

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENYEBAB TERJADINYA KEGAGALAN MAIN BURNER PADA SISTEM BOILER KAPAL DI PT WARUNA SHIPYARD INDONESIA

*Diajukan untuk memenuhi syarat memperoleh
gelar Sarjana Teknik Elektro pada Fakultas
Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera
Utara*

Oleh:

RAHMAT RIZKI KURNIAWAN
NPM : 2107220055



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Rahmat Rizki Kurniawan
NPM : 2107220055
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Penyebab Terjadinya Kegagalan Main Burner Pada Sistem Boiler Kapal Di PT Waruna Shipyard Indonesia
Bidang ilmu : sistem Kontrol

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 27 September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

Dosen Pembanding I / Penguji



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

Dosen Pembanding II / Penguji

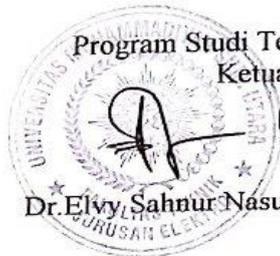


Arya Rudi Nasution, S.T., M.T

Program Studi Teknik Elektro
Ketua



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama Lengkap : Rahmat Rizki Kurniawan
Tempat / Tanggal Lahir : Aek Kanopan / 15 Desember 2001
NPM : 2107220055
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

"Analisis Penyebab Terjadinya Kegagalan Main Burner Pada Sistem Boiler Kapal Di PT Waruna Shipyards Indonesia",

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/ keserjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 27 September 2021



Saya yang menyatakan,

Rahmat Rizki Kurniawan
Rahmat Rizki Kurniawan

ABSTRAK

Boiler merupakan komponen vital pada kapal yang berfungsi menghasilkan uap untuk keperluan propulsi maupun peralatan bantu. Pada kapal MT Hight Standard yang sedang melakukan docking di PT Waruna Shipyard Indonesia, sistem *main burner* boiler tipe Aalborg Mission OM KB 1000 mengalami kegagalan penyalan berulang (*burner trip*). Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi Bagaimana kerja komponen listrik dalam mendukung kinerja pada sistem boiler dan penyebab utama kegagalan tersebut. Metode penelitian meliputi observasi langsung di ruang ketel, pengukuran parameter operasional menggunakan instrumen lapangan, inspeksi fisik komponen utama (*nozzle/rotary cup, igniter, flame scanner, dan fuel heater*), serta analisis catatan log alarm pada panel kontrol. Hasil penelitian menunjukkan suhu bahan bakar Heavy Fuel Oil (HFO) mencapai 50 - 100°C, di standar operasional, sehingga viskositas tetap tinggi dan atomisasi tidak optimal. Selain itu ditemukan penyumbatan $\pm 15\%$ pada port nozzle akibat endapan karbon, keausan elektroda igniter, serta flame scanner kotor yang mengurangi sensitivitas deteksi nyala api. Sistem kontrol otomatis bekerja sesuai desain dengan memicu interlock *flame failure* dan *emergency shutdown* untuk mencegah risiko keselamatan. Bahwa kegagalan *main burner* disebabkan oleh kombinasi rendahnya suhu bahan bakar, gangguan aliran semprotan, penurunan performa igniter, dan sensor nyala yang terkontaminasi. Perawatan preventif terjadwal dan inspeksi berbasis kondisi direkomendasikan guna menjaga keandalan pembakaran.

Kata Kunci: Main Burner, Boiler, HFO, Kontrol Otomatis, Kegagalan Pembakaran

ABSTRACT

Boilers are vital components on ships that generate steam for propulsion and auxiliary equipment. On the MT Hight Standard ship, which is currently docked at PT Waruna Shipyard Indonesia, the Aalborg Mission OM KB 100 main burner boiler system has experienced repeated ignition failures (burner trips). This study aims to identify the primary cause of the failure and analyze the role of the electrical system and automatic control in the performance of the main burner. The research methods include direct observation in the boiler room, measurement of operational parameters using field instruments, physical inspection of main components (nozzle/rotary cup, igniter, flame scanner, and fuel heater), and analysis of alarm log records on the control panel. The research results showed that the temperature of the Heavy Fuel Oil (HFO) only reached 50 - 100°C, below the operational standard of, resulting in high viscosity and suboptimal atomization. Additionally, ±15% blockage was found in the nozzle port due to carbon deposits, wear on the igniter electrodes, and a dirty flame scanner, which reduced the sensitivity of flame detection. The automatic control system operated as designed, triggering the flame failure interlock and emergency shutdown to prevent safety risks. In conclusion, the main burner failure was caused by a combination of low fuel temperature, spray flow disruption, igniter performance degradation, and contaminated flame sensors. Scheduled preventive maintenance and condition-based inspections are recommended to maintain combustion reliability.

Keywords: Main Burner, Boiler, Heavy Fuel Oil (HFO), Automatic Control, Combustion Failure

KATAPENGANTAR

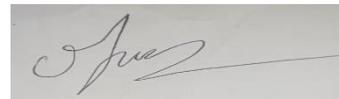
Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Penyebab Terjadinya Kegagalan *Main Burner* pada Sistem *Boiler* Kapal di PT Waruna Shipyard Indonesia” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan. Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Dr. Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Bapak Munawar Alfansury Siregar S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Dr. Ade Faisal, M.Sc, Ph.D, selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Affandi S.T., M.T., selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibu Elvy Sahnur Nasution S.T., M.Pd., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Benny Oktrialdy S.T., M.T., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Bapak Faisal Irsan Pasaribu S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa membimbing saya dalam penulisan laporan Tugas Akhir.
8. Bapak/Ibu Staff Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

9. Kepada Ibu saya, Rusmini, yang selalu mendoakan, memberikan kasih sayang yang tak ternilai, serta menjadi sumber semangat dan inspirasi sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Segala pengorbanan, doa, dan cinta yang telah diberikan akan selalu menjadi kekuatan terbesar dalam setiap langkah saya.
10. Kepada Nadya Azrani Siahaan S.Pd, yang penulis sayangi, dengan penuh rasa syukur, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus atas kehadiran sampai terselesainya skripsi ini. Terima kasih telah menjadi tempat berkeluh kesah setia mendengar, sekaligus sumber kekuatan yang tak tergantikan. Dukungan dan semangat yang diberikan telah menjadi bagian penting dalam proses ini, membuat penulis mampu bertahan dan terus melangkah. Semoga segala kebaikan tersebut berakhir dengan kebahagiaan yang indah.
11. Teman-teman seperjuangan Teknik Elektro Satu Angkatan.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi teknik sipil/Mesin/Elektro.

Medan, 27 September 2025



Rahmat Rizki Kurniawan

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	1
ABSTRAK.....	4
KATAPENGANTAR	6
DAFTAR ISI	8
BAB 1 PENDAHULUAN	10
1.1 Latar Belakang	10
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Ketel Uap (<i>Boiler</i>).....	6
2.1.1 Definisi Ketel Uap	6
2.1.2 Penelitian Terdahulu	7
2.1.3 Jenis jenis boiler	8
2.1.4 Komponen-Komponen Ketel Uap.....	13
2.1.5 Mekanisme Kerja Ketel Uap	15
2.1.6 Sistem Pembakaran pada Ketel Uap.....	16
2.1 Prinsip Kerja <i>Burner</i> pada Ketel Uap Kapal	18
2.2 Sistem Sensor dan Kontrol Otomatisasi pada Ketel Uap Kapal	23
2.4.1 Masalah Pengatomisasian pada Burner	34
2.4.2 Pengaturan Udara Pembakaran yang Tidak Tepat	35
2.4.3 Penyumbatan	35
2.4.4 Kerusakan pada Komponen Burner	35
2.4.5 <i>Error</i> pada Sistem Kontrol/Monitoring	35
2.5 Kondisi Aktual Sistem Main Burner Boiler di Kapal MT Hight Standard.....	36
2.6 Pembakaran sebagai Gejala Kimia	41
2.6.1 Udara Cukup ,Minyak dibakar dengan asam di udara yang	41
2.7 Sistem Bahan Bakar.....	42
BAB III	46
3.1 Jenis Penelitian	46
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	46
3.2.1 Data Spesifikasi Boiler	47

3.2.2 Data Operasi Boiler	47
3.2.3 Data Teknis Kapal MT HIGHT STANDARD	47
3.3 Alat dan Bahan	49
3.4 Teknik Pengumpulan Data	51
3.4.1 Observasi Langsung.....	51
3.4.2 Wawancara	51
3.4.3 Studi Dokumentasi	51
3.5 Prosedur Penelitian.....	52
3.5.1 Persiapan Penelitian.....	52
3.5.2 Pengumpulan Data.....	52
3.5.3 Analisis Data.....	52
3.6 Teknik Analisis Data	53
3.6.1 Reduksi Data.....	53
3.6.2 Penyajian Data.....	53
3.6.3 Penarikan Kesimpulan	54
3.7 Diagram Alir Penelitian	55
BAB IV	56
4.1. Pengaruh kelistrikan pada proses pembakaran boiler kapal	56
4.2 Analisis Penyebab Kegagalan Main Burner	63
4.2.1 Percobaan pembakaran terhadap suhu dan tekanan bahan bakar	63
BAB V PENUTUP.....	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	73
LAMPIRAN	75
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	79

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal merupakan sarana transportasi laut yang memiliki berbagai jenis dan fungsi, mulai dari kapal penumpang, kapal barang, hingga kapal khusus seperti kapal tanker. Kapal beroperasi dengan dilengkapi berbagai sistem pendukung untuk menunjang kebutuhan mesin dan kehidupan di atas kapal, salah satunya adalah sistem ketel uap atau *boiler*. Boiler merupakan komponen yang berfungsi untuk menghasilkan uap, baik digunakan sebagai tenaga penggerak (propulsi) maupun sebagai sumber panas bagi sistem pendukung lainnya seperti pemanas bahan bakar, pemanas kargo, hingga kebutuhan akomodasi awak kapal (Babicz, 2021).

Kapal yang tidak dilengkapi dengan sistem pemanas berbasis listrik atau perangkat pemanas alternatif lainnya sangat mengandalkan keberlangsungan operasional boiler untuk memenuhi kebutuhan uap bertekanan di atas kapal. Uap bertekanan memiliki peran penting, terutama selama pelayaran, karena sejumlah sistem dan permesinan kapal memerlukan suplai uap yang stabil untuk dapat berfungsi secara optimal. Jika proses pembangkitan uap terganggu atau bahkan terhenti, maka akan berdampak langsung pada performa dan operasional mesin-mesin tersebut. Oleh karena itu, proses pembakaran bahan bakar di dalam burner harus berlangsung secara sempurna, yang hanya dapat tercapai apabila tersedia pasokan bahan bakar dan oksigen dalam jumlah yang memadai

Boiler kapal adalah sistem yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap panas bertekanan dengan memanfaatkan panas hasil pembakaran. Terdapat dua jenis boiler utama, yaitu boiler pipa api, di mana gas panas atau api mengalir melalui pipa dan memanaskan air di sekitarnya; dan boiler pipa air, di mana air mengalir melalui pipa dan gas panas atau api mengalir di luar pipa sebagai sumber panas.

Salah satu komponen vital dalam sistem boiler adalah main burner, yang berfungsi sebagai pusat proses pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan dalam konversi air menjadi uap. Kinerja burner sangat bergantung pada kestabilan suplai bahan bakar, udara, sistem penyalaan (*ignition system*), serta

pengaturan otomatis yang dikendalikan oleh panel kontrol. Ketidakseimbangan pada salah satu komponen tersebut dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna, nyala api yang tidak stabil, atau bahkan kegagalan menyala secara total (*misfire*). Saat kapal sedang beroperasi, kegagalan pada burner bukan hanya berdampak pada terganggunya sistem pemanas, tetapi juga dapat memicu gangguan lebih luas terhadap sistem propulsi dan keamanan awak kapal.

Dalam praktiknya, proses perawatan dan perbaikan kapal tidak lepas dari peran galangan kapal (*shipyard*) sebagai fasilitas pendukung operasional maritim. PT Waruna Shipyard Indonesia merupakan salah satu galangan kapal yang menyediakan layanan *dry docking*, *ship repair*, dan *ship conversion* untuk berbagai jenis kapal niaga. Berdiri sejak tahun 1990, perusahaan ini memiliki kapasitas dock hingga 100.000 DWT dan melayani berbagai proyek reparasi skala besar dari kapal domestik maupun internasional.

Salah satu proyek perbaikan yang ditangani adalah kapal niaga MT HIGHT STANDARD, yang memasuki fase *docking* untuk dilakukan inspeksi dan perbaikan terhadap sejumlah sistem penting, termasuk sistem ketel uap (*boiler*). Berdasarkan hasil observasi awal oleh teknisi, ditemukan bahwa *burner* mengalami *trip* otomatis akibat tidak terdeteksinya nyala api, yang disebabkan oleh ketidaksesuaian pembacaan sensor *flame detector* serta *delay* pada sistem *ignition control*. Masalah ini menyebabkan proses pembakaran tidak berlangsung sempurna, sehingga suplai uap bertekanan dari boiler terganggu.

Sistem *burner* dalam boiler kapal merupakan perangkat vital yang dirancang untuk mencampur bahan bakar dan udara dalam rasio yang tepat agar menghasilkan nyala api yang stabil, sebagai sumber panas utama dalam proses pembangkitan uap. Untuk menunjang kinerjanya, *burner* dilengkapi dengan berbagai perangkat otomatisasi seperti sensor nyala api (*flame sensor*), sakelar tekanan (*pressure switch*), katup solenoid, serta sistem pengapian otomatis yang semuanya saling terintegrasi. Ketika terjadi gangguan seperti *delay* pada sistem *ignition* atau sinyal *error* dari *flame detector* yang ditemukan pada MT HIGHT STANDARD, maka sistem proteksi otomatis akan menghentikan operasi untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Permasalahan pada MT HIGHT STANDARD menunjukkan performa burner yang juga tergantung pada keandalan sistem

kelistrikan dan kontrol pendukungnya.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis memilih judul “Analisis Penyebab Terjadinya Kegagalan Main Burner pada Sistem Boiler Kapal di PT Waruna Shipyard Indonesia” dengan tujuan utama untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kegagalan burner, yang mana hasil dari penelitian ini dapat menjadi masukan teknis untuk pengembangan sistem proteksi dan *troubleshooting* yang lebih andal pada *burner* kapal, serta memperkuat penerapan keilmuan elektro dalam industri maritim.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang terjadi pada sistem burner kapal MT HIGHT STANDARD di PT Waruna Shipyard Indonesia, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kerja komponen listrik dalam mendukung kinerja pada sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD?
2. Bagaimana terjadinya kegagalan main burner pada sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada analisis penyebab terjadinya kegagalan *main burner* pada sistem *boiler* kapal MT HIGHT STANDARD yang sedang melakukan proses *docking* di PT Waruna Shipyard Indonesia. Adapun ruang lingkup penelitian ini meliputi:

1. Penelitian ini membahas mengenai pengaruh sistem kelistrikan pada boiler kapal MT HIGHT STANDARD saat proses *docking* di PT Waruna Shipyard Indonesia.
2. Penelitian dilakukan pada sistem main burner boiler.
3. Fokus pada penyebab terjadinya kegagalan pembakaran yang terjadi pada main burner .

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah yang telah disusun, tujuan dari

penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui dan memahami peran sistem kelistrikan serta kontrol otomatis dalam memengaruhi kinerja main burner pada sistem boiler kapal.
2. Untuk mengidentifikasi dan menganalisis penyebab utama kegagalan main burner dan menghitung pemakaian daya listrik pada sistem boiler dikapal MT HIGHT STANDARD yang sedang melakukan perbaikan di PT Waruna Shipyard Indonesia.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak, baik secara teoritis maupun praktis, yaitu:

1. Manfaat Teoritis

Secara teoritis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur terkait penerapan teknologi kontrol pada sistem pembangkit uap di kapal, serta memberikan wawasan baru mengenai peran sistem kelistrikan dalam mendukung kinerja burner. Selain itu, penelitian ini juga berpotensi untuk memperdalam pemahaman tentang pentingnya integrasi antara aspek mekanik dan kelistrikan dalam menjaga kestabilan operasional sistem boiler kapal.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk beberapa pihak, yaitu:

a. Bagi Peneliti

Penelitian ini dapat memperluas wawasan dan pemahaman peneliti dalam bidang teknik elektro, terutama dalam aplikasi sistem kelistrikan dan kontrol otomatis pada kapal. Serta dapat memperoleh pengalaman

b. Bagi Lembaga Pendidikan (Universitas)

Penelitian ini dapat menjadi referensi akademik yang berguna bagi mahasiswa dan dosen yang tertarik pada topik pengembangan dan

penerapan sistem kelistrikan dalam industri kapal.

c. Bagi Industri Galangan Kapal (PT Waruna Shipyard Indonesia) Penelitian ini dapat memberikan masukan yang berguna dalam perbaikan sistem dan pencegahan kegagalan burner pada sistem boiler kapal, yang berdampak pada efisiensi operasional dan keandalan kapal.

d. Bagi Teknisi dan Operator Kapal

Temuan penelitian ini diharapkan dapat membantu teknisi dalam mendiagnosis dan memperbaiki masalah pada sistem burner dengan lebih cepat dan efisien, sehingga dapat mengurangi risiko kecelakaan akibat kegagalan sistem pembangkit uap.

e. Bagi Pemerintah dan Regulator Industri Maritim

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi masukan bagi regulator dalam merumuskan standar keselamatan yang lebih baik, khususnya terkait dengan pemeliharaan dan pengoperasian sistem boiler kapal di Indonesia.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ketel Uap (*Boiler*)

2.1.1 Definisi Ketel Uap

Boiler, atau dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai ketel uap, merupakan suatu bejana tertutup yang digunakan untuk memanaskan fluida hingga berubah menjadi uap dengan tekanan tinggi melalui proses pembakaran. Proses ini melibatkan konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas, yang kemudian ditransfer ke fluida yang dipanaskan (Steingress et al., 2018). Menurut Munson et al., (2013), *boiler* adalah alat penukar panas (*heat exchanger*) yang mentransformasikan energi termal hasil pembakaran menjadi energi uap untuk keperluan mekanis maupun pemanasan. *Boiler* secara umum digunakan di berbagai sektor industri seperti pembangkit listrik, industri pengolahan makanan, manufaktur, dan transportasi.

Menurut Handoyo (2016), ketel uap adalah bejana tertutup yang menghasilkan uap dengan tekanan lebih dari 1 atmosfer, di mana pemanasan air terjadi melalui gas panas hasil pembakaran bahan bakar dalam dapur ketel. Menurut Narto (2018) *boiler* merupakan bejana tertutup yang berfungsi untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi lebih dari 1 atmosfer melalui proses pemanasan air yang berada di dalamnya. Pemanasan ini dilakukan dengan memanfaatkan energi panas dari gas hasil pembakaran bahan bakar yang dialirkan ke dalam sistem ketel.

Berdasarkan definisi-definisi di atas, ketel uap atau *boiler* adalah suatu bejana tertutup yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan dari hasil pembakaran bahan bakar. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan lebih tinggi dari tekanan atmosfer dan digunakan untuk berbagai keperluan, baik sebagai tenaga penggerak mesin maupun sebagai sumber panas dalam sistem industri dan perkapalan. Proses pembentukan uap ini melibatkan perpindahan panas antara gas hasil pembakaran dan air di dalam ketel, yang dapat berlangsung dalam berbagai konfigurasi, seperti ketel pipa api dan ketel pipa air. Dengan demikian, boiler memiliki peran vital dalam sistem yang membutuhkan suplai energi termal secara berkelanjutan dan efisien.

