

Pengaruh Suhu Pengeringan terhadap Retensi Senyawa Bioaktif dan Kinerja Proses pada Produksi *Palm Oil Powder* Berbasis *Crude Palm Oil*: Suatu Telaah Sistematis

Effects of Drying Temperature on Bioactive Compound Retention and Process Performance in the Production of Crude Palm Oil Powder: A Systematic Review

¹Pino Rinando, ²Endah Sulistiawati

¹ Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191, Indonesia. Tel.: +62 274 563515.

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191, Indonesia. Tel.: +62 274 563515.

¹E-mail korespondensi: 2508054011@webmail.uad.ac.id

ABSTRAK

Crude Palm Oil (CPO) merupakan sumber senyawa bioaktif alami seperti karotenoid, tokoferol, tokotrienol, dan senyawa fenolik yang berpotensi dikembangkan menjadi produk pangan fungsional bernilai tambah tinggi. Produksi *palm oil powder* melalui proses pengeringan menjadi salah satu bentuk hilirisasi sawit untuk meningkatkan nilai tambah dan diversifikasi produk berbasis minyak sawit. Namun hubungan antara suhu pengeringan, retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas pada berbagai teknologi pengeringan masih belum banyak disintesis secara komparatif dalam satu kerangka analisis. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh suhu pengeringan terhadap retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas pada produksi *palm oil powder* berbasis CPO. Metode yang digunakan adalah *Systematic Literature Review (SLR)* dengan pendekatan PRISMA. Pencarian literatur dilakukan pada berbagai basis data internasional untuk publikasi tahun 2000–2025. Sebanyak 51 artikel memenuhi kriteria inklusi, dengan 21 artikel utama digunakan dalam sintesis mendalam berdasarkan teknologi pengeringan, suhu operasi, retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas proses. Hasil kajian menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan umumnya mempercepat proses pengeringan dan berpotensi meningkatkan produktivitas, namun dapat menurunkan retensi karotenoid, tokoferol, tokotrienol, serta aktivitas antioksidan akibat degradasi termal. Retensi karotenoid pada beberapa studi dilaporkan menurun hingga sekitar 50–60% pada suhu pengeringan di atas 160°C. *Freeze drying* secara umum menghasilkan retensi senyawa bioaktif yang lebih tinggi dibandingkan teknologi lainnya, sedangkan *spray drying* memberikan keseimbangan yang baik antara mutu produk, efisiensi energi, produktivitas, dan kemudahan penerapan industri. Hasil kajian ini dapat menjadi dasar dalam pemilihan teknologi pengeringan untuk mendukung hilirisasi sawit dan pengembangan pangan fungsional yang berkelanjutan.

Kata kunci: *crude palm oil*, efisiensi energi, *palm oil powder*, senyawa bioaktif, suhu pengeringan

ABSTRACT

Crude Palm Oil (CPO) is a rich source of natural bioactive compounds, including carotenoids, tocopherols, tocotrienols, and phenolic compounds, making it a promising raw material for the development of high-value functional food products. The production of palm oil powder through drying technologies represents a potential downstream processing strategy to enhance product value and diversify palm oil-based food products. However, the influence of drying temperature on bioactive compound retention, energy efficiency, and productivity across different drying technologies has not been comprehensively synthesized. This study aimed to evaluate the effects of drying temperature on bioactive compound retention, energy efficiency, and productivity in the production of CPO-based palm oil powder. A systematic literature review (SLR) was conducted following the PRISMA guidelines. Literature was retrieved from various international databases, covering studies published between 2000 and 2025. A total of 51 articles met the inclusion criteria, of which 21 key studies were selected for in-depth synthesis based on drying technology, operating temperature, bioactive compound retention, energy efficiency, and process productivity. The results indicate that increasing drying temperature generally accelerates moisture removal and improves process productivity; however, it may reduce the retention of carotenoids, tocopherols, tocotrienols, and antioxidant activity due to thermal degradation. Several studies reported that carotenoid retention decreased by approximately 50–60% at drying temperatures above 160°C. Among the drying technologies evaluated, freeze drying consistently demonstrated the highest retention of bioactive compounds, whereas spray drying provided a favorable balance between product quality, energy efficiency, productivity, and industrial applicability. These findings provide a scientific basis for selecting appropriate drying technologies to support palm oil downstream processing and the sustainable development of functional food products.

Keywords: crude palm oil (CPO), palm oil powder, bioactive compounds, drying temperature, energy efficiency.

PENDAHULUAN

Pangan fungsional merupakan kelompok pangan yang memberikan manfaat fisiologis untuk meningkatkan kesehatan dan menurunkan risiko berbagai penyakit kronis melalui keberadaan senyawa bioaktif. Dalam konteks tersebut *Crude Palm Oil* (CPO) memiliki potensi besar sebagai bahan baku pangan fungsional karena kaya akan karotenoid, tokoferol, tokotrienol, fitosterol, skualen, dan senyawa fenolik yang berperan sebagai antioksidan alami (Ayu et al., 2016). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa komponen bioaktif tersebut memiliki aktivitas biologis sebagai penangkal radikal bebas, agen neuroprotektif, dan pencegahan penyakit kardiovaskular (Sambanthamurthi et al., 2000). Namun demikian senyawa bioaktif tersebut rentan mengalami degradasi akibat paparan panas, oksigen, dan cahaya selama proses pengolahan maupun penyimpanan sehingga dapat menurunkan kualitas nutrisi produk akhir (Ayeleso et al., 2012).

Sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia, Indonesia memiliki peluang besar untuk meningkatkan nilai tambah komoditas sawit melalui pengembangan produk pangan fungsional berbasis CPO. Salah satu pendekatan yang banyak

dikembangkan adalah konversi minyak menjadi *palm oil powder* melalui proses pengeringan. Produk bubuk memiliki berbagai keunggulan, seperti umur simpan yang lebih panjang, kemudahan penanganan, distribusi, serta fleksibilitas formulasi dalam berbagai produk pangan (Coşkun et al., 2024). Suhu pengeringan yang tinggi dapat meningkatkan laju perpindahan panas dan massa sehingga mempercepat proses produksi, sedangkan pada saat yang sama berpotensi menyebabkan degradasi karotenoid, tokoferol, dan senyawa bioaktif lainnya melalui mekanisme oksidasi, isomerisasi, dan degradasi termal (Santos et al., 2025). Oleh karena itu pengendalian suhu dan pemilihan teknologi pengeringan menjadi faktor kunci dalam mempertahankan kualitas nutraseutikal produk sekaligus menjaga efisiensi proses.

Berbagai teknologi pengeringan telah diterapkan dalam produksi *palm oil powder*, termasuk *spray drying*, *freeze drying*, *vacuum drying*, *microwave-assisted drying*, dan *hybrid drying*. *Spray drying* merupakan teknologi yang paling banyak digunakan pada skala industri karena memiliki kapasitas produksi tinggi, waktu proses singkat, serta biaya operasional yang relatif rendah. Sebaliknya *freeze drying* mampu mempertahankan retensi senyawa bioaktif yang lebih tinggi, tetapi membutuhkan energi dan biaya operasi yang besar (Gomes et al., 2018). Sementara itu *vacuum drying*, *microwave-assisted drying*, dan teknologi hibrida dikembangkan untuk efisiensi energi (Tan et al., 2025). Pendekatan mikroenkapsulasi juga banyak digunakan untuk melindungi karotenoid dan tokoferol dari degradasi selama proses pengeringan dan penyimpanan (Thaher et al., 2022).

