

**OPTIMASI EFISIENSI *BOILER* BERBASIS METODE  
*TAGUCHI* TERHADAP PENGARUH CANGKANG, *FIBER*,  
DAN *TEMPERATUR STEAM SUPERHEATER* UNTUK  
MENINGKATKAN KINERJA TURBIN UAP**

**SKRIPSI**

**OLEH:**

**GIAN RAJA KESUMA**

**218130017**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSTAS MEDAN AREA**

**MEDAN**

**2025**

**OPTIMASI EFISIENSI *BOILER* BERBASIS METODE  
*TAGUCHI* TERHADAP PENGARUH CANGKANG, *FIBER*,  
DAN *TEMPERATUR STEAM SUPERHEATER* UNTUK  
MENINGKATKAN KINERJA TURBIN UAP**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik  
Universitas Medan Area

Oleh:

**GIAN RAJA KESUMA**

**218130017**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

**MEDAN**

**2025**

## HALAMAN PENGESAHAN

### HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Optimasi Efisiensi *Boiler* Berbasis Metode *Taguchi*  
Terhadap Pengaruh Cangkang, *Fiber*, dan *Temperatur*  
*Steam Superheater* Untuk Meningkatkan Kinerja Turbin  
Uap.  
Nama Mahasiswa : GIAN RAJA KESUMA  
NIM : 218130017  
Program Studi : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh  
Komisi Pembimbing

MUHAMMAD IDRIS, ST., MT

Pembimbing

Dr. Eng. Supratno, ST., MT

Dekan

Dr. Iswandi, ST., MT

Ka. Prodi

Tanggal Lulus: 22 September 2025

## HALAMAN PERNYATAAN

### HALAMAN PERNYATAAN

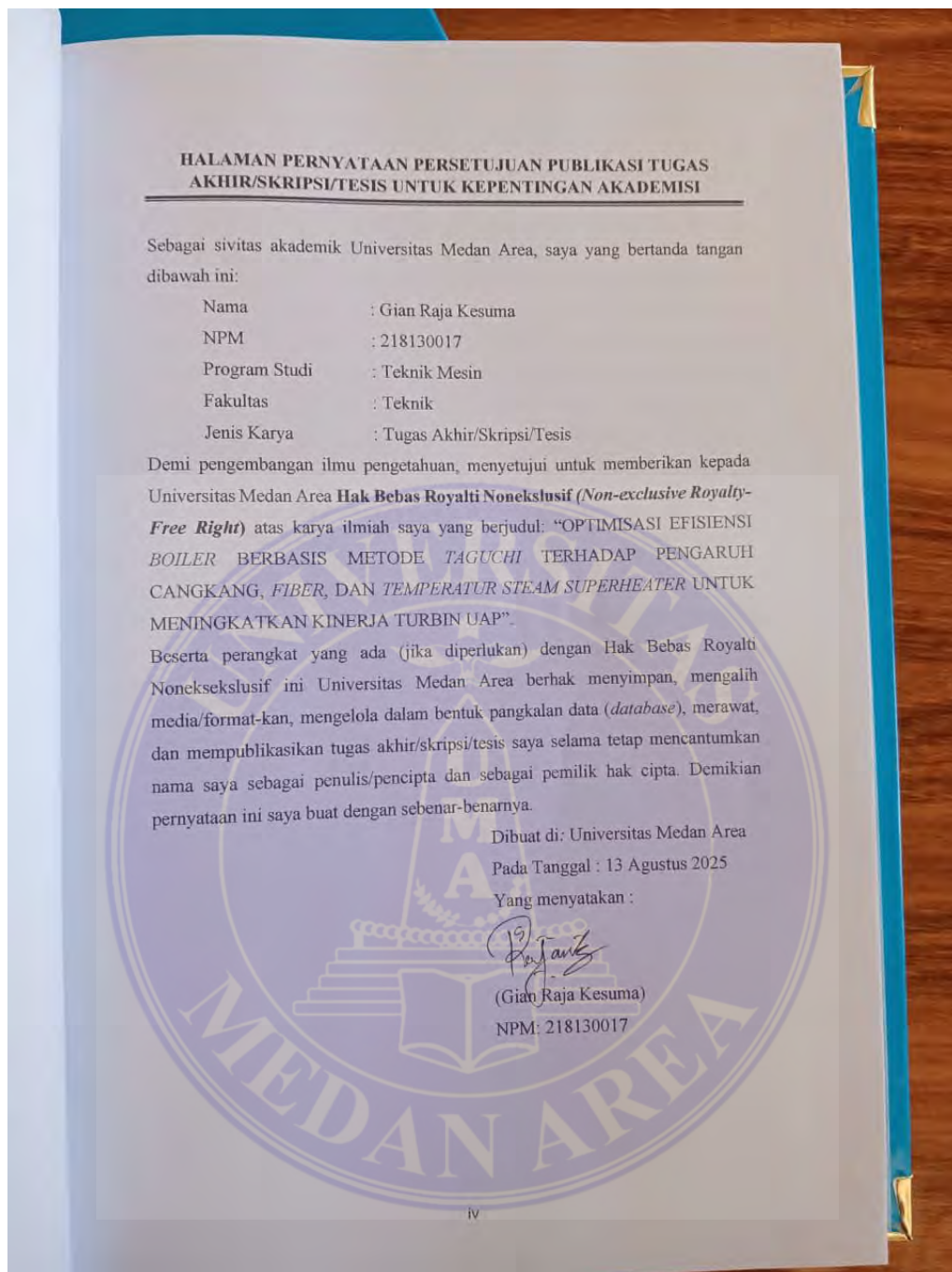
Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana dan merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 13 Agustus 2025



Gian Raja Kesuma  
NPM.218130017



## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengoptimasi efisiensi *boiler* tipe *SFW* produksi PT *Atmindu* yang digunakan di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit dengan menggunakan metode Taguchi dan analisis regresi linear berganda. Variabel yang diteliti meliputi jumlah cangkang (kg), *fiber* (kg), dan *temperatur steam superheater* (°C), dengan kinerja turbin uap (MW) sebagai variabel respon. Eksperimen dirancang menggunakan orthogonal array L9 untuk tiga faktor dan tiga level. Data historis enam bulan telah dibersihkan dari *outlier* dan diuji normalitas. Hasil regresi menunjukkan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 93,12%, menandakan model yang baik. Variabel cangkang dan *fiber* berpengaruh signifikan terhadap kinerja turbin uap, sedangkan *temperatur steam superheater* tidak signifikan. Model regresi bebas multikolinearitas dan valid untuk prediksi serta optimasi. Evaluasi model dengan MAE, MSE, RMSE, dan MAPE menunjukkan tingkat kesalahan rendah. Penelitian menyimpulkan bahwa optimalisasi penggunaan cangkang dan *fiber* dapat meningkatkan efisiensi *boiler*, sementara pengaturan *temperatur steam superheater* memberikan dampak kecil. Metode *Taguchi* dan regresi berganda efektif dalam menentukan parameter operasi optimal untuk meningkatkan efisiensi *boiler*.

**Kata Kunci:** *Boiler SFW*, metode *Taguchi*, regresi linear berganda, efisiensi *boiler*, kinerja turbin uap, optimalisasi.

## ABSTRACT

*This study aims to optimize the efficiency of the SFW type boiler produced by PT Atmindo, used at PT. Palm oil processing plant, by applying the Taguchi method and multiple linear regression analysis. The independent variables examined are the amount of shells (kg), fiber (kg), and steam superheater temperature (°C), with steam turbine performance (MW) as the dependent variable. The experiment was designed using the L9 orthogonal array for three factors at three levels. Six months of historical data were cleaned from outliers and tested for normality. Regression results showed a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 93.12%, indicating a good model fit. Shell and fiber variables significantly affect steam turbine performance, whereas steam superheater temperature is not significant. The regression model is free from multicollinearity and valid for prediction and optimization. Model evaluations using MAE, MSE, RMSE, and MAPE indicate low prediction error. The study concludes that optimizing the use of shells and fiber can improve boiler efficiency, while steam superheater temperature control has minimal impact. Taguchi and multiple regression methods are effective in determining optimal operating parameters to improve boiler efficiency.*

**Keywords:** *SFW boiler, Taguchi method, multiple linear regression, boiler efficiency, steam turbine performance, optimization.*

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Desa Sei Rejo, pada tanggal 11 Mei 2003 dari Alm Bapak Budi dan ibu Yusniwati. Penulis merupakan anak pertama dari satu bersaudara.

Pada tahun 2021 penulis lulus dari SMK N1 Sei Rampah dan terdaftar sebagai mahasiswa di Fakultas Teknik Mesin Universitas Medan Area. Sejalan dengan perkuliahan, tepatnya pada tahun 2021. Penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit beralamat JL. Sialang Buah, Teluk Mengkudu, Liberia, Teluk Mengkudu Regency Sumatera utara 20997, Dan tamat di Universitas Medan Area tahun 2025.



## KATA PENGANTAR

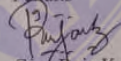
### KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan karya tulis ilmiah (skripsi) dari tugas akhir, skripsi merupakan persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana di Fakultas Teknik Mesin Universitas Medan Area.

Dalam penulisan karya tulis ilmiah (skripsi) ini, penulis mendapatkan bantuan dan bimbingan dari banyak pihak. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc. Selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Bapak Dr. Eng. Supriatno, ST, MT. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
3. Bapak Dr. Iswandi, ST, MT. Selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Medan Area
4. Bapak Muhammad Idris, ST, MT, Selaku Dosen Pembimbing Skripsi
5. Orang tua penulis (Alm Ayahanda Budi dan Ibunda Yusniwati) yang dengan begitu tulus memberikan semangat, dorongan dan doa kepada Penulis dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini.
6. Sesama teman-teman mahasiswa Teknik mesin Universitas Medan Area.

Penulis



Gian Raja Kesuma

NPM.218130017

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	iv
ABSTRAK .....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
KATA PENGANTAR .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Hipotesis Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.5.1 Manfaat Teoritis.....	4
1.5.2 Manfaat Praktis .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA Teori <i>Boiler</i> .....	5
2.1 Teori <i>Boiler</i> .....	5
2.1.1 Komponen Pada <i>Boiler</i> .....	7
2.1.2 Jenis-jenis <i>Boiler</i> .....	10
2.1.3 Prinsip dan Cara Kerja <i>Boiler</i> .....	15
2.1.4 Cara Perawatan dan Perbaikan <i>Boiler</i> .....	16
2.1.5 Langkah <i>Maintenace Boiler</i> .....	16
2.2. Siklus <i>Rankine</i> .....	18
2.2.1 Diagram Ts .....	18

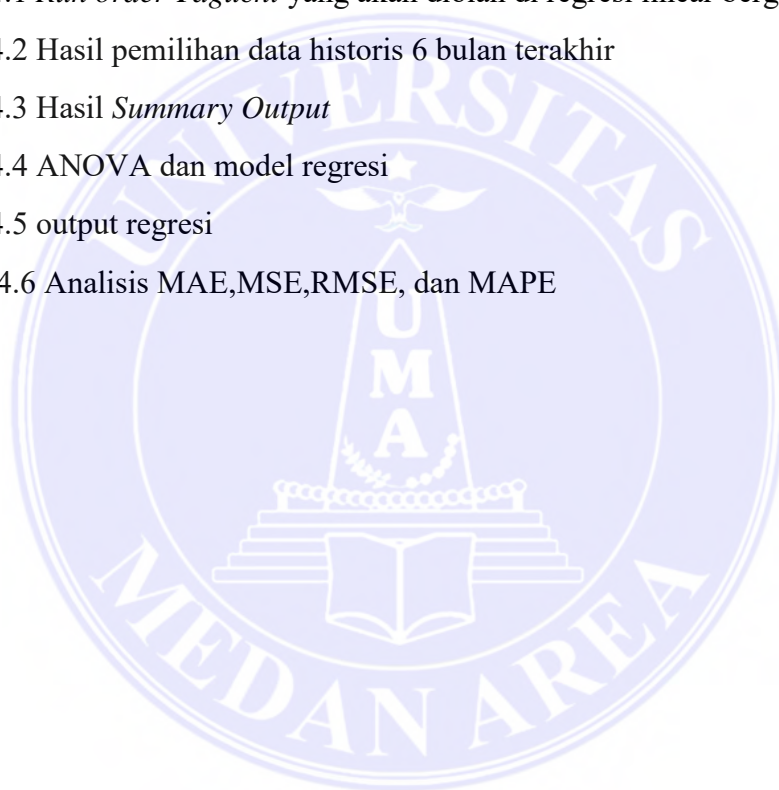
2.2.2 Teori dalam siklus <i>rankine</i> .....	20
2.3 Perpindahan Panas .....	22
2.3.1 Perpindahan Kalor Secara Konveksi .....	23
2.3.2 Perpindahan Kalor Secara Konduksi .....	25
2.4 Proses Pembentukan Uap .....	28
2.5 Bahan Bakar Boiler dalam Efisiensi Energi dan Kinerja Operasi .....	32
2.6 Identifikasi Potensi Penghematan .....	34
2.6.1 Manajemen Pembakaran .....	34
2.6.2 Manajemen Kualitas Air Umpan .....	37
2.7 Metode <i>Taguchi</i> .....	38
2.7.1 Analisis dalam Metode <i>Taguchi</i> .....	40
2.8 Metode Evaluasi Regresi .....	49
2.8.1 Teori Umum Metode-Metode optimasi proses .....	53
<b>BAB III METODELOGI PENELITIAN</b> .....	<b>55</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	55
3.1.1 Waktu Penelitian .....	55
3.1.2 Tempat Peneliti/fokus Penelitian .....	56
3.2 Alat dan Bahan .....	56
3.2.1 Alat .....	56
3.2.2 Bahan .....	58
3.3 Metode Penelitian .....	58
3.4 Populasi Sampel .....	59
3.5 Prosedur Kerja .....	59
3.6 Diagram Alur proses Penelitian .....	61
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>62</b>
4.1 Hasil .....	62
4.1.1 Teknik Pengambilan Data .....	62
4.1.2 Hasil Analisis Regresi Linier .....	63
4.2 Pembahasan .....	65
4.2.1 Pembahasan Hasil Analisis Awal Regresi .....	65
4.2.2 Pembahasan Hasil Analisis <i>Taguchi</i> .....	74

4.2.3 Pembahasan regresi lanjutan setelah taguchi .....	82
4.2.4 Perhitungan Efisiensi <i>Boiler</i> .....	95
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	99
5.1 Simpulan .....	99
5.2 Saran.....	100
DAFTAR PUSTAKA .....	102
LAMPIRAN.....	104



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Kira-kira Koefisien Perpindahan Kalor konfeksi	25
Tabel 2.2 Konduktivitas Ternal Berbagai Bahan Pada 0°C	28
Tabel 2.3 <i>Standart Orthogonal Array</i>	44
Tabel 3.1 Waktu Penelitian	55
Tabel 3.2 Populasi dan Sample	59
Tabel 4.1 <i>Run order Taguchi</i> yang akan diolah di regresi linear berganda	62
Tabel 4.2 Hasil pemilihan data historis 6 bulan terakhir	64
Tabel 4.3 Hasil <i>Summary Output</i>	65
Tabel 4.4 ANOVA dan model regresi	67
Tabel 4.5 output regresi	70
Tabel 4.6 Analisis MAE,MSE,RMSE, dan MAPE	72



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Drum Ketel</i>	8
Gambar 2.2 <i>Superheater</i>	8
Gambar 2.3 <i>Economizer</i>	9
Gambar 2.4 <i>Steam Air Heater</i> .	10
Gambar 2.5 Ketel Pipa Api ( <i>Fire Tube Boiler</i> )	10
Gambar 2.6 Ketel Pipa Air ( <i>Water Tube Boiler</i> )	11
Gambar 2.7 Prinsip Serkulasi Alami.	13
Gambar 2.8 Prinsip Serkulasi Paksa	15
Gambar 2.9 Diagram T-S <i>Rankine Cycle</i>	18
Gambar 2.10 Perpindahan Kalor Konveksi dari Suatu Plat	24
Gambar 2.11 Volume Unsur untuk Analisis Konduksi Kalor Satu Dimensi.	26
Gambar 2.12 Diagram T-S.	29
Gambar 2.13 Grafik Proses Pembentukan Uap.	30
Gambar 2. 14 Panas hilang ke cerobong vs rasio udara	35
Gambar 3.1 Laptop	57
Gambar 3.2 Tampilan <i>software minitab</i>	57
Gambar 3.3 <i>Software Microsoft Excel</i>	58
Gambar 3.4 Digram alur proses penelitian	61
Gambar 4.1 Tabel hasil analisis <i>Taguchi</i> untuk <i>SNR</i>	74
Gambar 4.2 Grafik <i>Main Effect Plot for SN ratios (SNR)</i>	76
Gambar4.3 Tabel hasil analisis <i>Taguchi</i> untuk <i>Means</i> (Rata-rata)	78
Gambar 4.4 Grafik <i>Main Effect Plot For Means</i>	80
Gambar 4.5 Hasil model regresi lanjutan pada <i>Minitab</i> setelah <i>taguchi</i>	82
Gambar 4.6 Tabel <i>Coenfficients</i> hasil analisis lanjut	84
Gambar 4.7 <i>Model Summary</i>	86
Gambar 4.8 Tabel ANOVA <i>Taguchi</i>	88
Gambar 4.9 <i>Pareto Chart</i>	91
Gambar 4.10 <i>Resudal Plots</i>	93

