p-ISSN: 1907-8056
e-ISSN: 2527-5410
AGROINTEK
Jurnal Teknologi Industri Pertanian
journal homepage: journal.trunojoyo.ac.id/agrointek

Penentuan kondisi optimal operasi deodorisasi bertahap untuk memaksimalkan retensi karoten dalam produksi minyak sawit merah (RPO)

Jefri Pandu Hidayat[1,3*], Siti Munfarida[2,3], Rizka Lestari[1,3], Asful Hariyadi1[,3], Adrian Prananda Putra[1], Andini Angelina Putri[1], Ahmad Maulidi[1]

[1]*Teknik Kimia, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia*
[2]*Teknologi Pangan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia*
[3]*Pusat Riset Agrotropikal Kalimantan (A-KAL), Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia*

Article history
Diterima:
6 Juni 2024
Diperbaiki:
7 Mei 2025
Disetujui:
25 Juli 2025

Keyword
Carotenoid;
deodorization;
kinetic modelling;
red oil;
RSM

ABSTRACT

Red palm oil (RPO) is an intermediate superfood derived from palm oil, with the potential to reduce stunting and supply sustainable phytonutrients aligned with SDGs 4 in Ibu Kota Nusantara (IKN), East Kalimantan. RPO contains significantly higher carotene levels than commercial oils which is produced through physical modification processes to remove phospholipids and palm distinctive smell by beta-ionone. This study focuses on optimizing the deodorization process that removing impurity and volatile compounds. The optimization used Response Surface Methodology (RSM) with Central Composite Design (CCD) across 13 experimental runs, varying two key parameter temperature (118–133°C) and heating time (238–253 minutes). The novelty of deodorization process using multi-flash autovaporization by lower temperature for better preserve carotene. The effects on carotene content, free fatty acids (FFA), and density were analyzed using Design Expert 13 software. The optimal condition was found at 120°C for 240 minutes, resulting in 280 ppm carotene, 1.11% FFA, and a density of 0.948 g/cm³. The carotene kinetic model has been found where X is temperature and Y is time. Statistical and graphical analysis confirmed that the final product met Indonesian standards SNI 3741:2013 and 9098:2022, which require FFA below 5% and carotene above 30 ppm.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

[*] Penulis korespondensi
Email : jefri.pandu@lecturer.itk.ac.id
DOI 10.21107/agrointek.v20i1.25867

PENDAHULUAN

Red palm oil (RPO) merupakan salah satu produk turunan *crude palm oil* (CPO) yang proses pengolahannya tidak dilakukan *bleaching* atau pemucatan sehingga memiliki kadar antioksidan yang lebih tinggi dibanding minyak goreng pada umumnya. CPO diperoleh dari buah kelapa sawit yang menjadi komoditas perkebunan unggulan di Kalimantan Timur dengan luas area 1,37 juta hektar atau setara dengan 4,1 juta ton CPO, berkontribusi 8,7% dari total produksi di Indonesia pada tahun 2022 (BPS 2023). RPO tergolong bahan intermediet yang kaya akan vitamin A dan E, dengan kandungan senyawa antioksidan berupa karoten, tokoferol, dan tokotrienol. Berdasarkan kandungan tersebut RPO memilki potensi sebagai bahan pangan fungsional dan nutrasetikal yang dapat yang dapat mendukung kesehatan tubuh dan mencegah penyakit degeneratif (Catanzaro et al. 2016). Beberapa antioksidan yang terdefinisi dari vitamin A juga mampu mengurangi risiko *stunting*, sebagai tujuan pemenuhan gizi dan bahan pangan berkelanjutan di Ibu Kota Nusantara (IKN) sesuai poin SDGs 4 (Bappenas 2020, Bappenas RI 2022).

Penyulingan CPO menjadi RPO dengan proses deodorisasi, bertujuan menghilangkan bau tengik khas CPO yang menyebabkan penurunan kualitas fisik (rasa, aroma, tekstur, warna), fitonutrien (karoten dan tokoferol) dan senyawa antioksidan lainnya (Zhang et al. 2024). Pada tahap deodorisasi suhu tinggi diatas (150-200°C), terjadi penurunan kualitas RPO yang ditandai dengan hilangnya kadar karoten sekitar 50-70% (Sumarna et al. 2021). Namun tahap deodorisasi harus tetap dilakukan, karena fungsinya untuk menghilangkan bau tengik dan rasa getir dari beta-ionone yang merupakan ciri khas dari minyak sawit (Hidayat et al. 2022, Jamoussi et al. 2022). Tahapan deodorisasi telah dilakukan dengan penguapan bertahap suhu rendah dengan memanfaatkan energi panas dan pompa vakum untuk memisahkan senyawa volatil yang menyebabkan bau tengik pada RPO. Teknologi ini membutuhkan konsumsi energi yang lebih kecil dibandingkan dengan metode deodorisasi konvensional pada rentang waktu proses 8-12 jam (Jamoussi et al. 2022). Optimasi proses deodorisasi mempertimbangkan komponen suhu dan lamanya waktu pemanasan sehingga didapatkan kondisi operasi optimal untuk produksi RPO. Penelitian (Zhang et al. 2024) dalam variasi tekanan pada metode *steam distillation*, mampu menahan yield 2,09% pada minyak esensial serta *steam-hydro distillation* (Sari et al. 2020) dengan yield eugenol 1,65%, dan mengurangi aroma khas yang kurang disukai. Kondisi tekanan terbaik yang diperoleh dapat digunakan pada metode *multi-flash autovaporization* atau deodorisasi bertahap dengan harapan kandungan antioksidan dan fitronutrien dapat terjaga optimal. Dua kondisi operasi yang paling berpengaruh terhadap proses deodorisasi, dilakukan permodelan berupa Interaksi Dua Faktor (2FI) berbasis *Central Composite Design* (CCD). Metode ini mampu memetakan jumlah perlakuan secara acak, namun dilakukan secara berurutan, untuk membedakan tiap siklus dengan perbedaan suhu pada rentang (90-150°C) dan lamanya waktu pemanasan selama 1-3 jam (Sumarna et al. 2021). Metode RSM juga telah digunakan pada optimasi proses deasidifikasi dan *degumming* pada CPO, menemukan kondisi operasi dengan hasil capaian respon yang optimal (Widarta et al. 2012, Nidzam et al. 2022). Tidak terbatas pada hal tersebut, dapat dilakukan pada optimalisasi penyulingan minyak biji bunga matahari dengan tekanan vakum 300 kPa (Zeaiter et al. 2021).

Evaluasi dan analisis data dengan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk menentukan kondisi optimal berdasarkan hasil uji. Pemodelan persamaan untuk memvalidasi model prediksi terhadap respon melalui penggabungan analisis secara grafik dan numerik (Hidayat et al. 2024b). Hingga saat ini, belum ada penelitian untuk menentukan kondisi operasi optimal deodorisasi bertahap suhu rendah (<150°C) dengan metode RSM-CCD. Optimasi deodorisasi perlu juga dilakukan karena kondisi operasi sebelumnya, yaitu degumming menghasilkan kualitas minyak merah yang belum terstandar dengan baik, meskipun retensi karotennya cukup tinggi (80-85%) (Hidayat et al. 2024c). Begitu pula dengan sifat fisik dan kimia lainnya yaitu FFA 1,92% dan densitas yang masih tinggi 0,91% (Hidayat et al. 2025).

Model prediksi untuk mendapatkan retensi karoten optimal juga belum dikaji lebih lanjut. Menjaga suhu tetap rendah berfungsi untuk melindungi antioksidan karoten agar tidak mudah mengalami denaturasi dan mengurangi jumlah penguapannya yang akan lepas bersama asam volatil lainnya. Optimalisasi ini perlu dilakukan untuk menjaga karoten tetap tinggi namun asam

lemak bebas yang rendah di bawah ambang batas SNI. Diharapkan RPO menjadi minyak sehat *superfood* yang kaya vitamin A.

