

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Sebagai pendukung pengerjaan penelitian ini penulis mencantumkan beberapa referensi penelitian sebelumnya yang sejenis dengan penelitian kali ini:

1. Sun, H., Wang, Y., Zhong, J., dan Guan, K. (2025), "*Failure Analysis of Corrosion Perforation of Heat Exchanger Plate*," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 25, no. 2, hlm. 885–893.

Penelitian ini menganalisis kegagalan pelat PHE berbahan *stainless steel* 316 yang mengalami kebocoran akibat perforasi. Pengujian yang dilakukan meliputi inspeksi visual, analisis mikrostruktur, serta pengujian SEM dan EDS untuk mengidentifikasi produk korosi. Hasil penelitian menunjukkan adanya penumpukan *fouling* pada sisi fluida pendingin yang berkaitan dengan munculnya *pitting corrosion*. Analisis komposisi menunjukkan keberadaan ion klorida (Cl^-) yang merusak lapisan pasif material sehingga memicu terbentuknya lubang pada pelat. Selain itu, desain aliran pada pelat juga mempengaruhi akumulasi *deposit* yang mempercepat korosi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kegagalan terjadi akibat kombinasi *fouling*, *pitting corrosion*, dan kondisi operasi yang tidak optimal.

2. Ali, M., Raza, A., Khan, M., dan Ahmed, S. (2021), "*Corrosion-Related Failures in Heat Exchangers*," *Corrosion Reviews*, vol. 39, no. 6, hlm. 519–546.

Penelitian ini merupakan studi literatur yang membahas berbagai mekanisme kegagalan *heat exchanger* akibat korosi. Jenis korosi yang dibahas meliputi *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, *stress corrosion cracking* (SCC), *erosion corrosion*, serta *uniform corrosion*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan zat korosif dalam fluida seperti ion klorida, oksigen, dan senyawa sulfur menjadi faktor utama penyebab kegagalan. Selain itu, kondisi operasi seperti temperatur tinggi, aliran fluida yang tidak stabil, serta pemilihan material yang kurang tepat juga mempercepat terjadinya degradasi material. Penelitian ini menegaskan bahwa korosi merupakan penyebab utama kegagalan *heat exchanger* sehingga diperlukan pengendalian kualitas fluida dan kondisi operasi.

3. Čarnogurská, M. (2020), "*Analysis of the Plate Heat Exchanger Failure*," *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, vol. 6, Issue no. 1.

Penelitian ini membahas kegagalan PHE akibat fenomena *hydraulic impact* yang terjadi selama operasi. Analisis dilakukan menggunakan metode numerik untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada pelat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lonjakan tekanan akibat aliran fluida yang tidak stabil dapat menyebabkan tegangan melebihi batas kekuatan material, khususnya pada sambungan pelat. Dalam kondisi tertentu, tekanan total dalam sistem dapat melampaui batas desain sehingga menyebabkan deformasi dan kerusakan struktural. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kestabilan tekanan operasi sangat penting untuk menjaga keandalan PHE.

4. Moschogianni, E. (2023), "*Failure Mechanism in Heat Exchangers*," *Diploma Thesis, University of Thessaly, Greece*.

Penelitian ini mengkaji berbagai mekanisme kegagalan pada *heat exchanger* yang meliputi kegagalan akibat korosi, mekanik, serta *fouling*. Analisis menunjukkan bahwa kegagalan *heat exchanger* umumnya disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor seperti kondisi operasi, kualitas fluida, serta pemilihan material. Mekanisme kegagalan yang dominan meliputi *pitting corrosion*, *stress corrosion cracking*, *erosion*, dan *thermal fatigue*. Selain itu, *fouling* juga berperan dalam menurunkan efisiensi perpindahan panas dan mempercepat degradasi material. Penelitian ini memberikan gambaran umum mengenai hubungan antara kondisi operasi dan kerusakan material pada *heat exchanger*.

5. Khodamorad, S.H., Alinezhad, N., Haghshenas Fatmehsari, D., dan Ghahtan, K. (2016), "*Stress Corrosion Cracking in Type 316 Plates of a Heat Exchanger*," *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, vol. 5–6, hlm. 59–66.

Penelitian ini menganalisis kegagalan pelat PHE berbahan *stainless steel* 316 akibat *stress corrosion cracking* (SCC). Pengujian dilakukan melalui inspeksi visual, analisis mikrostruktur, SEM, serta pengujian komposisi kimia fluida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa retakan terjadi pada area *gasket* akibat kombinasi tegangan mekanis dan lingkungan korosif yang mengandung ion klorida dan sulfida. Selain itu, ditemukan bahwa *pitting corrosion* menjadi titik awal terbentuknya retakan yang kemudian

berkembang menjadi kegagalan struktural. Penelitian ini menyimpulkan bahwa interaksi antara tegangan dan lingkungan korosif merupakan faktor utama penyebab kegagalan material pada *heat exchanger*.

2.1.1 Sintesis Kritis dan Matriks *Research Gap*

Penelitian terdahulu telah menunjukkan peran klorida, *deposit*, tegangan, dan kondisi hidraulik terhadap kegagalan PHE. Namun, sebagian besar studi berfokus pada satu mekanisme atau satu kelompok pengujian. Matriks berikut memperlihatkan posisi penelitian ini terhadap studi terdahulu.

