

PEMISAHAN ASAM-ASAM LEMAK JENUH DAN TAK JENUH (SEPARATION OF SATURATED AND UNSATURATED FATTY ACIDS)

Azzah Sri Rahmah¹⁾, I Dewa Gede Arsa Putrawan^{1*)}, I Dewa Ayu Candradewi¹⁾, Nuke Lydia Agustias¹⁾,
Wemvy Nugraha¹⁾, Husaen Salahu²⁾

¹⁾Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung

²⁾Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Maluku Utara, Ternate

*Email: idedewa@itb.ac.id

Abstrak: Asam lemak merupakan bahan baku penting untuk berbagai produk, seperti bahan bakar, perasa, pewangi, plastiser, stabiliser termal, sabun, kosmetik, pengemulsi, pelumas, pelapis, dan resin. Asam lemak diperoleh melalui hidrolisis minyak nabati dan lemak hewani, menghasilkan campuran asam lemak jenuh dan tak jenuh. Untuk memperoleh asam lemak dengan tingkat kejenuhan yang diinginkan, campuran asam lemak perlu dipisahkan. Berbagai metode pemisahan asam lemak jenuh dari asam lemak tak jenuh telah tersedia. Metode-metode tersebut meliputi kristalisasi biasa, distilasi, kristalisasi pelarut, kompleksasi urea, hidrofilisasi, ekstraksi superkritik, dan pemisahan membran. Meskipun masing-masing metode memiliki keterbatasan, kristalisasi biasa dan distilasi tetap banyak digunakan dalam skala komersial. Hidrofilisasi dan kristalisasi pelarut juga telah menemukan aplikasi komersial. Sementara itu, metode lain seperti kompleksasi urea, ekstraksi superkritik, dan pemisahan membran masih dalam tahap penelitian dan pengembangan. Tantangan seperti volume air limbah dalam jumlah besar, biaya investasi yang tinggi, atau keterbatasan data perancangan saat ini masih menghambat aplikasi komersial skala besar.

Kata Kunci: Asam lemak jenuh, Asam lemak tak jenuh, Pemisahan

Abstract: Fatty acids serve as essential raw materials for various products, including fuel, flavorings, fragrances, plasticizers, thermal stabilizers, soaps, cosmetics, emulsifiers, lubricants, coatings, and resins. They are obtained through the hydrolysis of vegetable oils and animal fats, producing a mixture of saturated and unsaturated fatty acids. To obtain fatty acids with the desired level of saturation, fatty acid mixtures need to be separated. Various methods for separating saturated fatty acids from unsaturated fatty acids are available. These include conventional crystallization, distillation, solvent crystallization, urea complexation, hydrophilization, supercritical extraction, and membrane separation. Although each method has its limitations, conventional crystallization and distillation remain widely used on a commercial scale. Hydrophilization and solvent crystallization have also found commercial applications. Meanwhile, methods such as urea complexation, supercritical extraction, and membrane separation are still under research and development. Challenges such as wastewater generation, high investment costs, or limited design data currently hinder their large-scale commercial application.

Keywords: Saturated fatty acid, Separation, Unsaturated fatty acid

I. Pendahuluan

Asam lemak adalah senyawa-senyawa yang tersusun oleh unsur-unsur karbon, hidrogen, dan oksigen dengan rumus RCOOH dimana R adalah alkil (Smolińska dkk., 2024). Asam lemak merupakan bagian dari kelompok senyawa asam karboksilat

dengan jumlah karbon umumnya genap, sebanyak 6 atau lebih (Lund & Rustan, 2020). Tergantung pada jumlah ikatan rangkap pada rantai karbonnya, asam lemak dapat dikelompokkan menjadi asam lemak jenuh, asam lemak tak jenuh tunggal, dan asam lemak tak jenuh ganda (Clavijo-Bernal dkk., 2023).

Asam lemak jenuh tidak memiliki ikatan rangkap, sebagai contoh: asam kaproat, asam kaprilat, asam kaprat, asam laurat, asam palmitat, dan asam stearat. Asam lemak jenuh tunggal mengandung satu ikatan rangkap, sebagai contoh: asam oleat. Asam lemak tak jenuh ganda atau kadang disebut asam lemak tak jenuh banyak mengandung lebih dari satu ikatan rangkap, sebagai contoh: asam linoleat, asam linolenat, asam eikosapentaenoat, dan asam dokosaheksaenoat. Berdasarkan panjang rantai karbonnya, asam lemak terbagi menjadi asam lemak rantai pendek (6 hingga 10 karbon), asam lemak rantai sedang (12 hingga 22 karbon), dan asam lemak rantai panjang (lebih dari 22 karbon) (Szabó dkk., 2023). Sebagian besar asam-asam lemak yang dimanfaatkan di industri adalah dari kelompok asam lemak rantai sedang (Anneken dkk., 2006).

Asam lemak memiliki berbagai aplikasi. Lilin dari asam lemak jenuh merupakan penggunaan tertua asam lemak (Anneken dkk., 2006). Beberapa kelompok intermediat yang diturunkan dari asam lemak dan memiliki beragam aplikasi meliputi alkohol lemak, amida lemak, dan ester asam lemak (Anneken dkk., 2006). Kelompok senyawa ini menemukan aplikasi dalam industri bahan bakar, pelumas, pengemulsi/surfaktan, karet, pelapis, resin, dan aditif. Asam lemak juga digunakan untuk industri sabun, detergen, dan kosmetik. Aplikasi asam lemak di industri terus berkembang, terlebih penggunaan produk-produk berbasis bahan terbarukan cenderung meningkat belakangan ini. Riset pemanfaatan asam lemak juga berlanjut terus, antara lain pemanfaatan asam lemak sebagai suplemen ternak (Bionaz dkk., 2020; Handojo dkk., 2019), aditif polivinil klorida (Putrawan dkk., 2022; Putrawan & Azharuddin, 2024), bahan baku asam azelaik (Handayani dkk., 2022), bioaditif (Burhan dkk., 2020) dan agen flotasi (Guo dkk., 2021).