Pemilihan teknologi pengeringan tidak hanya ditentukan oleh retensi senyawa bioaktif, tetapi juga oleh efisiensi energi dan produktivitas proses (Mangope et al., 2025). Proses pengeringan merupakan salah satu unit operasi dengan konsumsi energi terbesar dalam industri pangan. Efisiensi termal, jumlah air yang diuapkan, rendemen produk, dan kapasitas produksi menjadi dasar pemilihan teknologi pengeringan (Mujumdar, 2023).

Penelitian terdahulu telah mengevaluasi pengaruh suhu pengeringan terhadap retensi senyawa bioaktif dan efisiensi energi pada produksi *palm oil powder*, tetapi sebagian besar studi masih berfokus pada satu teknologi pengeringan tertentu dan menggunakan parameter evaluasi yang berbeda-beda. Hingga saat ini belum ada telaah literatur yang secara khusus membandingkan berbagai teknologi pengeringan berdasarkan suhu operasi, retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas proses pada produksi *palm oil powder* berbasis *Crude Palm Oil* (CPO). Oleh karena itu diperlukan kajian yang mengintegrasikan aspek kualitas produk dan kinerja proses dalam satu kerangka analisis yang komprehensif.

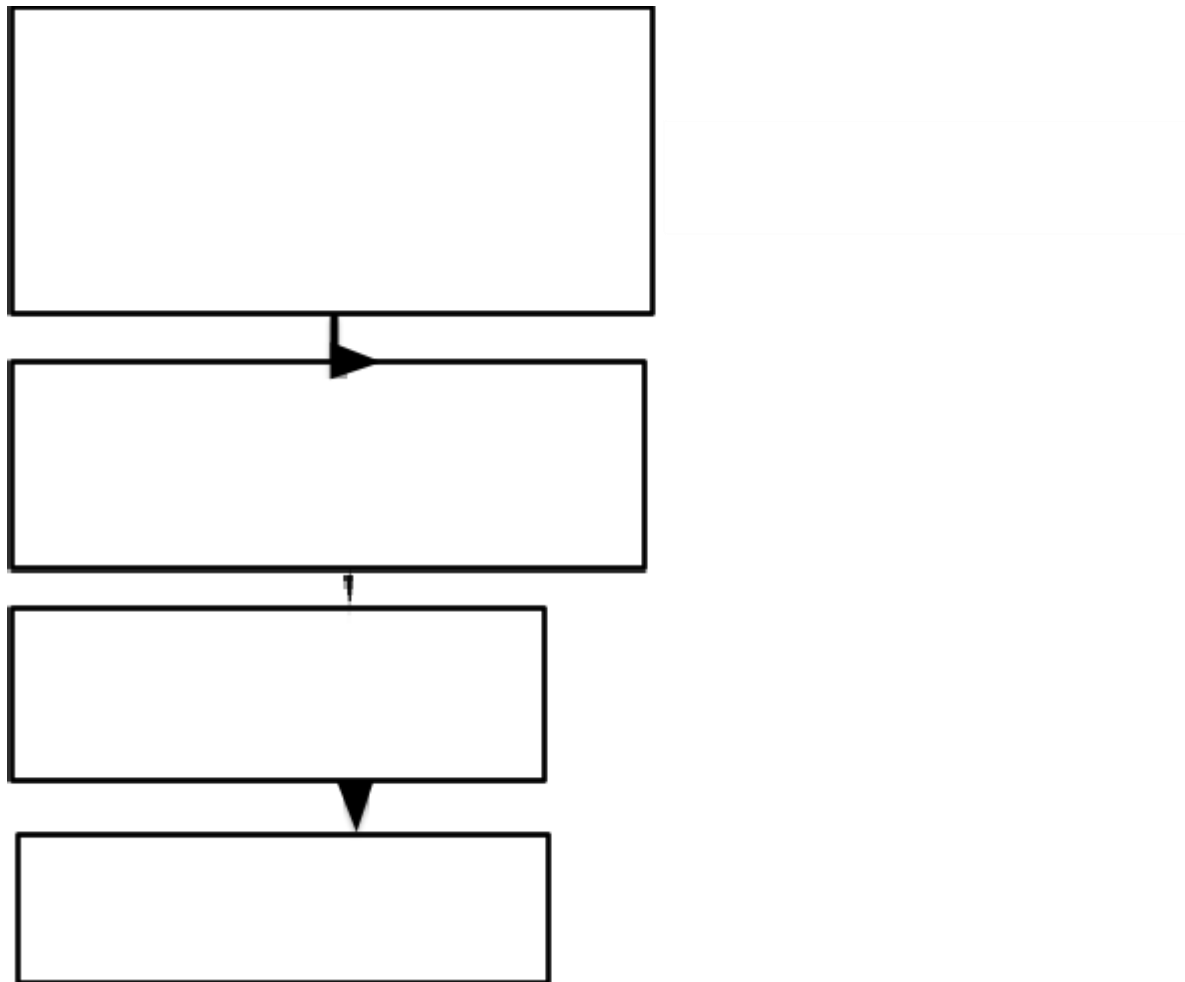
Berdasarkan *research gap* yang telah diidentifikasi penelitian ini bertujuan untuk melakukan telaah kritis mengenai pengaruh suhu pengeringan terhadap stabilitas senyawa bioaktif, efisiensi energi, produktivitas, dan keberlanjutan proses pada produksi *palm oil powder* berbasis *Crude Palm Oil* (CPO). Kajian ini difokuskan untuk membandingkan berbagai teknologi pengeringan, meliputi *spray drying*, *freeze drying*, *vacuum drying*, *microwave-assisted drying*, dan *hybrid drying* berdasarkan retensi senyawa bioaktif, kebutuhan energi, produktivitas proses, serta potensi implementasinya pada skala industri. Hasil kajian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam pengambilan keputusan pemilihan teknologi pengeringan.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengkaji pengaruh suhu pengeringan terhadap retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas pada produksi *palm oil powder* berbasis *Crude*

Palm Oil (CPO). Kajian mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) meliputi tahap identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi artikel. Pencarian literatur dilakukan pada Februari–Juni 2026 menggunakan *Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis, MDPI, Wiley Online Library*, dan *Google Scholar* untuk publikasi 2000–2026. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci *palm oil powder, red palm oil powder, microencapsulated palm oil, spray drying, freeze drying, vacuum drying, microwave drying, supercritical fluid drying, drying temperature, bioactive compounds, carotenoid, tocopherol, tocotrienol, energy efficiency*, dan *productivity* yang dikombinasikan dengan operator *Boolean*.

Artikel yang digunakan adalah artikel penelitian berbahasa Inggris tentang proses pengeringan, mikroenkapsulasi, atau produksi *palm oil powder* berbasis CPO. Hasil pencarian awal memperoleh 238 artikel, setelah penghapusan 42 artikel duplikat, sebanyak 196 artikel disaring berdasarkan judul dan abstrak. Sebanyak 75 artikel dievaluasi melalui penelaahan teks lengkap dan 24 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria inklusi. Sebanyak 51 artikel digunakan dalam sintesis literatur. Proses seleksi artikel disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses identifikasi, seleksi, dan inklusi artikel berdasarkan pedoman PRISMA

Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan 16 artikel memiliki data paling lengkap sebagai artikel inti. Karakteristik 16 artikel inti disajikan pada Tabel 1. Meskipun fokus utama kajian ini adalah teknologi pengeringan, beberapa artikel membahas proses termal seperti *deep-fat frying, physical refining*, dan deodorisasi vakum, tetap disertakan sebagai referensi pendukung untuk menjelaskan stabilitas termal, degradasi senyawa bioaktif dan perilaku oksidatif CPO.

