



## Perubahan Fisikokimia Keripik Pisang selama Proses Penggorengan dan Mekanisme Browning (Tinjauan Literatur Sistematis dan Studi Kasus Pencokelatan Keripik Pisang Produk UMKM "MA")

### Physicochemical Changes in Banana Chips During the Frying Process and Browning Mechanism (A Systematic Literature Review and Case Study on the Browning of Banana Chips from the MSME "MA" Product)

Oksilia Oksilia <sup>\*1,3</sup>, Melati Pratama <sup>2,3</sup>, Gatot Priyanto <sup>3,4</sup>, Filli Pratama <sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Agroteknologi, Universitas Tamansiswa Palembang, Palembang, Indonesia

<sup>2</sup> Politeknik Pariwisata Palembang, Palembang, Indonesia

<sup>3</sup> Program Studi Doktor Ilmu Pertanian, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

<sup>4</sup> Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Sriwijaya, Indralaya, Indonesia

\* Penulis Korespondensi

Email: [oksilia@gmail.com](mailto:oksilia@gmail.com)



**Abstrak.** Keripik pisang merupakan produk olahan buah yang digemari karena cita rasa dan teksturnya yang khas. Namun, proses penggorengan sering memicu reaksi pencokelatan (browning) yang menurunkan mutu visual dan sensorik produk. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kualitas minyak dan warna keripik pisang akibat proses penggorengan serta mengidentifikasi tahapan reaksi yang memengaruhi mutu produk. Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus one-shot observational yang dikombinasikan dengan Systematic Literature Review (SLR). Parameter yang diamati meliputi bilangan peroksida minyak yang diukur dengan metode titrasi iodometri dan indeks warna ( $L$ ,  $a$ ,  $b^*$ )\*\* sebelum dan sesudah penggorengan. Hasil uji  $t$  berpasangan menunjukkan bahwa bilangan peroksida meningkat signifikan ( $p = 0,0000000435$ ), menandakan terjadinya oksidasi lemak selama penggorengan. Nilai  $L^*$  dan  $b^*$  menurun signifikan ( $p = 4,498 \times 10^{-5}$ ;  $p = 4,505 \times 10^{-6}$ ), menunjukkan penggelapan warna akibat reaksi Maillard dan karamelisasi, sedangkan nilai  $a^*$  tidak berubah signifikan. Secara keseluruhan, proses penggorengan memicu reaksi oksidasi dan pencokelatan non-enzimatis yang menurunkan kestabilan mutu produk. Penggunaan minyak segar, pengaturan suhu dan waktu penggorengan yang optimal, serta penambahan antioksidan alami disarankan untuk mempertahankan warna, cita rasa, dan stabilitas mutu keripik pisang.

**Kata kunci:** oksidasi lemak, stabilitas mutu, reaksi maillard, non enzimatis.

**Abstract.** Banana chips are products of fruit processing, which are popular due to their distinctive taste and texture. But the frying process frequently leads to browning reactions, which impair the visual and sensory quality of the product. This research aimed to analyze the change in the quality of banana chips' oil and color due to the frying process and to find out the stages of reaction affecting the quality of the product. The research employs a one-shot observational case study approach combined with a Systematic Literature Review (SLR). Parameters observed are the number of oil peroxides determined by the iodometric titration method and color index ( $L$ ,  $a$ ,  $b^*$ ) before and after frying. The paired  $t$ -test results showed that the peroxide number increased significantly ( $p = 0.0000000435$ ), indicating that fat oxidation occurred during the frying process.

*The L and b values decreased significantly ( $p = 4.498 \times 10^{-5}$  and  $p = 4.505 \times 10^{-6}$ ), which indicates the darkening of the color due to the Maillard reaction and caramelization. The  $a^*$  value did not change significantly. Overall frying process results in oxidation reactions and non-enzymatic browning; thus, the stability of the product quality decreases. It is advisable to use fresh oil, set the optimum temperature and frying time, and add natural antioxidants to preserve the color, taste, and stability of the banana chips..*

**Keywords:** fat oxidation, stability of quality, Maillard reaction, non-enzymatic.

## 1. Pendahuluan

Keripik pisang goreng merupakan salah satu produk olahan buah yang sangat digemari di Indonesia dan negara tropis lainnya. Cita rasa manis, tekstur renyah, serta daya simpan yang relatif lama menjadikan keripik pisang sebagai camilan favorit berbagai kalangan. Keripik pisang goreng dihasilkan melalui pemilihan pisang, pengupasan, pengirisan, penggorengan dengan suhu terkontrol, penirisan dan pengemasan yang baik agar renyah, aman dan daya simpan yang lama (Ahmad *et al.*, 2024). Namun, tantangan utama dalam produksi dan penyimpanan keripik pisang goreng adalah terjadinya reaksi pencokelatan (*browning*) yang dapat menurunkan kualitas visual, sensorik, dan nilai gizi produk. Pencokelatan tidak hanya memengaruhi penampilan, tetapi juga persepsi konsumen terhadap kesegaran dan keamanan pangan, sehingga pengendalian pencokelatan menjadi aspek penting dalam industri pengolahan pisang.

Secara umum, mekanisme pencokelatan pada keripik pisang goreng dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu pencokelatan enzimatis dan non-enzimatis. Pencokelatan enzimatis terutama dipicu oleh aktivitas enzim polifenol oksidase (PPO) yang mengkatalisis oksidasi senyawa fenolik menjadi o-quinon, yang selanjutnya mengalami polimerisasi membentuk pigmen melanin berwarna coklat gelap (Hamdan *et al.*, 2022; Moon *et al.*, 2020; Tilley *et al.*, 2023). Pada pisang, PPO sangat aktif terutama setelah proses pengirisan dan pemanasan awal, ketika jaringan buah mengalami kerusakan sel dan terjadi kontak antara enzim, substrat fenolik, dan oksigen. Substrat utama PPO pada buah-buahan tropis meliputi katekol, klorogenat, dan turunan fenolik lain, di mana kecepatan dan intensitas reaksi sangat dipengaruhi oleh jenis dan konsentrasi substrat, serta kondisi lingkungan seperti pH dan suhu (Su *et al.*, 2022; Tilley *et al.*, 2023).