Sumber-sumber asam lemak meliputi minyak nabati dan lemak hewani (Cerone & Smith, 2021). Asam lemak dalam kedua sumber tersebut umumnya berada dalam bentuk trigliserida yang dikenal sebagai minyak netral. Asam lemak dalam bentuk asam karboksilat yang tidak terikat sebagai trigliserida dikenal sebagai asam lemak bebas. Di alam, asam lemak bebas terbentuk karena aktivitas enzim lipase yang menghidrolisis minyak netral

(Nizam dkk., 2020; Prihatiningtyas dkk., 2024). Komposisi asam lemak sangat beragam dari satu sumber ke sumber lainnya. Walaupun jumlah asam lemak banyak, hanya beberapa asam lemak yang dominan. Tabel 1 menyajikan komposisi berbagai minyak nabati maupun lemak hewani berdasarkan asam lemak dominannya.

Tabel 1. Komposisi asam lemak (Shahidi, 2005).

Minyak/Lemak	Asam (%)						
	Lau	Mir	Pal	Ste	Ole	Lea	Len
Sawit			44		40	10	
Inti sawit	49	16	9		15	2	
Kelapa	48	18	9		6	2	
Jagung			13		31	52	1
Kedelai			11		22	53	8
Sapi		6	26	31	31	2	
Ayam			23	6	42	19	1

Catatan: Mir=miristat, Lau=laurat, Pal=palmitat, Ste=stearat, Ole=oleat, Lea=linolenat, Len=linolenat.

Untuk keperluan industri, asam lemak diproduksi melalui hidrolisis minyak/lemak (Anneken dkk., 2006). Hidrolisis dapat dilakukan tanpa maupun dengan katalis. Tanpa katalis, hidrolisis menghendaki tekanan dan temperatur tinggi. Hidrolisis minyak maupun lemak menghasilkan campuran asam lemak, baik jenuh maupun tak jenuh. Beberapa aplikasi asam lemak memerlukan derajat ketidak-jenuhan yang berbeda. Sebagai bahan flotasi, asam lemak tak jenuh lebih dikehendaki karena memberikan efek flotasi yang baik sedangkan asam lemak jenuh memiliki efek flotasi yang buruk (Guo dkk., 2017, 2021). Epoksidasi juga menghendaki asam lemak tak jenuh (Cogliano dkk., 2025; Lewandowski dkk., 2020; Putrawan dkk., 2023). Stabiliser termal polivinil klorida berbasis timah organik lebih menyukai asam lemak tak jenuh (Putrawan & Azharuddin, 2024) sementara yang berbasis campuran logam cenderung lebih bagus menggunakan asam lemak jenuh (Putrawan dkk., 2022). Di sisi lain, bahan baku biodiesel membatasi kadar fraksi tak jenuh untuk menghindari oksidasi selama penyimpanan (Wang dkk., 2021). Untuk memenuhi kebutuhan industri tertentu, asam lemak perlu dipisahkan berdasarkan tingkat kejenuhannya. Ada berbagai metode

pemisahan fraksi jenuh dan fraksi tak jenuh campuran asam lemak. Berbagai metode telah ditinjau oleh (Muckerheide, 1954) dan (Thomas dkk., 2015). Akan tetapi, kedua publikasi tersebut sudah lama, sementara metode pemisahan terus berkembang pesat. Penelitian ini mengulas berbagai metode pemisahan asam lemak menjadi fraksi jenuh dan fraksi tak jenuh dengan melibatkan metode-metode terkini yang belum dibahas dalam tinjauan sebelumnya.

II. Metodologi

Kajian pemisahan asam lemak jenuh dan tak jenuh yang disajikan dalam makalah ini dilakukan melalui analisis komprehensif terhadap literatur yang ada. Publikasi yang ditinjau mulai dari studi paling awal tentang metode pemisahan hingga tahun berjalan. Sumber dipilih berdasarkan relevansinya dengan pokok bahasan, ketelitian ilmiah, dan kontribusi terhadap bidang tersebut. Berbagai basis data, antara lain *Science Direct*, *Elsevier*, *American Chemical Society (ACS)*, *CAS SciFinder*, *Royal Society of Chemistry (RSC)*, *Springerlink*, *Scopus*, *PubMed*, dan *Google Scholar* digunakan untuk menemukan artikel yang ditinjau, termasuk prosiding konferensi dan paten yang relevan. Penekanan diberikan pada karya yang memberikan wawasan tentang perkembangan teoritis, metodologi eksperimental, dan aplikasi praktis. Informasi yang dikumpulkan dianalisis secara kritis.

III. Teknik Pemisahan

A. Kristalisasi biasa

Kristalisasi biasa dilakukan melalui pendinginan diikuti pemisahan kristal yang dikenal sebagai metode pengempaan dingin (*cold press*) dan merupakan metode tertua pemisahan asam lemak namun masih dipraktikkan hingga kini. Metode ini memanfaatkan perbedaan titik leleh antara asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh. Tabel 2 membandingkan titik leleh beberapa asam lemak jenuh dan tak jenuh dengan panjang rantai yang sama. Tabel tersebut memperlihatkan dengan jelas bahwa pada panjang rantai karbon yang sama, titik leleh asam lemak jenuh lebih tinggi dibandingkan dengan asam lemak tak jenuh. Dengan kata lain, jika campuran asam lemak jenuh dan tak jenuh didinginkan, fraksi jenuh cenderung mengkristal

terlebih dahulu.

Tabel 2. Titik leleh asam lemak (Sathivel dkk., 2008).

