

**ANALISIS VARIASI SUHU DAN TEKANAN PADA *BOILER*
TERHADAP PENGGUNAAN AIR UMPAN: PENDEKA TAN
METODE OPTIMASI TAGUCHI**

SKRIPSI

OLEH :
YESAYA SARI TUA SINAGA
218130077



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2025**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 6/12/25

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repositori.uma.ac.id)6/12/25

ANALISIS VARIASI SUHU DAN TEKANAN PADA *BOILER* TERHADAP PENGGUNAAN AIR UMPAN: PENDEKATAN METODE OPTIMASI TAGUCHI

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area

Oleh :

YESAYA SARI TUA SINAGA

218130077

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2025**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 6/12/25

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Access From (repositori.uma.ac.id)6/12/25

HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

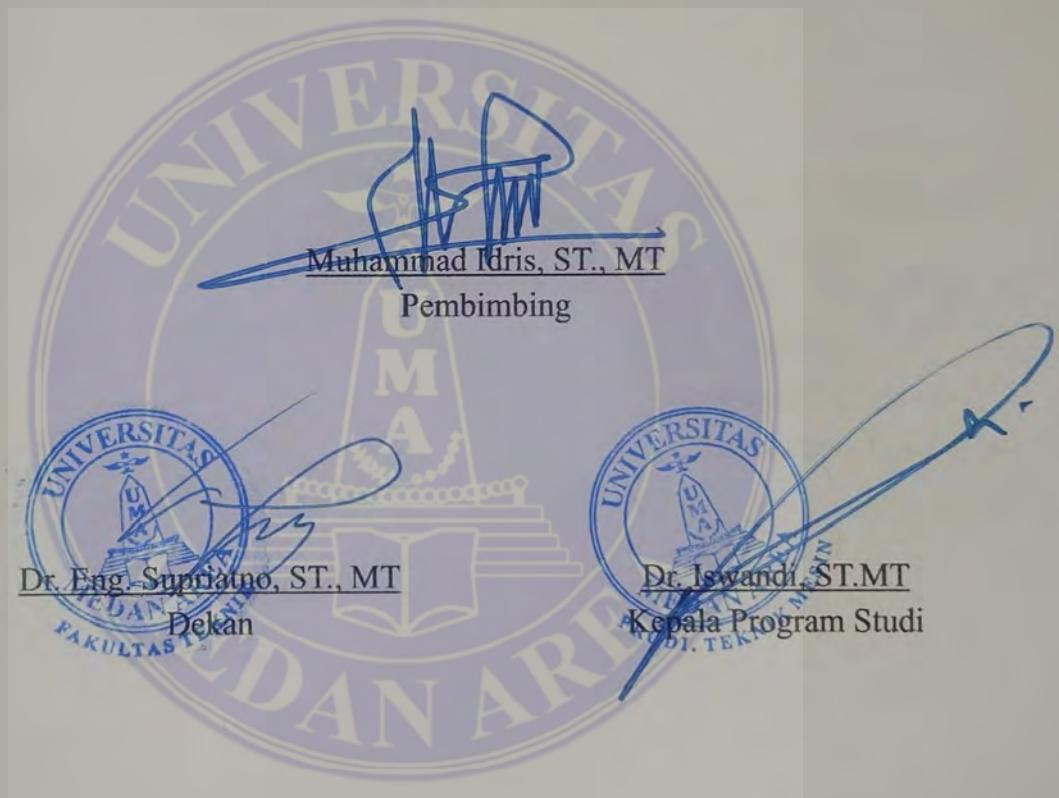
Judul Proposal : ANALISIS VARIASI SUHU DAN TEKANAN PADA
BOILER TERHADAP PENGGUNAAN AIR
UMPAN: PENDEKATAN METODE OPTIMISASI
TAGUCHI

Nama Mahasiswa : YESAYA SARI TUA SINAGA

NIM : 21.813.0077

Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing

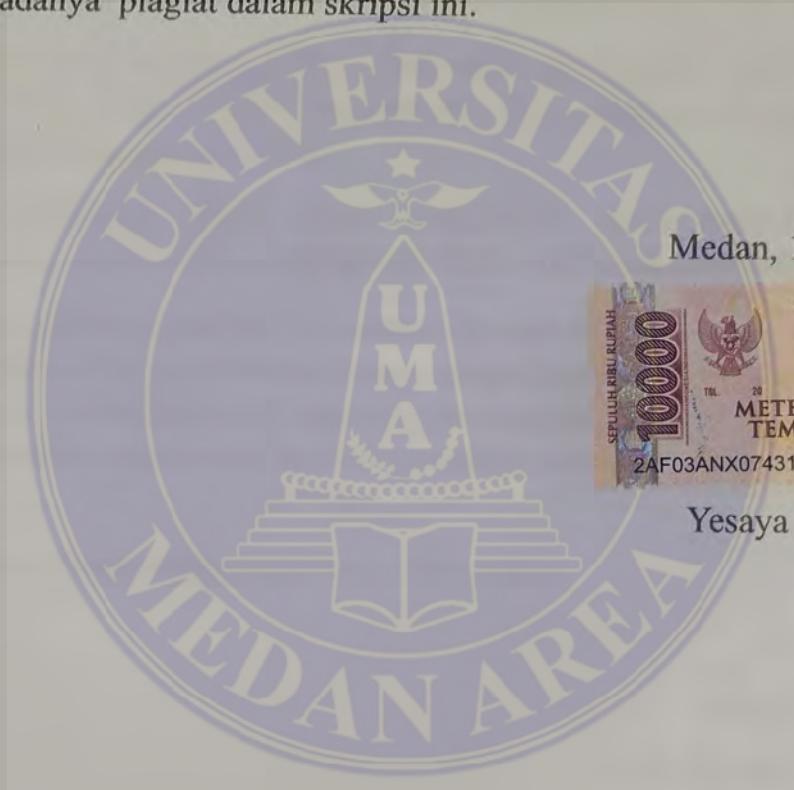


Tanggal Lulus : 12 September 2025

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana 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 sorma, 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.



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area saya yang bertanda tangan dibawah ini
:

Nama : YESAYA SARI TUA SINAGA
NPM : 218130077
Program studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir/Skripsi/Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non – Exclusive Royalty – Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

ANALISIS VARIASI SUHU DAN TEKANAN PADA **BOILER** TERHADAP PENGGUNAAN AIR UMPAN: PENDEKATAN METODE OPTIMASI TAGUCHI

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*). Merawat, dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di: Medan

Pada Tanggal: 15 Oktober 2025

Yang Menyatakan



(Yesaya Sari Tua Sinaga)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur gas asap dan tekanan uap kering pada *boiler* dalam mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal melalui proses optimasi. Metode Taguchi digunakan sebagai pendekatan optimasi, sementara analisis regresi linear diterapkan untuk melihat hubungan antar variabel. Data diambil dari catatan harian operasional *boiler* dan dianalisis secara kuantitatif. Hasil regresi menunjukkan model dengan R^2 sebesar 0,64, Adjusted R^2 sebesar 0,61, dan nilai MAPE sebesar 2,08%, menandakan akurasi yang sangat baik. Berdasarkan *Response Optimization*, diperoleh prediksi penggunaan air umpan minimal 295268 m^3 , sedangkan metode Taguchi menghasilkan kombinasi optimal tekanan uap kering $19,5 \text{ kg/cm}^2$ dan temperatur gas asap 279°C dengan hasil prediksi 293894 m^3 yang paling stabil. Perbedaan kecil antara kedua hasil tersebut masih dalam batas wajar dan tergolong sangat sedikit. Hasil optimasi juga menunjukkan penurunan penggunaan air umpan pada beberapa data aktual, meski sebagian nilai aktual masih sedikit lebih rendah (kisaran $282654,4 \text{ m}^3$ – $326466,2 \text{ m}^3$). Secara keseluruhan, metode regresi dan Taguchi menghasilkan hasil yang konsisten dan saling menguatkan, sehingga kombinasi parameter tersebut dapat dijadikan kondisi operasi terbaik untuk mencapai penggunaan air umpan paling minimal pada sistem *boiler*.

Kata Kunci: *Boiler*, Tekanan & Temperatur, Metode Taguchi, Regresi Linear, Optimasi

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of variations in flue gas temperature and dry steam pressure in boilers in optimizing feedwater usage to minimize it through an optimization process. The Taguchi method is used as an optimization approach, while linear regression analysis is applied to see the relationship between variables. Data are taken from the boiler operational diary and analyzed quantitatively. The regression results show a model with an R^2 of 0.64, an Adjusted R^2 of 0.61, and a MAPE value of 2.08%, indicating very good accuracy. Based on Response Optimization, a prediction of minimum feedwater usage of 295268 m³ is obtained, while the Taguchi method produces an optimal combination of dry steam pressure of 19.5 kg/cm² and flue gas temperature of 279°C with the most stable prediction result of 293894 m³. The small difference between the two results is still within reasonable limits and is considered very small. The optimization results also show a decrease in feedwater usage in some actual data, although some actual values are still slightly lower (range 282654.4 m³ – 326466.2 m³). Overall, the regression and Taguchi methods produce consistent and mutually reinforcing results, so that the combination of these parameters can be used as the best operating conditions to achieve the minimum use of feed water in the boiler system.

Keywords: Boiler, Pressure & Temperature, Taguchi Method, Linear Regression,

Optimization



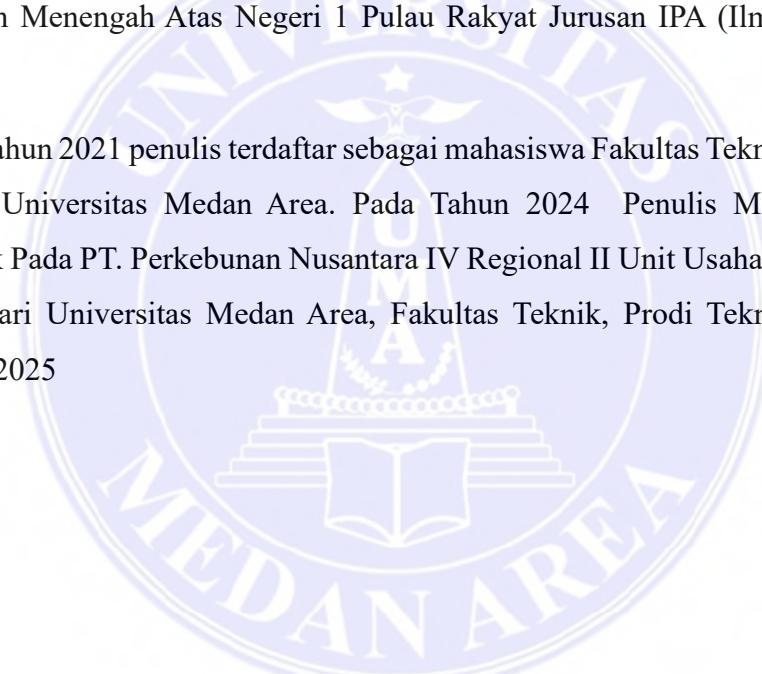
RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kisaran pada tanggal Jumat 18 oktober 2002 dari ayah Pardomuan Bilson Sinaga dan ibu Yenni Br Situmorang. Penulis merupakan putra ke dua dari dua bersaudara

Tahun 2007 penulis lulus dari Taman Kanak Kanak Wijaya Kesuma, dan Tahun 2014 Penulis lulus dari Sekolah Dasar Negeri 010131 Pulau Rakyat serta, Tahun 2017 lulus dari Sekolah Menengah Pertama Negeri 3 Pulau Rakyat, dan terakhir Penulis lulus dari Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Pulau Rakyat Jurusan IPA (Ilmu Pengetahuan Alam)

Pada Tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Prodi Teknik Mesin Universitas Medan Area. Pada Tahun 2024 Penulis Melakukan Kerja Praktek Pada PT. Perkebunan Nusantara IV Regional II Unit Usaha Pulu Raja. Dan lulus dari Universitas Medan Area, Fakultas Teknik, Prodi Teknik Mesin pada Tahun 2025



KATA PENGANTAR

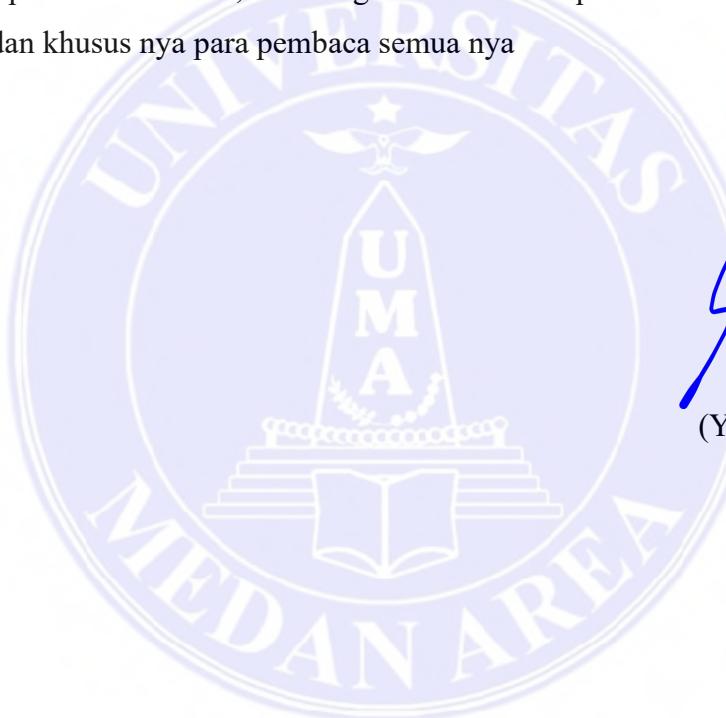
Puji dan Syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Ese, yang telah meberikan dan kesehatan dan kesempatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir Penulis yang berjudul **Analisis Variasi Suhu Dan Tekanan Pada Boiler Terhadap Penggunaan Air Umpan: Pendekatan Metode Optimasi Taguchi**

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Strata I (S1) pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area. Penulisan Tugas Akhir ini saya mendapat banyak bimbingan dan saran berbagai pihak sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat selesai. Penulis juga menyampaikan ucapan terimakasih kepada :

1. Bapak Muhammad Idris, ST,MT. Selaku Pembimbing Tugas Akhir yang dengan sabar memberikan arahan, bimbingan, serta masukan yang berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Ir. Tino Hermanto, ST., MSc. IPP Selaku Kabid Pembelajaran & Sistem Informasi Akademik yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam berbagai aspek akademik serta kepengurusan administrasi, sehingga memungkinkan kelancaran proses penyusunan skripsi ini.
3. Kepada panitia ujian skripsi, yaitu Bapak Dr.Eng Supriatno, S.T., M.T., selaku Ketua, Bapak Yopan Rahmad Aldori, S.T., M.Sc selaku Sekretaris, dan Bapak Indra Hermawan, S.T., M.T selaku Penguji, yang telah memberikan masukan yang berharga selama proses penyusunan skripsi ini, serta mendukung kelancaran pelaksanaan ujian sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lebih baik.
4. Bapak Martin Yekonia Tarigan, ST, selaku mentor dalam pengambilan data Tugas Akhir, yang telah memberikan izin serta bantuan, dan juga memberikan masukan dalam proses pengumpulan data di lapangan.
5. Bapak Jerry Harianja, ST, selaku Asisten Quality Assurance, yang juga telah memberikan arahan, masukan, serta penjelasan terkait sistem kerja *boiler*.

6. Kepada Petugas dan Operator *Boiler*, yang telah memberikan masukan dan informasi teknis yang sangat membantu serta berperan besar dalam kelengkapan dan keakuratan data Tugas Akhir ini.
7. Kedua orang tua dan kakak saya yang selalu memberikan doa, dukungan moral, serta motivasi yang tiada henti dalam perjalanan akademik penulis.

Penulis Menyadari dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kata kesempurnaan dikarenakan keterbatasan pengetahuan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif agar pada masa yang akan mendatang penulis dapat melakukan perbaikan pada penulisan karya ilmiah lainnya. Akhir kata penulis mengucapkan terimakasih, dan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan khusus nya para pembaca semua nya



Penulis

A blue ink signature of the author's name, Yesaya Sari Tua Sinaga.

(Yesaya Sari Tua Sinaga)

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| ANALISIS VARIASI SUHU DAN TEKANAN PADA BOILER TERHADAP PENGGUNAAN AIR UMPAN: PENDEKATAN METODE OPTIMASI TAGUCHI..... | i |
| HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI..... | ii |
| HALAMAN PERNYATAAN | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI..... | iv |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vi |
| RIWAYAT HIDUP | vii |
| KATA PENGANTAR..... | viii |
| DAFTAR ISI..... | xiii |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xv |
| DAFTAR NOTASI | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 4 |
| 1.3 Batasan Masalah..... | 5 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 7 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 8 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 9 |
| 2.1 Boiler (Ketel Uap)..... | 9 |
| 2.1.1 Water Tube Boiler..... | 10 |
| 2.2 Perpindahan Panas (<i>Heat Transfer</i>) | 11 |
| 2.2.1 Konduksi | 13 |
| 2.2.2 Konveksi..... | 14 |
| 2.2.3 Radiasi | 14 |
| 2.3 Tekanan (<i>Pressure</i>)..... | 15 |
| 2.4 Suhu (Temperature)..... | 16 |
| 2.5 Siklus Rankine | 18 |
| 2.6 Steam (Uap) dan Proses Pembentukan Uap dalam Boiler..... | 20 |
| 2.7 Flue Gas Boiler (Gas Buang/Asap Boiler) | 23 |