Tabel 1. Karakteristik 16 artikel inti yang digunakan dalam sintesis deskriptif-komparatif

No	Penulis (Tahun)	Teknologi Pengeringan	Suhu Pengeringan (°C)	Senyawa Bioaktif yang Dianalisis	Parameter Proses yang Dianalisis	Temuan Utama
1	Ferreira et al. (2015)	<i>Spray Drying</i>	180	Karotenoid, aktivitas antioksidan	<i>Encapsulation efficiency, moisture content, yield</i>	Mikroenkapsulasi CPO menghasilkan stabilitas termal dan oksidatif yang baik serta mempertahankan karakteristik bioaktif minyak sawit.
2	Hernandez-Chamorro et al. (2020)	<i>Spray Drying</i>	180	Karotenoid	<i>Encapsulation efficiency, storage stability</i>	Pektin sebagai lapisan kedua meningkatkan stabilitas karotenoid selama penyimpanan.
3	Corrêa-Filho et al. (2019)	<i>Spray Drying</i>	110–200	β-Karoten	<i>Drying yield, antioxidant activity</i>	Kondisi optimum 173°C menghasilkan retensi β-karoten tertinggi.
4	Liau et al. (2025)	<i>Spray Drying</i>	170	α- dan β-Karoten	<i>Moisture content, water activity, flowability</i>	Rasio minyak:dinding 1:3 menghasilkan retensi karoten tertinggi.
5	Liau et al. (2025)	SEDS (<i>Supercritical Fluid Drying</i>)	40	α- dan β-Karoten	<i>Encapsulation efficiency</i>	SEDS menghasilkan efisiensi enkapsulasi 95,88% dengan degradasi termal minimal.
6	Lee et al. (2020)	<i>Spray Drying & SEDS</i>	25–85	Karoten, tokoferol, tokotrienol	<i>Totox value, stability</i>	SEDS memberikan stabilitas oksidatif dan retensi vitamin E terbaik.
7	Hassan et al. (2021)	Sterilisasi suhu rendah + ekstraksi	62	Karotenoid	<i>Yield, FFA</i>	Suhu rendah mempertahankan kandungan karotenoid lebih tinggi dibanding proses konvensional.
8	Loganathan et al. (2020)	<i>Microwave & Conventional Heating</i>	±180	Karoten, vitamin E	Retensi senyawa bioaktif	Pemanasan menurunkan karoten dan vitamin E, namun sebagian besar masih dapat dipertahankan.

No	Penulis (Tahun)	Teknologi Pengeringan	Suhu Pengeringan (°C)	Senyawa Bioaktif yang Dianalisis	Parameter Proses yang Dianalisis	Temuan Utama
9	Mba et al. (2017)	<i>Deep Fat Frying</i>	170–190	Karotenoid, tokoferol, tokotrienol	Kinetika degradasi	Karotenoid merupakan senyawa paling stabil selama perlakuan termal.
10	Sampaio et al. (2017)	<i>Physical Refining</i>	200–260	Karoten, tokoferol, tokotrienol, fitosterol	FFA, <i>steam</i> , suhu	Peningkatan suhu menjadi faktor utama hilangnya senyawa nutraseutikal.
11	Andarwulan et al. (2019)	Deodorisasi Vakum	135–145	Karoten	Suhu, waktu, tekanan	Kondisi optimum mempertahankan karoten >400 ppm.
12	Nagendran et al. (2000)	<i>Molecular Distillation</i>	-	Karoten, vitamin E	Retensi bioaktif	Proses mampu mempertahankan sekitar 80% karoten dan vitamin E.
13	Chandrasekaram et al. (2009)	Penyimpanan Fitonutrien Sawit	Suhu ruang vs dingin	Karoten, vitamin E, sterol	Stabilitas penyimpanan	Penyimpanan dingin mempertahankan >90% fitonutrien.
14	Gomes et al. (2018)	<i>Freeze Drying</i>	-62	Karotenoid, fenolik	Aktivitas antioksidan	<i>Freeze drying</i> menghasilkan retensi bioaktif tertinggi.
15	Ozay-Arancioglu et al. (2022)	<i>Freeze Drying, Vacuum Drying, HAD</i>	Beragam	Fenolik, antioksidan	Bioaksesibilitas, kualitas produk	<i>Freeze drying</i> memberikan kualitas produk terbaik.
16	de Lima et al. (2022)	<i>Spray Drying + Spray Chilling</i>	-	Karotenoid	Stabilitas penyimpanan	Kombinasi teknologi meningkatkan perlindungan karotenoid selama penyimpanan.

Berdasarkan sintesis terhadap 16 artikel inti, Tabel 2 menyajikan perbandingan berbagai teknologi pengeringan pada produksi *palm oil powder* berbasis *Crude Palm Oil*.

Tabel 2. Sintesis Perbandingan Teknologi Pengeringan pada *Produksi Palm Oil Powder* Berbasis *Crude Palm Oil*

Teknologi	Jumlah Studi	Rentang Suhu (°C)	Retensi Senyawa Bioaktif	Efisiensi Energi	Produktivitas	Kelebihan	Keterbatasan
<i>Spray Drying</i>	7	110–200	Sedang–Tinggi	Tinggi	Tinggi	Waktu proses singkat, biaya operasional rendah, mudah diskalakan, banyak digunakan industri	Degradasi karotenoid dan tokoferol meningkat pada suhu tinggi (>170°C)
<i>Freeze Drying</i>	2	-40 hingga -80	Sangat Tinggi	Rendah	Rendah	Retensi karotenoid, fenolik, dan aktivitas antioksidan tertinggi	Konsumsi energi tinggi, waktu proses lama, biaya investasi besar
<i>Vacuum Drying</i>	1	50–80	Tinggi	Sedang–Tinggi	Sedang	Oksidasi lebih rendah karena tekanan rendah, kualitas produk baik	Kapasitas produksi lebih rendah dibanding <i>spray drying</i>
<i>Microwave-Assisted Drying</i>	1	Setara 800 W (2–10 menit)	Sedang–Tinggi	Tinggi	Tinggi	Waktu pengeringan sangat singkat, efisiensi perpindahan energi tinggi	Risiko pemanasan tidak merata dan degradasi lokal senyawa bioaktif
<i>Supercritical Fluid Drying (SEDS)</i>	2	±40	Sangat Tinggi	Sedang	Sedang	Efisiensi enkapsulasi sangat tinggi (>95%), degradasi termal minimal	Peralatan mahal dan belum banyak diterapkan pada skala industri
<i>Spray Drying + Spray Chilling (Hybrid)</i>	1	<i>Spray drying</i> + pendinginan lipid	Sangat Tinggi	Sedang	Sedang	Perlindungan ganda terhadap karotenoid, stabilitas oksidatif terbaik selama penyimpanan	Proses lebih kompleks dan membutuhkan tahapan tambahan

Sumber: Disintesis dari Ferreira et al. (2015), Lee et al. (2020), Gomes et al. (2018), Ozay-Arancioglu et al. (2022), de Lima et al. (2022), Liau et al. (2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1.1 Senyawa Bioaktif pada *Palm Oil Powder* Berbasis *Crude Palm Oil* (CPO)

Crude Palm Oil (CPO) merupakan minyak nabati yang kaya akan fitonutrien alami, seperti karotenoid, tokoferol, tokotrienol, fitosterol, skualena, koenzim Q10, dan polifenol yang berkontribusi terhadap aktivitas antioksidan dan nilai fungsional produk yang terdapat pada Tabel 3 (Nesaretnam, 2009; Loganathan et al., 2017). Kandungan senyawa bioaktif tersebut menjadikan CPO berpotensi sebagai bahan baku pangan fungsional bernilai tambah tinggi. Di antara berbagai fitonutrien tersebut, karotenoid dan vitamin E (tokoferol serta tokotrienol) merupakan komponen utama yang paling banyak dikaji karena konsentrasinya relatif tinggi dan berperan penting dalam aktivitas antioksidan. Selain jumlahnya dominan, kedua kelompok senyawa tersebut juga sensitif terhadap perubahan kondisi proses sehingga sering digunakan sebagai indikator kualitas produk berbasis CPO (Gesteiro et al., 2019).