## DAFTAR NOTASI

$Q$	= Laju Perpindahan Panas ( kj/det atau W )
$h$	= Koefisien perpindahan Panas Konveksi ( W / m <sup>2</sup> . <sup>0</sup> C )
$A$	= Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas ( ft <sup>2</sup> , m <sup>2</sup> )
$T_w$	= Temperature Dinding ( <sup>0</sup> C , K )
$T_{\square}$	= Temperature Sekeliling ( <sup>0</sup> C , K )
$q$	= Laju Perpindahan Panas (kj / det,W)
$k$	= Konduktifitas Termal (W/m. <sup>0</sup> C)
$A$	= Luas Penampang (m <sup>2</sup> )
$dT$	= Perbedaan Temperatur ( <sup>0</sup> C, <sup>0</sup> F )dX = Perbedaan Jarak (m / det)
$dT/dx$	= gradient temperatur kearah perpindahan kalor. konstanta positif "k"
$m_a$	= massa air (kg/satuan waktu)
$C_p$	= panas spesifik air (kkal/kg)
$\Delta t_1$	= (100 <sup>0</sup> C – t <sub>1</sub> )
$m_v$	= massa uap (kg)
$Q_1$	= panas laten (penguapan) (kkal/kg) <sup>0</sup> C
$m_v$	= massa uap (kg)
$C_{pv}$	= panas spesifik uap (kkal/kg <sup>0</sup> C)
$\Delta t_2$	= (t <sub>1</sub> – 100 <sup>0</sup> C)
$Y$	= rata – rata dari setiap percobaan
$S^2$	= varian
$X_i$	= nilai kombinasi ke-n
$X$	= nilai rata-rata dari setiap kombinsi
$n$	= jumlah level dari setiap <i>control factor</i>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor yang berkembang pesat di Indonesia, mengingat tingginya permintaan *Crude Palm Oil (CPO)* baik di pasar domestik maupun internasional. Untuk memenuhi kebutuhan energi dalam proses pengolahan kelapa sawit, boiler menjadi salah satu komponen vital dalam industri ini, terutama untuk menyediakan uap yang digunakan dalam berbagai tahap produksi. PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit, sebagai salah satu pelaku industri kelapa sawit, memanfaatkan *boiler SFW ATMINDO* untuk mendukung efisiensi operasionalnya. *Boiler* ini berfungsi sebagai sumber energi termal yang mengonversi bahan bakar menjadi uap, yang kemudian digunakan dalam berbagai proses produksi.

Namun, dalam pengoperasiannya, *boiler* dihadapkan pada tantangan untuk mencapai efisiensi yang optimal. Efisiensi *boiler* sangat dipengaruhi oleh beberapa variabel proses, seperti jenis bahan bakar yang digunakan (misalnya cangkang dan serabut dari kelapa sawit), tekanan operasi, serta suhu gas buang. Pemilihan parameter yang kurang optimal dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar, kehilangan energi, serta penurunan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dampaknya, selain pada biaya operasional yang meningkat, juga mempengaruhi keberlanjutan dan dampak lingkungan dari penggunaan energi dalam produksi kelapa sawit.

Di sisi lain, metode evaluasi efisiensi *boiler* yang konvensional seringkali kurang informatif dalam mengidentifikasi penyebab utama kehilangan energi.

Metode konvensional biasanya tidak dapat memberikan informasi yang cukup rinci mengenai pengaruh masing-masing variabel proses terhadap efisiensi boiler. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih efektif dan sistematis untuk menganalisis serta mengoptimalkan parameter-parameter yang memengaruhi kinerja boiler.

Salah satu metode yang telah terbukti efektif dalam optimisasi proses industri adalah Metode *Taguchi*. Metode ini memungkinkan untuk menentukan kombinasi parameter terbaik dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit, sehingga lebih efisien dalam hal waktu dan biaya. Metode *Taguchi* memanfaatkan konsep *Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio)* untuk mengidentifikasi pengaturan yang menghasilkan kinerja terbaik dengan variabilitas yang minimal. Dalam konteks ini, metode *Taguchi* dapat digunakan untuk menentukan kombinasi optimal dari variabel-variabel proses, seperti jenis bahan bakar, tekanan boiler, dan suhu gas buang, guna memaksimalkan efisiensi boiler di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan efisiensi boiler SFW ATMINDO dengan menggunakan Metode *Taguchi* di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat ditemukan kombinasi parameter yang optimal untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi kehilangan energi, serta mengurangi konsumsi bahan bakar secara keseluruhan. Optimasi ini tidak hanya akan memberikan dampak positif pada biaya operasional, tetapi juga pada keberlanjutan industri kelapa sawit dalam menghadapi tantangan lingkungan dan energi.

## 1.2 Perumusan Masalah

- a. Bagaimana pengaruh variasi penggunaan bahan bakar biomassa kelapa sawit berupa cangkang dan fiber terhadap efisiensi dan kinerja turbin uap pada boiler tipe *SFW ATMINDO* di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit?
- b. Seberapa besar pengaruh variasi tekanan *boiler* dan temperatur steam superheater terhadap efisiensi pembangkitan uap serta kehilangan energi selama proses pembakaran pada boiler tersebut?
- c. Bagaimana cara mengoptimalkan kombinasi variabel bahan bakar (cangkang dan *fiber*) dan temperatur steam superheater menggunakan metode *Taguchi* untuk meningkatkan efisiensi boiler secara signifikan?

## 1.3 Tujuan Penelitian

- a. Mengevaluasi signifikansi pengaruh cangkang, fiber, dan *temperatur steam superheater* terhadap kinerja turbin uap.
- b. Mengevaluasi performa model optimasi.
- c. Menentukan kombinasi optimal parameter independen terhadap parameter dependen: kinerja turbin uap

## 1.4 Hipotesis Penelitian

Adapun hipotesis dari penelitian ini yaitu:

- a. Variasi bahan bakar (cangkang dan *fiber*) memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi *boiler SFW ATMINDO* di PT tersebut.
- b. Tekanan *boiler* (5 bar, 7 bar, dan 10 bar) memiliki pengaruh signifikan dalam mengurangi kehilangan energi pada sistem *boiler*.

Suhu gas buang ( $150^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ , dan  $250^{\circ}\text{C}$ ) berpengaruh signifikan terhadap kehilangan energi pada *boiler*, di mana suhu gas buang yang lebih

- c. rendah akan mengurangi kehilangan energi dan meningkatkan efisiensi operasional *boiler*.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

### 1.5.1 Manfaat Teoritis

- a. Metode *Taguchi* berkontribusi dalam menurunkan variasi pada proses sehingga meningkatkan konsistensi kualitas produk.
- b. Melalui optimasi, biaya operasional dapat dikurangi dengan meningkatkan efisiensi dalam penggunaan energi dan bahan baku.
- c. Proses yang lebih efisien memungkinkan peningkatan kapasitas produksi tanpa memerlukan investasi yang signifikan.

### 1.5.2 Manfaat Praktis

- a. Mengoptimalkan kombinasi bahan bakar serabut dan cangkang kelapa sawit untuk mengurangi limbah dan memaksimalkan pemanfaatan sumber daya lokal.
- b. Meningkatkan efisiensi *boiler* hingga 75%, yang berkontribusi pada pengurangan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional.
- c. Meningkatkan kapasitas produksi dengan memanfaatkan energi uap secara maksimal, yang mendukung proses industri yang lebih berkelanjutan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Teori *Boiler*

*Boiler* adalah bagian dari pembangkit uap yang berbentuk seperti sebuah bejana tertutup, yang berfungsi mengubah air jenuh menjadi uap jenuh dengan menggunakan panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Komponen utama *boiler* umumnya meliputi pipa *evaporator*, alat pembakar, pompa, *blower*, air umpan, serta *drum* untuk air dan uap.

Pada dasarnya, *boiler* menjalankan dua proses utama, yang pertama adalah proses pembakaran dan pengeluaran panas, beserta proses pemindahan panas dan menghasilkan uap dari air umpan. Jenis bahan bakar yang dipakai dalam *boiler* sangat beragam, salah satunya adalah batu bara, minyak, gas, biomassa, dan panas limbah. Sistem *boiler* tersusun dari tiga komponen utama: komponen utama meliputi sistem pemberian air, sistem pengelolaan uap, serta sistem pemasukan bahan bakar. Sistem pengumpan air berfungsi untuk memasukan air ke dalam *boiler* serta mengatur jumlahnya secara otomatis agar sesuai dengan kebutuhan uap.

Sistem uap air memiliki peran dalam mengumpulkan serta mengendalikan produksi uap pada *boiler*. Seluruh sistem mengatur tekanan uap melalui katup dan memantau tekanan tersebut menggunakan alat pengukur khusus. Sementara itu, sistem bahan bakar meliputi seluruh perangkat yang bertanggung jawab untuk memasukan bahan bakar. yang diperlukan untuk menghasilkan panas, Menyesuaikan dengan tipe bahan bakar yang digunakan. Air umpan (*feed water*) merupakan air yang disuplai ke dalam *boiler* untuk diubah menjadi uap. terdapat dua sumber air umpan, yaitu uap yang di kondensasi kembali dari proses

(kondensat) dan air baku yang diolah (*make up water*), yang harus diperoleh dari luar ruang boiler dan bagian proses. Untuk meningkatkan efisiensi *boiler*, digunakan *economizer* yang memanfaatkan panas dari gas buang untuk memanaskan air secara awal.

*Boiler* adalah salah satu perangkat penting yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi proses produksi dalam industri manufaktur. Perkembangan industri *boiler* dalam negeri akan didorong oleh inovasi teknologi yang diterapkan pada *boiler* tersebut. Salah satu aspek pengendalian proses pada *boiler* adalah pengaturan tingkat ketinggian air. Tingkat ketinggian air di dalam *drum boiler* menunjukkan volume air yang terdapat di dalam *drum* tersebut.

Permasalahan dalam penelitian mengenai perancangan dan pembuatan penampang melintang *boiler* tabung air adalah untuk mengetahui pengaruh tingkat ketinggian air di dalam *drum* uap terhadap uap jenuh yang dihasilkan, serta menentukan level ketinggian air yang paling optimal untuk operasi *boiler* yang menggunakan bahan bakar solar dan gas. Ketel uap berfungsi sebagai perangkat untuk mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi. Ketel uap dapat diartikan sebagai alat yang memproduksi uap dengan mengubah energi kimia dari bahan bakar baik padat, cair, maupun gas menjadi energi panas. Uap yang dihasilkan merupakan gas yang terbentuk melalui perubahan fase dari cair menjadi uap atau gas dengan pemanasan yang memerlukan sejumlah energi dalam prosesnya. Air yang mengalir di dekat permukaan pemanas memiliki temperatur lebih tinggi (dan massa jenis yang lebih rendah) dibandingkan air yang bersuhu rendah, sehingga air panas tersebut akan naik ke permukaan, sementara air yang lebih dingin turun ke bagian bawah.

Peristiwa ini berlangsung secara berkesinambungan (sirkulasi) hingga terbentuk uap. Penelitian mengenai *boiler* dengan pipa *longitudinal* sebagai superheater bertujuan menghasilkan uap panas kering (*superheated steam*), dengan sistem yang hanya menggunakan satu *drum* yang berfungsi sebagai *water drum* sekaligus *steam drum*. Dari studi tentang *boiler* tabung air longitudinal tersebut diketahui bahwa masih terdapat beberapa kekurangan, salah satunya adalah desain pipa *longitudinal* yang berarti susunan pipa sejajar dengan *steam drum*, sehingga ruang di sekitar pipa menjadi lebih sempit dan mengakibatkan perpindahan panas yang terjadi pada *boiler* menjadi lebih terbatas.

### 2.1.1 Komponen pada *Boiler*

*Boiler* merupakan kumpulan alat atau komponen yang saling terhubung mengikuti alur prosesnya. Setiap komponen dalam boiler memiliki fungsi yang berbeda-beda. Karena itu, penting untuk mengetahui fungsi setiap komponen agar dapat memahami prinsip kerja *boiler* secara menyeluruh. Beberapa komponen utama yang terdapat pada boiler antara lain.

#### 1. *Drum* Ketel

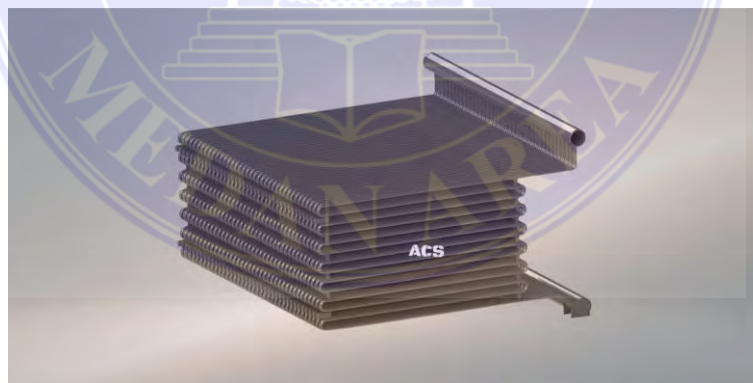
Sesuai dengan namanya, komponen ini berbentuk seperti drum yang berperan sebagai tempat penampungan air panas sekaligus tempat terbentuknya uap. *Drum* ketel menampung uap jenuh (*saturated steam*) dan air dengan perbandingan sekitar 50:50. *Drum* ini dilengkapi dengan sekat khusus agar air tidak mudah terbawa bersama uap. Selanjutnya, air dengan suhu rendah akan turun ke bagian bawah *drum*, sedangkan air dengan suhu tinggi akan naik ke atas dan menguap.



Gambar 2. 1 *Drum* Ketel

## 2. *Superheater*

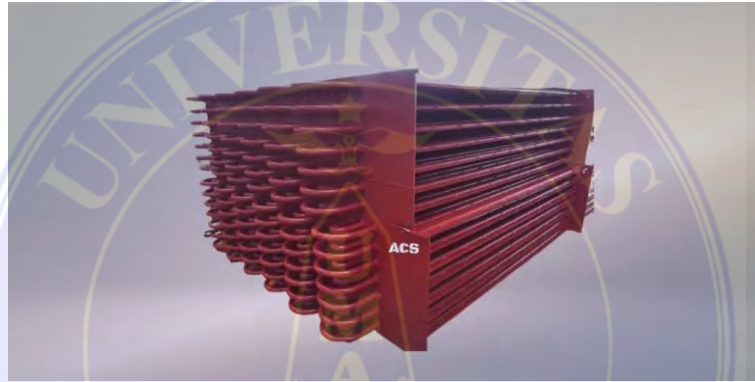
Komponen *boiler* ini berfungsi sebagai tempat pengeringan uap. Karena uap yang dihasilkan dari *drum* ketel biasanya masih dalam kondisi basah, maka diperlukan pemanasan tambahan agar uap tersebut dapat digunakan. Pemanasan lanjutan ini dilakukan melalui pipa *superheater* yang dipanaskan pada suhu sekitar 260°C hingga 350°C. Pada suhu tersebut, uap menjadi kering dan siap untuk menggerakkan turbin atau digunakan dalam peralatan lainnya.



Gambar 2. 2 *Superheater*

### 3. *Economizer*

Selanjutnya, terdapat komponen *economizer* yang berfungsi untuk menyerap panas dari gas hasil pembakaran setelah melewati *superheater*. Penyerapan panas ini bertujuan agar perbedaan suhu antara air dalam *drum* ketel dengan air pengisi tidak terlalu besar, sehingga mencegah terjadinya *thermal stress* (tegangan akibat pemanasan) pada *drum*. Selain itu, gas sisa pembakaran ini juga membantu meningkatkan efisiensi *boiler* dan mempercepat proses pembentukan uap.



