redundant.
2. Merancang konsep sistem redundant *cloth bag filter* yang dapat diterapkan pada PLTU Tidore untuk mengurangi risiko forced outage akibat kegagalan filter.
3. Mengevaluasi sejauh mana sistem redundansi *cloth bag filter* dapat meningkatkan efisiensi pembangkitan, khususnya dalam mengurangi ketergantungan pada PLTD sebagai pembangkit pengganti.
4. Menganalisis kontribusi sistem *redundant cloth bag filter* dalam menekan dampak lingkungan, terutama terkait penurunan emisi partikulat dari PLTU Tidore.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik dalam aspek ilmiah maupun praktis yang mendukung pengembangan teknologi pembangkitan listrik, pengendalian emisi, serta peningkatan keandalan sistem. Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Teoretis

- a. Memberikan kontribusi ilmiah mengenai analisis keandalan sistem pengendali emisi pada PLTU, khususnya terkait karakteristik kegagalan *cloth bag filter* dan implikasinya terhadap performa pembangkit.
- b. Memperkaya kajian akademik terkait desain sistem redundansi pada peralatan kritis pembangkit, sehingga dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam bidang keandalan, efisiensi, dan manajemen risiko operasional.
- c. Menyediakan dasar teoretis untuk pengembangan model evaluasi performa bag filter, mencakup aspek efisiensi, umur pakai, dan pengendalian emisi partikulat.

2. Manfaat Praktis

- a. Memberikan rekomendasi teknis bagi PLTU Tidore dalam meningkatkan keandalan operasi melalui penerapan sistem *redundant cloth bag filter* guna mengurangi risiko *forced outage*.
- b. Meminimalkan penggunaan PLTD sebagai pembangkit substitusi, sehingga dapat menurunkan biaya operasi sistem kelistrikan Ternate-Tidore serta mengurangi konsumsi bahan bakar minyak.
- c. Mendukung pemenuhan standar baku mutu emisi dan regulasi lingkungan, sehingga operasional PLTU dapat tetap berkelanjutan dan ramah lingkungan.
- d. Menjadi acuan bagi unit PLTU lain dengan teknologi serupa (*chain stoker boiler*) dalam merencanakan peningkatan keandalan sistem pengendali emisi melalui desain redundansi.
- e. Membantu pengambil kebijakan perusahaan dalam perencanaan investasi peralatan kritis, terutama berdasarkan analisis dampak teknis, operasional, dan lingkungan.

1.5 Originalitas Penelitian

Ringkasan penelitian sebelumnya terkait analisis kinerja PLTU dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti (tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1.	Bing Zhang, Wei Wang, Zhihong Zheng, Jingyun Zhang, Yuekun Lai,	Failure analysis of the PPS-based bag filters in coal-fired power plants: a surface structural evolution insigh	▪ Fokus penelitian yang dilakukan yaitu kerusakan <i>cloth bag filter</i> oleh pengaruh suhu dan bahan kimia sehingga menyebabkan korosi dan degradasi permukaan <i>cloth bag filter</i> .	▪ Penelitian yang dilakukan membahas kegagalan sistem pembangkit yang mana hal ini akan berkaitan dengan indikator kinerja

	Jianying Huang, Hong Cao Weilong Cai (2024)		▪ Fokus penelitian yang dilakukan lebih ke penyebab kegagalan dan bagaimana mencegah melalui perawatan, material, kontrol operasi. ▪ Karakteristik kegagalan material Polyphenylene Sulfide (PPS) pada bag filter di PLTU melalui pendekatan <i>surface structural evolution</i>. ▪ Mengidentifikasi mekanisme degradasi material akibat oksidasi termal, kandungan sulfur, serta interaksi partikel halus pada suhu tinggi.	pembangkit (EAF, MOH, SOF). ▪ Penelitian yang dilakukan membuat desain <i>redundant cloth bag filter</i> agar unit tetap dapat beroperasi saat terjadi kegagalan pada <i>cloth bag filter</i> yang lain ▪ Penelitian yang dilakukan membuat perusahaan utilitas menjadi lebih efisiensi dari segi BPP karena <i>downtime</i> dan MWh loss akibat adanya kegagalan <i>cloth bag filter</i> dapat diminimalisir.
2.	U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1998)	Particulate Matter Controls	▪ Penelitian ini menunjukkan bahwa <i>baghouse filter / cloth bag filter</i> merupakan sistem pengendalian partikulat paling efisien untuk PLTU, dengan efisiensi penghilangan partikulat mencapai 99,9 % bahkan	▪ Penelitian yang dilakukan membahas kegagalan sistem pembangkit yang mana hal ini akan berkaitan dengan indikator kinerja pembangkit (EAF, MOH, SOF).