Tabel 3. Kandungan Fitonutrien Utama pada *Crude Palm Oil* (CPO)

Fitonutrien	Konsentrasi (ppm)
Tokoferol/Tokotrienol	600–1000
Karotenoid (α -karoten, β -karoten, likopen, fitoena)	500–1000
Fitosterol	300–620
Skualena	250–800
Fosfolipid	20–100
Koenzim Q10	10–80
Polifenol	40–70

Sumber: Nesaretnam (2009).

Berdasarkan Tabel 3 karotenoid serta tokoferol/tokotrienol merupakan fitonutrien dominan dalam CPO sehingga retensinya banyak digunakan sebagai indikator keberhasilan proses produksi *palm oil powder*. Namun, kedua senyawa tersebut memiliki stabilitas termal yang berbeda. Karotenoid lebih rentan mengalami degradasi akibat oksidasi dan isomerisasi selama pemanasan karena struktur ikatan rangkap terkonjugasinya, sedangkan tokoferol dan tokotrienol relatif lebih stabil meskipun tetap dapat mengalami penurunan pada suhu tinggi dan waktu proses yang panjang (Shahidi & Ambigaipalan, 2015; Gesteiro et al., 2019). Perbedaan stabilitas termal tersebut menunjukkan bahwa karotenoid merupakan indikator yang lebih sensitif terhadap perubahan suhu dibandingkan vitamin E. Oleh karena itu, retensi karotenoid banyak digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan kondisi pengeringan yang mampu mempertahankan mutu fungsional *palm oil powder*.

Dalam produksi *palm oil powder*, suhu pengeringan menjadi faktor penting karena menentukan keseimbangan antara retensi senyawa bioaktif dan efisiensi proses. Peningkatan suhu umumnya mempercepat penguapan air dan meningkatkan produktivitas, tetapi juga memperbesar risiko degradasi karotenoid, vitamin E, dan komponen antioksidan lainnya. Sebaliknya suhu yang lebih rendah mampu mempertahankan kandungan bioaktif, namun memerlukan waktu proses dan energi yang lebih besar. Dengan demikian pengaruh suhu terhadap retensi karotenoid dan vitamin E menjadi fokus utama dalam evaluasi berbagai teknologi pengeringan yang dibahas pada bagian berikutnya.

1.2 Pengaruh Suhu terhadap Stabilitas Senyawa Bioaktif

Berdasarkan hasil telaah berbagai penelitian peningkatan suhu pengeringan memberikan dampak yang berlawanan terhadap kualitas dan efisiensi proses pada

produk berbasis CPO. Suhu yang lebih tinggi mampu mempercepat perpindahan panas dan massa sehingga waktu pengeringan menjadi lebih singkat dan produktivitas meningkat. Namun kondisi tersebut juga mempercepat oksidasi, isomerisasi, dan degradasi termal yang menyebabkan penurunan kandungan senyawa bioaktif, terutama karotenoid, tokoferol, tokotrienol, senyawa fenolik, dan aktivitas antioksidan (Olivares-Tenorio et al., 2024). Karotenoid merupakan komponen yang paling sensitif terhadap panas karena mudah mengalami perubahan struktur dari bentuk all-trans menjadi cis-isomer yang memiliki aktivitas biologis lebih rendah. Pada sistem mikroenkapsulasi berbasis sawit, Liao et al. (2025) melaporkan bahwa retensi β -karoten tertinggi hanya mencapai 51,29%, menunjukkan bahwa suhu tetap menjadi faktor utama yang menentukan stabilitas karotenoid selama proses pengeringan.

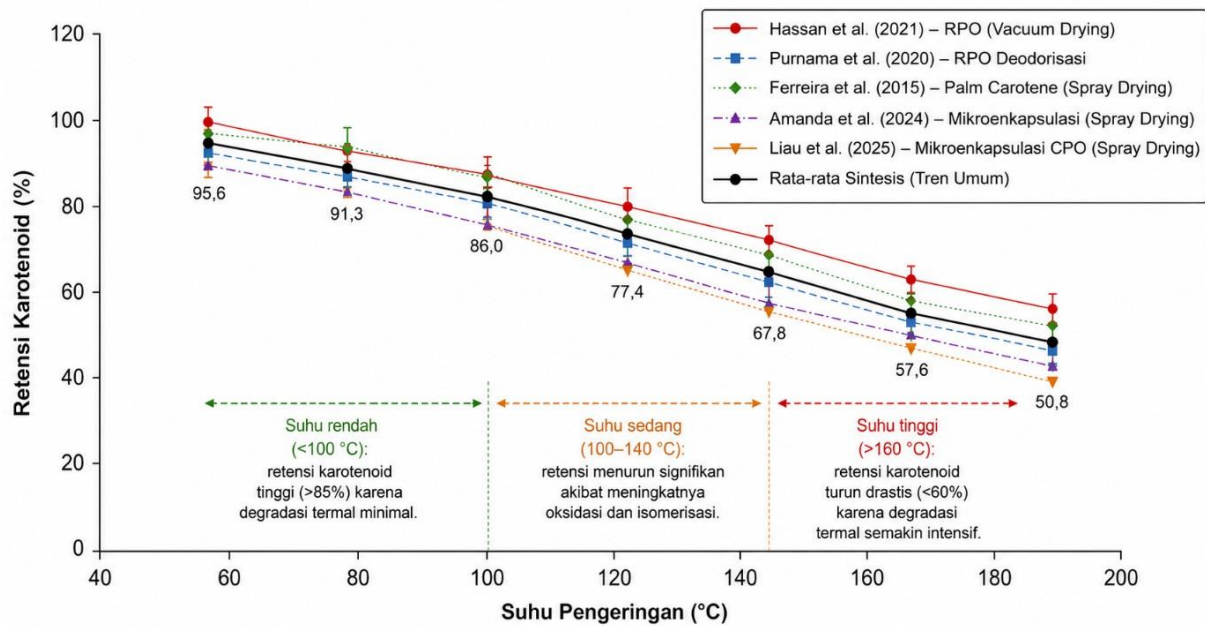
Dibandingkan karotenoid, tokoferol dan tokotrienol menunjukkan stabilitas termal yang relatif lebih baik, meskipun tetap mengalami degradasi pada suhu tinggi dan waktu proses yang panjang (Mba et al., 2018). Sementara itu senyawa fenolik dan flavonoid menunjukkan respons yang lebih kompleks karena peningkatan suhu moderat dapat meningkatkan pelepasan senyawa fenolik dari matriks bahan, tetapi suhu yang terlalu tinggi justru menyebabkan oksidasi dan penurunan aktivitas antioksidan (Awang et al., 2021). Temuan ini menunjukkan bahwa stabilitas senyawa bioaktif tidak hanya dipengaruhi oleh suhu, tetapi juga oleh lama proses, keberadaan oksigen, kadar air, serta efektivitas bahan penyalut yang digunakan selama mikroenkapsulasi.