Selain pencokelatan enzimatis, reaksi pencokelatan non-enzimatis juga berperan penting, terutama selama proses penggorengan dan penyimpanan, salah satunya reaksi Maillard. Reaksi Maillard terjadi akibat interaksi antara gula pereduksi dan asam amino pada suhu tinggi yang menghasilkan senyawa melanoidin yang berkontribusi pada warna coklat khas keripik pisang goreng (Su *et al.*, 2022). Oksidasi lemak akibat paparan suhu tinggi dan oksigen selama penggorengan juga dapat menghasilkan senyawa karbonil reaktif yang mempercepat pembentukan warna coklat dan menurunkan kualitas sensorik produk. Interaksi antara reaksi Maillard dan

oksidasi lemak sering kali bersifat sinergis yang mempercepat proses pencokelatan dan pembentukan senyawa flavor khas, namun juga dapat menghasilkan senyawa yang bersifat toksik jika tidak dikendalikan (Su *et al.*, 2022; Tilley *et al.*, 2023). Faktor-faktor yang memengaruhi laju dan intensitas pencokelatan pada keripik pisang goreng sangat kompleks dan saling berinteraksi. Komposisi kimia pisang (kandungan gula, asam amino, dan fenolik), kondisi proses (suhu, waktu penggorengan, kadar air), serta keberadaan oksigen dan logam transisi seperti tembaga sangat menentukan jalannya reaksi pencokelatan (Su *et al.*, 2022; Tilley *et al.*, 2023). Selain itu, perlakuan pra-pengolahan seperti perendaman dalam larutan asam askorbat, ekstrak alami, atau bahan antioksidan lain terbukti efektif dalam menekan aktivitas PPO dan memperlambat pencokelatan (Hamdan *et al.*, 2022; Milani *et al.*, 2020; Moon *et al.*, 2020). Asam askorbat, misalnya, bekerja sebagai agen pereduksi yang mengubah o-quinon kembali menjadi senyawa fenolik, sehingga menghambat pembentukan pigmen coklat (Milani *et al.*, 2020; Moon *et al.*, 2020). Penggunaan bahan alami seperti air kelapa juga terbukti mampu menekan aktivitas PPO, menjaga warna, dan memperlambat pencokelatan pada irisan pisang segar (Sarkar *et al.*, 2024). Pencegahan pencokelatan dapat dilakukan pada beberapa tahapan proses, mulai dari pra-pengolahan (perendaman dengan antioksidan atau senyawa penghambat PPO), pengaturan suhu dan waktu penggorengan, hingga pengemasan dan penyimpanan melalui pengontrolan kadar oksigen. Penelitian terbaru menyoroti efektivitas *pretreatment* menggunakan asam askorbat, *quince seed mucilage*, dan air kelapa dalam menurunkan indeks pencokelatan dan mempertahankan kualitas warna serta kandungan antioksidan pada keripik pisang (Milani *et al.*, 2020; Sarkar *et al.*, 2024). Selain itu, pendekatan non-termal seperti penggunaan tekanan tinggi, ultrasound, dan modifikasi atmosfer juga mulai diterapkan untuk menekan aktivitas enzim tanpa merusak kualitas sensorik produk (Hamdan *et al.*, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kualitas minyak dan warna keripik pisang akibat proses penggorengan serta mengidentifikasi tahapan reaksi yang memengaruhi mutu produk. Pengetahuan ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan strategi pengolahan dan inovasi teknologi yang mampu menghasilkan keripik pisang goreng dengan kualitas warna serta daya simpan yang lebih baik.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada Laboratorium Kimia Hasil Pertanian Universitas Sriwijaya pada bulan September 2025. Pengambilan sampel dilakukan pada UMKM Pengolahan Pisang "MA" Palembang.

## 2.2 Populasi dan Sampel

Sampel minyak goreng diambil sebelum penggorengan (minyak baru) dan setelah penggorengan (minyak bekas). Sampel keripik pisang diambil sebelum digoreng (irisian pisang mentah) dan setelah digoreng (keripik jadi). Parameter pengukuran yang dilakukan adalah bilangan peroksida minyak melalui metode titrasi iodometri (Anwar & Wahdania, 2024) dan indeks kecokelatan pisang iris dan keripik pisang (Nurrosyidah & Machfud, 2024).

## 2.3 Jenis dan Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus (*case study*) pada UMKM pengolahan keripik pisang "MA" dengan rancangan *one-shot observational* yang dikombinasikan dengan *Systematic Literature Review* (SLR). Pencarian dilakukan pada basis data Scopus, PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar menggunakan kata kunci: "banana chips" OR "fried banana" AND "oil quality" OR "oxidation" OR "free fatty acid" OR "peroxide value" AND "color index" OR "browning" OR "frying temperature". Kata kunci diterjemahkan pula ke dalam Bahasa Indonesia untuk menelusuri sumber lokal akses terbuka. Batasan pencarian: artikel ilmiah berbahasa Inggris atau Indonesia, tahun publikasi 2015–2025, dan tersedia teks penuh (*open access*).

Hasil tinjauan literatur ini digunakan sebagai dasar pembandingan terhadap data empiris lapangan. Pada tahap studi kasus, dilakukan pengamatan dengan pendekatan *one-shot (post-test only observational)*, yaitu pengukuran langsung dua parameter (kualitas minyak dan indeks warna) pada dua kondisi berbeda: sebelum penggorengan dan setelah penggorengan, tanpa manipulasi perlakuan tambahan (1).

$O_1 \rightarrow \text{proses penggorengan} \rightarrow O_2$  (1)  
di mana:

$O_1$  = observasi awal (minyak dan bahan sebelum digoreng)

$O_2$  = observasi setelah penggorengan (minyak bekas dan keripik yang dihasilkan)

Setiap pengukuran dilakukan ulangan sebanyak 3 kali dan hasilnya dianalisis secara deskriptif serta dibandingkan dengan kisaran nilai yang diperoleh dari hasil SLR. Kombinasi metode ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif, karena hasil lapangan dapat ditafsirkan berdasarkan konteks dan temuan ilmiah sebelumnya.

