

**OPTIMISASI PROSES PENGOLAHAN KELAPA SAWIT
MENGUNAKAN METODE *TAGUCHI* UNTUK
MENINGKATKAN *RENDEMEN CRUDE PALM OIL* DAN
MEREDUKSI KADAR *FREE FATTY ACID***

SKRIPSI

OLEH:

**NURUL WANDANA
218130021**



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

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 6/4/26

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)6/4/26

**OPTIMISASI PROSES PENGOLAHAN KELAPA SAWIT
MENGUNAKAN METODE *TAGUCHI* UNTUK
MENINGKATKAN *RENDEMEN CRUDE PALM OIL* DAN
MEREDUKSI KADAR *FREE FATTY ACID***

SKRIPSI

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

Oleh:

**NURUL WANDANA
218130021**

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

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Optimisasi Proses Pengolahan Kelapa Sawit Menggunakan Metode *Taguchi* Untuk Meningkatkan Rendemen *Crude Palm Oil* Dan Mereduksi Kadar *Free Fatty Acid*


Nama Mahasiswa : Nurul Wandana

NIM : 218130021

Program Studi : Teknik Mesin


Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh
Komisi Pembimbing


MUHAMMAD HBRIS, ST., MT

Pembimbing


Dr. Eng. Supriano, ST., MT
Dekan


Dr. Iswandi, ST., MT
Ka. Prodi

Tanggal Lulus: 22 September 2025.

HALAMAN PERNYATAAN

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

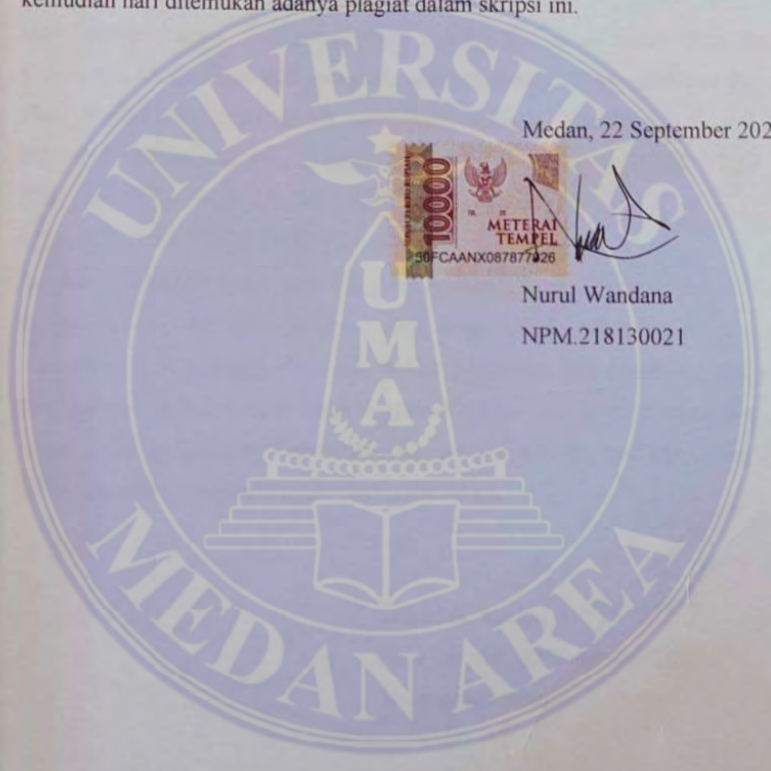
Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 22 September 2025



Nurul Wandana

NPM.218130021



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMISI**

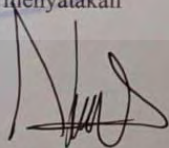
Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nurul Wandana
NPM : 218130021
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: "OPTIMISASI PROSES PENGOLAHAN KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN METODE *TAGUCHI* UNTUK MENINGKATKAN *RENDEMEN CRUDE PALM OIL* DAN MEREDUKSI KADAR *FREE FATTY ACID*".

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan Hak Bebas Royalti Nonekseklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalih media/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 sebenar-benarnya.

Dibuat di: Medan
Pada Tanggal: 22 September 2025
Yang menyatakan



(Nurul Wandana)
NPM: 218130021

ABSTRAK

Proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi Crude Palm Oil (CPO) dipengaruhi oleh variabel proses seperti suhu, tekanan, dan waktu perebusan yang menentukan kualitas serta *rendemen* minyak. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh waktu perebusan, perbedaan suhu, dan tekanan uap terhadap *rendemen* CPO dan kadar asam lemak bebas (Free Fatty Acid/FFA), menilai performa model optimasi, serta menentukan kombinasi parameter proses terbaik. Analisis dilakukan menggunakan regresi linier dan metode *Taguchi* dengan tiga faktor utama, yaitu lama waktu perebusan, Δ suhu perebusan, dan Δ tekanan uap perebusan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu perebusan berpengaruh signifikan terhadap *rendemen* CPO dan kadar FFA dengan *P-value* masing-masing 0,000 dan 0,001, sedangkan Δ suhu berpengaruh signifikan hanya terhadap *rendemen* (*P-value* 0,001). Δ tekanan uap tidak menunjukkan pengaruh signifikan (*P-value* > 0,05). Model optimasi memiliki performa sangat baik dengan R^2 sebesar 99,15% untuk *rendemen* CPO dan 92,80% untuk kadar FFA. Kombinasi optimal diperoleh pada lama perebusan 80 menit, Δ suhu 40,1°C, dan Δ tekanan uap 1,58 bar, menghasilkan *rendemen* CPO 42,17% dan FFA 2,40%. Kondisi ini dinilai paling efisien untuk meningkatkan hasil dan kualitas CPO.

Kata kunci: CPO, perebusan, *Taguchi*, *rendemen*, FFA, optimasi

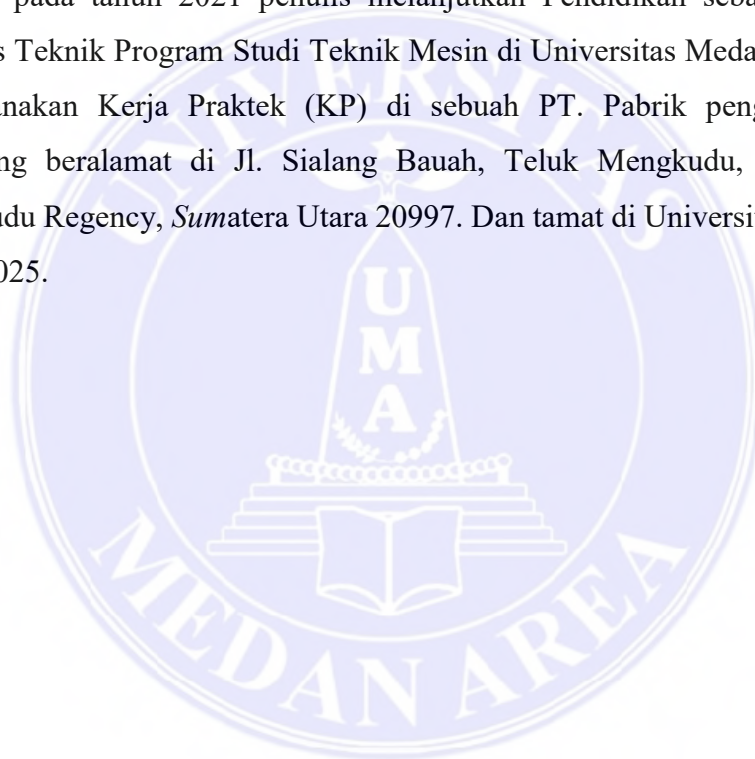
ABSTRACT

The processing of Fresh Fruit Bunches (FFB) into Crude Palm Oil (CPO) is influenced by process variables such as temperature, pressure, and boiling time, which determine the oil's yield and quality. This study aims to evaluate the effects of boiling time, temperature difference, and steam pressure on CPO yield and Free Fatty Acid (FFA) levels, assess the performance of the optimization model, and determine the optimal combination of process parameters. The analysis was carried out using linear regression and the Taguchi method with three main factors: boiling time, temperature difference (ΔT), and steam pressure difference (ΔP). The results showed that boiling time had a significant effect on both CPO yield and FFA levels, with P-values of 0.000 and 0.001, respectively, while ΔT significantly affected only CPO yield (P-value 0.001). ΔP showed no significant effect (P-value > 0.05). The optimization model demonstrated excellent performance, with R^2 values of 99.15% for CPO yield and 92.80% for FFA. The optimal combination was obtained at 80 minutes of boiling time, ΔT of 40.1°C, and ΔP of 1.58 bar, resulting in a CPO yield of 42.17% and an FFA level of 2.40%. These conditions were found to be the most efficient for improving CPO yield and quality.

Keywords: CPO, boiling process, Taguchi method, yield, FFA, optimization

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Nurul Wandana dilahirkan di Desa Sigara-gara, Kec. Patumbak, Kab. Deli Serdang pada tanggal 23 Juli 2003 dari ayah Suarto dan ibu Ratna Winingsih. Penulis merupakan putra ke pertama dari tiga bersaudara. Tahun 2015 penulis menyelesaikan Pendidikan Dasar di SD Swasta PAB 34 Patumbak, tahun 2018 penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Patumbak, tahun 2021 penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMK Swasta Multi Karya jurusan Teknik Kendaraan Ringan, pada tahun 2021 penulis melanjutkan Pendidikan sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin di Universitas Medan Area. Penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di sebuah PT. Pabrik pengolahan kelapa sawityang beralamat di Jl. Sialang Bauah, Teluk Mengkudu, Liberia, Teluk Mengkudu Regency, Sumatera Utara 20997. Dan tamat di Universitas Medan Area tahun 2025.




KATA PENGANTAR

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

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

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

Penulis



Nurul Wandana

NPM.218130021

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR.	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Hipotesis Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
1.5.1 Manfaat Akademis.....	6
1.5.2 Manfaat Praktis.....	6
1.5.3 Manfaat Ekonomi dan Lingkungan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Pengolahan Kelapa Sawit menjadi <i>Crude Palm Oil</i> (CPO).....	8
2.1.1 Proses Pengolahan <i>Crude Palm Oil</i> (CPO).....	8
2.1.2 Variabel-Variabel Berpengaruh Dalam Proses Pengolahan CPO	16
2.1.3. <i>Rendemen Crude Palm Oil</i> (CPO).....	18
2.1.4 <i>Free Fatty Acid</i> (FFA).....	19
2.2 <i>Microsoft Excel</i>	24
2.2.1 Metode regresi pada <i>Microsoft Excel</i>	24
2.2.2 Regresi Linier Berganda	29
2.3 <i>Software Minitab</i> dan Metode <i>Taguchi</i>	31
2.3.1 <i>Orthogonal array</i> (OA)	32

2.3.2 <i>Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio)</i> dan <i>Means</i>	34
2.3.3 <i>Summary Output</i>	37
2.3.4 ANOVA (<i>Analysis of Variance</i>)	38
2.3.5 <i>Coefficients</i>	39
2.4 Teori Optimasi Dalam Proses Produksi	40
2.4.1 Optimasi Multirespon	40
2.4.2 Teori Umum Metode-Metode optimasi proses.....	42
2.5.2 Faktor-Faktor Kehilangan Minyak Selama Proses Produksi.....	44
2.5 Kerusakan Bahan Baku dan Kehilangan Minyak.....	46
2.5.1 Faktor-Faktor Kerusakan Bahan Baku	46
2.6 Tinjauan Penelitian Terdahulu	48
2.6.1 Studi Kasus Optimasi.....	48
2.6.2 Pengaruh Parameter-Parameter Serupa Dalam Industri Minyak Nabati Lainnya.....	49
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	51
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	51
3.1.1 Waktu Penelitian.....	51
3.1.2 Tempat Penelitian	51
3.2 Alat dan Bahan	52
3.2.1 Alat.....	52
3.2.2 Bahan	53
3.3 Metode Penelitian.....	54
3.4 Populasi dan Sampel	54
3.5 Prosedur kerja	55
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	56
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1 Hasil.....	57
4.1.1 Teknik Pengambilan Data.....	57
4.1.2 Hasil Analisis Regresi Linear Sementara	61
4.1.3 Hasil Analisis Menggunakan Metode <i>Taguchi</i>	67
4.2 Pembahasan	79
4.2.1 Pembahasan Hasil Analisis <i>Rendemen</i> CPO Menggunakan Metode <i>Taguchi</i>	79

4.2.2 Pembahasan Hasil Analisis ALB/FFA Menggunakan Metode <i>Taguchi</i>	83
.....	83
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	87
5.1 Simpulan.....	87
5.2 Saran	88
DAFTAR PUSTAKA	88
LAMPIRAN.....	98



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standart Orthogonal array	33
Tabel 2. 2 Kategori Nominal Is The Best	35
Tabel 2. 3 Kategori Small Is Better	35
Tabel 2. 4 Kategori Higher Is Better	36
Tabel 2. 5 Penelitian terdahulu.	48
Tabel 3. 1 Waktu Penelitian	51
Tabel 3. 2 Populasi dan Sampel	55
Tabel 4. 1 Data yang akan diolah.	57
Tabel 4. 2 Hasil dari mencari selisih perubahan (Δ).	58
Tabel 4. 3 Run order untuk CPO yang akan diolah pada <i>Taguchi</i> .	59
Tabel 4. 4 Run order untuk FFA yang akan diolah pada <i>Taguchi</i> .	59
Tabel 4. 5 Hasil pemilihan data historis selama enam bulan untuk CPO.	60
Tabel 4. 6 Hasil pemilihan data historis selama enam bulan untuk FFA.	60
Tabel 4. 7 Summary output regresi sementara untuk <i>rendemen</i> CPO (Y1).	61
Tabel 4. 8 ANOVA regresi sementara untuk <i>rendemen</i> CPO (Y1).	61
Tabel 4. 9 Coefficients regresi sementara untuk <i>rendemen</i> CPO (Y1).	62
Tabel 4. 10 Evaluasi model regresi untuk <i>rendemen</i> CPO (Y1).	63
Tabel 4. 11 Summary output regresi sementara untuk kadar FFA (Y2).	64
Tabel 4. 12 ANOVA regresi sementara untuk kadar FFA (Y2).	65
Tabel 4. 13 Coefficients regresi sementara untuk kadar FFA (Y2).	66
Tabel 4. 14 Evaluasi model regresi sementara untuk kadar FFA (Y2).	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jmebatan timbang	9
Gambar 2. 2 Sterilizer	11
Gambar 2. 3 Thresher	12
Gambar 2. 4 Digester	13
Gambar 2. 5 Vibrating oil	15
Gambar 2. 6 Bak Fat-fit	16
Gambar 3. 1 Laptop.	52
Gambar 3. 2 Software Minitab.	53
Gambar 3. 3 <i>Software Microsoft Excel.</i>	53
Gambar 3. 4 Diagram alir penelitian	56
Gambar 4. 1 <i>S/N Ratios</i> untuk <i>rendemen</i> CPO.	68
Gambar 4. 2 <i>Means</i> untuk <i>rendemen</i> CPO.	69
Gambar 4. 3 ANOVA untuk <i>rendemen</i> CPO.	69
Gambar 4. 4 <i>Model Summary</i> untuk <i>rendemen</i> CPO.	71
Gambar 4. 5 <i>Coefficients</i> untuk <i>rendemen</i> CPO.	71
Gambar 4. 6 <i>Regression Equation</i> untuk <i>rendemen</i> CPO.	72
Gambar 4. 7 <i>S/N Ratios</i> untuk kadar FFA.	74
Gambar 4. 8 <i>Means</i> untuk FFA.	75
Gambar 4. 9 ANOVA untuk kadar FFA.	75
Gambar 4. 10 <i>Model Summary</i> untuk kadar FFA.	77
Gambar 4. 11 <i>Coefficients</i> untuk kadar FFA.	77
Gambar 4. 12 <i>Regression Equation</i> untuk kadar FFA.	78
Gambar 4. 13 <i>Main Effects Plot for SN Ratios</i> untuk CPO.	79
Gambar 4. 14 <i>Main Effects Plot for Means</i> untuk CPO.	80
Gambar 4. 15 <i>Residual Plots</i> untuk <i>rendemen</i> CPO	81
Gambar 4. 16 <i>Pareto Chart</i> untuk <i>rendemen</i> CPO	82
Gambar 4. 17 <i>Main Effects Plot for SN Ratios</i> untuk FFA.	83
Gambar 4. 18 <i>Main Effects Plot for Means</i> untuk FFA.	83
Gambar 4. 19 <i>Residual Plots</i> untuk FFA.	84
Gambar 4. 20 <i>Pareto Chart</i> untuk FFA.	85

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi di stasiun perebusan (Sterilizer Station).	98
Lampiran 2. Dokumentasi bentuk data mentah waktu perebusan.	98
Lampiran 3. Dokumentasi bentuk data mentah suhu dan tekanan perebusan.	99



DAFTAR NOTASI

CPO	= Jumlah minyak sawit mentah yang dihasilkan (kg).
TBS	= Jumlah Tandan Buah Segar yang diolah (kg).
L	= <i>Orthogonal array</i> .
n	= Jumlah percobaan (baris).
f	= Jumlah <i>Level</i> untuk setiap faktor.
k	= Jumlah faktor yang diuji.
y	= Nilai dari setiap percobaan.
D	= Desirabilitas keseluruhan.
K	= Konstanta laju reaksi.
A	= Faktor frekuensi.
E_a	= Energi aktivitas.
R	= Konstanta gas ideal.
T	= Suhu (K).