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan kondisi operasi optimal dengan metode RSM-CCD pada penyulingan CPO di tahap deodorisasi bertahap suhu rendah. Hasil operasi dikaji berdasarkan suhu dan lama waktu proses terhadap kadar karoten, asam lemak bebas (FFA), densitas, dan gugus fungsi.

METODE

Bahan dan Alat

Crude Palm Oil (CPO) yang didapatkan ini berasal dari PT Agro Indomas East Kalimantan (AIEK). Bahan utama dan penunjang antara lain asam fosfat (H_3PO_4) 85% *food grade,* natrium hidroksida (NaOH) *Merck*, n-heksana (C_6H_{14}) *Merck*, Propanol (C_3H_8O) 95% *Merck* dan aquadest.

Persiapan Bahan

Produksi minyak merah (RPO) diawali dengan proses degumming menggunakan asam fosfat 2 ml pada suhu 80ºC. Proses degumming dilakukan selama 120 menit dengan kecepatan pengadukan 200 rpm untuk 60 menit pertama dan tanpa pengadukan untuk 60 menit selanjutnya (Hidayat et al. 2024c). Selanjutnya, gum akan mengendap pada dasar minyak sebagai fraksi berat. Dilanjutkan dengan proses sentrifugasi untuk memisahkan gum dalam CPO dengan kecepatan 3000 rpm yang diletakkan ke dalam tabung sentrifugasi pada *table top centrifuge* selama 20 menit. Kondisi operasi degumming memproduksi minyak merah (DRPO) yang optimal dengan retensi karoten 82,3% (Hidayat et al. 2025).

Deodorisasi

Sampel yang telah dipisahkan getahnya kemudian deodorisasi menggunakan metode penguapan bertahap suhu rendah yang terdiri dari kombinasi dua siklus operasi berurutan. Tahap pertama merupakan tahap aktif pemurnian CPO dengan kondisi operasi pada waktu dan suhu tertentu dengan *autoclave*, dilanjutkan dengan tahapan pasif yang dilakukan dengan kondisi vakum menggunakan pompa vakum. Proses ini dilakukan pada suhu yang cukup tinggi (>120ºC), dengan waktu proses lebih dari 240 menit. Tekanan operasi ditentukan sebesar 500 kPa menyesuaikan spesifikasi alat autoclave yang tersedia. Digunakan model *Central Composite Design* (CCD) untuk menunjukkan jumlah percobaan yang harus dilakukan secara berurutan guna mencapai titik optimal variabel kondisi operasi. Setelah proses deodorisasi selesai, tekanan operasi pada RPO diturunkan secara mendadak menuju kondisi vakum selama 60 detik. Produk RPO dianalisis sesuai dengan standar minyak pangan yang diperlukan dalam penelitian mengikuti SNI (BSN 2019, Hidayat et al. 2022).

Uji Karoten

Pengujian karoten sesuai prosedur (Jin et al. 2024) dan telah dimodifikasi. Sebanyak 0,1 gram sampel minyak ditimbang, dimasukkan ke dalam labu takar 25 ml, kemudian ditambahkan pelarut berupa n-heksana sampai tanda tera. Kemudian, sampel dihomogenkan. Selanjutnya sampel diukur absorbansi campuran menggunakan spektrofotometri UV-Vis menggunakan panjang gelombang 446 nm. Diharapkan karoten yang didapat menyesuaikan standar SNI 01-3741-2002, di mana minimum karoten dalam minyak goreng sebanyak 30 ppm. Kadar karoten minyak dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Karoten(ppm)} = \frac{25 \times \text{A} \times 383}{\text{V} \times 100} \qquad (1)$$

Uji Asam Lemak Bebas (FFA)

Nilai FFA dapat ditentukan dengan metode titrasi sesuai AOCS dengan beberapa modifikasi (Ifa et al. 2021). Sampel minyak dengan berat 5 gram ditimbang dan dipanaskan pada suhu 50ºC. Selanjutnya dicampurkan dengan propanol 95% 50 ml. Larutan dititrasi dengan 0,1 N NaOH untuk proses netralisasi. Persentase FFA (Persamaan (2)) dihitung sebagai asam palmitat dengan berat molekul sebesar 256.

$$\text{FFA\%} = \frac{25{,}6 \times \alpha \times \text{N}}{\text{W}} \qquad (2)$$

Uji Densitas

Densitas minyak yang baik berada pada rentang (0,86-0,91 gr/cm³). Semakin tinggi densitasnya maka kualitas dari RPO akan semakin bagus. Massa jenis atau densitas merupakan besarnya massa per satuan volume. Pengukuran massa jenis menggunakan piknometer 10 ml

dengan menghitung berat akhir dan awal dari RPO sesuai metode (Latimer 2016).

Uji Gugus Fungsi

Sampel dianalisis menggunakan FTIR pada gelombang infrared yang ditembakkan dengan rentang (650 – 4000)/cm dan resolusi 4/cm. Pengujian FTIR dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk menjaga akurasi hasil sesuai dengan metode (Martins et al. 2021). Pengujian FTIR ditujukan untuk mengamati pengaruh suhu dan waktu proses terhadap nilai asam lemak bebas dan karoten pada RPO.

Analisis Statistik

Pengolahan data optimasi kondisi operasi deodorisasi menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Central Composite Design* (CCD) dengan aplikasi Design Expert 13. Hasil pengujian pada setiap variabel terhadap parameter diolah berdasarkan uji beda nyata (ANOVA) dalam mempertimbangkan skema kondisi operasi yang optimal berdasar *p-value*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kondisi Operasi Berdasarkan Hasil Pengujian

Berdasarkan Tabel 1 terkait perbandingan sampel RPO uji, RPO SNI, dan Minyak Goreng SNI menunjukkan RPO yang telah dioptimasi memiliki kadar karoten yang sangat tinggi dibanding minyak goreng kovensional dan juga nilai FFA yang diuji menunjukkan RPO jauh dibawah ambang maksimal dari FFA, sedangkan densitas yang dihasilkan menunjukkan hasil yang lebih tinggi disbanding sampel SNI sehingga minyak akan lebih berat dibandingkan minyak goreng SNI.

Tabel 1Spesifikasi RPO dari pengujian dan RPO SNI

Parameter	RPO	RPO SNI	Minyak Goreng SNI
Karoten (ppm)	280,679	-	30
FFA (%)	1,1100	Maks. 5%	Maks. 2%
Densitas (gr/cm^3)	0,9484	-	0,91

SNI 3742:2013 Minyak Goreng
SNI 9098:2022 Minyak Makan Merah



Gambar 1 Produk RPO optimal

Berdasarkan hasil running dari 13 pengujian terkait permodelan kondisi operasi pembuatan RPO pada Design Expert 13, dapat dilihat respon dari suhu dan waktu proses diantaranya nilai FFA, kadar karoten, dan, densitas RPO yang telah dilakukan proses penguapan bertahap suhu rendah. Proses deodorisasi dengan permodelan rentang suhu (118-133°C) menyebabkan kenaikan FFA, penurunan kadar karoten, dan menyebabkan densitas minyak semakin berat setelah proses deodorisasi. Adapun pengaruh lamanya waktu proses yang dimodelkan pada rentang (238-253 menit) menyebabkan penurunan FFA, kadar karoten, dan densitas minyak. Keseluruhan hasil pengujian ini nantinya akan dibandingkan dengan permodelan grafik residual vs prediksi yang menjadi acuan dalam penentuan kondisi operasi dari parameter suhu dan waktu proses. Gambar 1 menunjukkan bahwa RPO hasil deodorisasi variabel optimal pada suhu 120°C selama 240 menit. Penjelasan pemilihan titik optimasi akan ditinjau berdasarkan analisis *running* CCD melalui parameter karoten, FFA, dan densitas RPO.