Asam	Titik leleh (°C)
Palmitat (C _{16,0})	59,8
Stearat (C _{18,0})	67,6
Palmitoleat (C _{16,1})	-0,9
Oleat (C _{18,1})	-5,7
Linoleat (C _{18,2})	-13,0
Linolenat (C _{18,3})	-21,0

Proses pemisahan dengan kristalisasi biasa melibatkan dua operasi utama, pendinginan untuk memfasilitasi kristalisasi dan penyaringan untuk memisahkan kristal dari cairan. Kristalisasi dapat dilakukan secara partaian (*batch*) maupun kontinyu. Operasi partaian memerlukan waktu tinggal lebih lama dibandingkan dengan operasi kontinyu. Dalam operasi kontinyu, kristalisasi dilakukan dalam sebuah alat pemindah panas berpengeruk (*scrapped heat exchanger*). Alat ini berupa pemindah panas pipa ganda dimana poros yang dilengkapi baling-baling ditempatkan di dalam pipa bagian dalam. Baling-baling poros mengaduk kristal yang terbentuk agar dapat keluar dengan lancar, tidak tertinggal di dalam alat yang dapat membuntu aliran. Penyaringan dapat dilakukan dengan penyaring tekan (*filter press*) atau penyaring sentrifugal (*centrifuge*).

Keunggulan dari kristalisasi biasa adalah kondisi operasi yang tidak ekstrem dan tidak melibatkan bahan tambahan. Kekurangan dari metode ini adalah pemisahan kristal dan cairan yang tidak efisien. Sebagian cairan terjebak dalam kristal dan sulit keluar karena fase cair dari asam lemak umumnya kental. Efisiensi pemisahan kristal bergantung pada rasio fraksi jenuh terhadap fraksi tak jenuh. Menimbang efisiensi pemisahan pada saat penyaringan, metode ini baik diterapkan jika jumlah fraksi jenuh dan fraksi tak jenuh dalam keadaan berimbang.

Pemisahan fraksi jenuh dan tak jenuh melalui metode ini awalnya dilakukan secara empiris karena keterbatasan pemahaman akan kelakuan kristalisasi asam lemak. Belakangan, informasi kristalisasi semakin terbuka sehingga perancangan proses

menjadi lebih mudah. Pengaruh berbagai kondisi operasi terhadap hasil kristalisasi asam lemak dalam bentuk lemak (trigliserida) telah dikaji oleh da Silva dan Martini (2024). Peneliti ini menemukan bahwa beberapa parameter yang mempengaruhi hasil kristalisasi adalah laju pendinginan, pengadukan, temperatur dan keberadaan komponen minor. Tambahan pula, pendinginan yang cepat, 5–15°C/menit menghasilkan kristal halus dan keras sedangkan laju pendinginan lambat, 0,1°C/menit, menghasilkan kristal lebih besar dan lunak.

Pengaruh keberadaan komposisi khususnya komponen minor dalam kristalisasi lemak telah didiskusikan oleh Yang dkk. (2024) dan Talbot dkk. (2012). Keberadaan komponen minor seperti fosfolipida sangat berpengaruh untuk kristalisasi dalam skala nano. Berdasarkan data biner trigliserida tak jenuh dan asam lemak jenuh yang meliputi asam miristat, asam palmitat, dan asam stearat, sebuah persamaan kinetika pertumbuhan kristal telah dikembangkan (Yamamoto dkk., 2017). Kristalisasi dilakukan secara partaian melalui mekanisme pelapisan (*layering*) di permukaan sebuah silinder. Yamamoto dkk. (2017) mengungkapkan laju pertumbuhan kristal sebagai:

$$G = \frac{\left\{ -\frac{d}{2z} \left(z + \frac{d}{4} \right) + \sqrt{\left(\frac{d}{2z} \right)^2 \left(z + \frac{d}{4} \right)^2 + \frac{m}{\pi z \rho}} \right\}}{t} \quad (1)$$

dimana G adalah laju pertumbuhan kristal, d adalah diameter silinder, z adalah tinggi lapisan kristal, m adalah masa kristal, dan ρ adalah rapat massa kristal. Dalam percobaannya, Yamamoto dkk. (2017) merumuskan laju perpindahan panas dan laju perpindahan massa dalam bentuk persamaan berikut:

$$Nu = aRe^{1/2}Pr^{1/3} \quad (2)$$

$$Sh = bRe^{1/2}Sc^{1/3} \quad (3)$$

dimana Nu , Sh , Re , Pr , dan Sc adalah angka Nusselt, Sherwood, Reynold, Prandtl, dan Schmidt sedangkan a dan b adalah konstanta. Kinetika kristalisasi asam lemak pada tekanan tinggi juga telah dikaji (Maeda dkk., 2021). Dasgupta dkk. (2013, 2016) secara khusus mengkaji kinetika nukleasi asam lemak tak jenuh ganda. Waktu induksi ditemukan menurun terhadap temperatur sementara jumlah kristal meningkat terhadap laju pendinginan dan

supersaturasi. Tambahan pula, laju pertumbuhan kristal asam lemak jenuh ditemukan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan asam lemak tak jenuh. Informasi kinetika pertumbuhan kristal yang dikaji belakangan ini oleh sejumlah peneliti sangat penting dalam memodelkan distribusi ukuran partikel kristal.

B. Distilasi

Distilasi memanfaatkan perbedaan kemudahan menguap dalam memisahkan komponen-komponen dalam campuran. Kemudahan menguap berkaitan dengan titik didih, dimana komponen dengan titik didih lebih rendah cenderung lebih mudah menguap. Untuk panjang rantai karbon yang sama, titik didih asam lemak dipengaruhi jumlah ikatan rangkap. Sebagai contoh, Tabel 3 menampilkan titik didih asam lemak berantai 18, dalam bentuk asam lemak bebas (ALB), metilester asam lemak (MEAL) dan etil ester asam lemak (EEAL) (Iakovlieva dkk., 2017; Joelianingsih dkk., 2014). Tabel tersebut dengan jelas menunjukkan perbedaan titik didih berdasarkan jumlah ikatan rangkap. Pemisahan asam lemak melalui distilasi cenderung dilakukan dalam bentuk metil atau etil ester agar dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah. Keunggulan distilasi adalah tidak melibatkan bahan tambahan sebagai agen pemisah. Pemisahan semata-mata melibatkan panas.