Tabel 2. 1 Matriks *Research Gap* Penelitian Kegagalan Pelat PHE

Penelitian	Objek dan metode utama	Temuan utama	Keterbatasan terhadap kasus ini	Kontribusi penelitian ini
Sun dkk.[13]	<i>Plate Heat Exchanger</i> SS 316; inspeksi visual, mikrostruktur, SEM-EDS	<i>Fouling</i> dan Cl^- memicu <i>pitting corrosion</i> hingga perforasi	Belum mengaitkan hasil kegagalan dengan RCA dan FMEA	Mengintegrasikan karakterisasi material, data CCW, kondisi operasi, RCA, FTA, dan FMEA pada suatu kejadian aktual
Ali dkk[5].	<i>Heat Exchanger</i> secara umum; analisis data mikro (SEM, EDS, CFD)	Korosi (sumuran dan erosi) dipicu oleh cacat fabrikasi, pemilihan material yang salah, dan kimia air yang buruk	Hanya mencakup kegagalan terkait korosi, didominasi oleh studi kasus tipe <i>shell and tube</i> , tidak spesifik pada PHE sistem <i>lube oil cooler</i>	Menerapkan integrasi karakterisasi material, data CCW, dan RCA–FTA–FMEA secara khusus pada kasus PHE <i>lube oil cooler</i> , yang tidak dibahas secara spesifik oleh Ali

				dkk
Čarnogurská [12]	<i>Plate Heat Exchanger tipe SWEEP IC 5 x 20;</i> Analisis numerik (COSMOS/M, ANSYS), perhitungan analitis <i>water hammer</i> , pengukuran makroskopis	<i>Hydraulic impact (water hammer)</i> menyebabkan tegangan berlebih pada sambungan solder yang memicu deformasi plastik dan kerusakan struktural	Properti mekanik solder spesifik tidak diketahui, keterbatasan frekuensi pemindaian alat ukur tekanan; hanya fokus pada satu tipe unit PHE	Membedakan kegagalan akibat korosi lokal dari skenario <i>hydraulic impact</i> dengan membatasi beda tekanan hanya sebagai penentu arah kebocoran setelah perforasi
Moschogianni [6]	<i>Heat Exchanger</i> secara umum; kajian literatur, eksperimen lab (visual, metalografi, microhardness), instrumen lanjut (SEM, EDX, XRD)	Kegagalan dipengaruhi oleh mekanik, korosi kimia (terutama sumuran), <i>fouling, erosion</i> , dan <i>thermal fatigue</i>	Masih bersifat umum dan tidak spesifik pada SUS 316 PHE, mengakui kompleksitas mekanisme korosi sumuran yang belum sepenuhnya dipahami	Menerapkan kerangka kegagalan umum pada satu kasus aktual PHE SUS 316 melalui integrasi visual, ketebalan, PMI-OES, metalografi, SEM-EDS, kekerasan, dan data operasi
Khodamorad dkk. [4]	<i>Plate Heat Exchanger SS 316</i> Analisis termal (<i>thermo-scan</i>), inspeksi visual, mikroskopi (optik & SEM-EDS), pengukuran kimia	SCC akibat penumpukan ion klorida/sulfida di celah pelat-gasket, dipercepat oleh suhu tinggi dan penguapan air servis, <i>pitting</i>	Ketergantungan pada estimasi konsentrasi ion lokal di celah, kegagalan dipicu oleh tindakan darurat (<i>non-standard operation</i>) seperti	Mengevaluasi kemungkinan SCC, tetapi menurunkan statusnya menjadi belum terkonfirmasi karena tidak ditemukan bukti

	air	menjadi titik awal retak	penyiraman air servis	retak langsung pada spesimen
Penelitian ini	PHE <i>lube oil cooler</i> ; visual, <i>thickness</i> , PMI-OES, metalografi, SEM-EDS, kekerasan, RCA, FTA, FMEA	Menentukan mekanisme dominan dan prioritas mitigasi	Belum mencakup evaluasi umur sisa (<i>remaining life assessment</i>) dan prediksi laju korosi secara kuantitatif.	Korelasi terintegrasi pada unit dan riwayat operasi yang sama

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)



Gambar 2. 1 PLTGU Muara Karang

(Sumber: <https://www.kebumenekspress.com/2021/03/turbin-uap-pltgu-muara-karang-perkuat.html>)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggabungkan dua sistem pembangkitan, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), dalam satu sistem terpadu untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi panas [1], [2]. Pada sistem ini, energi panas hasil pembakaran bahan bakar tidak langsung dibuang, melainkan dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan energi

listrik tambahan.

Secara umum, PLTGU berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dalam kapasitas besar dengan efisiensi yang tinggi serta tingkat emisi yang lebih rendah dibandingkan pembangkit berbasis bahan bakar padat. Oleh karena itu, PLTGU banyak digunakan sebagai pembangkit beban dasar (*base load*) maupun beban menengah dalam sistem ketenagalistrikan [2].

Prinsip kerja PLTGU diawali dari proses kompresi udara oleh kompresor, kemudian udara tersebut dicampur dengan bahan bakar dan dibakar di dalam ruang bakar (*combustion chamber*) sehingga menghasilkan gas panas bertekanan tinggi. Gas hasil pembakaran tersebut digunakan untuk memutar turbin gas yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Gas buang dari turbin gas masih memiliki temperatur yang tinggi, sehingga dimanfaatkan kembali pada *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk menghasilkan uap [1].

Uap yang dihasilkan dari HRSG kemudian digunakan untuk memutar turbin uap yang juga terhubung dengan generator, sehingga menghasilkan tambahan energi listrik. Setelah melewati turbin uap, uap dikondensasikan kembali menjadi air dan dialirkan kembali ke HRSG, sehingga membentuk siklus tertutup [1], [2].

