

Efektivitas Antioksidan Sintetis dan Alami terhadap Stabilitas Oksidatif dan Mutu Minyak Goreng: Suatu Telaah Literatur Sistematis

Pino Rinando^{1,*}, Endah Sulistiawati¹

¹) Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan

*) Corresponding author: 2508054011@webmail.uad.ac.id

Abstrak

Minyak goreng rentan mengalami kerusakan oksidatif selama penyimpanan dan penggorengan yang ditandai dengan peningkatan *peroxide value* (PV), *p-anisidine value* (*p*-AnV), *total polar compounds* (TPC), dan *free fatty acid* (FFA), sehingga menurunkan mutu, umur simpan, serta nilai gizi minyak. Berbagai penelitian telah mengevaluasi penggunaan antioksidan sintetis maupun alami untuk menghambat oksidasi, namun hasil yang dilaporkan masih menunjukkan variasi efektivitas pada berbagai jenis minyak dan kondisi pengolahan. Hingga saat ini belum terdapat *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengintegrasikan bukti secara komprehensif mengenai efektivitas kedua kelompok antioksidan berdasarkan indikator stabilitas oksidatif, retensi senyawa bioaktif, dan mutu minyak goreng. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dan membandingkan efektivitas antioksidan sintetis dan alami dalam mempertahankan mutu minyak goreng melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Kajian dilakukan mengikuti pedoman PRISMA 2020 dengan menelusuri artikel dari *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, dan *Google Scholar* yang dipublikasikan pada periode 2005–2025. Artikel diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, kemudian dilakukan ekstraksi data serta sintesis secara deskriptif-komparatif. Sebanyak 50 artikel memenuhi kriteria inklusi dan digunakan sebagai dasar sintesis. Analisis difokuskan pada indikator kestabilan oksidatif (PV, *p*-AnV, TPC, FFA, *total oxidation value* (Totox), dan *induction period* (IP)) serta retensi senyawa bioaktif. Hasil kajian menunjukkan bahwa TBHQ merupakan antioksidan sintetis yang paling konsisten dilaporkan efektif dalam mempertahankan kestabilan oksidatif minyak selama penggorengan suhu tinggi melalui penekanan peningkatan PV, TPC, *p*-AnV, dan FFA, sedangkan BHT dan BHA menunjukkan efektivitas yang lebih rendah akibat stabilitas termal yang terbatas. Sebaliknya antioksidan alami seperti tokoferol, *tea polyphenols*, γ -oryzanol, *rosemary extract*, dan karotenoid lebih unggul dalam mempertahankan retensi senyawa bioaktif, kualitas nutrisi, dan mutu fungsional minyak. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pemilihan strategi penggunaan antioksidan sesuai tujuan aplikasi, yaitu peningkatan kestabilan oksidatif melalui antioksidan sintetis atau preservasi retensi senyawa bioaktif melalui antioksidan alami, serta mendukung pengembangan formulasi minyak goreng yang lebih stabil, aman, dan berkelanjutan bagi industri pangan.

Kata kunci: antioksidan sintetis; antioksidan alami; stabilitas oksidatif; oksidasi lipid; minyak goreng

Abstract

Cooking oil is highly susceptible to oxidative deterioration during storage and frying, as evidenced by increased *peroxide value* (PV), *p-anisidine value* (*p*-AnV), *total polar compounds* (TPC), and *free fatty acid* (FFA) levels, leading to reduced oil quality, shorter shelf life, and diminished nutritional value. Numerous studies have investigated the application of synthetic and natural antioxidants to inhibit lipid oxidation; however, their reported effectiveness varies according to oil type and processing conditions. To date, no *Systematic Literature Review* (SLR) has comprehensively synthesized the available evidence comparing the effectiveness of these antioxidant groups using indicators of oxidative stability, bioactive compound retention, and oil quality. This study aimed to evaluate and compare the effectiveness of synthetic and natural antioxidants in preserving the oxidative stability and quality of cooking oil through a *Systematic Literature Review* (SLR). The review was conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines by systematically searching *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, and *Google Scholar* for studies published between 2005 and 2025. Eligible studies were selected

according to predefined inclusion and exclusion criteria, followed by data extraction and descriptive-comparative synthesis. A total of 50 eligible articles were included in the final analysis. The evaluated parameters included indicators of oxidative stability, namely PV, p-AnV, TPC, FFA, total oxidation value (Totox), induction period (IP), and bioactive compound retention. The findings consistently identified tert-butylhydroquinone (TBHQ) as the most effective synthetic antioxidant for suppressing increases in PV, TPC, p-AnV, and FFA while enhancing oxidative stability during high-temperature frying. In contrast, butylated hydroxytoluene (BHT) and butylated hydroxyanisole (BHA) exhibited lower effectiveness due to their limited thermal stability. Natural antioxidants, including tocopherols, tea polyphenols, γ -oryzanol, rosemary extract, and carotenoids, demonstrated superior performance in preserving bioactive compounds, nutritional quality, and the functional properties of the oil. These findings provide a scientific basis for selecting antioxidant strategies according to specific application objectives. Synthetic antioxidants are more suitable for enhancing oxidative stability, whereas natural antioxidants are preferable for preserving bioactive compounds. Furthermore, combining both antioxidant groups represents a promising strategy for developing cooking oils with improved stability, safety, and sustainability for the food industry.

Keywords: *synthetic antioxidants; natural antioxidants; cooking oil; oxidative stability; lipid oxidation*

PENDAHULUAN

Minyak goreng merupakan salah satu komoditas pangan strategis yang penggunaannya terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan perkembangan industri pangan global. Konsumsi minyak nabati dunia telah melampaui 240 juta ton per tahun, dengan minyak sawit menjadi minyak nabati yang paling banyak diproduksi dan diperdagangkan di dunia. Indonesia sebagai produsen minyak sawit terbesar menyumbang lebih dari separuh produksi minyak sawit global, sehingga kualitas dan stabilitas minyak goreng menjadi aspek penting yang tidak hanya berkaitan dengan mutu produk, tetapi juga keamanan pangan dan daya saing industri. Namun demikian, selama proses penyimpanan dan penggorengan, minyak goreng rentan mengalami kerusakan akibat reaksi oksidasi, hidrolisis, dan polimerisasi. Choe dan Min (2007) menjelaskan bahwa oksidasi lipid merupakan penyebab utama penurunan kualitas minyak selama proses penggorengan. Temuan tersebut diperkuat oleh Erickson et al. (2022) yang menunjukkan bahwa pemanasan berulang mempercepat pembentukan produk oksidasi primer dan sekunder, sedangkan Bazina et al. (2025) melaporkan bahwa penggunaan minyak secara terus-menerus menyebabkan akumulasi senyawa degradasi yang mempercepat penurunan mutu dan umur simpan minyak goreng.

Kerusakan oksidatif pada minyak tidak hanya memengaruhi karakteristik sensori seperti warna, aroma, dan rasa, tetapi juga menurunkan nilai gizi serta menghasilkan senyawa yang berpotensi merugikan kesehatan. Tingkat kerusakan minyak umumnya dievaluasi melalui parameter *peroxide value* (PV), *p-anisidine value* (p-AnV), *total*

oxidation value (TOTOX), *free fatty acid* (FFA), dan *total polar compounds* (TPC). Farhoosh et al. (2010) menunjukkan bahwa peningkatan suhu penggorengan secara signifikan mempercepat pembentukan senyawa polar dan produk oksidasi sekunder. Penelitian Shahidi, F., & de Camargo, A. C. (2016) menemukan bahwa minyak dengan kandungan antioksidan alami yang rendah mengalami penurunan stabilitas oksidatif lebih cepat dibandingkan minyak yang kaya senyawa bioaktif. Hasil tersebut sejalan dengan laporan Maszewska et al. (2018) dan Wong et al. (2019) yang menunjukkan bahwa penggorengan berulang meningkatkan nilai PV, FFA, dan TPC secara signifikan sehingga mempercepat degradasi mutu minyak.