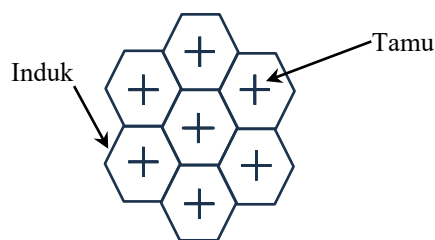
Walaupun dalam bentuk metil atau etil ester, temperatur operasi distilasi asam lemak masih termasuk tinggi jika dilakukan pada tekanan atmosfer. Untuk menghindari kerusakan termal, distilasi asam lemak dilakukan pada tekanan vakum. Makin rendah tekanan, titik didih makin rendah. Data titik didih asam lemak pada berbagai tekanan khususnya tekanan rendah berikut korelasinya telah tersedia di literatur (Scott dkk., 1952; Yuan dkk., 2005).

Pemisahan asam lemak dengan metode distilasi juga termasuk proses yang konvensional. Metode ini mampu menghasilkan asam lemak yang praktis murni dan merupakan metode yang banyak dipraktikkan di industri saat ini. Kajian distilasi asam lemak baik dalam bentuk asam lemak bebas maupun ester asam lemak telah dilakukan sejak lama (Ackman dkk., 1973; Norris dkk., 1941, 1943;

Norris & Terry, 1945; Potts & White, 1953; Scott dkk., 1952). Distilasi termasuk proses yang banyak mengonsumsi energi eksternal. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi penggunaan energi eksternal guna meningkatkan keberlanjutan. Stage (1984, 1987) mengkaji optimasi kondisi produksi asam lemak dengan target kemurnian melebihi 99% dan membahas pengaruh internal kolom serta jumlah tahap, rasio refluks dan waktu tinggal asam lemak. Rancangan pemisah dengan efisiensi tinggi dan hilang tekan rendah dipengaruhi oleh sifat termal umpan dan target kualitas. Ketersediaan simulator proses telah membantu mempercepat penentuan kondisi operasi optimum dari distilasi asam-asam lemak, sebagaimana dilakukan oleh Bono dkk. (2010) dan Cermak dkk. (2012).

Tabel 3. Titik didih asam lemak (Iakovlieva dkk., 2017; Joelianingsih dkk., 2014).

Asam	Titik didih (°C)		
	ALB	MEAL	EEAL
Stearat (C _{18,0})	643,0	355,5	356,0
Oleat (C _{18,1})	633,0	351,4	385,9
Linoleat (C _{18,2})	475,0	373,3	388,3
Linolenat (C _{18,3})		364,4	374,4



Gambar 1. Struktur heksagonal kompleks urea dan asam lemak.

C. Kompleksasi urea

Urea merupakan kristal putih dengan struktur tetragonal berdiameter dalam 5,67Å yang meleleh pada 134,7°C. Bersama senyawa alifatik (berantai lurus), urea membentuk kristal kompleks dengan struktur heksagonal heliks. Struktur heliks tersebut memiliki diameter dalam 8-12Å dimana dalam struktur kristal tersebut terikat molekul rantai lurus melalui ikatan hidrogen. Urea berperan sebagai induk (*host*) sedangkan molekul lurus yang terikat

di dalam kristal urea dinamakan molekul tamu (*guest*) sebagaimana disajikan di Gambar 1. Kristal dengan struktur heliks yang dihasilkan dinamakan kompleks urea.

Asam lemak jenuh memiliki rantai lurus, sedangkan asam lemak tak jenuh memiliki struktur yang melengkung. Makin banyak ikatan rangkap dalam suatu asam lemak, struktur molekul asam lemak makin tertekuk dan menjadi makin melengkung. Oleh karena itu, asam lemak jenuh dapat membentuk kompleks urea sedangkan asam lemak tak jenuh tidak. Kemampuan membentuk kompleks ini yang dimanfaatkan dalam memisahkan asam lemak jenuh dari asam lemak tak jenuh melalui kompleksasi urea.

Sejak ditemukan oleh Bengen (1940), sejumlah peneliti mengkaji struktur kompleks urea. Struktur kompleks urea dengan senyawa-senyawa alkana linier dikaji oleh Zimmerschied dkk. (1950). Schiessler dan Flitter (1952) menemukan n-parafin tanpa cabang di atas heksana dapat membentuk senyawa kompleks urea pada 25°. Jika rantai n-alkil cukup panjang, siklisasi terminal tidak mencegah pembentukan senyawa kompleks urea, sedangkan gugus metil yang berpusat pada rantai C₁₃ menghambat pembentukan senyawa kompleks urea. Fenomena transisi fase, periodisitas struktur, dan panas spesifik dari kompleks urea masing-masing dikaji oleh Couzi dkk. (2018), Couzi dkk. (2016), dan Fraile-Rodríguez dkk. (2004). Kajian kompleks urea juga telah berkembang ke senyawa-senyawa non-alkana, seperti ester gliseril (Aylward & Wood, 1956), monogliserida (Aylward & Wood, 1957), tetrahidrofuran (Chenite & Brisse, 1992), glisin (Smith dkk., 1997), dan tetraalkyl ammonium hydrogen sulphate (Kossev dkk., 2013).

Penelitian tentang kompleksasi urea dengan asam lemak diawali oleh Schlenk dan Holman (1950) dan Schlenk (1954). Peneliti-peneliti ini menganalisis senyawa kompleks urea dari beberapa asam lemak jenuh dan tak jenuh serta memisahkan campuran asam lemak biner. Kompleks urea dengan asam lemak jenuh berantai karbon 8 hingga 20 ditemukan mengandung 7,6-16,0 mol urea per mol asam lemak. Semakin panjang rantai asam lemak, semakin besar rasio mol urea terhadap asam lemak yang diperlukan untuk menghasilkan kompleks

urea. Perolehan senyawa kompleks urea asam lemak dipengaruhi oleh panjang rantai karbon, kandungan ikatan rangkap, dan jenis isomer. Semakin panjang rantai karbon dan semakin jenuh asam lemak, perolehan akan meningkat. Asam lemak terkonjugasi dan asam lemak trans memberikan perolehan yang lebih besar.