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq) adalah komoditas perkebunan penting di Indonesia, berperan besar dalam ekonomi sebagai sumber utama minyak nabati yang banyak dibutuhkan oleh berbagai industri. Minyak kelapa sawit digunakan secara luas, antara lain untuk minyak goreng, minyak industri, dan bahan bakar/biodiesel. Keunggulan minyak sawit termasuk ketahanannya terhadap oksidasi pada tekanan tinggi, kemampuan melarutkan zat kimia yang sulit larut dalam pelarut lain, serta daya pelapis yang baik. Tanaman kelapa sawit umumnya memiliki umur produktif 20 hingga 25 tahun. Pada tiga tahun pertama, disebut sebagai fase muda karena belum menghasilkan buah. Pohon sawit mulai berbuah pada usia 4 hingga 6 tahun, dan memasuki fase matang pada usia 7 hingga 10 tahun, menghasilkan tandan buah segar. Seluruh bagian buah sawit dapat dimanfaatkan, dengan daging buah menghasilkan minyak sawit kasar (CPO) dan biji sawit (*kernel*) diolah menjadi minyak *kernel* sawit (PK) (Yusup, 2020).

Proyeksi kebutuhan minyak nabati dunia pada tahun 2020 menjadi bahasan menarik, terutama seiring peningkatan jumlah penduduk yang diprediksi mencapai 7,72 miliar jiwa, naik dari 6,92 miliar pada 2010. Dengan pertumbuhan ini, permintaan minyak nabati global dipastikan meningkat. Pada 2020, produksi minyak sawit atau CPO diperkirakan mencapai 78 juta ton, diikuti minyak kedelai sebesar 53,2 juta ton, minyak bunga matahari 18,3 juta ton, dan minyak kanola 31,5 juta ton. Sementara itu, total 55 juta ton lainnya berasal dari 13 jenis minyak lain

seperti minyak inti sawit, minyak kelapa, minyak kacang tanah, dan minyak zaitun, menurut analisis Thomas Mielke dari *Oilworld* berjudul “*The Oil World Supply and Demand Forecast for the Year 2020*” (Sitorus et al., 2020).

Produksi minyak kelapa sawit yang berkualitas di Indonesia sangat bergantung pada proses produksi yang telah memenuhi standar mutu yang ditetapkan. Setiap pabrik berupaya untuk terus meningkatkan kualitas minyak kelapa sawit yang dihasilkan. Upaya ini sangat penting untuk memastikan bahwa kualitas minyak sawit yang diproduksi tetap terjaga (Nofiar, 2021).

Pengendalian kualitas adalah salah satu fungsi utama dalam suatu perusahaan untuk memenangkan persaingan industri. Melalui kegiatan pengendalian kualitas (*quality control*), perusahaan diharapkan dapat menjaga dan meningkatkan mutu produk dengan mengurangi tingkat kecacatan hingga mencapai tingkat kecacatan nol (*zero defect*). Oleh karena itu, pengendalian kualitas perlu dilakukan sejak pemilihan bahan baku, selama proses produksi, hingga produk akhir, dengan mengikuti standar yang telah ditetapkan. Standar mutu ini sangat penting untuk menentukan kualitas minyak kelapa sawit. Minyak sawit yang bermutu baik harus memenuhi beberapa kriteria kualitas, seperti kandungan Asam Lemak Bebas (FFA), Kandungan Air (*Moisture*), dan Kandungan Kotoran (*Dirt*) (Levia, 2023).

Asam lemak bebas (FFA) adalah asam karboksilat dengan rantai lurus yang memiliki atom karbon antara 12 hingga 20. Secara umum, asam lemak ini dibagi menjadi dua kategori, yaitu asam lemak jenuh dan asam lemak tidak jenuh. Kadar asam lemak dalam minyak goreng menjadi indikator kualitas minyak tersebut. Minyak yang berkualitas baik umumnya mengandung lebih banyak asam lemak

tidak jenuh dibandingkan dengan asam lemak jenuh. Semakin tinggi angka asam lemak bebas dalam minyak, semakin tinggi pula kandungan asam lemak bebasnya, yang menurunkan kualitas minyak tersebut. Kerusakan pada minyak goreng dapat terjadi akibat proses hidrolisis, di mana kandungan air dalam minyak menyebabkan terbentuknya asam lemak bebas dan beberapa gliserol (Levia, 2023). Setiap proses pengolahan di perusahaan selalu mengutamakan kualitas dan berusaha mengoptimalkan *rendemen Crude Palm Oil (CPO)*. Salah satu metode manajemen yang diterapkan untuk mencapai *rendemen* optimal adalah dengan mengurangi kehilangan minyak (*Oil losses*) selama proses produksi. *Oil losses* merujuk pada kehilangan minyak yang seharusnya dapat diperoleh dari proses, namun hilang atau tidak tercapai. Kehilangan minyak ini menjadi masalah penting yang dapat menurunkan kualitas CPO, sebab proses yang panjang seringkali menyebabkan kerugian bagi perusahaan (Hartati et al., 2022).

Pengendalian kualitas dengan menggunakan *Statistical Quality Control (SQC)* adalah teknik pengambilan keputusan yang didasarkan pada analisis informasi yang terkandung dalam suatu proses atau populasi. Metode statistik berperan penting dalam memastikan kualitas produk. Dengan pendekatan ini, perusahaan dapat menggunakan teknik dasar untuk menguji sampel dan menganalisis data, yang pada gilirannya membantu dalam mengendalikan dan meningkatkan mutu proses yang sedang dijalankan (Levia, 2023).

Proses pengolahan TBS menjadi CPO melibatkan berbagai tahapan, seperti pemasakan, pengempaan, dan pemurnian. Pada setiap tahap, terdapat beberapa variabel proses, seperti suhu, tekanan, dan waktu, yang dapat mempengaruhi kualitas dan kuantitas minyak yang dihasilkan. Variabel-variabel ini dapat

menentukan efisiensi konversi TBS menjadi CPO serta kualitas minyak sawit, termasuk *rendemen* CPO dan kandungan asam lemak bebas (*Free Fatty Acid* - FFA). Kandungan FFA yang tinggi, misalnya, akan menurunkan kualitas minyak karena menyebabkan minyak menjadi lebih cepat rusak dan tidak tahan lama. Namun, kendala yang dihadapi dalam proses produksi adalah belum optimalnya pengendalian variabel-variabel proses tersebut, yang dapat berakibat pada tingginya kandungan FFA dan rendahnya *rendemen* CPO. Selain itu, variasi parameter proses juga dapat menyebabkan kerusakan bahan baku serta kehilangan minyak selama proses pengolahan. Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi variabel-variabel proses yang paling berpengaruh dalam menghasilkan CPO dengan efisiensi tinggi dan kualitas yang baik, serta menentukan kombinasi optimal dari variabel-variabel tersebut.

Berdasarkan latar belakang masalah di atas peneliti, dalam penelitian ini akan difokuskan pada identifikasi variabel-variabel proses yang berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pengolahan TBS menjadi CPO dan analisis terhadap pengaruh variasi parameter proses di Di sebuah PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit, di Sumatra Utara. Dengan menemukan kombinasi optimal dari variabel-variabel proses, diharapkan *rendemen* CPO dapat ditingkatkan dan kandungan FFA dapat ditekan seminimal mungkin. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan kualitas pengolahan minyak sawit di industri, sehingga dapat bersaing secara global serta memenuhi standar kualitas yang lebih tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian adalah sebagai berikut:

- a. Apakah waktu perebusan, perbedaan suhu, dan tekanan uap berpengaruh secara signifikan terhadap *rendemen* CPO dan kadar FFA?
- b. Bagaimana performa model optimasi dalam memprediksi dan mengoptimalkan *rendemen* CPO serta kadar FFA?
- c. Kombinasi parameter independen seperti waktu perebusan, suhu, dan tekanan uap seperti apa yang menghasilkan *rendemen* CPO dan kadar FFA yang optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, yaitu:

- a. Mengevaluasi signifikansi pengaruh waktu perebusan, perbedaan suhu, dan tekanan uap terhadap *rendemen* CPO dan FFA.
- b. Mengevaluasi performa model optimasi
- c. Menentukan kombinasi optimal parameter independen terhadap parameter dependen: *rendemen* CPO dan FFA.

1.4 Hipotesis Penelitian

Adapun hipotesis dari penelitian ini, yaitu:

- a. Waktu perebusan, suhu, dan tekanan uap berpengaruh signifikan terhadap *rendemen* CPO dan kadar FFA.

- b. Model optimasi mampu memprediksi dan mengoptimalkan *rendemen* CPO dan kadar FFA secara akurat.
- c. Terdapat kombinasi optimal waktu perebusan, suhu, dan tekanan uap yang dapat menghasilkan *rendemen* CPO dan kadar FFA terbaik.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat, yaitu:

1.5.1 Manfaat Akademis

- a. Memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik pengolahan minyak kelapa sawit, khususnya dalam hal optimasi proses produksi untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas.
- b. Menyediakan referensi empiris terkait variabel-variabel proses yang signifikan dalam pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi *Crude Palm Oil* (CPO), yang dapat menjadi acuan bagi penelitian lebih lanjut di bidang yang sama.
- c. Menambah literatur tentang penerapan metode optimasi dalam proses produksi CPO, yang dapat dimanfaatkan dalam studi lanjutan atau penelitian terapan di bidang teknologi pangan dan industri kelapa sawit.

1.5.2 Manfaat Praktis

- a. Memberikan panduan bagi industri kelapa sawit dalam mengidentifikasi dan mengendalikan variabel-variabel proses yang berpengaruh signifikan terhadap efisiensi dan kualitas produksi CPO, sehingga dapat meningkatkan produktivitas serta menekan biaya produksi.

- b. Menyediakan informasi mengenai kombinasi optimal parameter proses yang dapat diterapkan untuk memaksimalkan *rendemen* CPO dan meminimalkan kandungan asam lemak bebas (FFA), yang pada akhirnya akan meningkatkan kualitas produk akhir dan daya saing di pasar.
- c. Membantu industri dalam mengurangi tingkat kerusakan bahan baku dan kehilangan minyak selama proses produksi, yang berdampak pada peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya dan pengurangan limbah proses.

1.5.3 Manfaat Ekonomi dan Lingkungan

- a. Meningkatkan profitabilitas bagi perusahaan pengolah kelapa sawit melalui efisiensi proses dan peningkatan kualitas produk yang dapat dijual dengan harga yang lebih tinggi.
- b. Mengurangi pemborosan bahan baku dan sumber daya, yang pada akhirnya dapat membantu menekan dampak lingkungan dari limbah dan sisa produksi.
- c. Mendukung industri kelapa sawit dalam menghasilkan produk yang lebih ramah lingkungan dengan kualitas yang lebih baik, yang sesuai dengan tuntutan pasar global akan produk berkelanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengolahan Kelapa Sawit menjadi *Crude Palm Oil* (CPO)

2.1.1 Proses Pengolahan *Crude Palm Oil* (CPO)

Pengolahan kelapa sawit di pabrik bertujuan untuk menghasilkan minyak sawit berkualitas tinggi. Proses ini cukup panjang dan membutuhkan kontrol yang ketat, dimulai dari pengangkutan tandan buah segar (TBS) atau brondolan dari tempat pengumpulan hasil (TPH) ke pabrik hingga menjadi minyak sawit dan produk sampingan lainnya. Secara umum, TBS menghasilkan dua produk utama di pabrik: minyak sawit, yang diperoleh dari daging buah, dan minyak inti sawit, yang berasal dari ekstraksi inti sawit. CCP dan CP pada proses pengolahan CPO dan CPKO). Secara ringkas tahapan-tahapan utama proses pengolahan TBS sampai dihasilkan minyak diuraikan sebagai berikut.

a. Stasiun penerimaan buah (*Fruit Reception Station*)

Stasiun penerimaan tandan buah segar (TBS) dimulai dengan penimbangan di jembatan timbang (*weighbridge*) untuk mencatat berat TBS, yang berguna untuk memantau produktivitas kebun. Setiap truk yang membawa TBS ke pabrik ditimbang untuk memperoleh berat kotor (bruto) sebelum dibongkar dan berat kosong (tara) setelahnya. Selisih antara berat bruto dan tara menunjukkan jumlah TBS yang diterima di pabrik (netto). Selain TBS, jembatan timbang juga digunakan untuk menimbang pengiriman minyak sawit mentah (CPO), inti sawit, tandan kosong, *fiber*, dan pupuk untuk kebutuhan kebun.

Setelah penimbangan, TBS masuk ke stasiun sortasi untuk proses seleksi dan pengelompokan kualitas bahan baku harian, sekaligus mengevaluasi hasil pemanenan dari kebun. Setelah disortasi, TBS dibawa ke *loading ramp*, di mana buah ditempatkan dalam ruang (*bay*) *loading ramp* dan ditransfer ke lori. CCP dan CP pada proses pengolahan CPO dan CPKO) dengan kapasitas 10 ton. Proses ini dilakukan melalui pintu *bay* yang dioperasikan oleh sistem hidrolik elektromotor, yang memungkinkan distribusi buah ke dalam lori secara efisien. Dari *loading ramp* ditransfer melalui *inclined scrapper conveyor* untuk menghantarkan buah segar menuju *horizontal scrapper conveyor*, ini digunakan secara luas dalam pengangkutan material dalam jarak jauh. *Horizontal scrapper conveyor* ini di manfaatkan untuk mengantar dan memasukan TBS ke dalam tangki perebusan/*sterilizer*.



Gambar 2. 1 Jembatan timbang

b. Stasiun Perebusan (*Sterilizer*)

Sterilizer adalah alat yang digunakan dalam proses perebusan tandan buah segar (TBS) dengan memanfaatkan panas uap bertekanan melalui mekanisme konveksi dan konduksi. Mutu dan hasil produksi minyak sawit

dari Pabrik Kelapa Sawit (PKS) sangat dipengaruhi oleh kualitas proses perebusan ini. Uap yang digunakan adalah uap jenuh (*saturated steam*) dengan tekanan 2,8 – 3,0 kg/cm² dan suhu antara 120 – 140 °C, yang disuntikkan dari *Back Pressure Vessel* (BPV) (Hutasoi Candra, 2021). Jenis *Sterilizer* yang digunakan di PKS Di sebuah PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit, di Sumatra Utara yaitu vertikal *sterilizer*. Proses perebusan menggunakan sistem *steam injection* dengan tekanan operasi sebesar 2 kg/cm² dan *afblas* sebanyak 2 kali sampai tekanan 0,5 kg/cm² . Tujuan perebusan, antara lain untuk:

- 1) Menonaktifkan enzim-enzim lipase yang dapat mempercepat lajukenaikan Asam Lemak Bebas (ALB).
- 2) Melunakkan brondolan untuk memudahkan pelepasan daging buahdari *nut* pada proses *digester*.
- 3) Memudahkan proses pemisahan molekul minyak dari daging buah (proses *pressing*).
- 4) Mengurangi kadar air dari dalam buah.
- 5) Mengurangi kadar air dari dalam *nut* sehingga memudahkan prosespemisahan cangkang dan *kernel* (proses pemecahan *nut*) (Candra, 2021).