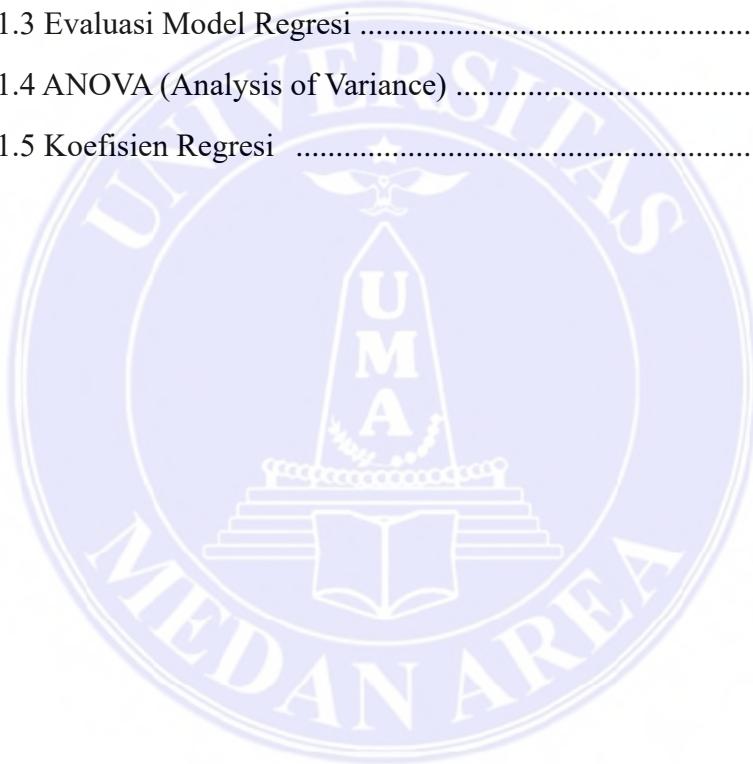
| | | |
|--|--|----|
| 2.8 | Air Umpan Ketel Uap (<i>Boiler Feedwater</i>)..... | 24 |
| 2.9 | Uji Normalitas..... | 28 |
| 2.10 | Regresi Linear | 30 |
| 2.10.1 | Analisis Regresi Linear Berganda | 30 |
| 2.11 | Evaluasi Model Matematis | 31 |
| 2.11.1 | <i>Mean Square Error (MSE)</i> | 32 |
| 2.11.2 | <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i> | 32 |
| 2.11.3 | <i>Mean Absolute Percentage Error (MAPE)</i> | 33 |
| 2.11.4 | <i>Mean Absolute Error (MAE)</i> | 33 |
| 2.12 | Desain Eksperimen (DoE) | 34 |
| 2.12.1 | Tujuan Eksperimen..... | 34 |
| 2.12.2 | Metode Taguchi | 35 |
| 2.12.3 | Matriks Ortogonal..... | 37 |
| 2.12.4 | <i>Ratios Signal to Noise (S/N)</i> | 38 |
| 2.13 | Penelitian Sebelumnya sebagai Dasar Pendekatan Metodologis | 39 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | | 46 |
| 3.1 | Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian..... | 46 |
| 3.1.1 | Waktu penelitian..... | 46 |
| 3.1.2 | Tempat penelitian..... | 46 |
| 3.2 | Bahan dan alat | 47 |
| 3.2.1 | Bahan..... | 47 |
| 3.2.2 | Alat | 47 |
| 3.3 | Populasi dan Sampel..... | 48 |
| 3.4 | Prosedur Kerja | 48 |
| 3.5 | Diagram alur penelitian | 49 |
| 3.5.1 | Persiapan dan Proses Pengolahan Data <i>Run Order Taguchi</i> | 52 |
| 3.5.2 | Transisi dari <i>Run Order Taguchi</i> ke Analisis Regresi Linear..... | 55 |
| 3.5.3 | Uji Normalitas Residual Regresi..... | 56 |
| 3.5.4 | Proses Analisis Regresi Linear..... | 58 |
| 3.5.5 | Proses Pengolahan Optimasi Taguchi..... | 61 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | | 63 |
| 4.1 | Hasil | 63 |
| 4.1.1 | Hasil Analisis Regresi Linear | 63 |
| 4.1.2 | Hasil Analisis Optimasi Taguchi | 72 |

| | | |
|--|---|----|
| 4.2 | Pembahasan Hasil..... | 78 |
| 4.2.1 | Pembahasan Hasil Regresi Linear | 78 |
| 4.2.2 | Pembahasan Hasil Analisis Optimasi Taguchi..... | 84 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | | 89 |
| 5.1 | Kesimpulan | 89 |
| 5.2 | Saran | 90 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 93 |



DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Kriteria Nilai MAPE Terhadap Kemampuan Model Peramalan..... | 33 |
| Tabel 3.1 Tabel jadwal penelitian..... | 46 |
| Tabel 3.2 Contoh tabulasi data 2 faktor bebas dan 1 faktor respon | 48 |
| Tabel 3.3 <i>Run Order Taguchi</i> yang telah ditetapkan dan diolah di regresi | 53 |
| Tabel 3.4 Hasil <i>Run Order Taguchi</i> Minitab | 60 |
| Tabel 4.1.1 Data Hasil <i>Run Order Taguchi</i> Untuk Regresi Linear: | 63 |
| Tabel 4.1.2 <i>Summary Output</i> | 64 |
| Tabel 4.1.3 Evaluasi Model Regresi | 66 |
| Tabel 4.1.4 ANOVA (Analysis of Variance) | 67 |
| Tabel 4.1.5 Koefisien Regresi | 69 |



DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Contoh <i>Boiler</i> Yang Sering Digunakan Pada Industri..... | 10 |
| Gambar 2.2 Grafik Dari Siklus Rankine..... | 18 |
| Gambar 2.3 Spesifikasi Air Umpam Boiler pada PKS Dimana Tempat Penelitian Dilakukan | 28 |
| Gambar 3.1 Tampilan <i>Software Minitab</i> | 47 |
| Gambar 3.2 Diagram Alur Penelitian..... | 51 |
| Gambar 3.3 Tampilan Hasil <i>Run Order Taguchi</i> Matriks L27..... | 54 |
| Gambar 3.4 Grafik Normal P-P Plot Dari <i>Residual Standarisasi Regresi</i> | 57 |
| Gambar 4.1.1 Hasil <i>Response Optimization</i> pada minitab..... | 70 |
| Gambar 4.1.2 <i>Response Table for SNR</i> | 73 |
| Gambar 4.1.3 <i>Response Table for Means</i> | 74 |
| Gambar 4.1.4 Grafik <i>Main Effect Plot for Means</i> | 75 |
| Gambar 4.1.5 Grafik <i>Main Effect Plot for SNR</i> | 76 |
| Gambar 4.1.6 Hasil <i>Predict Taguchi Result</i> | 77 |
| Gambar 4.2.1 Kumpulan Hasil Model Regresi..... | 78 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|----|
| Lampiran 1 Hasil Analisis Data Regresi Linear Pada Excel..... | 96 |
| Lampiran 2 Diagram Skematik Boiler Tipe N-600 SA Takuma Water Tube... | 99 |
| Lampiran 3 Panel Kontrol Boiler di Tempat Penelitian | 99 |



DAFTAR NOTASI

y_i = Nilai aktual (observasi) pada data ke i

\hat{y}_i = Nilai prediksi atau hasil model pada data ke i

n = Jumlah total data/ observasi dan replikasi atau pengamatan

i = indeks data ke-i, di mana $i=1, 2,..n$

Σ = Simbol penjumlahan (sigma), menjumlahkan nilai dari indeks 1 hingga n

$\sqrt{\cdot}$ = Akar kuadrat, digunakan dalam perhitungan RMSE

\hat{Y} = Nilai prediksi dari variabel dependen (*output*).

α = *Intercept* (konstanta regresi)

β_n = Koefisien regresi untuk variabel independent ke i

X_n = Nilai variabel independen ke-i

S/N = *Signal-to-Noise Ratios*

Log = Logaritma

m^3 = Satuan volume yang menyatakan besarnya penggunaan air umpan

kg/cm^2 = Satuan tekanan yang menyatakan besarnya tekanan uap kering

$^{\circ}C$ = Satuan temperatur yang menyatakan suhu gas asap

MSE = *Mean Square Error*

RMSE = *Root Mean Square Error*

MAPE = *Mean Absolute Percentage Error*

MAE = *Mean Absolute Error*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perusahaan tempat penelitian ini dilakukan merupakan pabrik kelapa sawit (PKS) yang bergerak di bidang produksi kelapa sawit menjadi *crude palm oil* (CPO) dan berlokasi di Provinsi Sumatera Utara. Dalam proses produksinya, perusahaan ini memanfaatkan *boiler* atau ketel uap sebagai sumber utama penyediaan energi panas.

Ketel uap merupakan komponen vital dalam sistem industri karena berfungsi menghasilkan uap yang dibutuhkan pada berbagai proses operasional. Air umpan yang masuk ke dalam ketel akan dipanaskan menggunakan energi panas hasil pembakaran bahan bakar. Melalui proses pemanasan ini, air mencapai titik didih dan berubah fase menjadi uap bertekanan tinggi. Uap tersebut kemudian dialirkan untuk menyediakan energi panas bagi berbagai tahapan proses produksi, seperti pemanasan, pengeringan, maupun penggerak turbin. Dalam proses ini, sebagian energi panas dapat hilang karena berbagai faktor yang memengaruhi ketel uap.

Dalam konversi air menjadi uap, berbagai kehilangan panas dapat terjadi, termasuk yang berasal dari udara berlebih dan suhu gas buang yang meningkat. Kerugian juga dapat berasal dari bahan bakar yang tidak terbakar, abu, ledakan, dan kondensat. Selain itu, kerugian timbul dari konveksi, radiasi, dan penguapan yang terkait dengan hidrogen dalam bahan bakar.

Untuk mengoptimalkan pengoperasian *boiler*, maka sangat penting untuk melakukan identifikasi sumber-sumber pemborosan atau kehilangan tersebut (Bhatia, 2012)

Salah satu alasan paling penting untuk penghematan biaya operasional dan dampak lingkungan semacam ini dalam industri yang menggunakan mesin termal (khususnya *boiler*) adalah sistem. Penggunaan air umpan: Cara terbaik untuk menjaga efisiensi *boiler* adalah melalui penggunaan air umpan. Ini adalah media yang dengan pemanasan menjadi uap dan digunakan dalam beberapa proses industri atau untuk penciptaan energi, antara lain. Konsumsi bahan bakar, emisi gas buang dan pembentukan kerak atau korosi akibat penggunaan air umpan yang berlebihan akan mengurangi umur *boiler*. Jadi, kontrol optimal parameter operasional seperti tekanan uap kering dan suhu gas buang adalah masalah utama.

Salah satu parameter utama dalam sistem *boiler* adalah tekanan uap kering. Tekanan yang diberikan uap tidak lain adalah berapa banyak energi yang dimilikinya per satuan volume untuk melakukan beberapa pekerjaan. Tekanan uap yang terlalu tinggi dan rendah dari *superheater* kering tidak hanya memiliki efek langsung pada kinerja *boiler*, tetapi juga mempengaruhi efisiensi termal secara keseluruhan.

Namun, tekanan yang terlalu tinggi akan memungkinkan panas diubah lebih berat dan dengan demikian mengambil lebih banyak air umpan sehingga efisiensi konversi energi menurun; Sementara di sisi lain, jika nilai ini menjadi lebih rendah, efisiensi mungkin tidak mencapai *output* yang baik yang menyebabkan kebutuhan surut pada waktu yang lebih dekat. Atau, ketika tekanan uap kering disesuaikan

dengan baik untuk panas proses air umpan yang akan mengakibatkan penyusutan jumlah yang digunakan secara substansial.

Akibatnya, optimalisasi tekanan uap kering diperlukan untuk mengontrol sumber daya air umpan sejalan dengan pemanfaatan energi oleh sistem untuk pengoperasian yang efisien pada tingkat maksimum.

Indikator lain yang menunjukkan tingkat efisiensi proses pembakaran dalam *boiler* adalah suhu gas buang. Gas asap yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar mengandung sisa panas energi yang tidak sepenuhnya berubah. Semakin tinggi suhu gas buang, berarti masih banyak panas yang terbuang ke atmosfer tanpa dimanfaatkan dalam proses pemanasan air umpan. Demikian pula, telah ditemukan bahwa suhu gas buang yang terlalu rendah juga menunjukkan proses pembakaran yang tidak efisien yang dapat mempengaruhi laju pemanasan air umpan sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar. Operator *boiler* mengatur dan memantau suhu gas buang untuk mempertahankan energi panas maksimum dari bahan bakar yang terbakar untuk digunakan dalam memanaskan air umpan. Ini menghemat energi dan membantu menstabilkan suhu uap dalam sistem, mengurangi kelebihan permintaan air umpan. Kontrol suhu gas buang yang lebih baik diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemanasan air umpan, yang diterjemahkan ke dalam penurunan konsumsi air siklus operasi.

Ini adalah pekerjaan yang sulit dan penting untuk menyeimbangkan tekanan uap kering dengan suhu gas buang dalam sistem *boiler*. Hubungan timbal balik dari kedua parameter ini memiliki pengaruh yang cukup besar pada kebutuhan air umpan dan melalui itu secara tidak langsung mempengaruhi efisiensi termal dan

biaya operasional, jika ada. Teknik Optimasi yang digunakan selama konfigurasi semacam ini, akan memungkinkan untuk mengatur nilai-nilai ini dengan benar dengan mempertimbangkan pengaruhnya terhadap penggunaan air umpan dan efisiensi globalnya.(Idris et al., 2022)

1.2 Perumusan Masalah

penggunaan air umpan dalam sistem *boiler* merupakan salah satu indikator penting yang mencerminkan karakteristik termal dan operasionalnya. Pengaturan parameter operasional yang tidak optimal, seperti tekanan uap kering yang terlalu tinggi atau rendah serta suhu gas buang yang tidak memadai, dapat menyebabkan peningkatan konsumsi air umpan, kehilangan energi, serta berdampak pada biaya operasional dan lingkungan. Jika tekanan uap kering terlalu rendah, proses pemanasan menjadi tidak efisien, mengakibatkan kebutuhan air umpan yang lebih tinggi. Sebaliknya, tekanan yang terlalu tinggi juga dapat menimbulkan ketidakseimbangan termal dalam sistem. Selain itu, suhu gas buang yang tidak optimal dapat menyebabkan efisiensi energi yang rendah dan meningkatkan konsumsi air umpan. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan parameter yang tepat untuk mendukung penggunaan air umpan yang lebih hemat dan stabil, sehingga dapat mendukung kinerja operasional *boiler* secara keseluruhan. Adapun perumusan masalah dapat dilihat dibawah ini:

1. Bagaimana pengaruh tekanan uap kering terhadap penggunaan air umpan dalam sistem *boiler*?
2. Sejauh mana suhu gas asap memengaruhi penggunaan air umpan pada *boiler*?

3. Bagaimana kombinasi optimal antara tekanan uap kering dan suhu gas asap dapat Mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini hanya di fokuskan pada beberapa hal berikut ini :

1. Ruang lingkup Parameter Operasional : Penelitian ini hanya mempertimbangkan tekanan uap kering dan temperatur gas asap sebagai variabel independen, sementara faktor lain seperti kualitas bahan bakar, jenis air umpan, dan kondisi lingkungan tidak dibahas secara rinci.
2. Jenis *boiler* : Analisis dilakukan pada salah satu *boiler* dari dua yang ada di pabrik yang dijadikan subjek pengumpulan data, sehingga hasilnya mungkin tidak sepenuhnya berlaku untuk jenis boiler lain atau kondisi operasi yang berbeda.
3. Pendekatan Analisis dan Optimasi : Menggunakan analisis regresi untuk memahami hubungan antar variabel serta metode Taguchi untuk optimasi sistem
4. Rentang Waktu Pengumpulan Data : Data yang digunakan berasal dari catatan harian stasiun *boiler* dan beserta data tambahan yang ada, tanpa mempertimbangkan perubahan jangka panjang seperti kondisi cuaca musiman atau anomali lainnya.
5. Parameter dependen tunggal : Fokus utama penelitian adalah untuk mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal, tanpa membahas aspek lain seperti emisi gas buang atau efisiensi bahan bakar secara terpisah.

6. Pembahasan pada penelitian : Penelitian ini difokuskan pada analisis statistik dengan menggunakan regresi linear untuk mengukur pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen serta metode Taguchi untuk optimasi parameter. Meskipun kajian tidak menitikberatkan pada uraian teoritis fisika maupun kimia dari proses *boiler*, penelitian ini tetap menempatkan variabel-variabel seperti tekanan uap kering, temperatur gas asap, dan penggunaan air umpan dalam konteks satu sistem operasi *boiler*. Dengan demikian, hubungan antarvariabel dianalisis secara kuantitatif melalui model regresi dan metode Taguchi untuk memperoleh kondisi operasi yang optimal. Pendekatan ini memungkinkan penyatuan variabel-variabel yang secara fundamental tidak selalu terhubung secara fisika atau kimia, namun secara sistemik memiliki keterkaitan dalam memengaruhi kinerja *boiler*.

7. Proses Pengolahan Data : Penelitian ini juga dibatasi pada penggunaan software secara penuh, yaitu Minitab untuk metode Taguchi dan SPSS untuk uji normalitas dan Excel untuk regresi linear. Seluruh pengolahan data, mulai dari *run order*, perhitungan rasio S/N, ANOVA, MAE, RMSE, MSE dan MAPE hingga model regresi dilakukan dengan software. Perhitungan manual tidak dilakukan karena penelitian difokuskan pada penerapan metode optimasi berbasis software untuk menjaga efisiensi, akurasi, dan konsistensi hasil.

1.4 Tujuan Penelitian

Penggunaan air umpan pada *boiler* sangat dipengaruhi oleh pengaturan tekanan uap kering dan temperatur gas asap, yang berdampak langsung pada besarnya konsumsi air umpan. Untuk mendukung pengendalian penggunaan air umpan agar lebih stabil dan sesuai kebutuhan operasi, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kedua parameter tersebut menggunakan pendekatan regresi guna memahami hubungan empirisnya terhadap kebutuhan air umpan. Optimasi dilakukan dengan metode Taguchi untuk menentukan kombinasi parameter terbaik dalam mendukung pengendalian penggunaan air umpan pada sistem *boiler*. Adapun secara spesifik tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi Level Optimal Tekanan Uap Kering yang Mengoptimalkan Penggunaan Air Umpan yang minimal Menggunakan Metode Taguchi
2. Menentukan level temperatur gas asap yang mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal melalui optimasi Taguchi.
3. Mengoptimalkan kombinasi tekanan uap kering dan suhu gas asap dengan metode Taguchi untuk menghasilkan penggunaan air umpan yang lebih minimal.