Dari perspektif teknologi, *freeze drying* menghasilkan retensi karotenoid, vitamin E, senyawa fenolik, dan aktivitas antioksidan yang lebih tinggi karena berlangsung pada suhu rendah dan kondisi vakum (Coşkun et al., 2024; Al Faruq et al., 2025). Sebaliknya, *spray drying* menawarkan produktivitas tinggi, waktu proses singkat, dan biaya produksi yang relatif lebih rendah, meskipun menyebabkan kehilangan sebagian senyawa bioaktif akibat paparan panas (Ferreira et al., 2015).

Berdasarkan sintesis 16 artikel inti, *freeze drying* cenderung memberikan retensi senyawa bioaktif tertinggi dengan retensi karotenoid dan aktivitas antioksidan yang pada beberapa studi dilaporkan tetap berada di atas 90%. Sebaliknya, retensi pada *spray drying* menunjukkan variasi yang lebih besar bergantung pada suhu pengeringan, jenis bahan penyalut, dan formulasi mikroenkapsulasi yang digunakan. Selain itu, teknologi SEDS dilaporkan mampu menghasilkan efisiensi enkapsulasi lebih dari 95% dengan kerusakan termal yang relatif rendah, sedangkan *microwave-assisted drying* menunjukkan potensi yang menarik karena mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi dibandingkan metode konvensional.

Oleh karena itu, pemilihan teknologi pengeringan perlu mempertimbangkan keseimbangan antara retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, produktivitas, dan kebutuhan aplikasi. Dalam konteks implementasi industri saat ini, *spray drying* menunjukkan potensi yang besar karena menawarkan kapasitas produksi tinggi, biaya operasi yang relatif rendah, serta kemudahan *scale-up*, meskipun retensi senyawa bioaktifnya umumnya lebih rendah dibandingkan *freeze drying*.

Secara umum, hasil sintesis menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan cenderung menurunkan retensi karotenoid akibat oksidasi, isomerisasi, dan degradasi termal. Hubungan tersebut disajikan secara skematis pada Gambar 2.

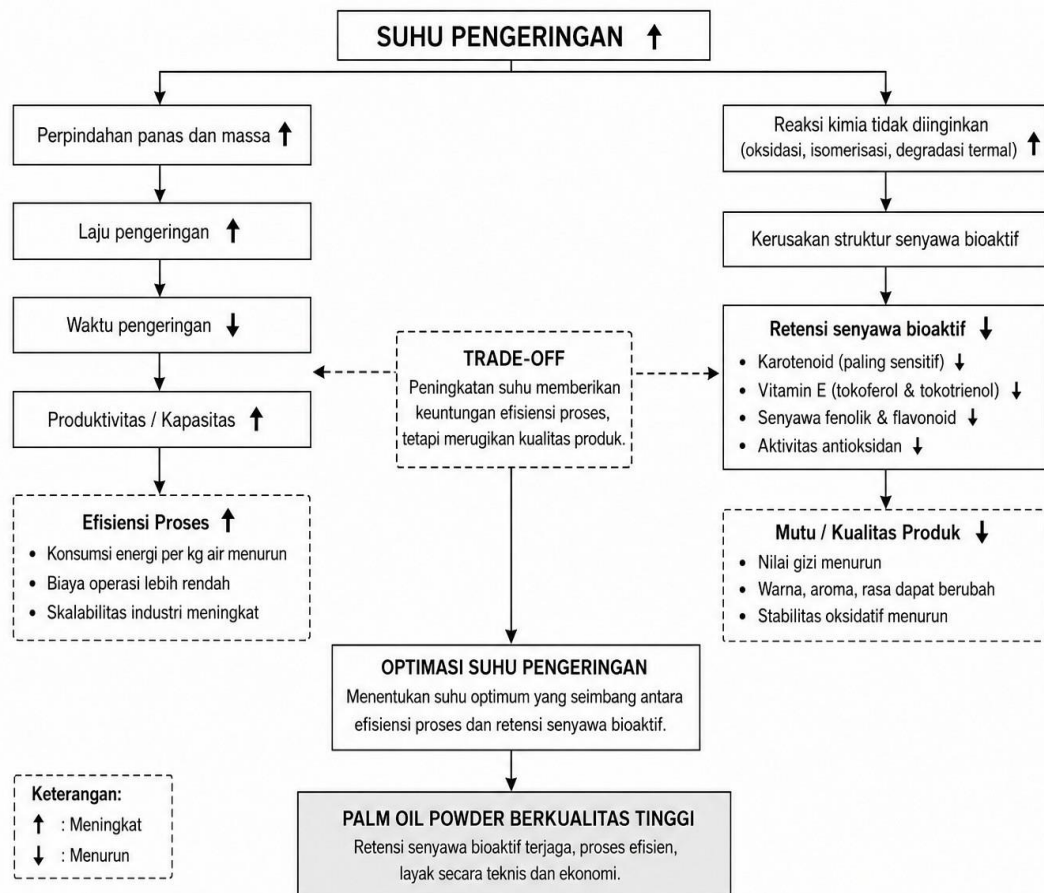


Gambar 2. Hubungan suhu pengeringan terhadap retensi karotenoid CPO. (Disusun berdasarkan sintesis berbagai studi yang dianalisis dalam penelitian ini).

1.3 Analisis Kritis

Hasil telaah menunjukkan adanya *trade-off* antara efisiensi proses dan retensi senyawa bioaktif pada berbagai teknologi pengeringan. Peningkatan suhu pengeringan mempercepat perpindahan panas dan massa sehingga laju pengeringan meningkat, waktu proses menjadi lebih singkat, dan produktivitas bertambah. Namun, kondisi tersebut juga mempercepat oksidasi, isomerisasi, dan degradasi termal yang menyebabkan penurunan kandungan karotenoid, tokoferol, tokotrienol, senyawa fenolik, dan aktivitas antioksidan (Hassan et al., 2021; Olivares-Tenorio et al., 2024). Di antara berbagai senyawa bioaktif, karotenoid merupakan komponen yang paling sensitif terhadap panas, sedangkan tokoferol dan tokotrienol menunjukkan stabilitas termal yang relatif lebih baik (Mba et al., 2018). Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan proses pengeringan tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghilangkan air, tetapi juga oleh kemampuan mempertahankan nilai fungsional produk.

Dari perspektif industri, *freeze drying* menghasilkan retensi senyawa bioaktif tertinggi, tetapi membutuhkan energi dan biaya operasi yang besar. Sebaliknya, *spray drying* menawarkan produktivitas dan efisiensi proses yang lebih baik meskipun menyebabkan kehilangan sebagian senyawa bioaktif. Oleh karena itu, optimasi suhu operasi dan penerapan mikroenkapsulasi menjadi strategi utama untuk memperoleh keseimbangan antara retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan kelayakan ekonomi pada produksi *palm oil powder* berbasis CPO.



Gambar 3. Diagram *trade-off* antara efisiensi proses dan retensi senyawa bioaktif

1.4 Perbandingan Teknologi Pengeringan untuk Produksi *Palm Oil Powder* Berbasis CPO

Berdasarkan sintesis 16 artikel inti, teknologi pengeringan menunjukkan adanya *trade-off* antara retensi senyawa bioaktif dan kinerja proses. Teknologi yang beroperasi pada suhu rendah, seperti *freeze drying*, cenderung menghasilkan retensi karotenoid, vitamin E, senyawa fenolik, dan aktivitas antioksidan yang lebih tinggi karena mampu meminimalkan degradasi termal dan oksidatif. Sebaliknya, peningkatan suhu pengeringan umumnya mempercepat laju pengeringan dan meningkatkan produktivitas, namun berpotensi menurunkan stabilitas senyawa bioaktif akibat oksidasi dan isomerisasi termal (Santos et al., 2025).