2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian pertama yaitu penelitian dari Muhammad Amma Ainul Khaq (2024) yang berjudul “Analisis Penyebab Kegagalan Pembakaran pada Boiler di Kapal MT.HIHG STANDART”. Metode yang digunakan kualitatif, dengan teknik pengumpulan data seperti observasi, wawancara, studi pustaka, dan dokumentasi. Teknik analisis data menggunakan metode Miles and Huberman dan triangulasi untuk uji keabsahan data. Penelitian ini mengidentifikasi beberapa faktor penyebab kegagalan pembakaran pada boiler kapal, seperti rendahnya tekanan bahan bakar yang masuk ke furnace, kotornya

filter bahan bakar pada pump, penyumbatan nozzle main burner, dan kerusakan relay. Dampaknya adalah tidak tercapainya suhu dan tekanan kerja yang diperlukan untuk pemanasan. Penelitian yang dilakukan lebih fokus pada masalah mekanis seperti tekanan bahan bakar dan kerusakan komponen tertentu. Namun, penelitian ini belum menggali secara rinci penyebab kegagalan dari sudut pandang sistem atau pengaruh faktor lainnya seperti perawatan berkala atau kualitas bahan bakar.

Penelitian kedua yaitu penelitian dari Andi Wicaksono (2023) yang berjudul “Analisa Penyebab Terjadinya Kegagalan Pembakaran Awal pada Ketel Uap Bantuan di KM. Dharma Kencana III”. Hasil penelitian ini berfokus pada kegagalan pembakaran akibat masalah pada elektroda, jarak nozzle, dan kondisi bahan bakar. Peneliti memberikan rekomendasi tentang perawatan berkala seperti pembersihan.

kawat elektroda dan pengecekan nozzle untuk memastikan pembakaran yang optimal. Penelitian ini menunjukkan hasil terkait komponen individual dalam sistem pembakaran. Namun, peneliti tidak menjabarkan interaksi antara komponen dalam sistem boiler secara keseluruhan, seperti dampak perawatan yang tidak tepat pada sistem kontrol atau sistem pembakaran lainnya.

Penelitian ketiga yaitu penelitian dari Robbi et al., (2024) yang berjudul "Analisis Gagalnya Pembakaran Pada Boiler di Kapal MT Gas Kalimantan". Peneliti menemukan bahwa penyumbatan pada nozzle dan filter yang kotor menjadi penyebab utama kegagalan pembakaran. Upaya pemeliharaan seperti membersihkan nozzle dan melakukan overhaul dibahas sebagai langkah untuk

mengatasi masalah tersebut. Penelitian ini membahas pada pemeliharaan dan pembersihan komponen yang terlibat dalam proses pembakaran, tetapi tidak menyentuh aspek pengaturan proses secara keseluruhan, seperti bagaimana suhu, tekanan, dan campuran bahan bakar yang tidak tepat bisa mengarah pada kegagalan. Penelitian keempat yaitu penelitian Vina Irfanti Putri (2023) yang berjudul “Analisa Kegagalan Pembakaran pada Burner Boiler Plant di Kapal KM. Lawit”. Peneliti menemukan bahwa kegagalan pembakaran pada burner disebabkan oleh kurangnya perawatan pada filter, tekanan bahan bakar rendah, dan kualitas bahan bakar yang kotor. Peneliti merekomendasikan perawatan rutin sesuai dengan prosedur pemeliharaan yang telah ditentukan. Penelitian ini lebih menekankan pada aspek perawatan dan kualitas bahan bakar, namun kurang membahas faktor-faktor penyebab kegagalan pembakaran yang terkait dengan pengelolaan operasional secara keseluruhan.

2.1.3 Jenis jenis boiler

Boiler adalah peralatan yang digunakan untuk menghasilkan uap atau panas yang dibutuhkan dalam berbagai industri dan aplikasi. Berdasarkan struktur dan cara kerjanya, boiler dibagi menjadi beberapa jenis. Setiap jenis boiler memiliki kelebihan dan kekurangan tergantung pada aplikasi yang digunakan. Berikut ini adalah penjelasan mengenai jenis-jenis boiler yang sering digunakan dalam industry.

A. Boiler Fire Tube (Pipa Api)

Definisi dan Prinsip Kerja Boiler *fire tube* adalah jenis boiler yang memiliki desain di mana gas panas dari proses pembakaran mengalir melalui pipa-pipa yang berada di dalam ruang yang dipenuhi air. Proses pembakaran terjadi di dalam furnace (ruang pembakaran) di mana bahan bakar seperti batubara, minyak, atau gas dibakar untuk menghasilkan gas panas. Gas panas ini mengalir melalui pipa-pipa yang berada di dalam boiler dan akan mentransfer panasnya ke air yang ada di luar pipa tersebut, sehingga air tersebut akan berubah menjadi uap.

Prinsip kerja boiler fire tube adalah sebagai berikut:

- **Pembakaran di Furnace:** Bahan bakar dibakar dalam ruang furnace untuk menghasilkan gas panas. Gas panas ini akan mengalir melalui pipa-pipa yang dikelilingi oleh air.

- **Pemanasan Air:** Gas panas dari pembakaran memanaskan pipa-pipa yang berisi air. Akibat pemanasan ini, air berubah menjadi uap. Uap yang dihasilkan kemudian disalurkan untuk keperluan industri atau aplikasi lainnya.
- **Sistem Sirkulasi:** Uap yang dihasilkan mengalir melalui sistem pipa dan digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pembangkit energi atau proses industri yang membutuhkan uap.

Pada boiler fire tube, terdapat dua kategori umum berdasarkan struktur pipa, yaitu:

1. **Boiler Single Pass:** Gas panas hanya mengalir melalui pipa satu kali sebelum dikeluarkan.
2. **Boiler Multi-Pass:** Gas panas mengalir melalui beberapa jalur pipa sebelum akhirnya dikeluarkan, yang memungkinkan transfer panas lebih efisien.

Aplikasi Boiler Fire Tube Boiler fire tube banyak digunakan untuk aplikasi dengan kebutuhan uap dalam kapasitas kecil hingga menengah. Beberapa aplikasi umum boiler fire tube meliputi:

- **Industri Pengolahan Makanan dan Minuman:** Untuk menghasilkan uap yang digunakan dalam proses pengolahan dan pemasakan makanan atau sterilisasi produk.
- **Pemanas Ruangan:** Digunakan dalam sistem pemanas sentral untuk gedung komersial, rumah sakit, atau fasilitas lain yang membutuhkan uap atau air panas.
- **Industri Tekstil:** Digunakan untuk proses pencelupan dan pemrosesan bahan tekstil dengan uap.
- **Pabrik Kimia Kecil:** Untuk pemanasan atau pembentukan uap dalam proses kimia skala kecil.
- **Pembangkit Listrik Skala Kecil:** Untuk pembangkit energi dalam kapasitas terbatas di daerah terpencil.

Kelebihan Boiler Fire Tube

1. Desain yang Sederhana: Boiler fire tube memiliki desain yang sederhana dan tidak terlalu kompleks. Ini membuat proses manufaktur, pemasangan, dan pengoperasiannya lebih mudah dan cepat.
2. Biaya Investasi Awal Rendah: Dibandingkan dengan boiler water tube, boiler fire tube memiliki biaya pembuatan dan pemasangan yang lebih rendah, membuatnya lebih ekonomis untuk aplikasi dengan anggaran terbatas.
3. Pemeliharaan yang Mudah: Dengan konstruksi yang lebih sederhana, pemeliharaan boiler fire tube lebih mudah dilakukan, sehingga cocok untuk pengoperasian jangka panjang.
4. Ukuran yang Kompak: Boiler ini lebih kecil dan lebih kompak dibandingkan dengan boiler water tube, sehingga ideal untuk aplikasi yang memerlukan ruang terbatas.
5. Pemasangan Cepat: Boiler fire tube dapat dipasang lebih cepat karena biasanya sudah dirakit sebagai satu kesatuan unit (pre-assembled package).
6. Stabilitas Operasional: Dapat memberikan uap dengan stabil pada kapasitas kecil, cocok untuk operasi pada beban rendah hingga menengah.

Kekurangan Boiler Fire Tube

1. Kapasitas Terbatas: Boiler fire tube tidak cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kapasitas uap besar atau uap dengan tekanan dan temperatur tinggi. Kapasitasnya terbatas pada aplikasi dengan kebutuhan uap skala kecil hingga menengah.
2. Efisiensi Terbatas pada Tekanan Tinggi: Pada kapasitas besar atau aplikasi dengan tekanan tinggi, boiler fire tube kurang efisien. Kecepatan pemindahan panas yang terbatas pada boiler ini membuatnya kurang optimal untuk aplikasi bertekanan tinggi.
3. Pemeliharaan Intensif: Meskipun pemeliharaan secara umum lebih mudah, boiler fire tube masih memerlukan pemeliharaan rutin untuk menghindari

pengendapan kotoran atau kerak pada pipa api, yang dapat mengurangi efisiensi pemanasannya.

4. Tidak Efisien pada Pembakaran Bahan Bakar Padat: Jika dibandingkan dengan boiler jenis lain seperti fluidized bed, boiler fire tube kurang efisien dalam menggunakan bahan bakar padat, terutama ketika menggunakan bahan bakar yang memiliki kelembaban tinggi atau kadar abu tinggi.

B. Boiler *Water Tube* (Pipa Air)

Definisi dan Prinsip Kerja Boiler *water tube* adalah jenis boiler di mana air mengalir melalui pipa-pipa kecil yang berada di dalam ruang boiler, sementara gas panas hasil pembakaran mengalir di luar pipa-pipa tersebut. Boiler water tube lebih sering digunakan pada aplikasi dengan kapasitas uap besar dan pada sistem yang membutuhkan uap bertekanan tinggi. Pada boiler water tube, air yang mengalir di dalam pipa dipanaskan oleh gas panas yang mengalir di sekeliling pipa hingga berubah menjadi uap.

Prinsip kerja boiler water tube adalah sebagai berikut:

- **Pembakaran Bahan Bakar:** Bahan bakar, seperti batubara, minyak, atau gas alam, dibakar dalam furnace untuk menghasilkan gas panas.
- **Aliran Gas Pembakaran:** Gas panas dari pembakaran ini mengalir di luar pipa-pipa yang berisi air. Proses ini terjadi dalam ruang pemanas di mana gas panas akan mentransfer panas ke pipa-pipa yang berisi air.
- **Pemanasan Air dan Uap:** Air di dalam pipa-pipa tersebut akan dipanaskan dan berubah menjadi uap. Uap yang dihasilkan kemudian akan dialirkan untuk keperluan industri atau pembangkit listrik.
- **Sistem Pengendalian:** Boiler water tube sering dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis yang canggih untuk mengatur suhu, tekanan, dan aliran uap, sehingga efisiensi operasionalnya lebih tinggi.

Boiler water tube ini sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan uap dengan tekanan dan suhu tinggi. Oleh karena itu, jenis boiler ini banyak digunakan dalam pembangkit listrik dan proses industri besar yang memerlukan uap dalam jumlah banyak.

Aplikasi Boiler Water Tube

Beberapa aplikasi utama boiler water tube meliputi:

- **Pembangkit Listrik:** Boiler water tube banyak digunakan pada pembangkit listrik besar yang membutuhkan kapasitas uap tinggi dan tekanan tinggi untuk menggerakkan turbin.
- **Industri Kimia dan Petrokimia:** Digunakan dalam proses pemanasan atau pembuatan produk kimia yang membutuhkan uap dalam jumlah besar dan tekanan tinggi.
- **Industri Semen:** Digunakan untuk proses pemanasan dalam pembuatan semen, yang membutuhkan uap bertekanan tinggi.
- **Pabrik Pengolahan Logam:** Digunakan untuk proses pemanasan logam atau produksi bahan logam yang membutuhkan suhu tinggi.
- **Pabrik Tekstil dan Pengolahan Makanan:** Diperlukan untuk menghasilkan uap dalam jumlah besar untuk proses pencelupan atau pemasakan bahan tekstil dan makanan.

Kelebihan Boiler Water Tube

1. **Kemampuan Uap pada Tekanan Tinggi:** Boiler water tube mampu menghasilkan uap pada tekanan dan temperatur tinggi, yang membuatnya sangat efisien untuk aplikasi pembangkit listrik atau industri besar.
2. **Kapasitas Besar:** Boiler jenis ini dapat menghasilkan uap dalam jumlah yang sangat besar, sesuai dengan kebutuhan industri besar dan pembangkit energi.
3. **Keamanan Lebih Tinggi:** Karena air berada di dalam pipa yang lebih kecil dan lebih banyak, boiler ini lebih aman pada tekanan tinggi. Risiko pecah atau ledakan lebih kecil dibandingkan dengan boiler fire tube.
4. **Efisiensi yang Lebih Baik:** Boiler water tube lebih efisien dalam memanfaatkan bahan bakar dan menghasilkan uap pada suhu tinggi, sehingga lebih cocok untuk pembangkit listrik dan aplikasi industri besar.

5. **Konstruksi yang Lebih Tahan Lama:** Dengan pipa yang terbuat dari material yang lebih kuat, boiler water tube lebih tahan lama dan lebih kokoh dalam jangka panjang, bahkan dalam kondisi operasi yang berat.
6. **Fleksibilitas dalam Pengaturan Suhu dan Tekanan:** Boiler water tube memungkinkan pengaturan suhu dan tekanan yang lebih presisi, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan pengaturan uap yang sangat spesifik.

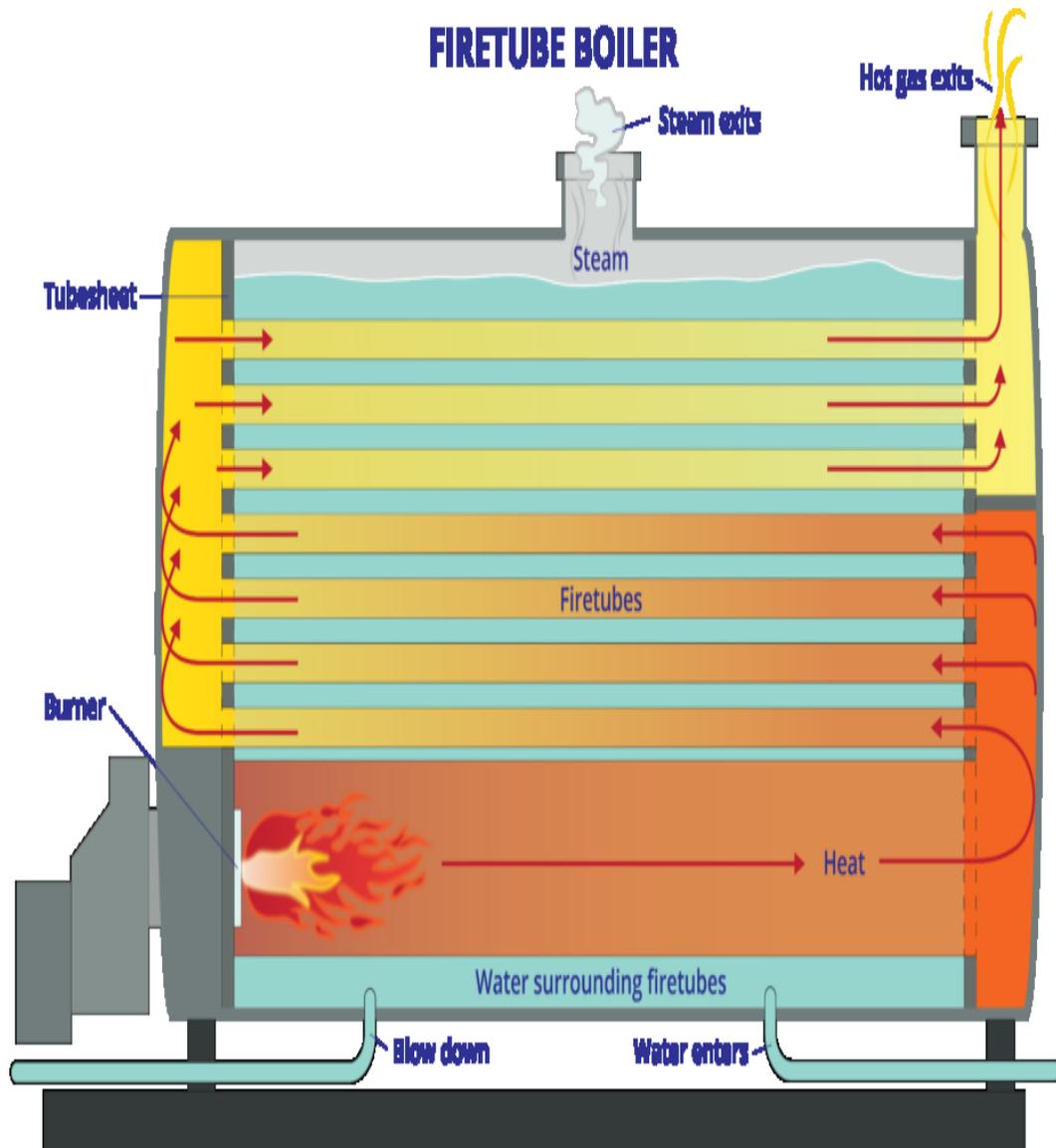
Kekurangan Boiler Water Tube

1. **Biaya Investasi yang Tinggi:** Boiler water tube memiliki biaya awal yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan boiler fire tube, baik dari segi pembelian, instalasi, maupun pemeliharaan.
2. **Kompleksitas Desain:** Boiler water tube lebih rumit dalam desain dan konstruksinya, yang membutuhkan keterampilan teknis lebih tinggi dalam pemasangan dan pemeliharaan.
3. **Memerlukan Operator Berpengalaman:** Pengoperasian boiler water tube memerlukan keterampilan dan pengalaman yang lebih tinggi dibanding dengan boiler fire tube.