Untuk menghambat proses oksidasi industri minyak goreng secara luas memanfaatkan antioksidan sintetis seperti *tert-butylhydroquinone* (TBHQ), *butylated hydroxytoluene* (BHT), dan *butylated hydroxyanisole* (BHA) (Augustin & Berry, 1983). Antioksidan sintetis TBHQ dilaporkan memiliki efektivitas paling tinggi dalam mempertahankan stabilitas oksidatif minyak selama penyimpanan maupun penggorengan suhu tinggi. Pimpa et al. (2009) melaporkan bahwa TBHQ menghasilkan umur simpan yang lebih lama dibandingkan BHT, BHA, maupun α -tokoferol pada palm olein. Penelitian Li et al. (2014) menunjukkan bahwa TBHQ mampu menghambat pembentukan produk oksidasi primer secara lebih efektif selama pemanasan minyak, sedangkan Huang et al. (2021) melaporkan kemampuannya dalam menekan pembentukan senyawa degradasi termal selama penggorengan. Pada minyak goreng sawit, Rantau dan Arifin (2024) menunjukkan bahwa penambahan TBHQ hingga 120 ppm mampu mempertahankan kualitas minyak berdasarkan parameter PV, FFA, dan perubahan warna.

Di sisi lain, meningkatnya kesadaran konsumen terhadap keamanan pangan dan penggunaan bahan aditif yang lebih ramah lingkungan mendorong pengembangan antioksidan alami sebagai alternatif pengganti antioksidan sintetis. Berbagai penelitian melaporkan bahwa tokoferol, tokotrienol, *rosemary extract*, *tea polyphenols*, γ -oryzanol, dan karotenoid memiliki kemampuan dalam menghambat pembentukan radikal bebas dan memperlambat oksidasi lipid. Taghvaei dan Jafari (2015) menyatakan bahwa antioksidan alami berpotensi menggantikan antioksidan sintetis pada berbagai minyak nabati. Blasi dan Cossignani (2020) melaporkan bahwa senyawa fenolik dan karotenoid mampu meningkatkan stabilitas oksidatif sekaligus memperpanjang umur simpan minyak. Selain itu, Loganathan et al. (2020) menunjukkan bahwa tokoferol dan karotenoid berperan penting dalam mempertahankan kualitas minyak sawit selama pemanasan, sedangkan

Athanasiadis et al. (2023) menemukan bahwa kombinasi α - dan δ -tokoferol menghasilkan efek sinergis yang mampu meningkatkan ketahanan minyak terhadap oksidasi.

Meskipun penelitian mengenai antioksidan pada minyak goreng telah berkembang pesat, sebagian besar studi masih berfokus pada efektivitas masing-masing antioksidan secara individual, baik sintetis maupun alami. Selain itu, hasil penelitian yang tersedia menunjukkan variasi yang cukup besar akibat perbedaan jenis minyak, kondisi pemanasan, konsentrasi antioksidan, serta parameter mutu yang digunakan. Silva et al. (2021) menegaskan bahwa efektivitas antioksidan sangat dipengaruhi oleh karakteristik sistem minyak yang diuji. Márquez-Ruiz et al. (2014) juga menunjukkan bahwa perbandingan langsung antara antioksidan sintetis dan alami pada berbagai jenis minyak masih relatif terbatas. Oleh karena itu, diperlukan suatu Systematic Literature Review (SLR) untuk mensintesis dan membandingkan temuan-temuan yang telah dipublikasikan sehingga diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran antioksidan sintetis dan alami terhadap stabilitas oksidatif dan mutu minyak goreng. Kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam pemilihan strategi antioksidan yang efektif, aman, dan berkelanjutan bagi industri minyak goreng serta menjadi acuan bagi pengembangan penelitian di masa mendatang.

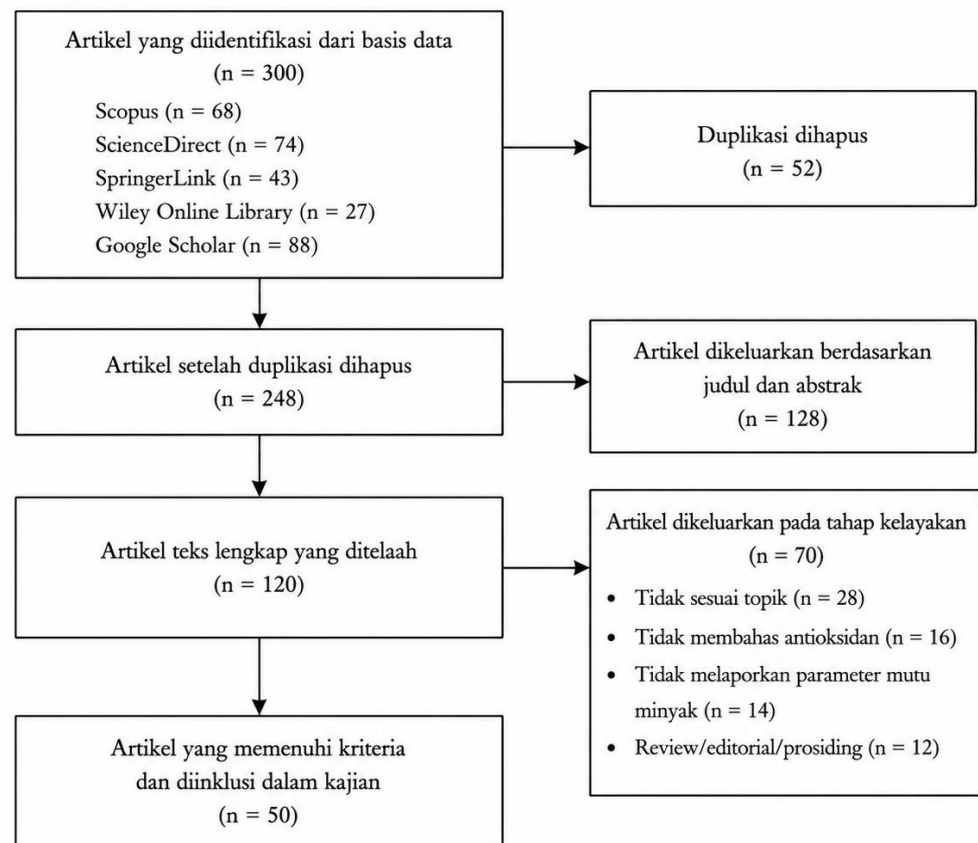
METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian mengenai peran antioksidan sintetis dan alami terhadap stabilitas oksidatif serta mutu minyak goreng. Proses kajian dilakukan secara sistematis dengan mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020) guna menjamin transparansi, konsistensi, dan keterulangan dalam proses pencarian, seleksi, serta analisis literatur.

Literatur diperoleh dari basis data ilmiah internasional yang meliputi *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, dan *Google Scholar*. Pencarian artikel dilakukan pada periode Januari–Mei 2025 menggunakan kombinasi kata kunci *antioxidant*, *TBHQ*, *BHT*, *tocopherol*, *frying oil*, *edible oil*, *oxidative stability*, *lipid oxidation*, *natural antioxidant*, dan *synthetic antioxidant*. Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean (*AND* dan *OR*) untuk memperoleh artikel yang relevan dengan tujuan penelitian.

