

## STRATEGI MITIGASI PEMBENTUKAN 3-MCPDE DAN GE PADA PEMURNIAN MINYAK SAWIT: STUDI LITERATUR

Oleh

Baiq Pebrianti Hidayati<sup>1</sup>, Murdiah<sup>2</sup>, Baiq Afriza Lia Fitri<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Institut Teknologi Lombok

<sup>1,3</sup>Wijala Institut

E-mail: <sup>1</sup>[baiqpebrianti94@gmail.com](mailto:baiqpebrianti94@gmail.com)

---

### Article History:

Received: 27-06-2025

Revised: 21-07-2025

Accepted: 30-07-2025

### Keywords:

3-MCPDE, Glycidyl Ester, Minyak Sawit, Pemurnian

**Abstract:** 3-monochloropropane-1,2-diol esters (3-MCPDE) dan glycidyl esters (GE) merupakan kontaminan proses yang terbentuk selama pemurnian minyak sawit, khususnya pada tahap deodorisasi bersuhu tinggi. Kedua senyawa ini bersifat toksik dan berpotensi karsinogenik, sehingga menjadi perhatian berbagai lembaga keamanan pangan global. Kajian ini disusun dalam bentuk narrative literature review untuk mengidentifikasi strategi mitigasi yang telah diterapkan di setiap tahap pemurnian, mulai dari pra-pemrosesan, degumming, bleaching, hingga deodorisasi. Hasil kajian menunjukkan bahwa kombinasi antara pencucian air (water washing), penggunaan bleaching earth dengan tingkat keasaman yang terkendali, serta pengaturan suhu dan pemilihan media stripping pada tahap deodorisasi merupakan pendekatan yang paling efektif dalam menurunkan kadar 3-MCPDE dan GE. Penerapan strategi mitigasi dari hulu hingga hilir dinilai penting untuk menghasilkan minyak sawit yang aman, efisien secara teknologi, dan sesuai dengan regulasi internasional.

---

## PENDAHULUAN

3-monochloropropane-1,2-diol esters (3-MCPDE) dan glycidyl esters (GE) merupakan senyawa kontaminan hasil pemrosesan yang terbentuk selama pemurnian. Kedua senyawa ini merupakan bentuk teresterifikasi dari senyawa 3-monochloropropane-1,2-diol (3-MCPD) dan glycidol. International Agency for Research on Cancer (IARC) mengklasifikasikan kedua senyawa ini ke dalam kategori grup 2B, yaitu kemungkinan bersifat karsinogenik bagi manusia, sedangkan glycidol diklasifikasikan dalam Grup 2A, yang berarti senyawa tersebut diduga kuat dapat menyebabkan kanker (1).

Kontaminasi senyawa 3-MCPDE dan GE dalam minyak nabati, terutama minyak sawit, telah menjadi perhatian utama berbagai otoritas keamanan pangan internasional. European Food Safety Authority (EFSA) dan Codex Alimentarius Commission telah menetapkan batas maksimum untuk kedua kontaminan tersebut dalam minyak nabati dan produk turunannya sebagai upaya perlindungan terhadap konsumen. EFSA menetapkan batas asupan harian yang dapat ditoleransi (Tolerable Daily Intake/TDI) sebesar 2 µg/kg berat badan per hari untuk 3-MCPD, sedangkan glycidol dikategorikan sebagai senyawa genotoksik tanpa ambang batas aman (2). Regulasi ini mendorong industri pengolahan minyak, khususnya minyak

sawit, untuk mengembangkan inovasi dalam proses pemurnian yang mampu meminimalkan pembentukan 3-MCPDE dan GE tanpa menurunkan efisiensi proses maupun kualitas akhir produk