Gambar 2. 3 *Economizer*

### 4. *Steam Air Heater*

Komponen steam air *heater* berperan dalam memanaskan udara yang digunakan untuk meniup atau menghembuskan bahan bakar agar pembakaran dapat berlangsung secara optimal. Biasanya, udara yang akan ditiupkan sebelum melewati steam air heater memiliki suhu sekitar suhu udara normal (38°C). Namun setelah melewati *steam air heater*, suhu udara tersebut dapat naik hingga mencapai 230°C.

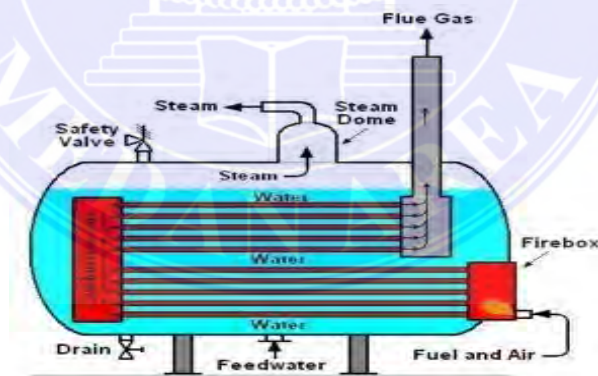


Gambar 2. 4 *Steam Air Heater*

### 2.1.2 Jenis-Jenis *Boiler*

#### 1. Ketel pipa api (*fire tube Boiler*)

Pada ketel uap pipa api, yang mengalir di dalam pipa-pipanya adalah api atau gas panas hasil pembakaran. Panas dari gas tersebut disalurkan melalui pipa-pipa dalam ketel uap sehingga memanaskan air di sekeliling pipa hingga berubah menjadi uap. Ketel uap pipa api dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 5 Ketel Pipa Api (*fire tube Boiler*)

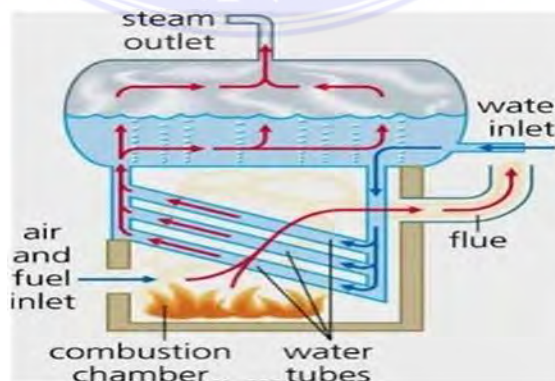
*Boiler* memiliki beberapa klasifikasi, salah satunya adalah *Fire Tube Boiler* atau ketel uap pipa api. Penamaan ketel ini berasal dari fluida yang mengalir di dalam pipa berupa uap panas hasil pembakaran di tungku. Uap tersebut bergerak melalui pipa dan menghantarkan panas secara konduksi dari permukaan dalam pipa

ke bagian luar. Proses ini menyebabkan panas menyebar ke air di dalam tabung boiler sehingga air mencapai titik didih dan berubah menjadi uap. Pada *boiler* pipa api, fluida yang mengalir di dalam pipa berupa gas nyala yang mengandung energi panas, yang kemudian langsung meneruskan panas tersebut ke air melalui permukaan pemanas. Tujuan dari pipa-pipa api adalah untuk mempermudah distribusi panas ke air. Pada *boiler* pipa air, fluida yang mengalir di dalam pipa adalah air, dan energi panas dialirkan dari luar pipa (yaitu dari ruang bakar) ke air tersebut.

Panas yang berasal dari pembakaran bahan bakar dan udara diteruskan ke air melalui permukaan pipa yang dipanaskan pada instalasi ketel uap atau *boiler*.

## 2. Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Pada ketel uap pipa air, yang mengalir di dalam pipa adalah air. Air bergerak melalui pipa yang dipanaskan oleh api yang berada di luar pipa. Pipa-pipa yang dipasang dalam *boiler* bisa berbentuk lurus atau melengkung (tabung bengkok), dan susunan pipa di antara kedua *header* memiliki kemiringan sekitar  $15^\circ$  dari garis *horizontal* untuk mempermudah sirkulasi air di dalam ketel. Ketel uap pipa air dapat dilihat pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. 6 Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

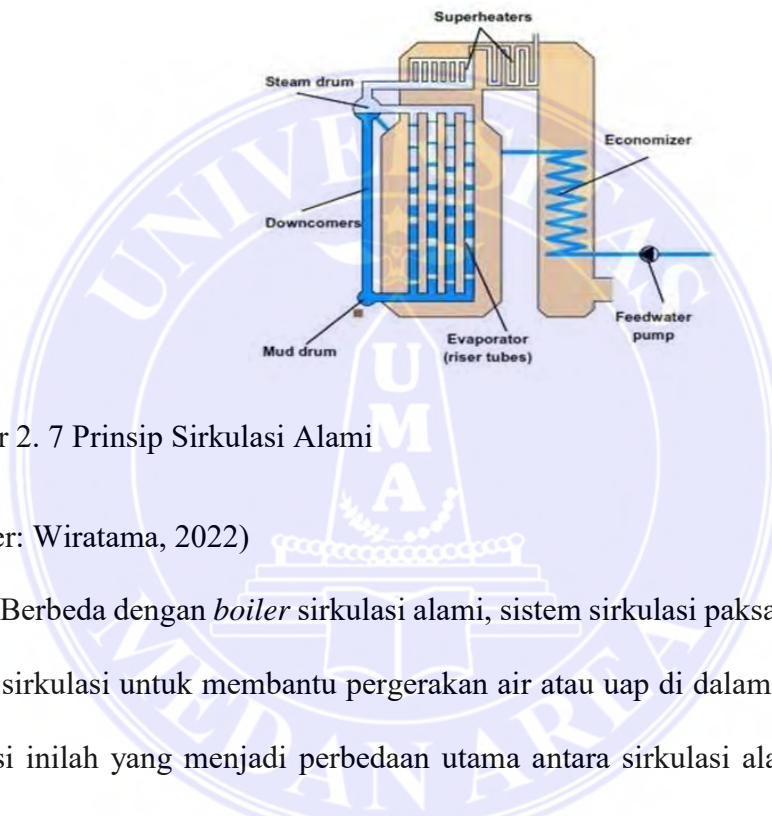
*Water tube boiler* adalah jenis boiler di mana air dipanaskan di dalam tabung, sementara gas panas mengalir di sekelilingnya. Ini merupakan definisi dasar dari *boiler* tabung air. Secara prinsip, *boiler* ini merupakan kebalikan dari *fire tube boiler*, di mana gas panas mengalir melalui pipa-pipa yang dikelilingi oleh air. *Water tube boiler* diklasifikasikan berdasarkan cara sirkulasi air atau uapnya, yaitu sirkulasi alami, sirkulasi paksa atau terbantu, sistem sekali lewat, serta tipe sirkulasi gabungan. Saat ini, semua boiler yang digunakan untuk pembangkit listrik termasuk dalam kategori *water tube boiler*.

Pada *water tube boiler* terdapat sirkulasi alami, yang merupakan salah satu prinsip tertua dalam mengalirkan uap atau air di dalam *boiler*. Pemakaian metode ini telah menurun dalam beberapa dekade terakhir karena adanya kemajuan teknologi pada jenis sirkulasi lain. Prinsip sirkulasi alami umumnya digunakan pada *boiler* dengan ukuran kecil hingga menengah. Penurunan tekanan pada *boiler* dengan sirkulasi alami berkisar antara 5-10% dari tekanan uap di dalam drum uap, dan suhu uap maksimum yang dihasilkan berkisar antara 540 hingga 560 °C.

Sirkulasi air atau uap bermula dari tangki *feed water*, tempat dimana air umpan dipompa. Pompa *feed water* berfungsi untuk meningkatkan tekanan air umpan hingga mencapai tekanan *boiler* yang diinginkan. Pada kenyataannya, tekanan uap akhir harus dijaga di bawah 170 bar agar sirkulasi alami dapat berjalan dengan efektif.

Air umpan terlebih dahulu dipanaskan di *economizer* hingga mencapai suhu yang hampir mendidih. Untuk menghindari agar air umpan tidak sampai mendidih di dalam pipa *economizer*, suhu keluar air dari *economizer* sengaja dijaga sekitar 10 derajat di bawah titik didih, dikenal sebagai pendekatan suhu 10 K. Setelah itu,,

air umpan mengalir ke *steam drum boiler*, di mana air tersebut tercampur merata dengan air yang sudah ada di dalam *steam drum*. Proses ini membantu mengurangi tekanan termal di dalam drum uap. Jenis sirkulasi yang terjadi disebut sirkulasi alami karena tidak terdapat pompa yang menggerakkan peredaran air; sirkulasi berlangsung secara otomatis akibat perbedaan massa jenis antara air atau uap yang mengalir melalui *downcomer* dan *riser*.



Gambar 2. 7 Prinsip Sirkulasi Alami

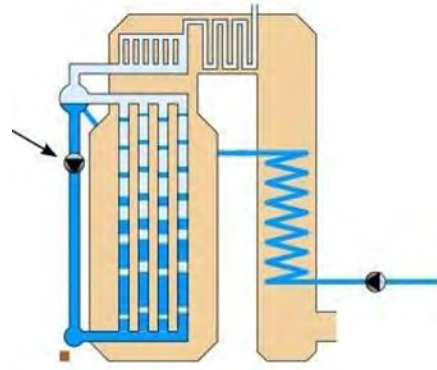
(Sumber: Wiratama, 2022)

Berbeda dengan *boiler* sirkulasi alami, sistem sirkulasi paksa menggunakan pompa sirkulasi untuk membantu pergerakan air atau uap di dalam *boiler*. Pompa sirkulasi inilah yang menjadi perbedaan utama antara sirkulasi alami dan paksa. Pada *boiler* sirkulasi paksa yang paling umum, seperti *boiler La Mont*, prinsip kerjanya mirip dengan sirkulasi alami, hanya saja dilengkapi dengan pompa sirkulasi. *Boiler* sirkulasi paksa biasanya beroperasi pada tekanan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan *boiler* dengan sirkulasi alami, namun karena proses pemisahan uap dan air di *steam drum* bergantung pada perbedaan massa jenis tersebut, *boiler* ini tidak cocok digunakan untuk tekanan *superkritis* di atas 221 bar.

Tekanan operasi maksimum *boiler* sirkulasi paksa mencapai sekitar 190 bar, dengan penurunan tekanan di dalam *boiler* sekitar 2-3 bar.

Sirkulasi air atau uap bermula dari tangki air umpan, di mana air tersebut dipompa. Pompa air umpan berfungsi untuk meningkatkan tekanan air hingga mencapai tekanan *boiler* yang diinginkan. Dalam praktik, tekanan uap akhir dijaga di bawah 190 bar agar uap tetap berada dalam kondisi subkritis. Selanjutnya, air umpan dipanaskan di economizer hingga mendekati suhu titik didih air. Pada sistem sirkulasi paksa, pompa sirkulasi memberikan dorongan aktif untuk mengalirkan uap dan air. Karena sirkulasi dipaksa oleh pompa, tabung *evaporator* dapat dipasang hampir di posisi mana saja. Sistem ini juga mampu mentoleransi kehilangan tekanan yang lebih besar, sehingga tabung *evaporator* pada boiler sirkulasi paksa memiliki biaya lebih murah dan diameter yang lebih kecil dibandingkan dengan boiler sirkulasi alami.

Air jenuh mengalir dari *steam drum* melalui tabung *downcomer* menuju *mud drum*. Biasanya terdapat beberapa tabung *downcomer* yang tidak dipanaskan dan berada di luar *boiler*. *Header* yang mendistribusikan air ke tabung *evaporator* dilengkapi dengan *choker* (pembatas aliran) pada setiap tabung dinding agar air dapat tersebar secara merata. Selanjutnya, air mengalir ke tabung *riser* di mana terjadi proses penguapan. Uap yang terbentuk kemudian dipisahkan di dalam *steam drum* dan diteruskan melalui *superheater*, sama seperti pada sistem sirkulasi alami.



Gambar 2. 8 Prinsip Sirkulasi Paksa

(Sumber: Wiratama, 2022)

### 2.1.3 Prinsip dan Cara Kerja *Boiler*

Bagaimana cara kerja *boiler*? Adapun prinsip kerja *boiler* mengikuti ketentuan berikut:

- Apabila air dipanaskan pada tekanan 1 atm, maka temperaturnya akan naik perlahan-perlahan hingga 100 derajat Celsius. Akan tetapi, jika dilakukan pembakaran lebih lanjut, suhu tidak akan bertambah lagi dan air yang ditambahkan digunakan untuk membangkitkan uap.
- Apabila air dipanaskan pada tekanan di atas 1 atm, maka temperaturnya akan mencapai lebih dari 100 derajat Celsius. Air akan mendidih pada suhu yang sebanding dengan tekanannya. Ketika air sudah mendidih, suhu akan konstan dan semua panas digunakan untuk menghasilkan uap.

Selain itu, proses pendidihan air melibatkan mekanisme perpindahan panas.

Di dalam *boiler*, panas dapat berpindah melalui tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar ditransfer

secara radiasi ke pipa-pipa air, kemudian permukaan pipa menyerap panas tersebut. Selanjutnya, perpindahan panas dilakukan dari permukaan pipa ke bagian dalam pipa melalui konduksi.

Air yang mengalir di dalam pipa kemudian menyerap panas melalui perpindahan panas konveksi antar molekul air. Seiring waktu, air tersebut secara bertahap berubah menjadi uap basah dan kemudian menjadi uap kering. Uap yang telah mencapai kondisi kering inilah yang digunakan untuk menggerakkan mesin. Perlu diketahui bahwa *boiler* atau ketel uap merupakan komponen penting dalam berbagai bidang industri. Walaupun fungsinya hanya mengubah air menjadi gas, uap yang dihasilkan sangat dibutuhkan untuk mengoperasikan mesin.

#### 2.1.4 Cara Perawatan dan Perbaikan *Boiler*

Seperti halnya komponen peralatan lainnya, *boiler* memerlukan perawatan (*maintenance*) yang tepat dan rutin. Pelaksanaan *maintenance* serta perbaikan pada *boiler* bertujuan untuk beberapa hal, antara lain:

1. Meningkatkan kemampuan produksi.
2. Menjaga kualitas produksi.
3. Memastikan keamanan *boiler* dalam bekerja.
4. Menjaga *boiler* agar selalu dalam kondisi yang dikehendaki.
5. Menjamin kesiapan operasional *boiler* bila diperlukan dalam keadaan darurat.
6. Menjaga *boiler* agar dapat bertahan lebih lama.

#### 2.1.5 Langkah *Maintenance Boiler*

Ada beberapa langkah yang harus dilakukan dalam *maintenance boiler*, antara lain:

1. Perawatan Preventif

Langkah ini meliputi serangkaian tindakan yang direncanakan dan dilakukan secara teratur untuk mencegah kerusakan serta mempertahankan kinerja *boiler* agar tetap optimal. Kegiatan ini mencakup pembersihan secara berkala, pemeriksaan bagian-bagian utama, serta penggantian suku cadang yang mungkin mengalami keausan.

## 2. Perawatan Korektif

Perawatan ini dilakukan setelah terjadi kerusakan atau gangguan pada sistem *boiler* oleh tim *maintenance* sesegera mungkin setelah masalah terdeteksi, dengan tujuan mengurangi waktu henti dan mencegah kerusakan yang lebih parah.

## 3. Perawatan Reaktif (*Break Down Maintenance*)

Perawatan reaktif dilakukan setelah perbaikan dilaksanakan. Meskipun bersifat cepat, jenis perawatan ini biasanya lebih mahal dan berpotensi menyebabkan waktu henti yang tidak diinginkan.

## 4. Perawatan Deteksi Dini (*Predictive Maintenance*)

Pendekatan ini menggunakan teknologi dan pemantauan secara terus-menerus untuk mengidentifikasi tanda-tanda awal kemungkinan kerusakan pada boiler melalui analisis data dan sensor.