1.5 Manfaat Penelitian

Metode Taguchi menawarkan pendekatan yang efisien dalam pengembangan dan optimasi sistem dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit melalui array ortogonal, sehingga menghemat sumber daya dan waktu. Selain itu, metode ini meningkatkan kualitas dan stabilitas kinerja dengan mengurangi variasi hasil serta memastikan performa yang konsisten dan andal. Keunggulan adalah fokus pada *robustness*, yaitu ketahanan terhadap faktor gangguan eksternal, memungkinkan sistem tetap optimal meskipun terjadi fluktuasi lingkungan. Adapun manfaat penelitian sebagai berikut :

1. Efisiensi Eksperimen dengan Pengurangan Jumlah Percobaan
2. Peningkatan Kualitas dan Kinerja yang Konsisten
3. *Robustness* (ketahanan) terhadap Faktor Gangguan

BAB II

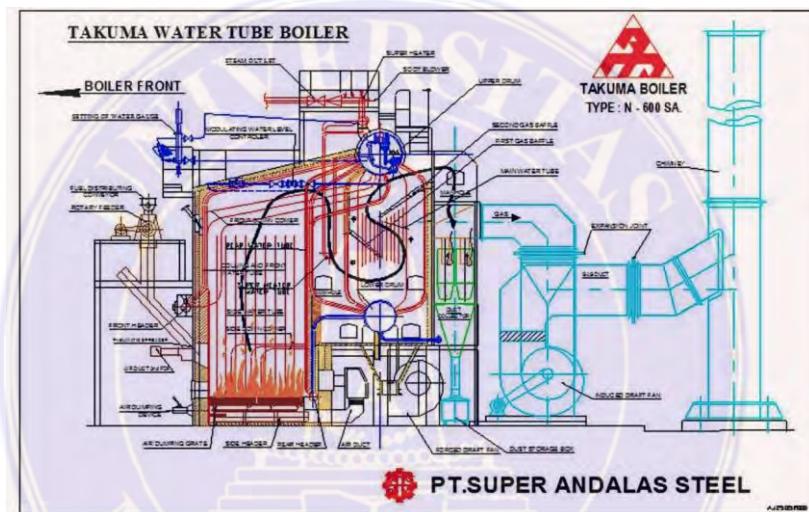
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Boiler* (Ketel Uap)

Ketel uap (atau pembangkit uap, sebagaimana lazimnya disebut) adalah bejana tertutup tempat air, di bawah tekanan, diubah menjadi uap dengan memberikan panas. Bejana terbuka dan bejana yang menghasilkan uap pada tekanan atmosfer tidak dianggap sebagai ketel uap. Tungku pemanas adalah bagian ketel uap tempat energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi panas, dan fungsi ketel uap adalah mentransfer panas ini ke air dengan cara yang paling efisien. Dengan demikian, fungsi utama ketel uap adalah mengubah energi yang terkandung dalam bahan bakar menjadi panas secara efisien melalui proses pembakaran dan menghasilkan uap pada tekanan di atas atmosfer dengan menyerap panas yang dihasilkan dalam pembakaran bahan bakar. Pada ketel uap panas buang, gas panas berfungsi sebagai sumber panas,

Boiler juga digunakan untuk menyediakan pemanas ruangan untuk bangunan serta untuk menghasilkan air panas dan uap yang dibutuhkan oleh pengguna seperti laundry dan dapur. Bahan bakar fosil seperti batu bara, gas, minyak, dll., dan energi nuklir, digunakan untuk menghasilkan sebagian besar listrik dunia dan umumnya boiler merupakan pilihan terbaik untuk mengubah jenis energi ini menjadi listrik. Oleh karena itu, jelas bahwa peningkatan efisiensi *boiler* uap, meskipun hanya sebagian kecil, akan mengurangi konsumsi energi yang sangat besar dalam pembangkitan listrik. Sekali lagi, meskipun cadangan bahan bakar fosil menipis dan masalah perlindungan

lingkungan, permintaan minyak, gas alam, dan batu bara diperkirakan akan meningkat masing-masing hingga 47,5%, 91,6%, dan 94,7% antara tahun 2003 dan 2030. Selain itu, sebagian besar sistem pemanas industri menggunakan boiler untuk menghasilkan air panas atau uap. Oleh karena itu, *boiler* yang efisien juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penghematan energi terkait pemanasan. Sejumlah besar energi dapat dihemat dengan menerapkan langkah-langkah penghematan energi dan meningkatkan efisiensi *boiler* secara keseluruhan.



Gambar 2.1. Contoh *Boiler* yang Sering Digunakan Pada Industri

2.1.1 Water Tube Boiler

Water tube boiler adalah jenis *boiler* yang beredar air di tabung dipanaskan secara eksternal oleh api. Bahan bakar dibakar di dalam tungku, menghasilkan gas panas yang mendidihkan air di dalam tabung penghasil uap. Dalam *boiler* yang lebih kecil, tabung pembangkit tambahan terpisah di tungku, sementara *boiler* utilitas yang lebih besar bergantung pada tabung berisi air yang membentuk dinding tungku untuk menghasilkan uap. Campuran air/uap yang dipanaskan kemudian naik ke dalam steam drum. Di sini, uap jenuh ditarik dari bagian atas drum. Dalam

beberapa layanan, uap melewati tabung di jalur pemanas, (*superheater*) menjadi *superheated*. Uap *superheated* didefinisikan sebagai uap yang dipanaskan di atas titik didih pada tekanan tertentu. Uap super panas adalah gas kering dan oleh karena itu biasanya digunakan untuk menggerakkan turbin, karena tetesan air dapat sangat merusak bilah turbin. Air jenuh di bagian bawah *drum* uap kembali ke *drum* yang lebih rendah melalui 'tabung *downcomer*' dengan lubang besar, di mana ia memanaskan pasokan air umpan terlebih dahulu. (Dalam *boiler* utilitas besar, air umpan disuplai ke *drum* uap dan *downcomer* memasok air ke bagian bawah dinding air). Untuk meningkatkan penghematan *boiler*, gas buang juga digunakan untuk memanaskan awal udara pembakaran yang ditiupkan ke *burner*, dan untuk menghangatkan pasokan air umpan di *economizer*. Ketel pipa air seperti itu di pembangkit listrik termal juga disebut unit pembangkit uap.

2.2 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah proses perpindahan energi kalor atau panas (*heat*) karena adanya perbedaan temperature. Atau dengan kata lain Perpindahan panas adalah ilmu yang berupaya memprediksi perpindahan energi yang mungkin terjadi antara benda-benda material akibat perbedaan suhu. Termodinamika mengajarkan bahwa perpindahan energi ini didefinisikan sebagai panas. Ilmu perpindahan panas tidak hanya berusaha menjelaskan bagaimana energi panas dapat ditransfer, tetapi juga memprediksi laju pertukaran tersebut dalam kondisi tertentu. Fakta bahwa laju perpindahan panas merupakan tujuan analisis yang diinginkan menunjukkan perbedaan antara perpindahan panas dan termodinamika. Termodinamika membahas sistem dalam kesetimbangan; ilmu ini dapat digunakan untuk memprediksi jumlah energi yang dibutuhkan untuk

mengubah sistem dari satu keadaan kesetimbangan ke kesetimbangan lainnya; ilmu ini tidak dapat digunakan untuk memprediksi seberapa cepat perubahan akan terjadi karena sistem tidak berada dalam kesetimbangan selama proses tersebut. Perpindahan panas melengkapi prinsip pertama dan kedua termodinamika dengan menyediakan aturan eksperimental tambahan yang dapat digunakan untuk menetapkan laju perpindahan energi. Sebagaimana dalam ilmu termodinamika, aturan eksperimental yang digunakan sebagai dasar subjek perpindahan panas cukup sederhana dan mudah diperluas untuk mencakup berbagai situasi praktis. Analisis termodinamika hanya memberi tahu kita berapa banyak panas yang harus ditransfer untuk mewujudkan perubahan keadaan tertentu guna memenuhi prinsip kekekalan energi.

Termodinamika membahas keadaan kesetimbangan dan perubahan dari satu keadaan kesetimbangan ke keadaan kesetimbangan lainnya. Perpindahan panas, di sisi lain, membahas sistem yang tidak memiliki kesetimbangan termal, sehingga merupakan fenomena non-kesetimbangan. Oleh karena itu, studi perpindahan panas tidak dapat hanya didasarkan pada prinsip-prinsip termodinamika. Namun, hukum-hukum termodinamika meletakkan kerangka kerja bagi ilmu perpindahan panas. Hukum pertama mensyaratkan bahwa laju perpindahan energi ke dalam suatu sistem sama dengan laju peningkatan energi sistem tersebut. Hukum kedua mensyaratkan bahwa panas dipindahkan ke arah penurunan suhu. Hal ini analog dengan mobil yang diparkir di jalan miring; mobil tersebut harus menuruni bukit ke arah penurunan ketinggian ketika remnya dilepas. Hal ini juga analog dengan arus listrik yang mengalir ke arah penurunan tegangan atau fluida yang mengalir ke arah penurunan tekanan.

Persyaratan dasar untuk perpindahan panas adalah adanya perbedaan suhu.

Tidak mungkin ada perpindahan panas bersih antara dua medium yang berada pada suhu yang sama. Perbedaan suhu merupakan gaya dorong untuk perpindahan panas; sebagaimana perbedaan tegangan merupakan gaya dorong untuk arus listrik, dan perbedaan tekanan merupakan gaya dorong untuk aliran fluida. Laju perpindahan panas dalam arah tertentu bergantung pada besarnya gradien suhu (perbedaan suhu per satuan panjang atau laju perubahan suhu) dalam arah tersebut. Semakin besar gradien suhu, semakin tinggi laju perpindahan panas.

Persamaan perpindahan panas dapat di ekspresikan dalam rumus :

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Proses terjadinya perpindahan panas dapat terjadi secara konduksi, konveksi, dan radiasi dibawah, ini akan dijelaskan:

2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas yang terjadi tanpa memerlukan pergerakan relatif antarbagian suatu benda atau adanya kontak langsung dengan benda lain. Panas berpindah karena gerakan termal molekul, atom, elektron bebas, maupun partikel mikroskopis lain yang berhubungan dengan kemampuan hantar panas suatu material. Mekanisme ini berlangsung melalui interaksi antaratom atau antarmolekul di dalam material yang dilalui oleh aliran panas tersebut. Rumus dari konduksi dapat ditulis sebagai berikut :

$$qx = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

2.2.2 Konveksi

Perpindahan relatif terjadi antara bagian-bagian fluida. Perpindahan panas terjadi karena pencampuran fluida panas dan dingin yang bergerak satu sama lain. Konveksi adalah proses yang menyeragamkan suhu antara bagian cairan atau gas yang lebih panas dan lebih dingin, dengan cara aliran yang membuat suhu seragam. Konveksi adalah cara unik perpindahan panas antara cairan dan gas. Konveksi gas biasanya lebih kuat daripada cairan secara signifikan. Konveksi dapat dibagi menjadi konveksi alami dan konveksi paksa. Konveksi alami terjadi secara alami karena suhu yang tidak merata. Konveksi paksa disebabkan oleh pompa yang menggerakkan konveksi paksa fluida. Meningkatkan kecepatan aliran fluida dapat mempercepat perpindahan panas konveksi. Konveksi melibatkan perpindahan panas melalui pencampuran dan gerakan bagian-bagian makroskopis fluida. Rumus dari perpindahan panas secara konveksi menggunakan hukum newton adalah:

$$q = hA (T_w - T_\infty)$$

2.2.3 Radiasi

Benda memiliki kemampuan memancarkan energi karena suhunya sendiri. Perpindahan panas ini disebut radiasi termal. Meskipun radiasi termal juga merupakan salah satu cara perpindahan panas, ia berbeda dari konduksi dan konveksi panas. Radiasi termal dapat memindahkan panas secara langsung dari satu sistem ke sistem lain tanpa bergantung pada medium. Radiasi termal memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Semakin tinggi suhu, semakin kuat radiasinya. Distribusi panjang gelombang radiasi juga berubah seiring dengan suhu. Misalnya, ketika suhu rendah, radiasi tersebut terutama dipancarkan oleh cahaya inframerah tak terlihat. Ketika suhu 500°C atau lebih tinggi, ia akan memancarkan

cahaya tampak atau bahkan cahaya ultraviolet. Radiasi termal adalah cara utama perpindahan panas jarak jauh. Misalnya, panas matahari ditransmisikan ke bumi melalui ruang dalam bentuk radiasi termal. Rumus radiasi dinyatakan dalam bentuk:

$$q_{emitted} = \sigma A T^4$$

2.3 Tekanan (*Pressure*)

Tekanan didefinisikan sebagai gaya normal yang diberikan oleh fluida per satuan luas. Biasanya, kita berbicara tentang tekanan ketika kita berurusan dengan gas atau cairan. Padanan tekanan dalam zat padat adalah tegangan normal. Namun, perlu dicatat bahwa tekanan adalah besaran skalar, sedangkan tegangan adalah tensor. Karena tekanan didefinisikan sebagai gaya per satuan luas, tekanan memiliki satuan newton per meter persegi (N/m^2), yang disebut pascal (Pa). Artinya,

$$1 \text{ pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Satuan tekanan pascal terlalu kecil untuk sebagian besar tekanan yang ditemui dalam praktik. Oleh karena itu, kelipatannya, kilopascal ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$) dan megapascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$), umumnya digunakan. Tiga satuan tekanan lain yang umum digunakan dalam praktik, terutama di Eropa, adalah bar, atmosfer standar, dan kilogram-gaya per sentimeter persegi:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$= 0.9807 \text{ bar}$$

$$= 0.9679 \text{ atm}$$

Tekanan didefinisikan sebagai:

$$p = \frac{F_n}{A}$$

Perhatikan bahwa satuan tekanan bar, atm, dan kgf/cm² hampir setara. Dalam sistem Inggris, satuan tekanan adalah pound-force per inci persegi (lbf/in², atau psi), dan 1 atm = 14,696 psi. Satuan tekanan kgf/cm² dan lbf/in² juga dilambangkan dengan kg/cm² dan lb/in², dan umumnya digunakan dalam pengukur ban. Dapat ditunjukkan bahwa 1 kgf/cm² = 14,223 psi.

2.4 Suhu (Temperature)

Suhu adalah besaran yang digunakan untuk mengukur aktivitas molekul dalam suatu zat. Semakin besar aktivitas molekul dalam ruang mikro, semakin tinggi suhunya. Suhu merupakan ukuran relatif seberapa "panas" atau "dingin" suatu zat dan dapat digunakan untuk memprediksi arah perpindahan panas.

Skala suhu memungkinkan kita menggunakan dasar yang sama untuk pengukuran suhu, dan beberapa skala telah diperkenalkan sepanjang sejarah. Semua skala suhu didasarkan pada beberapa keadaan yang mudah direproduksi seperti titik beku dan titik didih air, yang juga disebut titik es dan titik uap. Campuran es dan air yang berada dalam kesetimbangan dengan udara jenuh uap pada tekanan 1 atm dikatakan berada pada titik es, dan campuran air cair dan uap air (tanpa udara) yang berada dalam kesetimbangan pada tekanan 1 atm dikatakan berada pada titik uap.

Skala suhu yang digunakan dalam sistem SI dan Inggris saat ini adalah skala Celsius (sebelumnya disebut skala celcius; pada tahun 1948, namanya diubah untuk menghormati astronom Swedia A. Celsius, 1702–1744, yang menemukannya) dan

skala Fahrenheit (dinamai untuk menghormati pembuat instrumen asal Jerman, G. Fahrenheit, 1686–1736). Pada skala Celsius, titik es dan uap awalnya diberi nilai 0 dan 100°C, masing-masing. Nilai yang sesuai pada skala Fahrenheit adalah 32 dan 212°F.

dua skala suhu yang umum digunakan di dunia, yaitu skala Fahrenheit (F) dan Celsius (°C). Skala Fahrenheit didasarkan pada spesifikasi selisih 180 derajat antara titik beku dan titik didih air pada tekanan atmosfer normal. Skala Celsius didasarkan pada spesifikasi selisih 100 derajat antara titik beku dan titik didih air pada tekanan atmosfer normal.

Titik nol pada skala tersebut ditetapkan secara acak dalam sejarah. Suhu air mendidih ditetapkan pada 100 pada skala Celsius, dan suhu tubuh manusia yang sedang demam ditetapkan pada 100 pada skala Fahrenheit. Titik beku air dipilih sebagai titik nol pada skala Celsius, sementara suhu terdingin yang dapat dicapai dengan campuran es dan air garam dipilih sebagai titik nol pada skala Fahrenheit. Beberapa rumus suhu dapat dinyatakan sebagai berikut:

Skala Kelvin berhubungan dengan skala Celsius dengan

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$$

Skala Rankine berhubungan dengan skala Fahrenheit dengan

$$T(R) = T(^{\circ}F) + 459.67$$

Skala suhu dalam dua sistem satuan tersebut saling terkait melalui

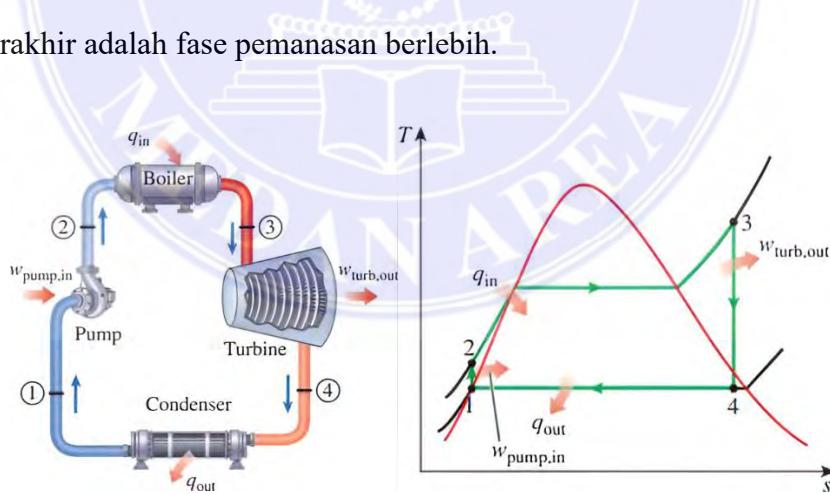
$$T(R) = 1.8T(K)$$

$$T(^{\circ}F) = 1.8T (^{\circ}C) + 32$$

2.5 Siklus Rankine

Siklus Rankine diusulkan oleh insinyur Skotlandia, W. J. M. Rankine (1820-1870). Siklus ini banyak digunakan pada pembangkit listrik tenaga termal untuk pembangkit listrik dengan turbin uap.

Siklus Rankine merupakan salah satu siklus termodinamika yang mengubah energi panas menjadi energi mekanik. Siklus ini dikenal sebagai siklus tenaga uap yang paling sederhana. Siklus termodinamika dari siklus Rankine konvensional terdiri dari empat unit, yaitu pompa yang idealnya beroperasi secara isentropik dan adiabatik, penukar kalor yang membantu proses penguapan fluida, turbin yang beroperasi dalam kondisi ideal, dan terakhir, kondensor ideal yang mencegah kehilangan tekanan dan memiliki permukaan kontak tak terbatas untuk perpindahan kalor. Siklus ini terdiri dari tiga tahap berbeda. Tahap pertama adalah fase prapemanasan, tahap kedua fluida melewati *boiler* yang disebut fase pemanasan, dan tahap terakhir adalah fase pemanasan berlebih.



Gambar 2.2. Grafik dari Siklus Rankine

Terdapat empat proses dalam siklus rankine yang bisa dilihat pada Gambar 2.2 dimana dibawah ini akan dijelaskan empat proses tersebut yaitu :

- 1-2 Kompresi isentropik dalam pompa
- 2-3 Penambahan panas tekanan konstan dalam boiler
- 3-4 Ekspansi isentropik dalam turbin
- 4-1 Pembuangan panas tekanan konstan dalam kondensor

➤ Air memasuki pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh dan dikompresi secara isentropik hingga mencapai tekanan operasi *boiler*. Suhu air sedikit meningkat selama proses kompresi isentropik ini karena sedikit penurunan volume spesifik air. Jarak vertikal antara kondisi 1 dan 2 pada diagram T-s dilebih-lebihkan untuk kejelasan.

➤ Air memasuki ketel uap sebagai cairan terkompresi pada keadaan 2 dan keluar sebagai uap super panas pada keadaan 3. Ketel uap pada dasarnya merupakan penukar kalor besar di mana panas yang berasal dari gas pembakaran, reaktor nuklir, atau sumber lain ditransfer ke air pada dasarnya pada tekanan konstan. Ketel uap, bersama dengan bagian di mana uap mengalami super panas (*superheater*) sering disebut sebagai generator uap.

➤ Uap super panas pada tahap 3 memasuki turbin, tempat uap tersebut mengembang secara isentropis dan menghasilkan kerja dengan memutar poros yang terhubung ke generator listrik. Tekanan dan suhu uap turun selama proses ini ke nilai pada tahap 4, tempat uap memasuki kondensor. Pada tahap ini, uap biasanya berupa campuran cair-uap jenuh dengan kualitas tinggi. Uap dikondensasikan pada tekanan konstan di dalam kondensor, yang pada dasarnya merupakan penukar panas besar, dengan membuang panas ke media pendingin seperti danau, sungai, atau atmosfer. Uap meninggalkan kondensor sebagai cairan jenuh dan memasuki pompa, menyelesaikan siklus.