Pembentukan 3-MCPD esters (3-MCPDE) terjadi melalui reaksi kimia antara berbagai prekursor yang secara alami terdapat dalam minyak mentah. Prekursor utama dalam pembentukan 3-MCPDE meliputi monoasilgliserol (MAG), diasilgliserol (DAG), dan ion klorida anorganik, yang berinteraksi pada suhu tinggi selama proses pemurnian khususnya tahap deodorisasi (3). Sementara itu, GE terbentuk melalui dehidrasi gliserol atau monoasilgliserol menjadi glisidil, yang kemudian mengalami esterifikasi dengan asam lemak (4,5). Beberapa studi menunjukkan bahwa senyawa GE terbentuk melalui reaksi termal pada suhu di atas 200°C dengan adanya prekursor DAG dan MAG (3,4). Sementara itu, Lakshmanan dan Yung (6) mengonfirmasi adanya korelasi positif antara kadar 3-MCPD esters (3-MCPDE) dengan kandungan klorida dan DAG dalam minyak, yang menunjukkan bahwa keberadaan kedua prekursor tersebut berperan penting dalam pembentukan kontaminan selama proses pemurnian.

Strategi mitigasi pembentukan 3-MCPDE dan GE pada setiap tahap proses pemurnian dilakukan dengan mengurangi kadar prekursor sejak tahap awal. Proses pemurnian minyak sawit secara umum terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu *degumming*, *bleaching*, dan deodorisasi, yang masing-masing memiliki kontribusi terhadap terbentuknya kontaminan proses (7,8). Pendekatan mitigasi yang bersifat komprehensif umumnya mencakup tiga fase utama, yaitu pra-pemrosesan, pengendalian selama proses pemurnian, dan pasca-pemrosesan (9). Pada tahap pra-pemrosesan, langkah yang paling banyak diterapkan adalah pencucian minyak sawit mentah (CPO) dengan air, yang bertujuan untuk mengurangi ion klorida bebas sebagai prekursor utama pembentukan 3-MCPDE (9). Selain itu, proses *degumming* dan *bleaching* juga berperan dalam menghilangkan senyawa polar, logam, dan zat pengotor lain yang dapat memicu pembentukan kontaminan (10). Oleh karena itu, penting untuk mengkaji secara menyeluruh strategi-strategi mitigasi yang telah dikembangkan untuk menurunkan kadar 3-MCPDE dan GE selama proses pemurnian minyak sawit, dengan fokus pada tahapan-tahapan kritis dalam proses tersebut.

## LANDASAN TEORI

*3-monochloropropane-1,2-diol esters* (3-MCPDE) dan *glycidyl esters* (GE) merupakan senyawa kontaminan hasil pemrosesan yang terbentuk selama pemurnian minyak nabati, khususnya pada tahap deodorisasi yang dilakukan pada suhu tinggi. Kedua senyawa ini merupakan bentuk teresterifikasi dari senyawa *3-monochloropropane-1,2-diol* (3-MCPD) dan *glycidol*, yang secara toksikologis telah terbukti menimbulkan dampak kesehatan yang signifikan (3). 3-MCPD diketahui memiliki potensi nefrotoksik dan menunjukkan efek karsinogenik pada hewan percobaan, sedangkan *glycidol* bersifat genotoksik dan telah diklasifikasikan sebagai senyawa karsinogenik oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC) (1). Sebagai respons terhadap potensi toksikologisnya, *European Food Safety Authority* (EFSA) dan *Codex Alimentarius* telah menetapkan batas maksimum residu 3-MCPDE dan GE dalam minyak dan produk turunannya.

3-MCPD masuk dalam kelompok kloropropanol yang terdapat dalam beberapa bentuk yaitu bentuk bebas dan ester asam lemak bebas atau keduanya (11). Ester dari

*monochloropropane diols* (MCPD) terdiri dari 3-MCPD ester (3-MCPDE) dan 2-MCPDE ester (2-MCPDE) dan glisidil ester (GE) (12). *International Agency for Research on Cancer* (IARC 2018) mengklasifikasikan 3-MCPD ke dalam dalam kelompok karsinogen 2B (dicurigai berpotensi karsinogenik untuk manusia), sedangkan glisidol termasuk ke dalam kelompok karsinogen 2A (kemungkinan besar karsinogenik untuk manusia) (1). Codex Alimentarius menyatakan bahwa batas maksimal *Tolerable Daily Intake* (TDI) kandungan 3-MCPDE pada bahan pangan sebesar 2 µg 3-MCPDE/kg berat badan per hari (13).