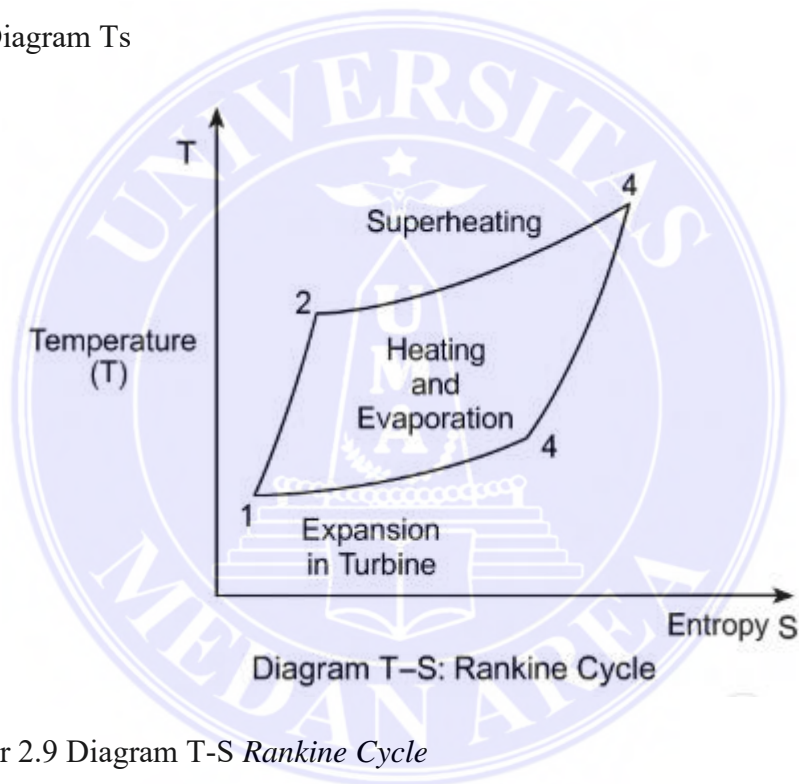
## 5. Perawatan Proaktif (*Proactive Maintenance*)

Langkah ini mencakup tindakan pencegahan lanjutan, seperti melakukan perbaikan atau peningkatan pada desain sistem, dengan tujuan mencegah masalah yang mungkin terjadi di masa mendatang. Hal ini bertujuan untuk memperpanjang masa pakai dan meningkatkan kinerja boiler secara keseluruhan, mengurangi kebutuhan perbaikan, serta meningkatkan efisiensi operasional.

## 2.2 Siklus *Rankine*

Siklus *Rankine* merupakan siklus termodinamika yang digunakan secara luas pada pembangkit tenaga uap, termasuk sistem *boiler*, turbin uap, dan kondensor. Siklus ini menggambarkan proses konversi energi panas menjadi energi mekanik, yang kemudian dapat diubah menjadi energi listrik. Prinsip kerja siklus *Rankine* didasarkan pada hukum termodinamika pertama, yaitu perubahan energi dalam sistem tertutup akibat perpindahan panas dan kerja.

### 2.2.1 Diagram Ts



Gambar 2.9 Diagram T-S *Rankine* Cycle

#### 1. Proses 1–2: Pemompaan (Isentropik Kompresi)

- Air cair jenuh dari kondensor dipompa ke tekanan *boiler* menggunakan pompa.
- Karena cairan hampir tidak dapat dimampatkan, kerja pompa relatif kecil dibandingkan kerja turbin.
- Proses ini bersifat isentropik, sehingga tidak terjadi pertukaran panas dengan lingkungan.

- Rumus kerja pompa:

$$W_p = v(P_2 - P_1)$$

Di mana  $V$  adalah volume spesifik air,  $P_2$  tekanan *boiler*, dan  $P_1$  tekanan kondensor.

## 2. Proses 2–3: Pemanasan dan Penguapan di *Boiler* (Isobarik Pemanasan)

- Air bertekanan tinggi dipanaskan secara isobarik (tekanan konstan) di dalam *boiler* hingga menjadi uap jenuh atau uap *superheated*.
- Energi panas yang diberikan pada tahap ini disebut panas masuk ( $Q_{in}$ ):

$$Q_{in} = h_3 - h_2$$

Dimana  $h_3$  dan  $h_2$  adalah entalpi uap keluar dan air masuk *boiler*.

## 3. Proses 3–4: Pemanasan Lanjut (*Superheating*)

- Uap jenuh dari drum ketel dialirkan ke *superheater* untuk menaikkan temperatur di atas titik jenuh.
- Uap menjadi *superheated steam*, yang digunakan untuk memutar turbin uap.
- Proses ini meningkatkan efisiensi termal karena uap keluar memiliki energi entalpi tinggi.

## 4. Proses 4-5: Ekspansi Uap di Turbin (Isentropik Ekspansi)

- Uap bertekanan tinggi dari *boiler* diekspansikan di dalam turbin untuk menghasilkan kerja mekanik.
- Selama ekspansi, entropi dijaga konstan (proses isentropik), dan sebagian energi panas uap diubah menjadi kerja turbin:

$$W_t = h_3 - h_4$$

## 5. Proses 5–1: Kondensasi di Kondensor (Isobarik Pendinginan)

- Uap sisa dari turbin dialirkan ke kondensor untuk dikondensasikan menjadi air jenuh cair pada tekanan rendah.
- Proses ini juga berlangsung isobarik, dengan panas buang dilepaskan ke lingkungan:

$$Q_{out} = h_4 - h_1$$

### 2.2.2 Teori dalam siklus *rankine*

#### 1. Kerja Pompa

Pompa pada sistem pembangkit uap berfungsi untuk menaikkan tekanan air umpan (*feed water*) agar dapat masuk ke dalam *boiler*. air dari tangki *feed water* dipompa ke *economizer* untuk dipanaskan hingga mendekati titik didih sebelum memasuki *drum boiler*. Pada *boiler* dengan sirkulasi paksa, pompa tidak hanya mengalirkan air ke *boiler* tetapi juga membantu sirkulasi air dan uap dalam pipa *evaporator*. Fungsi utama pompa adalah mengatasi tekanan tinggi di dalam *boiler* (contohnya 20 bar) agar air dapat masuk dan terus bersirkulasi. Energi yang diperlukan oleh pompa disebut kerja pompa ( $W_p$ ), yaitu energi mekanik yang digunakan untuk memindahkan fluida bertekanan tinggi.

Secara termodinamika:

$$W_p = v(P_2 - P_1)$$

dengan:

- $v$  = volume spesifik air ( $m^3/kg$ )
- $P_2 - P_1$  = kenaikan tekanan (Pa)

#### 2. Panas Masuk ( $Q_{in}$ )

berdasarkan energi pembakaran bahan bakar biomassa, yaitu campuran cangkang dan fiber. Umumnya, rumus yang digunakan untuk menghitung panas masuk ( $Q_{in}$ ) adalah sebagai berikut:

$$Q_{masuk} = m_{bahanbakar} \times \text{NilaiKalorBahanBakar}$$

### 3. Kerja Turbin ( $W_t$ )

Uap yang telah dipanaskan di *boiler* (uap *superheated*) kemudian dialirkan ke turbin uap, di mana energi panas diubah menjadi energi mekanik. Prinsip kerja turbin adalah dengan memperluas uap bertekanan tinggi sehingga menghasilkan kerja pada poros yang digunakan untuk memutar generator. Besarnya kerja turbin dihitung dari selisih entalpi antara uap yang masuk dan yang keluar dari turbin.

Rumus umum:

$$W_t = h_3 - h_4$$

dengan:

- $h_3$  = entalpi uap masuk turbin (*superheated steam*)
- $h_4$  = entalpi uap keluar turbin

### 4. Panas Keluar ( $Q_{out}$ )

Panas keluar adalah energi panas yang dibuang ke kondensor atau ke lingkungan setelah uap keluar dari turbin.

Dalam siklus *Rankine*:

$$Q_{out} = h_4 - h_1$$

dengan:

- $h_4$  = entalpi uap keluar turbin
- $h_1$  = entalpi air kondensat yang kembali ke pompa

Dalam konteks efisiensi *boiler* di skripsi ini, kehilangan panas ( $Q_{out}$ ) juga meliputi:

- Panas yang hilang melalui gas buang (cerobong),
- Kehilangan panas radiasi dan konveksi dari dinding *boiler*,
- Panas tak terpakai yang terbawa bersama abu atau sisa pembakaran.

Efisiensi termal *boiler* dihitung dari perbandingan antara energi berguna ( $Q_{keluar}$ ) dan energi masuk ( $Q_{masuk}$ ):

$$\eta = \frac{Q_{keluar}}{Q_{masuk}} \times 100\%$$

### 2.3 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan ilmu yang mempelajari kecepatan aliran panas antar material atau benda akibat perbedaan suhu (antara panas dan dingin). Perpindahan kalor tidak akan terjadi dalam sistem yang memiliki suhu yang sama. Perbedaan suhu ini berfungsi sebagai penggerak utama terjadinya perpindahan kalor, serupa dengan perbedaan tegangan yang menjadi penggerak aliran arus listrik.

Proses perpindahan kalor terjadi dari suatu *system* yang memiliki *temperatur* lebih tinggi ke *temperatur* yang lebih rendah. Keseimbangan pada masing – masing sistem terjadi ketika *system* memiliki temperatur yang sama. Perpindahan kalor dapat berlangsung dengan 3 (tiga) cara, yaitu:

- a. Perpindahan kalor konduksi
- b. Perpindahan kalor konveksi (Alami dan Paksa)
- c. Perpindahan kalor radiasi

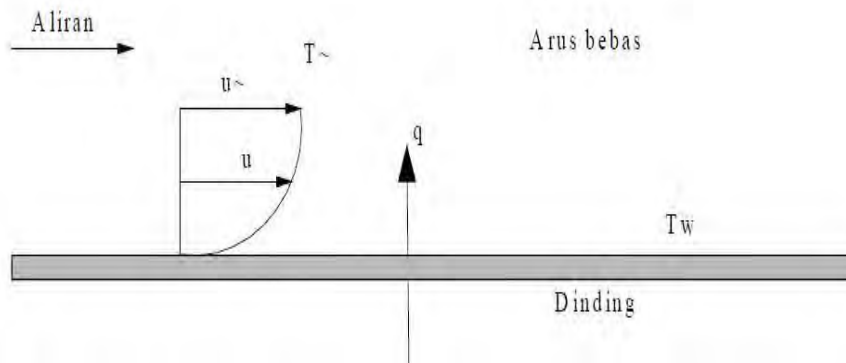
Perpindahan panas secara konduksi adalah proses di mana panas bergerak dari area dengan suhu tinggi ke area dengan suhu lebih rendah, sementara media yang digunakan untuk perpindahan panas tersebut tetap tidak berpindah tempat.

Kecepatan aliran panas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti luas permukaan kontak antar benda, perbedaan suhu awal antara kedua benda, serta kemampuan konduktivitas panas dari masing-masing benda. Konduktivitas panas mengacu pada seberapa mudah suatu material dapat menghantarkan panas.

### 2.3.1 Perpindahan Kalor Secara Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas yang terjadi melalui pergerakan zat yang dipanaskan. Perpindahan panas secara konveksi merupakan fenomena yang terjadi pada permukaan suatu bahan. Dalam proses ini, kondisi bagian dalam bahan kurang berperan penting, sementara kondisi permukaan, lingkungan sekitar, dan posisi permukaan tersebut menjadi faktor utama. Biasanya, karena adanya proses konduksi yang menciptakan keseimbangan termodinamik di dalam bahan, suhu pada permukaan bahan akan berbeda dengan suhu di sekitarnya.

Proses perpindahan panas yang terjadi ini disebut perpindahan kalor konveksi. Misalnya, sebuah pelat dipanaskan seperti pada gambar 2.15, dengan suhu pelat  $T_w$  dan suhu fluida  $T_\infty$ , serta kecepatan aliran yang terlihat dalam gambar tersebut. Kecepatan aliran fluida menurun hingga nol di permukaan pelat akibat pengaruh gaya viskos. Karena kecepatan fluida di permukaan pelat adalah nol, panas pada titik ini hanya dipindahkan secara konduksi. Oleh karena itu, kita dapat menggunakan persamaan (2.1) dengan nilai konduktivitas termal fluida dan gradien suhu fluida di permukaan pelat. Namun, proses ini tetap disebut konveksi karena gradien suhu tersebut dipengaruhi oleh laju aliran fluida yang mengambil panas.



Gambar 2. 10 Perpindahan kalor konveksi dari suatu plat.

Efek keseluruhan konveksi, dirumuskan dengan Hukum Newton tentang pendinginan:

$$q = hA (T_w - T_{\infty}) \dots \dots \dots (2.1)$$

keterangan :

$Q$  = Laju Perpindahan Panas ( kj/det atau W )

$h$  = Koefisien perpindahan Panas Konveksi ( W / m<sup>2</sup>.°C )

$A$  = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas ( ft<sup>2</sup> , m<sup>2</sup> )

$T_w$  = Temperature Dinding ( °C , K )

$T_{\infty}$  = Temperature Sekeliling ( °C , K )

Tanda minus ( - ) digunakan untuk memenuhi hukum II thermodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif ( + ).

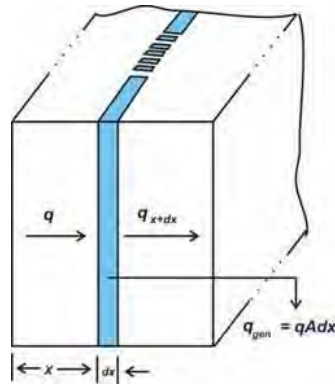
Satuan koefisien perpindahan panas konveksi (h) adalah *watt* per meter persegi per derajat *Celsius*, jika aliran kalor dinyatakan dalam watt. Dari uraian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas secara konveksi dipengaruhi oleh viskositas fluida.

Tabel 2. 1 Nilai Kira-Kira Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi

Modus	<i>H</i>	
	W/m <sup>2</sup> . °C	Btu/h . ft <sup>2</sup> . °F
Konveksi bebas, $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$		
Plat vertical, tinggi 0.3 m ( 1ft ), di udara	4,5	0,79
Silinder horizontal, diameter 5 cm di udara	6,5	1,14
Silinder horizontal, diameter 2 cm, dalam air	890	157
Konveksi paksa		
Aliran udara 2 m/s di atas plat bujur sangkar 0,2 m	12	2,1
Aliran udara 35 m/s di atas plat bujur sangkar 0,75 m	75	13,2
Udara 2 atm mengalir di dalam tabung diameter 2,5 cm, kecepatan 10 m/s	65	11,4
Air 0,5 kg/s mengalir di dalam tabung 2,5 cm	3500	616
Aliran udara melintas silinder diameter 5 cm, kecepatan 50 m/s	180	32
Air mendidih		
Dalam kolam atau bejana	2500 – 35.000	440 – 6200
Mengalir dalam pipa	5000 – 100.000	880 – 17.600
Pengembunan uap air, 1 atm		
Muka vertikal	4000 – 11.300	700 – 2000
Di luar tabung horizontal	9500 – 25.000	1700 – 4400

### 2.3.2 Perpindahan Kalor secara Konduksi

Jika sebuah benda memiliki *gradien* suhu, maka sesuai pengalaman, energi akan mengalir dari bagian yang bersuhu tinggi ke bagian yang bersuhu lebih rendah. Proses perpindahan energi ini disebut konduksi atau hantaran, dan laju perpindahan panasnya sebanding dengan gradien suhu yang tegak lurus.



Gambar 2. 11 volume unsur untuk analisis konduksi kalor satu dimensi.

Kita katakan bahwa energi berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal :

$$\frac{q}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (2.2)$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitas (*proportionality constant*) atautetapan sebandingan, maka :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (2.3)$$

keterangan :

q = Laju Perpindahan Panas (kj / det,W)

k = Konduktifitas Termal (W/m.°C)

A = Luas Penampang (m<sup>2</sup>)

dT = Perbedaan Temperatur ( °C, °F )dX = Perbedaan Jarak (m / det)

dT/dx = gradient temperatur kearah perpindahan kalor. konstanta positif "k"

Hal ini disebut konduktivitas atau kemampuan benda menghantarkan panas, dan tanda minus ditambahkan untuk mengikuti hukum kedua termodinamika, yang menyatakan bahwa panas selalu mengalir menuju area dengan suhu yang lebih rendah.