Dari perspektif implementasi industri, *spray drying* merupakan teknologi yang paling prospektif karena mampu memberikan keseimbangan antara mutu produk, efisiensi proses, produktivitas, dan kemudahan *scale-up*. Meskipun sebagian senyawa bioaktif mengalami degradasi selama proses pengeringan, penerapan mikroenkapsulasi terbukti mampu meningkatkan stabilitas karotenoid dan vitamin E sehingga kualitas produk tetap dapat dipertahankan. Sementara itu, *vacuum drying* menawarkan retensi bioaktif yang relatif baik melalui pengurangan oksidasi pada tekanan rendah, sedangkan *microwave-assisted drying* menunjukkan potensi peningkatan efisiensi energi dan percepatan proses melalui pemanasan volumetrik (Putra et al., 2025).

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa *hybrid drying* berpotensi menjadi arah pengembangan yang paling menjanjikan karena mampu mengombinasikan

retensi senyawa bioaktif yang tinggi dengan kebutuhan energi yang lebih rendah dibandingkan teknologi tunggal. Potensi tersebut muncul karena teknologi hibrida dapat mengurangi kelemahan utama metode konvensional yaitu tingginya konsumsi energi pada *freeze drying* dan risiko degradasi termal pada *spray drying*. Secara keseluruhan, hasil sintesis menegaskan bahwa pemilihan teknologi pengeringan untuk produksi *palm oil powder* berbasis CPO tidak dapat didasarkan pada retensi senyawa bioaktif semata, melainkan harus mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas produk, efisiensi energi, produktivitas, dan kelayakan industri. Dalam konteks hilirisasi sawit saat ini, *spray drying* masih merupakan teknologi yang paling layak diterapkan pada skala industri, sedangkan *microwave-assisted drying* dan *hybrid drying* menunjukkan prospek yang kuat sebagai teknologi generasi berikutnya untuk mendukung produksi *palm oil powder* yang lebih efisien dan berkelanjutan (Santos et al., 2025).

1.5 Sintesis dan Rekomendasi Teknologi Pengeringan

Berdasarkan hasil sintesis berbagai parameter yang telah dibahas pada Tabel 1, rekomendasi teknologi pengeringan dapat disusun berdasarkan tujuan produksi untuk memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dalam pengembangan *palm oil powder* berbasis CPO yang terdapat pada tabel 4.

Tabel 4. Rekomendasi Teknologi Pengeringan Berdasarkan Tujuan Produksi *Palm Oil Powder* Berbasis CPO

Tujuan Produksi	Teknologi yang Direkomendasikan	Alasan Utama
Retensi Senyawa Bioaktif Maksimum	<i>Freeze Drying</i>	Retensi karotenoid, vitamin E, dan aktivitas antioksidan tertinggi
Efisiensi Energi Tinggi	<i>Microwave-Assisted Drying</i>	Waktu proses singkat dan konsumsi energi lebih rendah
Produktivitas Tinggi	<i>Spray Drying</i>	Kapasitas produksi besar dan mudah di-scale-up
Implementasi Industri Saat Ini	<i>Spray Drying</i>	Keseimbangan terbaik antara mutu produk, energi, produktivitas, dan biaya
Teknologi Masa Depan	<i>Hybrid Drying</i>	Mengombinasikan retensi bioaktif tinggi dan efisiensi energi

Sumber: Disintesis dari Ferreira et al. (2015), Lee et al. (2020), Zahoor et al. (2023), Coşkun et al. (2024), Amanda et al. (2024), Al Faruq et al. (2025), Putra et al. (2025), Santos et al. (2025), dan Liau et al. (2025).

Hasil sintesis menunjukkan bahwa tidak terdapat satu teknologi yang unggul pada seluruh parameter evaluasi. *Freeze drying* lebih sesuai untuk menghasilkan produk premium dengan retensi senyawa bioaktif maksimum, sedangkan *spray drying* merupakan pilihan paling realistis untuk aplikasi industri karena menawarkan keseimbangan terbaik antara mutu produk, efisiensi energi, produktivitas, dan biaya operasi. Sementara itu *microwave-assisted drying* dan *hybrid drying* menunjukkan prospek yang menjanjikan sebagai teknologi generasi berikutnya karena mampu meningkatkan efisiensi energi tanpa mengurangi kualitas produk secara signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan teknologi pengeringan perlu disesuaikan dengan tujuan produksi serta mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas produk, efisiensi energi, produktivitas, dan kebutuhan industri.

1.6 Analisis Efisiensi Energi, Produktivitas, dan Keberlanjutan

Efisiensi energi, produktivitas, dan keberlanjutan merupakan parameter penting dalam pemilihan teknologi pengeringan untuk produksi *palm oil powder* berbasis *Crude Palm Oil* (CPO). Selain memengaruhi biaya operasi, konsumsi energi juga berhubungan dengan emisi karbon, penggunaan utilitas, serta kelayakan penerapan teknologi pada skala industri (Al Faruq et al., 2025). *Freeze drying* menghasilkan retensi karotenoid, vitamin E, dan aktivitas antioksidan tertinggi, tetapi membutuhkan konsumsi energi dan waktu proses yang paling besar (Coşkun et al., 2024). Sebaliknya, *spray drying* menawarkan produktivitas tinggi, waktu proses singkat, dan kemudahan *scale-up*, sehingga menjadi teknologi yang paling banyak diterapkan dalam produksi *palm oil powder* meskipun menyebabkan kehilangan sebagian senyawa bioaktif akibat paparan suhu tinggi (Ferreira et al., 2015; Amanda et al., 2024). Perkembangan teknologi pengeringan modern menunjukkan kecenderungan menuju sistem yang lebih hemat energi dan berkelanjutan. *Microwave-assisted drying* mampu mempercepat proses pengeringan melalui pemanasan volumetrik sehingga meningkatkan efisiensi energi tanpa menurunkan kualitas produk secara signifikan (Zahoor et al., 2023). Selain itu, teknologi hibrida seperti *microwave-assisted freeze drying* dan *microwave-vacuum drying* berpotensi menggabungkan retensi bioaktif yang tinggi dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan *freeze drying* konvensional (Santos et al., 2025).

Dari perspektif keberlanjutan, teknologi dengan konsumsi energi yang lebih rendah berpotensi mengurangi biaya operasi dan dampak lingkungan selama proses produksi. Namun demikian, hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa kajian mengenai penerapan teknologi hibrida pada sistem mikroenkapsulasi CPO masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan hubungan antara retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas pada produksi *palm oil powder*. Secara keseluruhan *spray drying* masih menjadi teknologi yang paling layak untuk aplikasi industri saat ini karena memberikan keseimbangan terbaik antara kualitas produk, produktivitas, efisiensi energi, dan biaya operasi. Namun, *microwave-assisted drying* dan teknologi hibrida menunjukkan prospek yang paling menjanjikan sebagai teknologi generasi berikutnya untuk mendukung hilirisasi sawit dan pengembangan industri pangan yang lebih berkelanjutan.

1.7 Implikasi Industri, Research Gap, dan Arah Pengembangan Teknologi

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa pengembangan *palm oil powder* berbasis CPO berpotensi mendukung hilirisasi sawit melalui diversifikasi pangan fungsional bernilai tambah. Penerapan teknologi pengeringan modern, khususnya *spray drying*, *microwave-assisted drying* dan *hybrid drying*, berperan dalam menjaga stabilitas senyawa bioaktif sekaligus meningkatkan efisiensi proses dan keberlanjutan produksi (Al Faruq et al., 2025).