Hasil pengujian FFA berdasarkan parameter yang telah dimodelkan pada Design Expert, menunjukkan respon yang memilki nilai fluktuatif baik parameter suhu maupun waktu proses. Diperlukan analisis regresi untuk melihat seberapa besar pengaruh parameter terhadap respon yang telah dimodelkan. Selanjutnya regresi tersebut akan dianalisis berdasarkan grafik residual vs prediksi yang mana terdapat batasan garis merah sisi atas-bawah yang akan menunjukkan seberapa optimal variabel tersebut jika tidak melewati batasan. Adapun garis hitam yang berada di tengah pada Gambar 2 digunakan sebagai peluang keberhasilan parameter dengan kondisi yang mampu menghasilkan hasil paling optimal.

Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Nilai FFA

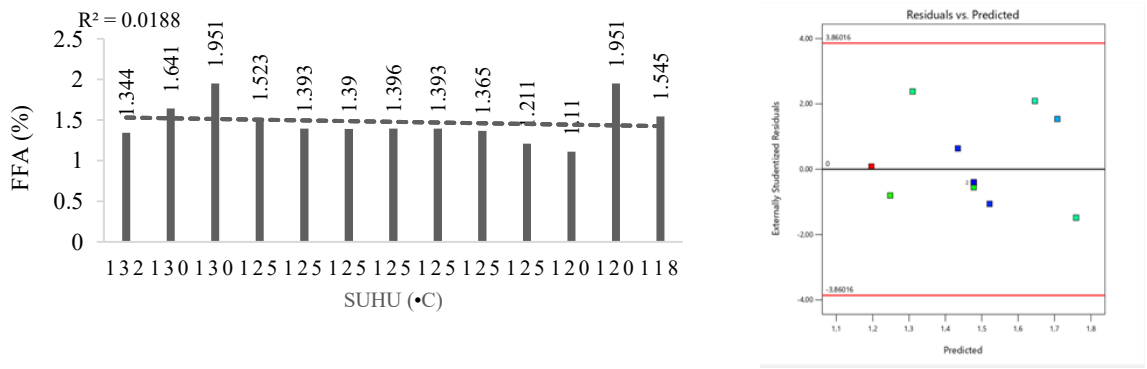
Free fatty acid (FFA) atau asam lemak bebas yang terdapat pada minyak sangat mempengaruhi kualitas minyak itu sendiri, seperti bau, rasa, dan juga warna yang ada pada minyak. FFA dihasilkan dari trigliserida yang terhidrolisis menghasilkan FFA, di mana banyaknya nilai FFA akan menyebabkan bau tengik pada minyak semakin kuat. Berdasarkan Gambar 2 (a) di mana dilakukan analisis terkait pengaruh suhuh terhadap FFA, didapat seiring tingginya suhu digunakan dalam proses deodorisasi maka FFA yang dihasilkan akan semakin besar, begitupun sebaliknya. Besarnya pengaruh suhu pemanasan dalam deodorisasi juga dijelaskan sesuai hasil penelitian (Oey et al. 2020). Penggunaan suhu tinggi pada proses deodorisasi menyebabkan nilai FFA yang kian meningkat, untuk menghasilkan 0,01% FFA diperlukan suhu yang relative rendah yakni 17°C dengan lamanya waktu proses selama 60 menit.

Penggunaan suhu yang bervariasi nyatanya memberikan respon yang fluktuatif terutama suhu rendah 120°C dan tinggi 130°C menyebabkan nilai FFA tertinggi. Diperlukan acuan dalam menetapkan suhu yang sesuai dalam proses deodorisasi menggunakan grafik residual vs prediksi. Pada Gambar 2(b) seluruh variabel masih berada dalam batasan garis merah yang menandakan semua kondisi operasi dapat digunakan. Namun dikarenakan penggunaan suhu yang tinggi menyebabkan FFA yang tinggi, dipilihlah suhu 120°C yang memberikan FFA 1,11% yang merupakan nilai terendah.

Tabel 2 Hasil analisis nilai FFA, karoten dan densitas RPO

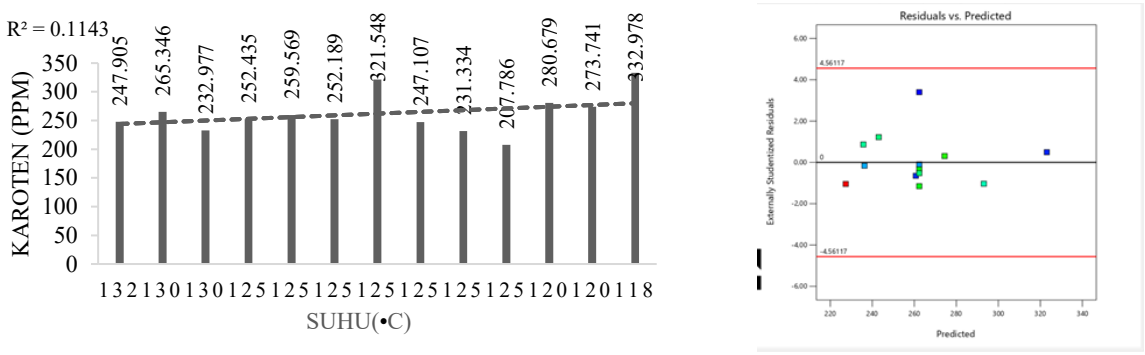
Run	Suhu (°C)	Waktu (menit)	Karoten (ppm)	FFA (%)	Densitas (gr/cm^3)
1	120	240	280,67	1,11	0,94
2	132,07	245	247,9	1,34	0,94
3	125	252,07	252,43	1,52	0,94
4	125	245	259,56	1,39	0,94
5	125	245	252,18	1,39	0,94
6	125	245	321,54	1,39	0,94
7	130	240	265,34	1,64	0,94
8	130	250	232,97	1,95	0,94
9	120	250	273,74	1,95	0,94
10	125	245	247,1	1,39	0,94
11	125	245	231,33	1,36	0,94
12	117,92	245	332,97	1,54	0,94
13	125	237,92	207,78	1,21	0,95
RPO*	-	-	468,83	1,36	0,90

Keterangan: RPO* adalah RPO komersial



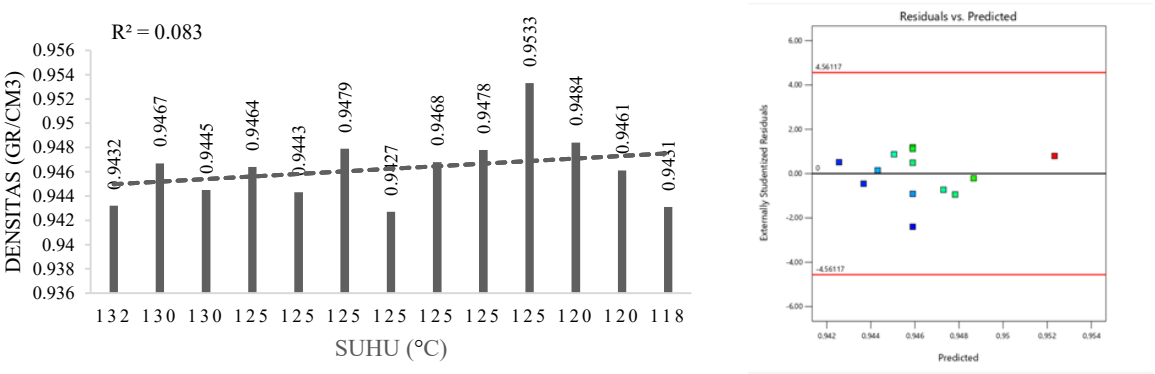
a b

Gambar 2 Data suhu terhadap nilai FFA tergambar pada (a) grafik (b) sebaran titik percobaan



a b

Gambar 3 Data suhu terhadap kadar karoten tergambar pada (a) grafik (b) sebaran titik percobaan



a b

Gambar 4 Data suhu terhadap densitas tergambar pada (a) grafik (b) sebaran titik percobaan

Pengaruh Suhu Terhadap Kadar Karoten

Kadar karoten yang terdapat pada RPO jauh lebih besar dibanding pada minyak goreng komersial. Hal ini dikarenakan pada proses pengolahannya RPO tidak melewati proses pemucatan yang dapat melunturkan pigmen warna merah pada minyak. Pigmen warna merah menjadi tanda adanya karoten pada minyak secara fisik (Hidayat et al. 2022). Berbeda dengan FFA, kadar karoten tinggi diperlukan untuk membuat RPO *superfood* sebagai panganan dengan antioksidan tinggi. Namun karoten yang terkandung tersebut sangat rentan pada kondisi operasi proses pemuatan minyak. (Pramono et al. 2023) menyatakan suhu tinggi pada pemanasan wortel dapat menyebabkan kadar karoten menurun. Didalam pengujiannya didapat kadar karoten terendah sebesar 62,15 µg/g pada suhu 60°C. Sama halnya dengan FFA, kadar karoten akan menurun saat dilakukan pemanasan dengan menggunakan suhu atau tekanan tinggi. Berdasarkan Gambar 3(a), di mana dilakukan analisis terkait pengaruh suhu terhadap karoten didapat seiring tingginya suhu digunakan dalam proses deodorisasi maka karoten akan terdegradasi, begitupun sebaliknya.