## 2.4 Analisis Data

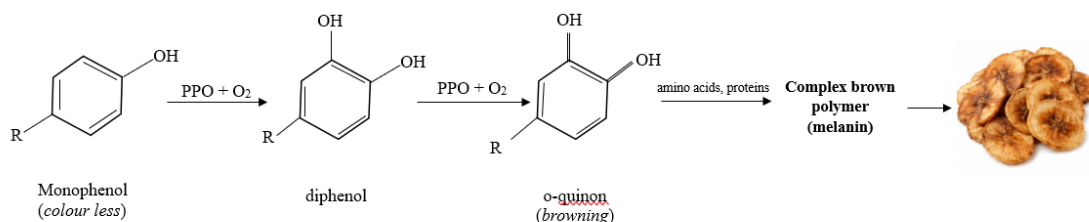
Data yang diperoleh dari hasil pengamatan lapangan dianalisis secara deskriptif dan komparatif. Nilai rata-rata dan standar deviasi dari setiap parameter, baik kualitas minyak (angka peroksida) maupun indeks warna, dihitung untuk menggambarkan perubahan sebelum dan sesudah penggorengan. Perbedaan nilai kedua kondisi dianalisis menggunakan uji t berpasangan (*paired t-test*) apabila data berdistribusi normal, sedangkan uji Wilcoxon digunakan bila data tidak

memenuhi asumsi normalitas. Hasil statistik disajikan dalam bentuk tabel untuk memperjelas kecenderungan data. Selanjutnya, hasil pengamatan lapangan dibandingkan dengan kisaran nilai rata-rata yang diperoleh dari SLR guna menilai kesesuaian atau perbedaan terhadap temuan penelitian terdahulu. Pendekatan ini digunakan sebagai bentuk validasi eksternal, di mana data empiris dikonfirmasi terhadap referensi ilmiah.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Browning Enzimatis

Keripik pisang goreng pada studi kasus di UMKM 'MA', melalui tahapan pengupasan, pengirisan dan penggorengan dalam minyak panas (145-160°C). Selama tahapan pengupasan dan pengirisan terjadi reaksi pencokelatan enzimatis. Reaksi ini menjadi salah satu tantangan utama dalam pembuatan keripik pisang karena dapat menurunkan kualitas warna, penampilan, dan nilai jual produk. Proses ini terjadi akibat kerusakan jaringan buah saat pengupasan, pemotongan, atau pengirisan, yang menyebabkan enzim polifenol oksidase (PPO) dan peroksidase (POD) bersentuhan dengan substrat fenolik di dalam sel (Moon *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2024). Tahapan reaksi dimulai dengan PPO mengkatalisis oksidasi senyawa fenolik menjadi o-quinon, yang kemudian mengalami polimerisasi non-enzimatis membentuk pigmen cokelat gelap (melanin) (Milani *et al.*, 2020; Tilley *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). Selain PPO, aktivitas enzim *fenilalanin amonia liase* (PAL) juga berperan dalam biosintesis fenolik yang menjadi substrat utama reaksi pencokelatan (Zhao *et al.*, 2025). Secara rinci, tahapan reaksi pencokelatan enzimatis pada keripik pisang yang disajikan pada Gambar 1 meliputi: (1) kerusakan jaringan yang mempertemukan enzim dan substrat, (2) oksidasi fenol oleh PPO menjadi o-quinon, (3) polimerisasi o-quinon secara non-enzimatis membentuk melanin, dan (4) perubahan warna menjadi cokelat pada permukaan pisang (Song *et al.*, 2015; Tilley *et al.*, 2023; Wohlt *et al.*, 2021). Faktor lingkungan seperti suhu, pH, dan keberadaan oksigen sangat memengaruhi laju reaksi ini (Iqbal *et al.*, 2019; Tinello & Lante, 2018).



Gambar 1. Reaksi pencokelatan enzimatis yang dikatalisis oleh polifenol oksidase, modifikasi dari Tilley *et al.* (2023).

Untuk menghambat pencokelatan, berbagai metode telah dikembangkan, seperti perlakuan fisik (*blanching*, *cold plasma*), penambahan asam askorbat, l-sistein, atau ekstrak alami seperti mucilage biji quince dan ekstrak biji alpukat (Pour *et al.*, 2022; Milani *et al.*, 2020; Moon *et al.*, 2020; Yepes-Betancur *et al.*, 2025). *Blanching* dan *cold plasma* terbukti efektif menurunkan aktivitas PPO dan POD pada irisan pisang, sehingga memperlambat pencokelatan (Cano *et al.*, 1997; Pour *et al.*, 2022; Wohlt *et al.*, 2021). Penelitian terbaru juga mengidentifikasi gen PPO utama pada pisang (MaPPO1 dan MaPPO6) yang sangat berkontribusi terhadap proses *browning* selama pematangan dan pengolahan (Qin *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2025). Dengan memahami tahapan dan mekanisme reaksi pencokelatan enzimatis, produsen dapat menerapkan strategi pencegahan yang lebih efektif untuk menjaga kualitas keripik pisang.

### 3.2 Pencokelatan Non Enzimatis

Selama proses penggorengan keripik pisang, terjadi reaksi pencokelatan non-enzimatis yang sangat dominan, terutama melalui jalur reaksi Maillard dan karamelisasi. Pada suhu 37 °C, reaksi Maillard telah berlangsung namun sangat lambat. Pada proses penggorengan suhu tinggi ( $\geq 140$  °C), gula reduksi dan asam amino dalam pisang bereaksi membentuk senyawa antara seperti Amadori dan Maillard *intermediates*, yang kemudian berlanjut membentuk pigmen coklat kompleks (melanoidin) yang memberikan warna khas pada keripik pisang goreng (Mastrocola & Munari, 2000; Shi *et al.*, 2024). Selain itu, reaksi Maillard juga menghasilkan senyawa volatil yang memperkaya aroma dan rasa, namun dapat membentuk *advanced glycation end products* (AGEs) yang berpotensi berdampak negatif jika berlebihan.

Proses pencokelatan ini sangat dipengaruhi oleh kondisi minyak goreng. Selama penggorengan, minyak mengalami oksidasi akibat paparan suhu tinggi dan kontak dengan udara, yang diukur melalui bilangan peroksida (*peroxide value*/PV). Sebelum digunakan, minyak goreng umumnya memiliki PV rendah (3,97 meq/kg), menandakan tingkat oksidasi minimal. Namun, setelah penggorengan, PV meningkat tajam. Hasil analisis uji t berpasangan menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan ( $p = 0,0000000435 < 0,05$ ) antara nilai bilangan peroksida minyak sebelum dan sesudah penggorengan (Tabel 1). Nilai rata-rata bilangan peroksida meningkat sebesar 11,4233 meq/kg setelah penggorengan, yang menandakan terjadinya oksidasi minyak akibat pemanasan. Peningkatan PV ini menunjukkan terbentuknya hidroperoksida sebagai hasil oksidasi lemak, yang tidak hanya menurunkan kualitas minyak, tetapi juga dapat mempercepat reaksi *browning* dan pembentukan senyawa off-flavor pada keripik pisang (Singh *et al.*, 2022; Ujong *et al.*, 2023).