Pemilihan jenis boiler—apakah *boiler fire tube* atau *boiler water tube* tergantung pada berbagai faktor seperti kapasitas yang dibutuhkan, anggaran, jenis bahan bakar yang digunakan, dan kebutuhan operasional. Boiler fire tube lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan kapasitas uap kecil hingga menengah dengan biaya lebih rendah dan desain yang lebih sederhana. Sebaliknya, boiler water tube adalah pilihan ideal untuk aplikasi dengan kapasitas uap besar dan tekanan tinggi, meskipun memerlukan biaya investasi dan perawatan yang lebih tinggi. Kedua jenis boiler memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, sehingga penting untuk memilih yang paling sesuai dengan kebutuhan spesifik dari setiap aplikasi

2.1.4 Komponen-Komponen Ketel Uap

Boiler memiliki beberapa komponen yang bekerja untuk mendukung proses pemanasan uap, komponen tersebut meliputi: (Cornetti, 2024)



Gambar 2.1 *Firetube* Boiler

a) *Burner*

Alat untuk mencampurkan bahan bakar dengan udara, lalu membakarnya untuk menghasilkan nyala api. Energi panas dari api ini digunakan untuk memanaskan air di dalam boiler.

b) *Tubesheet*

Plat logam tebal tempat ujung-ujung firetube ditanamkan dan disegel. Berfungsi menjaga kestabilan posisi pipa serta mencegah kebocoran antara gas panas dan air.

c) *Firetubes*

Pipa-pipa di mana gas panas hasil pembakaran mengalir. Panas dari gas akan mengalir melalui dinding pipa dan memanaskan air yang mengelilinginya.

d) *Water Surrounding Firetubes*

Air ketel yang mengelilingi firetubes. Air ini menyerap panas dari firetubes sehingga berubah menjadi uap.

e) *Steam Area (Steam Exits)*

Area di bagian atas boiler tempat uap terkumpul. Uap yang terbentuk kemudian dikeluarkan untuk keperluan sistem pemanasan atau mekanisme lainnya.

f) *Hot Gas Exits (Cerobong)*

Saluran pembuangan gas panas sisa pembakaran. Berfungsi membuang gas buang agar tidak mengganggu sistem dan menjaga efisiensi boiler.

g) *Water Enters (Feed Water Inlet)*

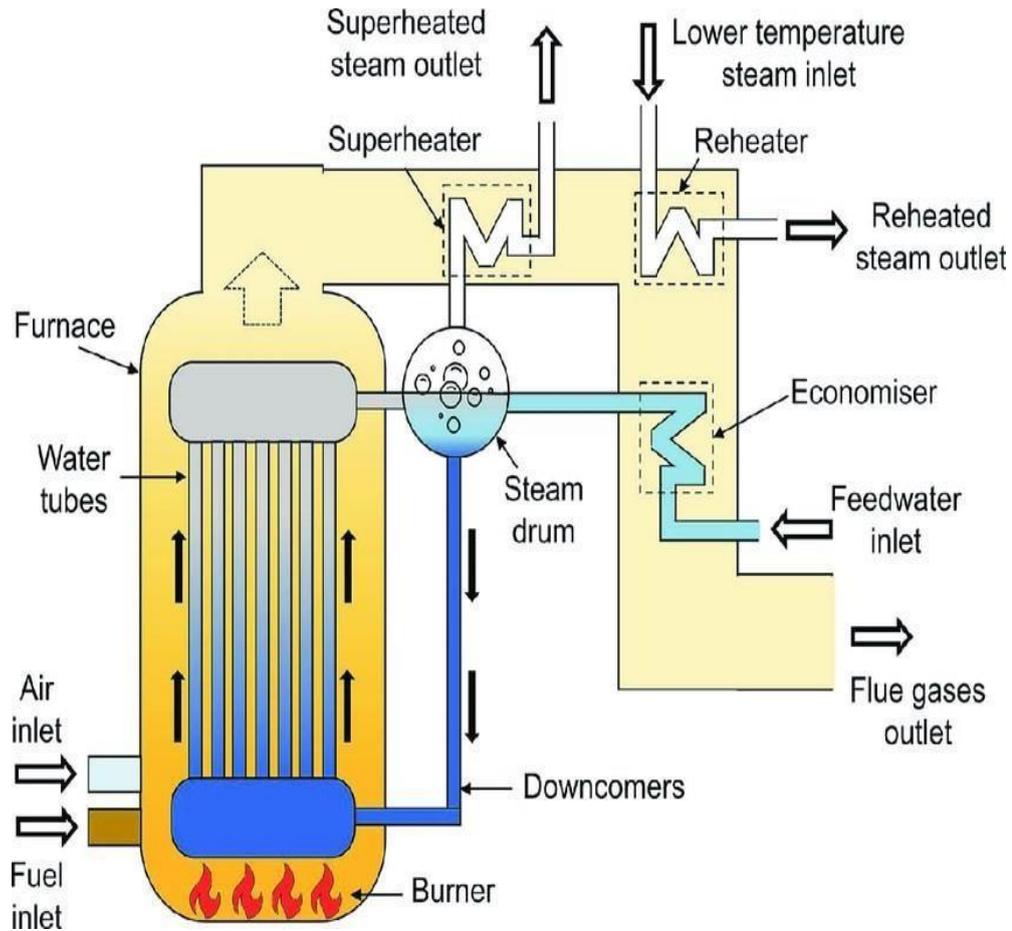
Titik masuk air ketel ke dalam boiler. Biasanya air yang masuk sudah melalui proses pemurnian atau pemanasan awal (economizer).

h) *Blow Down*

Saluran untuk membuang endapan atau kotoran yang mengendap di dasar boiler. Membantu menjaga kualitas air dalam boiler agar tetap optimal dan mencegah korosi.

2.1.5 Mekanisme Kerja Ketel Uap

Kinerja *boiler* secara umum dimulai dari *inlet* bahan bakar (*fuel inlet*) dan *inlet* udara (*air inlet*) yang masuk ke dalam *burner*, tempat berlangsungnya proses pembakaran. Panas dari pembakaran akan dialirkan ke ruang bakar (*furnace*) dan dipindahkan ke pipa-pipa air (*water tubes*) yang mengalirkan fluida dari *steam drum*. Fluida yang mengalir melalui *water tubes* ini menerima panas langsung dari pembakaran dan berubah menjadi uap.



Gambar 2.2 Mekanisme Kerja Ketel Uap

Uap yang terbentuk akan naik ke *steam drum*, kemudian dialirkan ke bagian *superheater* untuk ditingkatkan temperaturnya, menghasilkan uap super panas (*superheated steam*) yang keluar melalui *superheated steam outlet*. Sisa panas dari gas pembakaran tidak langsung dibuang, melainkan dapat dimanfaatkan lebih lanjut di *economiser*, di mana air pengisi (*feedwater*) dipanaskan sebelum masuk kembali ke sistem melalui *feedwater inlet*. Proses ini meningkatkan efisiensi termal keseluruhan sistem *boiler*. Akhirnya, gas buang yang telah kehilangan sebagian besar panasnya akan dikeluarkan melalui *flue gases outlet*. Aliran air dari *steam drum* ke bawah juga dibantu oleh saluran *downcomers* agar sirkulasi fluida berjalan lancar (Cruz & Ugalde-Loo, 2021).

2.1.6 Sistem Pembakaran pada Ketel Uap

Pembakaran adalah proses kimia di mana bahan bakar (biasanya

berupa minyak, batu bara, atau gas) bereaksi dengan oksigen dari udara untuk menghasilkan energi panas. Proses ini dapat dibagi menjadi beberapa tahap:

2.1.6.1 Pengantaran Bahan Bakar

1. Bahan bakar cair (seperti HSD) dikirim ke ruang pembakaran melalui *burner* yang dilengkapi dengan sistem pemanas agar bahan bakar terciprat dan terbakar dengan efisien.
2. Bahan bakar gas dikirim dalam bentuk gas yang disalurkan ke ruang pembakaran melalui burner dengan sistem kontrol tekanan dan aliran yang akurat.
3. Bahan bakar padat (batu bara) dipasok ke ruang pembakaran menggunakan sistem pengumpan.

2.1.6.2 Penyemprotan Bahan Bakar

Pada boiler kapal yang menggunakan bahan bakar cair, bahan bakar disemprotkan melalui *nozzle burner* untuk membentuk kabut bahan bakar yang halus.

2.1.6.3 Pengaturan Aliran Udara

Udara untuk pembakaran dibawa oleh kipas udara (*forced draft fan*) yang menyediakan udara bertekanan tinggi ke dalam ruang pembakaran. Kipas ini membantu mencampur bahan bakar yang telah disemprotkan dengan oksigen dari udara sehingga proses pembakaran dapat berlangsung.

2.1.6.4 Pembakaran dan Reaksi Kimia

Setelah bahan bakar tercampur dengan udara, terjadi reaksi kimia pembakaran yang menghasilkan panas, karbon dioksida (CO₂), dan uap air (H₂O). Persamaan reaksi yang terjadi yaitu:



e) Pemantauan dan Kontrol

Boiler kapal dilengkapi dengan berbagai sensor dan perangkat pemantauan untuk memastikan bahwa pembakaran berjalan dengan efisien dan aman. Sistem ini dapat mengatur aliran udara, bahan bakar, dan suhu pembakaran secara otomatis.

2.1 Prinsip Kerja *Burner* pada Ketel Uap Kapal

Burner adalah perangkat utama dalam sistem pembakaran pada boiler yang berfungsi untuk mencampurkan bahan bakar dengan udara dalam perbandingan tertentu dan membakarnya guna menghasilkan energi panas. Energi panas ini kemudian digunakan untuk memanaskan air di dalam *boiler* hingga menjadi uap



Gambar 2.3 *Burner*

Terdapat beberapa jenis burner yang digunakan pada boiler kapal, yang disesuaikan dengan jenis bahan bakar dan karakteristik boiler itu sendiri, yaitu:

a) *Burner Bahan Bakar Cair (Liquid Fuel Burners)*

Digunakan pada kapal yang menggunakan bahan bakar minyak seperti HSD atau MDO (*Marine Diesel Oil*). Burner ini dilengkapi dengan sistem pemanasan bahan bakar untuk menjaga agar bahan bakar tetap dalam bentuk cair dan bisa disemprotkan dengan baik.

b) *Burner Bahan Bakar Gas (Gas Burners)*

Digunakan pada kapal yang menggunakan gas alam atau LNG sebagai bahan bakar. Burner gas memerlukan kontrol yang lebih presisi pada

tekanan gas agar pembakaran berlangsung optimal.

c) Burner Bahan Bakar Padat (*Solid Fuel Burners*)

Digunakan untuk membakar batu bara. Pembakaran bahan bakar padat membutuhkan pengaturan yang lebih rumit dalam aliran bahan bakar dan udara.

Komponen-Komponen *Main Burner* pada ketel uap kapal umumnya meliputi: (Tjahjono et al., 2023)

a) *Nozzle*

Berfungsi untuk menyembrotkan bahan bakar dalam bentuk kabut halus ke dalam ruang bakar. Nozzle harus menghasilkan pola penyemprotan yang merata agar pembakaran berlangsung sempurna



Gambar 2.4 *Nozzle*

b) Elektroda (*Ignition Electrode*)

Digunakan untuk memercikkan bunga api (spark) saat awal proses pembakaran. Elektroda ini biasanya bekerja dengan sistem pengapian tegangan tinggi.



Gambar 2.5 Elektroda

c) *Solenoid Valve*

Komponen katup elektrik yang mengontrol aliran bahan bakar ke dalam nozzle. Solenoid akan membuka saat sistem kontrol mengirimkan sinyal bahwa burner siap menyala.



Gambar. 2.6 Solenoid Valve

d) *Blower/Fan*

Menyuplai udara ke dalam ruang bakar agar bahan bakar dapat terbakar dengan sempurna. Udara yang cukup akan mencegah pembakaran tidak sempurna atau pembentukan karbon (jelaga).



Gambar. 2.7 *Blower Forced Draft Fan*

e) *Fuel Oil Pump*

Fuel oil pump adalah pompa yang digunakan untuk mengalirkan bahan bakar minyak (fuel oil) dari tangki penyimpanan menuju sistem pembakaran, seperti burner pada boiler atau mesin diesel. Pompa ini dirancang untuk menangani cairan kental seperti Heavy Fuel Oil (HFO) atau Marine Fuel Oil (MFO), yang memerlukan tekanan dan suhu tertentu agar dapat dipompa dengan lancar. Fuel oil pump bekerja dengan prinsip memindahkan fluida dari sisi hisap (inlet) ke sisi tekanan (outlet), dengan memberikan tekanan yang cukup agar bahan bakar bisa masuk ke burner dan terbakar secara efisien.



Gambar 2.8 Fuel Oil Pump

f) *Pressure Regulator Valve*

Mengatur tekanan bahan bakar yang masuk ke dalam nozzle agar tetap stabil. Tekanan yang terlalu rendah atau tinggi dapat menyebabkan pembakaran gagal.



Gambar 2.9 Pressure Gauge

g) *Photocell/Flame Sensor*

Sensor ini mendeteksi keberadaan nyala api. Jika api tidak terdeteksi dalam waktu tertentu, sensor akan memberi sinyal ke

sistem kontrol untuk mematikan burner secara otomatis sebagai langkah pengamanan.



Gambar 2.10 Sensor *Flame Aye*

h) Control Box

Mengatur urutan kerja burner mulai dari tahap starting, ignition, combustion, hingga shutdown. Panel ini juga dilengkapi sistem alarm untuk kondisi abnormal.



Gambar 2.11 Control Box Panel

2.2 Sistem Sensor dan Kontrol Otomatisasi pada Ketel Uap Kapal

Sensor adalah perangkat yang digunakan untuk mendeteksi perubahan fisik atau kimia pada lingkungan sekitarnya dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diukur dan dianalisis oleh sistem kontrol. Dalam sistem boiler, sensor memiliki peranan krusial dalam memantau parameter penting seperti suhu, tekanan,

ketinggian air, aliran bahan bakar, dan keberadaan nyala api (flame), sehingga memastikan proses pembakaran dan pembentukan uap berlangsung secara aman dan efisien. Menurut Lee (2024), sensor merupakan bagian integral dalam sistem instrumentasi dan otomasi industri, karena memungkinkan sistem untuk “merasakan” kondisi proses dan memberikan umpan balik secara real-time kepada pengontrol.

Sistem kelistrikan pada boiler kapal merupakan bagian penting yang mendukung pengoperasian burner dan komponen-komponen kontrol lainnya. Sistem ini biasanya terhubung ke Main Switchboard kapal dan memiliki panel kontrol khusus untuk boiler. Beberapa fungsi utama sistem kelistrikan dalam boiler kapal antara lain:

- 2.2.1 Menggerakkan motor-motor listrik seperti blower fan, pompa bahan bakar, dan pompa feedwater.
- 2.2.2 Menyuplai daya ke sistem kontrol otomatis (PLC atau relay logic) untuk mengatur urutan proses pembakaran.
- 2.2.3 Menyalakan sistem ignition seperti elektroda atau spark plug yang bekerja dengan tegangan tinggi.
- 2.2.4 Mengaktifkan dan mengatur sensor-sensor seperti pressure switch, flame detector, limit switch, dan temperature sensor.
- 2.2.5 Menyediakan pengamanan listrik berupa fuse, circuit breaker, dan alarm jika terjadi gangguan tegangan, beban berlebih, atau korsleting.

Boiler modern di kapal dilengkapi dengan sistem otomatisasi untuk menjaga operasi tetap efisien, aman, dan stabil tanpa intervensi manusia secara terus-menerus. Sistem otomatis ini berbasis pada kontrol loop tertutup dan dikendalikan oleh Programmable Logic Controller (PLC) atau control relay analog/digital.

Komponen-komponen dasar otomatisasi sistem kontrol di ketel uap, dapat berupa (Zhao et al., 2022):

- PLC (Programmable Logic Controller)
Otak dari sistem otomatis boiler. Mengatur logika penyalan burner, safety shutdown, alarm, dan kontrol tekanan/suhu.
- Actuator Valve (Solenoid Valve)
Membuka atau menutup aliran bahan bakar (FO/DO) secara otomatis.

- Diperintah oleh PLC atau relay berdasarkan kondisi operasi.
- Air-Fuel Ratio Controller
Mengatur jumlah udara dan bahan bakar agar pembakaran optimal. Umumnya berbasis servo motor atau sistem mekanik elektrik.
- Flame Safeguard System (FSS) Sistem proteksi otomatis terhadap flame failure. Jika api tidak terdeteksi dalam waktu tertentu, sistem akan shutdown otomatis.
- Alarm & Monitoring System (HMI / Panel Indikator)
Menampilkan kondisi operasi burner dan alarm fault. Memberikan notifikasi untuk operator jika terjadi gangguan.

Pasaribu dan Roza (2020) menjelaskan bahwa pengaturan suhu media pemanas berbasis sensor LM35 dan *servo motor* pada sistem pemanas *water jacket* dapat menjaga kestabilan temperatur secara otomatis dengan akurasi tinggi. Penerapan konsep serupa pada sistem pemanas bahan bakar di kapal dapat membantu mencegah kegagalan pembakaran akibat suhu bahan bakar yang rendah, yang sering menjadi salah satu penyebab *flame failure*.

Seluruh sistem ini bekerja dengan bantuan sensor-sensor yang memantau berbagai parameter serta aktuator yang mengatur aliran bahan bakar dan udara secara otomatis berdasarkan *input* dari sensor. Sensor yang beroperasi untuk mendukung kinerja *burner* pada ketel uap kapal dapat terdiri dari berbagai jenis sensor, yaitu (Baocheng & Li, 2017):

1. *Flame Detector*

Sensor api, berfungsi mendeteksi keberadaan nyala api di dalam *burner*. Bila api gagal menyala, sistem akan memutuskan suplai bahan bakar untuk mencegah ledakan. Sensor ini dapat berupa sensor UV (Ultraviolet) maupun IR (Infrared). Instalasi *flame detector* di sisi luar *burner* menghadap ruang pembakaran.



Gambar 2.12 *Flame Detector*

Pada penelitian ini sensor yang dipakai yaitu Infrared (IR) Flame Detector Siemens QRI2B1B adalah sensor khusus yang dirancang untuk mendeteksi nyala api pada sistem pembakaran minyak dan gas, terutama pada aplikasi boiler industri. Sensor ini bekerja dengan menangkap radiasi inframerah pada panjang gelombang sekitar 4.3 mikrometer, yang merupakan emisi khas dari gas karbon dioksida (CO_2) yang terbentuk saat proses pembakaran. Dengan respon cepat dan keandalan tinggi, QRI2B1B mampu memberikan sinyal keamanan yang akurat untuk memonitor keberadaan api dan menghindari risiko kebakaran yang tidak terdeteksi. Berikut adalah spesifikasi teknis utama dari sensor ini:

Tabel 4.1 Data spesifikasi sensor *flame detector*

Parameter	Spesifikasi Siemens QRI2B1B
Tipe sensor	Infrared Flame Detector (IR)
Tegangan kerja	220 V AC
Konsumsi daya	Sekitar 2 VA
Output	Relay kontak (NO/NC)
Waktu respon	< 2 detik
Jarak Deteksi	Hingga 5 meter (tergantung kondisi api)
Suhu Operasi	-20°C sampai +80°C
Dimensi	± 50 mm diameter, panjang 150 mm
Kelembaban Operasi	95% tanpa kondensasi

Dari tabel 4.1 merupakan data spesifikasi sensor *flame detector*, dapat dilihat bahwa Siemens QRI2B1B bekerja dengan tegangan 220V AC dan memiliki daya konsumsi yang rendah sekitar 2 VA. Sensor ini menggunakan relay kontak sebagai output untuk memberikan sinyal deteksi nyala api dengan waktu respon cepat kurang dari 2 detik. Jarak deteksinya mencapai hingga 5 meter dengan sudut deteksi $\pm 30^\circ$, yang cocok untuk pemasangan langsung pada dinding boiler atau burner. Sensor ini mampu beroperasi dalam rentang suhu -20°C hingga 80°C dan kelembaban hingga 95% tanpa kondensasi. Fitur proteksi khusus menjamin ketahanan terhadap gangguan dari sinar matahari dan sumber cahaya lain. Dengan dimensi kompak dan berat sekitar 0,5 kg, sensor ini mudah dipasang dan telah memenuhi standar sertifikasi CE dan EN 298 untuk aplikasi industri.