Buah yang sudah masak di dalam *sterilizer* kemudian dibongkar dan di jatuhkan ke *fruit scraper*. *Fruit scraper* ini dilengkapi dengan *scrap*, *chain conveyor*, dan *sprocket conveyor* yang dihubungkan dengan elektromotor untuk mendistribusikan buah masak menuju *thresher*.



Gambar 2. 2 *Sterilizer*

c. Stasiun Penebah (*Thresher Station*)

Setelah melalui proses perebusan di *sterilizer*, buah yang sudah direbus tadi menuju ke *thresher*. di dalam *thresher*, TBS dipisahkan menjadi brondolan dan tandan kosong melalui kisi-kisi dalam *drum*, di mana tandan berputar dan terbanting sehingga bagian brondolan terlepas dan jatuh ke *conveyor* buah. Tandan kosong keluar melalui *empty fruit bunch conveyor*, sementara brondolan yang terpisah dikumpulkan pada *fruit conveyor* dan diangkat menuju *elevator* untuk proses selanjutnya (Candra, 2021).

Proses pemisahan brondolan berlangsung karena perputaran tandan di dalam *thresher* dengan kecepatan 22,5 rpm. Brondolan yang telah lepas akan jatuh melalui kisi-kisi menuju *fruitless conveyor*, yang dilengkapi dengan *screw* dan *shaft* yang digerakkan oleh elektromotor, sehingga brondolan dibawa menuju *fruitless elevator*. Di sini, *bucket-bucket* pada *chain elevator* mengangkut brondolan ke *fruit distribution conveyor* untuk tahap pengolahan berikutnya di *digester*.



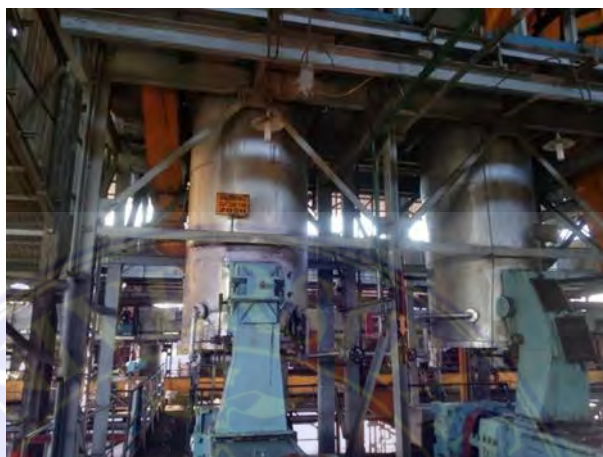
Gambar 2. 3 *Thresher*

d. Stasiun Kempa (*Pressing Station*)

Tujuan utama dari proses di stasiun kempa adalah untuk mengekstraksi minyak secara optimal, serta menghasilkan *nut*, *fiber*, dan brondolan sawit yang telah melalui perebusan dengan tingkat kehilangan (*losses*) minyak yang minimal, sambil menjaga keseimbangan kapasitas produksi pabrik. Pada proses di *digester*, buah yang telah dipisahkan dimasukkan hingga $\frac{3}{4}$ penuh, kemudian diputar dengan *line press* dibuka. *Digester* terdiri dari tabung silinder vertikal yang dilengkapi dengan enam tingkat pisau pengaduk (*stirring arms*) yang digerakkan oleh motor listrik. Lima tingkat pisau bagian atas berfungsi untuk mengaduk dan melumat, sementara pisau di bagian bawah juga berfungsi mendorong massa buah keluar dari *digester*. Untuk mempermudah proses pelumatan, panas ditambahkan melalui injeksi uap langsung atau pemanasan mantel. *Digester* ini menggunakan injeksi uap dengan suhu sekitar 90–95°C (Candra, 2021).

Brondolan yang sudah dilumat selanjutnya menuju ke *screw press* dikempa menggunakan tambahan air dari *flow* meter untuk memisahkan minyak, biji (*nut*) dengan *fiber*. Minyak hasil pengempaan akan mengalir

menuju pipa ke *vibrating sweco*. Sedangkan *nut* dan *fiber* akan menuju ke CBC (*Cake Break Conveyor*) untuk dilanjutkan ke proses pengolahan *kernel*. *screw press* menggunakan tenaga hidrolik dari *hidrolic press* dan dilengkapi dengan *cage* sebagai tempat pengempaan.



Gambar 2. 4 *Digester*

e. Stasiun Pemurnian (*Clarification Station*)

Minyak yang dihasilkan dari stasiun pengepresan dialirkan ke *sand trap tank* untuk memisahkan pasir dari minyak kasar melalui proses pengendapan. Suhu dalam *sand trap tank* dijaga pada 85–90 °C agar pasir dapat mengendap lebih mudah. Pasir yang terkumpul akan jatuh ke bak pasir, dan sisa pasir yang masih mengandung minyak akan diproses di kolam *fit recovery* untuk pengambilan minyak tambahan. Minyak kasar yang telah dipisahkan langsung menuju *vibrating screen* yang memiliki dua lapisan saringan: lapisan pertama dengan ukuran 20 mesh dan lapisan kedua 40 mesh. Minyak kasar pertama-tama disaring pada lapisan pertama, dan sisa kotoran yang lolos akan disaring kembali pada lapisan kedua. Ampas padat yang tertahan di saringan dikembalikan ke *conveyor distributing fruit* untuk diproses ulang, sementara cairan minyak yang sudah tersaring akan

disalurkan ke *crude oil tank*. Minyak ini kemudian dipompa menggunakan COT pump menuju tangki pemisah (*continuous settling tank*) (Candra, 2021).

Lumpur yang dipompa dari CST diarahkan ke *sludge tank* dengan sistem *underflow* sebelum masuk ke *decanter*, di mana terjadi proses pemisahan tiga fase: minyak, air, dan padatan. *Sludge tank* ini dilengkapi dengan pipa *coil steam* dan *agitator* untuk mencairkan campuran lumpur dan minyak, menjaga suhu sekitar 90°C agar proses berjalan optimal. Fungsi utama *sludge tank* adalah untuk menerima lumpur dari CST yang masih mengandung minyak dan mengolahnya pada suhu yang cukup tinggi.

Di *decanter*, pemisahan tiga fase dilakukan menggunakan gaya sentrifugal, dengan tabung yang berputar (*bowl*) pada 3.500 rpm, dan dilengkapi ulir (*screw conveyor*) yang bergerak sedikit lebih lambat dari *bowl*. Gaya sentrifugal ini mendorong partikel padat ke dinding *bowl*, kemudian *screw conveyor* mengarahkan padatan tersebut ke bawah untuk dibuang, sementara cairan bergerak ke arah berlawanan. Cairan dengan densitas lebih rendah, yaitu minyak, akan bergerak menuju poros dan kembali ke CST, sedangkan air yang mengandung kotoran dialirkan ke saluran pembuangan menuju *fat-fit*.

Setelah CST, minyak diproses lebih lanjut di *oil tank* No.1–4, di mana minyak, air, dan partikel padat terpisah otomatis karena perbedaan berat jenis. Minyak murni berada di tangki ke-4, dilengkapi dengan pipa dan pompa yang mengalirkan minyak ke *oil bLower*. *Oil bLower* kemudian mengurangi kadar air pada CPO dengan menguapkan butiran air pada suhu

90–95°C, menggunakan prinsip vakum dengan *bLower* bertenaga elektromotor. Setelah kadar air minyak berkurang, minyak dipompa ke *Daily tank* dengan kapasitas 50 TON, yang berfungsi sebagai penampung sementara sebelum disalurkan ke *stock tank*. *Daily tank* dilengkapi dengan *coil steam pipe* untuk menjaga suhu minyak antara 45–50°C.



Gambar 2. 5 *Vibrating oil*

f. Stasiun *Fat-Fit*

Dekantasi adalah alat yang berfungsi menampung air kondensat yang digunakan dalam proses pengepresan di *screw press*. Bak *decanting* memisahkan fasa air minyak sawit (*palm oil water phase*) dari *output decanter* yang masih mengandung sekitar 1,2% minyak pada suhu 90°C. Minyak yang mengapung di permukaan dikumpulkan dalam bak *recycle*, lalu dipompa kembali ke *continuous settling tank* untuk diolah lebih lanjut.

Selanjutnya, *fat-fit* adalah bak penampung tempat pengendapan *sludge* yang masih mengandung minyak sekitar 0,07%. Pemisahan minyak dari air dan kotoran di dalam bak ini dilakukan dengan injeksi uap, yang memudahkan pemisahan karena perbedaan berat jenis, sehingga minyak mengapung ke permukaan. Minyak yang diambil dari *fat-fit* akan diolah

kembali di bak *recycle*, sedangkan *sludge* yang lebih pekat dialirkan ke unit pengolahan limbah.



Gambar 2. 6 Bak *Fat-fit*

2.1.2 Variabel-Variabel Berpengaruh Dalam Proses Pengolahan CPO

Salah satu faktor yang memengaruhi kualitas produk adalah kualitas bahan baku itu sendiri. Untuk menghasilkan produk yang memenuhi standar yang telah ditentukan, perusahaan perlu melakukan pengawasan terhadap bahan baku sebelum produksi dimulai. Bahan baku yang berkualitas baik akan cenderung menghasilkan produk yang juga memiliki kualitas yang tinggi (Ali et al., 2023). Proses pengolahan *Crude Palm Oil* (CPO) dipengaruhi oleh beberapa variabel penting yang saling terkait, antara lain:

- a. Suhu perebusan mempengaruhi kecepatan dan efisiensi pelepasan minyak dari tandan buah segar sawit. Suhu yang optimal dapat meningkatkan *rendemen* minyak dan menurunkan kadar asam lemak bebas (FFA) pada CPO, karena suhu yang terlalu tinggi dapat merusak kualitas minyak (Hasibuan, 2016; Junaidah, 2013).
- b. Tekanan uap yang diterapkan selama perebusan menentukan temperatur air didih dan penetrasi panas ke dalam tandan. Tekanan

uap yang cukup membantu mempercepat pelunakan dan pemisahan minyak, namun tekanan berlebih dapat mempengaruhi kualitas CPO secara negatif.

- c. Lama waktu perebusan: Lama perebusan mempengaruhi *rendemen* dan mutu CPO. Waktu perebusan yang terlalu singkat mungkin menyebabkan *rendemen* rendah, sementara waktu terlalu lama dapat meningkatkan kadar FFA dan merusak mutu minyak. Penelitian merekomendasikan waktu perebusan sekitar 2 jam sebagai waktu optimal untuk mendapatkan *rendemen* terbaik sekitar 71,83% dengan FFA sekitar 2,20% (di bawah standar 5%) (Mas'ud et al., 2023).
- d. Kadar FFA (*Free Fatty Acid*) adalah indikator degradasi minyak yang menunjukkan tingkat kerusakan akibat hidrolisis atau oksidasi. Nilai FFA yang tinggi menandakan kualitas minyak menurun, berpotensi menyebabkan ketengikan dan rasa tidak baik. Pengendalian suhu, lama perebusan, dan kadar air dalam CPO penting untuk menjaga FFA tetap rendah (Iskandar et al., 2025).
- e. *Rendemen* CPO adalah perolehan minyak dari proses pengolahan. *Rendemen* ditentukan oleh efektivitas kombinasi suhu, tekanan, dan waktu perebusan serta kualitas bahan baku. *Rendemen* yang tinggi menunjukkan efisiensi proses yang baik tetapi perlu diimbangi dengan kualitas minyak yang tetap terjaga (Mas'ud et al., 2023; Purwanto et al., 2021).

2.1.3. Rendemen Crude Palm Oil (CPO)

Rendemen CPO (Crude Palm Oil) adalah ukuran yang menunjukkan efisiensi dalam proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi minyak sawit mentah. *Rendemen CPO* didefinisikan sebagai perbandingan antara berat minyak sawit mentah yang dihasilkan (CPO) dengan berat TBS yang diolah, dinyatakan dalam persentase. Rumus untuk menghitung *rendemen CPO* adalah sebagai berikut:

$$\text{Rendemen CPO} = \left(\frac{\text{CPO}}{\text{TBS}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana:

CPO = jumlah minyak sawit mentah yang dihasilkan (dalam kilogram).

TBS = jumlah Tandan Buah Segar yang diolah (dalam kilogram).

Menurut Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), visi *rendemen Crude Palm Oil (CPO)* yang dicanangkan sejak 2011 adalah sebesar 26%. Target tersebut dapat tercapai apabila pengelolaan kebun kelapa sawit dilakukan sesuai standar operasional yang baik, termasuk penggunaan varietas unggul dan penanganan pascapanen yang tepat. *Rendemen 26%* ini melebihi standar umum yang biasanya berkisar antara 20-24% dan menunjukkan efisiensi pengolahan yang tinggi dengan kualitas buah dan proses yang optimal. Lama waktu perebusan, suhu perebusan, dan tekanan uap perebusan memiliki pengaruh signifikan terhadap *rendemen Crude Palm Oil (CPO)* dalam proses pengolahannya:

- a. Perebusan yang terlalu singkat menyebabkan tandan buah sawit kurang lunak sehingga minyak tidak dapat keluar maksimal, sehingga *rendemen CPO* rendah. Sebaliknya, perebusan yang terlalu lama bisa menyebabkan degradasi kualitas minyak dan peningkatan kadar asam lemak bebas (FFA).

Waktu perebusan ideal biasanya sekitar 90 menit hingga 2 jam, yang

memberikan *rendemen* optimal tanpa merusak mutu minyak (Mas'ud et al., 2023).

- b. Suhu perebusan menentukan seberapa efektif panas diteruskan ke dalam tandan buah untuk memecah jaringan pelepasan minyak. Suhu yang terlalu rendah menyebabkan *rendemen* rendah karena perlunakan tandan kurang maksimal. Suhu yang terlalu tinggi dapat merusak kandungan minyak dan menaikkan FFA, menurunkan kualitas CPO. Suhu perebusan ideal umumnya berkisar antara 140-150°C (Purwanto et al., 2021).
- c. Tekanan uap berperan dalam mengatur suhu air yang mendidih selama perebusan. Tekanan uap yang sesuai membantu penetrasi panas lebih merata dan mempercepat proses pelepasan minyak dari tandan sawit. Tekanan yang kurang menyebabkan pemanasan tidak merata dan berdampak pada *rendemen* rendah. Namun, tekanan uap berlebih bisa mengakibatkan kondisi berlebih yang merusak kualitas minyak (Hasibuan & Junaidah, 2013).

2.1.4 Free Fatty Acid (FFA)

Free Fatty Acid (FFA) adalah komponen asam karboksilat yang terlepas dari trigliserida melalui proses hidrolisis, yang menunjukkan tingkat degradasi minyak. Dalam konteks *Crude Palm Oil* (CPO), kadar FFA merupakan indikator kualitas yang sangat penting karena kadar yang tinggi mengindikasikan minyak mengalami kerusakan, yang dapat menyebabkan rasa tidak enak dan menurunkan nilai jual minyak.

Menurut Amanda et al. (2022), FFA dalam CPO merupakan penentu kualitas minyak karena memberikan pengaruh pada sifat fisik dan kimianya. Kadar

FFA dapat diturunkan melalui proses adsorpsi dengan bahan seperti bentonit dan tanah liat, yang meningkatkan kualitas CPO. Penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian FFA sangat penting dalam proses pengolahan minyak kelapa sawit (Amanda et al., 2022).

Selain itu, Najma (2018) menjelaskan bahwa analisis kadar FFA adalah cara primer untuk mengetahui mutu CPO yang dihasilkan di pabrik minyak kelapa sawit dan penting untuk validasi metode analisis guna menjaga konsistensi dan keandalan pengukuran kadar FFA (Najma, 2018).

Standar kadar asam lemak bebas (FFA) pada *Crude Palm Oil* (CPO) menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 01-2901-2006) adalah maksimum 5%. Kadar FFA ini merupakan batas tertinggi yang diperbolehkan untuk menjaga mutu CPO agar tetap layak dan memenuhi standar kualitas industri. Penelitian yang dilakukan oleh Silitonga (2019) di PT. SUCOFINDO Cabang Medan menunjukkan bahwa kadar FFA CPO yang dihasilkan adalah sekitar 3,57%, yang berarti sudah memenuhi standar SNI tersebut. Selain itu, Yuniva (2010) melaporkan bahwa kadar FFA di pabrik kelapa sawit di Kabupaten Kampar berkisar antara 3,00% sampai 4,5%, juga sesuai dengan standar mutu yang ditetapkan.