Artikel yang disertakan dalam kajian merupakan publikasi berbahasa Inggris pada rentang tahun 2005–2025 yang membahas penggunaan antioksidan sintetis maupun alami pada minyak goreng atau minyak nabati serta melaporkan parameter stabilitas oksidatif dan mutu minyak. Artikel duplikat, artikel tanpa akses teks lengkap, prosiding, editorial, dan publikasi yang tidak secara spesifik membahas minyak goreng atau minyak nabati dikeluarkan dari proses seleksi.

Proses identifikasi dan seleksi artikel dilakukan melalui tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi sesuai pedoman PRISMA 2020. Artikel yang lolos seleksi kemudian dievaluasi berdasarkan kesesuaian topik, kelengkapan data, dan relevansi terhadap tujuan penelitian. Diagram alir proses seleksi literatur disajikan pada Gambar 1. Berdasarkan tahapan tersebut diperoleh 50 artikel yang memenuhi kriteria dan digunakan sebagai sumber utama dalam sintesis literatur.



Gambar 1. Diagram alir Prisma Proses seleksi artikel yang digunakan dalam kajian literatur

Data yang diekstraksi dari setiap artikel meliputi penulis, tahun publikasi, negara asal penelitian, jenis minyak, jenis antioksidan, metode penelitian, parameter yang

dianalisis, serta temuan utama. Selanjutnya, data disintesis secara deskriptif-komparatif untuk membandingkan efektivitas berbagai antioksidan dalam mempertahankan stabilitas oksidatif dan mutu minyak goreng. Parameter evaluasi yang digunakan dalam kajian ini meliputi *peroxide value* (PV), *p-anisidine value* (p-AnV), *total oxidation value* (Totox), *free fatty acid* (FFA), *total polar compounds* (TPC), *induction period* (IP), retensi tokoferol, retensi karotenoid, serta perubahan warna minyak. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai indikator untuk menilai kemampuan antioksidan dalam menghambat oksidasi lipid dan mempertahankan kualitas minyak selama penyimpanan maupun penggorengan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Artikel yang Direview

Sebanyak 50 artikel yang memenuhi kriteria inklusi digunakan dalam kajian ini. Karakteristik artikel yang direview meliputi tahun publikasi, jenis minyak, jenis antioksidan, metode penelitian, serta parameter evaluasi yang digunakan untuk menilai stabilitas oksidatif dan mutu minyak goreng. Ringkasan karakteristik artikel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik umum artikel yang digunakan dalam kajian literatur (n = 50)

Karakteristik	Kategori	Jumlah Artikel
Tahun Publikasi	2005–2010	9
	2011–2015	10
	2016–2020	17
	2021–2025	13
Jenis Antioksidan	Sintetis (TBHQ, BHT, BHA)	22
	Alami (tokoferol, rosemary, polifenol, karotenoid, dll.)	18
	Kombinasi sintetis dan alami	10
Metode Penelitian	Eksperimental	37
	Review	12
Parameter Evaluasi	<i>Peroxide Value</i> (PV)	Dominan
	<i>Free Fatty Acid</i> (FFA)	Dominan
	<i>Total Polar Compounds</i> (TPC)	Dominan
	<i>Induction Period</i> (IP)	Sedang
	Perubahan warna minyak	Sedang
	Retensi tokoferol/karotenoid	Rendah

Berdasarkan Tabel 1, sebagian besar penelitian dipublikasikan pada periode 2015–2025, menunjukkan meningkatnya perhatian terhadap stabilitas oksidatif minyak goreng dan pengembangan antioksidan yang lebih efektif. Minyak sawit dan palm olein merupakan jenis minyak yang paling banyak diteliti, sedangkan TBHQ menjadi antioksidan sintetis yang paling sering digunakan sebagai pembanding. Di sisi lain,

penelitian mengenai antioksidan alami seperti tokoferol, tokotrienol, rosemary extract, dan berbagai senyawa fenolik menunjukkan tren peningkatan dalam satu dekade terakhir.

Parameter yang paling banyak digunakan untuk mengevaluasi efektivitas antioksidan adalah peroxide value (PV), free fatty acid (FFA), total polar compounds (TPC), induction period (IP), dan total oxidation value (Totox). Selain itu, beberapa penelitian juga mengevaluasi retensi tokoferol, retensi karotenoid, dan perubahan warna minyak sebagai indikator tambahan mutu minyak.

Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai penelitian yang digunakan dalam kajian ini, matriks sintesis artikel terpilih disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Matriks sintesis artikel terpilih yang digunakan dalam kajian literatur

Penulis	Jenis Antioksidan	Pengaruh terhadap Warna	Pengaruh terhadap Oksidasi	Kesimpulan Utama
Taghvaei & Jafari (2015)	Berbagai antioksidan alami	Memperlambat perubahan warna minyak selama penyimpanan	Menurunkan laju oksidasi lipid	Antioksidan alami berpotensi menggantikan antioksidan sintetis
Silva et al. (2021)	TBHQ, BHT, BHA, tokoferol	Menjaga warna minyak lebih stabil	Meningkatkan stabilitas oksidatif	Antioksidan sintetis umumnya lebih efektif, namun antioksidan alami lebih aman
Wong et al. (2019)	BHA, BHT, TBHQ, rosemary oleoresin	Memperlambat penggelapan palm olein	Menurunkan PV dan TPC	TBHQ menunjukkan efektivitas tertinggi selama penggorengan
Pimpa et al. (2009)	BHT, BHA, TBHQ, PG, α -tokoferol	Tidak dilaporkan	TBHQ menghasilkan induction period tertinggi	TBHQ merupakan antioksidan paling efektif pada palm olein
Li et al. (2023)	Tea polyphenol dan TBHQ	Tidak dilaporkan	Menurunkan pembentukan produk oksidasi	Tea polyphenol lebih baik dalam mempertahankan vitamin E
Ammar (2016)	Rosemary extract, oregano extract, TBHQ	Menjaga warna minyak selama frying	Menurunkan degradasi minyak	Rosemary memiliki efektivitas mendekati TBHQ
Trivedi et al. (2017)	TBHQ, tokoferol, rosemary, green tea extract	Mempertahankan warna minyak	Menurunkan PV dan TPC	Kombinasi antioksidan menghasilkan efek sinergis
Loganathan et al. (2020)	Karotenoid dan tokoferol alami	Mempertahankan warna merah palm olein	Menekan degradasi oksidatif	Red palm olein memiliki stabilitas oksidatif yang baik

Penulis	Jenis Antioksidan	Pengaruh terhadap Warna	Pengaruh terhadap Oksidasi	Kesimpulan Utama
Athanasiadis et al. (2023)	α - dan δ - tokoferol	Tidak dilaporkan	Menurunkan PV, TBARS, dan Totox	Kombinasi tokoferol menunjukkan efek sinergis yang lebih baik dibandingkan BHT
Rantau & Arifin (2024)	TBHQ	Menekan perubahan warna minyak	Menurunkan PV dan FFA	Penambahan TBHQ 120 ppm memberikan stabilitas terbaik

Berdasarkan matriks sintesis pada Tabel 2, TBHQ merupakan antioksidan sintetis yang paling konsisten dalam meningkatkan stabilitas oksidatif minyak goreng. Meskipun demikian, antioksidan alami seperti tokoferol, rosemary extract, tea polyphenols, dan karotenoid juga menunjukkan kinerja yang baik, terutama dalam mempertahankan komponen bioaktif dan warna minyak. Beberapa penelitian bahkan melaporkan bahwa kombinasi antioksidan sintetis dan alami memberikan perlindungan yang lebih efektif dibandingkan penggunaan antioksidan tunggal. Temuan ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem antioksidan kombinasi berpotensi menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mempertahankan mutu minyak goreng.