Pembentukan 3-MCPDE dalam minyak sawit terjadi terutama selama tahap deodorisasi dalam proses pemurnian, yaitu pada suhu tinggi di atas 200 °C (3). Senyawa ini terbentuk melalui mekanisme kimia yang melibatkan dua prekursor utama yaitu *diacylglycerol* (DAG) dan ion klorida (Cl<sup>-</sup>) (5). DAG dan *monoacylglycerol* (MAG) merupakan hasil dari hidrolisis *triacylglycerol* (TAG), suatu proses yang terjadi secara alami karena adanya aktivitas enzim lipase pada kelapa sawit. DAG memiliki gugus hidroksil bebas yang sangat reaktif, sehingga menjadi substrat utama dalam pembentukan 3-MCPDE (14). Sementara itu, ion klorida berasal dari berbagai sumber seperti air proses, pupuk, kontaminasi tanah, maupun residu dari bahan baku (15). DAG dan Cl<sup>-</sup> berinteraksi pada suhu tinggi melalui pembentukan intermediat siklik *acyloxonium ion* (15). Struktur ini terbentuk dari gugus hidroksil DAG yang mengalami protonasi dan siklisasi, lalu diserang oleh ion klorida melalui mekanisme substitusi nukleofilik, menghasilkan senyawa 3-MCPD yang selanjutnya membentuk ester dengan asam lemak menjadi 3-MCPDE. Reaksi ini lebih mudah terjadi dalam kondisi asam (pH rendah) dan dipercepat oleh waktu tinggal minyak yang lama pada suhu tinggi. Kadar DAG dan klorida yang tinggi terbukti meningkatkan laju pembentukan 3-MCPDE, sebagaimana dijelaskan dalam berbagai studi (8,15).

*Glycidyl esters* (GE) merupakan senyawa hasil pemurnian minyak nabati yang secara struktur terbentuk dari asilgliserol yang memiliki gugus epoksida reaktif (12). Faktor utama yang memengaruhi pembentukan GE adalah kandungan diasilgliserol (DAG) dalam minyak serta kondisi proses deodorisasi, khususnya suhu dan lamanya pemanasan (16). Pada suhu tinggi, DAG dapat mengalami penataan ulang intramolekular yang diikuti oleh eliminasi asam lemak, memicu terbentuknya GE. Proses eliminasi ini diawali oleh pelepasan proton dari gugus hidroksil DAG melalui interaksi dengan gugus karboksil terdekat. Reaksi tersebut menghasilkan senyawa antara berupa asiloksonium, yang kemudian mengalami migrasi muatan dan melepaskan asam lemak. Selanjutnya, pembentukan cincin oksiran terjadi melalui reaksi nukleofilik antara gugus alkoksida yang terbentuk. Secara teori, jalur reaksi ini dimungkinkan baik pada struktur 1,2-DAG maupun 1,3-DAG (4).

## METODE PENELITIAN

Artikel ini disusun dalam bentuk *narrative literature review* yang bertujuan untuk merangkum, membandingkan, dan menganalisis berbagai strategi mitigasi pembentukan senyawa 3-MCPDE dan GE dalam proses pemurnian minyak sawit berdasarkan hasil penelitian dari literatur ilmiah yang relevan. Kajian ini disusun dalam bentuk tinjauan literatur *non-sistematis* yang bertujuan untuk merangkum dan menganalisis berbagai temuan ilmiah yang relevan dengan topik yang dikaji. Pendekatan ini dipilih guna memberikan pemahaman yang menyeluruh mengenai mekanisme terbentuknya kontaminan, sekaligus mengeksplorasi perkembangan konsep, tren penelitian, serta strategi

mitigasi yang telah dilaporkan dalam berbagai sumber literatur. Pencarian sumber dilakukan menggunakan beberapa database ilmiah terkemuka, seperti *ScienceDirect*, *Scopus*, *PubMed*, dan *Google Scholar*. Proses pencarian difokuskan pada publikasi ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2012 hingga 2025, dalam bahasa Inggris dan Indonesia, dengan fokus utama pada strategi mitigasi 3-MCPDE dan GE dalam industri pengolahan minyak nabati, khususnya minyak sawit. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian antara lain: “3-MCPD esters”, “glycidyl esters”, “mitigation strategies”, “palm oil refining”, “bleaching”, “degumming”, “deodorization” dan istilah terkait lainnya. Artikel yang sesuai kemudian disimpan dengan bantuan aplikasi referensi Mendeley.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Mitigasi Pemurnian Minyak Sawit