Jika dilihat pada Gambar 3(a) kadar karoten yang tinggi dipengaruhi pada suhu rendah, di mana suhu pada rentang (118-120°C) dapat menghasilkan retensi karoten teritinggi sebesar 333 ppm. Jika mengacu pada Gambar 3(b), semua perlakuan masih berada di antara dua garis merah, yang berarti data yang dihasilkan dapat diterima. Tidak cukup dengan hal tersebut, perlu dilakukan optimasi dengan membandingkan parameter suhu dan waktu proses, serta hasil dua respon lainnya agar titik kondisi operasi optimal terhadap retensi karoten lebih tervalidasi. Ditemukan pada suhu 120°C untuk menghasilkan karoten sebesar 280 ppm sebagai salah satu respon retensi karoten paling tinggi.

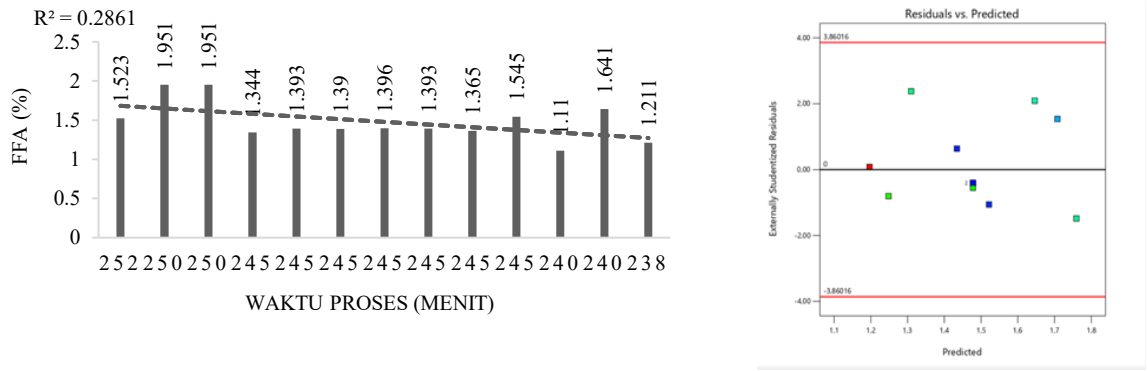
Pengaruh Suhu Terhadap Densitas

Densitas pada minyak menunjukkan perbandingan berat persatuan volume. Pengujian densitas ditujukan untuk menentukkan berat jenis

suatu zat dalam hal ini minyak. Seiring meningkatnya suhu maka densitas minyak akan semakin rendah, hal ini dikarenakan penurunan kepadatan pada minyak akibat volume yang meningkat dari proses pemanasan (Shrivastava et al. 2021). Ekspansi molekul cairan megakibatkan penurunan massa per satuan volume, yang berdampak pada penurunan spesifik gravittasi yang merupakan ratio densitas minyak terhadap densitas air (Baig et al. 2022). Hal serupa dialami juga pada viskositas yang merupakan resistensi cairan terhadap aliran akibat pergerakan molekul yang dapat meningkat akibat adanya pemanasan (Kumoro et al. 2022, Hidayat et al. 2023). Gambar 4(a) menunjukkan densitas minyak (RPO) yang beragam, nilainya melebih dari standar SNI yang ditentukan (0,86-0,91 gr/cm³) (BSN 2019). Hal ini diakibatkan operasi suhu yang tinggi dan juga lamanya waktu pemanasan. Terkait batasan pada Gambar 4(b), secara keseluruhan variabel dapat digunakan sebagai parameter untuk mendapatkan densitas minyak yang tinggi. Jika didasarkan parameter optimal dari FFA dan kadar karoten didapatkan suhu optimal 120°C dengan densitas 0,94 gr/cm³.

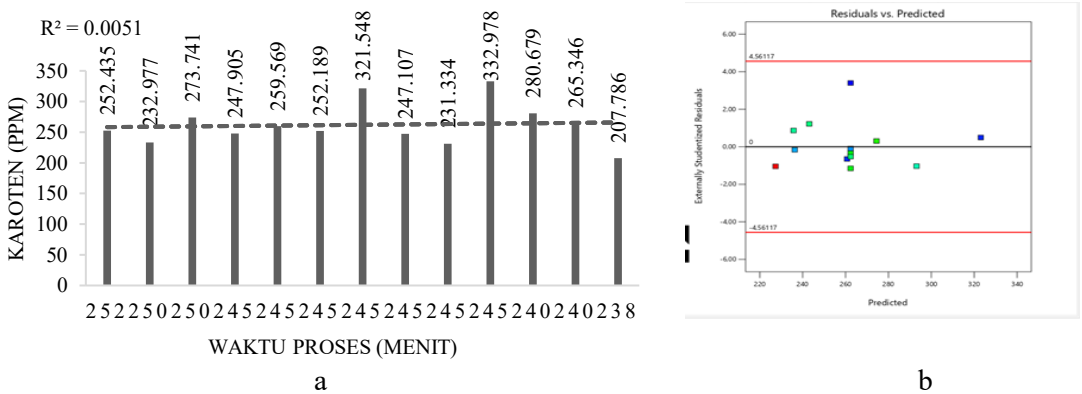
Pengaruh Waktu Proses Terhadap Nilai FFA

Seperti pada data pengaruh suhu terhadap FFA, lamanya waktu proses juga memengaruhi proses hidrolisis trigliserida yang menghasilkan asam lemak. Semakin lama waktu yang diperlukan untuk memanaskan minyak (deodorisasi) menyebabkan kenaikan persentase FFA. Dalam hal ini, waktu proses lebih berpengaruh terhadap nilai FFA yang dihasilkan, dikarenakan semakin lama proses hidrolisis, maka semakin rendah kadar air yang terkandung dalam produk. Selain itu, dapat menyebabkan terurainya trigliserida menjadi komponen asam lemak yang lebih sederhana (Nor Shafizah et al. 2022). Merujuk pada Gambar 2(a) dan Gambar 2(b), didapatkan waktu proses yang digunakan dalam proses deodorisasi sebagai parameter optimal, dengan hasil FFA 1,11% dari variabel suhu sebesar 120°C dan waktu proses selama 4 jam. Lama waktu proses yang ditandai dari hasil grafik menunjukkan semakin lama deodorisasi bertahap suhu rendah, maka nilai FFA tetap semakin meningkat.