Proses pemisahan asam lemak melalui kompleksasi urea diawali dengan homogenisasi larutan jenuh urea dalam alkohol dan asam lemak. Larutan yang telah homogen kemudian didinginkan untuk menghasilkan kompleks urea-fraksi jenuh. Fraksi asam lemak jenuh diperoleh dengan membebaskan urea dari kompleks urea melalui pelarutan akuatik. Fraksi asam lemak tak jenuh diperoleh dengan menguapkan alkohol dari larutan induk. Pemisahan asam lemak menggunakan kompleksasi urea telah dikaji untuk berbagai sumber minyak, seperti asam lemak dari minyak jagung (Ericson & Clegg, 1952), minyak biji Cucurbita maxima (Tewari & Srivastava, 1968), minyak biji Cassia tora (Tewari dkk., 1965), lemak anjing laut (Wanasundara & Shahidi, 1999), campuran minyak kanola dan biji bunga matahari, (Fei dkk., 2010), minyak ikan dan minyak jarak (Hayes dkk., 2000), minyak ikan mas (Crexi dkk., 2011), minyak jagung (Setyawardhani dkk., 2018), minyak sawit (Bahadi dkk., 2021; Setyawardhani dkk., 2015, 2024), minyak Kilka (Eskandari dkk., 2024), lanolin (Wang dkk., 2020), dan lemak dari limbah industri ikan (Maruyama dkk., 2022). Kompleksasi urea juga telah dikaji untuk pemisahan asam lemak dalam bentuk ester dari minyak goreng bekas (Idris dkk., 2014), minyak kedelai (Jiang & Liu, 2014), dan minyak biji bunga matahari (Liu dkk., 2023; Yong dkk., 2021). Metanol dan etanol merupakan dua pelarut yang banyak dikaji. Dua pelarut ini sangat potensial karena memiliki titik didih cukup rendah sehingga mudah dipisahkan dari fraksi tak jenuh. Kedua alkohol rantai pendek ini juga saling larut dengan air yang memudahkan pemisahan fraksi jenuh dari kristal kompleks. Capaian kemurnian fraksi jenuh maupun fraksi tak jenuh ditentukan oleh komposisi umpan. Fraksi asam lemak tak jenuh dengan kemurnian melebihi 95% dilaporkan berhasil diperoleh melalui metode ini (Elkacmi dkk., 2016; Gao dkk., 2023; Gunawan

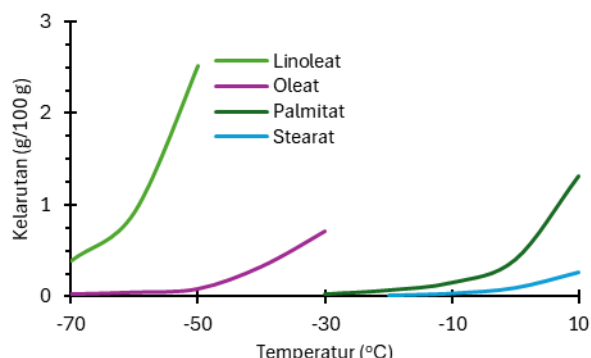
dkk., 2023). Kelemahan utama dari metode kompleksasi urea adalah kebutuhan rasio pelarut dan urea terhadap asam lemak yang tinggi. Rasio volume pelarut terhadap urea ada pada rentang 3-20 L/kg sedangkan rasio berat urea terhadap berat asam lemak ada pada rentang 0,5-14,0. Hal ini menimbulkan masalah lingkungan, yakni adanya banyak limbah urea. Di sisi lain, pelibatan sejumlah besar pelarut akan meningkatkan konsumsi energi dalam memisahkan fraksi tak jenuh dan daur ulang pelarut. Hal ini menjadi kendala dalam mewujudkan proses skala komersial.

D. Kristalisasi pelarut

Proses pemisahan ini memanfaatkan perbedaan kelarutan dari komponen-komponen yang dipisahkan dalam pelarut polar (Japir dkk., 2018b). Asam lemak tak jenuh lebih polar dibandingkan dengan asam lemak jenuh. Tambahan pula, asam lemak tak jenuh memiliki titik leleh yang lebih rendah dibandingkan dengan asam lemak jenuh. Hal ini mengakibatkan asam lemak tak jenuh lebih larut dalam pelarut polar seperti metanol, etanol dan aseton. Gambar 2 membandingkan kurva kelarutan asam lemak jenuh dan tak jenuh berantai 17-18 yang dibuat berdasarkan data literatur (Foreman & Brown, 1944; Japir dkk., 2018a). Pada temperatur kurang dari -30°C, asam palmitat dan asam stearat praktis tidak larut sementara asam oleat dan asam linoleat cukup larut. Di atas 0°C, asam-asam lemak tak jenuh memiliki kelarutan yang tak terbatas, sedangkan asam lemak jenuh sedikit larut. Proses-proses komersial berbasis kristalisasi pelarut yang telah dikembangkan meliputi proses Emersol, proses Solxoldan proses Armour Texaco yang masing-masing menggunakan metanol, propana cair dan aseton sebagai pelarut (Lv dkk., 2020).