Tabel 1. Analisis uji paired sample t-Test bilangan peroksida minyak goreng sebelum dan sesudah penggorengan.

Variabel	Mean difference (meq/kg)	T	95% confidence interval of the difference		df	Sig. (2 tailed)
			lower	upper		
Bilangan peroksida	11,4233	-53,41	10,8735	11,9731	5	4,35x10 <sup>-8</sup>

Sumber: hasil analisis menggunakan R-Studio.

Parameter penting lain untuk menilai terjadinya pencokelatan pada keripik pisang goreng adalah perubahan warna pada keripik pisang goreng melalui pengukuran indeks warna. Selama penggorengan, suhu tinggi memicu reaksi Maillard dan karamelisasi, dua jalur utama pencokelatan non-enzimatis yang menyebabkan warna kuning kecokelatan hingga coklat gelap pada produk akhir (Singh *et al.*, 2022). Hasil analisis uji t berpasangan (Tabel 2) menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan ( $p = 4,498 \times 10^{-5} < 0,05$ ) pada nilai L sebelum dan setelah penggorengan. nilai L menggambarkan kecerahan (*lightness*) yang menunjukkan bahwa produk menjadi lebih gelap setelah proses penggorengan. Komponen warna merah-hijau ( $a^*$ ) tidak berubah secara signifikan ( $p = 0,1057 > 0,05$ ), sedangkan nilai  $b^*$  menggambarkan komponen warna kuning-biru ( $p = 4,505 \times 10^{-6} < 0,05$ ) terjadi penurunan nilai sebesar 9,26 menunjukkan penurunan intensitas warna kuning, yang berarti produk menjadi lebih gelap atau lebih kecokelatan setelah proses penggorengan. Perubahan warna ini menjadi indikator visual terjadinya proses pencokelatan, namun jika terlalu gelap dapat menandakan pembentukan senyawa hasil degradasi minyak dan reaksi Maillard berlebih, yang berpotensi menurunkan mutu sensorik dan keamanan pangan (Qi *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2024).

Tabel 2. Analisis uji paired sample t-Test warna keripik pisang sebelum dan sesudah penggorengan.

Variabel	Mean difference (meq/kg)	T	95% confidence interval of the difference		df	Sig. (2 tailed)
			lower	upper		
L	-14,685	-13,175	-11,819	-17,55012	5	4,498x10 <sup>-5</sup>
*a	-0,515	-3,975	-0,1820	0,8479	5	0,1057
*b	-9,26	-21,03	-8,1280	-10,3919	5	4,505x10 <sup>-6</sup>

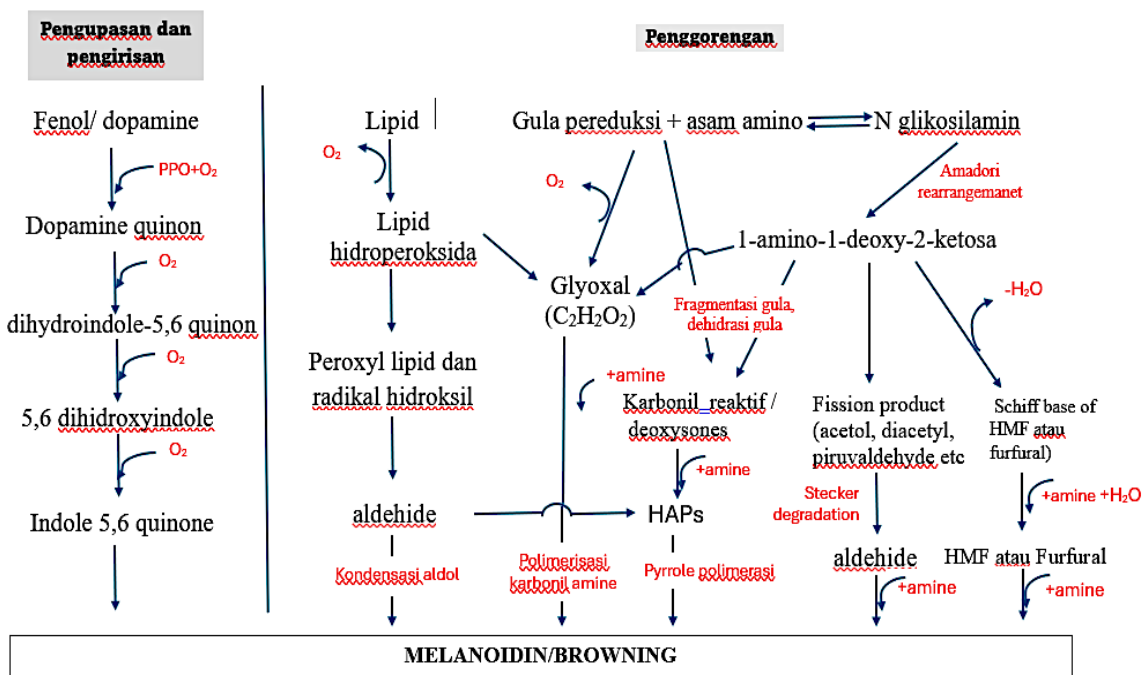
Sumber: hasil analisis menggunakan R-Studio.

### 3.3. Jalur Reaksi dan Senyawa Intermediate

Reaksi Maillard merupakan glikosidasi non-enzimatis antara asam amino atau protein dengan gula pereduksi untuk membentuk produk terglikasi. Reaksi ini mencakup jaringan kompleks dari berbagai reaksi kimia yang menghasilkan campuran senyawa yang sangat beragam dalam jumlah yang berbeda-beda. Dalam bahan pangan, reaksi ini terutama terjadi antara

monosakarida seperti glukosa dan fruktosa atau disakarida seperti maltosa dan laktosa, serta bersama dengan asam amino dan/atau protein.