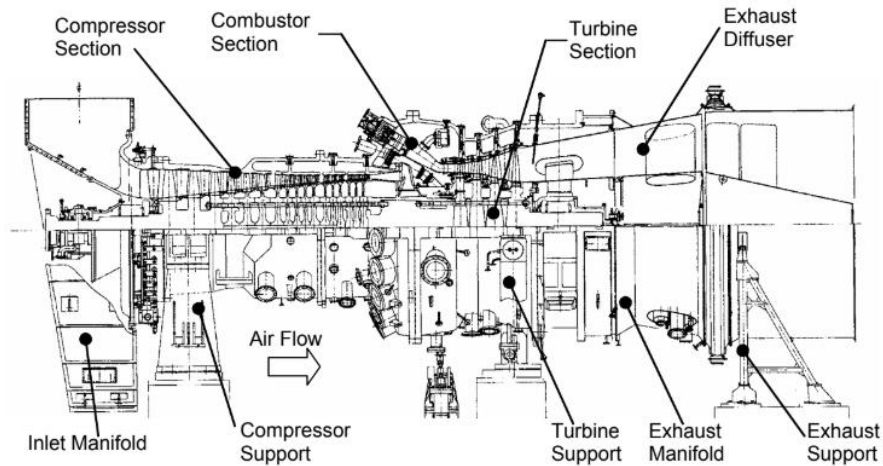
Dalam proses pembangkitan, PLTGU menggunakan dua siklus utama, yaitu:

- Siklus *Brayton* (Turbin Gas): Siklus ini terjadi pada turbin gas, dimana udara dikompresi oleh kompresor, kemudian dipanaskan melalui proses pembakaran di dalam *combustion chamber*, dan selanjutnya diekspansikan pada turbin untuk menghasilkan energi mekanik.
- Siklus *Rankine* (Turbin Uap): Siklus ini terjadi pada turbin uap, dimana air dipanaskan di dalam HRSG hingga menjadi uap, kemudian uap digunakan untuk memutar turbin uap. Setelah itu, uap dikondensasikan kembali menjadi air untuk digunakan ulang dalam siklus tertutup.

Keunggulan utama PLTGU antara lain memiliki efisiensi termal yang tinggi, dapat mencapai lebih dari 50%, serta memiliki fleksibilitas operasi yang baik dibandingkan pembangkit konvensional. Selain itu, penggunaan bahan bakar gas menghasilkan emisi yang lebih rendah sehingga lebih ramah lingkungan. Dengan kombinasi kedua siklus tersebut, PLTGU mampu memanfaatkan energi secara lebih

optimal dan meningkatkan keandalan sistem pembangkitan listrik [1], [2].

2.2.2 Komponen Utama PLTG



Gambar 2. 2 *Longitudinal Section* Turbin Gas

(Sumber: *Manual Book* Mitsubishi PLTGU UP Muara Karang, 2.1 Gas Turbine Overview, hlm. 1)

1. Kompresor (*Compressor*)

Kompresor berfungsi untuk menghisap dan memampatkan udara dari lingkungan sehingga tekanan dan temperatur udara meningkat sebelum masuk ke ruang bakar. Udara yang telah dikompresi akan digunakan sebagai media utama dalam proses pembakaran. Kompresor pada turbin gas umumnya terdiri dari beberapa tahap (*stage*) yang tersusun secara aksial, dimana setiap tahap berfungsi meningkatkan tekanan udara secara bertahap hingga mencapai kondisi yang dibutuhkan untuk proses pembakaran [1], [2].

2. Ruang Bakar (*Combustion Chamber*)

Ruang bakar merupakan tempat terjadinya proses pembakaran antara udara bertekanan tinggi dengan bahan bakar. Proses pembakaran ini menghasilkan gas panas dengan temperatur dan tekanan tinggi. Gas hasil pembakaran tersebut kemudian digunakan sebagai fluida kerja untuk memutar turbin gas. Proses pembakaran harus berlangsung stabil agar menghasilkan energi yang optimal serta menjaga keandalan sistem turbin gas [1], [2].

3. Turbin Gas (*Gas Turbine*)

Turbin gas berfungsi untuk mengubah energi panas dari gas hasil pembakaran

menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Gas panas yang dihasilkan dari ruang bakar akan diekspansikan melalui sudu turbin sehingga menghasilkan gaya yang menyebabkan turbin berputar. Putaran ini digunakan untuk menggerakkan kompresor serta generator. Bagian turbin terdiri dari rotor (bagian berputar) dan stator (bagian diam) yang bekerja secara bersamaan dalam proses konversi energi [1], [2].

4. Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Putaran poros turbin akan memutar rotor di dalam generator sehingga menghasilkan medan magnet yang menginduksi arus listrik pada stator. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan ke sistem jaringan listrik [1], [2].

2.2.3 Sistem Pelumasan Turbin Gas

Sistem pelumasan (*lube oil system*) merupakan salah satu sistem pendukung pada turbin gas yang berfungsi untuk melumasi komponen-komponen yang bergerak, terutama *bearing* (bantalan) dan poros. Dalam kondisi operasinya, komponen seperti *bearing* dan poros mengalami beban gesek yang signifikan akibat pergerakan kontinu. Selain itu, gesekan yang terjadi juga menyebabkan peningkatan temperatur pada komponen tersebut. Oleh karena itu, sistem pelumasan diperlukan untuk menjaga keandalan operasi serta memastikan komponen tetap bekerja dalam kondisi yang aman dan optimal. Adapun sistem pelumasan turbin gas berfungsi untuk:

- Mengurangi gesekan antar komponen yang bergerak.
- Mendinginkan komponen, khususnya pada area *bearing*.
- Membawa partikel kotoran agar tidak merusak permukaan komponen.
- Menjaga kestabilan operasi serta memperpanjang umur pakai komponen.

Secara umum, sistem pelumasan turbin gas terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu [16]:

1. *Main Lube Oil Pump*

Main lube oil pump merupakan pompa utama yang berfungsi untuk mensirkulasikan minyak pelumas dari *reservoir* menuju *bearing* turbin. Pompa ini memastikan aliran pelumas tetap tersedia secara kontinu selama turbin

beroperasi, sehingga proses pelumasan dapat berlangsung secara optimal.

2. *Emergency Lube Oil Pump*

Emergency lube oil pump berfungsi sebagai pompa cadangan yang akan bekerja ketika pompa utama mengalami gangguan, seperti saat terjadi pemadaman listrik atau kegagalan sistem. Keberadaan pompa ini sangat penting untuk menjaga kontinuitas suplai pelumas dan mencegah kerusakan pada *bearing* akibat terhentinya aliran pelumas.