- Mengingat bahwa luas di bawah kurva proses pada diagram T-s merepresentasikan perpindahan panas untuk proses reversibel internal, kita melihat bahwa luas di bawah kurva proses 2-3 merepresentasikan panas yang ditransfer ke air di dalam boiler dan luas di bawah kurva proses 4-1 merepresentasikan panas yang dibuang di kondensor. Selisih antara keduanya (luas yang dilingkupi oleh kurva siklus) adalah kerja bersih yang dihasilkan selama siklus.

2.6 ***Steam (Uap) dan Proses Pembentukan Uap dalam Boiler***

Steam adalah air yang telah dipanaskan membentuk uap air dengan suhu dan tekanan tertentu yang diproduksi di dalam *boiler*. *Steam* digunakan sebagai suatu cara pemindahan sejumlah energi yang terkendali dari suatu pusat, ruang *boiler* yang otomatis ke titik pengguna suatu industri. *Steam* yang bergerak mengelilingi pabrik merupakan suatu transportasi penyediaan energi. *Steam* diproduksi di dalam suatu *boiler* dengan tekanan yang sesuai dengan kebutuhan pada titik pengguna di dalam industri. Pada tekanan atmosfer, *steam* jenuh mempunyai suhu 100°C, semakin tinggi tekanannya, suhu jenuh *steam* akan meningkat. (Widiatmini, 2006 dalam MT et al., 2023)

Secara umum bisa disebutkan bahwa *steam* merupakan bagian dari uap air, tetapi tidak semua uap air bisa dikategorikan sebagai *steam*. *Steam* dikelompokkan menjadi 3 macam yaitu: *saturated steam* (uap jenuh), *superheated steam* (uap kelewat jenuh) dan uap kering. (Sukarman, 2010 dalam MT et al., 2023). *Steam* (uap air) dapat dibedakan sebagai berikut:

- Uap Jenuh (*Saturated Steam*)

Ketika panas diberikan pada uap basah, kandungan air di dalamnya akan terus menguap. Dalam proses ini, suhu uap tetap stabil pada kondisi tertentu. Jika pemanasan diteruskan, uap basah akan bertransformasi menjadi uap jenuh (*saturated steam*) dengan tingkat kekeringan yang lebih tinggi. Selama fase perubahan ini, temperatur uap tetap konstan, sedangkan tekanan uap jenuh yang meningkat akan menyebabkan massa jenisnya juga cenderung bertambah.(MT et al., 2023)

- Uap Panas Lanjut (*Superheated Steam*)

Uap panas lanjut (*superheated steam*) adalah uap yang dipanaskan lebih lanjut dengan cara dialirkan melalui pipa-pipa yang terkena panas gas hasil pembakaran hingga mencapai kondisi uap jenuh kering. Pada tahap penguapan menuju uap jenuh kering, temperatur uap tetap stabil. Setelah kondisi uap jenuh tercapai, suhu uap akan meningkat lebih tinggi membentuk uap panas lanjut dengan tekanan tetap. Nilai kalor spesifik uap panas lanjut dapat berubah tergantung pada tekanan dan tingkat pemanasan lanjutan yang diberikan.(MT et al., 2023)

- Uap Kering

Kualitas uap, x_1 didefinisikan sebagai perbandingan antara fraksi massa uap kering M dengan massa total uap basah, yaitu massa fraksi uap kering M ditambah massa kandungan air (m).

Proses pembentukan uap berlangsung ketika keseimbangan antara tekanan (P), volume (V), dan suhu (T) mulai berubah. Secara fisis, air pada kondisi cair jenuh memiliki massa jenis teoritis sekitar 1 kg/cm^3 . Pada tekanan 1 atm, jika suhu

dipanaskan hingga 100°C, air akan mulai berubah fase menjadi uap. Namun, bila pada permukaan air diberi tekanan tambahan yang menghambat pembentukan gelembung, proses penguapan tidak akan terjadi meskipun suhu telah mencapai titik didih normal. Selama kondisi tekanan, volume, dan suhu tetap stabil, air tetap berada pada fase cair. Jika suhu terus dinaikkan sehingga keseimbangan tersebut terganggu, maka air akan mengalami perubahan fase dari cair menjadi uap. Proses ini dapat berlangsung di ruang tertutup maupun terbuka, dan kondisi uap yang terbentuk dapat memiliki karakteristik yang berbeda.(MT et al., 2023). Keadaan uap yang dihasilkan dapat berbentuk:

- Uap jenuh, yaitu uap yang berada diantara uap basah dan uap kering (uap yang tidak mengandung butiran air lagi).
- Uap panas lanjut (uap kering), yaitu uap yang dihasilkan dengan proses pemanasan lanjut dari uap jenuh.
- Uap basah, yaitu uap yang masih mengandung butiran-butiran yang halus dari air

berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa *steam* atau uap memiliki karakteristik yang ditentukan oleh kondisi tekanan, suhu, dan proses pemanasan di dalam *boiler*. Salah satu parameter penting yang mendukung pembentukan steam adalah tekanan uap kering, karena semakin optimal tekanan uap kering, maka proses pemanasan dan perubahan fase air menjadi uap dapat berlangsung lebih stabil.

Dalam penelitian ini, tekanan uap kering digunakan sebagai variabel independen untuk dianalisis pengaruhnya terhadap penggunaan air umpan pada

sistem *boiler*. Hubungan antara tekanan uap kering dan air umpan diuji secara statistik menggunakan metode regresi linear, sedangkan penentuan level operasional optimal dilakukan melalui metode Taguchi. Dengan demikian, teori mengenai jenis dan proses pembentukan uap menjadi dasar untuk memahami bagaimana parameter tekanan uap kering dapat memengaruhi variabel respon penelitian, yang dianalisis hanya melalui pendekatan statistik dan tidak dibahas secara teori fisika atau kimia mendalam.

2.7 *Flue Gas Boiler (Gas Buang/Asap Boiler)*

Flue Gas (kadang-kadang disebut gas buang atau gas asap) adalah gas yang berasal dari pabrik pembakaran dan mengandung produk reaksi bahan bakar dan udara pembakaran serta zat sisa seperti partikel (debu), oksida sulfur, oksida nitrogen, dan karbon monoksida. Saat membakar batu bara dan/atau bahan limbah, hidrogen klorida dan hidrogen fluorida dapat hadir dalam gas buang serta turunan hidrokarbon dan turunan logam berat. Di banyak negara, sebagai bagian dari program perlindungan lingkungan nasional, gas buang harus mematuhi peraturan pemerintah yang ketat mengenai nilai batas polutan seperti debu, sulfur dan nitrogen oksida, serta karbon monoksida. Untuk memenuhi nilai batas ini, pabrik pembakaran dilengkapi dengan sistem pembersihan gas buang seperti *scrubber gas* dan penyaring debu. Seperti halnya gas lainnya, komposisi gas buang bergantung pada komposisi dan sifat bahan bakar yang dibakar, tetapi, meskipun demikian, komposisinya biasanya sebagian besar terdiri dari nitrogen (biasanya sekitar 60% dan lebih tinggi yang berasal dari proses pembakaran menggunakan udara sebagai oksidan, karbon dioksida, dan uap air), serta kelebihan oksigen (yang juga berasal dari udara). Gas buang juga dapat mengandung sejumlah kecil polutan, seperti (1)

partikel, misalnya jelaga, (2) karbon monoksida, (3) nitrogen oksida, NOx, dan (4) sulfur oksida, SOx.

Temperatur gas asap atau *flue gas* temperature merupakan salah satu parameter penting yang menunjukkan seberapa besar energi panas yang terbuang dari proses pembakaran pada *boiler*. Temperatur gas asap yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan efisiensi perpindahan panas yang rendah, sehingga berdampak pada penggunaan air umpan yang harus disuplai untuk menjaga kinerja pembangkitan uap. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, temperatur gas asap digunakan sebagai variabel independen kedua yang dianalisis pengaruhnya terhadap kebutuhan air umpan melalui metode regresi linear dan di optimasi menggunakan metode Taguchi. Hubungan ini hanya dikaji melalui sudut pandang statistik tanpa pembahasan teori reaksi kimia atau fisika mendalam.

2.8 Air Umpan Ketel Uap (*Boiler Feedwater*)

Air umpan ketel uap merupakan air yang disuplai ke dalam ketel untuk diubah menjadi uap. Secara umum, air umpan ketel (*boiler feedwater*) harus bebas dari kandungan kalsium (Ca) karena unsur ini dapat menimbulkan endapan yang memicu terbentuknya kerak pada permukaan ketel. Selain itu, air umpan idealnya juga tidak mengandung unsur yang berpotensi menimbulkan korosi pada ketel maupun sistem pendukungnya, serta tidak memicu pembentukan busa di dalam ketel uap. Oleh karena itu, air baku yang akan digunakan sebagai air umpan perlu melalui proses pengolahan terlebih dahulu untuk menghilangkan zat-zat atau padatan, baik tersuspensi, terlarut, maupun koloid, yang dapat menimbulkan kerak, korosi, atau pembusaan selama operasi ketel. Senyawa organik seperti kalsium (Ca) diketahui dapat memperburuk kondisi operasi jika membentuk kerak. Kualitas air

umpan ketel uap juga bergantung pada kondisi operasi ketel; semakin tinggi tekanan dan temperatur kerja, semakin tinggi pula tingkat kemurnian air umpan yang dibutuhkan. Secara umum, ketel uap sendiri merupakan peralatan yang berfungsi menghasilkan uap, dengan dua bagian utama: sisi api sebagai penyedia energi panas dan sisi air sebagai media perubahan fase air menjadi uap. Uap yang terbentuk kemudian dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti pemanas, penggerak turbin, dan aplikasi industri lainnya.(Wilastari et al., 2021)

Boiler feedwater atau air umpan ketel merupakan campuran antara air make-up dan air kondensat. Air *make-up* adalah air baku yang sudah melalui tahap pengolahan agar memenuhi syarat sebagai air umpan, sedangkan air kondensat adalah hasil kondensasi dari uap (*steam*) yang sebelumnya telah digunakan. Umumnya, kualitas air kondensat relatif murni karena berasal langsung dari uap yang telah mengalami proses pendinginan. Pada tahap penguapan di dalam ketel uap, air berubah fase menjadi uap. Uap yang terbentuk merupakan air murni dalam bentuk gas (H_2O) karena ion-ion atau zat terlarut dalam air ketel tidak ikut menguap bersama uap air. Pada *boiler* juga diperlukan pengolahan air, adapun tujuan pengolahan air *boiler* antara lain:

- Menghindari terjadinya korosi pada ketel uap maupun jalur pipa uap kondensat.
- Mencegah pembentukan kerak (*scale*) dan endapan lumpur (*sludge*) yang dapat memicu penyumbatan pipa dan risiko panas berlebih (*overheating*).
- Mencegah terjadinya *carry-over*, yaitu kondisi di mana air terbawa bersama uap. Fenomena ini dapat dipicu oleh faktor mekanis seperti perubahan beban mendadak, pengoperasian di atas kapasitas (*overload*), ketinggian

permukaan air ketel yang melebihi batas normal, atau alat pemisah uap yang tidak optimal. Faktor kimia juga berpengaruh, misalnya tingginya kandungan zat padat tersuspensi, alkalinitas berlebih, kadar silika yang tinggi, maupun keberadaan bahan organik seperti minyak.

- Meningkatkan efisiensi kerja *boiler* secara optimal sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar.

Penggunaan air umpan *boiler* yang tidak memenuhi persyaratan akan menimbulkan beberapa masalah antara lain :

- Pembentukan Kerak

Pembentukan Kerak pada ketel uap dapat terbentuk akibat pengendapan zat pengotor yang menempel pada permukaan perpindahan panas, atau dari zat tersuspensi di dalam air yang melekat pada permukaan logam lalu mengeras. Keberadaan kerak ini bisa menimbulkan pemanasan berlebih pada titik tertentu (*local overheating*) yang berisiko menyebabkan kerusakan fungsi ketel (*boiler failure*).

- Terjadi nya Korosi

Pengertian Korosi secara sederhana dapat diartikan sebagai proses kembalinya logam ke bentuk bijihnya. Korosi pada sistem *boiler* sebenarnya terjadi melalui mekanisme elektrokimia yang kompleks dan dapat menimbulkan kerusakan signifikan pada permukaan logam. Faktor utama penyebab korosi antara lain:

- pH air yang terlalu rendah
- Kehadiran gas-gas terlarut seperti oksigen (O_2) dan karbon dioksida (CO_2), dan lain-lain,

- Kandungan garam terlarut dan padatan tersuspensi.

Selain itu, alkalinitas air yang rendah serta adanya garam atau padatan dalam air umpan dapat mempercepat proses korosi.

- Pembentukan Busa

Pembentukan busa (*foaming*) adalah peristiwa munculnya gelembung-gelembung di permukaan air dalam drum ketel uap. Busa ini biasanya muncul karena adanya kontaminasi zat organik atau bahan kimia di dalam air *boiler* yang tidak terkontrol dengan baik. Busa dapat mengurangi ruang pelepasan uap (*steam-release space*) sehingga menimbulkan terbawanya air dan kotoran bersama uap. Dampaknya, endapan dan korosi dapat terbentuk pada komponen logam di dalam sistem *boiler*. (Klistafani et al., 2021)

Sistem air umpan ketel uap (*boiler feed water*) harus memenuhi standar kualitas tertentu agar tidak menimbulkan masalah dalam pengoperasian *boiler*. Air umpan ini wajib bebas dari kandungan mineral yang tidak diinginkan maupun zat pengotor lain yang dapat menurunkan efisiensi kerja ketel. Air yang disuplai ke dalam *boiler* untuk diubah menjadi uap (*steam*) inilah yang disebut sebagai air umpan. (Aquarina,2009 dalam Fatimura, 2015). Adapun spesifikasi air umpan *boiler* Pada tempat diambil nya data penelitian sebagai berikut :

| Parameter | Standard (%) |
|-------------------------------|-------------------|
| Ph | 10,5-11,5 |
| Kesadahan Total | Tidak nyata (t.n) |
| <i>Silica</i> | 150 |
| Alkalinity M | 250-1.400 |
| Alkalinity P | 250-750 |
| <i>CO₂</i> terkait | - |
| <i>Tanin</i> indeks | 120-160 |
| <i>Sulfite</i> | 20-80 |
| <i>Phosphate</i> | 30-70 |
| TDS | 1.200 maks |
| Oksigen Terlarut | Tidak nyata (t.n) |

Gambar 2.3. Spesifikasi air umpan *boiler* pada PKS Dimana tempat penelitian dilakukan

2.9 Uji Normalitas

Uji normalitas adalah suatu prosedur yang digunakan untuk mengetahui apakah data berasal dari populasi yang terdistribusi normal atau berada dalam sebaran normal. Distribusi normal adalah distribusi simetris dengan modus, mean dan median berada dipusat.

Distribusi normal merupakan salah satu distribusi yang paling penting akan dihadapi. Beberapa alasan nya :

- Banyak variabel dependen umumnya diasumsikan memiliki distribusi mendekati normal di dalam populasi. Maksudnya, jika kita dapat mengamati keseluruhan data populasi, pola distribusi yang terbentuk akan menyerupai distribusi normal.
- Apabila variabel dapat diasumsikan berdistribusi normal atau mendekati normal, maka hal ini memungkinkan peneliti menarik berbagai kesimpulan (baik secara presisi maupun pendekatan) mengenai nilai-nilai variabel tersebut.

- Pengujian normalitas sering kali menjadi bagian dari langkah analisis statistik inferensial pada satu atau lebih kelompok sampel. Distribusi data yang normal menjadi salah satu asumsi penting untuk menentukan metode statistik yang tepat dalam tahap analisis berikutnya.

Uji normalitas umumnya dilakukan pada data dengan skala ordinal, interval, atau rasio. Dalam analisis yang menggunakan teknik statistik parametrik, syarat utama yang harus dipenuhi adalah data harus berasal dari distribusi normal. Apabila data tidak berdistribusi normal, jumlah sampel terlalu kecil, atau datanya bersifat nominal atau ordinal, maka analisis sebaiknya dilakukan menggunakan metode statistik non-parametrik.(Nuryadi et al., 2017)

Tujuan dari Uji Normalitas dilihat dari ilmu statistik adalah teknik analisis dalam mencari tahu apakah data yang dimilikinya berdistribusi normal atau tidak, atau apakah data yang dimiliki berasal dari populasi yang berdistribusi normal atau tidak (Zein et al., 2019 dalam Nurhaswinda et al., 2025). Beberapa ahli menyatakan bahwa sampel berukuran besar, yaitu dengan jumlah 30 data atau lebih, umumnya dapat diasumsikan memiliki distribusi normal. Namun demikian, tidak terdapat aturan pasti yang menjamin bahwa data dengan jumlah lebih dari 30 pasti berdistribusi normal. Oleh karena itu, pengujian normalitas tetap perlu dilakukan sebagai dasar yang kuat untuk mendukung proses interpretasi data di tahap analisis berikutnya.(Nurhaswinda et al., 2025)

Dalam penelitian ini, uji normalitas dilakukan untuk memastikan bahwa data yang dianalisis melalui regresi linear memenuhi asumsi distribusi normal, sehingga

hasil pengolahan data dapat diinterpretasikan secara valid dan mendukung proses optimasi parameter operasional menggunakan metode Taguchi.

2.10 Regresi Linear

Analisis regresi telah lama dikembangkan untuk mempelajari pola dan mengukur hubungan statistik antara dua atau lebih peubah (variabel). Teknik analisis yang mencoba menjelaskan bentuk hubungan antara dua peubah atau lebih khususnya hubungan antara peubah-peubah yang mengandung sebab akibat disebut analisis regresi.

Prosedur analisisnya didasarkan atas distribusi probabilitas bersama untuk jenis-jenis peubah-peubahnya. Bila hubungan ini dapat dinyatakan dalam persamaan matematik, maka kita dapat memanfaatkannya untuk keperluan-keperluan lain misalnya peramalan. (Wibisono, 2015)

2.10.1 Analisis Regresi Linear Berganda

Regresi linear berganda pada hakikatnya merupakan pengembangan dari analisis regresi linear sederhana. Kegunaannya juga untuk meramalkan nilai variabel terikat (Y).

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).

Persamaan regresi ganda dinyatakan dalam bentuk umum :

$$E(Y_i) = \mu_Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Dalam hal ini α , β_2, \dots, β_n merupakan parameter yang diduga dari data dengan nilai dugaan a, b_1, b_2, \dots, b_n . persamaan regresi ganda dinyatakan dalam bentuk

Selain itu beberapa Persamaan regresi berganda dirumuskan sebagai berikut:

Dua variabel bebas : $Y = a + b_1X_1 + b_2X_2$

Tiga variabel bebas : $Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3$

Empat variabel bebas: $Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4$

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa analisis regresi linear berganda digunakan untuk menjelaskan hubungan pengaruh antara dua atau lebih variabel bebas terhadap satu variabel terikat. Dalam penelitian ini, tekanan uap kering (X_1) dan temperatur gas asap (X_2) digunakan sebagai variabel independen, sedangkan penggunaan air umpan boiler dijadikan variabel dependen (Y). Melalui metode regresi linear berganda, hubungan fungsional antara variabel-variabel tersebut diuji untuk mengetahui seberapa besar pengaruh masing-masing faktor, sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan sebagai dasar optimasi dengan metode Taguchi.