Pada tahap awal reaksi Maillard, terjadi pembentukan N-substituted glycosylamine dari suatu aldosa (atau ketosa) yang bereaksi dengan gugus amino primer milik asam amino, peptida, atau protein. Senyawa glikosilamina yang terbentuk kemudian mengalami penataan ulang Amadori (*Amadori rearrangement*) untuk menghasilkan 1-amino-1-deoksi-2-ketosa (Hamdan *et al.*, 2022; Hidalgo & Zamora, 2000). Selanjutnya melibatkan dehidrasi atau fragmentasi gula, atau degradasi Strecker, yang menghasilkan berbagai senyawa amino maupun non-amino. Akhirnya, kondensasi senyawa hasil reaksi awal yang terbentuk pada tahap sebelumnya baik sesamanya maupun dengan senyawa amino menghasilkan pigmen cokelat dan polimer, yang dikenal sebagai melanoidin, penyebab utama warna cokelat pada bahan pangan yang dipanaskan (Hidalgo & Zamora, 2000).



Gambar 2. Mekanisme pembentukan *browning* pada keripik pisang, modifikasi dari Hamdan *et al.* (2022), Hidalgo and Zamora (2000), Zamora and Hidalgo (2005).

Oksidasi lipid, reaksi Maillard, dan karamelisasi adalah tiga jalur kimia utama yang secara sinergis menghasilkan pencokelatan dan pembentukan melanoidin pada pangan yang dipanaskan (Gambar 2). Oksidasi lipid menghasilkan senyawa karbonil reaktif seperti aldehida (misal malondialdehida, heksanal) dan keton. Senyawa-senyawa ini dapat berinteraksi langsung dengan gugus amino dari protein atau asam amino, membentuk produk reaksi karbonil-amin yang serupa dengan jalur Maillard (Hidalgo & Zamora, 2000; Liu *et al.*, 2023). Produk oksidasi lipid juga dapat bereaksi dengan intermediate Maillard (seperti Amadori dan  $\alpha$ -dicarbonyl), mempercepat

pembentukan pigmen coklat dan melanoidin. Selain itu, beberapa produk oksidasi lipid dapat menjadi substrat tambahan dalam reaksi Maillard, memperluas keragaman senyawa hasil dan memperkuat intensitas warna (Liu *et al.*, 2023). Secara bersamaan, karamelisasi terjadi ketika gula dipanaskan tanpa kehadiran asam amino, menghasilkan senyawa seperti furfural, hidroximetilfurfural (HMF), dan pigmen karamel. Senyawa hasil karamelisasi ini dapat berinteraksi dengan produk Maillard dan oksidasi lipid, membentuk polimer kompleks yang berkontribusi pada warna coklat dan aroma khas produk goreng (Bork *et al.*, 2023; Göncüoğlu Taş & Gökmen, 2017; Kanzler *et al.*, 2017). Polimerisasi dan kondensasi membentuk pigmen melanoidin, yang merupakan penyumbang utama warna coklat gelap pada keripik pisang (Murata, 2021; Starowicz & Zieliński, 2019; Wang *et al.*, 2011). Penelitian terbaru juga menunjukkan peran senyawa fenolik dan polifenol dalam membentuk pigmen warna melalui reaksi dengan intermediate Maillard, menghasilkan melanoidin yang lebih kompleks (Bork *et al.*, 2024). Variasi struktur dan berat molekul melanoidin menyebabkan perbedaan intensitas dan nuansa warna pada produk akhir (Bork *et al.*, 2023; Murata, 2021; Wang *et al.*, 2011).

### 3.4 Pengaruh Faktor Proses dan Inhibitor

#### 3.4.1. Pemilihan Bahan Baku

Pemilihan bahan baku merupakan tahap krusial dalam upaya mengurangi pencokelatan pada keripik pisang goreng. Pisang dipilih pada tingkat kematangan hijau atau matang fisiologis, ketika kandungan pati masih tinggi dan gula reduksi masih rendah, karena kondisi ini menurunkan peluang terjadinya reaksi Maillard dan karamelisasi yang berkontribusi terhadap pencokelatan selama proses penggorengan (Huang *et al.*, 2024; Tabtiang *et al.*, 2022). Peningkatan kematangan umumnya meningkatkan kandungan gula terlarut sehingga mempercepat pencokelatan dan menurunkan kerenyahan produk. Selain tingkat kematangan, varietas pisang juga berpengaruh terhadap intensitas pencokelatan, karena perbedaan komposisi kimia dan struktur jaringan antar kultivar akan menentukan warna akhir dan tekstur keripik (Santos *et al.*, 2023). Varietas dengan daging buah bertekstur lebih keras dan berwarna lebih terang cenderung menghasilkan keripik dengan warna lebih cerah dan penampakan lebih disukai.

#### 3.4.2. Pengupasan dan Pengirisan

Selama tahap pengupasan dan pengirisan, pengendalian pencokelatan enzimatik menjadi bagian penting karena kerusakan jaringan meningkatkan difusi oksigen dan aktivitas enzim PPO pada permukaan irisan. Upaya pencegahan difokuskan pada dua hal utama, yaitu meminimalkan paparan oksigen dan menghambat atau menunda aktivitas PPO. Secara praktis, irisan buah harus segera dimasukkan ke dalam larutan penstabil warna setelah proses pemotongan untuk mengurangi waktu kontak langsung dengan udara. Berbagai bahan pencegah pencokelatan

konvensional yang diakui aman, seperti asam askorbat, asam sitrat, dan asam oksalat, bekerja sebagai antioksidan, reduktan, pengkelat ion logam aktif, sekaligus penurun pH sehingga mengurangi pembentukan pigmen melanin pada permukaan jaringan segar (Bhat *et al.*, 2021; Sui *et al.*, 2023). Selain itu, perendaman dalam bahan alami seperti air kelapa atau jus lemon juga dilaporkan mampu menekan intensitas pencokelatan, mempertahankan kecerahan warna, menghambat aktivitas PPO, serta memperpanjang umur simpan irisan buah, termasuk pisang dan produk segar lainnya (Moon *et al.*, 2020; R *et al.*, 2024; Sarkar *et al.*, 2024; Tinello & Lante, 2018). Kombinasi perlakuan kimia ringan dengan teknik fisik seperti pendinginan cepat, *blanching* suhu rendah, atau aplikasi ultrasonik berintensitas rendah dilaporkan memberikan efek sinergis dalam menurunkan aktivitas PPO dan menjaga kualitas sensoris tanpa merusak tekstur (Shrestha *et al.*, 2020; Yildiz *et al.*, 2020). Pengaturan kondisi proses (waktu paparan udara, suhu, dan pH) yang diintegrasikan dengan penggunaan bahan yang menghambat pencokelatan yang sesuai merupakan strategi kunci untuk mengatasi pencokelatan pada tahap pengupasan dan pengirisan produk segar.