Mekanisme Oksidasi Minyak Goreng

Oksidasi Primer

Oksidasi minyak goreng diawali oleh reaksi oksigen dengan asam lemak tak jenuh yang menghasilkan radikal bebas dan hidroperoksida sebagai produk oksidasi primer. Laju pembentukan hidroperoksida dipengaruhi oleh komposisi asam lemak dan kandungan antioksidan alami dalam minyak. Minyak dengan kandungan asam lemak tak jenuh yang tinggi umumnya lebih rentan mengalami oksidasi dibandingkan minyak yang kaya asam lemak jenuh atau tokoferol (Kamal-Eldin, 2006; Cao et al., 2014). Choe dan Min (2007) menjelaskan bahwa pembentukan hidroperoksida berlangsung lebih cepat pada suhu tinggi dan penggorengan berulang. Hidroperoksida yang terbentuk bersifat tidak stabil dan mudah terdegradasi menjadi senyawa oksidasi lainnya. Yu et al. (2021) melaporkan bahwa kandungan antioksidan alami yang lebih tinggi mampu memperlambat pembentukan hidroperoksida, sehingga peroxide value (PV) banyak digunakan sebagai indikator awal oksidasi minyak (Erickson et al., 2022).

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa tingkat ketidakjenuhan asam lemak merupakan faktor utama yang mempercepat oksidasi primer, sedangkan tokoferol,

tokotrienol, dan karotenoid berperan sebagai sistem pertahanan alami yang memperlambat pembentukan hidroperoksida. Oleh karena itu, pengendalian tahap oksidasi primer menjadi langkah penting dalam mempertahankan stabilitas oksidatif minyak selama penyimpanan maupun penggorengan.

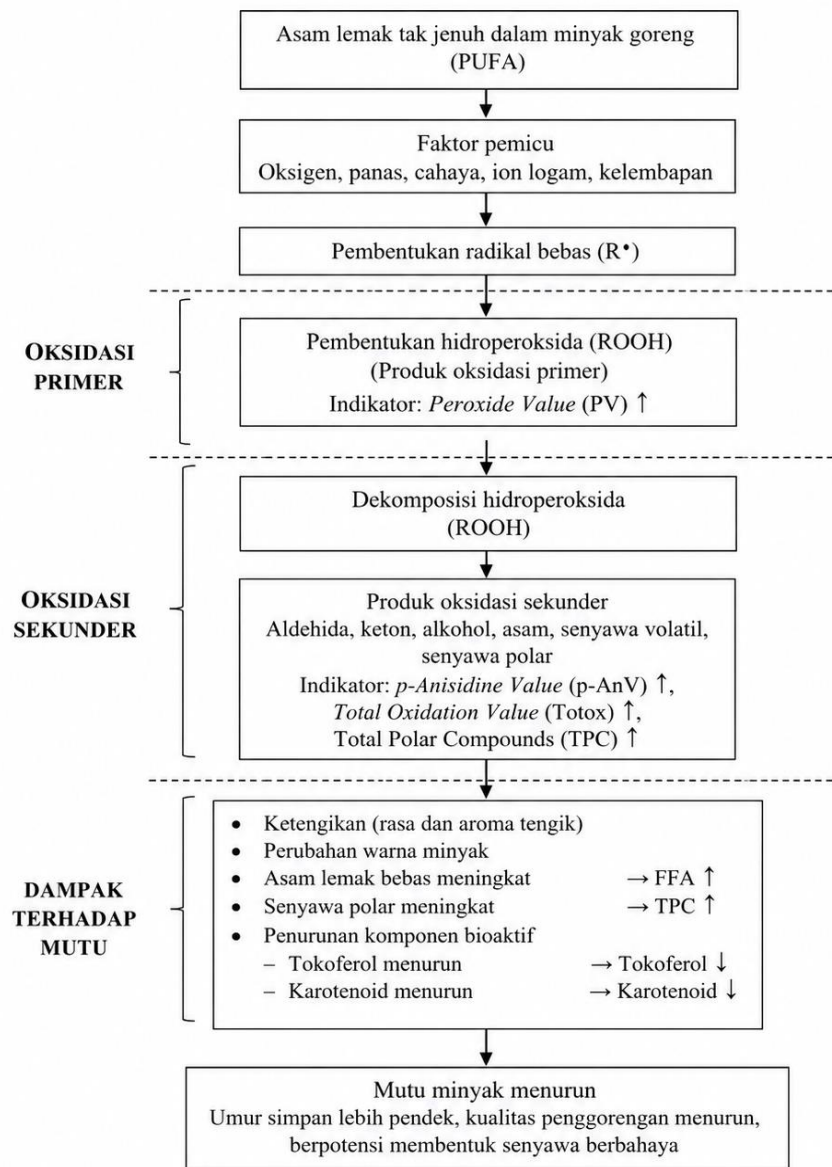
Oksidasi Sekunder

Hidroperoksida selanjutnya terdegradasi menjadi produk oksidasi sekunder seperti aldehida, keton, alkohol, dan senyawa volatil lainnya. Pembentukan senyawa tersebut berlangsung lebih cepat selama deep-fat frying akibat kombinasi suhu tinggi, oksigen, dan kontak dengan bahan pangan (Oke et al., 2018). Menurut Farhoosh et al. (2010), produk oksidasi sekunder berperan dalam pembentukan aroma dan rasa tengik minyak. Maszewska et al. (2018) menunjukkan bahwa peningkatan produk oksidasi sekunder berkorelasi dengan kenaikan p-anisidine value (p-AnV) dan Totox, sedangkan Bazina dan He (2025) melaporkan bahwa akumulasi senyawa polar mempercepat penurunan kualitas minyak.

Berdasarkan sintesis literatur, oksidasi sekunder memberikan dampak yang lebih besar terhadap mutu minyak dibandingkan oksidasi primer karena berhubungan langsung dengan perubahan aroma, rasa, warna, serta peningkatan total polar compounds (TPC). Oleh karena itu, parameter oksidasi sekunder menjadi indikator penting dalam mengevaluasi efektivitas antioksidan pada minyak goreng.

Dampak terhadap Mutu Minyak Goreng

Oksidasi minyak goreng menyebabkan penurunan mutu minyak secara fisik, kimia, dan gizi. Akumulasi produk oksidasi dapat memicu perubahan aroma, rasa, dan warna minyak (Taghvaei & Jafari, 2015). Pada minyak sawit, degradasi karotenoid selama pemanasan menurunkan intensitas warna dan aktivitas antioksidan alami (Loganathan et al., 2020). Selain itu, oksidasi berkelanjutan dapat menurunkan kandungan tokoferol dan komponen bioaktif lainnya yang berperan dalam menjaga stabilitas minyak (Silva et al., 2021). Mekanisme oksidasi lipid dan dampaknya terhadap mutu minyak goreng selama penyimpanan dan penggorengan dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme oksidasi lipid dan dampaknya terhadap mutu minyak goreng.