3. *Lube Oil Filter*

Lube oil filter berfungsi untuk menyaring minyak pelumas dari kontaminan atau partikel kotoran yang terbawa selama proses pelumasan. Penyaringan ini bertujuan untuk menjaga kualitas minyak pelumas agar tetap memenuhi standar operasi dan tidak merusak permukaan komponen.

4. *Lube Oil Cooler*

Lube oil cooler berfungsi untuk menurunkan temperatur minyak pelumas setelah menyerap panas dari komponen yang dilumasi. Pendinginan dilakukan menggunakan *heat exchanger*, sehingga temperatur pelumas dapat kembali ke kondisi operasi yang diizinkan.

5. *Lube Oil Reservoir*

Lube oil reservoir merupakan tempat penampungan minyak pelumas sebelum dan sesudah digunakan. Selain sebagai penyimpanan, *reservoir* juga berfungsi untuk mengendapkan kotoran serta memisahkan gas yang terlarut dalam minyak sebelum disirkulasikan kembali ke sistem.

Minyak pelumas yang telah digunakan akan kembali ke tangki setelah melewati komponen yang dilumasi, kemudian disirkulasikan kembali melalui pompa, *filter*, dan komponen lainnya dalam suatu sistem tertutup. Keandalan sistem pelumasan sangat berpengaruh terhadap kinerja turbin gas, karena gangguan pada sistem ini dapat menyebabkan peningkatan gesekan, keausan, hingga kerusakan pada komponen utama.

2.2.4 *Lube Oil Cooler Pada Turbin Gas*

Lube oil cooler merupakan salah satu komponen dalam sistem pelumasan turbin gas yang berfungsi untuk menjaga temperatur minyak pelumas agar tetap

berada dalam batas operasi yang diizinkan. Selama proses pelumasan, minyak pelumas menyerap panas dari komponen seperti *bearing* dan poros, sehingga temperatur minyak akan meningkat. Apabila temperatur ini tidak dikendalikan, maka dapat menurunkan viskositas minyak pelumas dan mengurangi efektivitas pelumasan.

Prinsip kerja *lube oil cooler* adalah memindahkan panas dari minyak pelumas ke fluida pendingin melalui suatu media perpindahan panas tanpa terjadi pencampuran antara kedua fluida. Fluida pendingin yang digunakan umumnya berupa air, baik air laut maupun air tawar, tergantung pada sistem pendingin yang digunakan pada pembangkit.

Secara umum, *lube oil cooler* terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu:

1. *Inlet dan Outlet Minyak Pelumas (Oil Inlet–Outlet)*

Berfungsi sebagai jalur masuk dan keluar minyak pelumas yang akan didinginkan dan yang telah mengalami proses pendinginan.

2. *Inlet dan Outlet Fluida Pendingin (Cooling Water Inlet–Outlet)*

Berfungsi sebagai jalur aliran fluida pendingin yang digunakan untuk menyerap panas dari minyak pelumas.

3. *Casing atau Frame*

Merupakan bagian luar yang berfungsi sebagai penopang dan pelindung komponen internal serta menjaga agar tidak terjadi kebocoran selama proses operasi.

4. *Media Perpindahan Panas*

Merupakan bagian utama yang berfungsi sebagai tempat terjadinya perpindahan panas antara minyak pelumas dan fluida pendingin. Pada sistem turbin gas *modern*, media ini umumnya menggunakan PHE.

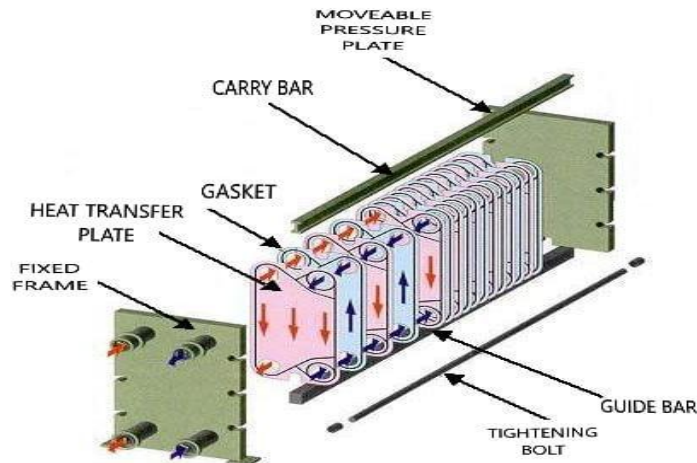
Dalam operasinya, minyak pelumas yang bersuhu tinggi dialirkan ke dalam *lube oil cooler* dan didinginkan oleh fluida pendingin melalui media perpindahan panas. Setelah temperatur minyak pelumas turun hingga mencapai kondisi yang diizinkan, minyak tersebut kemudian disirkulasikan kembali ke sistem pelumasan.

Kinerja *lube oil cooler* sangat dipengaruhi oleh kondisi fluida, kualitas pendingin, serta kondisi permukaan perpindahan panas. Gangguan pada komponen

ini dapat menyebabkan peningkatan temperatur pelumas, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan performa sistem pelumasan dan keandalan turbin gas. Oleh karena itu, *lube oil cooler* memiliki peranan penting dalam menjaga kestabilan operasi turbin gas.

2.2.5 Plate Heat Exchanger (PHE)

Gambar 2. 3 Komponen *Plate Heat Exchanger*



(Sumber: <https://primahandal.com/konstruksi-plate-heat-exchanger/>)

PHE merupakan alat penukar panas yang menggunakan pelat-pelat logam tipis sebagai media perpindahan panas antara dua fluida yang memiliki temperatur berbeda. Pada sistem *lube oil cooler* turbin gas, PHE digunakan untuk menurunkan temperatur minyak pelumas dengan memanfaatkan fluida pendingin tanpa terjadi pencampuran antara kedua fluida.

Prinsip kerja PHE adalah memanfaatkan perpindahan panas secara konduksi melalui pelat dan konveksi pada fluida. Fluida panas dan fluida dingin dialirkan secara bergantian melalui celah antar pelat, sehingga terjadi pertukaran panas yang efisien akibat perbedaan temperatur.