2. *Pressure Sensor*

Sensor tekanan, berfungsi memantau tekanan uap di dalam ketel dan tekanan bahan bakar yang menuju burner. Sensor ini dipasang di pipa bahan bakar dan ruang uap. Penggunaan pressure gauge sangat penting dalam berbagai sistem teknik dan industri, karena dapat membantu operator memantau kondisi tekanan dan mencegah kerusakan akibat tekanan berlebih (overpressure) maupun tekanan terlalu rendah (underpressure).



Gambar 2.13 *Pressure Sensor*

Pada penelitian ini menggunakan Pressure transmitter WIKA A-10, yang dimana sensor ini merupakan salah satu sensor tekanan elektronik yang banyak digunakan dalam aplikasi industri, termasuk pada boiler kapal. Sensor ini dirancang untuk memberikan pengukuran tekanan yang akurat dan andal dengan akurasi hingga $\pm 0,25\%$ dari skala penuh. Dengan material stainless steel 316L yang tahan korosi serta kemampuan bekerja di berbagai kondisi suhu dan lingkungan yang keras, WIKA A-10 sangat cocok untuk diaplikasikan di lingkungan maritim yang penuh tantangan. Sensor ini juga menyediakan output sinyal standar 4–20 mA yang mudah diintegrasikan ke

dalam sistem kontrol otomatis kapal, sehingga membantu menjaga keamanan dan efisiensi operasi boiler. Berikut adalah data spesifikasi WIKA A-10 Pressure Transmitter boiler kapal:

Tabel 2.2 Data spesifikasi *pressure gauge*

Parameter	Spesifikasi WIKA A-10
Tipe Sensor	Pressure Transmitter (Tekanan Elektronik)
Rentang Tekanan	0 ...0.6 Mpa
Akurasi	$\pm 0.25\%$ FS (Full Scale)
Output Sinyal	4–20 mA
Tegangan Supply	12 ... 30 V DC
Material Body	Stainless Steel 316L
Suhu Operasi	-40°C sampai +85°C
Respon Waktu	< 1 ms
Dimensi	Diameter ~ 43 mm, panjang ~ 90 mm

Dari tabel 2.2 di atas dapat dilihat bahwa WIKA A-10 merupakan sensor tekanan yang fleksibel dengan pilihan rentang pengukuran mulai dari 0,6MPa, sehingga bisa disesuaikan dengan kebutuhan sistem boiler kapal. Sensor ini menghasilkan sinyal output standar industri 4–20 mA dan membutuhkan catu daya 12–30 VDC, memudahkan integrasi ke sistem kontrol otomatis. Material body berbahan stainless steel 316L memberikan ketahanan tinggi terhadap korosi akibat uap air laut dan kondisi lingkungan yang keras. Selain itu, sensor ini memiliki waktu respon cepat di bawah 1 milidetik dan mampu beroperasi pada suhu lingkungan hingga 85°C, serta suhu media hingga 100°C. Pilihan konektor proses dan konektor listrik yang beragam juga membuat instalasi menjadi fleksibel. Secara keseluruhan, WIKA A-10 adalah solusi andal untuk pengukuran tekanan pada aplikasi

boiler kapal dan sistem tekanan industri lainnya.

3. Sensor Suhu

Sensor suhu, memiliki peran yang paling penting dan bekerja bersama dengan flame sensor. Tugas utamanya yaitu mengukur suhu air, suhu uap, dan suhu nyala burner. Sensor suhu yang digunakan pada kapal dapat berupa termokopel maupun RTD (*Resistance Temperature Detector*). Instalasi sensor suhu dilakukan di ruang bakar, outlet uap, dan pipa air masuk (Pasaribu, 2021).



Gambar 2.14 Sensor Suhu

Thermocouple Type K merupakan salah satu sensor suhu yang paling umum digunakan dalam sistem boiler kapal karena kemampuannya mengukur suhu tinggi dengan respon yang cepat dan struktur yang tahan terhadap lingkungan ekstrem. Sensor ini bekerja berdasarkan perbedaan tegangan listrik yang dihasilkan oleh dua jenis logam berbeda saat mengalami perubahan suhu. Dengan rentang pengukuran yang luas hingga lebih dari 1000°C dan konstruksi yang dapat dikustomisasi, Thermocouple Type K sangat ideal untuk mengukur suhu gas buang, ruang pembakaran, dan komponen lain dalam sistem uap kapal. Berikut adalah spesifikasi teknis dari Thermocouple Type K yang umum digunakan di aplikasi kelautan. Berikut adalah data spesifikasi untuk Thermocouple Type K.

Tabel 2.3 Data spesifikasi sensor suhu

Parameter	Deskripsi
Jenis Sensor	Thermocouple Type K
Rentang Suhu	-200°C hingga +1.200°C (praktis digunakan 0°C sampai 1.100°C)
Output Sinyal	Tegangan dalam milivolt (mV)
Koefisien Sensitivitas	~41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ di sekitar 1000°C
Akurasi Standar	$\pm 2.2^\circ\text{C}$ atau $\pm 0.75\%$ dari suhu terukur
Panjang Probe	50 mm – 500 mm

Dari tabel 2.3 di atas, dapat disimpulkan bahwa Thermocouple Type K menawarkan kombinasi antara ketahanan suhu tinggi, respons cepat, dan fleksibilitas instalasi, menjadikannya sangat cocok untuk pemantauan suhu pada berbagai titik kritis di sistem boiler kapal. Dengan rentang suhu yang luas hingga 1.200°C dan opsi material pelindung seperti stainless steel atau Inconel, sensor ini mampu bertahan dalam lingkungan keras seperti ruang mesin kapal. Output dalam bentuk tegangan milivolt memungkinkan integrasi yang mudah dengan sistem pemantauan suhu di control panel atau PLC. Selain itu, desainnya yang modular memungkinkan penggunaan pada berbagai konfigurasi, baik menggunakan ulir (thread), flange, maupun sistem clamp-on. Thermocouple Type K juga tersedia dalam versi tahan air laut dan bersertifikasi kelautan jika dibutuhkan, menjadikannya pilihan yang handal untuk operasi kelautan jangka panjang.

4. O₂ Analyzer

Oxygen Sensor berfungsi mengukur kadar oksigen dalam gas buang untuk mengatur rasio air:fuel. Umumnya instalasi sensor ini dilakukan di jalur gas buang (*chimney*).

Gambar 2.15 O₂ Analyzer

Jenis sensor oksigen yang dipakai pada kapal MT.Higt Standart yaitu OXY-Flex Flue Gas Oxygen Analyzer, yang dimana OXY-Flex Flue Gas Oxygen Analyzer adalah alat analisis gas berbasis sensor zirconia yang dirancang khusus untuk memantau kandungan oksigen dalam gas buang (flue gas) pada sistem pembakaran seperti boiler, furnace, dan incinerator. Alat ini digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi pembakaran, mengurangi emisi, dan meningkatkan keamanan operasional

Tabel 2.4 Data spesifikasi sensor oksigen

Parameter	Deskripsi
Rentang Pengukuran	0.1–25 % atau 0.1–100 % O ₂
Akurasi	< 0.5 % (0–25 %), < 1 % (0–100 %)
Waktu Respons	< 15 detik
Output	4–20 mA, 0–10 V
Tegangan dan Arus	24 VDC ±10 %, 500 mA operasional, <1–2 A saat start-up
Suhu Operasi	Probe: –100 °C hingga +250/400 °C; Housing: –10 °C hingga +85 °C

Tabel 2.4 di atas berbagai parameter teknis penting dari OXY-Flex Flue Gas Oxygen Analyzer. Rentang pengukurannya tersedia dalam dua opsi, yakni 0.1–25 % dan 0.1–100 % O₂, memungkinkan fleksibilitas dalam berbagai aplikasi industri. Akurasi pengukuran mencapai < 0.5 % untuk rentang rendah dan < 1 % untuk rentang penuh, dengan repeatability < 0.5 %, menunjukkan kestabilan dan presisi alat yang tinggi. OXY-Flex juga dirancang untuk kondisi lingkungan ekstrem, dengan probe yang mampu bekerja pada suhu hingga 250 °C atau 400 °C (tergantung model), serta housing yang tahan suhu hingga 85 °C. Selain itu, perlindungan IP65 dan opsional IP66 memastikan daya tahan alat terhadap debu dan percikan air di area industri.

5. Level Sensor

Sensor level air pada boiler adalah perangkat penting yang digunakan untuk mendeteksi dan memantau ketinggian air di dalam boiler. Fungsi utamanya adalah untuk menjaga level air tetap dalam batas aman, sehingga menghindari kerusakan pada boiler dan menjamin operasi yang efisien dan aman.



Gambar 2.16 Level Sensor

Untuk memastikan pengoperasian boiler yang aman dan efisien, pemilihan sensor level air yang tepat sangat penting. Sensor ini harus mampu bekerja pada kondisi suhu dan tekanan tinggi, serta tahan terhadap lingkungan yang

korosif akibat uap dan air panas. Spesifikasi sensor dapat bervariasi tergantung pada jenis sensor yang digunakan (seperti float, konduktif, kapasitif, atau tekanan diferensial). Berikut adalah spesifikasi umum dari sensor level air yang biasa digunakan pada sistem boiler:

Tabel 2.5 Data spesifikasi sensor level air

Parameter	Spesifikasi
Jenis Sensor	Float, Conductive, Capacitive, Ultrasonic, Differential Pressure
Tegangan Operasi	24VDC, 110VAC, atau 220VAC (tergantung sistem)
Arus Maksimum	0.5 – 2 A
Tekanan Operasi Maksimum	10 – 50 bar
Temperatur Operasi	-10°C hingga 250°C
Output	Relay (NO/NC), 4–20 mA
Panjang Probe / Sensor	200 mm – 2.000 mm
Akurasi Pengukuran	± 1 cm hingga ± 5 mm

Dari tabel 2.5 di atas, dapat dilihat bahwa setiap parameter pada sensor level air memiliki peran penting dalam menjamin kinerja dan keselamatan sistem boiler. Tegangan dan arus operasi menentukan kecocokan sensor dengan sistem kelistrikan yang digunakan. Tekanan dan suhu operasi menunjukkan batas kemampuan sensor untuk bekerja di lingkungan ekstrem yang umum pada sistem boiler.

2.3 Faktor Penyebab Kegagalan pada *Main Burner* Kapal

Kegagalan pada *main burner* pada sistem *boiler* kapal dapat disebabkan oleh berbagai faktor. Beberapa faktor yang menyebabkan kegagalan burner adalah (Purnama et al., 2025):

2.4.1 Masalah Pengatomisasian pada Burner

- a. Penyumbatan nozzle pada *burner* bisa tersumbat akibat penumpukan kotoran atau kotoran dari bahan bakar. Hal ini mengganggu proses atomisasi bahan bakar dan menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.

- b. Masalah Pemanasan Bahan Bakar Pada boiler yang menggunakan bahan bakar cair, bahan bakar harus dipanaskan agar dapat disemprotkan dengan baik. Jika sistem pemanas bahan bakar gagal, atomisasi bahan bakar akan terganggu.

2.4.2 Pengaturan Udara Pembakaran yang Tidak Tepat

Pembakaran yang tidak efisien dapat disebabkan oleh kualitas udara yang buruk, baik karena masalah pada kipas udara atau pengaturan aliran udara yang tidak tepat. Selain itu, tekanan udara yang terlalu tinggi atau rendah dapat mempengaruhi campuran bahan bakar dan udara, menyebabkan pembakaran tidak sempurna atau bahkan kegagalan total pada burner.

2.4.3 Penyumbatan

Penyumbatan saluran bahan bakar akan mengurangi aliran bahan bakar yang optimal ke *burner*, yang berpotensi menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.

2.4.4 Kerusakan pada Komponen Burner

Komponen-komponen seperti elemen pemanas atau nozzle yang aus atau rusak akan mempengaruhi atomisasi bahan bakar dan pembakaran yang efisien.

2.4.5 *Error* pada Sistem Kontrol/Monitoring

Burner yang tidak terpantau dengan baik bisa menyebabkan deteksi dini terhadap masalah pembakaran yang terlambat. Sensor yang gagal mendeteksi perubahan suhu, tekanan, atau emisi gas bisa menyebabkan kegagalan pembakaran sebelum masalah terdeteksi.

2.4 Faktor Penyebab Kegagalan pada *Main Burner* Kapal

Kegagalan pada *main burner* pada sistem *boiler* kapal dapat disebabkan oleh berbagai faktor. Beberapa faktor yang menyebabkan kegagalan burner adalah: (Purnama et al., 2025)

a.) Masalah Pengatomisasian pada Burner

1. Penyumbatan nozzle pada *burner* bisa tersumbat akibat penumpukan kotoran atau kotoran dari bahan bakar. Hal ini mengganggu proses atomisasi bahan bakar dan menyebabkan pembakaran yang tidak

sempurna.

2. Masalah Pemanasan Bahan Bakar

Pada boiler yang menggunakan bahan bakar cair, bahan bakar harus dipanaskan agar dapat disemprotkan dengan baik. Jika sistem pemanas bahan bakar gagal, atomisasi bahan bakar akan terganggu.

b) Pengaturan Udara Pembakaran yang Tidak Tepat

Pembakaran yang tidak efisien dapat disebabkan oleh kualitas udara yang buruk, baik karena masalah pada kipas udara atau pengaturan aliran udara yang tidak tepat. Selain itu, tekanan udara yang terlalu tinggi atau rendah dapat mempengaruhi campuran bahan bakar dan udara, menyebabkan pembakaran tidak sempurna atau bahkan kegagalan total pada burner.

c) Penyumbatan

Penyumbatan saluran bahan bakar akan mengurangi aliran bahan bakar yang optimal ke *burner*, yang berpotensi menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.

d) Kerusakan pada Komponen Burner

Komponen-komponen seperti elemen pemanas atau nozzle yang aus atau rusak akan mempengaruhi atomisasi bahan bakar dan pembakaran yang efisien.

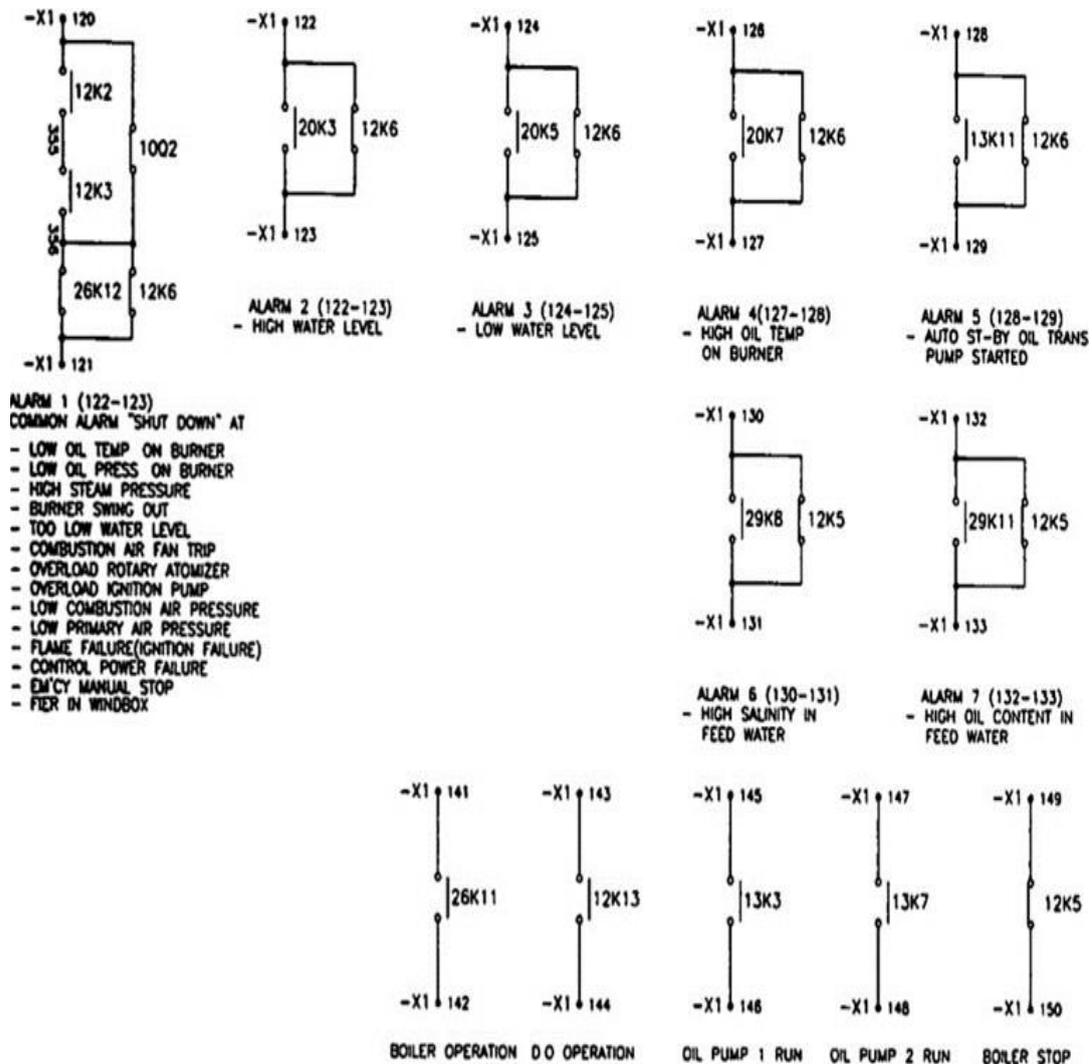
e) *Error* pada Sistem Kontrol/Monitoring

Burner yang tidak terpantau dengan baik bisa menyebabkan deteksi dini terhadap masalah pembakaran yang terlambat. Sensor yang gagal mendeteksi perubahan suhu, tekanan, atau emisi gas bisa menyebabkan kegagalan pembakaran sebelum masalah terdeteksi.

2.5 Kondisi Aktual Sistem Main Burner Boiler di Kapal MT Hight Standard

Objek pengamatan adalah boiler Aalborg Mission OM KB 100 dengan burner tipe *rotary cup atomizer* yang menggunakan bahan bakar Heavy Fuel Oil (HFO). Sistem pembakaran dikendalikan oleh *control box* dengan urutan kerja otomatis (*purging – ignition – combustion – post purging*) dan dilengkapi interlock

keselamatan seperti *low oil temperature*, *low/primary air pressure*, *flame failure*, *high steam pressure*, dan sebagainya. Panel kontrol menerima masukan dari sensor suhu HFO, transmiter tekanan bahan bakar, *switch* tekanan udara pembakaran, serta *flame scanner*.



Gambar 2.17 Manual book Boiler MT.High Standard

Gambar 2.17 yang ditampilkan merupakan sebuah diagram rangkaian kontrol listrik yang digunakan dalam sistem otomatisasi dan proteksi boiler (ketel uap). Diagram ini mencakup:

1. Sistem Alarm Otomatis, yang akan memberikan peringatan atau melakukan penghentian otomatis jika terjadi kondisi abnormal.
2. Kontrol Pengoperasian Boiler, seperti menjalankan pompa minyak,

operasi burner, serta kontrol start/stop boiler.

3. Indikasi Status Komponen, seperti relay (kontaktor) dan sensor yang memantau parameter penting seperti tekanan, suhu, level air, dan kualitas air umpan.