Pemberian *coating* hidrokoloid (guar gum, CMC, sodium alginat, maltodextrin) pada irisan pisang juga mampu mengurangi pencokelatan keripik secara signifikan. Lapisan hidrokoloid membentuk barrier fisik yang memperlambat transfer panas, sehingga reaksi Maillard dan karamelisasi yang menyebabkan pencokelatan berjalan lebih lambat. Selain itu, sifat hidrofilik *coating* meningkatkan retensi air, sehingga kadar air lebih terjaga selama penggorengan; kondisi ini secara langsung menekan reaksi pencokelatan yang dipercepat oleh dehidrasi (Santos *et al.*, 2023). *Coating* juga menurunkan terpaparnya oksigen pada permukaan, sehingga pencokelatan enzimatik sebelum penggorengan ikut berkurang. Stabilitas struktur sel yang dipertahankan oleh *coating* membatasi pelepasan gula pereduksi dan polifenol, sehingga reaksi pencokelatan berkurang. Hasil akhirnya berupa keripik berlapis hidrokoloid yang memiliki warna lebih terang (nilai L\* lebih tinggi) dan indeks pencokelatan lebih rendah dibanding kontrol, dengan maltodextrin dan guar gum memberikan efek paling nyata.

Chaisakdanugull *et al.* (2007) menggunakan jus nanas sebagai media perendaman irisan pisang untuk menguji kemampuan dalam menghambat pencokelatan enzimatik. Jus nanas dan terutama fraksi DE/ *diethyl ether* serta F3 (fraksi ke-3 hasil kromatografi) yang kaya asam organik (malat dan sitrat) bekerja dengan sangat efektif menghambat aktivitas enzim PPO melalui pengkelatan ion tembaga ( $\text{Cu}^{2+}$ ), penurunan pH, serta penetralan o-quinon sehingga pembentukan pigmen coklat dapat ditekan. Akibatnya, pisang yang diberi perlakuan jus nanas menunjukkan warna lebih terang dan laju pencokelatan lebih lambat, dengan efektivitas yang sebanding dengan asam askorbat dan hanya sedikit di bawah natrium metabisulfit.

### 3.4.3 Penggorengan

Secara prinsip, pencokelatan pada pisang melibatkan kombinasi pencokelatan enzimatis (oleh PPO) pada tahap awal dan pencokelatan non-enzimatis (reaksi Maillard dan karamelisasi gula) selama pemanasan minyak. Inaktivasi atau penurunan aktivitas PPO umumnya dilakukan melalui pra-perlakuan sebelum penggorengan, misalnya blansir termal (air panas/*steam/microwave*) yang terbukti mampu membatasi warna cokelat pada permukaan dan meningkatkan keseragaman warna produk pisang berbasis pemanasan suhu tinggi dan waktu singkat (Sathya *et al.*, 2024; Tabtiang *et al.*, 2022). Di sisi lain, pengaturan kondisi penggorengan seperti penurunan suhu dan atau tekanan (*vacuum frying*) serta optimasi kombinasi suhu-waktu pada penggorengan atmosferik mampu mengurangi warna gelap berlebih namun tetap menghasilkan tekstur renyah, di mana penggorengan vakum dan pra-perlakuan osmotik/termal terbukti memberikan warna yang lebih cerah dan skor sensori warna yang lebih tinggi pada keripik pisang dibanding penggorengan konvensional (Rathod & Rathod, 2021). Aplikasi lapisan hidrokoloid (misalnya guar gum, CMC, natrium alginat) sebelum penggorengan tidak hanya mengurangi penyerapan minyak, tetapi juga memodifikasi warna akhir dengan menurunkan intensitas cokelat pada permukaan keripik (Santos *et al.*, 2023). Faktor seperti suhu tinggi, waktu penggorengan lama dan pH netral hingga basa mempercepat pembentukan senyawa intermediate dan melanoidin, sehingga meningkatkan indeks kecoklatan (Delgado-Andrade *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2023; Starowicz & Zieliński, 2019). Penggunaan antioksidan alami (seperti flavan-3-ols, ekstrak kayu manis) dapat menurunkan pembentukan HMF dan melanoidin dan menjaga warna keripik tetap cerah tanpa mengurangi kualitas sensorik (Hu *et al.*, 2023; Qi *et al.*, 2018).

## 4. Kesimpulan

Proses penggorengan menyebabkan peningkatan signifikan pada bilangan peroksida minyak serta penurunan nilai  $L^*$  dan  $b^*$ , yang menunjukkan terjadinya oksidasi lemak dan reaksi pencokelatan non-enzimatis sebagai penyebab pencokelatan pada keripik pisang. Untuk menjaga mutu produk, pengendalian terhadap reaksi-reaksi tersebut perlu dilakukan melalui penggunaan minyak dengan kestabilan oksidatif tinggi, pengaturan suhu dan waktu penggorengan yang tepat, serta penerapan senyawa antioksidan alami pada tahap pra-pengolahan guna menekan aktivitas enzim dan pembentukan pigmen pencokelat. Pengelolaan proses yang tepat tidak hanya mempertahankan warna dan cita rasa, tetapi juga meningkatkan stabilitas mutu dan keamanan keripik pisang selama penyimpanan.

### Singkatan yang Digunakan

PPO	Polyphenol Oxidase
SLR	Systematic Literature Review

HMF Hydroxymethylfurfural

### Pernyataan Ketersediaan Data

Data akan tersedia berdasarkan permintaan.

### Kontribusi Para Penulis

**Oksilia:** berperan dalam konseptualisasi penelitian, penyusunan metodologi, serta penulisan draf awal manuskrip. **Melati Pratama:** berkontribusi dalam pengumpulan data, analisis data, dan interpretasi hasil. **Gatot Priyanto:** bertanggung jawab dalam supervisi penelitian, validasi metode, serta peninjauan dan penyuntingan manuskrip. **Filli Pratama:** berperan dalam visualisasi data, penyusunan referensi, serta revisi akhir manuskrip.

### Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan atau kepentingan yang bersaing.

### Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada UMKM Pengolahan Keripik Pisang 'MA' atas bantuannya di lapangan. Penelitian ini didukung oleh Beasiswa Program Doktor untuk Dosen Indonesia (PDDI) oleh Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi Republik Indonesia No. 000632/PPAPT.1.2/BPI.06/08/2025.