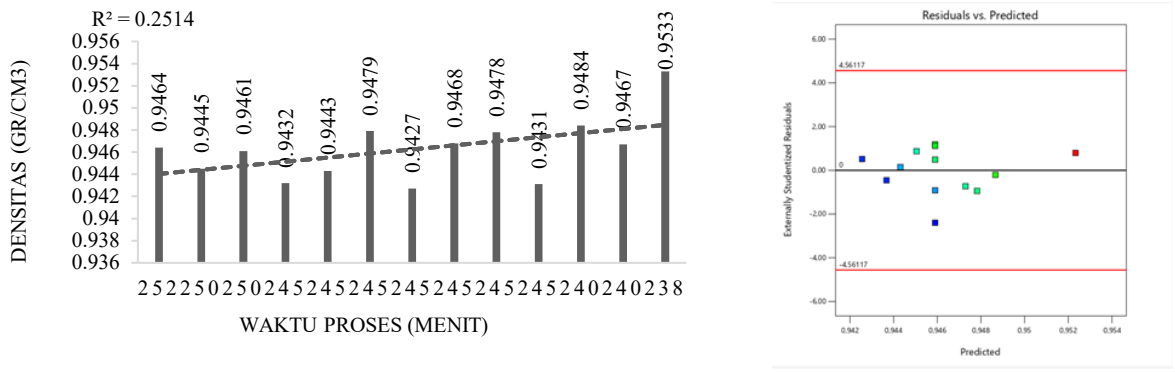
a b

Gambar 5 Data waktu terhadap nilai FFA tergambar pada (a) grafik (b) sebaran titik percobaan



a b

Gambar 6 Data waktu terhadap kadar karoten tergambar pada (a) grafik (b) sebaran titik percobaan



a b

Gambar 7 Data waktu terhadap densitas tergambar pada (a) grafik (b) sebaran titik percobaan

Pengaruh Waktu Proses Terhadap Kadar Karoten

Kandungan karoten yang dapat berubah pada pengolahan RPO diakibatkan dari pemanasan dengan suhu tinggi dengan durasi pemanasan yang lama. Menurut (Jin et al. 2024) mengungkapkan retensi karoten hanya mampu bertahan pada suhu kurang dari 150°C di mana penurunan karoten akan signifikan pada 2 jam pemanasan pertama. Pada suhu tinggi, karoten mengalami isomerisasi, yaitu perubahan struktur molekul tanpa perubahan komposisi atom. misalnya, β-karoten dapat berubah menjadi bentuk lain seperti cis-β-karoten. Degradasi karoten akibat pemansan menghasilkan 6 jenis senyawa yang mudah meguap seperti 2-metil heksana dan 3- metil heksana yang berasal dari pemutusan ikatan rantai, heptana yang bersala dari pemutusan lanjut pada rantai karoten, siklooktanona yang bersal dari reaksi intramolekul karoten, toluena dan (orto, meta atau para) xilena yang dapat saja terbentuk walaupun sangat kecil kemungkinan (Sulihatimarsyila et al. 2020). Terlihat pada Gambar 6(a) didapatkan waktu proses mampu mendegradasi karoten secara fluktuatif. Walaupun pada Gambar 6(b) semua parameter dapat digunakan dalam proses pengolahan RPO karena rata-ratanya tidak jauh berbeda dengan nilai tengah. Adapun parameter optimal yang diambil mengacu pada efisiensi waktu dan retensi karoten tertinggi (280 ppm), terpilih variabel suhu sebesar 120°C dan waktu proses selama 4 jam.

Pengaruh Waktu Proses Terhadap Densitas

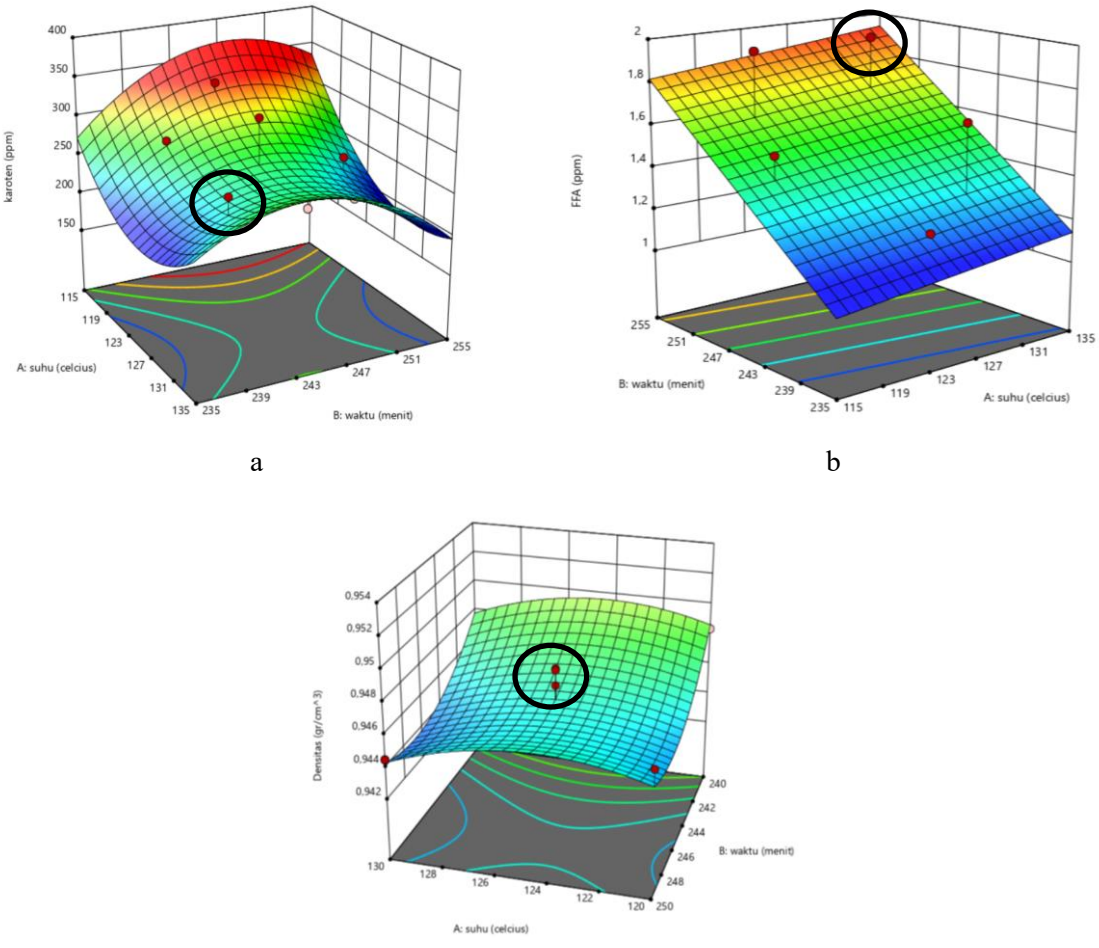
Minyak merah yang dipanaskan pada suhu tinggi selama terus-menerus akan meningkatkan nilai FFA dan menurunkan kadar karoten, berdampak pada densitas minyak (RPO) yang cenderung mengalami kenaikan. Sama halnya dengan faktor suhu, lama pemanasan juga mempengaruhi volume minyak akibat komponen yang teruapkan sehingga kerapatan minyak akan ikut turun. Pada pengujian densitas diberikan hasil yang berbanding terbalik, di mana densitas akan ikut turun setelah dipanaskan. Pada Gambar 7(b) semua parameter pengujian dapat digunakan untuk memproduksi RPO. Berdasarkan pengaruh parameter terhadap ketiga respon yang dihasilkan, menjelaskan bahwa nilai minyak merah (RPO) harus memiliki kadar karoten yang tinggi dibandingkan dengan minyak goreng komersial agar tujuan RPO menjadi produk *superfood* tersampaikan. Terjaganya retensi karoten ditandai dengan nilai FFA yang rendah (Widiastuti et al. 2022). Maka dari itu, dalam proses pengolahan RPO yang akan dioptimasi memerlukan suhu dan waktu proses yang rendah dengan perbandingan karoten dan FFA yang sebanding. Suhu terikat pada parameter FFA yang semakin meningkat sejak suhu tinggi dan waktu proses yang lama. Dampaknya akan berpengaruh terhadap degradasi kadar karoten pada RPO secara signifikan.

Adapun pengaruh parameter tersebut terhadap densitas tidak terlalu signifikan, dikarenkan hasil yang berbeda dari suhu dan waktu yang saling berkebalikan. Perbandingan sampel hasil pengujian dan analisis statistik jika dibandingkan dengan RPO komersial memiliki perbedaan yang tidak terlalu signifikan. Hal ini dapat diartikan metode penyulingan RPO uji dan RPO komersial dapat dianggap serupa, karena hasil pengujiannya menunjukan respon kadar karoten, FFA, dan densitas yang seragam.