Kristalisasi pelarut diawali proses pelarutan campuran asam lemak dalam pelarut yang digunakan. Campuran yang homogen kemudian didinginkan pada temperatur rendah untuk mengkristalkan fraksi jenuh. Campuran kemudian disaring untuk memisahkan kristal dari larutan induk. Fraksi jenuh terkonsentrasi dalam kristal sementara fraksi tak jenuh terkonsentrasi pada larutan induk. Upaya mengkaji pemisahan asam lemak melalui kristalisasi pelarut sudah lama

dilakukan (Brown, 1941). Akan tetapi, kajian yang dilakukan tidak berkembang karena keterbatasan peralatan temperatur rendah. Ketersediaan alat pendingin pada temperatur rendah belakangan ini telah mendorong banyak peneliti untuk mengkaji kembali kristalisasi pelarut.



Gambar 2. Kelarutan asam lemak dalam metanol.

Sebagian besar kajian pemisahan asam lemak melalui kristalisasi pelarut belakangan ini diarahkan pada minyak sawit, untuk menyingkirkan fraksi jenuh atau pemekatan asam oleat. Dengan menggunakan metanol sebanyak 20 kali asam lemak, kristalisasi asam lemak sawit pada -15°C selama 24 jam menghasilkan padatan mengandung lebih dari 96% asam lemak jenuh dengan perolehan sebesar 87,5% (Japir dkk., 2018a). Jumaah dkk. (2019) mengkaji optimasi kristalisasi distilat asam lemak sawit (DALS) dalam metanol. Kondisi optimum ditemukan pada rasio volume metanol/DALS sebesar 15, temperatur kristalisasi -15°C dan waktu kristalisasi 24 jam. Pada kondisi ini, kristalisasi menghasilkan fraksi jenuh mengandung lebih dari 95% asam lemak jenuh dengan perolehan 52% dan fraksi tak jenuh mengandung 93% asam lemak tak jenuh dengan perolehan 48%. Fraksi jenuh didominasi oleh asam palmitat (80%) sementara fraksi tak jenuh didominasi asam oleat (70,4%). Fraksinasi DALS juga dilakukan oleh Nasori dkk. (2023) yang menggunakan pelarut akuatik dan membandingkan kinerja 3 pelarut, yaitu metanol, aseton, dan asetonitril. Metanol ditemukan sebagai pelarut terbaik, menghasilkan fraksi tak jenuh dengan angka iodin tertinggi (88,67 g $\text{I}_2/100$ g) sedangkan aseton sebagai pelarut terburuk, menghasilkan fraksi tak

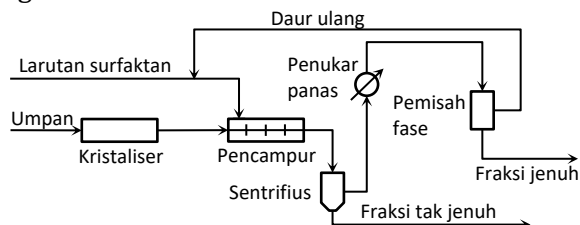
jenuh dengan angka iodin hanya 54,27 $\text{I}_2/100$ g. Pengambilan fraksi tak jenuh dalam asam lemak fraksi stearin sawit melalui kristalisasi dalam metanol dilakukan oleh Fadzel dkk. (2021). Peneliti ini berhasil memperoleh fraksi tak jenuh dengan kemurnian 99,7% dan perolehan sebesar 98% pada temperatur kristalisasi -20°C dengan menggunakan volume metanol sebanyak 9 kali berat asam lemak fraksi stearin sawit. Dengan menggunakan asam lemak dedak padi dan metanol sebagai pelarut, El-Zanati (1991) memperoleh fraksi jenuh dan tak jenuh masing-masing dengan kemurnian 59% dan 91%. Adapun perolehan dari kedua fraksi masing-masing 88,8% dan 65%. Peneliti ini menggunakan rasio pelarut terhadap berat asam lemak sebesar 3 dan melakukan kristalisasi pada 5°C .

E. Hidrofilisasi

Gambar 3 menyajikan diagram alir proses hidrofilisasi. Proses ini diawali dengan pendinginan umpan campuran asam lemak untuk mengkristalkan asam lemak jenuh. Dalam proses hidrofilisasi, campuran asam lemak jenuh (padat) dan tak jenuh (cair) dicampur dengan larutan surfaktan dalam air. Sifat aktif permukaan surfaktan membuat cairan asam lemak tak jenuh tidak menempel lagi pada permukaan kristal asam lemak jenuh, selanjutnya terdispersi dan menjadi emulsi dalam air. Di sisi lain, kristal asam lemak jenuh lepas dari cairan asam lemak tak jenuh dan masuk ke dalam air sebagai suspensi. Melalui sentrifugasi, suspensi kristal asam lemak jenuh dalam air dipisahkan dari emulsi asam lemak tak jenuh. Fraksi tak jenuh terpisah dari air berupa lapisan minyak. Asam lemak jenuh dapat diperoleh dengan memanaskan suspensi hingga temperatur leleh asam lemak jenuh.

Efisiensi pemisahan ini sangat ditentukan oleh komposisi dan konsentrasi surfaktan, kadar garam, dan volume larutan surfaktan. Alkohol lemak sulfat dan alkilbenzen sulfat termasuk surfaktan yang memberikan efisiensi yang baik (Stein, 1968). Keunggulan proses hidrofilisasi meliputi penggunaan air tanpa pelarut organik dan pemisahan terjadi antara dua fase cair sehingga filtrasi asam lemak padat dan asam lemak cair yang menyulitkan kristalisasi biasa terhindarkan. Hidrofilisasi pernah diterapkan dalam skala

komersial, beberapa proses komersial meliputi proses Lanza, proses Lipofrac, dan proses Henkel process (Lv dkk., 2020). Tabel 4 menyajikan data produk asam lemak tak jenuh yang dipisahkan melalui hidrofilisasi dari berbagai asam lemak. Hidrofilisasi mampu meningkatkan angka iodin asam lemak sawit dan sapi hingga dua kali lipat angka iodin semula.



Gambar 3. Diagram alir proses hidrofilisasi (Stein, 1968).

Tabel 4. Hasil pemisahan hidrofilisasi (Haraldsson, 1984).