### Daftar Pustaka

- Ahmad, R. A. N., Arifin, M. A. R., Nuraini, R. A., Rofiah, N., & Kusumawardhany, S. I. (2024). Pelatihan pembuatan buket snack untuk meningkatkan kreativitas santriwati dalam membuka peluang usaha kerja di Ponpes Sunan Ampel Rejomulyo. *Welfare: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 2(3), 543–548. <https://doi.org/10.30762/welfare.v2i3.1737>
- Anwar, I. R., & Wahdania, Y. (2024). Penetapan kadar metampiron dan asam askorbat dengan menggunakan metode titrasi iodimetri. *Jurnal Farmasi Al-Ghaffiqi*, 1(1), 7-10. <https://jurnal.itkesmusidrap.ac.id/JUFAL/article/view/885>
- Bhat, T. A., Rather, A. H., Hussain, S. Z., Naseer, B., Qadri, T., & Nazir, N. (2021). Efficacy of ascorbic acid, citric acid, ethylenediaminetetraacetic acid, and 4-hexylresorcinol as inhibitors of enzymatic browning in osmo-dehydrated fresh cut kiwis. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(5), 4354–4370. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01017-2>
- Bork, L. V., Baumann, M., Stobernack, T., Rohn, S., & Kanzler, C. (2023). Colorants and antioxidants deriving from methylglyoxal and heterocyclic Maillard reaction intermediates. *Antioxidants*, 12(9), 1788. <https://doi.org/10.3390/antiox12091788>
- Bork, L. V., Stobernack, T., Rohn, S., & Kanzler, C. (2024). Browning reactions of hydroxycinnamic acids and heterocyclic Maillard reaction intermediates – Formation of phenol-containing colorants. *Food Chemistry*, 449, 139189. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139189>
- Cano, M. P., De Ancos, B., Lobo, M. G., & Santos, M. (1997). Improvement of frozen banana (*Musa cavendishii*, cv. Enana) colour by blanching: Relationship between browning, phenols and polyphenol oxidase and peroxidase activities. *Zeitschrift For Lebensmitteluntersuchung Und -Forschung A*, 204(1), 60–65. <https://doi.org/10.1007/s002170050038>

- Chaisakdanugull, C., Theerakulkait, C., & Wrolstad, R. E. (2007). Pineapple juice and its fractions in enzymatic browning inhibition of banana [*Musa* (AAA Group) Gros Michel]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(10), 4252–4257. <https://doi.org/10.1021/jf0705724>
- Delgado-Andrade, C., Seiquer, I., Haro, A., Castellano, R., & Navarro, M. P. (2010). Development of the Maillard reaction in foods cooked by different techniques. Intake of Maillard-derived compounds. *Food Chemistry*, 122(1), 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.031>
- Göncüoğlu Taş, N., & Gökmen, V. (2017). Maillard reaction and caramelization during hazelnut roasting: A multiresponse kinetic study. *Food Chemistry*, 221, 1911–1922. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.159>
- Hamdan, N., Lee, C. H., Wong, S. L., Fauzi, C. E. N. C. A., Zamri, N. M. A., & Lee, T. H. (2022). Prevention of enzymatic browning by natural extracts and genome-editing: A review on recent progress. *Molecules*, 27(3), 1101. <https://doi.org/10.3390/molecules27031101>
- Hidalgo, F. J., & Zamora, R. (2000). The role of lipids in nonenzymatic browning. *Grasas y Aceites*, 51(1–2), 35–49. <https://doi.org/10.3989/gya.2000.v51.i1-2.405>
- Hu, J., Li, X., Yu, Q., Wang, W., & Bi, J. (2023). Understanding the impact of pectin physicochemical variation on browning of simulated Maillard reaction system in thermal and storage processing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124347. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124347>
- Huang, P.-H., Cheng, Y.-T., Lu, W.-C., Chiang, P.-Y., Yeh, J.-L., Wang, C. C., & Li, P.H. (2024). Changes in nutrient content and physicochemical properties of cavendish bananas var. Pei Chiao during ripening. *Horticulturae*, 10(4), 384. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040384>
- Iqbal, A., Murtaza, A., Hu, W., Ahmad, I., Ahmed, A., & Xu, X. (2019). Activation and inactivation mechanisms of polyphenol oxidase during thermal and non-thermal methods of food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 117, 170–182. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.006>
- Kanzler, C., Schestkova, H., Haase, P. T., & Kroh, L. W. (2017). Formation of reactive intermediates, color, and antioxidant activity in the Maillard reaction of maltose in comparison to D-glucose. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(40), 8957–8965. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04105>
- Liu, H., Ma, L., Chen, J., Zhao, F., Huang, X., Dong, X., Zhu, B.W., & Qin, L. (2023). Effect of aliphatic aldehydes on flavor formation in glutathione-ribose Maillard reactions. *Foods*, 12(1), 217. <https://doi.org/10.3390/foods12010217>
- Mastrocola, D., & Munari, M. (2000). Progress of the Maillard reaction and antioxidant action of maillard reaction products in preheated model systems during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3555–3559. <https://doi.org/10.1021/jf000278a>
- Milani, A., Jouki, M., & Rabbani, M. (2020). Production and characterization of freeze-dried banana slices pretreated with ascorbic acid and quince seed mucilage: Physical and functional properties. *Food Science & Nutrition*, 8(7), 3768–3776. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1666>
- Moon, K. M., Kwon, E. B., Lee, B., & Kim, C. Y. (2020). Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. *Molecules*, 25(12). <https://doi.org/10.3390/molecules25122754>
- Murata, M. (2021). Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction. *Glycoconjugate Journal*, 38(3), 283–292. <https://doi.org/10.1007/s10719-020-09943-x>
- Nurrosyidah, S. W., & Machfud, A. (2024). Pengaruh konsentrasi larutan Ca(OH)<sub>2</sub> (kapur terhidrasi) pada karakteristik perendaman keripik kulit pisang dalam berbagai konsentrasi kapur terhidrasi pada periode yang berbeda. *UMSIDA Preprints Server*, 1-11. <https://archive.umsida.ac.id/index.php/archive/preprint/view/4811/34457>