			untuk debu berukuran <i>submikron</i> ($< 1 \mu\text{m}$) ▪ Kerusakan <i>bag filter</i> pada umumnya disebabkan suhu operasi yang melebihi kapasitas material, terpapar bahan kimia yaitu SO_2, SO_3, HCl, aliran gas yang tidak merata dan partikel kasar. ▪ Sistem <i>baghouse</i> (khususnya tipe <i>pulse-jet</i>) mampu menghilangkan partikel lebih dari 99–99,9%, termasuk PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$.	▪ Penelitian yang dilakukan membuat desain <i>redundant cloth bag filter</i> agar unit tetap dapat beroperasi saat terjadi kegagalan pada <i>cloth bag filter</i> yang lain ▪ Penelitian yang dilakukan membuat perusahaan utilitas menjadi lebih efisiensi dari segi BPP karena <i>downtime</i> dan MWh loss akibat adanya kegagalan <i>cloth bag filter</i> dapat diminimalisir.
3.	Parker Hannifin (2020)	Real World Performance Results of Fabric Filters on Utility Coal-Fired Boilers	▪ Penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan diferensial (<i>pressure drop</i>) merupakan faktor kunci dalam menjaga efisiensi filtrasi dan umur kantong filter. ▪ Penggunaan lapisan ePTFE (<i>expanded polytetrafluoroethylene</i>) mampu menurunkan tekanan diferensial,	▪ Penelitian yang dilakukan membahas kegagalan sistem pembangkit yang mana hal ini akan berkaitan dengan indikator kinerja pembangkit (EAF, MOH, SOF). ▪ Penelitian yang dilakukan membuat desain <i>redundant cloth bag filter</i> agar

			memperpanjang umur filter hingga lebih dari lima tahun Penelitian ini berbasis data PLTU di Amerika Serikat dengan jenis Batubara PRB (<i>Powder River Basin</i>)	unit tetap dapat beroperasi saat terjadi kegagalan pada <i>cloth bag filter</i> yang lain. Penelitian yang dilakukan membuat perusahaan utilitas menjadi lebih efisiensi dari segi BPP karena <i>downtime</i> dan MWh loss akibat adanya kegagalan <i>cloth bag filter</i> dapat diminimalisir. Penelitian dilakukan di PLTU Tidore yang ada di Indonesia yang mana bahan bakarnya merupakan Batubara jenis LRC (<i>Low Rank Coal</i>) yang memiliki kelembapan dan kadar abu yang lebih tinggi sehingga potensi kegagalan pada <i>cloth bag filter</i> lebih tinggi
4.	Madhab C. Jena dkk. (2023)	A Study on Failure Rate, Reliability, and Collection	Adapun objek tempat melakukan penelitian yaitu pabrik semen menunjukkan bahwa	Penelitian yang dilakukan membahas kegagalan sistem pembangkit yang

		Efficiency Trend of Bag Filters in a Cement Plant	tingkat kegagalan (failure rate) mengikuti pola klasik <i>bathtub curve</i>, yaitu tinggi di awal operasi, menurun dan stabil pada masa pertengahan operasi, dan naik tajam pada akhir umur <i>cloth bag filter</i>. Yang mana ini berarti terjadi penurunan kemampuan <i>cloth bag filter</i> dalam menahan partikel debu Penelitian Madhab et al. (2023) menghasilkan dua kurva keandalan empiris (<i>Bathtub Curve</i> dan <i>Madhab's Hat Curve</i>) yang menggambarkan pola kegagalan dan reliabilitas bag filter selama umur pakainya.	mana hal ini akan berkaitan dengan indikator kinerja pembangkit (EAF, MOH, SOF). . Penelitian dilakukan terhadap PLTU, terutama tipe stoker dan bersifat solutif (menghasilkan desain baru <i>cloth bag filter</i> dan strategi mitigasi/antisipasi kegagalan peralatan)
--	--	---	--	---