2.11 Evaluasi Model Matematis

Dalam penelitian ini, model matematis yang dibangun melalui pendekatan regresi linear dan metode optimasi Taguchi perlu dievaluasi untuk memastikan bahwa hasil prediksi yang dihasilkan dapat menggambarkan kondisi sebenarnya secara akurat. Oleh karena itu, beberapa ukuran kesalahan (*error*) digunakan untuk menilai performa model, seperti *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Squared Error*

(MSE), *Root Mean Squared Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Indikator-indikator ini memberikan informasi sejauh mana nilai prediksi mendekati nilai aktual, sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk menilai keandalan model regresi yang dihasilkan.

2.11.1 *Mean Square Error (MSE)*

Mean Square Error (MSE) adalah nilai rata-rata dari selisih kuadrat antara data yang diprediksi dengan data aktual. Kesalahan yang terjadi akan dikalikan dengan dirinya sendiri (dikuadratkan) sehingga menekankan besarnya deviasi. MSE umumnya digunakan sebagai ukuran untuk menilai keakuratan suatu metode peramalan. Semakin kecil nilai MSE yang diperoleh, maka semakin tinggi tingkat ketepatan hasil prediksi.(Nurhaswinda et al., 2025) Rumus yang digunakan untuk menghitung MSE adalah sebagai berikut:

2.11.2 Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan salah satu ukuran evaluasi yang digunakan untuk membandingkan tingkat kesalahan peramalan pada beberapa model, tetapi hanya berlaku untuk variabel yang sama karena RMSE bergantung pada skala data. RMSE berfungsi untuk menunjukkan besarnya keseluruhan kesalahan prediksi dalam bentuk satu angka agregat. Ukuran ini dihitung dengan cara mengambil akar kuadrat dari rata-rata selisih kuadrat antara nilai prediksi dan nilai aktual.(Nurhaswinda et al., 2025) Rumus yang digunakan untuk memperoleh nilai RMSE adalah sebagai berikut:

2.11.3 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) adalah rata-rata selisih absolut antara nilai prediksi dengan nilai aktual, yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Indikator ini digunakan untuk menunjukkan seberapa besar kesalahan prediksi dibandingkan dengan nilai aktualnya secara relatif. Rumus yang digunakan untuk menghitung MAPE adalah sebagai berikut:

Nilai MAPE yang diperoleh kemudian dapat digunakan untuk menilai tingkat keakuratan peramalan. Menurut Lewis (1982), interpretasi MAPE dibagi menjadi empat kategori, yaitu :

Tabel 2.1. Kriteria Nilai MAPE terhadap Kemampuan Model Peramalan

| MAPE Range | Meaning | Value |
|------------|--|-------|
| < 10 % | = Excellent forecasting model capabilities | |
| 10 - 20 % | = Good forecasting model capabilities | |
| 20 - 50 % | = Feasibility of the forecasting model | |
| > 50 % | = Poor forecasting model capabilities | |

2.11.4 *Mean Absolute Error (MAE)*

Mean Absolute Error (MAE) adalah salah satu metrik evaluasi yang populer karena, serupa dengan *Root Mean Squared Error* (RMSE), satuan hasilnya tetap mengikuti satuan data target yang diprediksi. Berbeda dengan RMSE, nilai MAE bersifat linear sehingga lebih mudah dipahami secara intuitif. Meskipun MSE dan

RMSE memberi penalti lebih besar pada kesalahan besar akibat adanya kuadrat pada perhitungan, MAE memperlakukan setiap kesalahan secara seimbang tanpa bobot tambahan. Nilai MAE dihitung sebagai rata-rata dari semua selisih absolut antara nilai prediksi dan nilai aktual. Karena fungsi absolut hanya menghasilkan bilangan positif, maka selisih antara nilai prediksi dan nilai aktual baik positif maupun negatif akan dikonversi menjadi nilai positif saat dihitung menggunakan MAE.(Schneider & Xhafa, n.d.). Nilai MAE dapat dihitung sebagai berikut:

2.12 Desain Eksperimen (DoE)

Desain eksperimen merupakan suatu metode untuk mengevaluasi secara bersamaan dua atau lebih faktor (parameter) guna mengetahui sejauh mana faktor-faktor tersebut memengaruhi rata-rata maupun variasi dari karakteristik suatu produk atau proses. Agar evaluasi ini berjalan efektif dan valid secara statistik, tingkat (level) faktor-faktor kontrol diatur bervariasi, kemudian hasil dari setiap kombinasi percobaan dicatat dan dianalisis. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang signifikan, menentukan level optimalnya, serta melihat apakah perubahan level tersebut dapat memberikan perbaikan pada hasil proses selanjutnya.

2.12.1 Tujuan Eksperimen

Tujuan dari pelaksanaan eksperimen adalah untuk memahami cara mengurangi dan mengendalikan variasi pada suatu produk atau proses, sehingga dapat diambil keputusan terkait parameter-parameter yang memengaruhi performansi produk atau proses tersebut. Pengembangan produk atau proses

bertujuan untuk meningkatkan karakteristik kinerja agar semakin sesuai dengan kebutuhan dan harapan pelanggan. Dengan melakukan penyesuaian pada nilai rata-rata serta menekan variasi secara optimal, maka potensi kerugian atau pemborosan pada produk maupun proses dapat diminimalkan.

2.12.2 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan salah satu pendekatan dalam bidang rekayasa yang bertujuan meningkatkan kualitas produk dan proses, sekaligus meminimalkan penggunaan biaya serta sumber daya. Prinsip utama metode ini adalah membuat produk atau proses menjadi tidak sensitif terhadap berbagai faktor eksternal, seperti variasi material, peralatan produksi, tenaga kerja, maupun kondisi operasional. Dengan demikian, metode Taguchi berupaya menciptakan produk atau proses yang tangguh (*robust*) terhadap gangguan atau faktor kebisingan (*noise*), sehingga sering pula disebut sebagai rancangan kokoh (*robust design*).

Filosofi Taguchi mencakup tiga prinsip utama, yaitu:

- 1) Kualitas harus dirancang dan dibangun ke dalam produk sejak awal, bukan hanya diperiksa pada tahap akhir.
- 2) Tingkat kualitas yang optimal dicapai dengan meminimalkan penyimpangan dari target, sehingga produk harus didesain agar tetap tangguh (*robust*) terhadap faktor lingkungan yang sulit dikendalikan.
- 3) Kualitas diukur berdasarkan seberapa besar penyimpangan dari standar tertentu, dan kerugian yang timbul dihitung secara menyeluruh dalam sistem.

Metode Taguchi mempunyai beberapa keunggulan seperti:

- 1) Rancangan eksperimen Taguchi tergolong efisien karena memungkinkan peneliti untuk menguji banyak faktor sekaligus dengan jumlah percobaan yang relatif sedikit
- 2) Pendekatan ini membantu menghasilkan proses yang mampu memproduksi keluaran yang konsisten dan tangguh (*robust*) meskipun terdapat faktor gangguan yang tidak dapat dikendalikan sepenuhnya.
- 3) Metode Taguchi memberikan gambaran yang jelas mengenai pengaruh masing-masing faktor dan levelnya, sehingga dapat ditentukan kombinasi parameter kontrol yang menghasilkan respon optimal.

Selain keunggulannya, Metode Taguchi juga memiliki beberapa keterbatasan jika dibandingkan dengan metode eksperimen lainnya. Salah satu kekurangannya adalah struktur rancangan Taguchi yang cukup kompleks, karena pada beberapa rancangan terdapat kemungkinan mengorbankan efek interaksi atau bahkan efek utama yang sebenarnya signifikan. Untuk menghindari hal ini, pemilihan rancangan percobaan harus dilakukan dengan cermat dan disesuaikan dengan tujuan penelitian.

Metode Taguchi memanfaatkan seperangkat matriks khusus yang dikenal sebagai Matriks Ortogonal. Matriks standar ini digunakan untuk menentukan jumlah percobaan minimum yang masih mampu memberikan informasi maksimal mengenai semua faktor yang memengaruhi parameter yang diteliti. Hal yang paling penting dalam penerapan Matriks Ortogonal adalah bagaimana memilih kombinasi level variabel input pada setiap percobaan secara tepat.

Berdasarkan uraian di atas, Metode Taguchi digunakan dalam penelitian ini untuk membantu menentukan kombinasi level operasional terbaik dari variabel tekanan uap kering dan temperatur gas asap. Melalui penerapan Matriks Ortogonal, penelitian ini dapat mengkaji pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kebutuhan air umpan pada sistem boiler. Pendekatan ini mendukung tujuan penelitian untuk memperoleh kondisi operasi yang lebih stabil dan terkendali, sehingga dapat meminimalkan pemborosan air umpan dengan dasar analisis statistik.

2.12.3 Matriks Ortogonal

Orthogonal array merupakan suatu deretan angka disusun berdasarkan baris dan kolom. Kolom diatur sebagai parameter dalam eksperimen yang bisa diubah. Sedangkan Baris diatur sebagai variasi dari parameter tersebut atau dinamakan sebagai level faktor. Level-level dari faktor parameter tersebut dalam kondisi seimbang dan bisa diuraikan dari pengaruh faktor parameter yang lain, sehingga array tersebut dikatakan orthogonal. Oleh karena itu, matriks berimbang dari beberapa faktor dan level disebut Array Orthogonal. Sehingga adanya pengaruh suatu faktor atau level akan terpisah (*confounded*) dari faktor atau level lainnya (Utomo, Katolik, & Mandala, n.d. dalam FAHRI, 2023).

Matriks ortogonal adalah suatu matriks yang disusun dalam bentuk baris dan kolom, di mana setiap kolom merepresentasikan faktor yang dapat divariasikan dalam percobaan, sedangkan setiap baris menunjukkan kombinasi level dari faktor-faktor tersebut. Matriks ini disebut ortogonal karena susunan level pada setiap faktor dibuat seimbang dan memungkinkan pengaruh masing-masing faktor dapat dipisahkan tanpa tercampur dengan pengaruh faktor lain. Dengan demikian,

Matriks Ortogonal berfungsi sebagai rancangan yang seimbang, sehingga kontribusi faktor atau level tertentu dapat dianalisis secara terpisah tanpa gangguan dari faktor lainnya.(FAHRI, 2023).

2.12.4 Ratios Signal to Noise (S/N)

Rasio S/N (*Signal-to-Noise Ratios*) digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi dalam menurunkan variasi suatu respon. Rasio ini berfungsi sebagai metode untuk mentransformasi hasil uji ulang data menjadi satu nilai tunggal yang merepresentasikan tingkat variasi yang terjadi. Dengan Rasio S/N, peneliti dapat menentukan level faktor mana yang paling memengaruhi hasil percobaan. Rasio S/N sendiri memiliki beberapa tipe karakteristik kualitas, di antaranya adalah:

1. *Smaller is Better*

Adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negative.

Semakin kecil (mendekati nol adalah yang diinginkan).

2. *Nominal is Better*

Karakteristik kualitas dengan nilai atau target tidak nol dan terbatas. Atau dengan kata lain nilai yang mendekati suatu nilai yang ditentukan adalah yang terbaik.

$$S/N = 10 \log \frac{\hat{y}^2}{S_{y^2}}$$

3. *Large is Better*

Karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non negative.

Nilai semakin besar adalah semakin diinginkan.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2} \right)$$

2.13 Penelitian Sebelumnya sebagai Dasar Pendekatan Metodologis

Pemilihan metode dalam penelitian ini tidak dilakukan secara sembarangan, melainkan mengacu pada berbagai studi terdahulu yang telah berhasil menerapkan metode serupa dalam konteks sistem termal dan industri. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi antara metode Taguchi dan regresi linear telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi pengaruh variabel proses terhadap respon dan dalam menentukan kondisi operasional yang optimal. Dengan merujuk pada hasil-hasil tersebut, pendekatan metodologis yang digunakan dalam penelitian ini memperoleh dasar teoritis dan praktis yang kuat. Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan disajikan sebagai berikut.

1. (Venkatesan et al., 2015) : melakukan penelitian numerik untuk mengoptimalkan desain *curved vane demister* dengan metode Taguchi (L25) dan analisis regresi linear. Penelitian ini mengevaluasi enam parameter terhadap efisiensi pemisahan droplet dan faktor gesek. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi Taguchi dan regresi mampu menghasilkan model prediktif akurat dengan R^2 hingga 98%, serta secara efisien menentukan parameter optimal. Temuan ini memperkuat penggunaan metode serupa dalam penelitian ini untuk mengoptimalkan tekanan dan suhu pada *boiler* terhadap penggunaan penggunaan air umpan.

2. (Jadhav et al., 2024) : melakukan optimasi multiobjektif parameter pemesinan baja EN19 menggunakan metode Taguchi (L9), ANOVA, dan TOPSIS. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh kecepatan potong, laju umpan, dan kedalaman pemotongan terhadap kekasaran permukaan dan laju pelepasan material. Selain itu, dilakukan analisis regresi untuk membentuk model hubungan antara variabel input dan output. Hasilnya menunjukkan metode ini efektif dalam menentukan parameter optimal dengan jumlah eksperimen minimal. Temuan ini memperkuat penggunaan metode Taguchi dan regresi dalam penelitian ini untuk mengoptimalkan penggunaan air umpan pada sistem *boiler*.
3. (Chen et al., 2022) : mengkaji optimalisasi pemisahan hidrogen dari campuran gas menggunakan membran palladium dalam lingkungan vakum. Studi ini secara eksperimental menerapkan metode Taguchi dengan rancangan ortogonal L16 untuk merancang kondisi operasi secara efisien dan mengurangi jumlah eksperimen. Selain itu, digunakan analisis regresi terstandarisasi untuk memodelkan hubungan antara parameter operasi dan fluks permeasi hidrogen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi gas merupakan faktor paling signifikan, diikuti oleh tekanan sisi retentat, derajat vakum, dan temperatur membran. Model regresi orde dua yang dibangun mampu memprediksi fluks hidrogen dengan akurasi tinggi ($R^2 = 0,997$) dan error relatif kurang dari 7%, menjadikannya alat prediktif yang andal. Studi ini memperkuat efektivitas kombinasi metode Taguchi dan regresi dalam optimasi proses multi-parameter pada sistem pemisahan gas berbasis membran.

4. (Nandagopal et al., 2021) : memfokuskan pada optimasi parameter proses pengecoran pasir untuk mengurangi cacat *cold metal* pada produk flange besi tuang. Penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan rancangan ortogonal L27 untuk mengevaluasi empat parameter penting, yaitu temperatur tuang, kandungan fosfor, permeabilitas pasir cetak, dan waktu penuangan. Selain itu, dikembangkan model matematika menggunakan analisis regresi linier untuk memprediksi kualitas hasil coran berdasarkan parameter-parameter tersebut. Model regresi yang dihasilkan menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 86,61%, menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel input dan output. Hasil eksperimen konfirmasi menunjukkan penurunan tingkat penolakan coran dari 23% menjadi 10%, membuktikan bahwa kombinasi optimal parameter dari Taguchi dan validasi model regresi efektif dalam meningkatkan kualitas pengecoran dan mengurangi cacat permukaan.
5. (Agrawal et al., 2020) : melakukan penelitian untuk mengoptimalkan kinerja dan emisi mesin diesel berbahan bakar campuran biodiesel-alkohol menggunakan kombinasi metode Taguchi, regresi linear berganda, dan jaringan saraf tiruan (ANN). Metode Taguchi digunakan untuk menentukan kombinasi parameter input yang optimal seperti kecepatan putaran dan waktu injeksi bahan bakar, sedangkan regresi diterapkan untuk membangun model prediksi dari hasil eksperimen. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan Taguchi-regresi dapat menghasilkan model yang cukup akurat dan efisien dalam memprediksi performa mesin, sekaligus mengurangi jumlah eksperimen. Studi ini mendukung validitas penggunaan kombinasi

metode Taguchi dan regresi linear dalam sistem energi berbasis eksperimen, seperti yang diterapkan dalam penelitian ini.

6. (Ejeta, 2024) : meneliti pengaruh parameter proses gabungan dalam dua tahap manufaktur terhadap performa mekanik biokomposit. Penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan desain L9 untuk menyusun kombinasi eksperimen yang efisien, sekaligus mengevaluasi pengaruh parameter seperti suhu, tekanan, dan waktu pada kekuatan tarik dan ketangguhan material. Selain itu, regresi linear berganda diterapkan untuk membangun model prediksi dari data hasil eksperimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan gabungan Taguchi dan regresi mampu mengidentifikasi variabel paling berpengaruh secara statistik serta membentuk model prediktif dengan akurasi yang memadai. Temuan ini mendukung relevansi pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengoptimalkan parameter proses sistem termal.
7. (Sharma et al., 2019) : melakukan penelitian untuk mengeksplorasi porositas pada NiTi *Shape Memory Alloy* (SMA) yang diproduksi melalui proses metallurgi serbuk. Penelitian ini menggunakan pendekatan Taguchi L9, analisis regresi linear, dan *genetic programming* untuk menganalisis pengaruh tiga parameter proses utama: tekanan kompaksi, temperatur sintering, dan waktu sintering. Hasil analisis menunjukkan bahwa temperatur sintering merupakan faktor paling signifikan dengan kontribusi sebesar 43,46%, diikuti oleh waktu sintering sebesar 35,26%, sedangkan tekanan kompaksi hanya berkontribusi 19,46%. Model regresi linear yang dibangun memiliki nilai R^2 sebesar 98,2%, menunjukkan kecocokan model

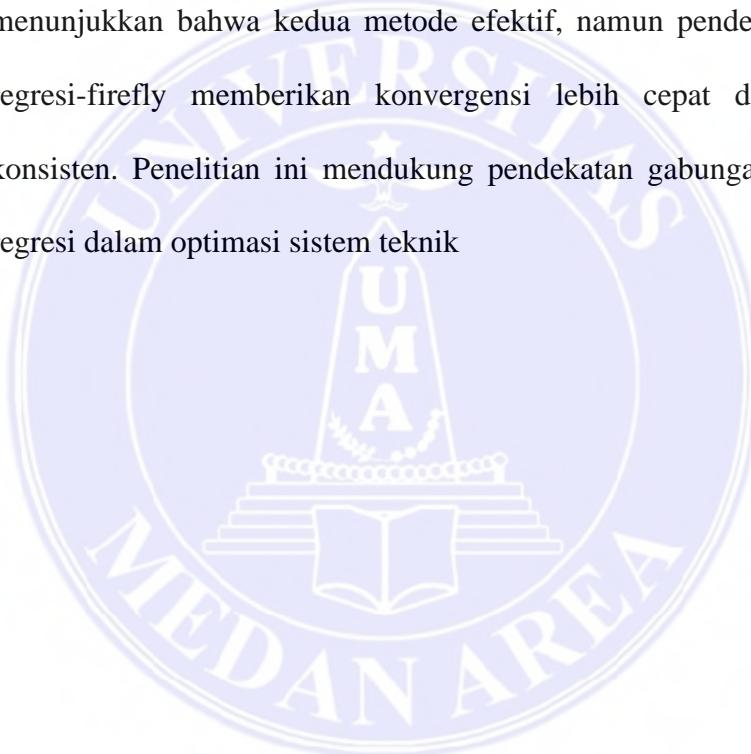
yang sangat tinggi. Selain itu, hasil optimasi menggunakan *genetic programming* mengkonfirmasi bahwa kombinasi parameter optimal menghasilkan porositas maksimum sebesar 55,48%, dengan nilai ini juga diperoleh melalui konfirmasi eksperimen. Studi ini menunjukkan keefektifan penggunaan kombinasi Taguchi dan regresi linear dalam memodelkan dan mengoptimasi variabel proses, yang sejalan dengan pendekatan metodologi dalam penelitian ini.