Secara umum, kadar FFA di bawah 5% menunjukkan kualitas CPO yang baik dan layak untuk dijual serta diolah lebih lanjut dalam industri minyak kelapa sawit (Silitonga et al., 2020; Yuniva, 2010; Hasibuan, 2018).

Pengaruh lama waktu perebusan, suhu perebusan, dan tekanan uap perebusan terhadap kadar asam lemak bebas (FFA) pada *Crude Palm Oil* (CPO) telah diteliti dan menunjukkan beberapa hal berikut:

- a. Lama waktu perebusan, suhu perebusan, dan tekanan uap perebusan memiliki pengaruh besar terhadap kadar asam lemak bebas (FFA) dalam *Crude Palm Oil* (CPO). Lama waktu perebusan yang semakin panjang cenderung meningkatkan kadar FFA akibat reaksi hidrolisis minyak yang diperparah oleh keberadaan air dalam minyak, sehingga FFA bertambah selama perebusan berlangsung.
- b. Suhu perebusan berperan sebagai katalis, semakin tinggi suhu, kecepatan reaksi hidrolisis meningkat yang menyebabkan kenaikan FFA, tetapi pemanasan pada suhu terlalu rendah tidak efektif mengurangi FFA secara optimal.
- c. Tekanan uap berhubungan dengan suhu perebusan karena mempengaruhi suhu didih air saat perebusan. Pengaturan tekanan uap yang tepat membantu menjaga suhu efektif dan mengontrol laju kenaikan FFA.

Wahyu Wijanarko et al. (2022) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa variasi suhu (57°C dan 67°C) tidak memberikan pengaruh nyata pada kadar FFA, tetapi variasi waktu pemurnian berpengaruh signifikan terhadap kadar asam lemak bebas. Lama waktu yang lebih singkat (1 jam 30 menit) memberikan kadar FFA yang lebih rendah (rata-rata 8,54%) dibandingkan dengan waktu yang lebih lama. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian waktu perebusan lebih kritical dalam mengontrol FFA dibandingkan suhu pada rentang yang diteliti (Wijanarko et al., 2022).

A. Prinsip Termodinamika

Termodinamika mempelajari hubungan antara panas, energi, dan kerja. Dalam pengolahan kelapa sawit, prinsip-prinsip ini menjelaskan bagaimana panas mempengaruhi perubahan komponen kelapa sawit.

- 1) Energi Internal dan Perubahan Fase: Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan energi internal, yang mengarah pada perubahan fase (misalnya, lelehnya lemak padat) dan penguraian trigliserida menjadi asam lemak bebas (FFA).
- 2) Hukum Termodinamika: Hukum pertama menyatakan bahwa energi tidak bisa diciptakan atau dihancurkan, hanya diubah bentuk. Dalam proses pemanasan, energi yang ditambahkan mengubah kondisi termal komponen kelapa sawit untuk memfasilitasi reaksi kimia.
- 3) Kestimbangan Termodinamik: Pada suhu dan tekanan tertentu, sistem mencapai kestimbangan, yang penting untuk optimasi efisiensi dalam ekstraksi minyak.

B. Prinsip Kinematika

Kinetika mempelajari laju reaksi kimia dan faktor yang mempengaruhinya. Dalam pengolahan kelapa sawit, kinetika membantu menjelaskan bagaimana suhu mempengaruhi laju perubahan selama pemanasan.

- 1) Laju Reaksi: Laju reaksi dipengaruhi oleh suhu, konsentrasi reaktan, dan tekanan. Menurut hukum Arrhenius, laju reaksi akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu karena lebih banyak molekul memiliki energi yang cukup untuk mengatasi energi aktivasi yang diperlukan.

$$K = Ae^{-E_a/(RT)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Di mana:

K = konstanta laju reaksi

A = faktor frekuensi

E_a = energi aktivitas

R = konstanta gas ideal

T = suhu (dalam kelvin)

- 2) Pengaruh Suhu: Peningkatan suhu mempercepat gerakan molekul dalam kelapa sawit, meningkatkan kemungkinan tumbukan efektif antara molekul dan mempercepat reaksi dekomposisi trigliserida menjadi FFA.
- 3) Reaksi Berurutan dan Paralel: Proses pemanasan sering melibatkan reaksi yang terjadi bersamaan atau berurutan. Misalnya, dekomposisi trigliserida dapat menghasilkan FFA dan produk lain secara bersamaan. Memahami kinetika setiap reaksi penting untuk mengoptimalkan kondisi proses guna mencapai produk akhir yang memenuhi standar kualitas.

C. Pemisahan Minyak dalam Proses Pengolahan

Pada proses pemisahan minyak dari kelapa sawit:

- 1) Pemisahan Fase: Suhu dan tekanan yang optimal sangat penting untuk memisahkan minyak dari fase padat (serat). Peningkatan suhu dapat memperbaiki kelarutan minyak dan mempermudah pemisahan.

- 2) Kondisi Operasional: Mengatur suhu dan tekanan secara tepat selama proses ekstraksi minyak sangat krusial untuk meningkatkan hasil minyak, sambil meminimalkan kehilangan komponen bernilai seperti FFA.

2.2 Microsoft Excel

Microsoft Excel adalah program aplikasi spreadsheet yang digunakan untuk mengorganisasi, menghitung, dan menganalisis data numerik dalam bentuk tabel. *Excel* dibuat oleh *Microsoft Corporation* dan pertama kali diperkenalkan pada tahun 1985. Program ini memungkinkan pengguna untuk melakukan perhitungan matematika, membuat grafik, serta menyajikan data dalam format yang lebih mudah dipahami. *Excel* sangat populer karena kemampuannya dalam pengolahan data dan perhitungan cepat menggunakan rumus dan fungsi bawaan.

Secara operasional, *Excel* terdiri dari *workbook* yang berisi beberapa *worksheet* yang tersusun dalam baris dan kolom membentuk sel-sel sebagai tempat data dimasukkan dan diproses. Fungsi utamanya meliputi pengelolaan data, analisis, pembuatan grafik, dan pemrosesan data dalam jumlah besar dengan mudah (Fikti UMSU, 2023).

2.2.1 Metode regresi pada Microsoft Excel

Metode regresi di *Microsoft Excel* adalah teknik analisis statistik yang digunakan untuk mengukur hubungan antara variabel dependen dan satu atau beberapa variabel independen dengan tujuan memodelkan dan memprediksi variabel dependen tersebut. Regresi sederhana melibatkan satu variabel bebas, sedangkan regresi linear berganda melibatkan dua atau lebih variabel bebas.

Analisis regresi di *Excel* dapat dilakukan menggunakan menu *Data Analysis*, di mana *input* data dimasukkan, dan *output* analisis berupa koefisien regresi, nilai *R-Square*, nilai signifikansi, dan lain-lain ditampilkan dalam *worksheet*.

Penelitian oleh Junaidi (2014) menjelaskan bahwa analisis regresi menggunakan *Microsoft Excel* merupakan metode populer di ilmu sosial dan eksak karena kemudahannya dan ketersediaan *Excel* di hampir semua komputer. *Excel* menghasilkan *output* lengkap termasuk tabel ANOVA, nilai koefisien, dan uji signifikansi, sehingga memungkinkan interpretasi yang mendalam terhadap hubungan variabel-variabel tersebut. Regresi di *Excel* sangat berguna dalam menganalisis hubungan sebab-akibat antar variabel secara praktis dan efisien (Junaidi, 2014).

A. *Summary output*

Summary output merupakan ringkasan statistik regresi yang melaporkan ukuran-ukuran kunci untuk mengevaluasi kekuatan dan keandalan model regresi secara keseluruhan (Chaniago, 2008; Statistikian, 2024).

- 1) *Multiple R* adalah koefisien korelasi berganda yang mengukur kekuatan hubungan linear antara variabel dependen dan satu atau lebih variabel independen, dengan nilai berkisar dari 0 (tidak ada hubungan) hingga 1 (hubungan sempurna); nilai standar yang baik biasanya >0.7 untuk menunjukkan model yang kuat (Froehlich, 2021).
- 2) *R Square* (atau R^2) adalah koefisien determinasi yang menunjukkan proporsi varians variabel dependen yang dijelaskan oleh variabel independen, dengan nilai dari 0 (tidak ada penjelasan) hingga 1

(penjelasan sempurna); nilai standar yang baik sering >0.6-0.8 tergantung konteks, di mana 0.956 berarti 95.6% varians dijelaskan (Froehlich, 2021; Frost, 2025).

- 3) *Adjusted R Square* adalah versi R^2 yang disesuaikan untuk jumlah prediktor, menghindari overestimation pada model kompleks, dihitung dengan rumus:

$$Adjusted R^2 = 1 - [(1-R^2)(n-1)/(n-k-1)] \dots \dots \dots (2.3)$$

di mana:

n = jumlah observasi

k = jumlah prediktor

nilai standar yang baik mendekati atau lebih tinggi dari R^2 , misalnya 0.946 untuk model dengan 2 prediktor, dan lebih berguna untuk membandingkan model dengan variabel berbeda (Froehlich, 2021; VanderWeele, 2024).

- 4) *Standard Error* adalah estimasi kesalahan standar prediksi model, mengukur akurasi rata-rata prediksi; nilai standar yang baik rendah relatif terhadap skala data, sering <10-20% dari *Mean* dependen untuk menunjukkan presisi tinggi (Graduate Tutor, 2016).

B. ANOVA (*Analysis of Variance*)

ANOVA (*Analysis of Variance*) dalam *output* regresi *Excel* adalah tabel yang menguji signifikansi keseluruhan model regresi melalui analisis varians, membandingkan variasi yang dijelaskan oleh model (*Regression*) dengan variasi yang tidak dijelaskan (*Residual*).

- 1) *df (Degrees of Freedom)* adalah derajat kebebasan yang mengukur jumlah informasi independen dalam data; di regresi ANOVA, *df Regression* = k (jumlah prediktor), *df Residual* = $n-k-1$ (n =sampel, k =prediktor), *df Total* = $n-1$; nilai standar untuk model sederhana (1 prediktor) adalah *df Regression*=1, *Residual*= $n-2$, *Total*= $n-1$, dengan $n > 30$ untuk reliabilitas (Scribd, 2025; Statistikian, 2024).
- 2) *SS (Sum of Squares)* mengukur variasi total dalam data; *SS Regression* = variasi dijelaskan model (kuadrat deviasi prediksi dari *Mean*), *SS Residual* = variasi tidak dijelaskan (kuadrat *Error*), *SS Total* = *SS Regression* + *SS Residual*; nilai standar yang baik adalah *SS Regression* tinggi relatif terhadap *Total* ($>50-70\%$ untuk model kuat), misalnya *SS Regression*=1234,56 menunjukkan penjelasan baik (Scribd, 2025; DQLab, 2020).
- 3) *MS (Mean Square)* adalah rata-rata kuadrat variasi, dihitung *MS* = *SS* / *df*; *MS Regression* untuk variasi dijelaskan, *MS Residual* untuk *Error*; nilai standar *MS Regression* > *MS Residual* (rasio >1), seperti *MS Regression*=412,19 vs *Residual*=12,34 menandakan model akurat (Scribd, 2025; Statistikian, 2024).
- 4) *F* adalah statistik uji yang membandingkan *MS Regression* / *MS Residual* untuk signifikansi model; nilai standar yang baik $> F$ -kritis (dari tabel *F*, misalnya $>4,0$ untuk $df=1,30$ pada $\alpha=0,05$), seperti $F=33,41$ menunjukkan model signifikan (DQLab, 2020; Scribd, 2025).

- 5) *Significance F* adalah *p-value* uji F (Prob > F); nilai standar <0,05 menolak H₀ (model tidak signifikan), misalnya 0,000 berarti model signifikan pada 95% (Statistikian, 2024; DQLab, 2020).
- 6) *Intercept* (*b*₀) adalah nilai variabel dependen ketika semua variabel independen bernilai nol, menunjukkan titik potong model regresi dengan sumbu Y; dalam regresi linier, ini diestimasi menggunakan metode *least Squares* untuk meminimalkan *Error*, dengan nilai standar yang signifikan jika *t-stat* >2 atau *p-value* <0,05, misalnya *Intercept*=5,2 berarti baseline Y=5,2 saat X=0 (Smartstat, 2023; Buku Statistik1, 2018).
- 7) *Coefficients* (*b*₁, *b*₂, dst.) adalah koefisien regresi yang mengukur perubahan variabel dependen per unit perubahan variabel independen, dengan tanda + menunjukkan pengaruh searah dan - berlawanan; nilai standar yang baik adalah signifikan secara statistik (*p-value* <0,05), seperti *b*₁=0,75 berarti peningkatan 1 unit X₁ meningkatkan Y sebesar 0,75 (Scribd, 2025; Statistikian, 2024).
- 8) *Standard Error* adalah estimasi kesalahan standar koefisien, mengukur presisi estimasi koefisien; nilai standar yang rendah (<0,1-0,5 relatif terhadap koefisien) menunjukkan estimasi akurat, dihitung dari varians *Residual* seperti $SE_{b_1} = \sqrt{(se^2 / \sum(x_i - \bar{x})^2)}$, misalnya SE=0,12 untuk koefisien stabil (Smartstat, 2023; Scribd, 2025).
- 9) *t Stat* (*t-stats*) adalah statistik uji t untuk signifikansi individu koefisien, dihitung $t = (b - 0) / SE_b$; nilai standar >|2| (untuk *df*>30,

$\alpha=0,05$) menolak H_0 (koefisien=0), seperti $t=3,45$ menandakan pengaruh signifikan (Scribd, 2025; Statistikian, 2024).

10) *p-value* adalah probabilitas uji t , mengukur signifikansi koefisien; nilai standar $<0,05$ menunjukkan pengaruh signifikan pada tingkat 95%, misalnya $p=0,001$ berarti koefisien bermakna secara statistik (Statistikian, 2024; RPubS, 2024).

11) *Lower 95%* dan *Upper 95%* adalah batas interval kepercayaan 95% untuk koefisien, dihitung dari $t\text{-kritis} \times SE$; rentang standar yang sempit ($<1-2$ kali SE) menunjukkan presisi tinggi, tidak mencakup 0 berarti koefisien signifikan, seperti *Lower*=-0,1 hingga *Upper*=1,5 untuk CI yang *reliable* (Junaidi, 2008; Panduan Regresi, n.d.).

2.2.2 Regresi Linier Berganda

Regresi linier berganda merupakan metode statistik yang memodelkan hubungan linear antara satu variabel dependen (Y) dengan dua atau lebih variabel independen (X_1, X_2, \dots, X_n), bertujuan untuk memprediksi nilai Y berdasarkan nilai-nilai X yang diketahui serta mengidentifikasi arah dan kekuatan pengaruh variabel independen (Junaidi et al., 2020; Almumtazah et al., 2021). Model matematisnya diekspresikan sebagai:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \dots \dots \dots (2.4)$$

Di mana

a = konstanta (*Intercept*)

b_1 hingga b_n = koefisien regresi

Yang menunjukkan perubahan Y per unit perubahan X_i , dengan asumsi tidak ada multikolinearitas, homoskedastisitas, dan normalitas *Residual* (Ghozali, 2018;

Wijaya et al., 2022). Analisis ini berguna untuk estimasi dan pengujian hipotesis pengaruh simultan atau parsial, seperti dalam prediksi kepuasan pelanggan atau produktivitas, di mana koefisien signifikan jika $p\text{-value} < 0,05$ dan $R^2 > 0,6$ untuk *goodness-of-fit* yang baik (Hidayat et al., 2022; Sari et al., 2022).

- a. *Mean Absolute Error* (MAE) adalah rata-rata nilai absolut selisih antara prediksi dan nilai sebenarnya, di mana nilai lebih kecil menunjukkan prediksi lebih akurat. Dalam studi regresi, MAE yang rendah (misal di bawah 5 atau relatif kecil terhadap skala data) menunjukkan kinerja model yang baik (Nurani et al., 2023).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |f_t - y_t| \dots \dots \dots (2.5)$$

- b. *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) adalah rata-rata persentase kesalahan absolut, digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan dalam bentuk persentase. MAPE di bawah 10% umumnya dianggap sangat baik, sedangkan 10–20% baik, 20–50% cukup, dan lebih dari 50% buruk (Nurani et al., 2023).