#### 1. *Water Washing of Crude Palm Oil (CPO)*

Pencucian minyak sawit merupakan salah satu strategi dalam upaya mitigasi pembentukan kontaminan *3-monochloropropane-1,2-diol esters* (3-MCPDE) dan *glycidyl esters* (GE). Tujuan utama pencucian adalah untuk menghilangkan prekursor ion klorida anorganik, yang berperan dalam pembentukan 3-MCPDE. Beberapa studi menunjukkan bahwa proses pencucian juga dapat membantu mengurangi kadar diasilgliserol (DAG), prekursor utama GE. Berbagai jenis larutan pencuci telah digunakan, termasuk air panas (90–95°C) (17), air yang telah dimurnikan (reverse osmosis)(6), serta kombinasi dengan pelarut polar seperti etanol (18)Efektivitas metode ini bervariasi tergantung pada kondisi proses dan karakteristik minyak yang digunakan.

Ramli (17) melaporkan bahwa pencucian CPO dengan air panas dapat menghilangkan lebih dari 85% kandungan klorida total, menurunkan kadar 3-MCPDE secara signifikan tanpa memengaruhi parameter mutu seperti FFA dan DOBI. Lakshmanan dan Yung (6) menemukan bahwa penggunaan *reverse osmosis water* dan air asam rendah menurunkan kadar 3-MCPDE sebesar 67–71%, dengan adanya korelasi linier antara kadar klorida dan pembentukan 3-MCPDE. Santiago (9) membandingkan pencucian CPO dari tiga sistem budidaya (organik, konvensional, dan RSPO) dan melaporkan penurunan kadar 3-MCPDE sebesar 34–41%, serta penurunan 2-MCPDE hingga 55%. Walaupun pengurangan GE tidak signifikan dalam beberapa studi, Silva (18) menunjukkan bahwa pencucian *bleached palm oil* (BPO) menggunakan kombinasi air dan etanol mampu menurunkan kadar GE hingga 76,9%, kemungkinan karena pelarutan prekursor lipofilik seperti DAG.

#### 2. *Bleaching dan Degumming*

Proses pemurnian minyak sawit tahap *degumming* memiliki peran penting untuk menghilangkan fosfolipid, protein, karbohidrat, air, dan resin yang dapat menyebabkan warna gelap pada *crude palm oil* (CPO). Metode *degumming* yang digunakan meliputi *acid degumming*, *water degumming*, dan *enzymatic degumming*. Dari beberapa metode tersebut, *water degumming* dan *acid degumming* adalah metode yang paling umum digunakan dalam industri minyak (7). *Water degumming* melibatkan penggunaan air sebagai agen pengemulsi untuk menghilangkan fosfatida pada minyak. Sedangkan *acid degumming* melibatkan penambahan asam seperti asam fosfat atau asam sitrat pada minyak.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Hew (10) kombinasi antara *acid* dan *water degumming* terbukti efektif dalam menurunkan kandungan ion klorida dan senyawa polar

lainnya yang berperan sebagai prekursor utama pembentukan kontaminan 3-MCPDE dan GE. Penggunaan 1% air deionisasi dalam proses *water degumming* menghasilkan penurunan kadar 3-MCPDE hingga 23% dan GE hingga 13%, dibandingkan dengan metode konvensional. Studi menekankan pentingnya penghilangan prekursor seperti DAG (diacylglycerol), FFA, dan klorida di awal proses, dengan menerapkan berbagai metode degumming seperti *dry degumming* dan *enzymatic degumming*. Penggunaan enzim fosfolipase terbukti efektif dalam memecah fosfolipid *non-hidratable*, sementara penggunaan asam fosfat pada *acid degumming* mampu mengendapkan fosfatida dan senyawa logam berat yang berperan sebagai prekursor kontaminan.