Penurunan tokoferol, tokotrienol, karotenoid, dan vitamin E selama pemanasan berulang juga mengurangi nilai nutrisi serta kapasitas antioksidan minyak (Shahidi & de Camargo, 2016; Adu et al., 2019). Akibatnya, umur simpan minyak menjadi lebih pendek dan mutu produk pangan yang digoreng turut menurun. Secara keseluruhan, peningkatan peroxide value (PV) mencerminkan terjadinya oksidasi primer, sedangkan kenaikan p-anisidine value (p-AnV), total oxidation value (Totox), total polar compounds (TPC), dan free fatty acid (FFA) menunjukkan perkembangan oksidasi sekunder dan degradasi termal minyak. Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa stabilitas oksidatif minyak merupakan hasil interaksi antara komposisi asam lemak, kandungan antioksidan alami,

suhu pemanasan, dan frekuensi penggunaan minyak. Faktor-faktor tersebut menentukan laju pembentukan hidroperoksida pada tahap oksidasi primer serta akumulasi aldehida, keton, dan senyawa polar pada tahap oksidasi sekunder yang pada akhirnya memengaruhi mutu sensori, nilai gizi, dan umur simpan minyak goreng. Dengan demikian, efektivitas antioksidan sintesis maupun alami tidak hanya ditentukan oleh kemampuannya menghambat pembentukan radikal bebas pada tahap awal oksidasi, tetapi juga oleh kemampuannya menekan pembentukan senyawa degradasi selama pemanasan dan penggorengan. Pemahaman terhadap mekanisme ini menjadi dasar untuk menjelaskan perbedaan efektivitas berbagai antioksidan yang dibahas pada subbab berikutnya.

Peran Antioksidan Sintesis

TBHQ

TBHQ (*tert-butylhydroquinone*) merupakan antioksidan sintesis yang paling banyak digunakan dalam minyak goreng karena kemampuannya menghambat reaksi oksidasi pada tahap propagasi. Pada palm olein, Pimpa et al. (2009) melaporkan bahwa TBHQ menghasilkan *induction period* yang lebih tinggi dibandingkan BHT, BHA, dan α -tokoferol. Hasil tersebut sejalan dengan Wong et al. (2019) yang menunjukkan bahwa TBHQ lebih efektif menekan peningkatan *peroxide value* (PV) dan *total polar compounds* (TPC) selama penggorengan. Stabilitas termal yang baik memungkinkan TBHQ mempertahankan aktivitas antioksidannya pada suhu *deep frying* (Aladedunye, 2014; Huang et al., 2021). Temuan serupa juga dilaporkan oleh Boindogurong et al. (2005), Likhitrungrat et al. (2009), Chen et al. (2021), dan Ye et al. (2020), yang menunjukkan bahwa TBHQ mampu menekan pembentukan produk oksidasi primer maupun sekunder selama pemanasan dan penggorengan berulang. Berdasarkan hasil sintesis literatur, TBHQ merupakan antioksidan sintesis yang paling konsisten dalam mempertahankan stabilitas oksidatif minyak goreng.

BHT

BHT (*butylated hydroxytoluene*) bekerja sebagai penangkap radikal bebas yang menghambat pembentukan produk oksidasi. Silva et al. (2021) melaporkan bahwa BHT mampu meningkatkan stabilitas oksidatif minyak, sedangkan Ye et al. (2018) menunjukkan bahwa efektivitasnya menurun selama pemanasan berkepanjangan akibat degradasi termal. Meskipun memiliki ketahanan termal yang lebih rendah dibandingkan TBHQ, BHT tetap banyak digunakan karena relatif ekonomis dan efektif memperlambat

peningkatan parameter oksidasi dibandingkan kontrol tanpa antioksidan (de Jesus et al., 2020).

BHA

BHA (*butylated hydroxyanisole*) memiliki mekanisme kerja yang serupa dengan BHT melalui penangkapan radikal bebas. Namun, efektivitasnya umumnya lebih rendah dibandingkan TBHQ. Kemudian untuk BHA dapat memperpanjang *induction period* yang lebih rendah dibandingkan TBHQ, hal ini menunjukkan bahwa minyak yang mengandung TBHQ memiliki nilai PV dan TPC yang lebih rendah selama pemanasan (Arpi. 2014). Meskipun demikian, BHA tetap efektif meningkatkan stabilitas minyak, terutama ketika digunakan bersama antioksidan lain yang menghasilkan efek sinergis (Ren et al., 2025). Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa TBHQ memiliki efektivitas paling tinggi dalam mempertahankan stabilitas oksidatif minyak goreng, terutama pada kondisi penggorengan suhu tinggi. Keunggulan tersebut berkaitan dengan stabilitas termal yang lebih baik sehingga mampu menghambat pembentukan hidroperoksida maupun produk oksidasi sekunder secara lebih efektif dibandingkan BHT dan BHA (Wong et al., 2019). Sebaliknya, efektivitas BHT dan BHA cenderung menurun selama pemanasan berkepanjangan akibat degradasi termal yang lebih cepat (Ye et al., 2018).

Peran Antioksidan Alami

Meningkatnya perhatian terhadap keamanan pangan dan preferensi konsumen terhadap produk berbasis *clean label* mendorong pengembangan antioksidan alami sebagai alternatif pengganti antioksidan sintetis pada minyak goreng. Berdasarkan hasil sintesis literatur, antioksidan alami yang paling banyak diteliti meliputi tokoferol, karotenoid, *rosemary extract*, *tea polyphenols*, dan γ -oryzanol. Senyawa tersebut berperan menghambat pembentukan radikal bebas dan memperlambat reaksi oksidasi selama penyimpanan maupun penggorengan (Warner et al., 2003; Rashid et al., 2022). Tokoferol dan karotenoid merupakan antioksidan alami pada minyak sawit. Loganathan et al. (2020) menunjukkan bahwa tokoferol dan karotenoid berkontribusi terhadap ketahanan minyak sawit selama pemanasan dengan menekan laju oksidasi. Selain berfungsi sebagai antioksidan, tokoferol berperan dalam mempertahankan kandungan vitamin E, sedangkan karotenoid berkontribusi terhadap stabilitas warna minyak. Athanasiadis et al. (2023) juga melaporkan kombinasi beberapa fraksi tokoferol mampu meningkatkan perlindungan reaksi oksidasi. Temuan tersebut sejalan dengan Aydeniz

dan Yilmaz (2016) yang menunjukkan bahwa antioksidan alami yang kaya tokoferol dapat meningkatkan stabilitas oksidatif minyak sekaligus mempertahankan kualitas nutrisi selama penyimpanan.

Kelompok antioksidan alami lain yang banyak dilaporkan adalah ekstrak tumbuhan seperti *rosemary extract* dan *tea polyphenols*. Ammar (2016) menunjukkan bahwa *rosemary extract* mampu memperlambat oksidasi selama penggorengan dan memberikan perlindungan yang mendekati TBHQ. Hasil yang serupa dilaporkan oleh Li et al. (2023), yang menunjukkan bahwa *tea polyphenols* efektif menekan oksidasi termal dan mempertahankan kandungan vitamin E selama pemanasan. Selain itu, Cardoso-Ugarte et al. (2013) melaporkan bahwa ekstrak tanaman yang kaya senyawa fenolik memiliki kemampuan menangkap radikal bebas yang tinggi sehingga mampu meningkatkan ketahanan minyak terhadap oksidasi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa senyawa fenolik memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada minyak goreng yang digunakan pada suhu tinggi.