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| 100}{n} \dots \dots \dots (2.6)$$

- c. *Mean Squared Error* (MSE) adalah rata-rata kuadrat selisih antara prediksi dan nilai sebenarnya. Nilai MSE yang lebih rendah menunjukkan kesalahan prediksi yang lebih kecil; MSE juga sensitif terhadap pencilan (outlier) (Nurani et al., 2023).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots \dots \dots (2.7)$$

- d. *Root Mean Squared Error* (RMSE) adalah akar kuadrat dari MSE, mengembalikan satuan ke satuan variabel aslinya, sehingga lebih mudah

diinterpretasikan. RMSE yang lebih kecil menandakan model lebih akurat, biasanya nilai <10% dari rata-rata observasi dianggap baik, namun standar tepat tergantung konteks data (Nurani et al., 2023).

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

2.3 Software Minitab dan Metode Taguchi

Menurut Jannah, Gunawan, & Ginting (2023), *Minitab* adalah perangkat lunak statistik yang dirancang untuk memudahkan analisis data kuantitatif, khususnya dalam statistik deskriptif, regresi, analisis varians (ANOVA), dan kontrol kualitas. *Minitab* mendukung berbagai proses statistik seperti uji hipotesis, desain eksperimen, dan pengolahan data dengan tampilan antarmuka yang *user-friendly* sehingga banyak digunakan di dunia industri, pendidikan, dan penelitian. Kelebihan *Minitab* terletak pada kemudahan penggunaan, lengkapnya fitur analisis, serta integrasi dengan aplikasi lain, meski memiliki keterbatasan dalam analisis statistik lanjutan dibandingkan *software* lain seperti SPSS atau SAS (Jannah et al., 2023).

Metode *Taguchi*, yang diperkenalkan oleh Dr. Genichi *Taguchi* pada 1949, dikembangkan untuk meningkatkan sistem komunikasi di Jepang. Dengan latar belakang teknik dan pemahaman mendalam dalam statistika, Dr. *Taguchi* menciptakan metode ini untuk menghasilkan data yang andal tanpa memerlukan percobaan besar. Melalui metode percobaan yang inovatif, Metode *Taguchi* menawarkan tingkat kepercayaan yang sebanding dengan *Statistical Process Control* (SPC) dalam peningkatan kualitas. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas produk dan proses, sambil mengurangi biaya dan pemakaian

sumber daya. Caranya adalah dengan menjadikan produk atau proses lebih "tahan" terhadap faktor-faktor luar, seperti material, tenaga kerja, peralatan manufaktur, dan kondisi operasional. Inilah yang menjadikan Metode *Taguchi* sering disebut sebagai desain kokoh (*robust design*), karena produknya menjadi tidak sensitif terhadap gangguan (Situmorang, 2023).

2.3.1 *Orthogonal array* (OA)

Orthogonal array adalah matriks yang terdiri dari baris dan kolom, di mana setiap kolom merepresentasikan faktor yang diuji dalam eksperimen, dan setiap baris menunjukkan kombinasi *Level* dari faktor-faktor tersebut. Disebut "*Orthogonal*" karena *Level* setiap faktor tersebar merata, tanpa dipengaruhi oleh faktor lainnya, sehingga memungkinkan analisis yang lebih jelas terhadap pengaruh masing-masing faktor (Zayendra & Yozza, 2016).

Dalam produksi *Crude Palm Oil* (CPO), *Orthogonal array* (OA) sangat relevan untuk mengenali faktor-faktor yang paling berdampak pada kualitas dan efisiensi proses. Beberapa penerapan OA adalah sebagai berikut:

- a. Identifikasi Faktor Kritis: Banyak faktor seperti suhu, tekanan, waktu ekstraksi, dan jenis bahan baku memengaruhi hasil akhir CPO. OA memungkinkan peneliti menguji kombinasi dari faktor-faktor ini untuk mengidentifikasi faktor yang paling signifikan terhadap yield dan kualitas.
- b. Optimasi Proses: Melalui hasil eksperimen menggunakan OA, perusahaan dapat menemukan kondisi optimal untuk produksi. Misalnya, jika suhu tertentu terbukti memberikan hasil yang optimal, pengaturan ini bisa diterapkan secara konsisten untuk memaksimalkan produksi.

- c. Penghematan Biaya dan Waktu: OA mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan untuk memperoleh hasil yang akurat, sehingga menghemat biaya dan waktu yang biasanya dihabiskan pada pengujian berulang.
- d. Analisis Varians (ANOVA): setelah eksperimen dilakukan menggunakan *Orthogonal array*, ANOVA diterapkan untuk menilai seberapa signifikan pengaruh setiap faktor dan interaksinya dalam proses. Ini membantu memberikan pemahaman mendalam tentang interaksi berbagai variabel yang memengaruhi produksi CPO, memungkinkan perusahaan untuk fokus pada faktor yang paling penting dalam mengoptimalkan hasil (Ahadi et al., 2023).

$$Orthogonal Array = L_n(f^k) \dots\dots\dots(2.9)$$

Di mana:

L = *Orthogonal array*.

n = jumlah percobaan (baris).

f = jumlah *Level* untuk setiap faktor.

k = jumlah faktor yang diuji.

Tabel 2. 1 Standart *Orthogonal array*

2 Level	3 Level	4 Level	5 Level	Mixed-Level
L ₄ (2 ³)	L ₉ (3 ⁴)	L ₁₆ (4 ⁵)	L ₂₅ (5 ⁶)	L ₁₈ (2 ¹ X 3 ⁷)
L ₈ (2 ⁷)	L ₂₇ (3 ¹³)	L ₆₄ (4 ²¹)	-	L ₃₂ (2 ¹ X 4 ⁹)
L ₁₂ (2 ¹¹)	L ₈₁ (3 ⁴⁰)	-	-	L ₃₆ (2 ¹¹ X 3 ¹³)
L ₁₆ (2 ¹⁵)	-	-	-	L ₃ (2 ³ X 3 ¹³)
L ₃₂ (2 ³¹)	-	-	-	L ₅₄ (2 ¹ X 3 ²⁵)
L ₆₄ (2 ⁶³)	-	-	-	L ₅₀ (2 ¹ X 5 ¹¹)

Tabel di atas menunjukkan standar penggunaan *Orthogonal array* berdasarkan jumlah faktor dan *Level*. Untuk tiga *Level*, tabel *Orthogonal array* meliputi L₉, L₂₇, dan L₈₁. Dalam penelitian ini, digunakan L₉ (3⁴) karena terdapat

tiga faktor yang berpengaruh dengan tiga *Level* untuk diuji, berdasarkan hasil kuesioner. Jumlah eksperimen dipilih sebanyak sembilan observasi, sesuai dengan kolom $L_9 (3^4)$, yang merupakan pilihan terdekat untuk tiga faktor dengan tiga *Level*.

2.3.2 *Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio)* dan *Means*

Signal-to-noise Ratio (S/N Ratio) adalah konsep utama dalam metode *Taguchi* yang digunakan untuk mengukur kualitas hasil proses. Dalam produksi *Crude Palm Oil (CPO)*, *S/N Ratio* membantu mengoptimalkan dua parameter kunci: tingkat *rendemen* yang tinggi dan kadar asam lemak bebas (FFA) yang rendah. Metode *Taguchi* mengoptimalkan proses dengan mempertimbangkan nilai rasio S/N, di mana kondisi proses dianggap optimal jika nilai S/N dapat dimaksimalkan.

Means dalam *Taguchi* adalah nilai rata-rata tiap kombinasi eksperimen, berguna untuk mengukur tingkat *output* dan mencari kombinasi setting optimal. Nilai *S/N Ratio* dinilai “standar baik” jika maksimal dibandingkan dengan variabel lain, sedangkan *Mean* mendekati target yang diinginkan (*Minitab*, 2024).

Secara sederhana, *S/N Ratio* menunjukkan perbandingan antara sinyal (nilai target atau hasil yang diinginkan) dan *noise* (variabilitas atau gangguan dalam sistem). Dalam konteks kualitas, "sinyal" mengacu pada nilai yang mendekati target yang diinginkan, sedangkan "noise" adalah variasi yang tidak diinginkan yang bisa memengaruhi hasil akhir. Nilai *S/N Ratio* diperoleh dari data eksperimen pada berbagai kombinasi *Level* faktor kendali dan berfungsi untuk mengevaluasi stabilitas hasil terhadap gangguan dalam proses produksi. *Taguchi* membagi karakteristik kualitas menjadi tiga kategori utama, masing-masing dengan

pendekatan *S/N Ratio* yang berbeda. Berikut adalah penjelasan dalam bahasa Indonesia mengenai konsep-konsep tersebut:

- a. *Nominal is the Best*: Karakteristik ini mengutamakan pencapaian nilai yang tepat pada titik tertentu, di mana nilai ideal berada pada titik yang telah ditentukan. Sebagai contoh, dimensi suatu produk harus sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan dengan akurat.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \dots\dots\dots(2.10)$$

Tabel 2. 2 Kategori *Nominal Is The Best*

<i>Nominal Is The Best</i>			
Berat	Panjang	Lebar	Kerapatan
Ketebalan	Diameter	Luas	Kecepatan
Volume	Jarak	Tekanan	waktu

- b. *Smaller is Better*: Dalam karakteristik ini, nilai ideal adalah nol, seperti halnya dengan cacat produk atau limbah. Tujuannya adalah mengurangi atau menghilangkan faktor-faktor negatif tersebut.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

y = nilai dari setiap percobaan

Tabel 2. 3 Kategori *Small Is Better*

<i>Small is better</i>		
Pemborosan panas	Persen kontaminasi	Hambatan
Penyimpanan	Kebisingan	Produk gagal
Waktu Proses	Waktu respon	Kerusakan

- c. *Higher is Better*: Karakteristik ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suatu nilai, semakin baik hasilnya, seperti dalam hal kekuatan produk atau umur pakai. Dalam kasus ini, nilai yang lebih tinggi dianggap lebih optimal.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{y^2}{\sigma^2} \right) \dots\dots\dots(2.12)$$

Tabel 2. 4 Kategori *Higher Is Better*

<i>Higher Is Better</i>		
Kekuatan	Kekuatan tarik	Efisiensi
Waktu antar	Ketahanan terhadap	Korosi

Dalam produksi CPO, penerapan *S/N Ratio* sangat penting untuk mengoptimalkan dua aspek utama: *rendemen* dan kandungan asam lemak bebas (FFA). Berikut penjelasan lebih lanjut:

- a. Optimasi *Rendemen CPO*: *Rendemen* yang tinggi mencerminkan efisiensi proses ekstraksi minyak dari buah sawit. Dengan pendekatan "*Higher is Better*", *S/N Ratio* digunakan untuk mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi hasil ekstraksi, seperti suhu, tekanan, dan waktu ekstraksi. Dengan menguji kombinasi faktor-faktor tersebut menggunakan *Orthogonal array*, proses ini dapat dilakukan dengan jumlah percobaan yang minimal namun tetap efisien untuk menemukan kondisi yang menghasilkan *rendemen* terbaik.
- b. Pengurangan Kandungan FFA: Kandungan FFA yang rendah menunjukkan kualitas minyak yang lebih baik. Pendekatan "*Smaller is Better*" digunakan untuk meminimalkan kadar FFA. *S/N Ratio* dihitung untuk setiap variasi kadar FFA pada percobaan yang dilakukan, memungkinkan peneliti untuk menentukan kondisi optimal yang menghasilkan FFA terendah.
- c. Analisis Varians (ANOVA): Setelah perhitungan *S/N Ratio*, ANOVA digunakan untuk mengevaluasi pengaruh signifikan dari setiap faktor terhadap hasil akhir. Ini membantu mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berkontribusi dalam meningkatkan *rendemen* serta mengurangi

kandungan FFA, sehingga dapat dilakukan perbaikan proses yang lebih terfokus.

2.3.3 Summary Output

Dalam metode *Taguchi*, *Summary output* merujuk pada ringkasan analisis desain eksperimen (DOE) yang mencakup metrik kualitas model seperti S, R-sq, R-sq(adj), dan R-sq(pred), yang mirip dengan *output* regresi untuk mengevaluasi akurasi prediksi dan *goodness-of-fit* berdasarkan *signal-to-noise (S/N) Ratio* atau *Means* (Phadke, 1989; Roy, 2001).

- a. S (*Standard Deviation*) adalah deviasi standar *Residual* model, mengukur variabilitas *Error* prediksi; nilai S yang rendah (misalnya <5% dari *Mean respons*) menunjukkan model stabil dan robust terhadap *noise*, dengan standar baik jika S mendekati nol relatif terhadap skala data (Roy, 2001).
- b. R-sq (*R-Squared*) adalah koefisien determinasi yang mengukur proporsi variasi *respons* yang dijelaskan oleh faktor kontrol; nilai standar >70% menandakan model baik, di mana $R-sq = 1 - (SS_{Residual} / SS_{Total})$, semakin tinggi semakin akurat penjelasan variasi (Phadke, 1989).
- c. R-sq(adj) (*Adjusted R-Squared*) adalah R-sq yang disesuaikan dengan jumlah prediktor dan ukuran sampel, mencegah *overestimation*; standar yang baik >60% untuk model kompleks, dihitung $R-sq(adj) = 1 - [(1 - R-sq)(n-1)/(n-p-1)]$, di mana n=sampel dan p=prediktor, berguna untuk membandingkan model (Roy, 2001).
- d. R-sq(pred) (*Predicted R-Squared*) mengukur kemampuan model memprediksi *respons* baru melalui *cross-validation*; nilai standar >50% menunjukkan prediksi reliable, dihitung dari PRESS (*Predicted Residual*

Sum of *Squares*), dengan ideal jika mendekati $R\text{-sq}(\text{adj})$ untuk menghindari overfitting (Phadke, 1989).

2.3.4 ANOVA (*Analysis of Variance*)

Dalam metode *Taguchi*, ANOVA (*Analysis of Variance*) digunakan untuk menganalisis pengaruh faktor kontrol terhadap *respons* (seperti *S/N Ratio* atau *Means*) melalui dekomposisi variasi total, dengan tujuan mengidentifikasi faktor signifikan secara statistik (Wibowo et al., 2016; Roy, 2010).

- a. DF (*Degrees of Freedom*) adalah derajat kebebasan untuk setiap sumber variasi, dihitung sebagai (*Level* faktor - 1) untuk faktor utama, (total observasi - 1) untuk total, dan sisa untuk *Error*; nilai standar DF *Error* >5-10 untuk estimasi varians yang reliabel (Wibowo et al., 2016).
- b. Adj SS (*Adjusted Sum of Squares*) adalah jumlah kuadrat yang disesuaikan untuk faktor, mengukur total variasi yang dijelaskan oleh faktor setelah menghilangkan efek rata-rata; standar baik jika Adj SS faktor > Adj SS *Error*, menunjukkan kontribusi signifikan (Roy, 2010).
- c. Adj MS (*Adjusted Mean Square*) adalah rata-rata jumlah kuadrat (Adj SS / DF), mewakili estimasi varians untuk faktor atau *Error*; nilai Adj MS faktor yang tinggi relatif terhadap *Error* menandakan pengaruh kuat (Wibowo et al., 2016).
- d. *F-Value* adalah statistik uji $F = (\text{Adj MS faktor} / \text{Adj MS Error})$, mengukur rasio varians antar-faktor versus *Error*; nilai standar >4-5 (tergantung DF) menunjukkan faktor signifikan (Roy, 2010).

- e. *P-Value* adalah probabilitas dari distribusi F, menguji hipotesis nol (tidak ada pengaruh faktor); nilai standar $<0,05$ menolak H_0 , berarti faktor berpengaruh signifikan pada $\alpha=0,05$ (Wibowo et al., 2016).
- f. *Error* adalah sumber variasi *Residual* (tidak dijelaskan oleh faktor), termasuk *noise* dan interaksi; *Adj SS Error* rendah ($<10-20\%$ dari total) menunjukkan model baik, dengan *DF Error* yang memadai untuk uji F (Roy, 2010).
- g. Total adalah jumlah keseluruhan variasi ($SST = \text{Adj SS faktor} + \text{Adj SS Error}$), dengan *DF total* = total observasi - 1; digunakan sebagai basis persentase kontribusi (Wibowo et al., 2016).