Asam lemak	Angka iodin (g I ₂ /100 g)	
	Umpan	Fraksi tak jenuh
Biji bunga matahari	127	146
Kedelai	123	145
Biji kapas	102	133
Sawit	54	99
Lemak sapi	49	90

F. Ekstraksi superkritik

Ekstraksi superkritik termasuk teknik pemisahan baru selama 60 tahun terakhir (Perez-Vazquez dkk., 2023). Ekstraksi superkritik menggunakan fluida superkritik sebagai pelarut. Superkritik mengacu pada keadaan satu fase dan tidak mengembun ketika tekanan dan suhu melampaui titik kritis (Mohammadi dkk., 2024). Pada kondisi ini, batas antara dua fase (cairan dan gas) menghilang. Fluida superkritik memiliki sifat-sifat yang tidak dapat dikategorikan sebagai cairan atau gas. Sebagian sifat fluida superkritik mendekati cairan dan sebagian mendekati gas. Fluida superkritik memiliki kerapatan seperti cairan namun viskositas seperti gas dengan difusivitas dua kali lipat lebih tinggi daripada cairan (Perez-Vazquez dkk., 2023). Sifat-sifat fluida kritis merupakan gabungan sifat-sifat menguntungkan dari gas dan cairan (Uwineza & Waśkiewicz, 2020).

CO₂ adalah pelarut umum yang digunakan dalam ekstraksi superkritik karena tidak beracun, tidak mudah meledak, relatif tidak reaktif serta memiliki viskositas rendah, tegangan permukaan rendah dan difusivitas tinggi. Tambahan pula, kondisi kritis CO₂ relatif moderat, dengan temperatur dan tekanan kritis masing-masing 31°C dan 73,8 bar) sehingga terhindar dari kerusakan termal. Ekstraksi superkritik dianggap sebagai teknik ekstraksi hijau karena membutuhkan waktu ekstraksi yang lebih rendah, pelarut tidak beracun dan jumlah pelarut lebih sedikit dibandingkan dengan ekstraksi konvensional. Selain itu, dengan menerapkan fluida superkritik, tidak ditemukan residu pelarut dalam ekstrak, dan selektivitas yang dicapai lebih tinggi daripada teknik ekstraksi lainnya. Kelemahan utama ekstraksi superkritik adalah peralatan yang mahal untuk proses bertekanan.

Walaupun penggunaan fluida superkritik untuk ekstraksi material lainnya sudah banyak dikaji, studi tentang penerapan dalam memisahkan asam lemak berdasarkan tingkat tidak-jenuhannya masih terbatas. Pemisahan asam lemak jenuh dan tak jenuh dalam DLAS menggunakan sebuah kolom ekstraktor CO₂ superkritik telah dilakukan oleh Brunner & Machado (2012) secara komprehensif. Penelitian yang dilakukan mencakup data kesetimbangan, hidrodinamika, jumlah tahap teoritik hingga perpindahan massa. Serangkaian percobaan yang dilakukan peneliti ini menunjukkan:

- Konstanta kesetimbangan tiga komponen utama dalam DALs ditemukan mengikuti urutan asam palmitat>asam oleat>asam linoleat yang mengindikasikan bahwa asam palmitat terekstrak lebih banyak dan dapat disingkirkan menggunakan CO₂ superkritik.
- Faktor kapasitas gas yang merupakan fungsi dari laju superfisial cairan menurun terhadap tekanan pada beban cairan yang sama sementara pada kondisi isobarik, faktor ini meningkat terhadap kenaikan temperatur.
- Jumlah tahap kesetimbangan berkurang sementara rasio pelarut/umpan meningkat terhadap kenaikan rasio refluks.
- Kadar asam palmitat yang semula 52,51% dalam umpan dapat diperkaya menjadi 74,39 wt.% dalam ekstrak, sedangkan asam oleat + linoleat

yang semula 46,27 wt.% dalam umpan dapat diperkaya menjadi 59,00 wt.% dalam rafinat.

- Tinggi ekivalen tahap teoritik berada pada rentang 0,8 – 2,5 m.

G. Pemisahan membran

Membran adalah pembatas yang melewatkan komponen secara selektif berdasarkan ukuran, muatan, afinitas atau interaksi lainnya (Wang dkk., 2024). Membran diklasifikasikan menjadi anorganik, organik, dan komposit. Di antara semua jenis membran, membran polimer banyak digunakan karena kinerjanya yang fleksibel, biaya pengoperasian relatif rendah, dan pembuatan yang mudah (Lv dkk., 2020). Gaya penggerak dalam melintasi membran dapat berupa beda tekanan, gradien konsentrasi, dan medan potensial. Sistem membran yang digerakkan beda tekanan dikategorikan menjadi tekanan rendah (10-30 psi) seperti mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi dan tekanan tinggi (75-250 psi) seperti nanofiltrasi dan reverse osmosis (Othman dkk., 2021). Berdasarkan struktur morfologinya, membran dapat dikategorikan menjadi *simetris* yang memiliki ukuran pori seragam dan konsisten di seluruh penampang membran dan *asimetris* yang terdiri dari dua lapisan utama yakni lapisan padat tipis yang disangga oleh substrat berpori dengan morfologi dan sifat permeabilitas yang beragam (Wang dkk., 2024).

Penggunaan membran dalam memisahkan asam lemak berdasarkan derajat kejenuhannya pertama kali dilakukan oleh Gupta dan Bowden (2013). Peneliti ini memisahkan asam-asam lemak stearat, oleat, petroselinat, vasetat, linoleat dan linolenat menggunakan membran berbasis polydicyclopentadiene berpengerak beda tekanan. Dalam keadaan bebas, asam-asam lemak tersebut tidak dapat dipisahkan karena semua memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan pori membran sehingga membran menjadi tidak selektif. Dalam bentuk garam, garam stearat melintas lebih cepat dibandingkan garam-garam oleat, petroselinat, vasetat, linoleat dan linolenat. Konversi menjadi garam meningkatkan ukuran molekul dan menempatkan ukuran pori membran berada di antara ukuran garam asam stearat dan garam asam lemak lainnya. Gupta dan Bowden (2013)

menemukan bahwa garam asam lemak jenuh hampir sepenuhnya dapat disingkirkan dari garam asam lemak lainnya ketika triisobutilamin digunakan sebagai amina untuk membentuk pasangan garam.