Berdasarkan *manual book* HISAKA [9], konstruksi PHE terdiri dari beberapa komponen utama sebagai berikut:

1. Pelat (*Plate*)

Pelat merupakan komponen utama tempat terjadinya perpindahan panas. Pelat didesain bergelombang (*corrugated plate*) untuk meningkatkan luas permukaan dan turbulensi aliran fluida sehingga efisiensi perpindahan panas meningkat. Selain itu,

pelat juga memiliki lubang aliran (*port holes*) yang berfungsi sebagai jalur distribusi fluida .

2. *Gasket*

Gasket berfungsi sebagai penyekat antar pelat untuk mencegah kebocoran serta mengarahkan aliran fluida sesuai jalur yang diinginkan. *Gasket* dipasang pada alur pelat dan berperan penting dalam menjaga pemisahan antara fluida panas dan fluida dingin.

3. Rangka PHE (*Frame*)

Frame terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu:

- *S-frame (Stationary frame)* sebagai rangka tetap
- *E-frame (Movable frame)* sebagai rangka yang dapat digeser untuk proses perawatan

Frame berfungsi sebagai penopang seluruh susunan pelat serta menjaga kekuatan dan kestabilan struktur PHE selama operasi.

4. *Guide bar* dan *Support Column*

Guide bar (batang penuntun) dan *support column* berfungsi untuk menopang serta menjaga posisi pelat agar tetap sejajar dan tersusun dengan baik selama proses pemasangan maupun operasi .

5. *Tightening Bolt (Tie Bolt)*

Tightening bolt berfungsi untuk mengikat dan menekan susunan pelat sehingga membentuk sistem yang rapat. Kekencangan baut ini sangat mempengaruhi kerapatan sistem dan mencegah kebocoran fluida .

6. *Nozzle (Inlet dan Outlet Fluida)*

Nozzle merupakan saluran masuk dan keluar fluida yang terhubung dengan sistem perpipaan. Fluida panas dan fluida dingin masuk melalui *nozzle* yang berbeda dan mengalir melalui jalur yang telah ditentukan dalam susunan pelat.

Dalam operasinya, fluida panas dan fluida dingin mengalir secara berselang-seling di antara pelat (*A-plate* dan *B-plate*), sehingga membentuk jalur aliran yang terpisah namun saling berdekatan. Konfigurasi ini memungkinkan perpindahan panas yang tinggi dengan luas permukaan yang besar dalam volume yang relatif kecil.

Keunggulan utama PHE antara lain efisiensi perpindahan panas yang tinggi, desain yang kompak, serta kemudahan dalam perawatan karena pelat dapat dibongkar dan dibersihkan. Namun demikian, PHE memiliki keterbatasan seperti sensitivitas terhadap kualitas fluida dan potensi kebocoran pada *gasket* maupun pelat.

Dalam aplikasinya pada sistem *lube oil cooler*, kinerja PHE sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, kualitas fluida, serta kondisi permukaan pelat. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konstruksi dan prinsip kerja PHE menjadi dasar penting dalam melakukan analisis kegagalan material pada komponen ini.

2.2.6 Material Plate Heat Exchanger

1. Material yang Umum Digunakan

Material pada PHE terutama digunakan pada bagian pelat (*plate*) dan *gasket*. Material pelat harus memiliki ketahanan terhadap korosi, kemampuan perpindahan panas yang baik, serta kekuatan mekanik yang memadai untuk menahan tekanan fluida selama operasi. Berdasarkan manual HISAKA, material pelat umumnya menggunakan logam dengan ketahanan korosi tinggi seperti *stainless steel*, titanium, dan material khusus lainnya tergantung kondisi fluida .

Material yang digunakan pada PHE harus memenuhi beberapa kriteria utama, antara lain:

- Tahan terhadap korosi akibat fluida kerja (*corrosion resistance*).
- Memiliki konduktivitas termal yang baik (*thermal conductivity*).
- Memiliki kekuatan mekanik yang cukup (*mechanical strength*).
- Tahan terhadap *fouling* dan *deposit*.
- Mampu bekerja pada temperatur dan tekanan operasi.

Beberapa material yang umum digunakan pada pelat PHE ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. 2 Standar Material *Plate Heat Exchanger*

Material	Komposisi Utama	Kelebihan	Kelemahan
SS 304 (<i>Stainless Steel 304</i>)	18–20% Cr, 8–10,5% Ni	Tahan korosi umum, harga relatif ekonomis	Rentan terhadap <i>pitting corrosion</i> pada lingkungan

			klorida
SS 316 (<i>Stainless Steel 316</i>)	16 – 18% Cr, 10 – 14% Ni, 2 – 3% Mo	Ketahanan korosi lebih baik, terutama terhadap klorida	Harga lebih mahal dibanding SS304
Titanium	Ti > 99% (<i>plus alloying elements</i> jika ada)	Sangat tahan korosi, cocok untuk air laut	Biaya sangat tinggi
Hastelloy	Ni-based alloy (Ni > 50%), Mo 15–17%, Cr 15–17%)	Ketahanan sangat tinggi terhadap korosi kimia	Biaya sangat mahal

2. Sifat Material yang Dibutuhkan

Material pelat pada PHE harus memiliki karakteristik sebagai berikut:

- *Corrosion Resistance*: Kemampuan material untuk menahan reaksi kimia dengan fluida, terutama pada lingkungan yang mengandung ion klorida atau zat korosif lainnya.
- *Thermal Conductivity*: Kemampuan material dalam menghantarkan panas, yang mempengaruhi efisiensi perpindahan panas pada PHE.
- *Mechanical Strength*: Kekuatan material dalam menahan tekanan fluida dan beban mekanik selama operasi.
- *Fouling Resistance*: Ketahanan terhadap penumpukan *deposit* yang dapat mengurangi efektivitas perpindahan panas.
- *Fatigue Resistance*: Kemampuan material menahan beban siklik akibat perubahan tekanan dan temperatur selama operasi.