8. (Kumar Ball et al., 2019) : melakukan penelitian terhadap proses pencetakan mikro berbasis *Electrohydrodynamic* (EHD) inkjet, yang bertujuan untuk menghasilkan tetesan tinta ultra-kecil secara presisi di atas permukaan substrat. Eksperimen dirancang menggunakan metode Taguchi dengan matriks ortogonal L27 (3^3) untuk menguji tiga parameter utama: tegangan listrik, jarak antara *nozzle* dan substrat, serta laju aliran tinta. Berdasarkan hasil analisis S/N ratio dan ANOVA, ditemukan bahwa laju aliran tinta merupakan faktor paling dominan yang memengaruhi diameter tetesan tinta. Selain itu, regresi linier dan kuadratik digunakan untuk memodelkan hubungan antara parameter input dan hasil output. Model regresi yang dihasilkan menunjukkan akurasi prediksi tinggi, dibuktikan dengan kesesuaian antara hasil prediksi dan data aktual dari uji konfirmasi dengan tingkat kepercayaan 90%. Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi metode Taguchi dan regresi sangat efektif dalam pengembangan model prediktif presisi untuk proses manufaktur mikro, dan mendukung pendekatan serupa dalam penelitian ini terhadap sistem operasi termal.

9. (Kumar et al., 2025) : melakukan studi untuk mengoptimalkan kinerja perpindahan panas pada sistem *heat pump* melalui variasi tiga parameter utama: jenis refrigeran, luas area penukar panas, dan laju alir massa air pendingin. Metode eksperimen disusun menggunakan Taguchi L9, sementara hubungan antarparameter dianalisis melalui regresi multifaktor. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode Taguchi mampu mengidentifikasi kombinasi parameter yang menghasilkan efisiensi perpindahan panas tertinggi, dengan refrigeran sebagai faktor paling dominan (kontribusi 44,3%). Sebaliknya, model regresi menunjukkan tingkat kecocokan yang rendah dan tidak memadai untuk prediksi akurat dalam konteks ini. Studi ini mempertegas bahwa pendekatan berbasis Taguchi tidak hanya efisien dalam merancang eksperimen dengan jumlah percobaan minimal, tetapi juga unggul dalam mengungkap pengaruh signifikan antarparameter proses secara sistematis. Hal ini menjadi dasar kuat bagi penerapan metode serupa dalam penelitian

10. (Kate et al., 2021) : melakukan optimasi sifat mekanik beton ramah lingkungan berbasis *fly ash* menggunakan metode Taguchi (L₁₆) dan analisis regresi ganda. Penelitian ini membandingkan beton dengan dan tanpa serat baja, mengevaluasi kekuatan tekan, tarik belah, dan lentur. Metode regresi digunakan untuk mengkaji pengaruh variabel terhadap kekuatan beton dan menunjukkan error prediksi di bawah 5%. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi Taguchi dan regresi efektif dalam optimasi desain eksperimental. Temuan ini mendukung pendekatan serupa dalam penelitian ini yang bertujuan mengoptimalkan penggunaan air umpan *boiler*.

11. (Fasina et al., 2023): membandingkan dua teknik optimasi hibrida berbasis Taguchi: Taguchi-BBD-firefly dan Taguchi-regresi-firefly, untuk optimasi pemesinan pelat baja IS 2062-E250. Penelitian ini mengintegrasikan algoritma firefly dengan metode Taguchi dan regresi guna menentukan parameter pemrosesan optimal pada operasi boring CNC. Model regresi digunakan sebagai fungsi objektif dalam salah satu pendekatan, sementara desain Box-Behnken digunakan pada pendekatan lainnya. Hasil menunjukkan bahwa kedua metode efektif, namun pendekatan Taguchi-regresi-firefly memberikan konvergensi lebih cepat dan hasil yang konsisten. Penelitian ini mendukung pendekatan gabungan Taguchi dan regresi dalam optimasi sistem teknik



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian

3.1.1 Waktu penelitian

Waktu atau jadwal penelitian ini dimulai dari persetujuan judul skripsi yang disetujui oleh fakultas dan ketua program studi Teknik mesin serta penyusunan proposal serta lama nya pengambilan data penelitian, pengolahan data hingga penyusunan skripsi sampai selesai dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 3.1 Tabel jadwal penelitian

| NO | KEGIATAN | Tahun 2024 | | | | Tahun 2025 | | | | | | | | |
|----|--|------------|---------|----------|----------|------------|----------|-------|-------|-----|------|------|---------|-----------|
| | | September | Oktober | November | Desember | Januari | Februari | Maret | April | Mei | Juni | Juli | Agustus | September |
| 1 | Studi literatur dan konsultasi dengan dosen pembimbing | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Pengajuan Judul Tugas Akhir | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Penyusunan proposal tugas akhir | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Menunggu jadwal Seminar Proposal Raya | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Seminar Proposal | | | | | | | | | | | | | |
| | Pengambilan data penelitian | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Pengolahan data serta pembuatan laporan | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Seminar hasil penelitian | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Perbaikan dan persiapan sidang TA | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | Sidang Sarjana | | | | | | | | | | | | | |

3.1.2 Tempat penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada salah satu perusahaan pabrik kelapa sawit (PKS) yang berlokasi di Provinsi Sumatera Utara.

3.2 Bahan dan alat

3.2.1 Bahan

Bahan dalam penelitian ini adalah data yang didapat dari Worksheet *boiler* pabrik kelapa sawit serta data tambahan lainnya bila tersedia

3.2.2 Alat

1) Software Minitab

Software minitab adalah sebuah atau perangkat alat statistika yang dibuat dan dirancang untuk pengolahan data statistic seperti contohnya adalah metode Taguchi. Software ini akan digunakan dalam penelitian ini untuk mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal



Gambar 3.1. Tampilan software minitab

2) Microsoft Excel

Microsoft Excel adalah aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk mengolah data dalam bentuk tabel. Banyak digunakan untuk analisis data, pembuatan grafik, perhitungan matematis, pengelolaan anggaran, serta tugas-tugas administratif dan keuangan lainnya. Beberapa fitur utama

Microsoft excel adalah :

- Spreadsheet (Lembar kerja)
- Perhitungan matematika dan formula
- Grafik dan Visualisasi Data
- Pemrograman VBA (*Visual Basic for Applications*)

3.3 Populasi dan Sampel

Penelitian ini dilakukan dengan pengumpulan data dengan cara melakukan riset ke Lokasi penelitian serta menanyakan kepada petugas operator ketel uap tentang *worksheet* ketel uap. Dibawah ini adalah contoh tabulasi dari dua faktor bebas dan 1 faktor respon yang akan dipakai dalam penelitian

Tabel 3.2 Contoh Tabulasi Data 2 Faktor bebas dan 1 Faktor Respon

| Jam | Tekanan Uap Kering (kg/cm ²) | Temperatur Gas Asap (°C) | Debit Air (m ³) |
|-------|--|--------------------------|-----------------------------|
| 07-08 | | | |
| 08-09 | | | |
| 09-10 | | | |
| ... | | | |
| ... | | | |
| ... | | | |
| dst | | | |

3.4 Prosedur Kerja

Metode penelitian yang akan dilakukan menggunakan beberapa metode antara lain :

- 1) Studi literatur adalah metode penelitian yang digunakan untuk mengumpulkan data dari sumber-sumber yang telah dipublikasikan sebelumnya, seperti buku, jurnal, artikel, dan dokumen lainnya.

Metode ini bertujuan untuk mengembangkan pemahaman teoritis dan praktis tentang topik tertentu serta untuk menyusun hipotesis penelitian.

- 2) Pengamatan lapangan adalah metode pengumpulan data yang dilakukan dengan cara mengamati langsung proses produksi, interaksi antar pekerja, dan praktik operasional di lingkungan pabrik. Metode ini bertujuan untuk memahami secara mendalam bagaimana kegiatan di pabrik berlangsung dan faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi serta efektivitas operasionalnya.
- 3) Pengumpulan data adalah langkah strategis dalam penelitian yang bertujuan untuk menghasilkan informasi valid dan relevan guna menjawab rumusan permasalahan yang diungkapkan dalam penelitian. Proses pengumpulan data melibatkan teknik-teknik spesifik yang digunakan untuk mengumpulkan data primer atau sekunder, bergantung pada tujuan dan metodologi penelitian

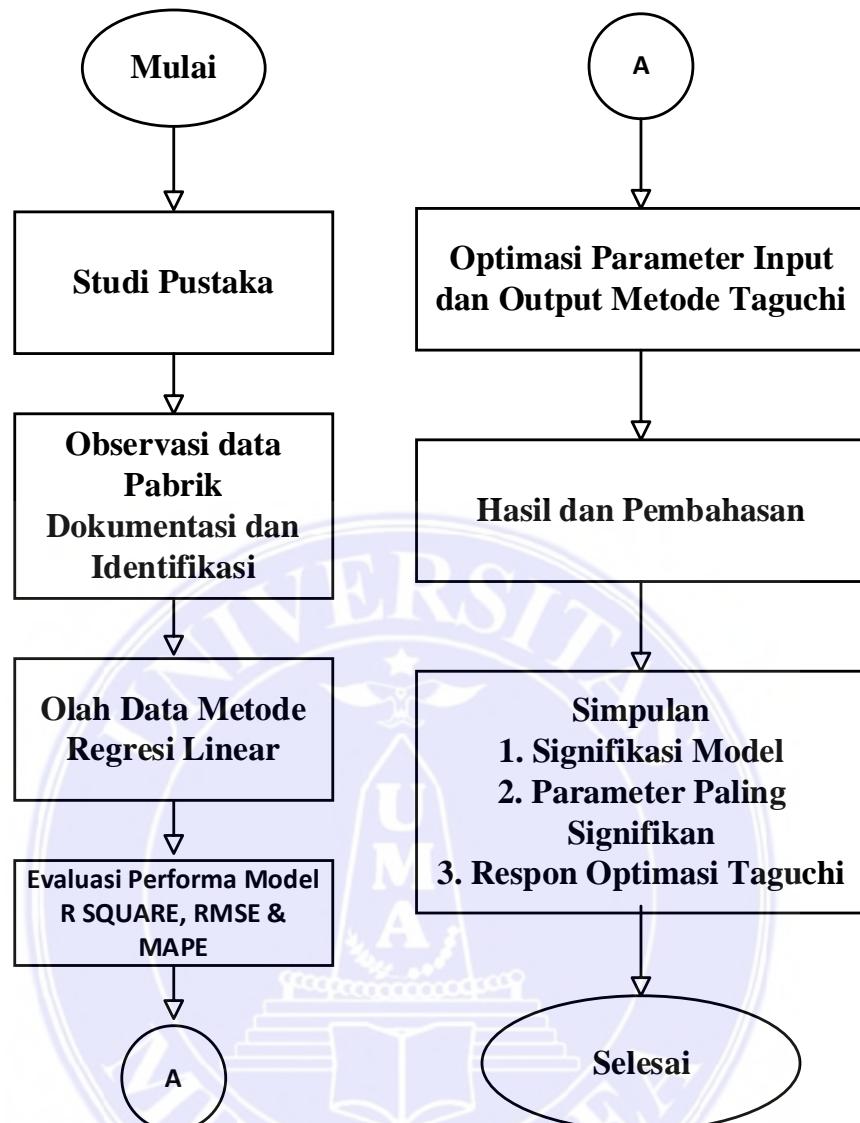
3.5 Diagram alur penelitian

Gambar 3.2 memperlihatkan alur pelaksanaan penelitian terkait penggunaan air umpan pada *boiler* dengan memvariasikan tekanan uap kering dan temperatur gas asap, melalui pendekatan analisis regresi linear dan optimasi menggunakan Metode Taguchi. Penelitian diawali dengan studi pustaka yang diperoleh dari berbagai sumber literatur, baik buku maupun jurnal, untuk memahami teori dasar, metode, serta hasil-hasil penelitian sebelumnya sebagai landasan konseptual. Tahap berikutnya adalah observasi lapangan untuk melakukan pengumpulan data di stasiun *boiler* sebagai objek penelitian. Data yang dikumpulkan mencakup

parameter-parameter penting seperti tekanan uap kering dan temperatur gas asap yang relevan untuk dianalisis.

Setelah data diperoleh, tahap selanjutnya adalah pengolahan data menggunakan metode regresi linear guna mengetahui hubungan antara variabel independen (tekanan dan suhu) dengan variabel dependen berupa kebutuhan air umpan. Model regresi kemudian dievaluasi performanya dengan pengujian R-Square, RMSE, dan MAPE untuk memastikan tingkat akurasi dan keandalan model. Apabila hasil evaluasi menunjukkan performa yang layak, langkah berikutnya adalah optimasi parameter input dan output menggunakan Metode Taguchi. Metode ini digunakan untuk menentukan kombinasi level tekanan dan suhu yang dapat menghasilkan kebutuhan air umpan yang optimal.

Hasil optimasi dan analisis regresi kemudian dibahas untuk mendapatkan simpulan, yang meliputi signifikansi model regresi, identifikasi parameter paling signifikan, serta respon optimasi yang dihasilkan melalui Metode Taguchi. Penelitian diakhiri dengan perumusan simpulan sebagai dasar rekomendasi pengaturan parameter operasional *boiler* di masa mendatang.



Gambar 3.2 Diagram alur penelitian

3.5.1 Persiapan dan Proses Pengolahan Data *Run Order* Taguchi

Penelitian ini menggunakan data operasional yang diperoleh dari pencatatan rutin di *worksheet* Stasiun *Boiler* pada salah satu perusahaan pabrik kelapa sawit (PKS) yang berlokasi di Provinsi Sumatera Utara.. Parameter yang diamati meliputi tekanan uap kering (Kg/cm²), temperatur gas asap (°C), dan penggunaan air umpan (m³). Pencatatan dilakukan secara manual setiap satu jam selama *boiler* beroperasi, terhitung sejak November 2024 hingga awal Mei 2025, sehingga menghasilkan data dalam jumlah besar, mencapai ribuan data. Mengingat volume data yang tinggi serta mempertimbangkan kebijakan kerahasiaan perusahaan, data mentah tidak disajikan pada bab ini maupun pada lampiran. Beberapa hasil analisis yang telah diolah dari data tersebut dicantumkan pada lampiran sebagai bukti validitas penelitian.

Sebagai tahap awal pengolahan, data historis disaring dan dikelompokkan untuk disesuaikan dengan format desain eksperimen Taguchi. Penelitian ini menerapkan Matriks Ortogonal L27 (3³) yang dirancang untuk dua faktor masing-masing tiga level. Matriks ini dipilih karena mampu menyajikan kombinasi eksperimen secara komprehensif namun tetap efisien dari segi jumlah percobaan, sekaligus valid secara statistik.

Adapun dua faktor yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- Faktor A : Tekanan Uap Kering
- Faktor B : Temperatur Gas Asap

Tabel 3.3. *Run Order Taguchi* yang telah ditetapkan dan diolah di regresi linear

| Control Factor | Variasi | | |
|--|---------|---------|---------|
| | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
| Tekanan Uap Kering (Kg/cm ²) | 19,1 | 19,5 | 19,7 |
| Temperatur Gas Asap (°C) | 279 | 288 | 296 |

Penetapan level untuk tekanan uap kering didasarkan pada kombinasi antara wawancara dengan operator dan analisis data historis. Berdasarkan keterangan teknis di lapangan, tekanan minimum yang diperbolehkan secara operasional adalah 19 Kg/cm², tekanan stabil berada pada 19,5 Kg/cm², dan batas maksimum yang masih dianggap aman adalah 20 Kg/cm². Namun, melalui penelusuran data selama enam bulan, ditemukan bahwa tekanan 19,1 Kg/cm², 19,5 Kg/cm², dan 19,7 Kg/cm² merupakan tiga nilai yang paling sering muncul dan tercatat lebih dari tiga kali. Oleh karena itu, ketiga titik tersebut dipilih sebagai level eksperimen, karena mewakili kondisi aktual dan memungkinkan pengambilan respon yang sah.

Sementara itu, untuk temperatur gas asap, operator hanya memberikan batas maksimum yakni tidak boleh melebihi 350°C, tanpa menyebutkan nilai stabil atau minimum yang pasti. Maka dari itu, pemilihan level temperatur dilakukan berdasarkan kemunculan terbanyak dalam data historis, yaitu 279°C, 288°C, dan 296°C, yang masing-masing juga telah tercatat lebih dari tiga kali selama periode observasi. Ketiga titik ini dianggap mencerminkan variasi temperatur yang realistik dalam kondisi operasional *boiler*.

Setelah level faktor ditentukan, desain eksperimen disusun menggunakan perangkat lunak Minitab versi 22, melalui tahapan berikut:

1. Buka menu Stat → DOE → Taguchi → Create Taguchi Design.
2. Pilih 3 level *design* dan masukkan 2 faktor, kemudian klik *Design*.
3. Pilih Matriks L27, lalu tetapkan faktor dan level sebagai berikut:
 - Faktor A: Tekanan Uap Kering (19,1 19,5 19,7)
 - Faktor B: Temperatur Gas Asap (279 288 296)
4. Klik *OK* untuk menghasilkan *run order* eksperimen.

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | C11 | C12 | C13 |
|----|------|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 19,1 | 279 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 19,1 | 279 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 19,1 | 279 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 19,1 | 288 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 19,1 | 288 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 19,1 | 288 | | | | | | | | | | | |
| 7 | 19,1 | 296 | | | | | | | | | | | |
| 8 | 19,1 | 296 | | | | | | | | | | | |
| 9 | 19,1 | 296 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 19,5 | 279 | | | | | | | | | | | |

Gambar 3.3 Tampilan *Run Order* Taguchi Matriks L27

Run order yang terbentuk dari Minitab berisi 27 kombinasi unik dari dua faktor dengan tiga level masing-masing. Kombinasi tersebut kemudian diekspor ke Microsoft Excel untuk dilengkapi dengan nilai respon (Y), yaitu penggunaan air umpan yang diambil dari data historis aktual. Untuk memastikan validitas, hanya *run order* yang benar-benar terjadi minimal tiga kali di lapangan yang digunakan. Dari masing-masing kombinasi nyata, diambil nilai rata-rata dari tiga data aktual untuk mewakili nilai Y, dengan tujuan mengurangi pengaruh fluktuasi dan mengeliminasi potensi *noise* dalam data.