Tujuan utama dari sistem ini adalah untuk:

1. Menjaga keamanan operasi boiler.
2. Mendeteksi dan memberi peringatan dini terhadap kondisi berbahaya.
3. Menghindari kerusakan pada peralatan.
4. Menghentikan operasi secara otomatis bila kondisi tidak aman terdeteksi.

Daftar kondisi yang menyebabkan alarm 1 aktif:

1. Low Oil Temp on Burner – Suhu minyak terlalu rendah untuk pembakaran.
2. High Oil Temp on Burner – Suhu minyak terlalu tinggi → bahaya overheating.
3. Low Oil Pressure on Burner – Tekanan minyak tidak cukup untuk pembakaran.
4. High Steam Pressure – Tekanan uap berlebihan, bisa memicu ledakan.
5. Burner Swings Out – Burner keluar dari posisi → pembakaran tidak aman
6. Low Water Level – Air dalam boiler sangat rendah (bahaya overheating).
7. Combustion Fan Trip – Kipas pembakaran berhenti → pembakaran tidak sempurna.
8. Overload Rotary Atomizer – Pemecah bahan bakar kelebihan beban.
9. Low Combustion Air Pressure – Tekanan udara pembakaran terlalu rendah.
10. High Combustion Air Pressure – Tekanan udara pembakaran terlalu tinggi.
11. Flame Failure – Nyala api tidak terdeteksi (ignition gagal).
12. D.C. Control Power Failure – Gangguan pada catu daya kontrol DC.
13. Manual Stop – Operator menghentikan sistem secara manual.
14. Feedwater Window Stop – Sistem penghentian air umpan aktif.

Inspeksi fisik dilaksanakan setelah sistem boiler dipastikan dalam kondisi aman, yakni setelah proses shutdown dan cooling down selesai dilakukan. Hal ini bertujuan untuk menghindari risiko kecelakaan kerja akibat suhu tinggi, tekanan uap yang masih tersisa, atau potensi nyala balik (backfire). Pemeriksaan difokuskan pada empat komponen utama yang memiliki pengaruh langsung terhadap proses

pembakaran, yaitu nozzle/rotary cup, igniter/spark plug, flame scanner, dan fuel heater.

1. Nozzle/Rotary Cup

Nozzle pada sistem burner tipe rotary cup berfungsi sebagai saluran distribusi bahan bakar dari pipa suplai menuju permukaan cup yang berputar. Kualitas aliran dan pola sebaran bahan bakar yang keluar dari nozzle sangat menentukan kualitas atomisasi dan pembentukan nyala api. Hasil inspeksi menunjukkan adanya endapan karbon keras dengan ketebalan $\pm 1-2$ mm yang menempel pada bagian dalam port nozzle. Endapan ini berwarna hitam kecoklatan dan memiliki struktur berpori akibat pembakaran tidak sempurna pada siklus sebelumnya. Penyumbatan ini diperkirakan menutup $\pm 15\%$ dari luas aliran normal, yang berdampak pada terhambatnya suplai bahan bakar menuju cup. Akibatnya, pola semprotan menjadi tidak merata (distorted spray pattern), di mana aliran bahan bakar cenderung keluar dalam bentuk jalur- jalur sempit, bukan kabut halus. Kondisi ini sangat mempengaruhi atomisasi karena droplet bahan bakar yang keluar menjadi lebih besar, sulit bercampur dengan udara, dan memerlukan energi nyala lebih tinggi untuk terbakar sempurna. Dalam jangka panjang, sumbatan seperti ini juga dapat menyebabkan beban mekanis berlebih pada pompa suplai bahan bakar akibat peningkatan tekanan di hulu nozzle.

2. Igniter/Spark Plug

Igniter merupakan komponen vital pada tahap ignition, berfungsi menghasilkan percikan listrik bertegangan tinggi untuk menyalakan campuran awal bahan bakar dan udara. Pada pemeriksaan visual, permukaan elektroda terlihat aus dan berwarna keabu-abuan, indikasi bahwa umur pakai sudah melampaui batas optimal. Selain itu, jarak celah elektroda yang seharusnya 3 mm menyempit menjadi ± 2 mm, mengurangi kekuatan percikan yang dihasilkan. Percikan yang lemah memiliki energi rendah, sehingga sulit menembus lapisan kabut bahan bakar yang kental akibat viskositas tinggi pada suhu HFO rendah (92–

95°C). Hal ini menjelaskan mengapa pada saat percobaan start-up, nyala api hanya bertahan sesaat sebelum padam dan memicu alarm Flame Failure. Jika dibiarkan, kondisi igniter yang aus dapat menyebabkan siklus start-up gagal berulang kali, meningkatkan risiko penumpukan bahan bakar tidak terbakar di furnace, yang berpotensi memicu explosive ignition saat restart.

2. Flame Scanner

Flame scanner berfungsi mendeteksi keberadaan nyala api di ruang bakar dengan membaca intensitas cahaya yang dihasilkan pembakaran. Pada inspeksi awal, permukaan lensa flame scanner tertutup lapisan jelaga tipis dan debu hasil pembakaran. Meskipun lapisan ini terlihat ringan, secara signifikan mengurangi jumlah cahaya yang masuk ke sensor, menurunkan sensitivitas deteksi. Dalam kondisi nyala api yang sudah lemah akibat atomisasi buruk, penurunan sensitivitas sekecil apapun dapat menyebabkan sistem menganggap api padam meskipun masih ada pijar kecil. Setelah dibersihkan menggunakan kain mikrofiber kering, respon deteksi meningkat signifikan, ditandai dengan stabilnya pembacaan flame signal pada saat uji fungsional.

4. Fuel Heater

- a. Fuel heater bertugas memanaskan HFO hingga mencapai suhu operasi optimal (120–130°C) agar viskositasnya turun dan memudahkan atomisasi. Pada saat pengujian, elemen pemanas masih berfungsi, namun pengaturan temperatur tidak stabil. Suhu output dari fuel heater hanya mampu mencapai 92–95°C meskipun pengaturan thermostat sudah diatur ke set point 125°C. Hal ini dapat disebabkan oleh dua faktor utama: Kerusakan pada kontrol suhu (thermostat atau sensor temperatur) yang menyebabkan pemutusan arus pemanas sebelum suhu tercapai.
- b. Fouling pada pipa pemanas akibat penumpukan residu HFO yang menghambat perpindahan panas dari elemen pemanas ke aliran bahan bakar.

Kondisi ini menjadi salah satu penyebab utama rendahnya suhu

HFO di burner, yang berkontribusi pada kegagalan pembakaran selama proses start-up.

2.6 Pembakaran sebagai Gejala Kimia

2.6.1 Udara Cukup ,Minyak dibakar dengan asam di udara yang mengandung sekitar 78% N₂ dan sekitar 21% O₂, , fraksi masa sekitar 77%, dan sejumlah CO₂ sekitar 23%. Biasanya udara pembakaran dipanaskan oleh gas buang atau uap buang sebelum masuk ke tungku. Temperatur pembakaran biasanya 1000-13000 °C, tetapi ada nilai yang lebih tinggi hingga 2300 °C.

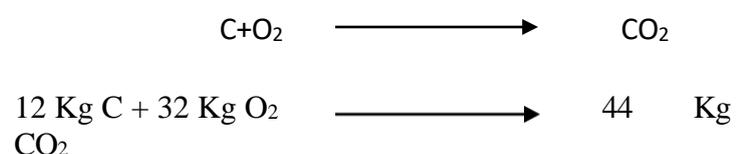
2.6.2 Campuran Bahan Bakar dan Udara yang BaikMakin baik penyampuran udara dan bahan bakar maka makin besar kemungkinan bahan bakar akan sempurna dengan udara yang sedikit.

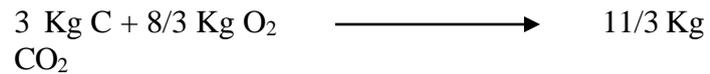
2.6.3 Suhu Bahan Bakar Bahan bakar motor diesel dengan tenaga tinggi mengandung banyak aspal kemudian dipanaskan, maka hasilnya pun akan mendapatkan bahan bakar seperti sebelum dicampur dengan suhu 60 0C – 850C Pembakaran di mesin diesel oleh karena itu membutuhkan suhu bahan bakar dan udara yang cukup tinggi, yang dicapai karena kondensasi udara pembakaran di ketel uap di mana waktu pembakaran karena pemanasan udara lebih lama. Jika satu atau lebih ketiga syarat tersebut tidak terpenuhi, maka pembakaran dipastikan gagal.

2.6.4 Asosiasi Bahan Pembakaran Total Udara Pembakaran (dalam Kg. Kg-1).

Misalnya, bahan bakar dengan fraksi massa H di mana c memiliki fraksi massa C dan s memiliki fraksi massa s. Saat menyiapkan bahan bakar (fraksi massa) 86% C, 12% H, dan 2% S, c, h, dan s sama dengan 0,86, 0,12, dan 0,02.

Zat arang terbakar sempurna apabila :





2.6.5 Pembakaran bahan bakar cair sangat penting berhasilnya pembakaran. Pembakaran yang tidak sempurna tidak hanya menyebabkan pencemaran pada boiler, tetapi juga kerugian pada sisi gas buang (paracharcoal). Minyak buram digunakan sebagai bahan bakar untuk ketel uap kapal komersial, dan produk lainnya berasal dari minyak bumi.

Minyak buram terutama terdiri dari arang, cairan dan belerang. Sulfur tidak mutlak diperlukan untuk menghasilkan panas dan hanya dianggap sebagai pengotor.

Pembakaran tidak sempurna atau tidak sempurna berarti tidak semua C dibakar menjadi CO₂ dan tidak semua H diubah menjadi H₂O. Pembakaran sempurna dengan gas buang menghasilkan CO, H₂, dan C. Arang yang tidak terbakar adalah komponen parakarbon. Paracharcoal adalah campuran arang, butiran abu, dan bahan terbaik dari udara pembakaran.

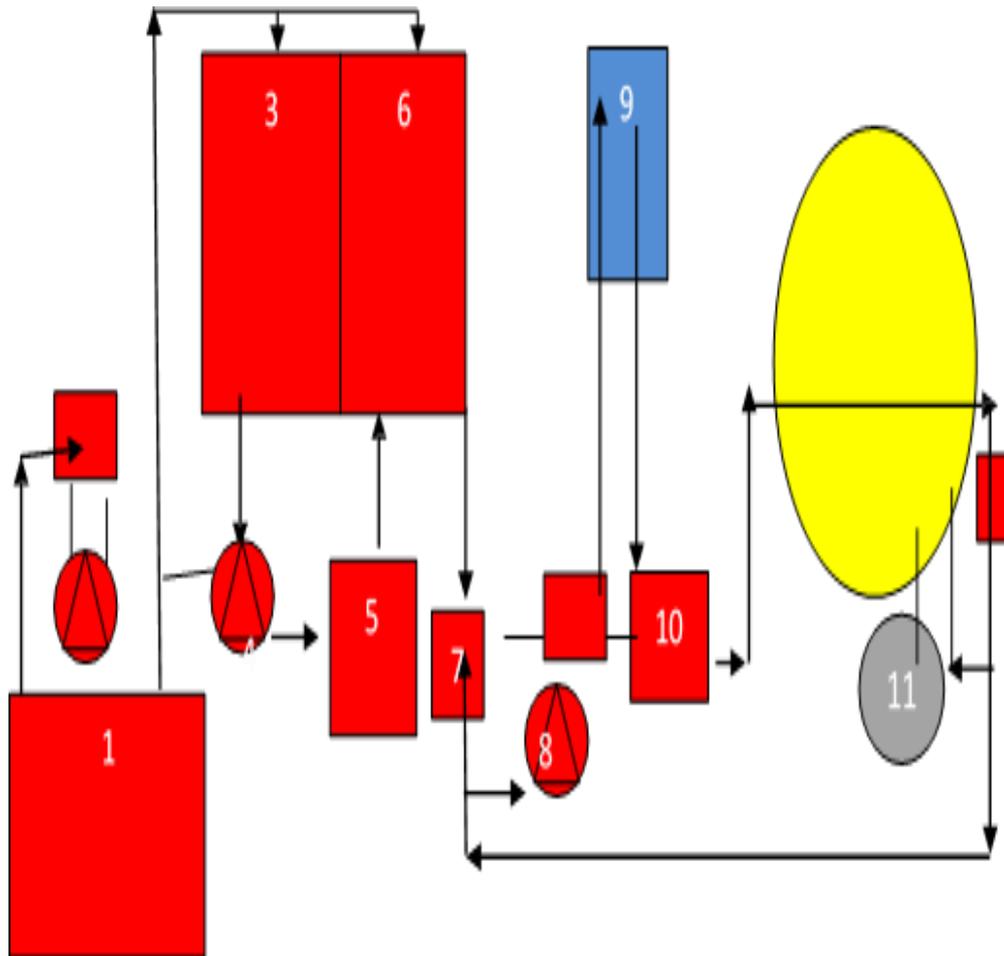
Arang rak ini dapat menempel pada bahan bakar lapis demi lapis, menghambat perpindahan panas karena konsumsi bahan bakar yang tinggi yaitu per kg uap. CO dan H₂ gas buang keluar dari cerobong asap.

Rugi primer karena pembakaran tidak sempurna sebagai berikut :

- a. Nilai kalor C hingga CO₂ = 32.900 KJ.Kg⁻¹
- b. Nilai kalor C hingga CO = 10.250 KJ.Kg⁻¹
- c. Nilai kalor H hingga H₂O = 142.000 KJ.Kg⁻¹

2.7 Sistem Bahan Bakar

Menurut *Boileau, M., Staffelbach, G., Cuenot, B., Poinsot, T., & Bérat, C. (2008)*. bahan bakar yang paling banyak digunakan adalah minyak berat. Untuk membakarnya, minyak terlebih dahulu harus dikeringkan dari api (pembakar minyak) dan kemudian dicampur dengan udara.



Gambar 2.17 Instalasi Bahan Bakar

Keterangan :

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| 1. Tangki Dasar Berganda | 7. Saringan Minyak Dingin |
| 2. Transfer <i>Pump</i> | 8. <i>Boiler Supply Pump</i> |
| 3. Tangki Persediaan | 9. <i>Oil Heater</i> |
| 4. <i>H.F.O Purifier Supply Pump</i> | 10. Saringan Minyak Panas |
| 5. <i>H.F.O Purifier</i> | 11. <i>Burner</i> |
| 6. Tangki Pemakaian | 12. Pipa Sirkulasi |

2.7.1 Tangki Bahan Bakar.

Tangki double bottom dan tangki yang rutin digunakan sebagai tangki

minyak tanah. Ada koil pemanas uap di sekitar tabung hisap untuk memanaskan tabung hisap di musim dingin.

2.7.2 Pompa Transfer Bahan Bakar.

Pompa transfer bahan bakar digunakan untuk mentransfer bahan bakar dari satu tangki bahan bakar ke tangki lain atau ke tangki harian.

2.7.3 *Settling Tank*

Tangki settling dirancang untuk memisahkan air dari minyak mentah. Sebuah kumparan dipanaskan disediakan ke tangki untuk pemisahan air yang baik dan minyak mentah dipanaskan sampai sekitar 60 ° C. Air yang terkumpul di dasar tangki dialirkan melalui katup pembuangan.

2.7.4 *H.F.O Purifier Supply Pump*

Pompa suplai digunakan untuk mengangkut atau menambahkan bahan bakar dari tangki pengendapan ke pembersih untuk dibersihkan.

2.7.5 *Purifier*

Pada tahap ini, bahan bakar dipisahkan menjadi minyak, air dan kotoran, dan bahan bakar yang telah dimurnikan dikirim langsung ke tangki servis atau tangki stok.

2.7.6 *Service Tank*

Pada tahap ini tangki penampungan bahan bakar yang sudah melewati proses purifikasi *purifier*.

2.7.7 *Saringan Minyak.*

Filter oli disediakan untuk memisahkan kotoran dari oli dan memiliki dinding ganda di bagian bawah. Filter dingin dipasang di depan pompa pembakaran oli, dan filter kawat dengan ukuran mesh kasar (110 mesh per inci persegi) digunakan karena konsentrasi oli yang tinggi pada suhu rendah. Filter panas disediakan di belakang pemanas di sisi tekanan pompa pembakaran minyak. Filter memiliki wire mesh dengan ukuran mesh halus (380 mesh² per inci). Setiap filter adalah tipe kembar dan dapat dibersihkan secara bergantian saat digunakan.

2.7.8 *Boiler Supply Pump*

Pompa yang digunakan untuk mensuplai bahan bakar dari tangki

bahan bakar ke *main burner boiler*.

2.7.9 Alat Pemanas Minyak Mentah

Pemanas minyak mentah digunakan untuk memanaskan minyak mentah untuk menurunkan konsentrasinya dan mendorong atomisasi untuk pembakaran yang lebih baik.

2.7.10 Pipa Sirkulasi

Pipa sirkulasi dirancang untuk mengalirkan dan memanaskan minyak pada awal pembakaran atau pada suhu rendah dari uap panas.

2.7.11 Pembakar Minyak

Pembakar minyak digunakan untuk mengatomisasi minyak mentah, mencampurnya dengan udara, dan membakar campuran gas. Berbagai pembakar tersedia tergantung pada aplikasinya. Persyaratan untuk pembakar minyak yang baik:

- a. Pembakar minyak harus disemprotkan secara menyeluruh dan dicampur dengan minyak dan udara.
- b. Memberikan fungsi dan keselamatan yang positif.
- c. Karena bentuknya yang kuat, tidak ada risiko kerusakan dan mudah ditangani selama pemeriksaan dan pembersihan.
- d. Mulut pipa jarang tersumbat oleh debu dan karbit.
- e. Nyala api bisa disesuaikan melalui rangkaian yang lebar.
- f. Penggunaan uap dan kekuatan minimal selama operasi.. Berbagai jenis minyak mentah dapat dipakai. O'Donnell, P. J. (1961).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian deskriptif kuantitatif. Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan secara mendalam penyebab kegagalan pada main burner sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD yang sedang menjalani perbaikan di PT Waruna Shipyard Indonesia. Penelitian ini berfokus pada analisis teknis kegagalan dan faktor-faktor yang memengaruhi kinerja boiler serta peran sistem kelistrikan dan kontrol otomatis dalam mendukung proses pembakaran pada boiler.

Penelitian ini akan menganalisis kejadian kegagalan main burner dengan mengumpulkan data kualitatif melalui observasi langsung, wawancara dengan teknisi dan operator kapal, serta dokumentasi teknis yang ada, seperti laporan perawatan, catatan operasional, dan manual teknis.

Pendekatan digunakan karena memungkinkan untuk menggali berbagai faktor penyebab kegagalan yang mungkin tidak teridentifikasi dalam penelitian kuantitatif (Creswell, 2019). Oleh karena itu, penelitian lebih menekankan pada pemahaman kondisi riil di lapangan dan upaya-upaya yang dilakukan dalam memperbaiki kerusakan tersebut.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan pada kapal MT HIGHT STANDARD yang merupakan salah satu kapal milik PT Waruna Shipyard Indonesia, yang beralamat di Jalan Bagan Deli Lama, Medan, Belawan 1, Kota Medan, Sumatra Utara. Proses pengumpulan data dilakukan selama periode *docking* kapal, yang diperkirakan berlangsung selama 3 bulan, mulai dari Maret hingga Juni 2025. Selama periode tersebut, peneliti akan melakukan observasi langsung pada kondisi sistem *boiler* kapal, serta berinteraksi dengan teknisi dan kru kapal yang terlibat dalam proses perbaikan.