Kajian ini menunjukkan bahwa pemilihan teknologi pengeringan tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan retensi senyawa bioaktif. Efisiensi energi, produktivitas proses, serta potensi implementasi industri juga perlu dipertimbangkan secara bersamaan. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada mutu produk, sedangkan hubungan antara retensi senyawa bioaktif, konsumsi energi spesifik, produktivitas proses, dan kelayakan ekonomi belum banyak dievaluasi secara terintegrasi (Belwal et al., 2022). Selain itu, penelitian mengenai *microwave-assisted drying* dan *hybrid drying* pada sistem mikroenkapsulasi CPO masih relatif terbatas.

Berdasarkan hasil sintesis *spray drying* merupakan teknologi yang paling layak untuk implementasi industri saat ini karena mampu memberikan keseimbangan antara retensi senyawa bioaktif, efisiensi proses, produktivitas, dan kemudahan *scale-up* (Corrêa-Filho et al., 2019). *Microwave-assisted drying* dan *hybrid drying* menunjukkan prospek yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi energi tanpa menurunkan kualitas produk secara signifikan (Zahoor et al., 2023).

Meskipun demikian hasil kajian ini masih dibatasi oleh variasi kondisi operasi, jenis bahan penyalut, metode analisis, dan parameter yang dilaporkan pada masing-masing penelitian. Oleh karena itu penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada optimasi *microwave-assisted drying* dan *hybrid drying* serta integrasi *techno-economic analysis* (TEA) dan *life cycle assessment* (LCA) guna menghasilkan proses produksi *palm oil powder* yang efisien, layak secara industri, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Hasil *Systematic Literature Review* terhadap 51 artikel yang memenuhi kriteria inklusi menunjukkan bahwa suhu pengeringan merupakan faktor kunci yang memengaruhi retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas pada produksi *palm oil powder* berbasis *Crude Palm Oil* (CPO). Peningkatan suhu pengeringan umumnya mempercepat proses pengeringan dan berpotensi meningkatkan produktivitas, namun dapat menurunkan retensi karotenoid, tokoferol, tokotrienol, serta aktivitas antioksidan akibat oksidasi, isomerisasi, dan degradasi termal.

Hasil sintesis juga menunjukkan adanya *trade-off* antara kualitas produk dan efisiensi proses pada berbagai teknologi pengeringan. *Freeze drying* menghasilkan retensi senyawa bioaktif yang tinggi, tetapi memerlukan energi dan biaya operasi yang relatif besar. Sebaliknya *spray drying* memberikan keseimbangan yang baik antara mutu produk, efisiensi energi, produktivitas, dan kemudahan implementasi pada skala industri, sehingga menjadi pilihan yang layak untuk produksi *palm oil powder* berbasis CPO saat ini. Sementara itu *microwave-assisted drying* dan *hybrid drying* menunjukkan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut guna meningkatkan efisiensi energi tanpa mengurangi kualitas produk secara signifikan.

Kajian ini memberikan sintesis komparatif yang mengintegrasikan hubungan antara suhu pengeringan, retensi senyawa bioaktif, efisiensi energi, dan produktivitas dalam satu kerangka analisis. Temuan ini dapat mendukung pemilihan teknologi pengeringan untuk hilirisasi sawit, peningkatan nilai tambah dan diversifikasi produk hilir sawit, serta pengembangan pangan fungsional yang berkelanjutan. Meskipun demikian, hasil kajian perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan heterogenitas metode pengeringan, variasi kondisi operasi, dan keterbatasan jumlah studi pada beberapa teknologi yang masih berkembang. Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada optimasi teknologi hibrida serta integrasi *techno-economic analysis* (TEA) dan *life cycle assessment* (LCA) guna mengevaluasi kelayakan industri dan keberlanjutan proses secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Faruq, A., Farahnaky, A., Dokouhaki, M., Khatun, H. A., Trujillo, F. J., & Majzoobi, M. (2025). Technological innovations in freeze drying: Enhancing efficiency, sustainability, and food quality. *Food Engineering Reviews*, 17, 859–883. <https://doi.org/10.1007/s12393-025-09415-8>
- Amanda, G. S., Falaifi, F. J. S., & Mardiyati, N. L. (2024). Determination of carotenoid bioavailability from palm oil microencapsulation. *International Journal of Oil Palm*, 7(2), 19–26. <https://doi.org/10.35876/ijop.v7i2.123>
- Andarwulan, N., Hariyadi, P., & Mursalin. (2019). Engineering process of deodorization to improve product quality of red palm oil with rich of carotene. *International Food Science and Technology Journal*, 1(1), 20–26. <https://doi.org/10.22437/ifstj.v1i1.5014>
- Awang, M. A., Chua, L. S., Abdullah, L. C., & Pin, K. Y. (2021). Drying kinetics and optimization of quercetrin extraction from *Melastoma malabathricum* leaves. *Chemical Engineering & Technology*, 44(11), 2065–2072. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100007>
- Ayeleso, A. O., Oguntibeju, O. O., & Brooks, N. L. (2012). Effects of dietary intake of red palm oil on fatty acid composition and antioxidant status. *African Journal of Biotechnology*, 11(19), 8275–8282. <https://doi.org/10.5897/AJB11.4080>
- Ayu, D. F., Andarwulan, N., Hariyadi, P., & Purnomo, E. H. (2016). Effect of tocopherols, tocotrienols, β -carotene, and chlorophyll on the photo-oxidative stability of red palm oil. *Food Science and Biotechnology*, 25(2), 401–407. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0055-1>
- Belwal, T., Cravotto, C., Prieto, M. A., Venskutonis, R., Daglia, M., Devkota, H. P., Baldi, A., Ezzat, S. M., Gómez-Gómez, L., Salama, M. M., Campone, L., Rastrelli, L., Echave, J., Jafari, S. M., & Cravotto, G. (2022). Effects of different drying techniques on the quality and bioactive compounds of plant-based products: A critical review on current trends. *Drying Technology*, 40(4), 1–23. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2068028>
- Chandrasekaram, K., Ng, M. H., Choo, Y. M., & Chuah, C. H. (2009). Effect of storage temperature on the stability of phytonutrients in palm concentrates. *American Journal of Applied Sciences*, 6(3), 529–533. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.529.533>
- Corrêa-Filho, L. C., Lourenço, M. M., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). *Microencapsulation of β -carotene by spray drying: Effect of wall material concentration and drying inlet temperature*. *International Journal of Food Science*, 2019, Article 8914852. <https://doi.org/10.1155/2019/8914852>
- Cory, H., Passarelli, S., Szeto, J., Tamez, M., & Mattei, J. (2018). The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. *Frontiers in Nutrition*, 5, Article 87. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00087>
- Coşkun, N., Sarıtaş, S., Jaouhari, Y., Bordiga, M., & Karav, S. (2024). The impact of freeze drying on bioactivity and physical properties of food products. *Applied Sciences*, 14(20), 9183. <https://doi.org/10.3390/app14209183>