2.3.5 Coefficients

Dalam metode *Taguchi*, tabel *Coefficients* muncul pada analisis regresi pasca-ANOVA untuk memodelkan efek faktor terhadap *respons* (*S/N Ratio* atau *Means*), di mana koefisien merepresentasikan pengaruh linear faktor (Roy, 2010; Phadke, 1989).

- a. *Constant* adalah *Intercept* model regresi, nilai *respons* saat semua faktor pada *Level* nol (*baseline*); standar baik jika mendekati target *respons*, menunjukkan stabilitas model tanpa faktor (Roy, 2010).
- b. *Coef* (*Coefficient*) adalah estimasi efek faktor, perubahan *respons* per unit perubahan *Level* faktor; koefisien positif menunjukkan pengaruh meningkat, negatif menurun, dengan nilai signifikan jika $>2-3$ kali *SE Coef* (Phadke, 1989).

- c. *SE Coef (Standard Error of Coefficient)* adalah kesalahan standar estimasi koefisien, mengukur presisi; nilai rendah ($<0,5$ relatif terhadap *Coef*) menandakan estimasi akurat dan reliable (Roy, 2010).
- d. *T-Value* adalah statistik uji $t = Coef / SE Coef$, menguji signifikansi individu faktor; nilai standar $>|2|$ ($\alpha=0,05$) menolak H_0 (efek=0), menunjukkan faktor berpengaruh (Phadke, 1989).
- e. *P-Value* adalah probabilitas dari distribusi t, menguji hipotesis nol; nilai $<0,05$ menandakan efek signifikan secara statistik pada tingkat kepercayaan 95% (Roy, 2010).
- f. *VIF (Variance Inflation Factor)* adalah ukuran multikolinearitas antar-faktor, dihitung $VIF = 1 / (1 - R^2)$ untuk setiap prediktor; nilai standar $<5-10$ menunjukkan tidak ada korelasi tinggi, >10 berisiko overfitting model (Phadke, 1989).

2.4 Teori Optimasi Dalam Proses Produksi

2.4.1 Optimasi Multirespon

Metode optimasi adalah teknik dalam statistika yang digunakan untuk membuat keputusan dengan tujuan tertentu, seperti meminimalkan biaya atau penggunaan bahan baku, serta memaksimalkan hasil atau efisiensi dalam proses produksi. Selain itu, optimasi bertujuan untuk menemukan respon terbaik dengan mengkombinasikan berbagai parameter. Dalam hal ini, optimasi bisa berupa respon tunggal maupun multirespon, di mana dalam optimasi multirespon, beberapa tujuan respon perlu dipertimbangkan secara bersamaan. Salah satu metode optimasi yang populer adalah metode *Taguchi*, yang dipilih karena tidak memerlukan asumsi

statistik dalam proses analisisnya. Metode ini mengandalkan dua alat utama, yakni *Orthogonal array* dan *Signal-to-Noise Ratio* untuk analisis yang lebih efisien (Winarni et al., 2017).

Optimasi *multirespons* adalah metode yang digunakan untuk mengoptimalkan lebih dari satu variabel atau respon dalam suatu proses secara bersamaan. Pada banyak penelitian, termasuk produksi *Crude Palm Oil* (CPO), dua respon yang sering diperhatikan adalah *rendemen* CPO dan kandungan *Free Fatty Acid* (FFA). Kedua respon ini sering kali memiliki tujuan yang berlawanan, seperti memperoleh *rendemen* tinggi namun tetap menjaga kandungan FFA rendah. Oleh karena itu, optimasi *multirespons* sangat penting dalam mencapai hasil yang optimal. Salah satu teknik yang banyak digunakan dalam optimasi *multirespons* adalah *Desirability Function*. Metode ini memungkinkan untuk menggabungkan beberapa tujuan optimasi menjadi satu nilai objektif tunggal, yang dapat dimaksimalkan, sehingga membantu peneliti untuk mencari solusi yang paling optimal secara keseluruhan.

Berikut adalah cara kerja *Desirability Function* dalam optimasi *multirespons*:

- a. Transformasi Respon ke Nilai Desirabilitas: Setiap respon dikonversi menjadi nilai desirabilitas (d_i), yang berkisar antara 0 hingga 1. Nilai 0 menunjukkan hasil yang tidak diinginkan, sementara nilai 1 menunjukkan hasil optimal. Fungsi desirabilitas berbeda berdasarkan tujuan optimasi:
 - 1) *Higher is Better*: Digunakan untuk respon yang lebih baik jika nilainya lebih tinggi, seperti *rendemen* CPO.
 - 2) *Smaller is Better*: Digunakan untuk respon yang lebih baik jika nilainya lebih rendah, seperti kandungan FFA.

- b. Penggabungan Nilai Desirabilitas: Setelah nilai desirabilitas untuk setiap respon dihitung, nilai-nilai tersebut digabungkan menjadi satu fungsi desirabilitas keseluruhan (D). Biasanya, penggabungan dilakukan dengan menggunakan rata-rata geometrik.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} \dots\dots\dots(2.13)$$

Di mana:

n adalah jumlah respon.

Tujuannya adalah untuk memaksimalkan nilai D.

- c. Pencarian Kondisi Optimal: Menggunakan metode numerik, kondisi *input* yang menghasilkan nilai D maksimum dapat ditemukan. Ini memberikan solusi optimal yang mempertimbangkan semua respon secara bersamaan.

2.4.2 Teori Umum Metode-Metode optimasi proses

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

- a. Metode *Taguchi*: Fokus pada desain eksperimen efisien untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas produk. Dengan menggunakan *Orthogonal array* (OA), metode ini mengoptimalkan proses dengan meminimalkan variasi dan memastikan produk berkualitas tinggi dengan sedikit percobaan.

- b. Desain Faktorial: Evaluasi semua kombinasi faktor untuk memahami interaksi antara mereka. Desain faktorial penuh memberikan informasi komprehensif tetapi memakan waktu dan biaya, sedangkan desain fraksional mengurangi jumlah percobaan.
- c. *Response Surface Methodology* (RSM): Digunakan untuk memodelkan hubungan non-linear antara variabel dan *respons*. RSM membantu mengidentifikasi kondisi optimal dan memvisualisasikan hubungan antara *input* dan *output*.
- d. Metode Heuristik dan Algoritma Genetika: Kedua pendekatan ini digunakan untuk masalah kompleks dengan banyak variabel, di mana algoritma genetika mencari solusi optimal menggunakan prinsip seleksi alam, sementara metode heuristik berbasis aturan memberikan solusi cepat.
- e. *Six Sigma*: Fokus pada pengurangan variasi dalam proses untuk meningkatkan kualitas, menggunakan analisis statistik untuk menghilangkan penyebab cacat dan mengurangi variabilitas.
- f. Eksperimen Terencana: Merupakan dasar dari optimasi proses statistik, di mana eksperimen direncanakan untuk mengeksplorasi banyak faktor secara efisien. Desain faktorial penuh dan fraksional membantu dalam mengevaluasi kombinasi faktor.
- g. Pendekatan Fungsi Desirabilitas: Mengoptimalkan beberapa *respons* secara simultan dengan menggabungkan hasil menjadi skor desirabilitas tunggal, sehingga memudahkan pengambilan keputusan dalam mencapai hasil yang diinginkan.

Pengendalian Proses Statistik (SPC): Digunakan untuk memantau dan memastikan proses beroperasi secara optimal dengan diagram kontrol untuk mendeteksi penyimpangan dan pemantauan real-time

2.5.2 Faktor-Faktor Kehilangan Minyak Selama Proses Produksi

Berikut adalah faktor-faktor yang dapat menyebabkan kehilangan minyak selama proses pengolahan:

- a. Proses perebusan harus disesuaikan agar tidak terlalu lama atau singkat.

Perebusan yang terlalu singkat akan mengakibatkan banyak buah tidak terpipil, sedangkan perebusan yang terlalu lama menyebabkan penurunan kadar air dalam minyak buah dan meningkatkan kerugian minyak pada air kondensat. Tingginya kadar *oil losses* pada kondensat disebabkan oleh waktu perebusan yang berlebihan. Selain itu, jika waktu deaerasi kurang optimal, maka *oil losses* pada tandan kosong akan meningkat. Suhu perebusan di sterilizer juga memengaruhi hasil akhir minyak sawit. Suhu yang lebih tinggi mempercepat pemasakan, sehingga minyak yang dihasilkan bertambah, namun meningkatkan kadar air dalam minyak akibat kandungan air yang tinggi pada uap jenuh yang digunakan (Masruroh & Mardesci, 2021). Selama pemanasan, khususnya pada suhu tinggi, sebagian minyak bisa menguap, menyebabkan kehilangan minyak akibat evaporasi. Fenomena ini sering terjadi pada tahap perebusan dan pemisahan. Apabila suhu terlalu tinggi atau waktu pemanasan diperpanjang, risiko evaporasi meningkat, yang berujung pada kerugian minyak.

- b. Pemisahan minyak yang tidak sempurna: Kualitas peralatan sangat memengaruhi hasil pemisahan minyak. Mesin seperti *screw press* harus

beroperasi optimal untuk memastikan ekstraksi minyak maksimal dari bahan baku. Jika peralatan tidak berfungsi dengan baik atau kurang perawatan, sisa minyak yang tertinggal dalam ampas akan meningkat (Kurniawan, 2022). Tekanan dan suhu dalam proses juga berpengaruh terhadap efisiensi pemisahan. Misalnya, tekanan yang terlalu rendah pada mesin pres bisa mengurangi efektivitas ekstraksi minyak dari brondolan sawit. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pada mesin pres membantu mengurangi kehilangan minyak (Kurniawan, 2022; Basuki et al., 2023).

- c. Kualitas bahan baku, khususnya kondisi Tandan Buah Segar (TBS), sangat memengaruhi hasil ekstraksi minyak. TBS yang belum matang atau telah membusuk cenderung menghasilkan lebih banyak kehilangan minyak karena proses pengolahannya menjadi kurang efisien. Buah yang rusak atau tidak memenuhi standar akan menyulitkan proses ekstraksi dan mengakibatkan jumlah ampas yang lebih banyak (Kurniawan, 2022; Damanik et al., 2023).
- d. Pengoperasian mesin yang efisien sangat bergantung pada keterampilan dan pelatihan operatornya. Operator yang kurang terlatih mungkin mengalami kesulitan dalam menjalankan mesin dengan optimal, yang dapat mengakibatkan peningkatan risiko kehilangan minyak dalam proses pengolahan. Kurangnya disiplin dan perhatian terhadap prosedur operasi standar (SOP) juga dapat menyebabkan kesalahan dalam proses pengolahan (Basuki et al., 2023).

Perawatan yang kurang baik atau mesin yang aus akibat pemakaian terus-menerus dapat menurunkan efisiensi ekstraksi minyak. Ketika kinerja mesin menurun, lebih banyak minyak akan tertinggal dalam ampas, yang berdampak pada peningkatan kerugian minyak selama proses pengolahan (Basuki et al., 2023; Damanik et al., 2023).

2.5 Kerusakan Bahan Baku dan Kehilangan Minyak

2.5.1 Faktor-Faktor Kerusakan Bahan Baku

Perebusan adalah langkah penting dalam pengolahan bahan baku, terutama di industri makanan dan minyak. Namun, beberapa faktor dapat mengakibatkan kerusakan bahan baku selama tahap ini, seperti pemanasan berlebihan (*Overcooking*) dan mekanisme kerusakan lainnya. Berikut adalah faktor-faktornya:

a. Pemanasan Berlebihan (*Overcooking*)

Pemanasan yang berlangsung terlalu lama dapat menyebabkan kerusakan pada struktur jaringan buah kelapa sawit, membuatnya menjadi lebih lembek. Kondisi ini meningkatkan risiko kehilangan minyak, karena minyak lebih mudah merembes keluar dari jaringan yang rusak. Penelitian menunjukkan bahwa waktu optimal untuk perebusan berada antara 90 hingga 100 menit. Apabila waktu ini terlampaui, kerusakan pada jaringan buah meningkat, dan minyak dapat ikut terbawa dalam air kondensasi, sehingga terjadi kerugian yang signifikan dalam jumlah minyak yang hilang (Zakaria & Susanto, 2022; Nugraha & Supriyanto, 2023).

b. Kehilangan Minyak dalam Air Rebusan

Jika perebusan berlangsung terlalu lama, minyak dapat bercampur dan membentuk emulsi dengan air, menyulitkan proses pemisahan minyak dari air setelah perebusan. Kondisi ini menyebabkan kehilangan minyak yang signifikan. Proses emulsifikasi ini dipengaruhi oleh suhu tinggi dan waktu pemanasan yang berlebihan, yang mengubah sifat fisik minyak dan meningkatkan kemungkinan terbentuknya emulsi (Zakaria & Susanto, 2022; Nugraha & Supriyanto, 2023).

c. Kerusakan Akibat Suhu Tinggi

Pada suhu tinggi, komponen-komponen dalam kelapa sawit seperti trigliserida dapat terurai menjadi asam lemak bebas (FFA) dan senyawa lain. Pemanasan yang berlangsung lebih lama akan mempercepat pembentukan FFA, yang menandakan penurunan kualitas minyak (Putranto et al., 2022). Penelitian menunjukkan bahwa kadar FFA tertinggi dihasilkan pada waktu perebusan yang lebih singkat karena pada waktu yang lebih lama, aktivitas enzim lipase terhambat pada suhu tinggi, tetapi proses pemanasan yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan kualitas minyak

d. Kualitas Uap dan Pengaturan Tekanan

Pengaturan tekanan uap yang kurang optimal selama proses perebusan dapat menyebabkan peningkatan kerugian minyak. Distribusi uap yang tidak merata atau tekanan yang tidak sesuai dengan prosedur dapat mengurangi efektivitas pemisahan minyak, sehingga minyak yang seharusnya diekstraksi dapat hilang dalam proses (Zakaria & Susanto, 2022; Nugraha & Supriyanto, 2023).

e. Kebocoran dan Kerusakan Peralatan

Kerusakan pada peralatan, seperti sterilizer, dapat menyebabkan kerugian dalam proses perebusan. Kebocoran pada pipa uap atau pintu sterilizer dapat mengurangi tekanan, menurunkan efisiensi pemanasan, dan memengaruhi kualitas hasil akhir produk (Zakaria & Susanto, 2022; Amalia et al., 2022)

2.6 Tinjauan Penelitian Terdahulu

2.6.1 Studi Kasus Optimasi

Berikut adalah tinjauan mengenai penelitian terdahulu yang telah mengaplikasikan metode *Taguchi* atau metode optimasi lainnya dalam produksi CPO (*Crude Palm Oil*) atau pengolahan minyak nabati lainnya:

Tabel 2. 5 Penelitian terdahulu.

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Dari Penelitian
Yusnawati, Taufan Arif Adlie, Yusri Nadya, Muhammad	Penerapan Metode <i>Taguchi</i> untuk Meminimumkan Biaya Kerugian Kualitas <i>Crude Palm Oil</i>	Penelitian ini berhasil mengoptimalkan proses pengolahan CPO sehingga kadar asam lemak bebas (ALB/FFA) dapat ditekan maksimal 3,5% dengan variabel utama kematangan buah, lama perebusan, dan tekanan pengepresan. Kombinasi optimal ditemukan pada kematangan buah <i>level</i> 3, perebusan 90 menit, dan tekanan 40 bar.
Ahmad Rizki Sitorus	Perbaikan Kualitas <i>Crude Palm Oil</i> Dengan Pendekatan Metode <i>Taguchi</i>	Identifikasi tiga faktor utama mempengaruhi kualitas CPO adalah kematangan buah, tekanan perebusan, dan temperatur di unit klarifikasi. Kombinasi optimum ditemukan dengan tekanan perebusan 3 kg/cm ³ , kematangan buah

		matang, dan temperatur klarifikasi 90°C.
Yusnawati	Penerapan Aplikasi Metode <i>Taguchi</i> untuk Analisis Pengendalian Kualitas Produksi Crude Sawit	Faktor-faktor terpenting pengaruh kualitas CPO adalah tekanan didih, temperatur didih, dan temperatur unit klarifikasi. Pengaturan optimal dapat menurunkan proporsi cacat hingga 10,42%.
Irwansyah	Analisa Pengendalian Kualitas Rbdpo Dengan Menggunakan Metode <i>Taguchi</i> Pada Pt. Multimas Nabati Asahan	Hasil analisa diolah menggunakan metode rata-rata, analisis varians dan strategi pooling up. Dari hasil kesimpulan menunjukkan bahwa untuk kadar ALB setting yang paling optimal yaitu tekanan perebusan pada <i>level 1</i> (2,0 torr), temperature perebusan pada <i>level 2</i> (105°C) dan waktu pada proses perebusan pada <i>level 1</i> (50 min).
Nor Shafizah, R. Irmawati, Hishamuddin Omar, M. Yahaya, A. Alia Aina	<i>Removal of free fatty acid (FFA) in crude palm oil (CPO) using potassium oxide/dolomite as an adsorbent: Optimization by Taguchi method</i>	Metode <i>Taguchi</i> digunakan untuk optimasi penghilangan FFA dengan hasil menurunkan kadar FFA secara signifikan pada produksi CPO.