3. Faktor yang Mempengaruhi Kegagalan Material

Material pelat pada PHE dapat mengalami degradasi akibat beberapa faktor utama, yaitu:

- *Korosi (Corrosion)*: Reaksi kimia antara material dengan fluida kerja, terutama pada lingkungan yang mengandung ion klorida yang dapat menyebabkan *pitting corrosion* atau *crevice corrosion*.
- *Fouling dan Deposit*: Penumpukan kotoran pada permukaan pelat yang dapat menghambat perpindahan panas serta mempercepat terjadinya korosi.

- Erosi (*Erosion*): Aliran fluida dengan kecepatan tinggi yang membawa partikel dapat menyebabkan penipisan material pelat.
- Kelelahan Material (*Fatigue*): Tegangan berulang akibat fluktuasi tekanan dan temperatur dapat menyebabkan retak pada material.
- Kondisi Operasi: Temperatur tinggi, tekanan, serta kualitas fluida sangat mempengaruhi umur pakai material.

Pemahaman terhadap mekanisme kegagalan material pada PHE sangat penting dalam menentukan strategi pemilihan material, desain operasi, serta program pemeliharaan. Analisis faktor-faktor ini menjadi dasar dalam mengidentifikasi penyebab kegagalan aktual pada PHE serta dalam upaya meningkatkan keandalan sistem, khususnya pada aplikasi *lube oil cooler* turbin gas.

2.2.7 Gambaran Umum dan Standar Material SUS 316

Pelat PHE pada sistem *lube oil cooler* umumnya membutuhkan material yang memiliki ketahanan korosi, kekuatan mekanik, dan kestabilan terhadap perubahan temperatur operasi. Salah satu material yang digunakan adalah SUS 316, yaitu baja tahan karat austenitik yang mengandung unsur utama Fe, Cr, Ni, dan Mo. Pada material ini, Cr berperan dalam membentuk lapisan pasif, Ni menstabilkan struktur austenitik, sedangkan Mo meningkatkan ketahanan terhadap korosi lokal pada lingkungan yang mengandung ion klorida.

Ketahanan korosi SUS 316 terutama berasal dari lapisan pasif (*passive film*), yaitu lapisan oksida tipis yang terbentuk pada permukaan baja tahan karat dan berfungsi menghambat kontak langsung antara logam dasar dengan lingkungan korosif. Lapisan pasif ini didominasi oleh oksida kromium, sehingga keberadaan Cr menjadi faktor penting dalam menjaga ketahanan korosi material. Dengan adanya Mo, SUS 316 memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi lokal dibandingkan baja tahan karat austenitik tanpa Mo.

Meskipun memiliki lapisan pasif, SUS 316 tidak sepenuhnya kebal terhadap korosi. Pada lingkungan yang mengandung ion klorida, lapisan pasif dapat mengalami kerusakan setempat. Kondisi ini lebih mudah terjadi pada daerah celah, area bawah *deposit*, atau zona stagnan karena pertukaran fluida dan oksigen menjadi

terbatas. Akibatnya, konsentrasi ion klorida pada area lokal dapat meningkat dan memicu terbentuknya *pitting corrosion* maupun *crevice corrosion* [7].

Ketahanan material terhadap *pitting corrosion* dapat diperkirakan menggunakan *Pitting Resistance Equivalent Number* (PREN), yaitu angka pendekatan untuk menilai kemampuan baja tahan karat dalam menahan *pitting corrosion*. PREN berkaitan langsung dengan komposisi material, terutama kandungan Cr, Mo, dan N. Persamaan PREN yang umum digunakan adalah:

$$[\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3(\% \text{Mo}) + 16(\% \text{N})]$$

Apabila kandungan nitrogen tidak tersedia, maka persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$[\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3(\% \text{Mo})]$$

Semakin tinggi nilai PREN, maka ketahanan material terhadap *pitting corrosion* cenderung meningkat. Namun, PREN hanya menunjukkan kecenderungan berdasarkan komposisi material, bukan jaminan bahwa material tidak akan mengalami korosi. Dalam operasi PHE, kondisi aktual seperti konsentrasi ion klorida, temperatur, pH, *deposit*, geometri celah, dan kecepatan aliran tetap menentukan kestabilan lapisan pasif [8], [10].

Hubungan antara ion klorida dan ketahanan SUS 316 dapat dijelaskan melalui analisis ambang klorida (*chloride threshold analysis*), yaitu penilaian terhadap batas kondisi lingkungan yang masih dapat ditahan oleh material sebelum terjadi korosi lokal. Nilai ambang klorida tidak bersifat tetap karena dipengaruhi oleh temperatur, pH, oksigen terlarut, kecepatan aliran, dan keberadaan *deposit*. Pada area celah atau bawah *deposit*, konsentrasi klorida lokal dapat lebih tinggi dibandingkan konsentrasi klorida pada fluida utama. Oleh karena itu, pelat PHE SUS 316 tetap dapat mengalami korosi lokal meskipun hasil komposisi material menunjukkan kesesuaian dengan standar.

Secara elektrokimia, proses kegagalan diawali ketika ion klorida mengganggu kestabilan lapisan pasif pada permukaan SUS 316. Area yang lapisan pasifnya rusak akan berperan sebagai daerah anodik, sedangkan area sekitar yang masih pasif berperan sebagai daerah katodik. Perbedaan kondisi elektrokimia tersebut menyebabkan pelarutan logam berlangsung secara lokal. Jika proses ini berlanjut, pit

akan tumbuh semakin dalam, menyebabkan penipisan lokal, dan akhirnya dapat menghasilkan perforasi pada pelat PHE[7].