Selain itu γ -oryzanol yang banyak ditemukan pada minyak dedak padi juga menunjukkan aktivitas antioksidan yang baik, mampu menghambat pembentukan hidroperoksida dan produk oksidasi sekunder selama pemanasan sehingga berkontribusi dalam mempertahankan mutu minyak. Fadda et al. (2022) melaporkan bahwa senyawa bioaktif dari sumber alami γ -oryzanol dan senyawa fenolik lainnya, mampu meningkatkan stabilitas oksidatif minyak sekaligus mempertahankan karakteristik fungsionalnya selama penyimpanan dan pemanasan.

Secara umum hasil sintesis menunjukkan bahwa antioksidan alami mampu meningkatkan stabilitas oksidatif dan mempertahankan mutu minyak goreng melalui perlindungan terhadap oksidasi primer maupun sekunder. Perbedaan efektivitas antara antioksidan alami dan sintetis terutama berkaitan dengan stabilitas termal masing-masing senyawa. Antioksidan alami umumnya lebih unggul dalam mempertahankan komponen bioaktif, kualitas nutrisi, dan karakteristik fungsional minyak, sedangkan antioksidan sintetis seperti TBHQ menunjukkan kemampuan menghambat pembentukan produk oksidasi selama penggorengan suhu tinggi (Shahidi & Zhong, 2015). Meskipun efektivitasnya pada kondisi penggorengan intensif umumnya masih sedikit di bawah TBHQ, antioksidan alami memiliki keunggulan dalam menjaga warna minyak serta mendukung pengembangan produk yang lebih sesuai dengan tuntutan keamanan pangan dan konsep *clean label* (Rashid et al., 2022). Oleh karena itu, pemanfaatan antioksidan

alami berpotensi menjadi alternatif maupun pelengkap antioksidan sintetis dalam formulasi minyak goreng modern.

Pengaruh Antioksidan terhadap Parameter Mutu Minyak

Pengaruh antioksidan terhadap mutu minyak goreng umumnya dievaluasi melalui parameter yang menggambarkan tingkat kerusakan oksidatif selama penyimpanan dan penggorengan. Berdasarkan hasil sintesis literatur, peroxide value (PV) merupakan parameter yang paling banyak digunakan karena merepresentasikan pembentukan hidroperoksida sebagai produk oksidasi primer. Pada berbagai jenis minyak goreng, TBHQ secara konsisten menghasilkan nilai PV yang lebih rendah dibandingkan BHT dan BHA (Pimpa et al., 2009), termasuk pada palm olein selama penggorengan (Wong et al., 2019). Meskipun demikian, rosemary extract, tea polyphenols, dan tokoferol juga efektif memperlambat peningkatan PV dibandingkan minyak tanpa antioksidan (Ammar, 2016; Li et al., 2023).

Kerusakan minyak lebih lanjut ditunjukkan oleh peningkatan p-anisidine value (p-AnV) dan total polar compounds (TPC) yang mencerminkan akumulasi produk oksidasi sekunder. Farhoosh et al. (2010) menjelaskan bahwa p-AnV berkaitan dengan pembentukan aldehida hasil degradasi hidroperoksida, sedangkan TPC menggambarkan akumulasi senyawa hasil pemanasan. Wong et al. (2019) menunjukkan bahwa TBHQ lebih efektif menekan peningkatan TPC dibandingkan BHT dan BHA, sementara rosemary extract dan tea polyphenols juga mampu memperlambat pembentukan senyawa polar selama penggorengan.

Selain itu, mutu minyak dipengaruhi oleh perubahan free fatty acid (FFA) yang berkaitan dengan hidrolisis dan degradasi termal. Rantau dan Arifin (2024) melaporkan bahwa TBHQ mampu memperlambat peningkatan FFA pada minyak sawit, sedangkan beberapa antioksidan alami menunjukkan kecenderungan yang serupa melalui penghambatan oksidasi selama pemanasan.

Aspek mutu lainnya adalah retensi komponen bioaktif, terutama tokoferol dan karotenoid. Loganathan et al. (2020) menunjukkan bahwa kedua senyawa tersebut mengalami degradasi selama pemanasan, namun dapat dipertahankan lebih baik dengan sistem antioksidan yang efektif. Li et al. (2023) melaporkan bahwa tea polyphenols mampu mempertahankan kandungan vitamin E lebih baik dibandingkan beberapa antioksidan sintetis, sedangkan Athanasiadis et al. (2023) menunjukkan bahwa kombinasi

tokoferol dapat meningkatkan ketahanan minyak terhadap oksidasi sekaligus menjaga kandungan senyawa bioaktif.

Tabel 3. Sintesis pengaruh antioksidan terhadap parameter mutu minyak goreng berdasarkan hasil kajian literatur

Antioksidan	Parameter yang Dilaporkan	Temuan Utama	Referensi
TBHQ	PV, TPC, FFA, IP	Paling efektif menekan pembentukan produk oksidasi primer dan sekunder serta meningkatkan stabilitas minyak selama penggorengan	Ibsch et al. (2019); Huang et al. (2021)
BHT	PV, TPC, IP	Mampu memperlambat oksidasi lipid, namun efektivitas menurun pada suhu tinggi	Silva et al. (2021)
BHA	PV, TPC, IP	Memberikan perlindungan terhadap oksidasi, tetapi umumnya lebih rendah dibandingkan TBHQ	Pimpa et al. (2009); Wong et al. (2019)
Tokoferol	PV, Totox, Retensi Vitamin E	Menghambat oksidasi sekaligus mempertahankan kandungan vitamin E dan komponen bioaktif minyak	Loganathan et al. (2020); Athanasiadis et al. (2023)
Rosemary extract	PV, TPC	Menunjukkan aktivitas antioksidan tinggi dengan efektivitas mendekati TBHQ pada beberapa sistem minyak	Ammar (2016); Wong et al. (2019)
Tea polyphenols	PV, Produk oksidasi sekunder, Retensi Vitamin E	Efektif menghambat oksidasi termal dan mempertahankan kandungan vitamin E selama pemanasan	Li et al. (2023)
γ -Oryzanol	PV, Produk oksidasi sekunder	Membantu mempertahankan stabilitas minyak dan menghambat degradasi termal	Hwang & Winkler-Moser (2014); Wang et al. (2010)
Karotenoid	Retensi Karotenoid, Stabilitas warna	Berperan sebagai antioksidan alami sekaligus mempertahankan warna dan mutu minyak sawit	Loganathan et al. (2020)

Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa TBHQ merupakan antioksidan yang paling efektif dalam menekan peningkatan PV, p-AnV, TPC, dan FFA. Namun, antioksidan alami seperti tokoferol, rosemary extract, tea polyphenols, γ -oryzanol, dan karotenoid memiliki keunggulan dalam mempertahankan komponen bioaktif dan mutu nutrisi minyak. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas antioksidan tidak hanya ditentukan oleh kemampuannya menghambat oksidasi, tetapi juga oleh kemampuannya menjaga kualitas fungsional minyak selama penyimpanan dan penggorengan.

Research Gap dan Arah Penelitian Masa Depan

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa TBHQ masih menjadi antioksidan yang paling efektif dalam mempertahankan stabilitas oksidatif minyak goreng, sedangkan penggunaan antioksidan alami terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan

terhadap produk pangan yang lebih aman dan berkelanjutan. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada parameter oksidasi seperti *peroxide value* (PV), *p-anisidine value* (p-AnV), dan *total polar compounds* (TPC), sementara parameter mutu lain seperti perubahan warna, retensi tokoferol, retensi karotenoid, serta bioavailabilitas senyawa bioaktif masih relatif jarang dikaji (Antończyk et al., 2023). Selain itu, penelitian mengenai sistem antioksidan kombinasi dan aplikasinya pada *palm olein* maupun *red palm oil* masih terbatas.