Data penelitian yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh langsung dari kapal MT HIGH STANDARD yang sedang menjalani perbaikan (*docking*) di PT Waruna Shipyard Indonesia. Data ini terdiri dari informasi teknis dan operasional

yang terkait dengan sistem boiler dan kondisi kapal secara umum. Pengumpulan data dilakukan melalui pemeriksaan dokumen teknis, observasi lapangan, dan wawancara dengan teknisi kapal.

3.2.1 Data Spesifikasi Boiler

Boiler yang digunakan pada kapal MT HIGH STANDARD memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.1 Data spesifikasi boiler

AALBORG	MISSION OM, KB 100
Kapasitas Output	1000 kg/jam
Tipe Burner	Rotary cup atomizer
Motor Penggerak Burner	7,5 – 9 KW (50/60 HZ)
Tekanan udara minimum	6,5 bar (g)
Tekanan udara maximum	25 bar (g)
Suhu udara pembakaran	45°C

Spesifikasi ini penting untuk mengetahui batasan kerja (operating limits) boiler, sehingga memudahkan analisis penyebab kegagalan *main burner* berdasarkan kesesuaian dengan parameter teknis pabrikan.

3.2.2 Data Operasi Boiler

Data operasi boiler mencakup parameter yang diukur selama proses inspeksi dan pengujian, antara lain tekanan bahan bakar yang masuk ke burner, jarak elektroda pemantik (ignition electrodes), dan pembukaan damper untuk pengaturan aliran udara pembakaran. Pengambilan data operasional dilakukan bersamaan dengan proses pemantauan lapangan. Data ini nantinya akan dianalisis untuk menghitung parameter-parameter penting yang berhubungan dengan efisiensi pembakaran serta mengidentifikasi potensi penyebab kegagalan main burner.

3.2.3 Data Teknis Kapal MT HIGH STANDARD

Data teknis kapal memberikan gambaran menyeluruh mengenai spesifikasi dan karakteristik kapal yang menjadi lokasi penelitian. Informasi ini penting untuk memahami lingkungan operasional dari sistem boiler dan keterkaitannya dengan operasi keseluruhan kapal.

1. General

- a. Ship's Name : MT HIGHT STANDARD
- b. Vessel Type : TANKER
- c. Flag : INDONESIA
- d. Port Registry : BELAWAN
- e. Call Sign : YDGV3
- f. IMO Number : 9365489
- g. MMSI No. : 525103009
- h. INM – C : 452502834 , 452502835
- i. Telp. And Fax No. : 021-43928112
- j. Owner : PT. WARUNA SHIPYARD AND SHIPPING
- k. Tech. Manager / Operator : PT.WARUNA NUSA SENTANA
- l. Builder : HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES Co., Ltd., Ulsan Shipyard,
Korea
- m. Hull No. : 2576 G.A : No. 1G-7000-201
- n. Keel Laid : 20 December 2012
- o. Delivered : 17 September 2013
- p. Class : Bureau Veritas
- q. Class Notation : +100A1 Liquefied Gas Carrier, Ship type 2G, Butadiene, Butane, Butylene, Propane, ButanePropane mixtures, Propylene, in Independent Tanks Type A, Maximum Specific Gravity 0.61, Maximum vapour pressure 0.275 bar (0.40 bar in Harbour), Minimum Cargo Temperature minus 50°C, ShipRight(SDA, ACS(B)),
*IWS,LI,+LMC,UMS,NAV1,+Llyod' s RMC(LG) with descriptive notes: ETA,Part Higher Tensile Steel, ShipRight (FDA, CM, BWMP(S), SCM)
- r. Serviced Speed : 16.75 Knot

2. Dimensions, Draft

- a. Length Overall : 225.81 m
- b. Length Between Perpendiculars : 215.00 m
- c. Breadth Moulded : 36.60 m

- d. Depth Moulded : 22.30 m
 - e. Deadweight : 54627 Ton
 - f. Gross Tonnage : 48917 Ton
 - g. Light Ship Weight : 19006 Ton
 - h. Net. Tonnage : 16576 Ton
 - i. Max Draft (S) : 11.92 m
 - j. Air Draft, Keel to Mast : 50.34 m
 - k. Free Board (S) : 6.41 m
3. Capacities
- a. Cargo Tank : 84187.1 m³(100%), 82503.4 m³(98%)
 - b. Ballast Tank : 23512 m³
 - c. FO and DO : FO : 2897 m³ (98%) and DO : 205.1 m³ (98%)
 - d. Cargo Pump : DEEP WELL PUMP, 8x700 m³/h x 120 mlc
 - e. Ballast Pump : 2x800 m³/h
 - f. Booster Pump : 2x700 m³/h x 120 mlc
4. Main engine
- a. Maker : HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C8.2
 - b. Type : Vertical, Single Action, 2 Cycle, Direct Injection, 6 Cylinder
 - c. Engine Power : MCR 13800 Kw (105 RPM)
 - d. Fuel Type : HFO & MDO
5. Aux Engine
- a. Maker : YANMAR CO., LTD. (6N21AL-GW)
 - b. Type : Vertical, Single Action, 4 Cycle, Direct Injection, 6 Cylinder,
Water Cooled
 - c. Rate Output : 1020 Kw (900 RPM)
 - d. Fuel Type : HFO & MDO f. Crew complement : 29+(6 suez crew) PERSON

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meteran, digunakan untuk mengukur jarak atau dimensi fisik

komponen dan instalasi yang berkaitan dengan sistem boiler, seperti panjang pipa bahan bakar, jarak antar komponen burner, serta posisi pemasangan sensor. Pengukuran yang akurat penting untuk memastikan pemasangan komponen sesuai spesifikasi teknis dan memudahkan proses inspeksi di lapangan.

2. Pressure Regulator, berfungsi untuk mengatur dan menjaga tekanan fluida (udara atau bahan bakar) agar sesuai dengan setpoint yang direkomendasikan oleh pabrikan boiler. Alat ini mencegah terjadinya tekanan berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan komponen burner atau mengganggu kestabilan pembakaran.
3. Multitester (Multimeter), digunakan untuk mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, dan resistansi pada komponen kelistrikan burner, termasuk motor penggerak, sistem ignition, dan sensor. Alat ini membantu dalam mendiagnosis kerusakan atau ketidaksesuaian pada sistem kelistrikan dan kontrol otomatis.
4. Sensor Flame Eye (Flame Scanner/Detector), merupakan perangkat yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan nyala api di dalam ruang bakar. Dalam penelitian ini, sensor digunakan untuk memverifikasi fungsi flame safeguard system pada boiler. Data dari sensor ini menjadi acuan sistem kontrol untuk memutuskan apakah burner tetap menyala atau harus trip demi keselamatan.
5. Thermocouple dan LM35 Temperature Sensor, digunakan untuk mengukur temperatur bahan bakar dan udara pembakaran. LM35 digunakan untuk pengukuran dengan keluaran analog yang presisi, sedangkan thermocouple mampu mengukur suhu tinggi di area dekat ruang bakar. Kedua alat ini membantu memastikan suhu bahan bakar berada dalam rentang optimal untuk proses atomisasi.
6. Stopwatch Digital, digunakan untuk mengukur waktu respon sistem, seperti durasi proses purging, waktu penyalaan burner, dan waktu shutdown. Data ini penting untuk menilai kesesuaian operasi dengan prosedur standar (SOP) dan manual pabrik.
7. Manual Book dan Diagram Kelistrikan Boiler, berfungsi sebagai acuan teknis dalam proses inspeksi, pengukuran, dan analisis.

Dokumen ini membantu mengidentifikasi titik pengukuran, urutan kerja sistem, serta batas operasi yang direkomendasikan oleh pabrikan.

3.4 Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan beberapa teknik, yaitu observasi langsung, wawancara, dan studi dokumentasi. Teknik-teknik ini dipilih untuk memperoleh informasi terkait penyebab kegagalan *main burner* pada sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD.

3.4.1 Observasi Langsung

Observasi langsung dilakukan untuk memantau secara langsung kondisi teknis dari *main burner* dan sistem *boiler* kapal selama proses perbaikan di PT Waruna Shipyard Indonesia. Peneliti akan mengamati proses perawatan dan perbaikan yang dilakukan terhadap *main burner*, termasuk pemeriksaan fisik sistem kelistrikan, kontrol otomatis, dan komponen lainnya. Observasi ini bertujuan untuk mendokumentasikan temuan lapangan yang relevan dengan penyebab kegagalan dan upaya perbaikan yang dilakukan.

3.4.2 Wawancara

Wawancara dilakukan dengan beberapa informan utama, yaitu teknisi kapal, operator boiler, serta staf teknis PT Waruna Shipyard Indonesia yang terlibat dalam perbaikan kapal MT HIGHT STANDARD. Wawancara ini bertujuan untuk menggali informasi lebih lanjut mengenai pengalaman praktis, masalah yang dihadapi dalam perbaikan *main burner*, dan langkah-langkah yang diambil untuk mengatasi kegagalan tersebut. Wawancara juga digunakan untuk memperoleh data terkait dengan prosedur perawatan dan standar operasional yang berlaku pada sistem boiler kapal.

3.4.3 Studi Dokumentasi

Studi dokumentasi dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis dokumen-dokumen yang berkaitan dengan perbaikan kapal MT HIGHT STANDARD, seperti laporan perawatan sebelumnya, catatan operasional kapal, manual teknis sistem boiler, dan catatan perbaikan yang terkait dengan *main burner*. Dokumen-dokumen ini memberikan informasi tambahan mengenai riwayat teknis kapal dan perbaikan sebelumnya yang berhubungan dengan

kegagalan yang terjadi pada *main burner*.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini menjelaskan tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam rangka memperoleh data yang diperlukan untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Penelitian ini akan mengikuti langkah-langkah berikut:

3.5.1 Persiapan Penelitian

Pemilihan Lokasi Penelitian: Penelitian ini dilakukan di PT Waruna Shipyard Indonesia, yang terletak di Jalan Bagan Deli Lama, Medan, Belawan 1, Kota Medan, Sumatra Utara. Sebelum mulai mengumpulkan data, peneliti akan mengajukan izin kepada pihak yang berwenang di PT Waruna Shipyard Indonesia untuk melakukan penelitian di area perbaikan kapal dan mengakses informasi terkait dengan sistem boiler. Langkah persiapan terakhir yaitu menyiapkan alat bantu yang diperlukan, seperti panduan wawancara, format observasi, dan dokumen studi literatur terkait.

3.5.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan observasi langsung pada sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD, memantau kondisi main burner dan sistem terkait, serta mencatat segala kejadian atau temuan teknis yang relevan dengan kegagalan main burner. Kemudian peneliti melakukan wawancara bersama teknisi kapal dan operator boiler untuk menggali informasi lebih lanjut tentang masalah yang terjadi pada main burner dan langkah-langkah yang diambil dalam perbaikan. Setelah wawancara, data berikutnya dikumpulkan melalui studi dokumentasi di mana peneliti akan mengumpulkan dokumen- dokumen teknis yang terkait dengan perawatan dan perbaikan kapal MT HIGHT STANDARD, termasuk laporan perawatan, manual teknis sistem boiler, serta catatan operasional.

3.5.3 Analisis Data

Data yang diperoleh dari wawancara, observasi, dan dokumentasi akan dianalisis secara kualitatif. Peneliti akan mengidentifikasi pola, tema, dan faktor penyebab kegagalan berdasarkan temuan lapangan. Untuk meningkatkan validitas hasil penelitian, peneliti akan melakukan triangulasi data dengan

menggabungkan hasil observasi, wawancara, dan dokumentasi untuk mengkonfirmasi kesesuaian temuan.

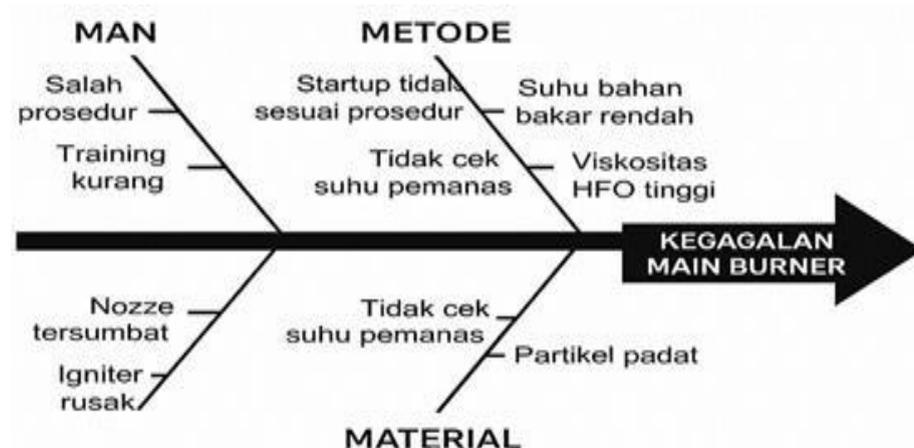
3.6 Teknik Analisis Data

Dalam penelitian ini, teknik analisis data yang digunakan adalah model analisis data interaktif Miles & Huberman. Model ini berfokus pada tiga tahapan utama dalam menganalisis data kualitatif, yaitu reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan.

3.6.1 Reduksi Data

Reduksi data adalah proses pemilihan, pemfokusan, penyederhanaan, dan pengabstrakan data yang diperoleh dari observasi, wawancara, dan dokumentasi. Proses ini bertujuan untuk menyaring data yang relevan dan menghilangkan informasi yang tidak relevan dengan fokus penelitian. Langkah-langkah reduksi data penelitian ini yaitu:

1. Mengidentifikasi temuan utama dari hasil observasi dan wawancara yang berkaitan dengan kegagalan main burner.
2. Menyaring informasi yang berulang dan hanya memilih data yang secara langsung berhubungan dengan masalah kegagalan pembakaran pada sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD.
3. Mencatat fenomena yang paling signifikan, seperti gejala awal kegagalan pembakaran, peran sistem kelistrikan, dan kontrol otomatis dalam mendukung kinerja burner



Gambar 3.2 Diagram Sebab-Akibat (Fishbone) Kegagalan Main Burner

3.6.2 Penyajian Data

Penyajian data adalah proses menyusun dan menyajikan data dalam

bentuk yang mudah dipahami dan dianalisis lebih lanjut. Data yang telah direduksi akan disusun dalam bentuk yang lebih terstruktur dan sistematis.

Langkah-langkah pada tahapan penyajian data meliputi:

4. Membuat tabel atau diagram untuk memudahkan pemahaman tentang hubungan antara variabel yang berpengaruh pada kegagalan main burner.
5. Menyajikan data yang telah dikategorikan dalam bentuk naratif, sehingga memudahkan peneliti untuk melihat pola atau tren yang ada.
6. Menggunakan diagram alir atau model konsep untuk menggambarkan hubungan antar faktor penyebab kegagalan dan dampaknya terhadap kinerja boiler

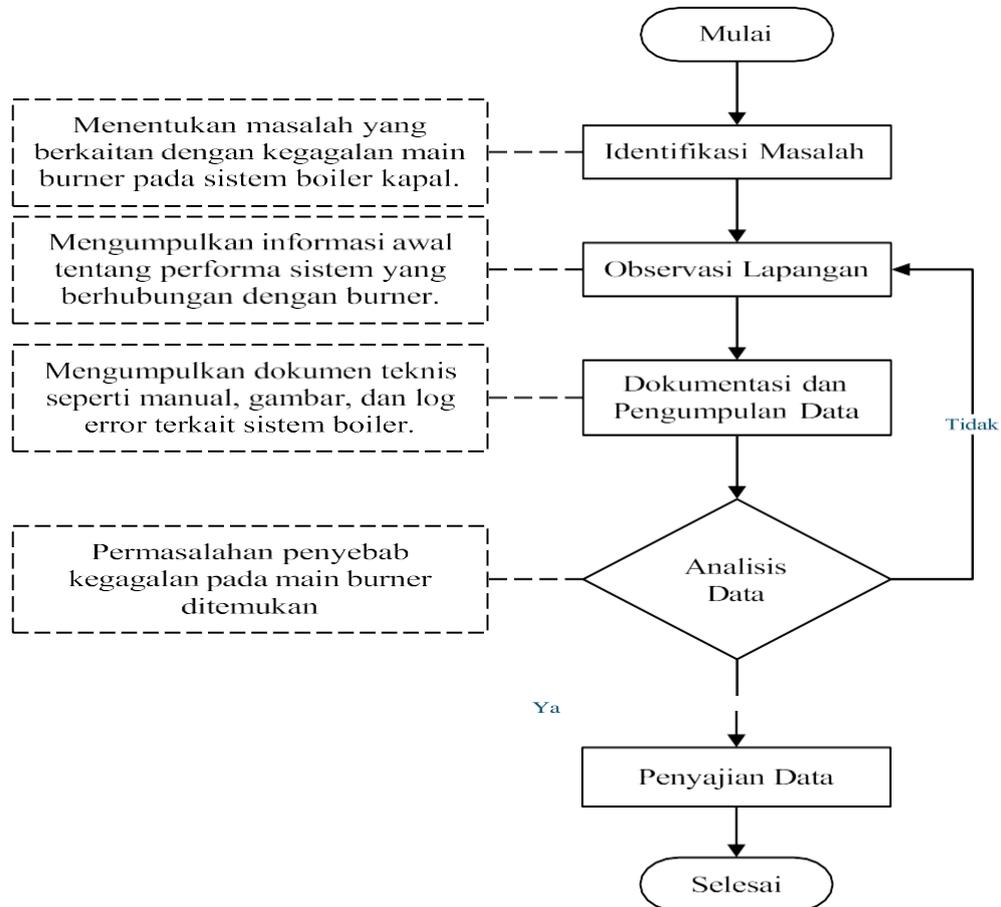
3.6.3 Penarikan Kesimpulan

Penarikan kesimpulan adalah tahapan akhir dalam proses analisis data yang bertujuan untuk mengidentifikasi temuan utama dari penelitian dan menarik kesimpulan berdasarkan data yang telah dianalisis.

7. Menyusun kesimpulan tentang penyebab utama kegagalan main burner pada sistem boiler kapal MT HIGHT STANDARD berdasarkan analisis data yang telah dilakukan.
8. Mengidentifikasi faktor-faktor teknis dan non-teknis yang berperan dalam terjadinya kegagalan pembakaran.
9. Memberikan rekomendasi untuk perbaikan dan pencegahan kegagalan serupa di masa depan, berdasarkan analisis yang telah dilakukan.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 menggambarkan langkah-langkah sistematis yang dilakukan untuk menganalisis penyebab terjadinya kegagalan *main burner* pada sistem boiler kapal. Tahapan penelitian dimulai dari proses identifikasi masalah hingga penyajian data hasil analisis.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengaruh kelistrikan pada proses pembakaran boiler kapal

Bab ini menyajikan uraian hasil penelitian yang diperoleh dari kegiatan observasi, pengukuran, dokumentasi, serta analisis terhadap sistem main burner boiler pada kapal MT Hight Standard yang sedang melakukan perbaikan di PT Waruna Shipyard Indonesia. Penelitian ini difokuskan untuk mengidentifikasi kondisi komponen kelistrikan pada boiler, mengumpulkan data parameter operasional, melakukan inspeksi fisik komponen, menganalisis kerja komponen kelistrikan serta mengkaji dampak yang ditimbulkan dari kegagalan main burner. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung di lapangan, pencatatan parameter kerja boiler menggunakan instrumen ukur, dan pemeriksaan fisik terhadap komponen utama burner. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dengan mengacu pada manual pabrikan Aalborg Mission OM KB 1000, standar operasi kapal tanker, serta teori pembakaran pada sistem ketel uap laut.