Penentuan Kondisi Operasi Optimal Berdasarkan Analisis RSM-CCD

Setelah dilakukan analisis terkait hasil pengujian dari tiap parameter terhadap respon kemudian membandingkannya pada grafik residual dengan prediksi, untuk menentukan parameter telah sesuai digunakan dalam pengolahan RPO. Setiap parameter yang diwakili titik-titik tersebut, akan dikatakan optimal jika semakin dekat dengan garis tengah hitam pada grafik tersebut. Sebagai catatan, tidak boleh melewati garis merah yang menjadi batasan penentuan kondisi operasi dari parameter. Tujuan perbandingan hasil uji dengan grafik berdasarkan analisis statistik, untuk menyederhanakan parameter yang di bawah standar sebagai kondisi operasi produksi RPO.

Penentuan kondisi operasi optimal hasil grafik selanjutnya dimodelkan pada grafik 3D yang disebut *Response Surface Methodology* (RSM). Grafik RSM akan menunjukkan titik puncak dengan gradasi warna sebagai pembanding nilai maksimum maupun nilai optimal, di mana disekililingnya terdapat titik-titk hasil pengujian berulang yang dimodelkan. Salah satu grafik RSM pada Gambar 8(A) dengan posisi titik puncak terdapat pada dua sisi, yaitu gradien warna merah-oranye dan hijau-biru. Posisi gradasi warna hijau-biru menunjukkan tingkat kesesuaian yang lebih efisien dan mendekati nyata dibandingkan pada gradasi warna-oranye (Pitchaiah et al. 2023, Sharma and Sharma 2023). Model Gambar 8(A) menunjukkan bahwa suhu dan waktu memengaruhi densitas secara signifikan, meskipun perubahannya relatif sedang (± 0,01 g/cm³). Model tersebut telah sesuai karena titik merah atau data poin optimal dengan permukaan yang diprediksi. Hal itu ditandai dengan nilai *R-square* 0,73 dan *lack of fit* 0,82. Kelengkungan kurva menunjukkan bahwa fungsi grafik tidak linear, sehingga pada fit statistik dipilih model kuadratik (Sharma and Sharma 2023).



a b c

Gambar 8 Hasil parameter respon pada grafik RSM (A) karoten (B) FFA (C) densitas

Tabel 3 Solution Numerical Design Expert

Number	Suhu (°C)	Waktu (menit)	Karoten (ppm)	FFA (%)	Densitas (gr/cm^3)
1	**125**	**245**	**262,34**	**1,47**	**0,94**
2	125	247,43	260,16	1,57	0,94
3	125	247,49	260,01	1,57	0,94

Tabel 4 Ringkasan pemodelan parameter karoten

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2
Linear	0,2007	0,6252	0,1297	-0,256
2FI	0,7157	0,5507	0,0479	-0,4468
Quadratic	**0,2171**	**0,6959**	**0,2088**	**-0,4309**
Cubic	0,4481	0,9113	0,1965	0,4036

Tabel 5 Ringkasan pemodelan parameter FFA

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2
Linear	**0,0578**	**<0,0001**	**0,3214**	**-0,1907**
2FI	0,2122	<0,0001	0,3718	-0,9344
Quadratic	0,4455	<0,0001	0,3589	-1.6545
Cubic	0,1572	<0,0001	0,5718	-10,3646

Tabel 6 Ringkasan pemodelan parameter densitas

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2
Linear	0,2071	0,3388	0,1241	-0,3826
2FI	0,9863	0,2743	0,0269	-0,4714
Quadratic	**0,0289**	**0,8178**	**0,5455**	**0,3076**
Cubic	0,593	0,9655	0,4837	0,6567

Gambar 8(B) berisi gradasi warna dalam menampilkan respon nilai FFA, ditandai warna merah-jingga yang manandakan puncak, dan hijau-biru yang merupakan titik tengah yang dapat dijadikan sebagai titik optimal. Pada grafik tersebut tergambarkan gradasi ombak yang menunjukkan perbedaan signifikan dari titik maksimum yaitu retensi karoten terbesar dengan titik optimal yang merupakan variabel pengulangan. Pada Gambar 8(B) di mana respon yang diamati berupa FFA yang digambarkan grafik curam, karena terlihat penurunan dari titik maksimum berupa FFA terbesar, titik tengah, hingga titik minimum. Model ini termasuk variabel linear dengan sedikit interaksi, karena bentuk permukaannya yang datar. Kemiringan grafik yang tajam menunjukkan bahwa suhu merupakan faktor dominan dalam menurunkan kadar FFA dibandingkan waktu. Kelengkungan gradien yang halus menandakan bahwa model linear sudah cukup dalam studi ini, meskipun nilai *lack of fit p value* < 0,05, artinya tidak signifikan berpengaruh terhadap respon FFA (Sharma and Sharma 2023). Kesesuaian model didukung dengan posisi titik merah pada data eksperimen yang dekat dengan permukaan model. Hal ini diprediksi untuk memperkuat prediksi model dengan galat yang rendah (Hidayat et al. 2025).

Adapun respon densitas yang cenderung menggambarkan grafik landai ditampikan pada Gambar 8(C) dengan kontur warna hijau kebiruan. Permukaan grafik menunjukkan bentuk melengkung di mana densitas meningkat seiring bertambahnya suhu dan waktu, namun pengaruh suhu lebih signifikan dibanding waktu sesuai nilai *p-value* 0,22. Bentuk tersebut menghubungkan bahwa model ini melibatkan fungsi kuadratik dengan nilai *lack of fit p-value* 0,69. Seperti pada Gambar 8(B), bentuk dari Gambar 8(C) memiliki titik merah yang berada dekat dengan permukaan model sehingga akurasi model tinggi atau galat yang diterima rendah (Sharma and Sharma 2023). Hal ini sesuai dengan teori bahwa pemanasan dengan waktu yang lebih lama dan suhu tinggi

dapat menyebabkan hilangnya kadar air dan senyawa volatil penyebab bau khas sawit yaitu beta-ionone, sehingga meningkatkan nilai densitas pada RPO (Shrivastava et al. 2021).

Berdasarkan ketiga titik tengah yang dijadikan sebagai acuan kondisi optimal yaitu pada suhu 125°C dan waktu proses 245 menit. Pertimbangan titik optimal respon didapatkan berdasarkan kadar FFA yang rendah, namun karoten dan densitas yang tinggi. Setelah peninjauan secara grafik terkait parameter optimal, akan diujikan kembali melalui metode numerik. Pada analisis numerik, diuji terhadap respon dari variabel yang tidak termuat pada 13 pengujian dengan rentang variabel hasil pengujian dan pengulangan perlakuan

Variabel optimal ditentukan dari nilai *desirability* 1,0. Nilai *desirability* merupakan pendekatan analisis statistik dalam menyesuaikan target dari hasil respon yang diinginkan. Diperoleh kondisi operasi optimal secara numerik pada suhu 125°C dan waktu proses 245 menit. Dari ketiga respon tersebut, didapatkan persamaan yang digunakan untuk memodelkan variabel operasi sesuai pada hasil optimasi. Model ini dapat dijadikan prediksi perhitungan parameter lanjutan pada variabel operasi yang berbeda, namun masih dalam rentang yang sama.

Berdasarkan ketiga ringkasan tabel respon, didapatkan persamaan untuk model respon dan nilai regresi melalui *fit statistic*. Nilai angka bercetak tebal adalah data yang dipakai sebagai *empirical state* pada persamaan (3) - (5) tercantum pada Tabel 7.