Tahap *bleaching* pada pemurnian minyak sawit memanfaatkan *Bleaching Earth* (BE) sebagai adsorben untuk menghilangkan produk oksidasi lipid, logam, dan pigmen seperti karoten (19). Melalui proses *bleaching*, minyak yang dihasilkan akan menjadi lebih terang dan cerah. Efektivitas proses adsorpsi dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti jenis adsorben yang digunakan, suhu, pH, efisiensi kontak antara adsorben dan adsorbat, serta sifat kimia dan ukuran molekul adsorbat. Dalam beberapa praktik industri, BE diaktivasi menggunakan asam klorida atau asam sulfat untuk memperluas permukaan aktif adsorben, mencegah fiksasi warna, dan dalam beberapa kasus, berfungsi sebagai katalis (20). Namun penggunaan asam klorida berpotensi meninggalkan residu klorida yang dapat berperan sebagai prekursor eksternal dalam pembentukan kontaminan proses seperti 3-MCPDE (4). Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hew (10). Menurut Hew, efektivitas BE dalam menurunkan kontaminan 3-MCPDE dan GE tidak hanya bergantung pada porositas atau luas permukaan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh tingkat keasaman permukaan (pH) dari BE itu sendiri. BE dengan pH sangat rendah ( $\approx 3$ ) dapat meningkatkan pembentukan ester kontaminan, sementara BE dengan keasaman rendah (sekitar pH 5) terbukti paling efektif dalam menurunkan kadar 3-MCPDE dan GE. Di sisi lain, BE dengan pH mendekati netral tidak menunjukkan penurunan signifikan terhadap kontaminan tersebut, menandakan bahwa karakteristik sedikit asam tetap dibutuhkan untuk mendukung proses adsorpsi secara optimal. Selain itu, penelitian tersebut juga menekankan bahwa setiap jenis BE memiliki dosis optimum, dan penambahan dosis secara berlebihan tidak serta-merta meningkatkan efektivitas, bahkan dapat menurunkan efisiensi proses.

### 3. Deodorisasi

Tahap deodorisasi merupakan bagian penting dalam proses pemurnian minyak sawit, namun juga menjadi titik kritis dalam pembentukan kontaminan 3-MCPDE dan GE. Kedua kontaminan ini terbentuk sebagai hasil reaksi termal antara prekursor mono- dan diasilgliserol, serta ion klorida pada suhu tinggi. GE sangat sensitif terhadap suhu tinggi, di mana pembentukannya meningkat secara signifikan pada suhu di atas 230 °C dan mencapai puncaknya di sekitar 250 °C (21). Oleh karena itu, strategi mitigasi yang berfokus pada modifikasi parameter deodorisasi menjadi sangat penting untuk menekan kadar kontaminan ini dalam minyak sawit.

Beberapa pendekatan telah dikaji untuk mengurangi kadar 3-MCPDE dan GE selama tahap deodorisasi. Salah satu strategi yang terbukti efektif adalah penurunan suhu deodorisasi menjadi sekitar 200 °C dengan waktu proses lebih lama, misalnya 120 menit. Kondisi ini mampu menekan pembentukan GE secara signifikan tanpa meningkatkan kadar 3-MCPDE (21). Selain itu, pendekatan deodorisasi dua tahap (*dual deodorization*) dengan

tahap pertama pada suhu rendah dan durasi panjang, diikuti tahap kedua singkat pada suhu tinggi terbukti mampu menurunkan kadar GE secara signifikan tanpa membentuk kembali 3-MCPDE dalam jumlah besar. Alternatif lain yang dikaji adalah *short-path distillation*, yang memungkinkan pemurnian pada suhu lebih rendah dengan tekanan tinggi, sehingga kadar GE dapat ditekan hingga mendekati batas deteksi ( $\sim 0,7$  mg/kg) tanpa terdeteksinya 3-MCPDE (8).