Dengan demikian, pembahasan material SUS 316 pada penelitian ini tidak hanya digunakan untuk menjelaskan komposisi material, tetapi juga untuk menunjukkan hubungan antara komposisi, lapisan pasif, pengaruh ion klorida, nilai PREN, dan mekanisme elektrokimia yang dapat menyebabkan kegagalan pelat PHE. Alur ini menjadi dasar untuk mengevaluasi apakah kegagalan lebih dominan disebabkan oleh ketidaksesuaian material atau oleh kondisi lingkungan dan operasi.

2.2.8 Mekanisme Kegagalan *Plate Heat Exchanger*

Mekanisme kegagalan pelat PHE berbahan SUS 316 pada sistem *lube oil cooler* perlu dijelaskan secara berurutan dari faktor pemicu, mekanisme kerusakan, hingga akibat akhir berupa perforasi. Pada penelitian ini, mekanisme utama diarahkan pada korosi lokal yang dipengaruhi oleh ion klorida, *deposit* atau *fouling*, dan geometri celah pada pelat PHE. Agar pembahasan lebih terstruktur, mekanisme kegagalan pelat PHE dijelaskan dalam beberapa bagian berikut[7].

a. Kerusakan lapisan pasif (*passive film*)

SUS 316 memiliki lapisan pasif yang berfungsi melindungi permukaan material dari reaksi korosi. Namun, lapisan pasif tersebut dapat mengalami kerusakan apabila permukaan pelat PHE terpapar ion klorida, terutama pada area yang mengalami *deposit*, celah, atau aliran stagnan. Kerusakan lapisan pasif menjadi tahap awal yang memungkinkan terjadinya korosi lokal pada pelat PHE.

b. Korosi sumuran (*pitting corrosion*)

Korosi sumuran (*pitting corrosion*) merupakan korosi lokal yang membentuk lubang kecil pada permukaan material. Pada pelat PHE berbahan SUS 316, *pitting corrosion* dapat terjadi setelah lapisan pasif rusak secara setempat akibat pengaruh ion klorida. Area yang rusak menjadi lebih aktif secara elektrokimia dan mulai mengalami pelarutan logam. Pit yang terbentuk dapat berkembang semakin dalam karena bagian dalam pit cenderung menjadi lebih asam dan kaya ion klorida. Kerusakan ini berbahaya karena ukurannya dapat terlihat kecil di permukaan, tetapi berkembang ke arah ketebalan pelat hingga menyebabkan penipisan lokal.

c. Korosi celah (*crevice corrosion*)

Korosi celah (*crevice corrosion*) merupakan korosi lokal yang terjadi pada daerah celah sempit, seperti area *gasket*, titik kontak antar pelat PHE, atau daerah aliran yang stagnan. Pada area tersebut, pertukaran fluida dan oksigen dengan lingkungan luar menjadi terbatas. Perbedaan konsentrasi oksigen antara bagian dalam dan luar celah menyebabkan bagian dalam celah menjadi lebih mudah mengalami pelarutan logam. Kondisi ini diperparah oleh akumulasi ion klorida dan penurunan pH lokal, sehingga kerusakan lapisan pasif berlangsung lebih cepat.

d. Korosi bawah deposit (*under-deposit corrosion*)

Korosi bawah *deposit* (*under-deposit corrosion*) merupakan korosi lokal yang terjadi di bawah lapisan *deposit*, kerak, *fouling*, atau produk korosi yang menempel pada permukaan pelat PHE. *Deposit* dapat menghambat kontak permukaan pelat PHE dengan aliran fluida utama sehingga terbentuk lingkungan mikro yang berbeda dari lingkungan sekitarnya. Pada area bawah *deposit*, kadar oksigen dapat menurun, pH lokal dapat berubah, dan ion klorida dapat terkonsentrasi. Kondisi tersebut membuat area bawah *deposit* menjadi tempat yang mendukung pertumbuhan *pitting corrosion* dan *crevice corrosion*.

e. Retak korosi tegangan (*stress corrosion cracking*)

Retak korosi tegangan (*stress corrosion cracking* atau SCC) merupakan mekanisme kerusakan akibat kombinasi lingkungan korosif, material yang rentan, dan tegangan tarik. Pada pelat PHE, tegangan dapat berasal dari proses pembentukan pelat, pengencangan *gasket*, tekanan operasi, atau fluktuasi termal. *Pitting corrosion* dapat menjadi titik konsentrasi tegangan karena ujung pit memiliki bentuk tajam dan dapat menjadi lokasi awal inisiasi retak. Dalam penelitian ini, SCC tidak langsung ditetapkan sebagai mekanisme utama, tetapi dibahas sebagai kemungkinan kontribusi apabila hasil metalografi atau SEM-EDS menunjukkan adanya indikasi retak pada area sekitar pit atau area kontak *gasket*.

f. Mekanisme pendukung: *corrosion fatigue*, erosi, dan *fouling*

Kelelahan korosi (*corrosion fatigue*) merupakan kerusakan akibat kombinasi lingkungan korosif dan beban siklik, misalnya akibat fluktuasi tekanan, temperatur,

atau getaran selama operasi. Erosi dapat terjadi apabila aliran fluida atau partikel padat mengikis permukaan pelat PHE. Sementara itu, *fouling* merupakan penumpukan material asing pada permukaan pelat PHE yang dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas dan menjadi pemicu terbentuknya lingkungan lokal agresif. Mekanisme tersebut diposisikan sebagai faktor pendukung yang dapat mempercepat kegagalan apabila ditemukan bukti yang sesuai pada hasil pengamatan.

2.2.8. Analisis Kegagalan Material

Analisis kegagalan material (*failure analysis*) merupakan proses sistematis untuk mengetahui penyebab suatu kegagalan berdasarkan bukti kerusakan, data pengujian, kondisi operasi, dan mekanisme degradasi yang terjadi. Pada penelitian ini, analisis kegagalan digunakan sebagai dasar untuk menghubungkan hasil pemeriksaan pelat PHE dengan dugaan mekanisme kegagalan, sehingga penyebab kegagalan tidak hanya ditentukan dari tampilan visual, tetapi juga dari data komposisi material, mikrostruktur, morfologi permukaan, produk korosi, dan perubahan sifat mekanik[17].