3.5.2 Transisi dari *Run Order Taguchi* ke Analisis Regresi Linear

Setelah seluruh kombinasi pada desain eksperimen Taguchi L27 ditentukan dan dikaitkan dengan data historis yang relevan, langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah menerapkan analisis regresi linear. Penggunaan regresi linear bertujuan untuk mengetahui hubungan matematis antara variabel-variabel *input* (tekanan uap kering dan temperatur gas asap) terhadap variabel *output* berupa penggunaan air umpan.

Dalam konteks penelitian ini, regresi linear berganda tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis statistik untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter, tetapi juga sebagai alat validasi terhadap model yang diperoleh dari desain eksperimen.

Namun demikian, regresi linear hanya menggambarkan hubungan secara umum, tanpa mempertimbangkan variasi antar level faktor maupun interaksi dalam kombinasi eksperimen. Oleh karena itu, untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif dan sistematis mengenai pengaruh tiap level parameter proses, serta untuk tujuan optimasi, maka analisis nanti akan dilanjutkan menggunakan metode Taguchi.

Metode Taguchi dipilih karena mampu mengevaluasi kombinasi faktor dalam suatu desain eksperimen yang efisien, dan sekaligus mempertimbangkan kestabilan proses melalui analisis rasio sinyal terhadap *noise (S/N ratio)*. Dalam konteks ini, karakteristik respon yang digunakan adalah “*Smaller is Better*”, sesuai dengan kebutuhan pengendalian kualitas terhadap *output* penggunaan air umpan.

Dengan menggunakan data *run order* hasil desain Taguchi yang telah dilengkapi dengan nilai respon aktual (penggunaan air umpan rata-rata), regresi linear dilakukan sebagai dasar pengembangan model matematis yang menggambarkan hubungan linier antar variabel. Tahapan analisis regresi disajikan pada subbab berikut.

3.5.3 Uji Normalitas Residual Regresi

Sebelum melanjutkan ke proses analisis regresi linear, penting untuk memastikan bahwa salah satu asumsi dasar regresi yaitu normalitas *residual* terpenuhi. Pengujian normalitas ini dilakukan untuk memverifikasi bahwa nilai galat (*residual*) dari model regresi menyebar secara normal, sehingga hasil estimasi model valid dan dapat diinterpretasikan secara statistik.

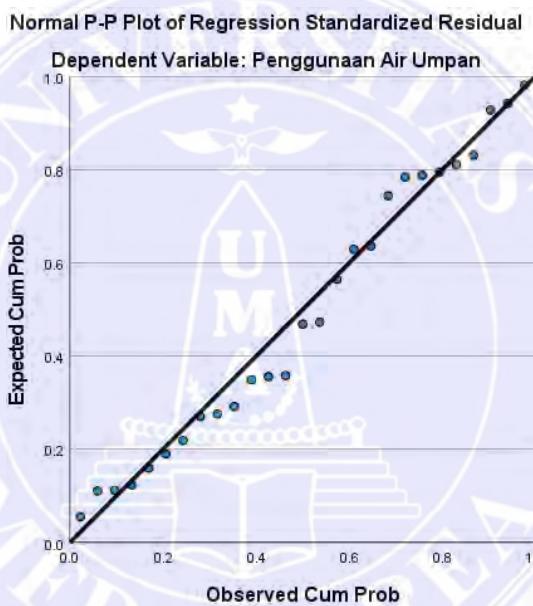
Normalitas *residual* diuji menggunakan grafik *Normal P-P Plot of Standardized Residual*, yang dibuat melalui perangkat lunak IBM SPSS Statistics versi 27. Grafik ini menampilkan hubungan antara probabilitas kumulatif observasi aktual dan ekspektasi teoritisnya dalam distribusi normal. Jika titik-titik residual menyebar mendekati garis diagonal, maka dapat disimpulkan bahwa residual terdistribusi normal.

Langkah-langkah Pembuatan *Normal P-P Plot* di SPSS adalah sebagai berikut:

1. Buka file data di SPSS yang telah berisi nilai variabel X_1 (tekanan uap kering), X_2 (temperatur gas asap), dan Y (penggunaan air umpan)
2. Pilih menu *Analyze* → *Regression* → *Linear*.
3. Masukkan variabel Penggunaan air umpan ke dalam kotak *Dependent*.

4. Masukkan Tekanan Uap Kering dan Temperatur Gas Asap ke dalam kotak *Independent*
5. Klik tombol *Plots* kemudian centang pilihan *Normal probability plot (P-P)* pada bagian *Standardized Residual Plots*.
6. Klik *Continue*, lalu tekan *OK*.

Hasil pengolahan akan menampilkan grafik *Normal P-P Plot* seperti pada Gambar 3.4 berikut:



Gambar 3.4 Grafik *Normal P-P Plot* dari Residual Standarisasi Regresi

Dari gambar terlihat bahwa sebagian besar titik berada di sekitar garis diagonal, yang menunjukkan bahwa *residual* dari model regresi menyebar secara mendekati distribusi normal. Dengan demikian, asumsi normalitas *residual* dapat dianggap terpenuhi, dan proses regresi linear berganda dapat dilanjutkan ke tahap analisis selanjutnya.

3.5.4 Proses Analisis Regresi Linear

Proses analisis regresi linear berganda dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel, dengan memanfaatkan fitur *Data Analysis Toolpack*. Analisis ini bertujuan untuk membentuk model matematis yang menggambarkan hubungan antara dua variabel bebas, yaitu tekanan uap kering (X_1) dan temperatur gas asap (X_2), terhadap variabel terikat berupa penggunaan air umpan (Y). Data yang digunakan berasal dari hasil *run order* Taguchi sebanyak 27 kombinasi eksperimen, yang telah dilengkapi dengan nilai respon aktual berdasarkan data historis boiler selama enam bulan, yaitu dari November 2024 hingga awal Mei 2025.

Nilai Y (penggunaan air umpan) diambil dari catatan operasional manual yang dilakukan setiap satu jam di stasiun *boiler*. Dari data mentah yang terkumpul, dipilih hanya kombinasi *run order* yang benar-benar terjadi di lapangan dan tercatat setidaknya tiga kali atau lebih selama periode observasi. Nilai Y untuk setiap kombinasi ditentukan dengan mengambil rata-rata dari tiga data aktual, guna mengurangi fluktuasi harian dan menghindari pengaruh *noise*. Hal ini memastikan bahwa nilai respon yang digunakan dalam regresi tidak bersifat asumtif, tetapi benar-benar merepresentasikan kondisi nyata di lapangan yang sesuai dengan desain eksperimen Taguchi.

Langkah-langkah pengerjaan regresi linear di Excel dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan data

- Susun data ke dalam excel sesuai dengan *run order* Taguchi yang telah ditetapkan

- Tekanan Uap Kering (X_1)
- Temperatur Gas Asap (X_2)
- Penggunaan Air Umpam (Y)

2. Pengolahan Regresi di Excel

- Aktifkan *Data Analysis Toolpak* melalui menu File → Options → Add-ins → *Analysis Toolpak*
- Buka tab Data, lalu klik *Data Analysis* → *Regression*.
- Pada bagian *Input Y Range*, pilih kolom Dimana penggunaan air umpan dibuat.
- Pada bagian *Input X Range*, pilih kolom Dimana tekanan dan temperature dibuat.
- Centang opsi *Labels*
- Pilih lokasi keluaran hasil regresi (*Output Range*)
- Klik OK untuk menjalankan analisis

3. *Output* Yang Dihasilkan

- Koefisien Regresi, untuk mengetahui kontribusi masing-masing variabel input terhadap output.
- *R-squared* (R^2), yang menunjukkan tingkat keakuratan model dalam menjelaskan variabilitas data.
- *ANOVA Table*, untuk menguji signifikansi model secara keseluruhan.
- *P-Value*, untuk menilai signifikansi tiap variabel independen.

Untuk menilai performa dan keandalan model regresi yang telah dibentuk, dilakukan evaluasi menggunakan beberapa indikator kesalahan prediksi, yaitu

Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Keempat parameter ini bertujuan untuk mengukur tingkat deviasi antara nilai aktual dan nilai prediksi dari model regresi terhadap penggunaan air umpan.

Perhitungan masing-masing indikator dilakukan secara otomatis menggunakan fungsi bawaan dalam Microsoft Excel, berdasarkan data selisih antara hasil prediksi model dan nilai aktual. Adapun rumus-rumus dasar dari masing-masing parameter telah dijelaskan secara teoritis pada Bab II.

Sebagai hasil akhir dari proses pengolahan data, berikut disajikan tabel yang memuat seluruh kombinasi level tekanan uap kering dan temperatur gas asap berdasarkan desain matriks Taguchi L27

Tabel 3.4 Hasil *Run Order* Taguchi Minitab

| Tekanan Uap Kering (Kg/cm ²) | Temperatur Gas Asap (°C) |
|--|--------------------------|
| 19,1 | 279 |
| 19,1 | 279 |
| 19,1 | 279 |
| 19,1 | 288 |
| 19,1 | 288 |
| 19,1 | 288 |
| 19,1 | 296 |
| 19,1 | 296 |
| 19,1 | 296 |
| 19,5 | 279 |
| 19,5 | 279 |
| 19,5 | 279 |
| 19,5 | 288 |
| 19,5 | 288 |
| 19,5 | 288 |
| 19,5 | 296 |
| 19,5 | 296 |

| | |
|------|-----|
| 19,5 | 296 |
| 19,7 | 279 |
| 19,7 | 279 |
| 19,7 | 279 |
| 19,7 | 288 |
| 19,7 | 288 |
| 19,7 | 288 |
| 19,7 | 296 |
| 19,7 | 296 |
| 19,7 | 296 |

Tabel ini menjadi dasar input dalam analisis regresi linear berganda yang bertujuan untuk mengetahui hubungan dan pengaruh masing-masing variabel terhadap penggunaan air umpan pada sistem *boiler*.

Model regresi yang diperoleh dari hasil pengolahan ini digunakan sebagai dasar evaluasi awal terhadap pengaruh tekanan dan temperatur dalam memengaruhi efisiensi penggunaan air umpan. Selain sebagai alat prediksi, model ini juga menjadi pembanding dalam proses optimasi parameter menggunakan metode Taguchi yang dibahas pada bab selanjutnya.

3.5.5 Proses Pengolahan Optimasi Taguchi

Setelah diperoleh hasil analisis regresi linear dan dievaluasi akurasinya, langkah selanjutnya adalah melakukan optimasi parameter operasional menggunakan metode Taguchi, dengan tujuan untuk menentukan kombinasi level terbaik dari tekanan uap kering dan temperatur gas asap yang menghasilkan penggunaan air umpan paling efisien.

Optimasi dilakukan dengan memanfaatkan Minitab versi 22, yang sebelumnya telah digunakan dalam proses penyusunan desain eksperimen Taguchi

matriks L27 sebagaimana dijelaskan pada Bab III (Subbab 3.6). Pada tahap awal, *run order* telah dibentuk berdasarkan kombinasi dua faktor, masing-masing dengan tiga level:

- Faktor A: Tekanan Uap Kering (19,1 19,5 19,7 Kg/cm²)
- Faktor B: Temperatur Gas Asap (279 288 296 °C)

Data hasil percobaan dari kombinasi tersebut, berupa nilai penggunaan air umpan (Y), kemudian diimpor ke Minitab untuk dianalisis lebih lanjut. Langkah-langkah optimasi dilakukan sebagai berikut:

1. *Import* data : masukkan data penggunaan air umpan (Y) yang sebelum sudah kita buat di excel
2. Analisis Taguchi di Minitab
 - Buka menu Stat → DOE → Taguchi → Analyze Taguchi Design.
 - Masukkan *Response* data nya adalah Penggunaan Air Umpam sebagai *output*
 - Pada Options kita masukkan *Signal to Noise Ratio* nya adalah *Smaller is Better* karena tujuan nya adalah meminimalkan penggunaan air umpan.
 - Setelah itu Minitab akan menghasilkan nilai *Signal-to-Noise Ratio* (*S/N Ratio*) untuk masing-masing kombinasi.
 - Ditampilkan pula *main effects plot*, yang menunjukkan pengaruh masing-masing level dari faktor terhadap respon.

Dengan metode ini, diperoleh kombinasi level tekanan dan temperatur yang paling minimal dalam menekan penggunaan air umpan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini melalui regresi linear dan metode taguchi untuk optimasi diperoleh kesimpulan berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis grafik *Main Effects Plot for SN Ratios* dengan pendekatan metode Taguchi dan kriteria “Smaller is Better”, diperoleh bahwa level tekanan uap kering yang paling optimal dalam mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal adalah sebesar 19,5 Kg/cm². Hal ini ditunjukkan oleh nilai *SN ratios* yang paling rendah dibandingkan dengan dua level lainnya, yaitu sekitar -109,665. Nilai tersebut menggambarkan kondisi proses yang paling stabil dan efisien dalam mengurangi konsumsi air umpan, karena semakin kecil nilai *SN ratios* pada metode ini, maka semakin kecil pula variasi dan jumlah konsumsi yang dihasilkan. Dengan demikian, tekanan uap kering sebesar 19,5 Kg/cm² dapat diidentifikasi sebagai kondisi yang paling efektif untuk mencapai penggunaan air umpan yang lebih minimal.
2. Analisis terhadap variabel temperatur gas asap menunjukkan hasil yang signifikan dalam proses optimasi menggunakan metode Taguchi. Berdasarkan grafik *SN Ratio* dengan kriteria “Smaller is Better”, nilai terkecil tercapai pada temperatur 279°C dengan nilai sekitar -109,437. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada suhu tersebut, konsumsi air umpan berada pada titik terendah, yang berarti penggunaan air umpan menjadi

paling minimal. Dengan demikian, temperatur gas asap sebesar 279°C dapat diidentifikasi sebagai level yang paling optimal dalam mengoptimalkan penggunaan air umpan agar lebih minimal.

3. Melalui analisis kombinasi antara dua faktor utama, yaitu tekanan uap kering dan temperatur gas asap, diperoleh kondisi operasi yang memberikan hasil paling optimal terhadap penggunaan air umpan. Berdasarkan hasil *Taguchi Predict*, kombinasi tekanan uap kering sebesar 19,5 Kg/cm² dan temperatur gas asap sebesar 279°C menghasilkan nilai *S/N Ratio* sebesar – 109,358 dengan nilai *Mean* prediksi penggunaan air umpan sebesar 293894 m³. Sementara itu, hasil *Response Optimization* menunjukkan nilai *Fit* penggunaan air umpan sebesar 295268 m³ dengan tingkat *Composite Desirability* sebesar 0,738519, yang menandakan kondisi proses mendekati kriteria optimal. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa prediksi dari kedua metode memberikan nilai yang konsisten dan saling mendukung dalam mengidentifikasi kombinasi parameter operasi terbaik, yaitu tekanan uap kering 19,5 Kg/cm² dan temperatur gas asap 279°C, untuk mencapai penggunaan air umpan yang lebih minimal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dengan regresi linear dan metode Taguchi untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan air umpan melalui parameter tekanan uap kering dan temperatur gas asap, terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan bahan pertimbangan dan pengembangan untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Saran Kepada Pabrik Tempat Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan metode Taguchi, yang dilakukan pada tempat penelitian di salah satu pabrik kelapa sawit (PKS) yang berlokasi di Sumatera Utara, disarankan agar pihak pabrik, khususnya pada stasiun boiler, mampu mempertahankan pengaturan tekanan uap kering pada level 19,5 Kg/cm² dan temperatur gas asap pada 279°C saat boiler beroperasi. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan konsumsi air umpan secara berkelanjutan. Kombinasi tersebut terbukti memberikan nilai tertinggi terhadap minimum penggunaan air umpan, yang berimplikasi langsung pada penghematan sumber daya serta peningkatan efisiensi sistem air umpan boiler secara keseluruhan.

Lebih lanjut, perusahaan juga disarankan untuk melakukan pemantauan berkala terhadap performa *boiler* pada parameter yang telah dioptimalkan ini, guna memastikan bahwa kondisi lapangan tetap sesuai dengan model yang telah diteliti.

2. Pengembangan Lebih Lanjut Variabel Penelitian

Penelitian ini secara khusus memfokuskan pada dua parameter utama, yaitu tekanan uap kering dan temperatur gas asap. Namun, data operasional yang terdapat dalam *worksheet* stasiun *boiler* menunjukkan adanya variabel lain yang berpotensi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penggunaan air umpan. Beberapa di antaranya adalah : Temperatur Uap Kering, *Blowdown*, Tekanan Uap Basah, Soot Blowing, Pemakaian Air dan daya Listrik yang dipakai yaitu PLN atau Tenaga dari genset pabrik serta jam operasi *boiler* saat dipakai atau tidak dipakai serta suhu disekitar *boiler*

3. Metode Alternatif

- *Response Surface Methodology (RSM)*

Metode ini direkomendasikan karena mampu mengevaluasi interaksi antar variabel proses secara lebih mendalam dan menyajikan hasil dalam bentuk model prediktif serta grafik 3D. RSM efektif untuk mengidentifikasi kombinasi parameter yang optimal secara visual dan matematis.

- Regresi Non Linear

Pendekatan ini cocok digunakan untuk memodelkan hubungan kompleks yang tidak linier antara variabel-variabel proses dan konsumsi air umpan. Dengan dataset historis yang cukup, regresi non-linear dapat memberikan estimasi akurat tanpa perlu eksperimen tambahan.

- Machine Learning & Deep Learning

Metode ini dapat digunakan untuk membangun model prediktif yang mampu mengenali pola kompleks serta hubungan non-linear antara parameter operasional boiler dan konsumsi air umpan. ML dapat memanfaatkan algoritma seperti *Random Forest* atau *Support Vector Regression*, sedangkan DL melalui jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Networks*) maupun model *time series* seperti LSTM (*Long Short Term Memory*) dapat mengakomodasi data berurutan. Pendekatan ini berpotensi memberikan hasil prediksi yang lebih akurat, terutama jika didukung dataset yang besar, bervariasi, dan berkualitas baik

DAFTAR PUSTAKA

Adnan Rusdy, A., Purnawansyah, & Herman. (2022). *Penerapan Metode Regresi Linear pada Prediksi Penawaran dan Permintaan Obat Studi Kasus Aplikasi Point of Sales*. 3(2), 121–126.

Agrawal, T., Gautam, R., Agrawal, S., Singh, V., Kumar, M., & Kumar, S. (2020). Optimization of engine performance parameters and exhaust emissions in compression ignition engine fueled with biodiesel-alcohol blends using taguchi method, multiple regression and artificial neural network. *Sustainable Futures*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100039>

Barma, M. C., Saidur, R., Rahman, S. M. A., Allouhi, A., Akash, B. A., & Sait, S. M. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 970–983. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.187>

Cengel, A. Y. (2008). *INTRODUCTION TO THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER Second Edition*. <http://www.primisonline.com>

Cengel, A Yunus, Boles A. Michael, & Kanoglu, M. (2019). *Thermodynamics An Engineering Approach Ninth Edition*.

Chen, W. H., Chen, K. H., Chein, R. Y., Ong, H. C., & Arunachalam, K. D. (2022). Optimization of hydrogen enrichment via palladium membrane in vacuum environments using Taguchi method and normalized regression analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(100), 42280–42292. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.060>

Ejeta, L. O. (2024). The effects of joint process parameters of two-step manufacturing processes on the mechanical performance of biocomposites using Taguchi and multiple regression techniques. *Cleaner Engineering and Technology*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100832>

FAHRI, M. (2023). *OPTIMISASI ENERGI PADA ALAT PERAUT LIDI SAWIT KAPASITAS 100 KG/JAM*.