Selain itu, strategi mengganti medium *stripping* tradisional berupa uap air dengan gas inert seperti nitrogen atau asam volatil seperti asam format juga telah dikaji. Pendekatan ini terbukti efektif dalam menurunkan kadar GE hingga 35% tanpa meningkatkan pembentukan 3-MCPDE. Ulasan terbaru oleh Ong (8) menguatkan bahwa efektivitas strategi deodorisasi sangat bergantung pada integrasinya dengan langkah-langkah *pra-refining* lainnya, seperti pencucian minyak sawit mentah (CPO) dan penggunaan tanah pemucat non-klorida, serta pengendalian prekursor sebelum masuk tahap suhu tinggi. Keberhasilan mitigasi juga tidak hanya dipengaruhi oleh suhu dan waktu proses, tetapi juga oleh pemilihan media *stripping* yang tepat serta stabilitas operasional pada skala industri.

Secara keseluruhan, modifikasi proses deodorisasi terbukti menjadi strategi praktis dalam menurunkan kadar 3-MCPDE dan GE, khususnya jika dikombinasikan dengan pendekatan mitigasi di tahap sebelumnya seperti *degumming* dan *bleaching*. Optimalisasi suhu, waktu, tekanan, serta jenis medium *stripping* dalam tahap deodorisasi perlu diatur dengan cermat agar dapat menjaga kualitas minyak, efisiensi energi, dan aspek keamanan pangan secara menyeluruh.

## KESIMPULAN

Pembentukan 3-MCPDE dan GE pada pemurnian minyak sawit sangat dipengaruhi oleh beberapa prekursor yaitu DAG, MAG, dan ion klorida, serta oleh parameter termal selama pemurnian. Proses pencucian CPO, *degumming* dan *bleaching* berkontribusi penting dalam menghilangkan senyawa prekursor, terutama jika dilakukan dengan metode yang tepat seperti *acid-water degumming* dan pemilihan *bleaching earth* dengan pH terkendali. Sementara itu, tahap deodorisasi merupakan titik kritis pembentukan kontaminan dan memerlukan pengaturan suhu, waktu, tekanan, dan jenis *medium stripping* untuk mengurangi risiko pembentukan senyawa berbahaya ini. Penerapan strategi mitigasi yang menyeluruh dari tahap awal hingga akhir pemurnian menjadi kunci utama dalam mengurangi kadar kontaminan 3-MCPDE dan GE, sekaligus menjaga kualitas dan keamanan minyak sawit sesuai standar global. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan terpadu yang mempertimbangkan kondisi teknis, sifat bahan baku, serta keberlanjutan proses industri secara keseluruhan.