- de Lima, P. M., Dacanal, G. C., Pinho, L. S., de Sá, S. H. G., Thomazini, M., & Favaro-Trindade, C. S. (2022). *Combination of spray-chilling and spray-drying techniques to protect carotenoid-rich extracts from pumpkin (*Cucurbita moschata*) byproducts, aiming at the production of a powdered natural food dye*. *Molecules*, 27(21), Article 7530. <https://doi.org/10.3390/molecules27217530>
- Ferreira, C. D., Conceição, E. J. L. da, Machado, B. A. S., Hermes, V. S., Rios, A. de O., Druzian, J. I., & Nunes, I. L. (2015). *Physicochemical characterization and oxidative stability of microencapsulated crude palm oil by spray drying*. *Food and Bioprocess Technology*, 9(1), 124–136. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1603-z>
- Gesteiro, E., Guijarro, L., Sánchez-Muniz, F. J., Vidal-Carou, M. del C., Troncoso, A., Venanci, L., Jimeno, V., Quílez, J., Anadón, A., & González-Gross, M. (2019). *Palm oil on the edge*. *Nutrients*, 11(9), 2008. <https://doi.org/10.3390/nu11092008>
- Gomes, W. F., França, F. R. M., Denadai, M., Andrade, J. K. S., Oliveira, E. M. da S., Brito, E. S. de, Rodrigues, S., & Narain, N. (2018). Effect of freeze- and spray-drying on physico-chemical characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of papaya pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2095–2106. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3124-z>
- Hassan, N. S. M., Hossain, M. S., Balakrishnan, V., Zuknik, M. H., Mustaner, M., Easa, A. M., Al-Gheethi, A., & Yahaya, A. N. A. (2021). *Influence of fresh palm fruit sterilization in the production of carotenoid-rich virgin palm oil*. *Foods*, 10(11), 2838. <https://doi.org/10.3390/foods10112838>
- Hernandez-Chamorro, T., Telis, V. R. N., Moser, P., & Benavides, I. F. (2020). *Stability of microencapsulated spray drying carotenoids depending on the composition of the encapsulating matrix*. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 7(2), 62–65. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00217>
- Lee, W. J., Tan, C. P., Sulaiman, R., Hee, Y. Y., & Chong, G. H. (2020). *Storage stability and degradation kinetics of bioactive compounds in red palm oil microcapsules produced with solution-enhanced dispersion by supercritical carbon dioxide: A comparison with the spray-drying method*. *Food Chemistry*, 304, 125427. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125427>
- Liau, K. Y., Liu, Y., Zhao, Y., & Tan, T. B. (2025). Comparative evaluation of palm-based carotene microcapsules produced via spray drying and supercritical fluid drying and their application as a non-dairy creamer. *Food and Bioprocess Technology*, 18, 9912–9926. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-04008-z>
- Liu, R. H. (2013). Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet. *Advances in Nutrition*, 4(5), 384S–392S. <https://doi.org/10.3945/an.112.003517>
- Loganathan, R., Ahmad Tarmizi, A. H., Vethakkan, S. R., & Tiu, T. K. (2020). *Retention of carotenes and vitamin E, and physico-chemical changes occurring upon heating red palm olein using deep-fat fryer, microwave oven and conventional oven*. *Journal of Oleo Science*, 69(3), 245–259. <https://doi.org/10.5650/jos.ess19209>
- Mangope, K., Kaseke, T., & Fawole, O. A. (2025). *Spray-drying microencapsulation of fixed oils: An innovative and sustainable technology to enhance*

- oxidative stability, functionality and application in food systems. Applied Food Research*, 5, 101200. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101200>
- Mba, O. I., Dumont, M.-J., & Ngadi, M. (2017). Thermostability and degradation kinetics of tocochromanols and carotenoids in palm oil, canola oil and their blends during deep-fat frying. *LWT – Food Science and Technology*, 82, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.027>
- Mba, O. I., Dumont, M.-J., & Ngadi, M. (2018). Characterization of tocopherols, tocotrienols and total carotenoids in deep-fat fried French fries. *Journal*

- of *Food Composition and Analysis*, 69, 78–86.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.02.011>
- Mujumdar, A. S. (2023). *Handbook of industrial drying* (5th ed.). CRC Press.
- Nagendran, B., Unnithan, U. R., Choo, Y. M., & Sundram, K. (2000). Characteristics of red palm oil, a carotene- and vitamin E-rich refined oil for food uses. *Food and Nutrition Bulletin*, 21(2), 189–194.
<https://doi.org/10.1177/156482650002100213>
- Nesaretnam, K. (2009, March). *Minor components in palm oil and their health benefits*. In *Palm Oil: The Sustainable 21st Century Oil* (SCI Conference). Society of Chemical Industry, London, United Kingdom.
- Olivares-Tenorio, M.-L., Cortes-Prieto, C.-M., Londoño-Univio, N.-C., Rojas-Díaz, D.-A., Quintanilla-Carvajal, M.-X., Tibaquirá-Pérez, L.-N., Ricaurte-Puentes, L.-Y., Rada-Bula, A.-I., Romero, H.-M., & García-Núñez, J.-A. (2024). Bioactive compounds in palm oil: A comprehensive review of recent advances in physicochemical characteristics, health-promoting properties and technologies for extraction, concentration, fractionation, encapsulation and functional food applications. *Journal of Food Composition and Analysis*, 132, 106306. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106306>
- Ozay-Arancioglu, I., Bekiroglu, H., Karadag, A., Saroglu, O., Tekin-Cakmak, Z. H., & Karasu, S. (2022). Effect of different drying methods on the bioactive, microstructural, and in-vitro bioaccessibility of bioactive compounds of the pomegranate arils. *Food Science and Technology*, 42, e06221.
<https://doi.org/10.1590/fst.06221>
- Purnama, K. O., Setyaningsih, D., Hambali, E., & Tawinwiyono, D. (2020). Processing, characteristics, and potential application of red palm oil: A review. *International Journal of Oil Palm*, 3(2), 40–55.
<https://doi.org/10.35876/ijop.v3i2.4>
- Putra, N. R., Agustini, S., Purwanto, W., Lestari, N., Nilawati, N., Hermawan, F., Rizkiyah, D. N., Mukhaimin, I., Mamat, H., Abdul Aziz, A. H., & Airlangga, B. (2025). *The impact of microwave technology on fruit drying processes in food industry: A bibliometric and comprehensive review (2018–2024)*. *Food Science and Biotechnology*, 34, 3175–3197.
<https://doi.org/10.1007/s10068-025-01851-w>
- Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Tan, Y. A. (2000). Chemistry and biochemistry of palm oil. *Progress in Lipid Research*, 39(6), 507–558.
[https://doi.org/10.1016/S0163-7827\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0163-7827(00)00015-1)
- Sampaio, K. A., Ayala, J. V., Van Hoed, V., Monteiro, S., Ceriani, R., Verhé, R., & Meirelles, A. J. A. (2017). Impact of crude oil quality on the refining conditions and composition of nutraceuticals in refined palm oil. *Journal of Food Science*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1111/1750-3841.13805>
- Santos, A. A. d. L., Leal, G. F., Marques, M. R., Reis, L. C. C., Junqueira, J. R. d. J., Macedo, L. L., & Corrêa, J. L. G. (2025). *Emerging drying technologies and their impact on bioactive compounds: A systematic and bibliometric review*. *Applied Sciences*, 15(12), 6653.
<https://doi.org/10.3390/app15126653>
- Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects—A review.

- Journal of Functional Foods*, 18, 820–897.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.018>
- Tan, X., Jiang, W., Su, J., & Yu, F. (2025). Recent advances in drying technologies for orange products. *Foods*, 14(17), 3051.
<https://doi.org/10.3390/foods14173051>
- Thaher, S., Anggrahini, S., Hidayat, C., & Hariadi, H. (2022). Microencapsulation of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas*) carotenoid extract by spray-drying with maltodextrin and whey protein concentrates. *Advances in Food Science, Sustainable Agriculture and Agroindustrial Engineering*, 5(2), 130–137. <https://doi.org/10.21776/ub.afssaae.2022.005.02.8>
- Zahoor, I., Mir, T. A., Ayoub, W. S., Farooq, S., & Ganaie, T. A. (2023). Recent applications of microwave technology as novel drying of food – Review. *Food and Humanity*, 1, 92–103.
<https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.05.001>