Hubungan dasar aliran panas secara konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melewati permukaan dengan suhu tetap (*isothermal*) dan gradien suhu pada permukaan tersebut, yang berlaku pada setiap titik dalam suatu benda dan setiap waktu. Hal ini dikenal sebagai hukum *Fourier*. Ketika diterapkan pada sebuah dinding datar, persamaan Hukum Fourier (persamaan 2.2) jika diintegrasikan akan menghasilkan bentuk tertentu [11]:

$$q = - \frac{\kappa A}{\Delta x} (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (2.4)$$

Bila mana konduktivitas termal (*thermal conductivity*) dianggap tetap. Tebal dinding adalah  $\Delta x$ , sedangkan  $T_1$  dan  $T_2$  adalah temperatur muka dinding. Jika konduktivitas berubah menurut hubungan linear dengan temperatur, seperti  $k = k_0 (1 + \beta T)$ , maka persamaan aliran kalor menjadi [11]:

$$q = - \frac{k_0 A}{\Delta x} [(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2)] \dots \dots \dots (2.5)$$

## 2.4 Proses Pembentukan Uap

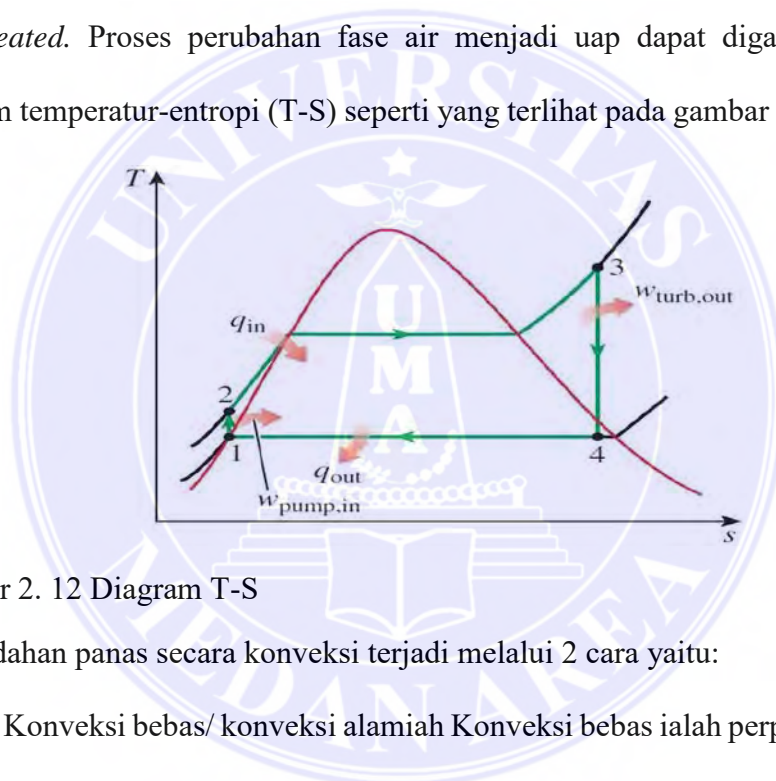
Tabel 2. 2 Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada 0 °C

Konduktivitas termal <i>K</i>		
Bahan	W/m °C	Btu/h . ft. °F
<i>Logam</i>		
perak ( murni )	410	237
tembaga ( murni )	385	223
aluminium ( murni )	202	117
nikel ( murni )	93	54
besi ( murni )	73	42
Baja karbon, 1% C	43	25
Timbal (murni)	35	20,3
baja karbon-nikel ( 18% cr, 8% ni )	16,3	9,4
<i>bukan logam</i>		
kuarsa ( sejajar sumbu )	41,6	24
magnesit	4,15	2,4
marmmer	2,08-2,94	1,2-1,7
batu pasir	1,83	1,06
Kaca, jendela	0,78	0,45
Kayu maple atau ek	0,17	0,096
Serbuk gergaji	0,059	0,034
Wol kaca	0,038	0,022
<i>Zat cair</i>		
Air-raksa	8,21	4,74
Air	0,556	0,327
Amonia	0,540	0,312
Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
Freon 12, 22FCCI	0,073	0,042
<i>Gas</i>		
Hidrogen	0,175	0,101
Helium Udara	0,141	0,081
Uap air ( jenuh )	0,024	0,0139
Karbon dioksida	0,0206	0,0119
	0,0146	0,00844

Pembentukan uap terjadi akibat perubahan energi panas saat pembakaran bahan bakar yang menghasilkan energi panas dalam bentuk uap. Panas dari proses pembakaran ini digunakan untuk meningkatkan entalpi air hingga terbentuk uap air yang menyimpan energi dalam bentuk panas dan tekanan. Pembentukan uap pada

ketel uap, bahan bakar dan udara dimasukkan ke dalam ruang dapur dan terjadi proses pembakaran.

Gas hasil pembakaran akan melewati *evaporator*, kemudian *superheater*, sebelum akhirnya dibuang ke atmosfer melalui cerobong asap. Sementara itu, air pengisi yang sudah dipanaskan di *deaerator* dimasukkan ke dalam *evaporator*, di mana air tersebut berubah menjadi uap jenuh. Uap jenuh ini kemudian dipanaskan lebih lanjut di *superheater* sehingga terbentuk uap panas lanjut atau uap *superheated*. Proses perubahan fase air menjadi uap dapat digambarkan pada diagram temperatur-entropi (T-S) seperti yang terlihat pada gambar 3 di bawah ini.

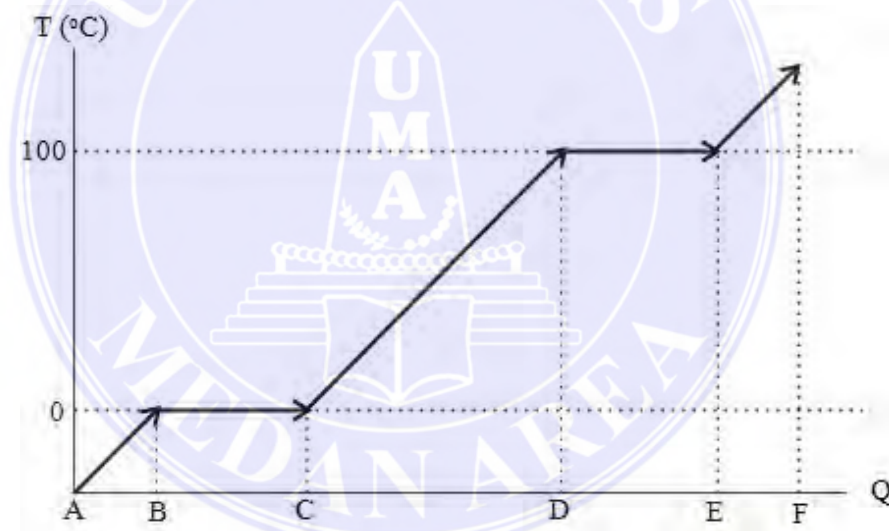


Gambar 2. 12 Diagram T-S

Perpindahan panas secara konveksi terjadi melalui 2 cara yaitu:

- a. Konveksi bebas/ konveksi alamiah Konveksi bebas ialah perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya. Contoh: plat panas dibiarkan berada di uadara sekitar tanpa ada sumber gerakan dari luar.
- b. Konveksi paksaan Konveksi paksaan ialah perpindahan panas yang aliran gas atau cairannya disebabkan adanya tenaga dari luar. Contoh: plat panas dihembus udara dengan kipas/blower.

- c. Perpindahan panas secara radiasi adalah proses *transfer* panas yang terjadi melalui pancaran gelombang elektromagnetik. Radiasi ini memiliki panjang gelombang dalam rentang tertentu. Karena radiasi panas tidak memerlukan media perantara, perpindahan panas ini dapat berlangsung bahkan di ruang hampa udara. Contoh nyata dari perpindahan panas radiasi adalah panas matahari yang sampai ke permukaan bumi.
- d. Agar energi panas dapat diubah menjadi energi mekanis, dibutuhkan sebuah media kerja. Dalam hal ini, media kerja yang digunakan adalah uap, yaitu uap air yang terbentuk dalam ketel sebagai gas hasil perubahan fase air menjadi uap melalui proses pemanasan.



Gambar 2. 13 Grafik proses pembentukan uap.

AB = Tambahan kalor menaikkan suhu es sampai  $0^{\circ}\text{C}$

BC = Tambahan kalor mencairkan es menjadi air

CD = Tambahan kalor menaikkan suhu air dari  $0^{\circ}\text{C}$  sampai  $100^{\circ}\text{C}$  di bawah.

pemanasan hingga ( $100^{\circ}\text{C}$  di bawah tekanan  $1\text{ atm} = 1,003\text{ kg/cm}$ ) dimana proses ini terjadi pada *sensible heat*.

DE = Tambahan kalor menguapkan air, panas yang diberikan merubah fase dari 100<sup>0</sup>C air menjadi 100<sup>0</sup>C uap jenuh (pada *later heat*).

EF = Tambahan kalor menaikkan suhu uap, panas yang diberikan menaikkan suhu 100<sup>0</sup>C uap jenuh menjadi uap kering (pemanas uap lanjut) pada proses *sensible heat*.

Pada tekanan 1 atm dan 100<sup>0</sup>C air akan berubah menjadi uap dan apabila dipanaskan terus-menerus maka seluruhnya akan berubah menjadi uap, pada pemanasan air dari *temperature* 0<sup>0</sup>C menjadi 100<sup>0</sup>C dibutuhkan kalor (Q), maka kalor yang dibutuhkan adalah :

$$Q_1 = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_1 \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

$m_a$  = massa air (kg/satuan waktu)

$C_p$  = panas spesifik air (kkal/kg)

$\Delta t_1 = (100^0C - t_1)$

Bila pemanasan terus dilanjutkan, maka volume uap bertambah sampai seluruh air berubah menjadi uap dan temperature air tidak naik, maka tekanannya juga tetap, kalor yang dibutuhkan untuk perubahan fase ini adalah :

$$Q_2 = m_v \cdot Q_1 \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

$m_v$  = massa uap (kg)

$Q_1$  = panas *laten* (penguapan) (kkal/kg<sup>0</sup>C)

Selanjutnya bila uap air terus dipanaskan maka *temperature* uap akan naik dan kenaikan temperaturnya sebanding dengan kalor yang diterima yaitu :

$$Q_3 = m_v \cdot C_{pv} \cdot \Delta t_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

$m_v$  = massa uap (kg)

$C_{pv}$  = panas spesifik uap (kkal/kg<sup>0</sup>C)

$\Delta t_2 = (t_1 - 100^0 C)$

## 2.5 Bahan Bakar *Boiler* Dalam Efisiensi Energi Dan Kinerja Operasi

Kelapa sawit merupakan komoditas pertanian penting yang menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar, seperti serabut dan cangkang. Limbah ini berpotensi digunakan sebagai bahan bakar padat pengganti bahan bakar fosil dalam berbagai aplikasi energi. Efisiensi dan emisi pembakaran di *boiler* sangat bergantung pada jenis bahan bakar yang dipakai. Oleh karena itu, penelitian mengenai penggunaan biomassa kelapa sawit sebagai bahan bakar alternatif penting dilakukan untuk menilai kemampuan biomassa ini dalam memberikan kinerja yang setara atau lebih baik dibanding bahan bakar konvensional, sekaligus menghasilkan emisi yang lebih rendah.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa biomassa kelapa sawit mempunyai kandungan energi yang tinggi dan dapat dibakar dengan efisien dalam *boiler*. Meski demikian, studi menyeluruh terkait kinerja dan emisi pembakaran bahan bakar padat kelapa sawit pada kondisi operasi nyata masih jarang dilakukan. Selain itu, perbedaan komposisi biomassa, seperti proporsi serabut dan cangkang, dapat memengaruhi hasil pembakaran dan tingkat emisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekurangan tersebut dengan melakukan eksperimen

pembakaran dalam boiler menggunakan berbagai kombinasi komposisi bahan bakar padat kelapa sawit.

Penelitian ini bertujuan untuk menilai kinerja dan emisi pembakaran bahan bakar padat kelapa sawit dalam *boiler*. Secara rinci, penelitian akan mengukur efisiensi pembakaran, suhu, dan tekanan operasi, serta menganalisis emisi gas seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), dan partikel debu. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat menyediakan data lengkap mengenai potensi bahan bakar padat kelapa sawit sebagai alternatif yang ramah lingkungan. Selain itu, penelitian ini juga akan mengevaluasi dampak variasi komposisi bahan bakar pada kinerja dan emisi, yang penting untuk menentukan formulasi bahan bakar yang optimal guna mencapai efisiensi pembakaran terbaik dengan emisi paling rendah.

Penelitian ini secara menyeluruh memiliki tujuan untuk menilai temperatur dan emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar padat kelapa sawit dalam boiler. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga memberikan dampak nyata bagi dunia industri. Meskipun banyak studi sebelumnya membahas pembakaran biomassa padat, evaluasi khusus mengenai temperatur dan emisi hasil pembakaran biomassa kelapa sawit masih sangat terbatas.

Penelitian ini akan secara khusus menitik beratkan pada evaluasi temperatur dan emisi *boiler* yang menggunakan bahan bakar padat hasil samping dari pabrik kelapa sawit, seperti cangkang dan serabut. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih detail mengenai pengaruh temperatur terhadap

kinerja dan emisi *boiler*, sehingga dapat mendukung optimalisasi pemanfaatan biomassa kelapa sawit sebagai bahan bakar.

## 2.6 Identifikasi potensi penghematan

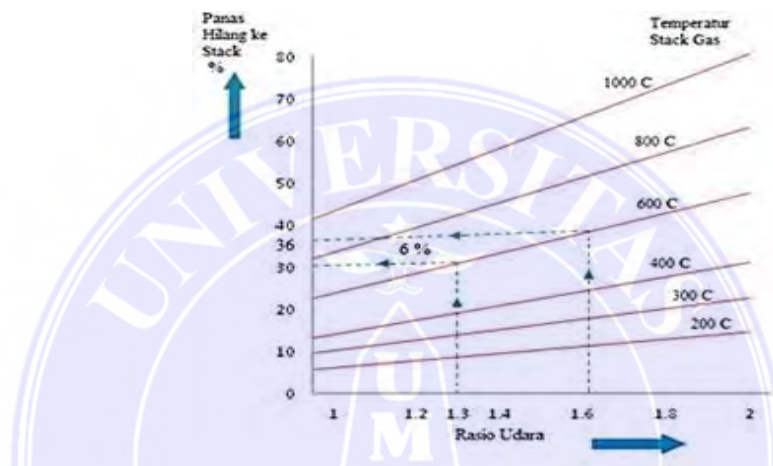
Tahapan berikutnya dalam *audit* energi pada *boiler* adalah menjelaskan potensi penghematan energi atau menjaga stabilitas efisiensi (konservasi energi pada boiler). Proses ini dilakukan dengan mempertahankan dua parameter utama konservasi energi pada boiler, yaitu:

### 2.6.1 Manajemen Pembakaran

Manajemen pembakaran bertujuan untuk memperoleh kondisi pembakaran yang paling efisien bagi bahan bakar dalam *boiler*. Penurunan kapasitas produksi uap dapat terjadi akibat kurangnya jumlah atau menurunnya kualitas bahan bakar. Seringkali terjadi ketidakseimbangan antara bahan bakar dan rasio udara, di mana kelebihan bahan bakar dan berkurangnya volume udara akibat penyempitan ruang bakar menyebabkan pembakaran menjadi tidak optimal. Perubahan tekanan di dalam boiler dapat menyebabkan pengisian bahan bakar menjadi tidak merata dan pembakaran menjadi kurang efisien, terutama saat pasokan bahan bakar terbatas. Hal ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi *boiler*, yang pada akhirnya mengurangi produksi uap dan berdampak pada kapasitas pengolahan di pabrik kelapa sawit (PKS). Menjaga kestabilan kondisi boiler sangat penting guna menghindari terjadinya priming, yang berisiko merusak pipa *superheater* serta pipa distribusi uap. Pembakaran yang ideal terjadi ketika jumlah udara yang masuk ke ruang bakar sedikit lebih banyak dari kebutuhan teoritis (*stoikiometri*). Namun, jika udara berlebih terlalu banyak, volume gas buang hasil pembakaran akan meningkat, sehingga energi terbuang secara signifikan lewat cerobong. Oleh karena itu,

penghematan energi dalam sistem pembakaran dapat dilakukan dengan mengurangi persentase udara berlebih.

Udara berlebih biasanya diukur dengan menggunakan rasio udara. Apabila suhu gas buang dari *boiler* dapat dikendalikan agar tetap rendah dan *persentase* udara berlebih dikurangi seminimal mungkin, maka kerugian energi akibat gas buang dapat diminimalkan, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 2. 14 Panas hilang ke cerobong vs rasio udara

Semakin rendah suhu gas hasil pembakaran, semakin sedikit energi yang terbang. Begitu pula, semakin kecil *persentase rasio* udara, semakin sedikit energi yang hilang, sehingga efisiensi pembakaran meningkat. Secara teori, penghematan energi paling optimal terjadi saat *rasio* udara sama dengan 1. Namun dalam praktik, jika *rasio* udara diatur tepat pada angka 1, bahan bakar cenderung tidak terbakar dengan sempurna, yang ditandai oleh munculnya karbon monoksida (CO) dan/atau asap hitam pada gas buang. Penurunan rasio udara secara berlebihan justru dapat menurunkan efisiensi dan berisiko menghasilkan gas CO yang berbahaya bagi kesehatan manusia dalam gas buang.