## PENGAKUAN/ACKNOWLEDGEMENTS

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Institut Teknologi Lombok dan Wijala Institut atas dukungan fasilitas, arahan, serta kontribusi keilmuan yang diberikan dalam proses penyusunan artikel ini. Kajian ini tidak akan tersusun dengan baik tanpa bantuan dan masukan dari berbagai pihak yang telah berperan selama proses penulisan berlangsung.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] IARC. 3-monochloro-1,2-propnediol IARC Monograph-101. 2018.
- [2] EFSA. Update of the risk assessment on 3-monochloropropane diol and its fatty acid esters. EFSA. 2018;16(November 2017):1–48.
- [3] Freudenstein A, Weking J, Matthäus B. Influence of precursors on the formation of 3-MCPD and glycidyl esters in a model oil under simulated deodorization conditions. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2013 Mar;115(3):286–94.
- [4] Destailats F, Craft B, Dubois M. Glycidyl esters in refined palm (*Elaeis guineensis*) oil and related fractions. Part I: Formation mechanism. *Food Chem*
- [5] Matthäus B, Pudiel F. Mitigation of 3-MCPD and glycidyl esters within the production chain of vegetable oils especially palm oil. *Lipid Technol*. 2013 Jul;25(7):151–5.
- [6] Lakshmanan S, Yung YL. Chloride reduction by water washing of crude palm oil to assist in 3-monochloropropane-1, 2 diol ester (3-MCPDE) mitigation. *Food Additives and Contaminants - Part A*. 2021;38(3):371–87.
- [7] Chew SC, Nyam KL. Refining of edible oils. In: *Lipids and Edible Oils: Properties, Processing and Applications*. Elsevier; 2020. p. 213–41.
- [8] Ong YH, Song CP, Choo WS, Lee YY, Qua KS, Quek WP, et al. Fatty acid esters of 3-monochloropropane-1,2-diol and glycidol in palm oil: A review on current industrial-scale mitigation strategies, challenges and perspectives. Vol. 202, *Food Research International*. Elsevier Ltd; 2025.
- [9] Santiago JK, Silva WC, Capristo MF, Ferreira MC, Ferrari RA, Vicente E, et al. Organic, conventional and sustainable palm oil (RSPO): Formation of 2- and 3-MCPD esters and glycidyl esters and influence of aqueous washing on their reduction. *Food Research International*. 2021 Feb 1;140:1–7.
- [10] Hew KS, Asis AJ, Tan TB, Yusoff MM, Lai OM, Nehdi IA, et al. Revising degumming and bleaching processes of palm oil refining for the mitigation of 3-monochloropropane-1,2-diol esters (3-MCPDE) and glycidyl esters (GE) contents in refined palm oil. *Food Chem*. 2020 Mar 1;307.
- [11] Svejkovska B, Novotny O, Divinova V, Reblova Z, Dolezal M, Velisek J. Esters of 3-Chloropropane-1,2-Diol in Foodstuffs. *Czech Journal Food Science*. 2004;22(5):190–6.
- [12] Ariseto AP, Marcolino PFC, Vicente E. Determination of 3-monochloropropane-1,2-diol fatty acid esters in Brazilian vegetable oils and fats by an in-house validated method. *Food Additives and Contaminants - Part A*. 2014;31(8):1385–92.
- [13] Hariyadi P. Understanding the Codex Standard to Ensure Safety and Quality of Palm Oil. *International Journal of Oil Palm*. 2021 Jun 25;4(1):1–7.
- [14] Elisabeth J. Mitigation of 3-MCPDE and GE in palm oil in Indonesia. *E-Journal Menara Perkebunan*. 2023 Oct 31;91(2).
- [15] Yung YL, Lakshmanan S, Kumaresan S, Chu CM, Tham HJ. Mitigation of 3-monochloropropane 1,2 diol ester and glycidyl ester in refined oil – A review. Vol. 429, *Food Chemistry*. Elsevier Ltd; 2023.
- [16] Chew SC, Tan CP, Lai OM, Nyam KL. Changes in 3-MCPD esters, glycidyl esters, bioactive compounds and oxidation indexes during kenaf seed oil refining. *Food Sci Biotechnol*. 2018 Jun 1;27(3):905–14.
- [17] Ramli MR, Tarmizi AHA, Hammid ANA, Razak RAA, Kuntom A, Lin SW, et al. Preliminary

- large scale mitigation of 3-monochloropropane-1, 2-diol (3-mcpd) esters and glycidyl esters in palm oil. *J Oleo Sci.* 2020;69(8):815–24.
- [18] Silva WC, Santiago JK, Capristo MF, Ferrari RA, Vicente E, Sampaio KA, et al. Washing bleached palm oil to reduce monochloropropanediols and glycidyl esters. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess.* 2019 Feb 1;36(2):244–53.
- [19] Oey SB, Fels-Klerx HJ van der, Fogliano V, Leeuwen SPJ van. Mitigation Strategies for the Reduction of 2- and 3-MCPD Esters and Glycidyl Esters in the Vegetable Oil Processing Industry. *Compr Rev Food Sci Food Saf*
- [20] Ramli MR, Siew WL, Ibrahim NA, Hussein R, Kuntom A, Razak RAA, et al. Effects of degumming and bleaching on 3-MCPD esters formation during physical refining. *J Am Oil Chem Soc.* 2011 Nov;88(11):1839–44.
- [21] Oey SB, van der Fels-Klerx HJ, Fogliano V, van Leeuwen SPJ. Effective physical refining for the mitigation of processing contaminants in palm oil at pilot scale. *Food Research International.* 2020 Dec 1;138.