2.6.2 Pengaruh Parameter-Parameter Serupa Dalam Industri Minyak Nabati Lainnya

Berikut adalah tinjauan mengenai penelitian yang telah mengaplikasikan metode *Taguchi* atau metode optimasi lainnya dalam produksi CPO atau pengolahan minyak nabati lainnya, dengan fokus pada pengaruh variabel seperti suhu, tekanan, dan waktu terhadap kualitas minyak:

- a. Pengaruh Suhu dan Tekanan pada Deodorisasi Minyak Sawit: Penelitian ini membahas pengaruh suhu dan tekanan vakum dalam proses deodorisasi minyak sawit. Didapatkan bahwa suhu optimal sekitar 267°C dengan tekanan vakum 2,8 mbar mampu menurunkan kadar asam lemak bebas (FFA) di bawah 0,1% dan meningkatkan warna minyak. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi termal berlebihan, yang pada akhirnya menurunkan kualitas minyak (Veriska & Youfa, 2021)
- b. Analisis Kehilangan Minyak Selama Perebusan: Penelitian ini mempelajari kehilangan minyak selama perebusan dengan mempertimbangkan waktu dan tekanan. Ditemukan bahwa semakin lama waktu perebusan dan semakin tinggi tekanannya, semakin besar kehilangan minyak. Kondisi optimal diperoleh pada waktu perebusan 90-100 menit dengan tekanan 3,0 kg/cm², yang menunjukkan penurunan kehilangan minyak yang signifikan (Nugraha & Supriyanto, 2023).
- c. Pengaruh Suhu Penyimpanan terhadap Kualitas Minyak Kelapa: Studi ini mengevaluasi pengaruh suhu penyimpanan terhadap kadar FFA dalam minyak kelapa tradisional. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu penyimpanan, semakin tinggi kadar FFA, menekankan pentingnya pengendalian suhu untuk menjaga kualitas minyak nabati (Liputo et al., 2024).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

3.1.1 Waktu Penelitian

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

No.	Kegiatan	Tahun 2024				Tahun 2025									
		September	Oktober	November	Desember	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober
1	Studi literatur dan konsultasi dengan dosen pembimbing	■													
2	Pengajuan judul tugas akhir		■												
3	Penulisan laporan		■	■											
4	Pengajuan seminar proposal			■	■										
5	Seminar proposal				■	■									
6	Pengambilan data penelitian					■	■								
7	Penyelesaian laporan							■	■						
8	Pengajuan seminar hasil									■					
9	Seminar hasil										■	■			
10	Evaluasi dan persiapan sidang											■	■	■	
11	Sidang sarjana													■	

3.1.2 Tempat Penelitian

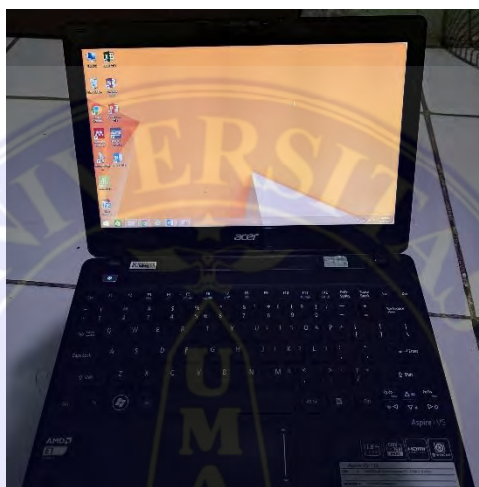
Lokasi penelitian berada di sebuah PT. Pabrik pengolahan kelapa sawit yang bergerak dalam bidang pengolahan kelapa sawit menjadi minyak mentah (*Crude Palm Oil*). Pabrik ini berlokasi di Jl. Sialang II, Kec. Medan Buah, Teluk Mengkudu, Serdang Berdagai, *Sumatra Utara* 20997. Waktu Penelitian ini akan dilaksanakan dalam kurun waktu 1 bulan.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

a. Laptop

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



Gambar 3. 1 Laptop.

b. *Software Minitab*

Software mintab adalah sebuah atau perangkat alat statistika yang dibuat dan dirancang untuk pengolahan data statistic seperti contoh nya adalah metode *Taguchi Software* ini akan digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis optimasi terhadap proses pengolahan *Crude Palm Oil*.



Gambar 3. 2 *Software Minitab.*

c. *Microsoft Excel*

Microsoft Excel adalah aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk mengolah data dalam bentuk tabel. Pada penelitian ini *Microsoft Excel* digunakan sebagai media lembar kerja (*spreadsheet*), perhitungan matematika dan formula dan menganalisis data.



Gambar 3. 3 *Software Microsoft Excel.*

3.2.2 Bahan

Bahan dalam penelitian ini berupa data-data proses produksi dari pabrik kelapa sawit yang berkaitan langsung dengan pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menjadi CPO. Data yang digunakan mencakup variabel-variabel proses

seperti suhu, tekanan, waktu proses, kandungan air, serta *rendemen* dan kandungan asam lemak bebas (FFA) dalam CPO. Data ini diambil dari hasil pengukuran dan catatan historis di pabrik, yang kemudian dianalisis untuk menentukan faktor-faktor yang berpengaruh signifikan dalam proses pengolahan CPO.

3.3 Metode Penelitian

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

3.4 Populasi dan Sampel

Dalam penelitian ini dilakukan pengumpulan data dengan cara mengamati objek dan melakukan riset ke lokasi tempat penelitian, selanjutnya mencatat data-data yang diperlukan untuk melengkapi data yang dibutuhkan dalam penyusunan tugas akhir.

Tabel 3. 2 Populasi dan Sampel

Run order	X1 Suhu perebusan (°C)	X2 Tekanan kerja (bar)	X3 Lama perebusan (menit)	Y1 <i>Rendemen</i> CPO	Y2 Kandungan FFA
1	?	?	?	?	?
2	?	?	?	?	?
3	?	?	?	?	?
4	?	?	?	?	?
5	?	?	?	?	?

3.5 Prosedur kerja

Berikut adalah prosedur kerja penelitian untuk menganalisis dan mengoptimalkan proses produksi *Crude Palm Oil* (CPO) dengan menggunakan metode *Taguchi*:

a. Persiapan Penelitian:

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

b. Desain Eksperimen (Metode *Taguchi*)

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

c. Pengumpulan Data Eksperimental

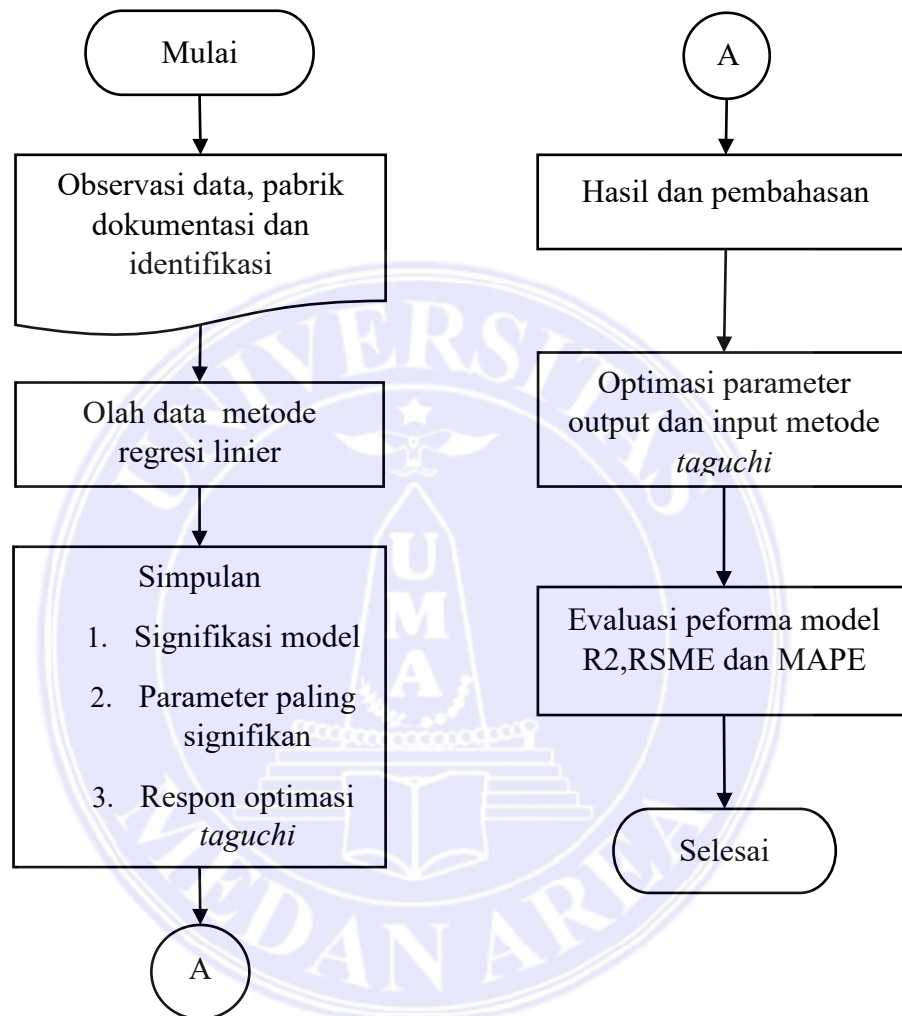
- 1) Lakukan eksperimen sesuai matriks *Taguchi*, catat hasil *rendemen* CPO dan FFA untuk setiap kombinasi.

d. Analisis Data (*Minitab*)

- 1) Masukkan data ke *Minitab*, lakukan ANOVA untuk analisis signifikansi variabel.

- 2) Identifikasi variabel signifikan dan tentukan kombinasi optimal.

3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 4 Diagram alir penelitian

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berlandaskan hasil analisis yang diperoleh melalui pendekatan regresi linear dan metode *Taguchi* dalam upaya optimisasi proses produksi, penelitian ini diperoleh beberapa kesimpulan terkait pengaruh variabel proses terhadap *rendemen* CPO dan kadar ALB, sebagai berikut:

- a. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lama waktu perebusan berpengaruh signifikan terhadap *rendemen* CPO dan kadar FFA dengan nilai *P-value* masing-masing 0,000 dan 0,001, sehingga faktor ini menjadi variabel paling dominan dalam proses perebusan. Δ suhu perebusan berpengaruh signifikan terhadap *rendemen* CPO dengan *P-value* 0,001, namun tidak signifikan terhadap kadar FFA (*P-value* 0,064). Sementara itu, Δ tekanan uap perebusan tidak berpengaruh signifikan terhadap keduanya karena memiliki *P-value* 1,000 untuk *rendemen* CPO dan 0,586 untuk kadar FFA.
- b. Model regresi yang digunakan memiliki R^2 sebesar 99,15% untuk *rendemen* CPO dan 92,80% untuk kadar FFA, menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sebagian besar variasi data dengan sangat baik. Nilai MAE, MAPE, MSE, dan RMSE yang berada pada kategori “sangat baik” menegaskan bahwa model memiliki tingkat akurasi dan presisi yang tinggi. Dengan demikian, model optimasi dinilai layak dan efektif dalam menggambarkan hubungan antarvariabel serta memprediksi hasil proses perebusan kelapa sawit.

- c. Berdasarkan metode *Taguchi* dan persamaan regresi, diperoleh kombinasi optimal pada lama waktu perebusan 80 menit, untuk *rendemen* CPO dan 86 menit untuk kadar FFA, Δ suhu perebusan $40,1^{\circ}\text{C}$, dan Δ tekanan uap 1,58 bar. Kombinasi ini menghasilkan *rendemen* CPO optimal sebesar 42,17% dan kadar FFA minimum sebesar 2,40%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi tersebut merupakan parameter operasi terbaik untuk memaksimalkan *rendemen* CPO sekaligus meminimalkan kadar FFA pada proses perebusan minyak kelapa sawit.

5.2 Saran

Melalui temuan yang diperoleh dari penerapan regresi linear dan metode *Taguchi* terhadap parameter lama waktu perebusan, suhu perebusan, dan tekanan uap, terdapat beberapa poin yang dapat dijadikan dasar pertimbangan praktis bagi industri serta arah pengembangan dalam penelitian lanjutan, yaitu:

- a. Saran kepada Pabrik

Optimalkan lama waktu perebusan dan suhu perebusan dalam batas aman operasional karena kedua variabel ini terbukti paling signifikan dalam meningkatkan *rendemen* dan menurunkan kadar ALB. Tekanan uap perebusan (X3) tidak memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik, sehingga dapat dikaji efisiensi energi dengan menyesuaikan tekanan pada *Level* yang cukup tanpa mengorbankan kualitas produksi. Disarankan untuk menetapkan standar operasional, terutama dalam mengontrol waktu dan suhu perebusan untuk memperoleh hasil yang konsisten dan optimal. Monitoring rutin terhadap parameter proses dan kualitas hasil sangat

penting agar model prediksi yang dikembangkan dapat diimplementasikan secara efektif.

b. Saran untuk Pengembangan Penelitian Selanjutnya

Perluasan variabel penelitian selanjutnya dapat menambahkan variabel lain seperti tandan buah segar (TBS), tekanan pada mesin *screw press*, atau kecepatan pembanting pada *thresher* buah yang dapat memengaruhi hasil CPO dan kadar ALB. Skala waktu lebih panjang, uji coba pada rentang waktu lebih lama.

c. Metode Alternatif

- 1) Metode Non-Linear atau *Machine Learning* guna mengingat pada Y2 ditemukan indikasi non-linearitas dan autokorelasi, penggunaan model non-linear *Regression*, *Random Forest*, atau *Artificial Neural Networks* (ANN) bisa menjadi alternatif untuk meningkatkan akurasi prediksi.
- 2) Metode RSM (*Response Surface Methodology*) Dapat digunakan untuk lebih mendetailkan hubungan interaktif antar variabel dan memperoleh titik optimasi lebih presisi.
- 3) Desain eksperimen lain seperti *Central Composite Design* (CCD) atau *Box-Behnken Design* dapat digunakan sebagai alternatif atau pelengkap dari metode *Taguchi*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahadi, G. D., Pratiwi, S. W., & Isnarwaty, D. P. (2023). Pendekatan Desain Eksperimen *Taguchi* Sebagai Metode Optimasi Pada Bidang Teknik Dan Industri (Studi Kasus Pada Proses Bundling Kemasan): Design Of Experiment *Taguchi* As An Optimisation Method In Engineering And Industry. *Sainstech Innovation Journal*, 6(2), 380-388.
- Ali, M. F., Sibuea, S. R., & Suliawati, S. (2023). Perhitungan Kualitas Mutu Minyak Cpo Dengan Metode Six Sigma Di Pt Pp Pati Sari. *Factory Jurnal Industri, Manajemen Dan Rekayasa Sistem Industri*, 2(1), 39-45.
- Almumtazah, A., Putra, R. A., & Sari, D. K. (2021). Analisis Regresi Linier Sederhana Dan Berganda Beserta Aplikasinya. *Journal On Education*, 6(2), 13331-13344.
- Amalia, W., Ramadian, D., & Hidayat, S. N. (2022). Analisis Kerusakan Mesin Sterilizer Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Failure Modes And Effect Analysis (Fmea). *Jurnal Teknik Industri*, 8(2), 369-377.
- Amanda, A. S., Azhari, A., Sulhatun, S., Suryati, S., & Meriatna, M. (2022). Penurunan Kadar Ffa (*Free Fatty Acid*) Minyak Kelapa Sawit Menggunakan Adsorben Pencampuran Bentonit Dan Tanah Liat (Lempung) Melalui Proses Adsorpsi. *Chemical Engineering Journal Storage (Cejs)*, 2(1), 82-92.
- Basuki, M., Pamungkas, I., & Tamalika, T. (2023). Identifikasi Penyebab Kehilangan Crude Palm Oil (Cpo) Di Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Optimalisasi*, 9(1), 40-44.
- Candra, H. (2021). *Alat Dan Proses Pengolahan Kelapa Sawit Pt. Tasik Raja Anglo Eastern Plantation* (Doctoral Dissertation, Politeknik Lpp).
- Chaniago, J. (2008). Memahami Output Regresi Dari Excel. <https://Junaidichaniago.wordpress.com/2008/07/03/Memahami-Output-Regresi-Dari-Excel/>
- Damanik, R. I., Zurairah, M., Rezeki, R., & Refiza, R. (2023). Analisis Kehilangan Minyak (Oil Losses) Pada Proses Pengolahan Cpo (Crude Palm Oil) Di Pt.