*Burner* adalah tempat berlangsungnya proses pembakaran atau pencampuran antara udara dan bahan bakar. *Burner* yang efektif akan menghasilkan

campuran bahan bakar dengan jumlah udara berlebih yang seminimal mungkin. Selain itu, burner harus beroperasi sesuai dengan beban yang telah ditetapkan. Apabila kapasitas pembakaran tidak sesuai dengan beban *boiler*, maka pembakaran bisa melebihi kebutuhan, yang menyebabkan peningkatan kerugian energi akibat panas yang dilepaskan melalui gas buang. Sebaliknya, jika pembakaran kurang dari kebutuhan beban, kerugian energi melalui radiasi dan konveksi akan bertambah. Oleh karena itu, beban *boiler* sebaiknya dijaga dalam rentang efisiensi optimal, yaitu antara 70% hingga 90% dari kapasitas maksimum.

Kurangnya perawatan pada *burner* bisa menyebabkan pembakaran menjadi tidak optimal. Kondisi ini dapat menimbulkan pembentukan kerak dan deposit di dalam *boiler*. Kerak pada ketel terjadi akibat endapan garam sadah di permukaan pipa yang dihasilkan oleh panas penguapan, sedangkan deposit ketel berupa penggumpalan partikel padat yang menempel pada permukaan *boiler*.

Kerak dan deposit tersebut akan menghambat perpindahan panas dari ruang bakar ke air dalam *boiler*, sehingga menyebabkan peningkatan suhu di sekitar ruang bakar dan menurunnya efisiensi *boiler*. Untuk mencegah hal ini, diperlukan pengolahan air (*water treatment*) yang tepat agar pembentukan kerak dapat dicegah. Deposit pada ketel dapat dihilangkan dengan pembersihan menggunakan uap bertekanan tinggi. Proses pembersihan soot *blowing* menggunakan uap sebaiknya dilakukan secara rutin, minimal sekali setiap shift. Dengan membersihkan permukaan bidang pemanas *boiler* secara teratur, pemanfaatan temperatur gas buang dapat ditingkatkan.

## 2.6.2 Manajemen Kualitas Air Umpan

Manajemen air umpan pada boiler bertujuan untuk meningkatkan kinerja jangka panjang. Semakin tinggi suhu air umpan sebelum memasuki *boiler*, maka burner membutuhkan usaha yang lebih sedikit untuk memanaskan air hingga mencapai titik uap jenuh. Hal ini berarti konsumsi bahan bakar dapat dikurangi, sehingga proses operasi menjadi lebih efisien. Dengan menjaga suhu air umpan, panas dapat dimanfaatkan secara optimal, baik melalui penggunaan air *kondensat* secara efektif maupun dengan memanfaatkan panas sisa dari gas buang menggunakan ekonomiser.

- a. Total *Dissolved Solid* (TDS), adalah zat padatan yang terlarut dalam air. Contoh: *Silica* (SiO<sub>2</sub>), Besi (Fe) dan *Chloride* (Cl).
- b. Total *Suspendid Solid* (TSS), adalah zat padatan yang tidak terlarut dalam air. Contoh: Lumpur, pasir, tanah dan zat organik.
- c. Total *Dissolved Gas* (TDG), adalah gas-gas yang terlarut dalam air. Contoh: Oksigen (O<sub>2</sub>), Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) dan Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S).

Konsentrasi tinggi dari TDS, TSS, dan TDG dapat menyebabkan pembentukan kerak pada permukaan pipa pemanas dan drum boiler, serta penumpukan lumpur di bagian bawah drum pada sisi air pipa. Jika kondisi ini berlangsung dalam waktu lama, kadar kerak dan lumpur akan terus meningkat sehingga menghambat perpindahan panas dari gas pembakaran ke air atau uap. Meski manajemen pembakaran sudah dijalankan dengan baik, efisiensi energi optimal *boiler* tidak akan tercapai jika masalah ini tetap terjadi. Semakin tebal kerak yang terbentuk, semakin banyak pula bahan bakar yang dibutuhkan. Oleh karena

itu, pemeliharaan dan pembersihan pada sisi air *boiler* wajib dilakukan secara rutin, baik melalui metode mekanis maupun dengan penggunaan bahan kimia.

Selain proses pemurnian air yang dilakukan di instalasi pengolahan air (*water treatment plant*), *boiler* juga dilengkapi dengan sistem yang berfungsi untuk mengendalikan tingkat kejenuhan atau konsentrasi kotoran yang terus meningkat, yaitu dengan melakukan proses pengurasan atau *blowdown*. *Blowdown* merupakan proses pengeluaran kotoran atau endapan dari dalam *boiler*, namun tindakan ini perlu dilakukan sesuai kebutuhan. Jika pengurasan dilakukan terlalu sering atau berlebihan, hal tersebut dapat menyebabkan peningkatan kehilangan energi melalui *blowdown*. Jumlah *blowdown* yang dibutuhkan bergantung pada kualitas air umpan dan air di dalam *boiler*, sehingga analisis kualitas air *boiler* harus dilakukan secara rutin. Kesalahan dalam pengelolaan air boiler dapat berakibat serius.

## 2.7 Metode Taguchi

Metode *Taguchi* adalah suatu pendekatan dalam bidang teknik yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas produk dan proses sambil meminimalkan biaya dan penggunaan sumber daya. Metode ini mengupayakan agar produk atau proses menjadi tahan terhadap berbagai faktor yang mempengaruhi, seperti material, peralatan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi operasional. Karena fokusnya pada ketahanan terhadap gangguan (*noise*), metode ini juga dikenal sebagai perancangan kokoh (*robust design*).

Metode *Taguchi* menekankan pada pencapaian target tertentu serta pengurangan variasi dalam produk atau proses. Pencapaian tersebut dilakukan dengan memanfaatkan ilmu statistik. Jika terdapat beberapa parameter yang diperkirakan memengaruhi suatu proses, metode *Taguchi* menggunakan prinsip

statistik untuk menghitung seberapa besar pengaruh masing-masing parameter terhadap proses maupun hasilnya. Dengan metode ini, dapat diidentifikasi parameter dominan sehingga memungkinkan dilakukan optimasi pada parameter tersebut guna memperoleh proses yang optimal. Selain itu, metode Taguchi juga mampu memprediksi hasil proses ketika menggunakan kombinasi parameter yang berbeda dari yang diuji, sehingga hasil prediksi ini berguna untuk merencanakan produksi.

a. Tahapan dalam Metode *Taguchi*

Pada tahap ini, desain perlu menetapkan tujuan optimasi proses yang akan dilaksanakan serta menentukan karakteristik *respons* yang akan dianalisis. Beberapa aktivitas yang termasuk dalam tahap ini antara lain adalah:

- 1) Menentukan karakteristik respon yang diukur.
- 2) Mendaftarkan pasangan parameter kendali (*control factor*). Parameter kendali adalah parameter yang berpotensi untuk mempengaruhi karakteristik dari proses pemesinan.
- 3) Menentukan jumlah *setting* tiap parameter kendali. Istilah yang bisa dipakai adalah *level*. *Level* adalah nilai dari parameter kendali.

b. Perencanaan percobaan

Awal dari tahap ini adalah menentukan jenis metode *Taguchi* yang akan digunakan. Jenis metode *Taguchi* ditentukan berdasarkan jumlah parameter kendali dan tingkat (*level*) untuk masing-masing parameter tersebut. Pemilihan jenis metode *Taguchi* ini akan menentukan *matriks ortogonal array* yang akan dipakai dalam percobaan.

c. Melaksanakan percobaan dan pengumpulan data

Pada tahap ini, dilakukan percobaan untuk mengumpulkan data respon sebanyak jumlah baris pada *matriks orthogonal array* yang dipilih. Data respon yang diperoleh kemudian diubah menjadi Rasio S/N (*Signal to Noise Ratio*) untuk analisis lebih lanjut dalam metode Taguchi.

d. Analisis hasil percobaan

Setelah data percobaan diolah, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis untuk menentukan pengaruh relatif dari berbagai parameter kendali tersebut. Analisis dalam metode *Taguchi* terbagi menjadi dua bagian, yaitu:

- 1) Analisis rata-rata (*Analysis of Mean / ANOM*).
- 2) Analisis varian (*Analysis of Variant / ANOVA*).

### 2.7.1 Analisis dalam Metode *Taguchi*

Dalam metode *Taguchi*, terdapat dua jenis analisis dengan tujuan yang berbeda, yaitu:

- a. ANOM (*Analysis of Mean*): Analisis ini digunakan untuk mencari kombinasi parameter kendali yang menghasilkan hasil optimal. Caranya dengan membandingkan nilai rata-rata rasio S/N untuk setiap *level* dan parameter kendali melalui grafik. Dari perbandingan ini, dapat diketahui apakah parameter kendali berpengaruh terhadap proses yang diuji.
- b. ANOVA (*Analysis of Variance*): Analisis ini digunakan untuk mengukur pengaruh masing-masing parameter kendali terhadap proses. Efek yang ditimbulkan dari setiap parameter dapat diketahui dengan membandingkan nilai *Sum of Squares* masing-masing parameter terhadap seluruh parameter yang ada. Besarnya pengaruh tersebut dapat diketahui dengan

membandingkan nilai Sum of Squares (jumlah kuadrat) dari masing-masing parameter kendali terhadap total jumlah kuadrat dari seluruh parameter kendali yang dianalisis.

1. *df (Degrees of Freedom)*: Derajat kebebasan.

- *Regression*: jumlah variabel bebas
- *Residual*: jumlah data kurang jumlah variabel bebas kurang 1.
- *Total*: jumlah data kurang 1.

2. *SS (Sum of Squares)* : Ukuran variasi data.

- *Regression SS*: variasi yang dijelaskan model.
- *Residual SS*: variasi yang tidak dijelaskan model.
- *Total SS*: total variasi.

3. *MS (Mean Square)*

- Nilai rata-rata variasi. Dihitung dengan SS dibagi df.

4. *F*

- Nilai statistik F untuk menguji apakah model secara keseluruhan signifikan.

5. *Significance F*

- Nilai *p-value* untuk uji F. Jika  $< 0,05$  maka model signifikan.

c. Derajat bebas (*degree of freedom*)

Derajat bebas adalah jumlah perbandingan yang perlu dilakukan antara berbagai level (efek utama) atau interaksi untuk menentukan jumlah percobaan minimum yang dibutuhkan. Perhitungan derajat bebas bertujuan untuk memahami hubungan antara suatu faktor dengan level-level yang berbeda terhadap karakteristik kualitas yang dihasilkan. Perbandingan ini

memberikan informasi mengenai faktor dan level mana yang memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik kualitas tersebut. Dalam melakukan percobaan, efisiensi dan biaya menjadi pertimbangan utama. Oleh karena itu, sebisa mungkin digunakan matriks orthogonal terkecil yang masih cukup memberikan informasi untuk pelaksanaan percobaan secara menyeluruh dan penarikan kesimpulan yang valid. Untuk menentukan *matriks orthogonal* yang diperlukan, perlu dilakukan perhitungan derajat kebebasan terlebih dahulu. Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui jumlah eksperimen minimum yang harus dilakukan dan memastikan bahwa matriks yang dipilih sesuai dengan tingkat faktor dan interaksi yang diamati dalam percobaan:

- 1) Untuk faktor utama, misal faktor A dan B:

$$V_A = (\text{jumlah level faktor A}) - 1$$

$$= k_A \cdot 1 \dots\dots\dots(2.16)$$

$$V_B = (\text{jumlah level faktor B}) - 1$$

$$= k_B \cdot 1 \dots\dots\dots(2.17)$$

- 2) Untuk interaksi, misal interaksi A dan B:

$$V_{A \times B} = (k_A \cdot 1) (k_B \cdot 1) \dots\dots\dots(2.18)$$

- 3) Nilai derajat bebas total

$$V_t = (k_A \cdot 1) + (k_B \cdot 1) + (k_A \cdot 1) (k_B \cdot 1) \dots\dots\dots(2.19)$$

Tabel *orthogonal array* yang dipilih harus mempunyai jumlah baris minimum yang tidak boleh kurang dari jumlah derajat bebas totalnya.

d. Matriks *Orthogonal Array*

*Orthogonal array* adalah sebuah matriks yang terdiri dari baris dan

kolom, di mana setiap kolom mewakili suatu faktor atau kondisi tertentu yang dapat berubah dari satu percobaan ke percobaan lainnya. Masing-masing kolom ini merepresentasikan faktor-faktor yang diuji dalam percobaan tersebut. Disebut *orthogonal array* karena setiap level dari setiap faktor tersebut seimbang (*balance*) dan pengaruhnya dapat dipisahkan dengan jelas dari pengaruh faktor-faktor lain, sehingga tidak saling bercampur. Dengan kata lain, *orthogonal array* adalah *matriks* dari faktor dan level yang disusun sedemikian rupa agar pengaruh setiap faktor atau level dapat dianalisis secara independen tanpa pengaruh silang dari faktor lain. Penomoran *orthogonal array* dapat dilakukan dengan cara tertentu sesuai standar eksperimen desain *Taguchi*.

$$Orthogonal Array = L_a (bc) \dots\dots\dots(2.20)$$

Keterangan:

L = Rancangan bujur sangkar latin

a = Banyak baris/eksperimen

b = Banyak level

c = Banyak kolom/faktor

1) Notasi L

Notasi L menyatakan informasi mengenai *orthogonal array*.

2) Notasi a

Menyatakan jumlah percobaan yang dibutuhkan ketika menggunakan *orthogonal array*.

3) Notasi b

Menyatakan jumlah level faktor.

## 4) Notasi c

Menyatakan jumlah faktor yang diamati dalam *orthogonal array*.

Tabel 2. 3 Standar *Orthogonal Array*

2 Level	3 Level	4 Level	5 Level	Mixed-Level
L4 ( $2^3$ )	L9 ( $3^4$ )	L16 ( $4^5$ )	L25( $5^6$ )	L18 ( $2^1 \times 3^7$ )
L8 ( $2^7$ )	L27 ( $3^{13}$ )	L64 ( $4^{21}$ )	-	L32 ( $2^1 \times 4^9$ )
L12 ( $2^{11}$ )	L81 ( $3^{40}$ )	-	-	L36 ( $2^{11} \times 3^{13}$ )
L16 ( $2^{15}$ )	-	-	-	L36 ( $2^3 \times 3^{13}$ )
L32 ( $2^{31}$ )	-	-	-	L54 ( $2^1 \times 3^{25}$ )
L64 ( $2^{63}$ )	-	-	-	L50 ( $2^1 \times 5^{11}$ )

(Sumber : Anggoro, 2016)

Tabel di atas menunjukkan standar penggunaan *orthogonal array* berdasarkan jumlah faktor dan level yang diuji. Untuk percobaan dengan tiga level, *orthogonal array* yang biasa digunakan adalah L9, L27, dan L81. Penelitian ini memilih menggunakan *orthogonal array* L9 ( $3^4$ ) karena berdasarkan hasil *kuesioner*, terdapat tiga faktor yang berpengaruh dan masing-masing faktor memiliki tiga level yang akan diuji. Jumlah observasi atau eksperimen yang dilakukan adalah sembilan kali, sesuai dengan standar tabel *orthogonal array* untuk tiga faktor dengan tiga level pada kolom L9 ( $3^4$ ). *Orthogonal array* ini memiliki beberapa manfaat, antara lain mengurangi jumlah eksperimen yang diperlukan sambil tetap memberikan informasi yang cukup untuk analisis faktor-faktor yang diuji.

- 1) Kesimpulan yang diambil dapat menjangkau ruang lingkup parameter kendali dan masing-masing levelnya secara keseluruhan.
- 2) Sangat menghemat pelaksanaan percobaan karena tidak menggunakan prinsip *fully operational* seperti percobaan yang biasa, tetapi menggunakan prinsip *fractional factorial*. Artinya, tidak semua kombinasi level harus dilakukan percobaan, melainkan hanya beberapa saja. Untuk menentukan level mana yang harus dilakukan dalam

pengambilan data, maka harus mengacu pada model *orthogonal array* yang *standard*. Pemilihan matriks *orthogonal array* disesuaikan dengan permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya.