Dalam proses pembakaran terdapat komponen utama kelistrikan yang ada pada boiler yaitu:

1. *Feedwater Pump* (Pompa Air Masuk) Salah satu komponen yang paling penting dalam sistem boiler adalah *feedwater pump*. Pompa ini berfungsi untuk memompa air yang telah diproses (umumnya melalui softener) masuk ke dalam boiler, adapun data pada pompa yaitu;

$$\text{Daya} = 3,2 \text{ kw}$$

$$\text{Arus} = 5 \text{ A}$$

$$\text{Cos } \phi = 0,85$$

$$\text{Tegangan} = 440 \text{ V}$$

$$\text{Kapasitas tangka} = 1000\text{L}$$

$$\text{Energi} = \text{Daya pompa (kw)} \times \text{waktu (jam)}$$

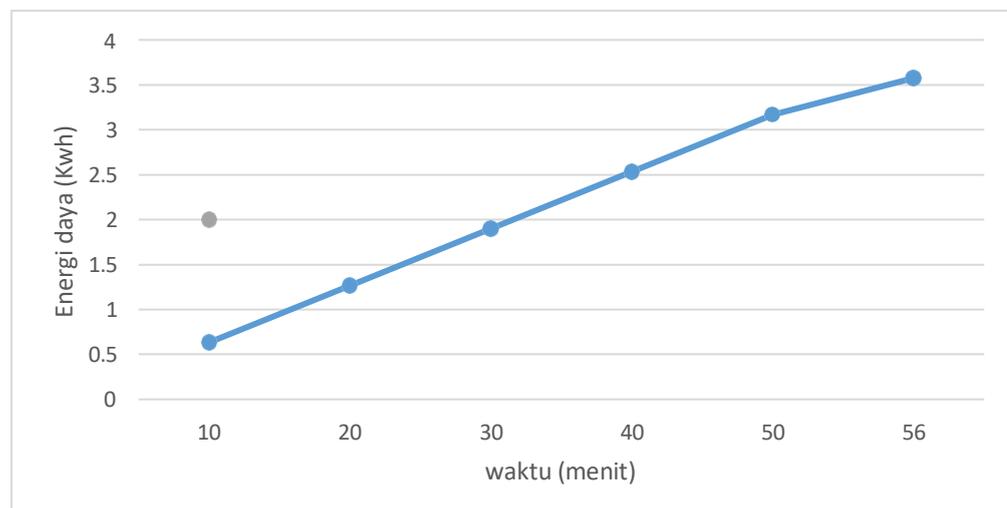
$$= 3,8 \times 0,1667$$

$$= 0,633 \text{ Kwh}$$

Tabel 4.1 Hasil pengukuran *feed water pump* pengisian 1000 L

Waktu (menit)	Volume terisi (L)	% dari 1000 L	Energi (kwh)
10	177	17,7	0,633
20	354	35,4	1,267
30	531	53,1	1,900
40	708	70,8	2,533
50	885	88,5	3,167
56	100	100	3,576

Hasil pengukuran pada tabel 4.1 menunjukkan pengukuran pada *feed water pump* yang dimana untuk mengisi air membutuhkan waktu selama 56 menit untuk tangka dengan kapasitas 1000 liter, dengan energi daya listrik yang terpakai 3,576 kwh. Pengukuran ini dilakukan dengan waktu 0 sampai 56 menit, yang dimana setiap 10 menitnya dihitung berapa liter air yang telah diisi pada tangka tersebut.



Gambar 4.1 Grafik Energi daya pada waktu tertentu

Gambar 4.1 menunjukkan grafik perbedaan energi daya listrik pada saat *Feedwater* bekerja. Pada pengukuran energi daya listrik pada pompa kenaikan energi daya. Pengukuran ini dilakukan selama 60 menit, yang

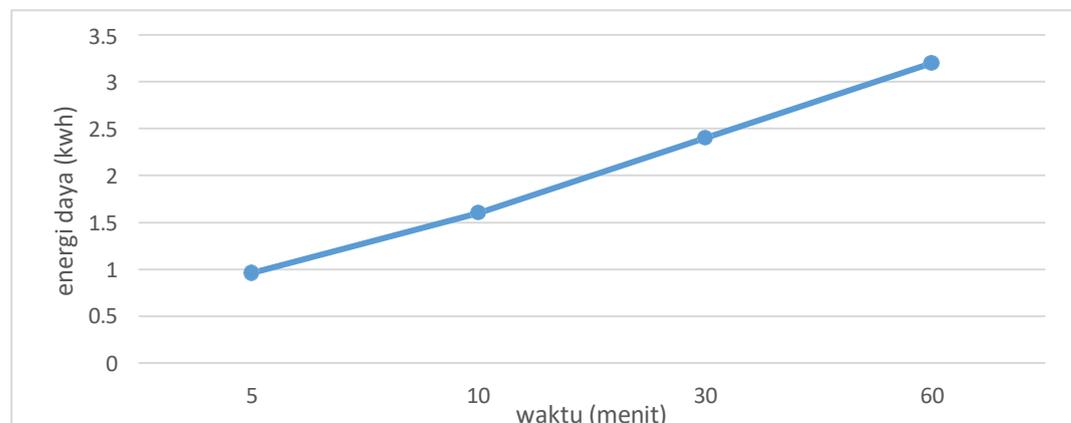
dimana pengukuran dilakukan disetiap 10 menit. Pada grafik ini menunjukkan bahwa *Feedwater* selama bekerja terjadinya peningkatan energi daya listrik sesuai berapa lama feedwater bekerja.

2. *Combustion Air Blower (Blower Udara Pembakaran)* Untuk proses pembakaran yang efisien, udara yang cukup harus disuplai ke ruang pembakaran. *Combustion air blower* berfungsi untuk memberikan suplai udara pembakaran yang cukup.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan energi daya pemakaian blower

Kondisi operasi	Keterangan	Waktu (menit)	Energi (kwh)
Low fire	Start api kecil	5	0,96
Medium fire	Beban normal	10	1,6
High fire	Mendekati kapasitas penuh	30	2,4
Full load	Kapasitas maksimum boiler	60	3,2

Hasil pengukuran pada tabel 4.2 merupakan hasil dari pengukuran blower pada saat boiler beroperasi. Pada saat boiler terjadi beberapa tahap, yang dimana terjadi start api kecil merupakan awal pembakaran dengan waktu 5 menit. Setelah start, kondisi blower naik beban normal dengan waktu 10 menit. Lalu masuk ke mendekati kapasitas penuh dengan waktu 30 menit. Dan terakhir kondisinya kapasitas maksimum boiler



Gambar 4.2 grafik energi waktu terhadap waktu operasi

Gambar 4.2 menunjukkan grafik perbedaan energi daya listrik pada saat *blower* bekerja. Pada pengukuran energi daya listrik pada *blower* kenaikan energi daya. Pengukuran ini dilakukan selama 60 menit, yang dimana pengukuran dilakukan 5, 10, 30, dan 60 menit. Pada grafik ini menunjukkan bahwa *blower* selama bekerja terjadinya peningkatan energi daya listrik sesuai berapa lama feedwater bekerja.

3. *Pompa Bahan Bakar (Fuel Oil Pump)* Pada boiler yang menggunakan bahan bakar cair seperti minyak HFO, fuel oil pump berfungsi untuk memompa bahan bakar ke burner.

Data pompa

$$P_{\text{motor}} = 3,8 \text{ kw} = 3800 \text{ watt}$$

$$n_{\text{pump}} = 0,70$$

$$\text{pressure } (P) = 0,2 \text{ MPa} = 200.000 \text{ Pa}$$

$$\text{Densitas } (\rho) = 900 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Percepatan gravitasi } (g) = 9,81 \text{ m/s}^2$$

a) Daya hidraulik

$$p_{\text{hyd}} = 3800 \times 0,70 = 2660 \text{ w}$$

b) Laju alir

$$Q = \frac{P_{\text{hyd}}}{p} = \frac{2660}{200000} = 0,01330 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{Konversi } Q \text{ L/min} &= 0,01330 \times 1000 \times 60 \\ &= 798 \text{ L/min} \end{aligned}$$

c) Laju massa

$$\begin{aligned} m &= 900 \times 0,01330 \\ &= 11,97 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

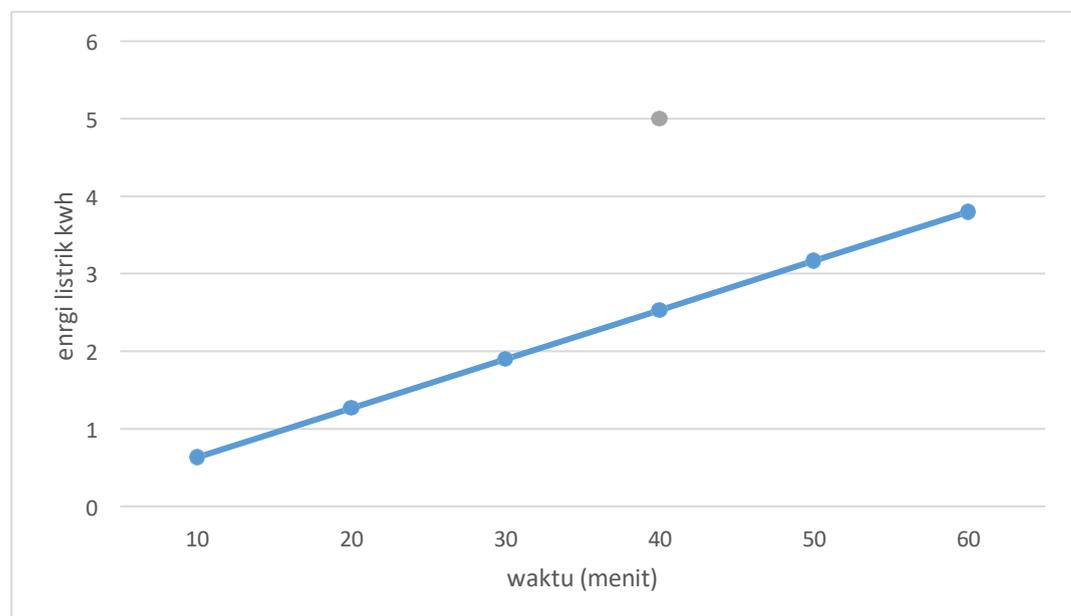
d) Energi daya = P motor x waktu (min)/ 60

$$\begin{aligned} &= 3,8 \times 10/60 \\ &= 0,63333 \text{ kwh} \end{aligned}$$

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan pemakaian pompa bahan bakar

Waktu (menit)	Energi listrik (kwh)	Laju alir (L/min)	Laju massa (kg/s)
10	0,633	798	11,97
20	1,266	789	11,97
30	1,900	789	11,97
40	2,533	789	11,97
50	3,166	789	11,97
60	3,800	789	11,97

Hasil pengukuran pada tabel 4.3 Laju alir dan laju massa tetap karena diasumsikan pompa beroperasi konstan selama percobaan, energi daya dihitung sejak pompa menyala, dalam perhitungan ini waktu nya selama 60 menit, yang dimana setiap 10 menitnya dilakukan perhitungan. Pada energi yang dipakai sebanyak 0,6333 kwh, pada menit 60 energi listrik yang terpakai 3,800 kwh.



Gambar 4.3 Grafik pemakain energi listrik terhadap waktu yang ditentukan

Gambar 4.3 menunjukkan grafik perbedaan energi daya listrik pada saat pompa bekerja. Pada pengukuran energi daya listrik pada pompa kenaikan

energi daya. Pengukuran ini dilakukan selama 60 menit, yang dimana pengukuran dilakukan 5, 10, 30, dan 60 menit. Pada grafik ini menunjukkan bahwa pompa selama bekerja terjadinya peningkatan energi daya listrik sesuai berapa lama pompa bekerja.

4. Heater pemanas bahan bakar pada sistem boiler merupakan salah satu komponen vital yang berfungsi untuk memastikan bahan bakar, seperti minyak bakar (fuel oil), memiliki temperatur yang optimal sebelum masuk ke dalam burner untuk proses pembakaran. Pemanasan bahan bakar ini sangat penting, terutama untuk bahan bakar yang memiliki viskositas tinggi (seperti heavy oil atau fuel oil), yang cenderung lebih kental pada suhu rendah. Tanpa pemanasan yang cukup, bahan bakar tidak akan mengalir dengan baik, dan proses pembakaran pada boiler bisa terganggu, yang berpotensi menurunkan efisiensi dan menyebabkan kerusakan pada sistem. Untuk mencari perubahan suhu serta waktu yang dibutuhkan pada proses pengukuran suhu bahan bakar terdapat beberapa rumus sebagai berikut;

$$T = \text{Suhu } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = \text{Perubahan suhu}$$

$$\Delta t = \text{Waktu}$$

$$R = \text{Laju perubahan}$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= T \text{ akhir} - T \text{ awal} \\ &= 50 - 68 \\ &= 18 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

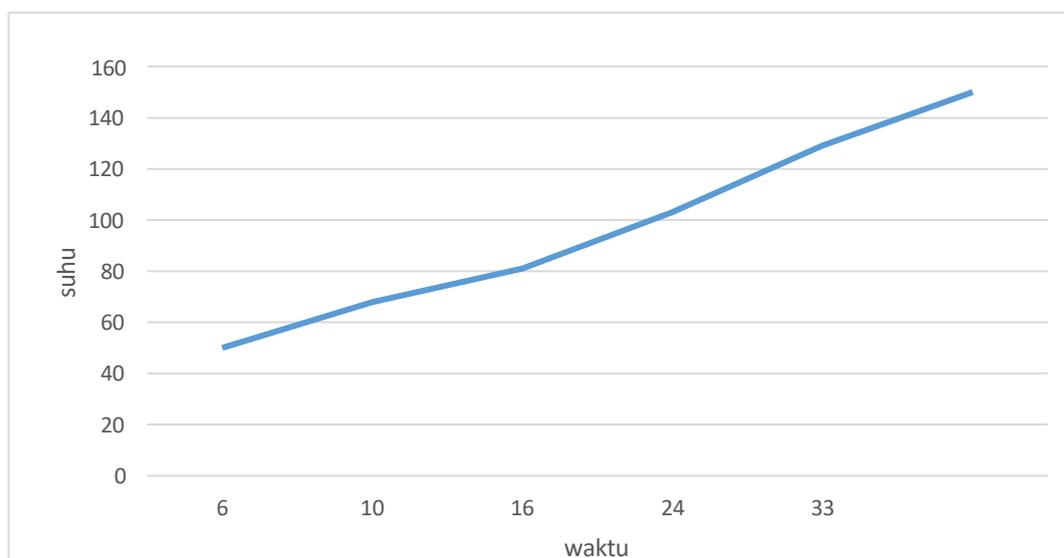
$$\begin{aligned} \Delta t &= t \text{ akhir} - t \text{ awal} \\ &= 10 - 6 \\ &= 4 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{\Delta T}{\Delta t} \\ &= \frac{18}{4} \\ &= 3,25 \text{ } ^\circ\text{C/menit} \end{aligned}$$

Tabel 4.4 Pengukuran perubahan suhu bahan bakar

Suhu awal T (°C)	Suhu akhir T (°C)	Perubahan suhu ΔT (°C)	Waktu (menit)	Laju perubahan (°C/menit)
50	68	18	6	3
68	81	13	10	3,25
81	103	22	16	3,67
103	129	26	24	3,25
129	150	21	33	2,33

Hasil pengukuran pada tabel 4.4 menunjukkan proses pemanasan bahan bakar menggunakan *Fuel Oil Heater*, suhu bahan bakar dinaikan secara bertahap dari 50°C hingga 150°C. Kenaikan suhu dibagi dalam beberapa tahap sesuai pengamatan, yaitu 68°C, 81°C, 103°C, 129°C, 150°C. Dari hasil perhitungan, perubahan suhu yang dihasil dalam memanaskan bahan bakar bisa mencapai 18 sampai 26°C, dan laju pemanasan sekitar antara 2,3 sampai 3,7 °C/menit. Data ini menjadi dasar untuk menentukan proses pembakaran pada boiler.



Grafik 4.4 pengukuran suhu terhadap waktu

Gambar 4.4 Grafik pengukuran suhu yang dimana menunjukkan hubungan antara suhu bahan bakar dengan waktu pemanasan. Dari pengukuran suhu pada

bakar bakar terdeteksi dengan nilai 50 sampai 150 °C. pada. Pada grafik ini terjadinya perbedaan sebuah suhu bahan bakar yang dilakukan pada setiap beberapa menit.

4.2 Analisis Penyebab Kegagalan Main Burner

4.2.1 Percobaan pembakaran terhadap suhu dan tekanan bahan bakar

a. Pengujian 1

Tabel 4.5 berikut menampilkan hasil pengukuran parameter pada saat melakukan pengujian pembakaran, pengujian 1 merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Parameter pengukuran Dilakukan dengan menggunakan thermo gan untuk mengukur suhu, indikator pressure gauge untuk mengukur tekanan bahan bakar, serta meteran untuk mengukur jarak ignition.

4.5 Hasil pengukuran parameter saat melakukan percobaan pembakaran

Suhu Bahan bakar (°C)	Tekanan Bahan Bakar (MPa)	Pembukaan Dumper (%)	Igniton (cm)	Waktu (menit)	Status
50	0,2	20 %	0,8	5	Alarm Failur
50	0,3	20 %	0,8	5	Alarm Failur
50	0,4	20 %	0,8	5	Alarm Failur
50	0,5	20 %	0,8	5	Alarm Failur
50	0,6	20 %	0,8	5	Alarm Failur

Hasil pengukuran pada tabel 4.5 menunjukkan pengujian 1 terjadinya Flame scanner tidak menangkap nyala api; alarm Flame Failure aktif. Sistem memutus aliran bahan bakar dan menjalankan post-purge ± 30 detik. Status: misfire. Penyebab kegagalan pembakaran ini disebabkan dengan suhu bahan bakar rendah dengan nilai 50 °C dengan tekanan 0,2 sampai 0,6 MPa dan kegagalan pembentukan nyala api stabil sehingga interlock *flame failure* menghentikan operasi.

b. Pengujian 2

Tabel 4.6 berikut menampilkan hasil pengukuran parameter pada saat melakukan pengujian pembakaran, pengujian 2 merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Parameter pengukuran Dilakukan dengan menggunakan thermo gan untuk mengukur suhu, indikator pressure gauge untuk mengukur tekanan bahan bakar, serta meteran untuk mengukur jarak ignition.