Dalam analisis kegagalan, terdapat beberapa istilah penting yang perlu dibedakan. *Failure event* merupakan peristiwa utama yang dianalisis, misalnya perforasi atau kebocoran pada pelat PHE. *Immediate cause* merupakan penyebab langsung yang menimbulkan kegagalan, seperti penipisan lokal pada pelat. *Damage mechanism* merupakan mekanisme kerusakan yang menjelaskan proses terbentuknya penipisan atau perforasi, misalnya *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, *under-deposit corrosion*, atau kemungkinan SCC. Sementara itu, *contributing factor* merupakan faktor yang mempercepat kegagalan, seperti ion klorida, *deposit*, geometri celah, kualitas fluida, kondisi operasi, dan pemeliharaan.

Setelah peristiwa kegagalan, penyebab langsung, mekanisme kerusakan, dan faktor kontribusi diidentifikasi, analisis dilanjutkan untuk menentukan akar penyebab. Akar penyebab (*root cause*) merupakan penyebab paling mendasar yang perlu dikendalikan agar kegagalan serupa tidak terjadi kembali. Pada kasus pelat PHE, akar penyebab tidak dapat ditentukan hanya dari satu hasil pengujian, tetapi harus diperoleh dari integrasi seluruh data pengujian dan informasi operasi.

Beberapa metode dapat digunakan untuk mendukung analisis kegagalan, antara lain diagram *fishbone*, *Fault Tree Analysis* (FTA), *Root Cause Analysis* (RCA), dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Diagram *fishbone* digunakan untuk mengelompokkan faktor penyebab berdasarkan kategori tertentu, seperti material, lingkungan, desain, operasi, dan pemeliharaan. FTA digunakan untuk memetakan hubungan logis antara peristiwa puncak (*top event*) dan kemungkinan penyebab dasar. RCA digunakan untuk menentukan akar penyebab utama dari kegagalan, sedangkan FMEA digunakan untuk menilai prioritas risiko dari setiap mode kegagalan berdasarkan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D).

Penentuan nilai prioritas risiko pada FMEA dinyatakan dalam *Risk Priority Number* (RPN). Nilai RPN digunakan untuk menentukan prioritas risiko dari masing-masing mode kegagalan. Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi diprioritaskan sebagai kandidat penyebab dominan kegagalan. Hasil analisis RPN pada penelitian ini digunakan sebagai dasar pendukung dalam penentuan penyebab utama kegagalan, bukan sebagai klaim absolut terhadap satu faktor penyebab tunggal.

2.2.9. Macam-Macam Pengujian Material *Plate Heat Exchanger*

Pengujian material pelat dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik, fisik, dan mikrostruktur material, serta mendeteksi adanya kegagalan sebelum atau selama operasi PLTG. Pengujian ini dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *Destructive Testing* (DT) dan *Non-Destructive Testing* (NDT).

1. Destructive Testing (DT)

Destructive Testing dilakukan dengan cara menghancurkan atau merusak sampel material untuk mengetahui karakteristik mekanik dan kimia material. Beberapa metode DT yang umum digunakan pada sampel pelat dari PHE [18], [19], antara lain:

- Analisis Metalografi (*Metallographic Analysis*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengamati struktur mikro material menggunakan mikroskop optik. Melalui pengamatan penampang melintang, dapat diidentifikasi perubahan struktur mikro, arah perambatan kerusakan, serta

indikasi korosi lokal seperti *pitting corrosion* dan *crevice corrosion*.

- Uji Tarik (*Tensile test*)

Pengujian merusak yang digunakan untuk mengukur kekuatan tarik maksimum, *yield strength*, dan elongasi material. Hasil uji ini penting untuk memastikan pelat mampu menahan tekanan fluida yang tinggi selama operasi.

- Uji Kekerasan (*Hardness test*)

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik material pada area tertentu. Perbandingan nilai kekerasan antara area rusak dan area normal dapat memberikan indikasi adanya perubahan sifat material akibat kondisi operasi.

- *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan material pada skala mikro, khususnya pada area kerusakan seperti perforasi atau *pitting*. Sedangkan EDS digunakan untuk menganalisis komposisi unsur pada area tersebut, sehingga dapat diidentifikasi unsur-unsur yang berperan dalam proses korosi, seperti klorida (Cl^-) atau unsur lain yang bersifat agresif.

2. Non-Destructive Testing (NDT)

Non-Destructive Testing dilakukan tanpa merusak pelat, sehingga pelat dapat tetap digunakan setelah pengujian. Beberapa metode NDT yang sering diterapkan pada sampel pelat [18], [19], antara lain:

- Inspeksi Visual (*Visual Inspection*):

Metode NDT yang paling sederhana dan dilakukan diawal, di mana inspeksi dilakukan secara langsung oleh mata manusia, dengan atau tanpa alat bantu seperti kaca pembesar atau endoskop untuk mengidentifikasi kondisi permukaan pelat secara langsung, seperti adanya perforasi, *pitting*, perubahan warna, deformasi, serta indikasi kebocoran.

- Uji Ketebalan (*Thickness Testing*)

Pengujian ini digunakan untuk mengukur ketebalan pelat dan mendeteksi adanya penipisan akibat korosi atau erosi selama operasi. Hasil pengukuran dibandingkan dengan ketebalan awal untuk mengetahui tingkat degradasi material.

- *Dye/Liquid Penetrant Testing (DPT / LPT)*

Dye Penetrant Testing (DPT) atau *Liquid Penetrant Testing (LPT)* adalah metode NDT yang digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan seperti retakan, pori-pori, atau cacat permukaan lainnya pada material *non-porous*.

- *Spectrometri (EDX/OES/XRF)*

Pengujian spektrometri digunakan untuk menganalisis komposisi kimia material dan *deposit* guna memverifikasi kesesuaian material dan mengidentifikasi unsur penyebab korosi.