- 3) Penggunaan *orthogonal array* akan memudahkan dalam menganalisis data penelitian.

e. *Signal to Noise Ratio* (Rasio S/N)

Optimasi proses yang dilakukan oleh metode *taguchi* adalah dengan memperhatikan nilai Rasio S/N. Prinsip dasarnya adalah pengaturan proses produksi mencapai kondisi yang optimum jika dapat memaksimalkan nilai rasio S/N. Rasio S/N adalah suatu bilangan yang menggambarkan perbandingan antara *signal* dan *noise* dari suatu parameter kendali. Nilai rasio S/N didapat dari pengolahan data hasil percobaan untuk beberapa kombinasi level pada parameter kendali. Setiap kombinasi akan memiliki nilai tersendiri yang dapat diketahui apakah parameter kendali tersebut cukup memberikan pengaruh yang signifikan pada sebuah proses pemesinan sehingga dapat disebut sebagai sebuah *signal* atau parameter tersebut hanya memberikan pengaruh yang kecil sehingga dianggap sebagai *noise* atau gangguan saja.

Jika target yang dituju adalah untuk meningkatkan respon, maka yang dilakukan adalah mencari kombinasi dari parameter kendali yang nilai rasio S/N dari setiap levelnya memiliki nilai terbesar. Ada tiga jenis rasio S/N yang biasa dipakai dalam optimasi permasalahan statik yaitu:

1. *Smaller the Better*

Optimasi jenis ini biasanya digunakan untuk mengurangi cacat pada produk, di mana nilai ideal cacat tersebut sebaiknya mendekati nol. Metode ini juga dapat dipakai untuk menentukan waktu produksi tercepat guna mencapai tingkat produktivitas maksimal. Perhitungan optimasi tersebut

dilakukan dengan menggunakan rumus tertentu yang sesuai dengan karakteristik target optimasi ini.

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r Y_i^2 \right) \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana:

Y = rata – rata dari setiap percobaan

### 2. *Large the Better*

Optimasi jenis ini merupakan kebalikan dari optimasi *Smaller the Better*. Rumus yang digunakan adalah:

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \frac{1}{Y_i^2} \right) \dots \dots \dots (2.22)$$

### 3. *Nominal the Better*

Optimasi ini digunakan ketika nilai target yang telah ditentukan harus dipenuhi secara pasti tanpa boleh lebih besar atau lebih kecil dari nilai tersebut. Contohnya meliputi dimensi pada komponen mekanik dalam industri manufaktur, perbandingan unsur kimiawi dalam suatu campuran di industri kimia, dan sejenisnya. Rumus yang digunakan dalam optimasi ini memperhitungkan target nilai tersebut secara presisi untuk mencapai hasil yang sesuai dengan standar yang diharapkan.

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log \frac{y^{-2}}{s^2} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$S^2 = \frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r X_i - X \right)^2}{n-1} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana:

$S^2$  = varian

$X_i$  = nilai kombinasi ke-n

X = nilai rata-rata dari setiap kombinsi

#### 4. Sum of Square

*Sum of Square* adalah jumlah variasi dari nilai rasio S/N pada setiap level untuk masing-masing parameter kendali. Besarnya nilai *Sum of Square* ini dapat dihitung menggunakan rumus tertentu yang melibatkan kuadrat dari nilai rata-rata respon pada tiap level parameter, dikalikan dengan jumlah pengulangan atau eksperimen yang dilakukan pada level tersebut, kemudian dijumlahkan dan dikurangi dengan total kuadrat rata-rata keseluruhan. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar variasi yang disebabkan oleh masing-masing parameter kendali dalam percobaan *Taguchi*.

$$SS = \sum_{i=1}^n (R_i - R)^2 \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana:

$n$  = jumlah level dari setiap *control factor*

$R_i$  = nilai S/N Ratio pada level ke- $n$

#### 5. Summary Output

ringkasan hasil analisis atau model yang memberikan gambaran utama dan insight statistik dari data atau model yang telah diproses. Summary output membantu pengguna memahami performa model, statistik deskriptif, dan informasi penting lainnya secara cepat.

- *Multiple R*

Nilai koefisien korelasi (0 sampai 1) yang mengukur keeratan hubungan antara hasil prediksi model dan data sebenarnya. Semakin mendekati 1 maka hubungan semakin kuat.

- *R Square (R<sup>2</sup>)*

Proporsi variasi Y yang dapat dijelaskan oleh X. Contoh:  $R^2 = 0,87$  artinya 87% variasi Y dijelaskan oleh model, sisanya dipengaruhi faktor lain.

- *Adjusted R Square*

Versi  $R^2$  yang sudah disesuaikan dengan jumlah variabel bebas. Penting untuk model dengan banyak X agar tidak “terlalu optimis.

- *Standard Error*

Rata-rata deviasi (kesalahan) antara nilai yang diprediksi dan nilai sebenarnya. Semakin kecil → prediksi semakin akurat.

- *Observations*

Jumlah data yang dianalisis.

## 6. *Coefficients Table*

Menampilkan koefisien regresi tiap variabel dan signifikansinya.

- *Intercept (Constant)*

Nilai Y ketika semua  $X = 0$ .

- *Coefficient*

Besarnya perubahan Y untuk setiap perubahan 1 satuan pada X. Positif dinyatakan hubungan searah; Negatif dinyatakan hubungan berlawanan.

- *Standard Error*

Tingkat ketidakpastian pada estimasi koefisien.

- *t Stat*

Nilai uji t untuk menguji apakah koefisien berbeda dari nol.

- *P-value*

Probabilitas kesalahan jika menyimpulkan koefisien  $\neq 0$ . Jika  $< 0,05$  maka signifikan.

- *Lower 95% & Upper 95%*

Batas bawah dan atas dari interval kepercayaan 95% untuk koefisien

- f. *P Value* adalah nilai probabilitas yang digunakan untuk mengukur apakah hasil pengujian data mendukung hipotesis nol ( $H_0$ ) atau tidak. Nilai *P Value* berkisar antara 0 hingga 1, dan biasanya dengan ambang batas 0,05. Jika *P Value* lebih kecil dari 0,05, maka hipotesis nol ditolak, yang artinya terdapat perbedaan atau pengaruh yang signifikan dalam data yang diuji. Sebaliknya, jika *P Value* lebih besar dari 0,05, maka hipotesis nol diterima, artinya tidak ada perbedaan signifikan.
- g. *F Value* dalam ANOVA adalah statistik yang digunakan untuk menguji apakah variabel bebas secara simultan memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel terikat. *F Value* diperoleh dari perbandingan variansi antar kelompok dengan variansi dalam kelompok. Jika nilai *F Hitung* lebih besar dari *F Tabel*, atau nilai signifikansi (*P Value*) kurang dari 0,05, maka model dianggap signifikan atau variabel bebas bersama-sama memengaruhi variabel terikat.

## 2.8 Metode Evaluasi Regresi

- a. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) adalah ukuran statistik yang menunjukkan sejauh mana variasi dalam variabel dependen dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model regresi. Nilai  $R^2$  berkisar antara 0 dan 1, dengan nilai yang mendekati 1 menunjukkan model yang sangat baik dalam menjelaskan variansi data, sedangkan nilai yang mendekati 0 menunjukkan

kemampuan model yang rendah. Menurut Chin (1998), nilai  $R^2$  dikategorikan kuat jika lebih dari 0,67, moderat antara 0,33 sampai 0,67, dan lemah jika kurang dari 0,33.

- b. *Multiple R* atau korelasi ganda adalah ukuran statistik yang menunjukkan kuat atau lemah hubungan linear antara satu variabel dependen dengan lebih dari satu variabel independen secara simultan. Nilai *Multiple R* berkisar antara 0 hingga 1, semakin mendekati 1 menunjukkan hubungan yang semakin kuat. *Multiple R* merupakan akar kuadrat dari nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dalam analisis regresi linear berganda.
- c. MAE (*Mean Absolute Error*) adalah rerata dari nilai absolut selisih antara nilai prediksi dan nilai aktual. MAE mengukur rata-rata kesalahan *absolut* tanpa memperhatikan arah kesalahan. MAE dengan nilai di bawah 3 sudah bisa dikatakan memiliki akurasi yang cukup baik, semakin kecil nilai MAE, maka model semakin akurat.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |f_t - y_t| \dots \dots \dots (2.6)$$

- d. MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) merupakan rata-rata persentase kesalahan *absolut* antara nilai prediksi dengan nilai aktual. MAPE mengindikasikan seberapa besar kesalahan prediksi dalam persentase, sehingga mudah diinterpretasikan. Nilai MAPE rendah menunjukkan akurasi yang baik.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| 100}{n} \dots \dots \dots (2.7)$$

- < 10% = Kemampuan model peramalan yang sangat baik
- 10-20% = Kemampuan model peramalan yang baik
- 20-50% = Kelayakan model peramalan

>50% = Kemampuan model peramalan yang buruk

e. MSE (*Mean Squared Error*) adalah rata-rata dari kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai aktual. MSE memberikan penalti lebih besar pada kesalahan besar karena nilai selisih dikuadratkan. Nilai MSE yang lebih kecil berarti model lebih baik.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots(2.8)$$

f. RMSE (*Root Mean Squared Error*) adalah akar kuadrat dari MSE, memberikan satuan kesalahan yang sama dengan data asli. RMSE juga mengukur ukuran kesalahan RSME dengan nilai di bawah 5 sudah bisa dikatakan memiliki akurasi yang cukup baik dan semakin kecil nilainya semakin baik model prediksi.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(2.9)$$

G. Pembahasan Respon Table For Means

Respon table for means merupakan tabel yang sering digunakan dalam desain eksperimen (Design of Experiment/DoE), khususnya untuk analisis pengaruh faktor terhadap respons atau output eksperimen.

komponen dalam *Response Table for Means*

- Faktor: Variabel yang diuji, misal faktor suhu, tekanan, waktu, dll.
- Level Faktor: Nilai atau kategori faktor tersebut (misal Level 1, Level 2).
- *Mean Response*: Nilai rata-rata hasil (*respons*) pada level faktor tersebut.

H. Regression Equation

Analisis *linear* berganda adalah alat untuk meramalkan nilai pengaruh dua variabel bebas atau lebih, terhadap satu variabel terikat. (Untuk membuktikan ada tidaknya hubungan fungsional atau hubungan kausal antara dua atau lebih variabel bebas :  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  terhadap satu variabel terikat  $Y$ ).

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2$$

### I. *Residual plot*

- *Normal Probability Plot*

Grafik ini digunakan untuk meninjau apakah residual tersebar mendekati distribusi normal. Titik-titik yang mengikuti garis diagonal secara umum menunjukkan bahwa asumsi kenormalan residual cukup *fitted values* dapat diterima dalam konteks model ini.

- *Versus Fits*

Grafik ini menunjukkan hubungan antara nilai prediksi () dan *residual*. Pola sebar acak dari titik-titik pada grafik ini mengindikasikan bahwa tidak terdapat pola khusus atau hubungan sistematis antara nilai prediksi dan sisa model.

- *Histogram*

*Histogram residual* menampilkan distribusi frekuensi residual dalam beberapa interval. Penyebaran yang relatif simetris dan konsisten mendukung interpretasi bahwa tidak terdapat deviasi yang berlebihan dari pola umum.

- *Versus Order*

Grafik ini memperlihatkan bagaimana residual berubah seiring urutan observasi. Fluktuasi yang tidak terlalu ekstrem menunjukkan bahwa pengaruh waktu atau urutan eksperimen tidak secara langsung mengganggu kestabilan residual.

### 2.8.1 Teori Umum Metode-Metode optimasi proses

Optimasi proses adalah pendekatan yang diterapkan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas dalam suatu proses produksi dengan cara mencari kombinasi parameter yang paling optimal. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mencapai hal ini, terutama melalui eksperimen yang direncanakan secara matang. Berikut adalah rangkuman dari beberapa metode optimasi proses yang digunakan dalam berbagai bidang:

- a. *Metode Taguchi*: Fokus pada desain eksperimen efisien untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas produk. Dengan menggunakan *Orthogonal Array* (OA), metode ini mengoptimalkan proses dengan meminimalkan variasi dan memastikan produk berkualitas tinggi dengan sedikit percobaan.
- b. *Desain Faktorial*: Evaluasi semua kombinasi faktor untuk memahami interaksi antara mereka. *Desain faktorial* penuh memberikan informasi komprehensif tetapi memakan waktu dan biaya, sedangkan desain fraksional mengurangi jumlah percobaan.
- c. *Response Surface Methodology* (RSM): Digunakan untuk memodelkan hubungan non-linear antara variabel dan respons. RSM membantu mengidentifikasi kondisi optimal dan memvisualisasikan hubungan antara input dan output.

- d. Metode *Heuristik* dan *Algoritma* Genetika: Kedua pendekatan ini digunakan untuk masalah kompleks dengan banyak variabel, di mana algoritma genetika mencari solusi optimal menggunakan prinsip seleksi alam, sementara metode heuristik berbasis aturan memberikan solusi cepat.
- e. *Six Sigma*: Fokus pada pengurangan variasi dalam proses untuk meningkatkan kualitas, menggunakan analisis statistik untuk menghilangkan penyebab cacat dan mengurangi variabilitas.
- f. Eksperimen Terencana: Merupakan dasar dari optimasi proses statistik, di mana eksperimen direncanakan untuk mengeksplorasi banyak factor secara efisien. *Desain faktorial* penuh dan fraksional membantu dalam mengevaluasi kombinasi faktor.
- g. Pendekatan Fungsi *Desirabilitas*: Mengoptimalkan beberapa respons secara simultan dengan menggabungkan hasil menjadi skor *desirabilitas* tunggal, sehingga memudahkan pengambilan keputusan dalam mencapai hasil yang diinginkan.
- h. Pengendalian Proses Statistik (SPC): Digunakan untuk memantau dan memastikan proses beroperasi secara optimal dengan diagram kontrol untuk mendeteksi penyimpangan dan pemantauan *real-time*.

## BAB III

### MOTODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

##### 3.1.1 Waktu Penelitian

Tabel 3.1 Waktu penelitian

N0	Kegiatan	Sep 24	Okt 24	Nov 24	Des 24	Jan 25	Feb 25	Mar 25
1	Studi letratur dan konsultasi dengan dosen pembimbing							
2	Pengajuan judul tugas akhir							
3	Penyusunan proposal tugas akhir							
4	Seminar proposal							
5	Pengambilan data penelitian							
6	Pengolahan data serta pembuatan laporan							
7	Seminar hasil penelitian							
8	Evaluasi dan persiapan sidang tugas akhir							
9	Sidang sarjana							

### 3.1.2 Tempat Penelitian /Fokus Penelitian

#### 1. Lokasi penelitian

Lokasi penelitian dalam pengambilan data dilakukan di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit yang beralamat JL. Sialang Buah, Teluk mengkudu, Serdang Bedagai *Regency, North Sumatra* 20997.

#### 2. Fokus penelitian

Fokus penelitian ini adalah meneliti boiler pada suhu, tekanan dan menentukan suhu gas buang yang ideal serta meningkatkan peforma sistem keseluruhan di PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit dengan menggunakan metode *taguchi* yang terbukti efektif dalam optimasi proses industry. Karena metod ini memungkinkan untuk menentukan kombinasi parameter terbaik dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit, sehingga lebih efisiensi dalam hal waktu dan biaya.

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat

#### a. Laptop

Dalam penelitian ini, laptop digunakan sebagai alat utama untuk melakukan analisis data. Dengan spesifikasi yang memadai, laptop memungkinkan peneti untuk menjalankan aplikasi *software* enggining yang diperlukan dalam penelitian ini.



Gambar 3. 1 Laptop.

b. *Software Minitab*

*Software mintab* adalah sebuah atau perangkat alat statistika yang dibuat dan drancang untuk pengolahan data statistic seperti contoh nya adalah metode *Taguchi Software* ini akan digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisi optimasi terhadap proses pengolahan *crude palm oil*.



Gambar 3. 2 *Software Minitab*.

c. *Microsoft Excel*

*Microsoft Excel* adalah aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk mengolah data dalam bentuk tabel. Pada penelitian ini *Microsoft excel*

digunakan sebagai media lembar kerja (*spreadsheet*), perhitungan matematika dan formula dan menganalisis data.



Gambar 3. 3 *Software Microsoft Excel.*

### 3.2.2 Bahan

Bahan dalam penelitian ini berupa data-data variasi bahan bakar yang akan diuji seperti cangkang dan serabut. Data yang digunakan mencakup variabel-variabel proses seperti suhu, tekanan, waktu proses, dan melihat dampaknya terhadap konsumsi *energy* dan efisiensinya. Data ini diambil dari hasil pengukuran dan catatan historis di pabrik, yang kemudian dianalisis untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh signifikan dalam proses *Boiler*.