4.6 Hasil pengukuran parameter saat melakukan percobaan pembakaran

Suhu Bahan bakar (°C)	Tekanan Bahan Bakar (MPa)	Pembukaan Dumper (%)	Igniton (cm)	Waktu (menit)	Status
68	0,2	30 %	0,8	5	Alarm Failur
68	0,3	30 %	0,8	5	Alarm Failur
68	0,4	30 %	0,8	5	Alarm Failur
68	0,5	30 %	0,8	5	Alarm Failur
68	0,6	30 %	0,8	5	Alarm Failur

Hasil pengukuran pada tabel 4.6 menunjukkan Flame scanner tidak menangkap nyala api; alarm Flame Failure aktif. Sistem memutus aliran bahan bakar dan menjalankan post-purge ± 30 detik. Status: misfire. suhu bahan bakar rendah dan kegagalan pembentukan nyala api stabil sehingga interlock *flame failure* menghentikan operasi.

c. Pengujian3

Tabel 4.7 Pengujian 3 merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Pengukuran Dilakukan dengan menggunakan thermos gan untuk mengukur suhu, indikator pressure gauge untuk mengukur tekanan bahan bakar, serta meteran untuk mengukur jarak.

4.7 Hasil pengukuran parameter saat melakukan percobaan pembakaran

Suhu Bahan bakar (°C)	Tekanan Bahan Bakar (MPa)	Pembukaan Dumper (%)	Igniton (cm)	Waktu (menit)	Status
81	0,2	30 %	0,8	5	Alarm Failur
81	0,3	30 %	0,8	5	Alarm Failur
81	0,4	30 %	0,8	5	Alarm Failur
81	0,5	30 %	0,8	5	Alarm Failur
81	0,6	30 %	0,8	5	Alarm Failur

Hasil pengukuran pada tabel 4.7 Flame scanner tidak menangkap nyala api; alarm Flame Failure aktif. Sistem memutuskan aliran bahan bakar dan menjalankan post-purge ± 30 detik. Status: misfire. suhu bahan bakar rendah dan kegagalan pembentukan nyala api stabil sehingga interlock *flame failur* menghentikan operasi.

d. Pengujian 4

Tabel 4.8 Pengujian 4 merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Pengukuran Dilakukan dengan menggunakan thermos gan untuk mengukur suhu, indikator pressure gauge untuk mengukur tekanan bahan bakar, serta meteran untuk mengukur jarak.

4.8 Hasil pengukuran parameter saat melakukan percobaan pembakaran

Suhu Bahan bakar (°C)	Tekanan Bahan Bakar (MPa)	Pembukaan Dumper (%)	Ignition (cm)	Waktu (menit)	Status
103	0,2	30 %	0,8	5	Alarm Failur
103	0,3	30 %	0,8	5	Alarm Failur
103	0,4	30 %	0,8	5	Alarm Failur
103	0,5	30 %	0,8	5	Alarm Failur
103	0,6	30 %	0,8	5	Alarm Failur

Tabel 4.8 Pengujian 4 merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Pada suhu 103 dan tekanan bahan bakar 0,2 dan 0,4 MPa terjadinya pembakaran kecil, tetapi sensor flame aye tidak membaca keberadaan api. alarm Flame Failure aktif..

e. Pengujian 5

Tabel 4.9 Pengujian merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Pengukuran Dilakukan dengan menggunakan thermos gan untuk mengukur suhu, indikator pressure gauge untuk mengukur tekanan bahan bakar, serta meteran untuk mengukur jarak.

4.9 Hasil pengukuran parameter saat melakukan percobaan pembakaran

Suhu Bahan bakar (°C)	Tekanan Bahan Bakar (MPa)	Pembukaan Dumper	Igniton (cm)	waktu	Status
129	0,2	30 %	0,8	5	Alarm Failur
129	0,3	30 %	0,8	5	Alarm Failur
129	0,4	30 %	0,8	5	Alarm Failur
129	0,5	30 %	0,8	5	Alarm Failur
129	0,6	30 %	0,8	5	Alarm Failur

Tabel 4.9 Pengujian 5 pada suhu 129°C dan tekanan di 0,2 – 0,3 MPa terjadinya Pembakaran yang sempurna, sensor flame aye membaca dan membuka solenoid bahan bakar. Pada percobaan ke 5 ini pada tekanan 0,4-0,6 tidak terjadinya pembakaran yang mengakibatkan alarm flame failure.

f. Pengujian 6

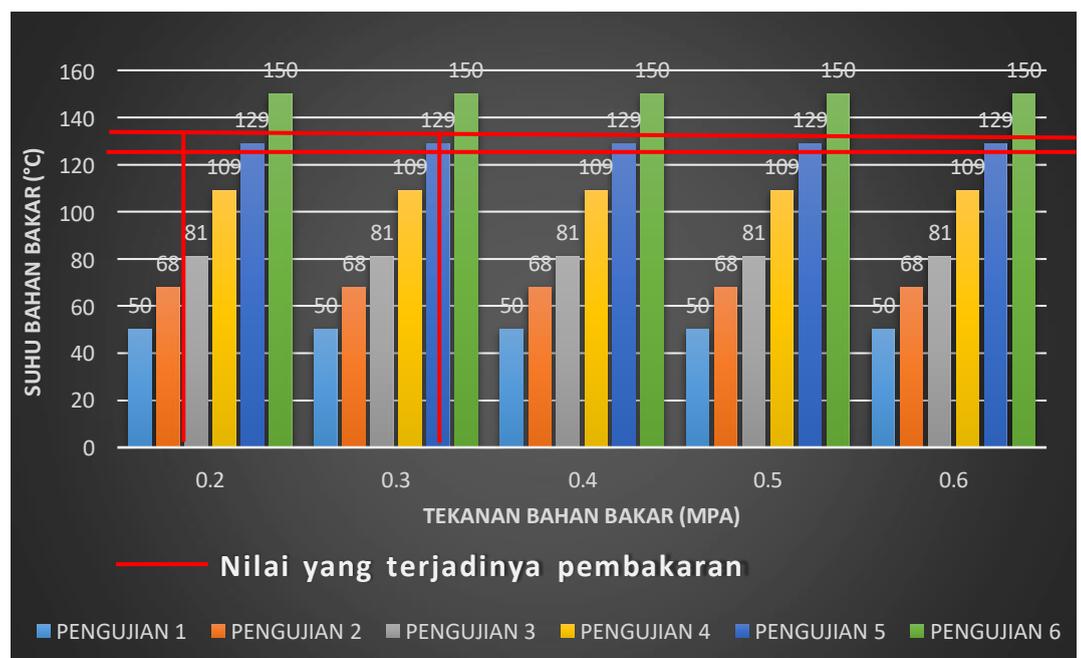
Tabel 4.10 Pengujian 6 merupakan hasil pengukuran pada suhu bahan bakar, tekanan bahan bakar, pembukaan damper, jarak ignition, dan waktu pengujian. Pengukuran Dilakukan dengan menggunakan

thermos gan untuk mengukur suhu, indikator pressure gauge untuk mengukur tekanan bahan bakar, serta meteran untuk mengukur jarak.

4.10 Hasil pengukuran parameter saat melakukan pengujian pembakaran

Suhu Bahan bakar (°C)	Tekanan Bahan Bakar (MPa)	Pembukaan Dumper (%)	Igniton (cm)	Waktu (menit)	Status
150	0,2	30 %	0,8	5	Alarm Failur
150	0,3	30 %	0,8	5	Alarm Failur
150	0,4	30 %	0,8	5	Alarm Failur
150	0,5	30 %	0,8	5	Alarm Failur
150	0,6	30 %	0,8	5	Alarm Failur

Hasil pengukuran pada tabel 4.7 merupakan percobaan ke 6 terjadinya Flame scanner tidak menangkap nyala api; alarm Flame Failure aktif. Sistem memutus aliran bahan bakar dan menjalankan post-purge ± 30 detik. Status: misfire. Penyebab kegagalan pembakaran ini disebabkan dengan suhu bahan bakar rendah dengan nilai 150 °C dengan tekanan 0,2 sampai 0,6 MPa dan kegagalan pembentukan



Gambar 4.5 Grafik pengujian 1 sampai pengujian 6

Gambar 4.5 menunjukkan grafik dari tabel pengujian pertama sampai pengujian ke enam yang dimana menunjukkan hubungan antara suhu bahan bakar dengan tekanan bahan bakar. Dari pengukuran suhu pada bahan bakar terdeteksi dengan nilai 50 °C, 68°C, 81°C, 103°C, 129°C, 150. °C. untuk tekanan bahan bakar dilkaukan dengan pengujian 0,2 – 0,6 MPa. Pada percobaan ini terjadinya perbedaan sebuah tekanan bahan bakar yang dilakukan pada setiap pengujian. Pada suhu 129°C dan tekanan pada 0,2-0,3 tidak adanya alarm failur, yang berarti pada pengujian ini terjadinya pembakaran pada boiler. Dari grafik 4.5 menunjukkan pada suhu 129°C dan tekanan 0,2-0,3 merupakan pembakaran sempurna.

4.2.1 Data Operasional Burner

1. Tabel 4.11 berikut menampilkan hasil pengukuran parameter terutama burner pada saat terjadinya pembakaran, disandingkan dengan standar operasionalnya.

Tabel 4.11 Hasil pengukuran yang terjadi pembakaran

Parameter Operasi	Nilai Terukur	Standar Operasional	Status
Tekanan Bahan Bakar	0,4 – 0,6 MPa	0,2 – 0,3 MPa	Normal
Suhu Bahan Bakar (HFO)	50 – 100 °C	120- 130°C	Normal
Tekanan Udara Pembakaran	0,2 MPa	0,2 – 0,3 MPa	Normal
Status Flame Scanner	20 mA	4 – 20 mA	Normal
Status Igniter / Spark Plug	5 kv	5-15kv	Normal

Pengukuran parameter operasional burner dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kondisi aktual sistem memenuhi standar yang ditetapkan pabrikan Aalborg Mission OM KB 1000. Hasil pengukuran pada saat kejadian *burner trip* menunjukkan bahwa tekanan bahan bakar berada pada angka 0,2 MPa, masih dalam rentang operasional normal. Hal ini mengindikasikan bahwa pompa suplai bahan bakar, *regulator*, dan sistem pipa distribusi berada dalam kondisi baik dan mampu mempertahankan tekanan kerja yang dibutuhkan burner.

Tekanan udara pembakaran tercatat 0,2 MPa, juga berada dalam rentang standar 0,2–0,3 MPa, sehingga suplai udara dari *forced draft fan* bekerja dengan baik dan tidak ditemukan indikasi kekurangan aliran udara pada tahap *purging* maupun saat proses *ignition*. Namun, perbedaan mencolok ditemukan pada suhu bahan bakar HFO.

2. Tabel 4.12 berikut menampilkan hasil pengukuran parameter terutama burner pada saat tidak terjadinya pembakaran, disandingkan dengan standar operasionalnya.

Tabel 4.12 Hasil pengukuran gagal nya pembakaran

Parameter Operasi	Nilai Terukur	Standar Operasional	Status
Tekanan Bahan Bakar	0,4-0,6 MPa	0,2 – 0,3 MPa	Tidak Normal
Suhu Bahan Bakar (HFO)	50-100°C	120- 130°C	Tidak Normal
Tekanan Udara Pembakaran	0,2 MPa	0,2 – 0,3 MPa	Normal
Status Flame Scanner	20 mA	4 – 20kv	Normal
Status Igniter / Spark Plug	5 kv	5- 15 kv	Normal

Hasil pengukuran menunjukkan suhu hanya mencapai 50 - 100°C. Suhu yang rendah ini membuat viskositas HFO tetap tinggi sehingga proses atomisasi di dalam *rotary cup atomizer* menjadi buruk. Akibatnya, droplet bahan bakar yang terbentuk berukuran besar, sulit bercampur homogen dengan udara, dan nyala api yang dihasilkan menjadi tidak stabil. Selama kejadian burner trip, tercatat tiga jenis alarm yang aktif secara berurutan. Pertama adalah Low Oil Temperature on Burner, yang dipicu ketika suhu HFO turun di bawah set point minimal $\pm 120^\circ\text{C}$. Alarm ini menjadi indikasi awal bahwa sistem fuel heating tidak bekerja optimal atau tidak mampu mencapai suhu yang dipersyaratkan untuk atomisasi yang baik mengindikasikan bahwa pompa suplai bahan bakar,

regulator, dan sistem pipa distribusi berada dalam kondisi baik dan mampu mempertahankan tekanan kerja yang dibutuhkan burner. Namun, perbedaan mencolok ditemukan pada suhu bahan bakar HFO. Hasil pengukuran menunjukkan suhu hanya mencapai 50 -100°C, jauh di bawah standar operasional 120–130°C. Suhu yang rendah ini membuat viskositas HFO tetap tinggi sehingga proses atomisasi di dalam *rotary cup atomizer* menjadi buruk. Akibatnya, droplet bahan bakar yang terbentuk berukuran besar, sulit bercampur homogen dengan udara, dan nyala api yang dihasilkan menjadi tidak stabil.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan melalui observasi lapangan, pengukuran parameter operasional, inspeksi fisik komponen, serta analisis log alarm pada panel kontrol, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem kelistrikan dan kontrol otomatis memiliki peran penting dalam mendukung maupun memengaruhi kinerja main burner. Control box menerima input dari berbagai sensor, memprosesnya, dan mengaktifkan interlock keselamatan ketika terdeteksi kondisi tidak aman. Dalam kasus ini, interlock berfungsi sesuai desain dengan memutus suplai bahan bakar dan melakukan post purge untuk mencegah risiko ledakan. Namun, kegagalan deteksi nyala akibat penurunan performa flame scanner serta lemahnya percikan igniter menunjukkan bahwa gangguan pada komponen kelistrikan atau sensor dapat secara langsung memengaruhi keberhasilan pembakaran.
2. Kegagalan main burner pada sistem boiler kapal MT Hight Standard disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor teknis yang saling berkaitan. Faktor dominan adalah suhu bahan bakar HFO (50 - 100°C) sehingga viskositas tetap tinggi dan atomisasi tidak optimal. Keadaan tersebut mengakibatkan nyala api tidak terbentuk atau tidak stabil dalam safety time, sehingga sistem proteksi memicu flame failure dan emergency shutdown.

5.2 Saran

Untuk mencegah terulangnya kegagalan *main burner* pada boiler kapal sejenis, disarankan:

1. Melakukan pemeliharaan rutin terhadap komponen kelistrikan yang membantu proses pembakaran seperti feed water pump, blower, fuel pump, dan fuel heating system untuk memastikan komponen dapat bekerja dengan baik tanpa mengganggu proses pembakaran.
2. Suhu bahan bakar berada pada kisaran 120– 130°C sebelum masuk keburner,

termasuk pengecekan dan kalibrasi thermostat serta pembersihan heating element. Untuk tekanan bahan bakar selalu diperhatikan untuk selalu berada diangka 0,2 – 0,3 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

- Babicz, J. (2021). *Encyclopedia of Ship Knowledge Ships and Their Equipment* (B. O. Baobab & J. Babicz (ed.)). Baobab Naval Consultancy.
- Baocheng, L., & Li, J. (2017). Design and application of marine boiler control system based on PLC and touch screen. *7th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ICADME 2017)*.
- Cornetti, G. (2024). Design of Boiler Components. In G. Cornetti (Ed.), *Thermal Sciences for Machines* (hal. 187–210). Springer Cham Online. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91593-3_8
- Creswell, J. W. (2019). *Research Design: Pendekatan Kualitatif, Kuantitatif, dan Mixed* (A. Fawaid (ed.); 5 ed.). Yayasan Mitra Netra.
- Cruz, I. D. la, & Ugalde-Loo, C. E. (2021). District Heating and Cooling Systems. In N. Jenkins (Ed.), *Microgrids and Local Energy Systems* (hal. 1–36). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99740>
- Handoyo, J. (2016). *Manajemen Perawatan Kapal*. Maritim Jangkar.
- Khaq, M. A. A. (2024). *Analisis Penyebab Kegagalan Pembakaran pada Boiler MissionTM OL Model 12000 di Kapal MT. Pancaran Infinity*. Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang.
- Lee, C.-M. (2024). Combustion Control of Ship's Oil-Fired Boilers Based on Prediction of Flame Images. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1474. <https://doi.org/10.3390/jmse12091474>
- Munson, B., Rothmayer, A. P., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). *Fundamental Of Fluid Mechanics* (8 ed.). Wiley.
- Narto, A. (2018). *Pengendali Sistem Permesinan Kapal*. Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang.
- Pasaribu, F. I., & Roza, I. (2020, April). Design of control system expand valve on water heating process air jacket. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 821, No. 1, p. 012050). IOP Publishing.

- Pasaribu, F. I. (2021). Penentuan Hot Point dan Monitoring Peralatan menggunakan Thermal Imagers Fluke dengan Metode Thermovisi. *Journal of Electrical and System Control Engineering*, 4(2), 113–128. <https://doi.org/10.31289/jesce.v4i2.4814>
- Purnama, M. I., Sifudin, I., Wanto, K., Jamaan, A., & Rakka, S. G. A. (2025). Analisis Terjadinya Flame Failure pada Burner Auxiliary Boiler di Kapal MV. Sky Free. *Journal of Marine Engineering Research*, 1(1).
- Putri, V. I. (2023). *Analisa Kegagalan Pembakaran pada Burner Boiler Plant di Kapal KM. Lawit*. Politeknik Ilmu Pelayaran Surabaya.
- Robbi, S. D., Mahendra, R. W. I., & Triyono, A. (2024). Analisis Gagalnya Pembakaran Pada Boiler di Kapal MT Gas Kalimantan. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(3), 6331–6346.
- Steingress, F. M., Frost, H. J., & Walker, D. R. (2018). *High Pressure Boilers* (6 ed.). American Technical Publishers.
- Tjahjono, A., Cahyadi, T., Fitriyaningsih, A., & Rabbani, A. V. (2023). Enhancing Burner Efficiency on Marine Vessels: A SWOT Analysis Approach. *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, 3(1), 58–67. <https://doi.org/10.31098/cset.v3i1.733>
- Wicaksono, A. (2023). *Analisa Penyebab Terjadinya Kegagalan Pembakaran Awal pada Ketel Uap Bantuan di KM. Dharma Kencana III*. Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
- Zhao, S., Wang, S., Cajo, R., Ren, W., & Li, B. (2022). Power Tracking Control of Marine Boiler-Turbine System Based on Fractional Order Model Predictive Control Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1307. <https://doi.org/10.3390/jmse10091307>

LAMPIRAN



Gambar 1. Panel Sistem Kontrol Boiler



Gambar 2. Nozzle



Gambar 3. Burner Boiler



Gambar 4 Pressure Switch

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI PENULIS

Nama Lengkap : Rahmat Rizki Kurniawan
Nomor Pokok Mahasiswa : 2107220055
Tempat, Tanggal Lahir : Aek Kanopan, 15 Desember 2001
Alamat : Jl DSN VIII Sei Bunga, Kel. Sei Pegantungan,
Kec. Panai Hilir, Kab.Labuhan batu
Agama : Islam
Jenis Kelamin : Laki-laki
No. HP : +62 852 1104 8868
Email : rahmatrizki438@gmail.com

DATA ORANG TUA PENULIS

Nama Ayah : Narsun
Agama : Islam
Nama Ibu : Rusmini
Agama : Islam
Alamat : Jl DSN VIII Sei Bunga, Kel. Sei Pegantungan,
Kec. Panai Hilir, Kab.Labuhan batu

Riwayat Pendidikan Penulis

1. (2008 - 2014) : SDN 016552 P.Rakyat
2. (2014 - 2017) : SMP Muhammadiyah 24 Aek Kanopan
3. (2017 - 2020) : SMA Muhammadiyah 09 Kualuh Hulu
4. (2021 - 2025) : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara S1 Teknik Elektro