- Perkebunan Nusantara Iv Kebun Adolina. *Vocatech: Vocational Education And Technology Journal*, 5(1), 47–59.
- Dqlab. (2020). Analysis Toolpak Excel, Tools Analisis Statistik Yang Jarang Diketahui. <https://Dqlab.Id/Analysis-Toolpak-Excel-Tools-Statistik-Yang-Jarang-Diketahui>
- Fikti Umsu. (2023). Microsoft Excel: Pengertian, Sejarah, Fungsi, Manfaat, Dan Kelebihan. <https://Fikti.Umsu.Ac.Id/Microsoft-Excel-Pengertian-Sejarah-Fungsi-Manfaat-Dan-Kelebihan/>
- Froehlich, Z. (2021). *Multiple R Vs. R-Squared: What's The Difference?* Statology. <https://Www.Statology.Org/Multiple-R-Vs-R-Squared/>
- Frost, J. (2025). How To Interpret R-Squared In Regression Analysis. Statistics By Jim. <https://Statisticsbyjim.Com/Regression/Interpret-R-Squared-Regression/>
- Ghozali, I. (2018). Pengaruh Perceived Value Terhadap Kepuasan Implementasi Mbkm. *Jurnal Ilmiah Manajemen Kesmas*, 7(1), 1–10.
- Graduate Tutor. (2016). Interpreting Regression Output (Without All The Statistics Theory). <https://Www.Graduatetutor.Com/Statistics-Tutor/Interpreting-Regression-Output/>
- Hartati, R., Marlinda, M., Hidjrawan, Y., & Puspita, R. (2022). Pengendalian Oil Losses Pada Titik Losses Crude Palm Oil Dengan Metode Statistical Process Control Di Pt. Ujong Neubok Dalam. *Jurnal Optimalisasi*, 8(2), 174-180.
- Hassan, N. S. M., Aziz, N. A. A., Ahmad, S. A., & Nor, M. N. M. (2021). Influence Of Fresh Palm Fruit Sterilization In The Production Of Carotenoid-Rich Virgin Palm Oil. *Foods*, 10(11), 2838.
- Hasibuan, H. A. (2018). Deterioration Of Bleachability Index Pada Crude Palm Oil: Bahan Review Dan Usulan Untuk Sni 01-2901-2006. *Jurnal Standardisasi*, 18(1), 25-34.
- Hasibuan, H. A. (2016). Pengaruh Suhu Proses Pada Saat Bleaching Terhadap Pemucatan Warna Cpo. *Jurnal Standardisasi*, 14(1), 13-21.
- Hasibuan, H. A., & Junaidah. (2013). Studi Pengaruh Suhu Pemanasan Terhadap Mutu Minyak Sawit. *Jurnal Teknik Industri*.

- Hidayat, R., Fauzi, Y., & Ramadhan, F. (2022). Analisis Regresi Berganda Pada Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Harga Saham. *Emerging Statistics And Data Science Journal*, 1(1), 53–65.
- Iskandar, Hudori, M., & Lubis, A. (2025). Pengaruh Kadar Air, Suhu Dan Lama Penyimpanan Terhadap Kenaikan Asam Lemak Bebas Pada *Crude Palm Oil* (Cpo). *Jurnal Agro Fabrica*, 6(2), 96–106.
- Jannah, M., Gunawan, E., & Ginting, Y. (2023). Fungsi Utama Aplikasi Minitab Untuk Analisis Data. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi*, 7(2), 122-135.
- Junaidi, C. (2008). Memahami Output Regresi Dari Excel. <https://Junaidichaniago.wordpress.com/2008/07/03/Memahami-Output-Regresi-Dari-Excel/>
- Junaidi, J. (2014). Regresi Dengan Microsoft Office Excel. *Jambi. Fakultas Ekonomi Dan Bisnis Universitas Jambi*.
- Junaidi, J., Pratama, Y., & Hakim, A. (2020). Analisa Sensitivitas Model Regresi Linier Berganda Menggunakan Pendekatan Bayesian. *Jurnal Data Analisis*, 3(1), 1–12.
- Kurniawan, E. W. (2022). *Pengaruh Tekanan Pada Mesin Pres Terhadap Persentase Kehilangan Minyak (Oil Losses) Pada Stasiun Pengepresan Di Pabrik Minyak Sawit Pt. Sentosa Kalimantan Jaya Berau: The Effect Of Pressing Machine Pressure On The Percentage Of Oil Losses At The Pressing Station Of Pt. Sentosa Kalimantan Jaya Berau Palm Oil Mill*. *Buletin Loupe*, 18(02), 111–116.
- Levia, D. (2023). Analisis Proses Produksi Cpo Untuk Mengidentifikasi Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Kualitas Mutu Cpo. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, 2(2), 82-89.
- Liputo, S. A., Une, S., Mutsyahidan, A. M. A., Lodi, S., Ibrahim, N., Tunai, K., ... & Sari, N. P. (2024, August). Pengaruh Suhu Penyimpanan Terhadap Minyak Kelapa Tradisional. In *Prosiding Seminar Nasional Mini Riset Mahasiswa* (Vol. 3, No. 1).

- Mas'ud, R., Sari, D. P., & Setiawan, A. (2023). Pengaruh Jangka Waktu Perebusan Terhadap Rendemen Dan Karakteristik *Crude Palm Oil*. *Jurnal Agribisnis & Teknologi*, Universitas Ma'some.
- Masruroh, L., & Mardesci, H. (2021). Proses Perebusan Tbs Kelapa Sawit Pada Stasiun Sterilizer (Studi Kasus Pada Pt. Tri Bakti Sarimas Pks 2 Ibul, Riau). *Jurnal Teknologi Pertanian*, 10(1), 43-48
- Minitab. (2024). What Is The Signal-To-Noise Ratio In A *Taguchi* Design? <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>
- Morakinyo, T. A., & Bamgboye, A. I. (2017). Optimization Of Operation Parameters Of A Vertical Sterilizer Of Medium-Scale Oil Palm Mill Using *Taguchi* Method. *Journal Of Food Process Engineering*, 40(6), E12521.
- Najma, A. N. (2018). Validasi Analisis Ffa (*Free Fatty Acid*) Untuk Mengetahui Validitas Metode Analisis Yang Dipergunakan Sebagai Penentu Kualitas Minyak Di Pabrik Minyak Kelapa Sawit. *Buletin Profesi Insinyur*, 1(2), 27-30.
- Nor Shafizah, I., Nurfathihah, Z., Nurul Ain, H., & Abdul Rahman, M. (2022). Removal Of Free Fatty Acid (Ffa) In Crude Palm Oil (Cpo) Using Potassium Oxide/Dolomite As An Adsorbent: Optimization By *Taguchi* Method. *Food Chemistry*, 368, 130835.
- Nugraha, I., & Supriyanto, G. (2023). Pengaruh Lama Waktu Penaikan Setiap Puncak Kehilangan Minyak (*Oil Losses*) Pada Air Rebusan Di Pks Adolina Sumatera Utara. *Agroforetech*, 1(3), 2040-2050.
- Nurani, Y., Mustika, N. M., & Saputro, R. H. (2023). Perbandingan Kinerja Regresi Decision Tree Dan Regresi Linear Berganda. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 6(1), 34-43.
- Nofiar, A. (2021). Pembuatan Media Interaktif Alur Proses Pengolahan Kelapa Sawit Menjadi Cpo. *Jami: Jurnal Ahli Muda Indonesia*, 2(2), 150-165.
- Pakdeechot, P., Thepa, S., & Kongkiattakajorn, J. (2019). Effects Of Sterilization Times Of Palm Bunches On Fruit Separation And Crude Palm Oil Yield. *Energy Procedia*, 156, 27-32.

- Panduan Regresi. (N.D.). Panduan Lengkap: Cara Melaporkan Hasil Regresi Linier Berganda. Repository Universitas Bakrie. <https://Repository.Bakrie.Ac.Id/8933/1/Panduan%20lengkap%20cara%20melaporkan%20hasil%20regresi%20linier%20berganda.Pdf>
- Phadke, M. S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall.
- Purwanto, E., Ramadhan, D., & Ali, F. (2021). Sifat Minyak Sawit Pada Variasi Suhu Dan Waktu Pemanasan. *Jurnal Teknik Kimia*.
- Putranto, A. W., Priyanto, A. D., Estiasih, T., Widyasari, W., & Sanjaya, Y. A. (2022). Optimasi Waktu Pemanasan Awal Dan Waktu Pasteurisasi Pef Terhadap Asam Lemak Bebas, Vitamin C, Dan Ph Pada Pengolahan Susu. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 16(3), 348-359.
- Real Statistics Using Excel. (2025). Signal-To-Noise Ratio. <https://Real-Statistics.Com/Design-Of-Experiments/Taguchi-Design-Of-Experiments/Signal-To-Noise-Ratio/>
- Roy, R. K. (2010). *A Primer On The Taguchi Method* (2nd Ed.). Society Of Manufacturing Engineers
- Roy, R. K. (2001). *Design Of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps To Product And Process Improvement*. Wiley.
- Rpubs. (2024). Permasalahan Analisis Regresi Linier Dan Asumsinya. <https://Rpubs.Com/Nragil423/1191811>
- Sari, N. P., Mulyadi, R., & Hasanah, U. (2022). Analisis Regresi Linier Berganda Dalam Estimasi Produktivitas Padi. *Jurnal Fisika Dan Budidaya*, 1(1), 1–15.
- Situmorang, F. (2023). *Analisis Pengendalian Kualitas Bubuk Kopi Dengan Metode Taguchi Di Ud. Sinar Harapan* (Doctoral Dissertation, Universitas Medan Area).
- Smartstat. (2023). Pelajari Regresi Linier Sederhana - Statistika. <https://Www.Smartstat.Info/Materi/Statistika/Regresi/Regresi-Linier-Sederhana.Html>
- Scribd. (2025). Interpretasi Analisis Regresi Dari Output Excel. <https://Id.Scribd.Com/Document/460196190/Interpretasi-Analisis-Regresi-Dari-Output-Excel>

- Scribd. (2025). Ringkasan Analisis Regresi. <https://id.scribd.com/document/452851627/Ringkasan-Analisis-Regresi-Docx>
- Shafizah, I. N., Irmawati, R., Omar, H., Yahaya, M., & Aina, A. A. (2022). Removal Of Free Fatty Acid (Ffa) In Crude Palm Oil (Cpo) Using Potassium Oxide/Dolomite As An Adsorbent: Optimization By *Taguchi* Method. *Food Chemistry*, 373, 131668.
- Silitonga, D. M. (2019). Penentuan Kadar Asam Lemak Bebas (*Free Fatty Acid*) Pada Cpo (*Crude Palm Oil*) Di Pt. Sucofindo Cabang Medan [Skripsi D-Iii Kimia, Universitas Sumatera Utara]. Repositori Usu. <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/21313>
- Statistikian. (2024). Cara Membaca Hasil Regresi Data Panel Dengan Eviews. <https://www.statistikian.com/2017/04/cara-membaca-hasil-regresi-data-panel.html>
- Statistikian. (2024). Tutorial Analisis Regresi Dengan Excel. <https://www.statistikian.com/2012/08/analisis-regresi-dalam-excel.html>
- Syntax Journal. (2021). Aplikasi Paket Statistik Untuk Metode Regresi Linier. <https://journal.unsika.ac.id/index.php/syntax/article/download/224/220>
- Sitorus, A. R. (2024). *Perbaikan Kualitas Cpo Dengan Pendekatan Metode Taguchi (Studi Kasus: Pt. Hamparan Sawit Makmur Medan)* (Doctoral Dissertation, Universitas Medan Area).
- Sitorus, M. L., Akoeb, E. N., Sembiring, R., & Siregar, M. A. (2020). Peningkatan Produksi *Crude Palm Oil* Melalui Kriteria Matang Panen Tandan Buah Segar Untuk Optimalisasi Pendapatan Perusahaan. *Agrisains: Jurnal Ilmiah Magister Agribisnis*, 2(1), 26-32.
- Vanderweele, T. (2024). *Adjusted R-Squared: A Clear Explanation With Examples*. Datacamp. <https://www.datacamp.com/tutorial/adjusted-r-squared>
- Veriska, H. D., & Youfa, R. (2021). Proses Deodorisasi Dalam Refining Minyak Sawit: Pengaruh Suhu Dan Tekanan Vakum Terhadap Kadar Asam Lemak Bebas Dan Kualitas Warna. *Sainti: Majalah Ilmiah Teknologi Industri*, 18(2), 57-61.

- Wibowo, A., Santoso, B., & Pratiwi, R. (2016). Pendekatan Metode Six Sigma-*Taguchi* Dalam Optimalisasi Proses. *Jurnal Gaussian*, 5(1), 165–175.
- Wijanarko, W. (2022). *Sifat Minyak Sawit Pada Variasi Suhu Dan Waktu Pemurnian* (Doctoral Dissertation, Institut Pertanian Stiper Yogyakarta).
- Wijaya, A., Ramdani, D., & Safira, T. (2022). Regresi Linier Berganda Untuk Memprediksi Jumlah Pasien. *Jurnal Sains Sosial Dan Riset*, 11(4), 1–12.
- Winarni, S., Suningsih, N., & Amzania, T. (2017). Penerapan Optimasi Multirespon Dengan Metode Grey *Taguchi* Topsis. In *Seminar Nasional Statistika. Fmipa, Statistik, Unpad* (Vol. 6).
- Waisuwan, S., Kongjao, S., & Somnuk, K. (2020). Batch Esterification Of Free Fatty Acid In Crude Palm Oil: Optimization Using *Taguchi* Method. *Energy Reports*, 6, 323–331.
- Yusnawati. (2022). Penerapan Aplikasi Metode *Taguchi* Untuk Analisis Pengendalian Kualitas Produksi Crude Sawit. *Jurnal Elektro Dan Telekomunikasi*, 8(1), 1-12
- Yusnawati, Adlie, T. A., Nadya, Y., & Muhammad. (2023). Penerapan Metode *Taguchi* Untuk Meminimumkan Biaya Kerugian Kualitas Crude Palm Oil. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Industri (Senasti)*, 1, 304-313.
- Yuniva, N. (2010). *Analisa Mutu Crude Palm Oil (Cpo) Dengan Parameter Kadar Asam Lemak Bebas (Alb), Kadar Air Dan Kadar Zat Pengotor Di Pabrik Kelapa Sawit Pt. Perkebunan Nusantara-V Tandun Kabupaten Kampar* (Doctoral Dissertation, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau).
- Yusup, Y. (2020). Optimalisasi Pengendalian Persediaan Bahan Baku Tandan Buah Segar (Tbs) Dalam Produksi *Crude Palm Oil* (Cpo) Pada Pks Pt. Tunggal Yunus Estate Kabupaten Kampar. *Jurnal Riset Manajemen Indonesia*, 2(2), 78-86.
- Zakaria, Z., & Susanto, H. (2022). Analisa Kerusakan Pada Rebusan (Sterilizer) Kelapa Sawit Di Pt. Beurata Subur Persada. *Jurnal Mahasiswa Mesin*, 1(1), 1-8.

Zayendra, S., & Yozza, H. (2016). Penerapan Metode *Taguchi* Untuk Optimalisasi Hasil Produksi Roti Di Usaha Roti Meyza Bakery, Padang Sumatera Barat. *Jurnal Matematika Unand*, 5(2), 113-121.





Lampiran 3. Dokumentasi bentuk data mentah suhu dan tekanan perebusan.