Penelitian di masa mendatang perlu diarahkan pada pengembangan kombinasi antioksidan sintetis dan alami untuk memperoleh stabilitas oksidatif yang tinggi sekaligus mempertahankan mutu nutrisi minyak. Eksplorasi antioksidan alami dari tanaman lokal Indonesia juga menjadi peluang yang menjanjikan untuk aplikasi pada minyak sawit. Pendekatan yang mengintegrasikan parameter oksidasi, retensi komponen bioaktif, perubahan warna, dan bioavailabilitas diharapkan dapat menghasilkan strategi antioksidan yang lebih relevan bagi pengembangan industri minyak goreng sawit yang berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil *Systematic Literature Review* menunjukkan bahwa penggunaan antioksidan berperan penting dalam mempertahankan stabilitas oksidatif dan mutu minyak goreng selama penyimpanan maupun penggorengan. Berdasarkan sintesis berbagai parameter mutu, seperti *peroxide value* (PV), *p-anisidine value* (p-AnV), *total polar compounds* (TPC), dan *free fatty acid* (FFA), TBHQ merupakan antioksidan sintetis yang paling efektif dalam menghambat kerusakan oksidatif minyak. Sementara itu, antioksidan alami menunjukkan kemampuan yang baik dalam mempertahankan komponen bioaktif, termasuk tokoferol dan karotenoid, sehingga berkontribusi terhadap kualitas nutrisi dan mutu fungsional minyak. Kajian ini menunjukkan bahwa efektivitas antioksidan tidak hanya ditentukan oleh kemampuannya menekan oksidasi, tetapi juga oleh kemampuannya mempertahankan karakteristik mutu minyak secara menyeluruh. Oleh karena itu, kombinasi antioksidan sintetis dan alami berpotensi menjadi strategi yang lebih efektif untuk menghasilkan minyak goreng dengan stabilitas oksidatif tinggi dan mutu yang lebih baik. Temuan ini dapat menjadi dasar bagi industri minyak goreng dalam mengembangkan formulasi antioksidan yang lebih optimal serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan terkait pemanfaatan antioksidan alami pada minyak goreng berbasis sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- Adu, O. B., Fajana, O. O., Ogunrinola, O. O., Okonkwo, U. V., Evuarherhe, P., & Elemo, B. O. (2019). *Effect of continuous usage on the natural antioxidants of vegetable oils during deep-fat frying*. *Scientific African*, 5, e00144. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00144>
- Aladedunye, F. A. (2014). *Natural antioxidants as stabilizers of frying oils*. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 116(6), 688–706. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201300267>
- Ammar, M. S. (2016). A comparative study on the antioxidant activity of TBHQ and extracts from rosemary and oregano on oxidative stability of palm olein during deep fat frying of beef meatballs. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 6(4), 671–681.
- Antończyk, A., Mika, M., & Wikiera, A. (2023). *Influence of synthetic antioxidants used in food technology on the bioavailability and metabolism of lipids – In vitro studies*. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(1), 95–107. <https://doi.org/10.31883/pjfn/161366>
- Arpi, N. (2014). Kombinasi antioksidan alami α -tokoferol dengan asam askorbat dan antioksidan sintetis BHA dengan BHT dalam menghambat ketengikan kelapa gongseng giling (*u neulheu*) selama penyimpanan. *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia*, 6(2). <https://doi.org/10.17969/jtipi.v6i2.2064>
- Athanasiadis, V., Chatzimitakos, T., Kalompatsios, D., Palaioiannis, D., Makrygiannis, I., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2023). *Evaluation of the efficacy and synergistic effect of α - and δ -tocopherol as natural antioxidants in the stabilization of sunflower oil and olive pomace oil during storage conditions*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), 1113. <https://doi.org/10.3390/ijms24021113>
- Augustin, M. A., & Berry, S. K. (1983). *Efficacy of the antioxidants BHA and BHT in palm olein during heating and frying*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 60(8), 1520–1523. <https://doi.org/10.1007/BF02666571>
- Aydeniz, B., & Yilmaz, E. (2016). Performance of different natural antioxidant compounds in frying oil. *Food Technology and Biotechnology*, 54(1), 21–30. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.01.16.4109>

- Bazina, N., Ahmed, T., Almdaaf, M., Abu Hallalah, H. M. O., & Jibia, S. (2025). *Chemical changes in deep-fat frying: Reaction mechanisms, oil degradation, and health implications*. *Food Science & Nutrition*, 13, e70969. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70969>
- Blasi, F., & Cossignani, L. (2020). *An overview of natural extracts with antioxidant activity for the improvement of the oxidative stability and shelf life of edible oils*. *Processes*, 8(8), 956. <https://doi.org/10.3390/pr8080956>
- Boindogurong, J., Higaki, T., Egashira, Y., & Sanada, H. (2005). *Protective effect of butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene against acetaminophen-induced hepatotoxicity in rats*. *Journal of Oleo Science*, 54(3), 153–159.
- Ibsch, R. B. M., Reiter, M. G. R., Bertoli, S. L., & de Souza, C. K. (2019). *Study of pure and combined antioxidants for replacing TBHQ in soybean oil packed in pet bottles*. *Journal of Food Science and Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04112-x>
- Cao, J., Li, H., Xia, X., Zou, X.-G., Li, J., Zhu, X.-M., & Deng, Z.-Y. (2014). *Effect of fatty acid and tocopherol on oxidative stability of vegetable oils with limited air*. *International Journal of Food Properties*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.864674>
- Cardoso-Ugarte, G. A., Morlán-Palmas, C. C., & Sosa-Morales, M. E. (2013). *Effect of the addition of basil essential oil on the degradation of palm olein during repeated deep frying of French fries*. *Journal of Food Science*, 78(7), C978–C984. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12166>
- Chen, J., Li, X., Kong, B., Ma, J., Liu, M., Liu, C., & Liu, Q. (2021). *How to efficiently remove tert-butylhydroquinone (TBHQ) from commercial soybean oils to obtain stripped oils: Eliminating TBHQ's influence on oxidative stabilities of model oil-in-water emulsions*. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 123(4), 2000385. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202000385>
- Choe, E., & Min, D. B. (2007). *Chemistry of deep-fat frying oils*. *Journal of Food Science*, 72(5), R77–R86. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>
- de Jesus, J. H. F., Ferreira, A. P. G., Szilágyi, I. M., & Cavaleiro, E. T. G. (2020). *Thermal behavior and polymorphism of the antioxidants: BHA, BHT and TBHQ*. *Fuel*, 278, 118298. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118298>