Fasina, E., Sawyerr, B. A., Abdullahi, Y. U., & Oke, S. A. (2023). A comparison of two hybrid optimization techniques: the Taguchi-BBD-firefly and the Taguchi-regression-firefly methods on the IS 2062-E250 steel plates boring problem. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00215-7>

Fatimura, M. (2015). *TINJAUAN TEORITIS PERMASALAHAN BOILER FEEDWATER PADA PENGOPERASIAN BOILER YANG DIPERGUNAKAN DALAM INDUSTRI*.

Febriani, S. D. A., & Purwanto, M. R. (2021). Analysis of Boiler Engine Efficiency Unit 2 PT. PJB UP Paiton. *Journal of Physics: Conference Series*, 1805(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1805/1/012015>

Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. In *Geoscientific Model Development* (Vol. 15, Issue 14, pp. 5481–5487). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer Tenth Edition*.

Idris, M., Abdul Rasid, A. F., Mohd Zamberi, M., & Zhang, Y. (2024). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: A Review of Prospects and Challenges. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 124(1), 28–52. <https://doi.org/10.37934/arfnts.124.1.2852>

Idris, M., Hermanto, T., Syah, R., Husein, M., & Sitinjak, S. (2024). SINERGI Polmed : JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN PEMBUATAN BIODIESEL DARI LIMBAH MINYAK GORENG: STUDI PERBANDINGAN BERBAGAI WAKTU REAKSI I N F O A R T I K E L. In *Jl. Kolam no. 1 Medan Estate, Deli Serdang*. <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index>

Idris, M., Hermawan, I., & Sihombing, V. (2022). Pengaruh Kombinasi Cangkang Kemiri Dengan Tempurung Kelapa Terhadap Nilai Kalor Briket. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 1(2), 35–44. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v1i2.22>

Jadhav, P. K., Sahai, R. S. N., Solanke, S., & Gawande, S. H. (2024). Multi-objective optimization of EN19 steel milling parameters using Taguchi, ANOVA, and TOPSIS approaches. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100102>

Jusuf Zulikar, A., & Gulo, Z. (2025). Enhancement of Mechanical Strength in Woven Fiber Laminates Through Taguchi Optimization. *Material and Thermal Engineering Journal (MATEJ)*, 1(1), 46–55. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15306947>

Kate, G. K., Nayak, C. B., & Thakare, S. B. (2021). Optimization of sustainable high-strength–high-volume fly ash concrete with and without steel fiber using Taguchi method and multi-regression analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00472-6>

Klistafani, Y., Arsal, R., & Rahmawati, R. (2021). Rancang Bangun Sistem Pengolahan Air Umpam Boiler Untuk Pengembangan Praktikum Sistem Pembangkit II. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 19(1), 136–145. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v19i2.3026>

Kumar Ball, A., Das, R., Shekhar Roy, S., Ranjan Kisku, D., & Chandra Murmu, N. (2019). *Experimentation modelling and optimization of electrohydrodynamic inkjet microfabrication approach: a Taguchi regression analysis*. <https://doi.org/10.1007/s12046-019-1146-5S>

Kumar, S. Y., Bhaskar, H. B., Nagamadhu, M., Chandrashekhar, R., & Lohith, N. (2025). Taguchi-Based Experimentation Technique in Combination with Multifactor Regression for Optimization of Refrigerants, Design and Process Parameters to Maximize Heat Transfer in Heat Pumps. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 106(3), 889–896. <https://doi.org/10.1007/s40032-025-01174-z>

Lewis, C. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods*.

Mallick, A. Ranjan. (2015). *Practical boiler operation engineering and power plant* (4th ed.). PHI Learning Private Limited.

MT, Y. I., M.Si, S. S. Gimelliya. D., & Pasaribu, N. S. (2023). *PERHITUNGAN STEAM YANG DIBUTUHKAN PADA PROSES PELUMATAN BUAH KELAPA SAWIT DI UNIT DIGESTER PT. PERKEBUNAN SUMATERA UTARA PMKS TANJUNG KASAU* (Issue 8).

Nandagopal, M., Sivakumar, K., & Sengottuvelan, M. (2021). Process parameter optimization to reduce cold metal defect in ferrous casting using Taguchi technique and regression analysis. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7917–7921.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.748>

Nurhaswinda, Zulkifli, A., Gusniati, J., Zulefni Septi, M., Afendi Aldania, R., Asni, W., & Fitriani, Y. (2025). *Tutorial uji normalitas dan uji homogenitas dengan menggunakan aplikasi SPSS* (Vol. 1, Issue 2).
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Nuryadi, S. Pd. , M. P., Tutut Dewi Astuti, SE. , M. S. A. CA. , C., Endang Sri Utami., M. Si. , Ak. , C., & M. Budiantara, SE. ,M. SI. ,Ak, C. (2017). *DASAR-DASAR STATISTIK PENELITIAN* (1st ed.). SIBUKU MEDIA. www.sibuku.com

Rahardja, I. B., Abinanda, E., & Siregar, L. A. (2022). Water Tube Boiler Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 45 Ton/Jam. *Jurnal Citra Widya Edukasi*, 14(1).

Schneider, P., & Xhafa, F. (n.d.). *Anomaly Detection and Complex Event Processing Over IoT Data Streams With Application to eHealth and Patient Data Monitoring*.

Sharma, N., Kumar, K., Raj, T., & Kumar, V. (2019). Porosity exploration of SMA by Taguchi, regression analysis and genetic programming. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 139–146. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1236-8>

Soejanto, I. (2009). *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi* (1st ed.). Graha Ilmu.

Speight, J. G. (2019). Unconventional gas. In *Natural Gas* (pp. 59–98). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809570-6.00003-5>

Subagyo, R. (2018). *SISTEM PEMBANGKIT DAN TURBIN UAP*.
https://mesin.ulm.ac.id/assets/dist/bahan/Sistem_Pembangkit_dan_Turbin_Uap.pdf

Venkatesan, G., Kulasekharan, N., Muthukumar, V., & Iniyan, S. (2015). Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization. *Desalination*, 370, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.05.011>

Wibisono, Y. (2015). *METODE STATISTIK* (3rd ed.). Gadjah Mada University Press.

Wilastari, S., Hidayat, T. N., & Akpelni, P. B. (2021). PENCEGAHAN KERAK DAN KOROSI UMPAN KETEL UAP DI PG MOJO SRAGEN. In *Jurnal Sains Teknologi Transportasi Maritim* (Vol. 3, Issue 1).

WOODRUFF. B EVERETT, LAMMERS. B HERBERT, & LAMMERS. F THOMAS. (2017). *STEAM PLANT OPERATION 10TH EDITION*.

Yu, J. (2022). *Fundamental Principles of Nuclear Engineering*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-16-0839-1>

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Hasil Analisis Data Regresi Linear Pada Excel

| No | Tekanan Uap Kering (Kg/cm ²) | Y Ave | 307238,0 |
|----|--|-------|----------------|
| | | | 27 Sum (Total) |
| 1 | 19,1 | 279 | 292903,9 |
| 2 | 19,1 | 279 | 305854,2 |
| 3 | 19,1 | 279 | 309983,3 |
| 4 | 19,1 | 288 | 298330,8 |
| 5 | 19,1 | 288 | 301858,6 |
| 6 | 19,1 | 288 | 303126,8 |
| 7 | 19,1 | 296 | 308372,8 |
| 8 | 19,1 | 296 | 316897,3 |
| 9 | 19,1 | 296 | 322699,2 |
| 10 | 19,5 | 279 | 282654,4 |
| 11 | 19,5 | 279 | 285657,3 |
| 12 | 19,5 | 279 | 290564,2 |
| 13 | 19,5 | 288 | 301068,3 |
| 14 | 19,5 | 288 | 301882,7 |
| 15 | 19,5 | 288 | 303173,5 |
| 16 | 19,5 | 296 | 320634,2 |
| 17 | 19,5 | 296 | 325661,3 |
| 18 | 19,5 | 296 | 330893,1 |
| 19 | 19,7 | 279 | 298780,5 |
| 20 | 19,7 | 279 | 298931,4 |
| 21 | 19,7 | 279 | 302666,9 |
| 22 | 19,7 | 288 | 299256,5 |
| 23 | 19,7 | 288 | 315893,5 |
| 24 | 19,7 | 288 | 316493,8 |
| 25 | 19,7 | 296 | 317335,7 |
| 26 | 19,7 | 296 | 317384,3 |
| 27 | 19,7 | 296 | 326466,2 |

| Y' | Y' | Intercept | 4559,115 | 1416,228 | Y-Y' |
|-----------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 293444,3 | 293444,3 | -188762,6 | 87079,1 | 395127,7 | -540,3668 |
| 293444,3 | 293444,3 | -188762,6 | 87079,1 | 395127,7 | 12409,93 |
| 293444,3 | 293444,3 | -188762,6 | 87079,1 | 395127,7 | 16539,03 |
| 306190,3 | 306190,3 | -188762,6 | 87079,1 | 407873,8 | -7859,523 |
| 306190,3 | 306190,3 | -188762,6 | 87079,1 | 407873,8 | -4331,723 |
| 306190,3 | 306190,3 | -188762,6 | 87079,1 | 407873,8 | -3063,523 |
| 317520,2 | 317520,2 | -188762,6 | 87079,1 | 419203,6 | -9147,351 |
| 317520,2 | 317520,2 | -188762,6 | 87079,1 | 419203,6 | -622,8507 |
| 317520,2 | 317520,2 | -188762,6 | 87079,1 | 419203,6 | 5179,049 |
| 295267,9 | 295267,9 | -188762,6 | 88902,74 | 395127,7 | -12613,51 |
| 295267,9 | 295267,9 | -188762,6 | 88902,74 | 395127,7 | -9610,613 |
| 295267,9 | 295267,9 | -188762,6 | 88902,74 | 395127,7 | -4703,713 |
| 308014 | 308014 | -188762,6 | 88902,74 | 407873,8 | -6945,669 |
| 308014 | 308014 | -188762,6 | 88902,74 | 407873,8 | -6131,269 |
| 308014 | 308014 | -188762,6 | 88902,74 | 407873,8 | -4840,469 |
| 319343,8 | 319343,8 | -188762,6 | 88902,74 | 419203,6 | 1290,403 |
| 319343,8 | 319343,8 | -188762,6 | 88902,74 | 419203,6 | 6317,503 |
| 319343,8 | 319343,8 | -188762,6 | 88902,74 | 419203,6 | 11549,3 |
| 296179,7 | 296179,7 | -188762,6 | 89814,57 | 395127,7 | 2600,764 |
| 296179,7 | 296179,7 | -188762,6 | 89814,57 | 395127,7 | 2751,664 |
| 296179,7 | 296179,7 | -188762,6 | 89814,57 | 395127,7 | 6487,164 |
| 308925,8 | 308925,8 | -188762,6 | 89814,57 | 407873,8 | -9669,292 |
| 308925,8 | 308925,8 | -188762,6 | 89814,57 | 407873,8 | 6967,708 |
| 308925,8 | 308925,8 | -188762,6 | 89814,57 | 407873,8 | 7568,008 |
| 320255,6 | 320255,6 | -188762,6 | 89814,57 | 419203,6 | -2919,92 |
| 320255,6 | 320255,6 | -188762,6 | 89814,57 | 419203,6 | -2871,32 |
| 320255,6 | 320255,6 | -188762,6 | 89814,57 | 419203,6 | 6210,58 |

| 0,561279025 | 171742,2284 | 1497540038 | 4143885135 | 0,361385509 |
|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| ABS_Y-Y'/Y | ABS_Y-Y' | SSE | SST | |
| 0,00184486 | 540,3667605 | 291996,2359 | 205465042,5 | |
| 0,04057467 | 12409,93324 | 154006443 | 1914769,188 | |
| 0,053354594 | 16539,03324 | 273539620,5 | 7536936,455 | |
| 0,026344993 | 7859,522982 | 61772101,5 | 79337354,11 | |
| 0,014350173 | 4331,722982 | 18763823,99 | 28937426,35 | |
| 0,010106408 | 3063,522982 | 9385173,06 | 16901569,55 | |
| 0,029663287 | 9147,350734 | 83674025,45 | 1287880,319 | |
| 0,001965466 | 622,8507339 | 387943,0367 | 93303006,65 | |
| 0,016049154 | 5179,049266 | 26822551,3 | 239050194,3 | |
| 0,044625213 | 12613,51279 | 159100705 | 604351021,7 | |
| 0,033643855 | 9610,612792 | 92363878,24 | 465724534,4 | |
| 0,016188205 | 4703,712792 | 22124914,03 | 278014000,8 | |
| 0,023070077 | 6945,669013 | 48242318,04 | 38064603,97 | |
| 0,020310104 | 6131,269013 | 37592459,72 | 28678722,4 | |
| 0,015966003 | 4840,469013 | 23430140,27 | 16519768,86 | |
| 0,004024534 | 1290,403234 | 1665140,507 | 179459464,4 | |
| 0,019398999 | 6317,503234 | 39910847,12 | 339419757 | |
| 0,034903427 | 11549,30323 | 133386405,2 | 559566033,9 | |
| 0,008704598 | 2600,764192 | 6763974,382 | 71528491,83 | |
| 0,009205002 | 2751,664192 | 7571655,825 | 68998803,67 | |
| 0,021433345 | 6487,164192 | 42083299,25 | 20894515,03 | |
| 0,032311051 | 9669,292029 | 93495208,35 | 63703573,66 | |
| 0,022057143 | 6967,707971 | 48548954,36 | 74918513,74 | |
| 0,023912026 | 7568,007971 | 57274744,64 | 85670724,94 | |
| 0,009201359 | 2919,919782 | 8525931,531 | 101964517,7 | |
| 0,009046824 | 2871,319782 | 8244477,288 | 102948380,7 | |
| 0,019023655 | 6210,580218 | 38571306,65 | 369725526,8 | |

UNIVERSITAS MEDAN AREA

SUMMARY OUTPUT

| <i>Regression Statistics</i> | | MAE | 6360.823 |
|------------------------------|--------|-------------|-----------------|
| Multiple R | 0.80 | MSE | 55464446 |
| R Square | 0.64 | RMSE | 7447.446 |
| Adjusted R Square | 0.61 | MAPE | 2.078811 |
| Standard Error | 7899.2 | | |
| Observations | 27 | | |

ANOVA

| | <i>df</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Significance F</i> |
|------------|-----------|------------|-----------|----------|-----------------------|
| Regression | 2 | 2646345096 | 1.323E+09 | 21.20554 | 4.9619E-06 |
| Residual | 24 | 1497540038 | 62397502 | | |
| Total | 26 | 4143885135 | | | |

| | <i>Coefficients</i> | <i>Standard Error</i> | <i>t Stat</i> | <i>P-value</i> | <i>Lower 95%</i> | <i>Upper 95%</i> |
|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------|----------------|------------------|------------------|
| Intercept | -188762.574 | 134144.532 | -1.407158 | 0.1722 | -465623.2808 | 88098.13261 |
| Tekanan Uap Kering | 4559.115079 | 6094.371994 | 0.7480861 | 0.461676 | -8019.050513 | 17137.28067 |
| Temperatur Gas Asap | 1416.228469 | 218.9163045 | 6.469269 | 1.09E-06 | 964.407423 | 1868.049515 |

RESIDUAL OUTPUT

| <i>Observation</i> | <i>Predicted Penggunaan Air Umpam</i> | <i>Residuals</i> | <i>Standard Residuals</i> |
|--------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------|
| 1 | 293444.2668 | -540.367 | -0.071200998 |
| 2 | 293444.2668 | 12409.93 | 1.635185012 |
| 3 | 293444.2668 | 16539.03 | 2.1792526 |
| 4 | 306190.323 | -7859.52 | -1.035603813 |
| 5 | 306190.323 | -4331.72 | -0.570766044 |
| 6 | 306190.323 | -3063.52 | -0.403662676 |
| 7 | 317520.1507 | -9147.35 | -1.205293416 |
| 8 | 317520.1507 | -622.851 | -0.082069433 |
| 9 | 317520.1507 | 5179.049 | 0.68241332 |
| 10 | 295267.9128 | -12613.5 | -1.662009511 |
| 11 | 295267.9128 | -9610.61 | -1.266334774 |
| 12 | 295267.9128 | -4703.71 | -0.619780986 |
| 13 | 308013.969 | -6945.67 | -0.91519057 |
| 14 | 308013.969 | -6131.27 | -0.8078818 |
| 15 | 308013.969 | -4840.47 | -0.637800561 |
| 16 | 319343.7968 | 1290.403 | 0.170028959 |
| 17 | 319343.7968 | 6317.503 | 0.832420804 |
| 18 | 319343.7968 | 11549.3 | 1.521784782 |
| 19 | 296179.7358 | 2600.764 | 0.342687631 |
| 20 | 296179.7358 | 2751.664 | 0.36257085 |
| 21 | 296179.7358 | 6487.164 | 0.854776046 |
| 22 | 308925.792 | -9669.29 | -1.274066597 |
| 23 | 308925.792 | 6967.708 | 0.918094515 |
| 24 | 308925.792 | 7568.008 | 0.997192569 |
| 25 | 320255.6198 | -2919.92 | -0.384740915 |
| 26 | 320255.6198 | -2871.32 | -0.378337174 |
| 27 | 320255.6198 | 6210.58 | 0.818332178 |

PROBABILITY OUTPUT

| <i>Percentile</i> | <i>Penggunaan Air Umpam</i> |
|-------------------|-----------------------------|
| 1.851851852 | 282654.4 |
| 5.555555556 | 285657.3 |
| 9.259259259 | 290564.2 |
| 12.96296296 | 292903.9 |
| 16.666666667 | 298330.8 |
| 20.37037037 | 298780.5 |
| 24.07407407 | 298931.4 |
| 27.77777778 | 299256.5 |
| 31.481481484 | 301068.3 |
| 35.18518519 | 301858.6 |
| 38.888888889 | 301882.7 |
| 42.59259259 | 302666.9 |
| 46.2962963 | 303126.8 |
| 50 | 303173.5 |
| 53.7037037 | 305854.2 |
| 57.40740741 | 308372.8 |
| 61.11111111 | 309983.3 |
| 64.81481481 | 315893.5 |
| 68.51851852 | 316493.8 |
| 72.22222222 | 316897.3 |
| 75.92592593 | 317335.7 |
| 79.62962963 | 317384.3 |
| 83.33333333 | 320634.2 |
| 87.03703704 | 322699.2 |
| 90.74074074 | 325661.3 |
| 94.44444444 | 326466.2 |
| 98.14814815 | 330893.1 |

UNIVERSITAS MEDAN AREA

Lampiran 2 Diagram Skematik Boiler Tipe N-600 SA Takuma Water Tube



Sumber : Dokumentasi lapangan, lokasi penelitian di salah satu pabrik kelapa sawit (PKS) di Sumatera Utara.

Lampiran 3 Panel Kontrol Boiler di Tempat Penelitian



Sumber : Dokumentasi lapangan, lokasi penelitian di salah satu pabrik kelapa sawit (PKS) di Sumatera Utara.