Tabel 7 Ringkasan persamaan prediksi melalui *running* model CCD

$\text{Karoten(ppm)} = 262{,}35 - 22{,}05X + 2{,}98Y - 6{,}36XY + 14{,}77X^2 - 15{,}39Y^2$	(3)
$\text{FFA}(\%) = 1{,}48 - 0{,}0308X + 0{,}199Y$	(4)
$\text{Densitas}\left(\frac{\text{gr}}{cm^3}\right) = 0{,}9459 - 0{,}0018Y - 0{,}0014X^2 + 0{,}002Y^2$	(5)
Keterangan: X = Suhu (118-133°C) Y = Waktu proses (238-253 menit)	

Perhitungan kelayakan model pada rentang variabel yang diuji perlu dikaji secara komprehensif. Terlampir bahwa model karoten belum sepenuhnya dinyatakan layak karena nilai regresi < 0,7 (Kumoro and Hidayat 2018, Hidayat et al. 2024a). Data ini dapat diujikan kembali dengan variasi variabel yang lebih luas sehingga didapatkan titik *running* yang lebih beragam, lalu berpeluang didapatkan nilai regresi lebih maksimal. Hal ini juga berlaku pada respon FFA dan densitas. Secara model respon densitas telah menunjukkan kelayakan, namun karena adanya hubungan antar respon, maka perlu dihitung rerata regresi terhadap ketiga respon hingga bernilai > 0,7.

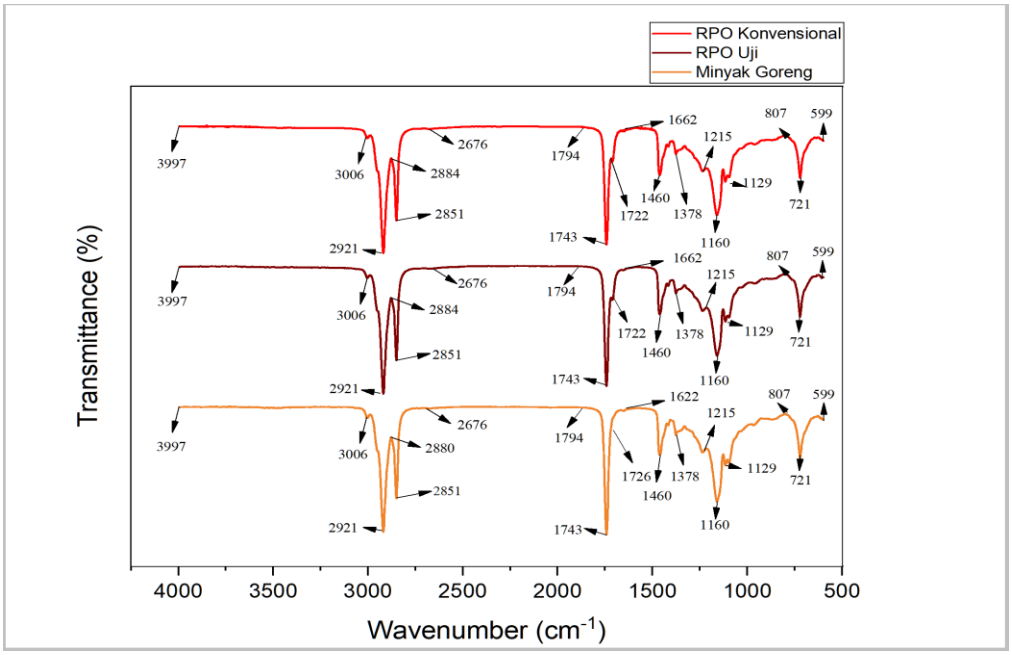
Tabel 8 Fit statistical respon

Peak	Std. Dev.	Mean	R^2
Karoten	30,83	261,97 ppm	**0,5385**
FFA	0,2055	1,48%	**0,4345**
Densitas	0,0019	0,9462 gr/cm^3	**0,7349**

Analisis Gugus Fungsi RPO

Pengujian FTIR dilakukan dengan membandingkan gugus fungsi dari masing-masing sampel antara lain minyak goreng komersial, RPO optimal, dan RPO komersial. Didapatkan perbedaan yang sangat minimal dari ketiga grafik yang menandakan tidak adanya perubahan gugus fungsi ketika terjadi pemanasan, baik pada proses deodorisasi ataupun metode pengolahan minyak goreng komersial. Perbedaan kecil tersebut dapat dilihat pada puncak 1722 untuk sampel RPO dan 1726 untuk sampel minyak goreng yang terlihat pada Gambar 8. Jika dilakukan analisis lebih lanjut dari kedua puncak tersebut, memiliki kesamaan pada jenis senyawa beserta ikatannya.

Pada proses pemanasan CPO, minyak goreng komersial, maupun RPO, panas yang digunakan belum dapat mengubah gugus fungsi pada minyak. Penurunan luasan kurva dari grafik FTIR minyak diakibatkan dari penggunaan panas tinggi lebih dari 250°C dengan waktu proses yang dilakukan berulang kali (Martins et al. 2021). Untuk itu, diasumsikan dari 13 pengulangan produksi RPO, penggunaan suhu dalam rentang (118-133°C) dan waktu proses (238-253 menit) tanpa adanya pengulangan pemanasan, hanya memberikan pengaruh minor yang tidak mengubah gugus fungsi. Sifat fisikokimia seperti perubahan gugus dan kadar asam lemak tidak signifikan berlaku untuk mengubah titik leleh dan titik didih minyak.



Gambar 9 Grafik intpretasi FTIR pada sampel RPO, RPO komersial, dan minyak goreng komersial

Tabel 9 Tabel interpretasi FTIR RPO optimal

Peak	Ikatan	Jenis Senyawa	Peak	Ikatan	Jenis Senyawa
721	Cis- RCH=CHR	Alkenil Aromatik	1794	C=O C-H	Amida Aromatik (Para)
807	C-H C-H	(Meta) Aromatik (Para)	1726	C=O C-H	Aldehida, keton, amida Aromatik (Para)
1129	C-O C-H	Anhidrida Aromatik (Para)	1743	C=O C-H	Ester, asam karboksilat, amida Aromatik (Para)
1160	C-O C-H	Anhidrida Aromatik (Para)	2676	O-H C-H	Asam karboksilat, ikatan hidrogen Aldehida, alkil, Aromatik (Para)
1215	C-O C-H	Anhidrida Aromatik (Para)	2851	O-H C-H	Asam karboksilat, ikatan hidrogen, aldehid, alkil, Aromatik (Para)
1378	$-CH_3$	Alkenil Aromatik (Meta)	2884	O-H C-H	Asam karboksilat, ikatan hidrogen Aromatik (Para), alkil
1407	$-CH_3$	Alkil	2921	C-H O-H	Alkil, aromatik Asam karboksilat, ikatan hidrogen
1560	$-CH_3$	Alkil	3006	O-H C-H	Asam karboksilat, ikatan hidrogen Aromatik (Para)
1662	C-H C=O	Aromatik (Para) Keton	3997	C-H	Aromatik (Para)

KESIMPULAN

Optimasi proses deodorisasi bertahap suhu rendah pada RPO menunjukkan kondisi optimal pada suhu 120°C selama 240 menit dengan retensi karoten 280 ppm, FFA 1,11%, dan densitas 0,94 g/cm³. Titik tengah grafik 3D-RSM menunjukkan alternatif kondisi operasi optimal pada suhu 125°C selama 245 menit dengan karoten 262 ppm dan FFA 1,47% berdasarkan solusi numerik. Proses ini tidak mengubah gugus fungsi secara signifikan. Kajian lanjutan dengan rentang suhu dan waktu lebih luas serta pengujian tambahan secara organoleptik dan proksimat diperlukan untuk mendukung kelayakan hilirisasi proses deodorisasi bertahap RPO dan prediksi parameter kinetik secara matematis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung dengan pendanaan dari Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat Republik Indonesia tahun

2023. Terima kasih kepada Group for Advanced Studies in Food Technology and Research (Gastro), Institut Teknologi Kalimantan dari persiapan bahan baku, pemenuhan alat dan bahan penunjang, literasi dan diskusi.