- Pour, A. K., Khorram, S., Ehsani, A., Ostadrahimi, A., & Ghasempour, Z. (2022). Atmospheric cold plasma effect on quality attributes of banana slices: Its potential use in blanching process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102945. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102945>
- Qi, Y., Zhang, H., Wu, G., Zhang, H., Wang, L., Qian, H., & Qi, X. (2018). Reduction of 5-hydroxymethylfurfural formation by flavan-3-ols in Maillard reaction models and fried potato chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(14), 5294–5301. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9068>
- Qin, F., Hu, C., Dou, T., Sheng, O., Yang, Q., Deng, G., & Bi, F. (2023). Genome-wide analysis of the polyphenol oxidase gene family reveals that MaPPO1 and MaPPO6 are the main contributors to fruit browning in *Musa acuminata*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1125375. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1125375>
- R, S., Rasane, P., Singh, J., Kaur, S., Bakshi, M., Gunjal, M., & Mahato, D. K. (2024). Strategic advances in the management of browning in fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 17(2), 325–350. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03128-8>
- Rathod, M., & Rathod, B. (2021). Comparative study of effect of frying temperature and hydrocolloid treatment on color and sensory characteristics of banana chips. *The Pharma Innovation Journal*, 10(2), 144–149. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue2/PartB/10-1-63-941.pdf>
- Santos, J. S. P. D., Leonel, M., Jesus, P. R. R. D., Leonel, S., Fernandes, A. M., & Ouros, L. F. D. (2023). Hydrocolloid coatings as a pre-frying treatment in the production of low-fat banana chips. *Horticulturae*, 9(10), 1139. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101139>
- Sarkar, S., Akhter, S., Roy, J., Wazed, Md. A., Abedin, R., Neogie, S., Mishat, K. B., & Sarker, M. S. H. (2024). Preventing enzymatic browning of freshly cut green bananas through immersion in normal water, lemon juice, and coconut water. *Food Science & Nutrition*, 12(9), 6612–6626. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4284>
- Shi, B., Guo, X., Liu, H., Jiang, K., Liu, L., Yan, N., & Liu, L. (2024). Dissecting Maillard reaction production in fried foods: Formation mechanisms, sensory characteristic attribution, control strategy, and gut homeostasis regulation. *Food Chemistry*, 438, 137994. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137994>
- Shrestha, L., Kulig, B., Moschetti, R., Massantini, R., Pawelzik, E., Hensel, O., & Sturm, B. (2020). Optimisation of physical and chemical treatments to control browning development and enzymatic activity on fresh-cut apple slices. *Foods*, 9(1), 76. <https://doi.org/10.3390/foods9010076>
- Singh, M. K., Kumar, A., Kumar, P. S., Selvaumar, P., & Chourasia, A. (2022). Effects of repeated deep frying on refractive index and peroxide value of selected vegetable oils. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 9(3), 28–31. <https://doi.org/10.31033/ijrasb.9.3.6>
- Song, M. B., Tang, L. P., Zhang, X. L., Bai, M., Pang, X. Q., & Zhang, Z. Q. (2015). Effects of high CO<sub>2</sub> treatment on green-ripening and peel senescence in banana and plantain fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(5), 875–887. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60851-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60851-0)
- Starowicz, M., & Zieliński, H. (2019). How maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? *Food Reviews International*, 35(8), 707–725. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600538>
- Su, J., Geng, Y., Yao, J., Huang, Y., Ji, J., Chen, F., & Ma, L. (2022). Quinone-mediated non-enzymatic browning in model systems during long-term storage. *Food Chemistry: X*, 16, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100512>
- Sui, X., Meng, Z., Dong, T., Fan, X., & Wang, Q. (2023). Enzymatic browning and polyphenol oxidase control strategies. *Current Opinion in Biotechnology*, 81, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.102921>

- Tabtiang, S., Yodru, A., Nimmol, C., Prachayawarakorn, S., & Soponronnarit, S. (2022). Effects of variety and ripening level on chemical composition, microstructure change, and qualities of crisp bananas. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16366>
- Tilley, A., McHenry, M. P., McHenry, J. A., Solah, V., & Bayliss, K. (2023). Enzymatic browning: The role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning. *Current Research in Food Science*, 7, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100623>
- Tinello, F., & Lante, A. (2018). Recent advances in controlling polyphenol oxidase activity of fruit and vegetable products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 50, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.008>
- Ujong, A. E., Emelike, N. J. T., Owuno, F., & Okiyi, P. N. (2023). Effect of frying cycles on the physical, chemical and antioxidant properties of selected plant oils during deep-fat frying of potato chips. *Food Chemistry Advances*, 3, 100338. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100338>
- Wang, C., Meng, L., Zhang, G., Yang, X., Pang, B., Cheng, J., & Sun, F. (2024). Unraveling crop enzymatic browning through integrated omics. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1342639. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1342639>
- Wang, H.-Y., Qian, H., & Yao, W.-R. (2011). Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity. *Food Chemistry*, 128(3), 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.075>
- Wohlt, D., Schwarz, E., Schieber, A., & Bader-Mittermaier, S. (2021). Effects of extraction conditions on banana peel polyphenol oxidase activity and insights into inactivation kinetics using thermal and cold plasma treatment. *Foods*, 10(5), 1022. <https://doi.org/10.3390/foods10051022>
- Yepes-Betancur, D. P., Zapata-Vahos, I. C., Henao-Rojas, J. C., Martínez-Saldarriaga, J., Márquez-Cardozo, C. J., & Cadena-Chamorro, E. M. (2025). Inhibitory effect of fermented avocado seed extract (*Persea americana* Mill. Cv. Hass) on polyphenol oxidase and its application as anti-browning agent in avocado, apple, and banana pulps. *Heliyon*, 11(4), e42588. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42588>
- Yildiz, G., Izli, G., & Aadil, R. M. (2020). Comparison of chemical, physical, and ultrasound treatments on the shelf life of fresh-cut quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14366>
- Zamora, R., & Hidalgo, F. J. (2005). Coordinate contribution of lipid oxidation and Maillard reaction to the nonenzymatic food browning. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(1), 49–59. <https://doi.org/10.1080/10408690590900117>
- Zhao, X., Zhuang, Y., Xie, W., Yang, Y., Pu, J., Fan, Z., & Lai, Z. (2025). Allelic expression dynamics of regulatory factors during embryogenic callus induction in ABB banana (*Musa spp.* Cv. Bengal, ABB Group). *Plants*, 14(5), 761. <https://doi.org/10.3390/plants14050761>