### 3.3 Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan dua metode, yaitu metode eksperimental dan metode *Taguchi*. Metode eksperimental melibatkan peneliti langsung ke lapangan untuk memperoleh data terkait variabel-variabel yang relevan, serta digunakan untuk menguji hubungan sebab-akibat antara variabel bebas dengan variabel terikat dan mengamati dampaknya. Sementara itu, metode *Taguchi* digunakan untuk menganalisis variabel-variabel tersebut, dengan tujuan

meningkatkan kualitas produk dan proses serta meminimalkan kerugian yang terkait dengan produk.

### 3.4 Populasi Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah limbah biomassa kelapa sawit. Sampel yang diambil berasal dari limbah tersebut, yaitu serabut dan cangkang sawit. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan teknik *purposive* sampling, yakni pengambilan berdasarkan pertimbangan tertentu, karena jumlah limbah secara kuantitatif cukup banyak.

Tabel 3.2 populasi dan sampel

Run order	X1 BB pure	X2 Cangkang	X3 Fiber	X4 Tekanan	Y1 Suhu gas buang	Y2
1	?	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?	?

### 3.5 Prosedur kerja

Berikut adalah prosedur kerja penelitian untuk menganalisis dan mengoptimasi efisiensi *boiler* SFW Atmindo dengan menggunakan metode *Taguchi*:

#### a. Persiapan Penelitian:

- 1) Kumpulkan data historis dari pabrik terkait variabel-variabel proses (suhu, tekanan, waktu).
- 2) Lakukan studi literatur dan siapkan alat (*software Minitab*) serta data operasional.

b. Desain Eksperimen (Metode *Taguchi*)

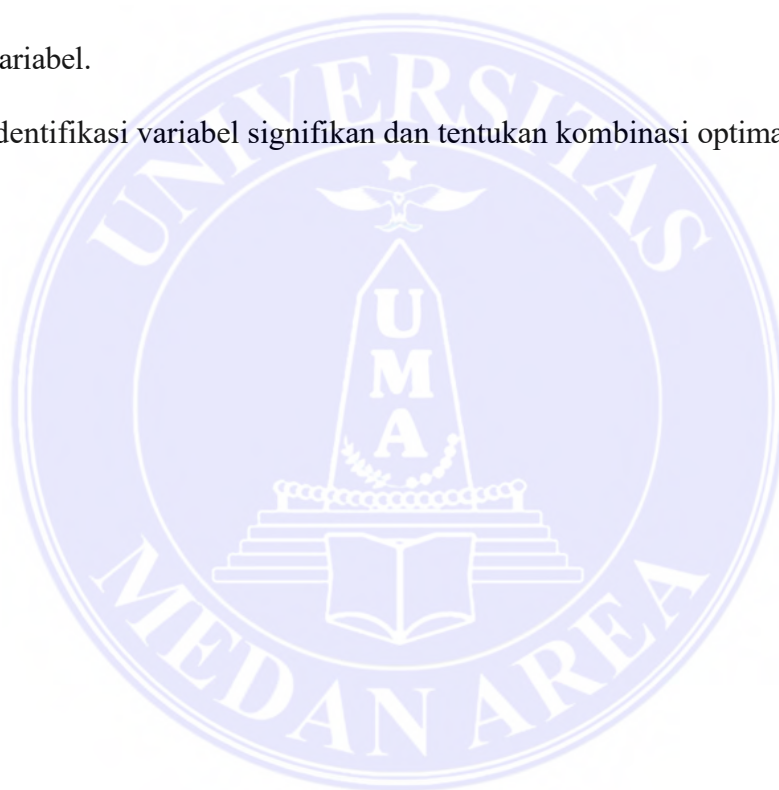
- 1) Tentukan faktor (suhu, tekanan, waktu) dan levelnya.
- 2) Susun *matriks orthogonal* untuk kombinasi eksperimen.

c. Pengumpulan Data Eksperimental

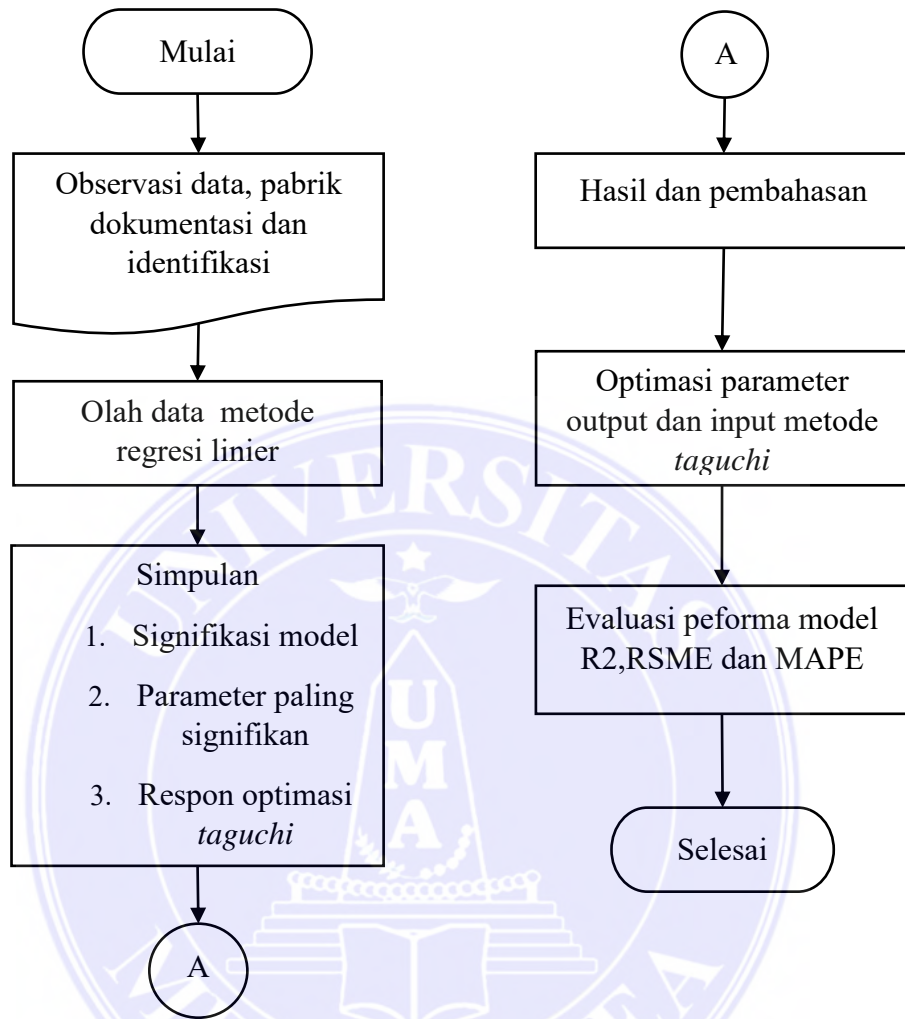
- 1) Lakukan eksperimen sesuai matriks *Taguchi*.

d. Analisis Data (*Minitab*)

- 1) Masukkan data ke *Minitab*, lakukan ANOVA untuk analisis signifikansi variabel.
- 2) Identifikasi variabel signifikan dan tentukan kombinasi optimal.



### 3.6 Diagram Alur Proses Penelitian



Gambar 3. 4 Diagram alir penelitian

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh melalui pendekatan regresi linear dan metode *Taguchi* dalam upaya optimisasi proses produksi, penelitian ini diperoleh beberapa kesimpulan terkait pengaruh variabel proses terhadap kinerja turbin uap, sebagai berikut:

1. Hasil analisis regresi dan metode Taguchi mengindikasikan bahwa variabel cangkang ( $X_1$ ) dan *fiber* ( $X_2$ ) memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja turbin uap, dengan cangkang menjadi faktor yang paling dominan. Sementara itu, *temperatur steam superheater* ( $X_3$ ) menunjukkan pengaruh positif, namun kontribusinya sangat kecil dan tidak signifikan secara statistik. Oleh karena itu, peningkatan suplai cangkang dan *fiber* terbukti memiliki peran yang lebih penting dalam meningkatkan kinerja turbin uap dibandingkan dengan variabel *temperatur steam superheater*.
2. Model optimasi yang dikembangkan menggunakan regresi linear berganda dan divalidasi dengan metode *Taguchi* menunjukkan performa yang sangat baik. Dengan nilai  $R^2$  sebesar 97,66%, *Adjusted R<sup>2</sup>* sebesar 96,26%, dan *Predicted R<sup>2</sup>* sebesar 90,56%, model ini mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data dengan tingkat kesalahan yang rendah ( $S = 0,120263$ ). Hasil uji ANOVA dan analisis residual juga menegaskan bahwa model ini signifikan secara keseluruhan, tidak mengalami masalah multikolinearitas, serta memenuhi asumsi normalitas, *homoskedastisitas*, dan memiliki

tingkat independensi yang memadai. Oleh karena itu, model optimasi ini dapat dipercaya sebagai dasar dalam pengambilan keputusan.

3. Berdasarkan analisis *Taguchi* yang meliputi rasio S/N, nilai rata-rata, dan *Main Effect Plot*, kombinasi optimal ditemukan pada: cangkang (X1) pada Level 3 (260,10 kg), *fiber* (X2) pada Level 3 (602,12 kg), dan *temperatur steam superheater* (X3) pada Level 3 (185 °C). Kombinasi tersebut menghasilkan nilai respon rata-rata dan rasio S/N tertinggi sesuai dengan kriteria *larger is better*. Dengan demikian, konfigurasi terbaik untuk meningkatkan kinerja turbin uap adalah dengan menggunakan cangkang dan fiber dalam jumlah maksimum serta temperatur steam superheater pada level tertinggi, meskipun kontribusi variabel temperatur terhadap peningkatan kinerja relatif kecil.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan di atas, berikut saran yang dapat diberikan untuk pengembangan dan implementasi selanjutnya:

1. Optimasi Penggunaan Cangkang

Disarankan agar manajemen PT. tersebut mempertimbangkan untuk meningkatkan penggunaan cangkang pada *boiler SFW ATMINDO* sebagai bahan bakar primer, mengingat pengaruh positif yang signifikan terhadap efisiensi dan performa turbin uap.

2. Pengendalian Temperatur *Steam Superheater*

Pengaturan dan *monitoring* suhu steam superheater perlu dilakukan secara ketat dan optimal, karena variabel ini memberikan pengaruh signifikan

terhadap *output* kinerja turbin. Pemeliharaan peralatan pengatur suhu secara rutin dapat meningkatkan stabilitas hasil kerja *boiler*.

### 3. Pengkajian Lanjutan Terhadap Variabel *Fiber*

Meskipun variabel *fiber* belum menunjukkan pengaruh signifikan secara statistik, disarankan untuk dilakukan pengamatan lebih lanjut dengan jumlah data yang lebih banyak dan desain eksperimen yang lebih mendetail, untuk memastikan peran *fiber* dalam efisiensi pembakaran.

### 4. Pemanfaatan Metode *Taguchi* dan Regresi untuk Optimasi Berkelanjutan

Metode *Taguchi* terbukti efektif dalam mengurangi jumlah percobaan namun tetap memperoleh hasil optimal. Disarankan agar metode ini terus diterapkan dan dipadukan dengan analisis regresi untuk memudahkan pemantauan dan evaluasi performa *boiler* di masa depan.

### 5. Pengumpulan Data Lebih Luas dan Variatif

Penelitian selanjutnya dapat memperluas cakupan data historis dengan periode yang lebih panjang dan variabel tambahan (misalnya tekanan uap, kelembapan bahan bakar, serta kondisi lingkungan sekitar) untuk memperkaya model dan meningkatkan akurasi prediksi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Balai Besar Teknologi Energi. (2015). *Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. Jakarta. Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan Dan Konservasi Energi Kementerian Esdm
- Buchori, L. (2011). *Buku Ajar Perpindahan Panas*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang.
- Djokosetyardjo, M. J. (2015). *Teknik Pesawat Tenaga*. Jakarta, Bumi Aksara Jakarta.
- Holman, J. P. (1981). *Heat Transfer*. Mcgraw-Hill International Book Company, New York.
- Indonesia, P. G. N. L. N. G. (2023). *Fungsi, Komponen, Jenis, Dan Cara Kerja Boiler*. Diakses Dari <https://pgnlg.co.id/Berita/Wawasan/Apa-Itu-Boiler> (Diakses Pada Tanggal 12 Desember 2024)
- Konservasi Energi Kementerian Esdm.
- Naibaho, P. (2016). *Teknologi Pengolahan Kelapa Sawit*. Medan. Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Patarana, G., & Hazwi, M. (2012). *Optimalisasi Efisiensi Termis Boiler Menggunakan Serabut Dan Cangkang Sawit Sebagai Bahan Bakar*. *Jurnal Dinamis*, 1(11), 22-26.
- Rifa'an, M. U. H. A. M. M. A. D. (2024). *Perancangan Sistem Kontrol Safety Water Tube Pada Burner Boiler Menggunakan Thermostat Digital Rex C100 (Doctoral Dissertation, Universitas Pgri Semarang)*.
- Rivaldi, M. (2014). *Analisa Perpindahan Panas Pada Marcet Boiler Kapasitas Tekanan Uap 5 Bar*.

- Ryan, A. (2022). *Perancangan Pipa Api Pada Ketel Uap Pipa Api Atau Fire Tube Boiler*.
- Saidah, K., Barus, D. S., & Razak, A. (2022). *Analisis Peluang Penghematan Energi Pada Boiler Dengan Kapasitas 40 Ton/Jam Di Pks Aek Loba Pt. Socfin Indonesia. Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 3(1), 45-54.*
- Silalahi, S., & Silfa, T. (2023). *Optimalisasi Perbandingan Campuran Cangkang Dan Serabut Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Ketel Uap Pipa Air. Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 4(1), 60-66.*
- Soejanto, I. 2009. *Desain Eksperimental Dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta : Graha Ilmu.
- Winarto, S. (2019). *Penghematan Energi Pada Sistem Boiler. Swara Patra 2, 35-42.*
- Wiratama, C. (2022). *Water Tuber Boiler*. [Www.Aeroengineering.Co.Id.https://Www.Aeroengineering.Co.Id/2022/10/Water-Tube-Boiler/](https://www.aeroengineering.co.id/2022/10/Water-Tube-Boiler/).  
(Diakses Pada Tanggal 12 Desember 2024)

## LAMPIRAN



Lampiran 1. Dokumentasi di *Boiler*

No	Tipe / No	Temp	Uk	Uk	Kondisi
1	211001-01	90	100	20	gula 200g, air
2	211002-01	90	100	20	gula 200g, air
3	211003-01	90	100	20	gula 200g, air
4	211004-01	90	100	20	gula 200g, air
5	211005-01	90	100	20	gula 200g, air
6	211006-01	90	100	20	gula 200g, air
7	211007-01	90	100	20	gula 200g, air
8	211008-01	90	100	20	gula 200g, air
9	211009-01	90	100	20	gula 200g, air
10	211010-01	90	100	20	gula 200g, air
11	211011-01	90	100	20	gula 200g, air
12	211012-01	90	100	20	gula 200g, air
13	211013-01	90	100	20	gula 200g, air
14	211014-01	90	100	20	gula 200g, air
15	211015-01	90	100	20	gula 200g, air
16	211016-01	90	100	20	gula 200g, air
17	211017-01	90	100	20	gula 200g, air
18	211018-01	90	100	20	gula 200g, air
19	211019-01	90	100	20	gula 200g, air
20	211020-01	90	100	20	gula 200g, air

No	Tipe / No	Temp	Uk	Uk	Kondisi
1	211021-01	90	100	20	gula 200g, air
2	211022-01	90	100	20	gula 200g, air
3	211023-01	90	100	20	gula 200g, air
4	211024-01	90	100	20	gula 200g, air
5	211025-01	90	100	20	gula 200g, air
6	211026-01	90	100	20	gula 200g, air
7	211027-01	90	100	20	gula 200g, air
8	211028-01	90	100	20	gula 200g, air
9	211029-01	90	100	20	gula 200g, air
10	211030-01	90	100	20	gula 200g, air
11	211031-01	90	100	20	gula 200g, air
12	211032-01	90	100	20	gula 200g, air
13	211033-01	90	100	20	gula 200g, air
14	211034-01	90	100	20	gula 200g, air
15	211035-01	90	100	20	gula 200g, air
16	211036-01	90	100	20	gula 200g, air
17	211037-01	90	100	20	gula 200g, air
18	211038-01	90	100	20	gula 200g, air
19	211039-01	90	100	20	gula 200g, air
20	211040-01	90	100	20	gula 200g, air

Lampiran 2. Dokumentasi data mentah *Boiler*



Lampiran 3. Dokumentasi data mentah dari suhu *Boiler*