DAFTAR PUSTAKA

Baig, A., M. Zubair, S. H. Sumrra, M. F. Nazar, M. N. Zafar, K. Jabeen, M. B. Hassan, and U. Rashid. 2022. Heating effect on quality characteristics of mixed canola cooking oils. *BMC Chemistry* 16(1):1–11.

Bappenas. 2020. Pedoman Teknis Penyusunan Rencana Aksi - Edisi II Tujuan Pembangunan Berkelanjutan/ Sustainable Development Goals (TPB/SDGs).

Bappenas RI. 2022. *Rencana Induk IKN UU Nomor 3 Tahun 2022*.

BPS. 2023. *Indonesian Oil Palm Statistics 2022*.

BSN. 2019. SNI 7709:2019 Minyak Goreng Sawit. Pages 1–33 *Minyak goreng sawit*.

Catanzaro, R., N. Zerbinati, U. Solimene, M. Marcellino, D. Mohania, A. Italia, A. Ayala, and F. Marotta. 2016. Beneficial effect of refined red palm oil on lipid peroxidation and monocyte tissue factor in HCV-related liver disease: A randomizer controller study. *Hepatobiliary and Pancreatic Diseases International 15(2):165–172.*

Hidayat, J. P., A. Hariyadi, and F. Chosta. 2022. Bentonite and RHA adsorption performance against characteristics waste-cooking oil. *J. Sains dan Teknologi Pangan 7(6):5600–5614.*

Hidayat, J. P., R. Lestari, S. Munfarida, A. A. Putri, P. Putra, F. Chosta, and A. Maulidi. 2025. Optimasi proses degumming minyak sawit mentah (DRPO) dengan response surface methodology (RSM) berbasis central composte design (CCD). *Agrointek 19(2):356–368.*

Hidayat, J. P., S. Munfarida, and A. Hariyadi. 2024a. Modified ganyong (*Canna edulis Kerr.*) starch prospective as wheat flour alternative. *Food Research 8:11–17.*

Hidayat, J. P., A. A. Putri, S. Munfarida, and A. C. Kumoro. 2024b. Kinetic bio - reaction modelling durian seed fused *Lactobacillus plantarum* suspension by high - order embedded runge - kutta. *Food Research 8:1–10.*

Hidayat, J. P., H. A. Romadhona, N. Sholihah, and S. Munfarida. 2023. Aloe vera gel-based edible coating characterization by onion powder fortification method as an antimicrobial. *Agrointek 17(3):493–501.*

Hidayat, J. P., N. Sholihah, A. Maulidi, A. A. Putri, and A. C. Kumoro. 2024c. Degradation β-carotene model of degummed red palm oil (drpo) by rsm-optimizing condition. *Materials Science Forum 1140:133–134.*

Ifa, L., L. Wiyani, N. Nurdjannah, A. M. T. Ghalib, S. Ramadhaniar, and H. S. Kusuma. 2021. Analysis of bentonite performance on the quality of refined crude palm oil's color, free fatty acid and carotene: the effect of bentonite concentration and contact time. *Heliyon 7(6):e07230.*

Jamoussi, B., C. Jablaoui, A. K. Hajri, R. Chakroun, B. Al-Mur, and K. Allaf. 2022. Deodorization process of vegetal soybean oil using Thermomechanical Multi-Flash Autovaporization (MFA). *LWT* 167.

Jin, Y., S. S. Teh, W. H. Yap, H. L. N. Lau, and S. H. Mah. 2024. In vivo retinoid metabolic and visual cycle pathways assessment of carotenoid-rich refined red palm-pressed mesocarp olein. *Journal of Functional Foods 116:106140.*

Kumoro, A. C., S. Mariana, T. H. Maurice, and J. P. Hidayat. 2022. Pectin derived from hydrolysis of ripe kepok kuning banana peel powder employing crude pectinases produced by *Aspergillus niger*. *Sains Malaysiana 51(7):2047–2059.*

Kumoro, A., and J. Hidayat. 2018. Effect of soaking time in sodium metabisulfite solution on the physicochemical and functional properties of durian seed flour. *Pages 1–5 MATEC Web of Conferences. EDP Sciences.*

Latimer, G. W. Jr. 2016. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. AOAC International.

Martins, L. S., N. G. S. Silva, A. M. Claro, N. C. Amaral, H. S. Barud, and D. R. Mulinari. 2021. Insight on açaí seed biomass economy and waste cooking oil: Eco-sorbent castor oil-based. *Journal of Environmental Management 293.*

Nidzam, M. S., S. Hossain, N. Ismail, R. A. Latip, M. K. M. Illias, B. M. Siddique, and M. Zulkifi. 2022. Influence of the degumming

process parameters on the formation of glyceryl esters and 3-MCPDE in refined palm: optimization and palm oil quality analyses. *MDPI 11(124).*

Nor Shafizah, I., R. Irmawati, H. Omar, M. Yahaya, and A. Alia Aina. 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.*

Oey, S. B., H. J. van der Fels-Klerx, V. Fogliano, and S. P. J. van Leeuwen. 2020. Effective physical refining for the mitigation of processing contaminants in palm oil at pilot scale. *Food Research International 138:109748.*

Pitchaiah, S., D. Juchelková, R. Sathyamurthy, and A. E. Atabani. 2023. Prediction and performance optimisation of a DI CI engine fuelled diesel–Bael biodiesel blends with DMC additive using RSM and ANN: Energy and exergy analysis. *Energy Conversion and Management 292:117386.*

Pramono, Y. B., S. B. M. Abduh, J. P. Hidayat, and C. Gunawan. 2023. *Food Quality Defines Your Own Quality*. Page (Eko Agung Saputra, editor). ITK PRESS, Balikpapan.

Sari, N. M., F. Elsania, and Muyassaroh. 2020. Eugenol of clove leaf using microwave steam-hydro distillation with material treatment and power operation variation. *Jurnal Teknik Kimia 14(2):51–57.*

Sharma, P., and N. Sharma. 2023. RSM approach to pre-treatment of lignocellulosic waste and a statistical methodology for optimizing bioethanol production. *Waste Management Bulletin 2:49–66.*

Shrivastava, P., P. Khongphakdi, A. Palamanit, A. Kumar, and P. Tekasakul. 2021. Investigation of physicochemical properties of oil palm biomass for evaluating potential of biofuels production via pyrolysis processes. *Biomass Conversion and Biorefinery 11(5):1987–2001.*

Sulihatimarsyila, A. W. N., H. L. N. Lau, K. M. Nabilah, and I. Nur Azreena. 2020. Production of refined red palm-pressed fibre oil from physical refining pilot plant. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 2:100035.*

Sumarna, D., S. H. Sumarlan, S. Wijaya, and N. Hidayat. 2021. Processing of olein fraction red palm oil with minimal refining method and optimization of deodorization process. *Pages 167–175 ICTAFF. Atlantis Press.*

Widarta, I. W. R., N. Andarwulan, and T. Haryati. 2012. Optimization of Deacidification Process in Red Palm Oil Purification on Pilot Plant Scale. *J. Teknol. dan Industri Pangan 23(1):41–46.*

Widiastuti, N., R. S. Silitonga, H. N. C. Dharma, J. Jaafar, A. R. Widyanto, and M. Purwanto. 2022. Decreasing free fatty acid of crude palm oil with polyvinylidene fluoride hollow fiber membranes using a combination of chitosan and glutaraldehyde. *RSC Advances 12(35):22662–22670.*

Zeaiter, A., C. Besombes, L. Rhazi, A. Haddarah, T. Hamieh, and K. Allaf. 2021. Instant multi-flash autovaporization as basis of an innovative deodorization process. Application to sunflower oil. *Journal of Mining and Mechanical Engineering 1(5):172–181.*

Zhang, X., X. Zhuang, M. Chen, J. Wang, D. Qiu, Z. Liu, Y. Huang, L. Zhang, and Z. Liu. 2024. An environmentally friendly production method: The pectin and essential oil from the waste peel of juvenile pomelo (*Citrus maxima* ‘Shatian Yu’) were extracted simultaneously in one step with an acid-based deep eutectic solvent. *LWT - Food Science and Technology* 206:116622.