- Erickson, M. D., Yevtushenko, D. P., & Lu, Z.-X. (2022). *Oxidation and thermal degradation of oil during frying: A review of natural antioxidant use. Food Reviews International*. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2039689>
- Fadda, A., Sanna, D., Sakar, E. H., Gharby, S., Mulas, M., Medda, S., Yesilcubuk, N. S., Karaca, A. C., Gozukirmizi, C. K., Lucarini, M., Lombardi-Boccia, G., Diaconeasa, Z., & Durazzo, A. (2022). *Innovative and sustainable technologies to enhance the oxidative stability of vegetable oils. Sustainability*, 14(2), 849. <https://doi.org/10.3390/su14020849>
- Farhoosh, R., & Tavassoli-Kafrani, M. H. (2010). Polar compounds distribution of sunflower oil as affected by unsaponifiable matters of Bene hull oil (BHO) and tertiary-butylhydroquinone (TBHQ) during deep-frying. *Food Chemistry*, 122(2), 381–385. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.066>
- Gianti, L. (2023). *Penentuan kadar antioksidan tertiary butyl hydroquinone pada minyak goreng curah dengan menggunakan metode kromatografi cair kinerja tinggi. Jurnal Farmasi, Kesehatan dan Sains (FASKES)*, 1(2), 72–77.
- Huang, Z., Xie, D., Cao, Z., Guo, Z., Chen, L., Jiang, L., Sui, X., & Wang, Z. (2021). The effects of chloride and the antioxidant capacity of fried foods on 3-chloro-1,2-propanediol esters and glycidyl esters during long-term deep-frying. *LWT*, 145, 111511. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111511>
- Hwang, H.-S., & Winkler-Moser, J. K. (2014). Food additives reducing volatility of antioxidants at frying temperature. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(10), 1745–1761. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2525-z>
- Kamal-Eldin, A. (2006). *Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils. European Journal of Lipid Science and Technology*, 108(12), 1051–1061. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200600090>
- Li, J., Bi, Y., Liu, W., Sun, S., Liu, C., & Ma, S. (2014). *Effect of acid value on TBHQ and BHT losses in heating oils: Identification of the esterification products of TBHQ and free fatty acids. Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(10), 1763–1771. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2510-6>
- Li, J., Yuan, F., Teng, J., Li, F., Zhou, P., & Bi, Y. (2023). Effects of tea polyphenols and tertiary butylhydroquinone on quality of palm oils and losses of endogenous vitamin E during batch frying and oxidative stability of fried instant noodles. *Food Chemistry: X*, 20, 101049. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101049>

- Likhitrungrat, C., Chokethaworn, N., & Suttajit, M. (2009). *Butylated hydroxytoluene in edible vegetable oils from local markets of Chiang Mai and Mae Hong Son and its thermal stability in different cooking conditions. Thai Journal of Toxicology*, 24(2), 113–118.
- 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), 245–261. <https://doi.org/10.5650/jos.ess19209>
- Márquez-Ruiz, G., Ruiz-Méndez, M. V., & Velasco, J. (2014). *Antioxidants in frying: Analysis and evaluation of efficacy. European Journal of Lipid Science and Technology*, 116(10), 1281–1290. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400063>
- Maszevska, M., Florowska, A., Dłużewska, E., Wroniak, M., Marciniak-Lukasiak, K., & Żbikowska, A. (2018). *Oxidative stability of selected edible oils. Molecules*, 23(7), 1746. <https://doi.org/10.3390/molecules23071746>
- Oke, E. K., Idowu, M. A., Sobukola, O. P., Adeyeye, S. A. O., & Akinsola, A. O. (2018). *Frying of food: A critical review. Journal of Culinary Science & Technology*, 16(2), 107–127. <https://doi.org/10.1080/15428052.2017.1333936>
- Pimpa, B., Kanjanasopa, D., & Boonlam, S. (2009). *Effect of addition of antioxidants on the oxidative stability of refined bleached and deodorized palm olein. Kasetsart Journal (Natural Science)*, 43(2), 370–377.
- Rantau, H., & Arifin, R. (2024). Analisis pengaruh penambahan antioksidan tertiary butyl hydroquinone (TBHQ) terhadap kualitas minyak goreng setelah penggunaan berulang. *Jurnal Pengelolaan Perkebunan*, 5(1), 7–17. <https://doi.org/10.54387/jpp.v5i1.45>
- Rashid, R., Wani, S. M., Manzoor, S., Masoodi, F. A., & Dar, M. M. (2022). *Improving oxidative stability of edible oils with nanoencapsulated orange peel extract powder during accelerated shelf life storage. Food Bioscience*, 49, 101917. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101917>
- Ravi Kiran, C., Sasidharan, I., Soban Kumar, D. R., & Sundaresan, A. (2015). Influence of natural and synthetic antioxidants on the degradation of soybean oil at frying temperature. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1774-7>

- Ren, J., Li, Z., Li, X., Yang, L., Bu, Z., Wu, Y., Li, Y., Zhang, S., & Meng, X. (2025). Exploring the mechanisms of the antioxidants BHA, BHT, and TBHQ in hepatotoxicity, nephrotoxicity, and neurotoxicity from the perspective of network toxicology. *Foods*, 14(7), 1095. <https://doi.org/10.3390/foods14071095>
- Shahidi, F., & de Camargo, A. C. (2016). Tocopherols and tocotrienols in common and emerging dietary sources: Occurrence, applications, and health benefits. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/ijms17101745>
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2015). Measurement of antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*, 18, 757–781. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.047>
- Silva, M. V. da, Santos, M. R. C., Silva, I. R. A., Viana, E. B. M., Dos Anjos, D. A., Santos, I. A., Lima, N. G. B. de, Wobeto, C., Jorge, N., & Lannes, S. C. da S. (2021). *Synthetic and natural antioxidants used in the oxidative stability of edible oils: An overview. Food Reviews International*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1869775>
- Taghvaei, M., & Jafari, S. M. (2015). Application and stability of natural antioxidants in edible oils in order to substitute synthetic additives. *Journal of Food Science and Technology*, 52(3), 1272–1282. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1080-1>
- Trivedi, V., Nivetha, Y., & Edwin Chow, P. Y. (2017). Improving the frying performance of RBD palm olein oil using NaturFORT™ TRLG 101 liquid as on-top of TBHQ in deep-fat frying of potato chips. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2869-0>
- Wang, Y., Zhao, M., Tang, S., Song, K., Han, X., & Ou, S. (2010). Evaluation of the oxidative stability of diacylglycerol-enriched soybean oil and palm olein under Rancimat-accelerated oxidation conditions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87(5), 483–491. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1521-1>
- Warner, K., Neff, W. E., & Eller, F. J. (2003). Enhancing quality and oxidative stability of aged fried food with γ -tocopherol. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(3), 623–627. <https://doi.org/10.1021/jf020937e>
- Wong, Y. H., Goh, K. M., Nyam, K. L., Nehdi, I. A., Sbihi, H. M., & Tan, C. P. (2019). Effects of natural and synthetic antioxidants on changes in 3-MCPD esters and glycidyl ester in palm olein during deep-fat frying. *Food Control*, 96, 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.10.006>

- Yang, T.-S., Chu, Y.-H., & Liu, T.-T. (2005). Effects of storage conditions on oxidative stability of soybean oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(9), 1587–1595. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2150>
- Ye, Q., Meng, X., & Jiang, L. (2018). *Identification and assessment of residual levels of the main oxidation product of tert-butylhydroquinone in frying oils after heating and its cytotoxicity to RAW 264.7 cells*. *Food Chemistry*, 264, 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.059>
- Ye, Q., Xia, C., Nie, X., & Meng, X. (2020). *Accumulation of 2-tert-butyl-1,4-benzoquinone in frying oil and fried food during repeated deep fat frying processes*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/aocs.12353>
- Yu, N., Ye, Q., Nie, X., Xia, C., & Meng, X. (2021). Distribution of 2-tert-butyl-1,4-benzoquinone and its precursor, tert-butylhydroquinone, in typical edible oils and oleaginous foods marketed in Hangzhou City, China. *Food Chemistry*, 361, 130039. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130039>