Gupta (2022) mengkaji kinerja dua membran polimerik nanofiltrasi dalam memisahkan campuran asam lemak jenuh dan tak jenuh. Peneliti ini menemukan *luas kritis* menjadi faktor penentu bagi molekul untuk menembus membran dimana luas kritis didefinisikan sebagai luas penampang terkecil dari suatu molekul. Luas kritis dipandang lebih tepat untuk mewakili ukuran molekul dari perspektif penyaringan. Tabel 5 menyajikan luas kritis asam lemak berantai 18 baik sebagai asam lemak bebas maupun garam triisobutlamin (Gupta, 2022). Walaupun asam stearat memiliki berat molekul yang paling besar, luas kritis yang dimiliki paling kecil. Gupta (2022) juga menemukan bahwa asam lemak jenuh dan tak jenuh dapat dipisahkan dengan membran dalam bentuk garam triisobutilamin. Peneliti ini juga menemukan, dalam bentuk asam lemak bebas, asam lemak tidak dapat dipisahkan secara selektif oleh membran. Dengan menggunakan membran berbasis polidisyklopentadiena, Gupta (2022) mendapati laju permeasi garam triisobutyl amin asam oleat, asam linoleat, dan asam linolenat masing-masing 0,07, 0,035 dan 0,0 kali laju permeasi asam stearat. Gupta dan Bowden (2013) memisahkan campuran asam lemak yang terdiri dari 14% asam stearat, 18% asam oleat, 55% asam linoleat, dan 13% asam linolenat. Dengan menggunakan membran berbasis polidisyklopentadiena, peneliti ini berhasil memperoleh fraksi tak jenuh dengan kadar asam stearat kurang dari 1%.

Sebelum dipisahkan dengan membran, asam lemak dilarutan terlebih dahulu. Dalam penelitiannya, Gupta dan Bowden (2013) dan Gupta (2022) menggunakan metanol, dichloromethane, heksan dan toluen sebagai pelarut. Setelah proses permeasi, pelarut ini sudah tentu harus dipisahkan untuk dapat memperoleh kembali pelarut dan ekstrak. Karena kajian yang dilakukan masih terbatas, data-data terkait perancangan masih belum tersedia.

Tabel 5. Luas kritis asam lemak (Gupta, 2022).

Asam	Luas kritis (nm)	
	Asam lemak	Garam
Stetarat	0,067	0,38
Oleat	0,21	0,59
Linoleat	0,34	0,97
Linolenic	0,36	0,94

IV. KESIMPULAN

Metode-metode pemisahan asam-asam lemak jenuh dan tak jenuh yang tersedia saat ini meliputi kristalisasi biasa, distilasi, kristalisasi pelarut, kompleksasi urea, hidrofiliisasi, ekstraksi superkritik, dan pemisahan membran. Kristalisasi biasa memiliki kesulitan dalam memisahkan padatan fraksi jenuh hasil kristalisasi yang sering memerangkap cairan fraksi tak jenuh. Distilasi harus dilakukan pada tekanan vakum untuk menghindari temperatur tinggi yang berpotensi merusak asam lemak. Terlepas dari kekurangan yang dimiliki tersebut, kristalisasi biasa dan distilasi merupakan dua metode yang diterapkan di industri saat ini karena mampu menghasilkan pemisahan yang tajam. Kristalisasi pelarut dan hidrofiliisasi, walaupun masih terbatas, telah menemukan aplikasi skala komersial. Sementara itu, metode lain seperti kompleksasi urea, ekstraksi superkritik, dan pemisahan membran masih dalam tahap penelitian dan pengembangan. Tantangan seperti volume air limbah dalam jumlah besar, biaya investasi yang tinggi, atau keterbatasan data perancangan masih menghambat aplikasi komersial skala besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Ackman, R. G., Ke, P. J., & Jangaard, P. M. (1973). Fractional vacuum distillation of herring oil methyl esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 50(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/bf02628730>
- Anneken, D. J., Both, S., Christoph, R., Fieg, G., Steinberner, U., & Westfechtel, A. (2006). Fatty acids. Dalam Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ed.), *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (pp. 73–116). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a10_245.pub2
- Aylward, F., & Wood, P. D. S. (1956). Urea Adducts of Glyceryl Esters. *Nature*, 177(4499), 146–146. <https://doi.org/10.1038/177146a0>
- Aylward, F., & Wood, P. D. S. (1957). Studies on glyceryl esters. I. The formation of urea inclusion compounds with 1-monoglycerides. *Journal of Applied Chemistry*, 7(11), 583–589. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010071103>
- Bahadi, M., Salih, N., & Salimon, J. (2021). D-optimal Design Optimization for the Separation of Oleic Acid from Malaysian High Free Fatty Acid Crude Palm Oil Fatty Acids Mixture Using Urea Complex Fractionation. *Applied Science and Engineering Progress*, 14(2). <https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.03.004>
- Bengen, F. (1940). (German Patent No. OZ12438).
- Bionaz, M., Vargas-Bello-Pérez, E., & Busato, S. (2020). Advances in fatty acids nutrition in dairy cows: From gut to cells and effects on performance. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00512-8>
- Bono, A., Pin Pin, O., & Peng Jiun, C. (2010). Simulation of Palm based Fatty Acids Distillation. *Journal of Applied Sciences*, 10(21), 2508–2515. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2508.2515>
- Brown, J. B. (1941). Low-temperature Crystallization of the Fatty Acids and Glycerides. *Chemical Reviews*, 29(2), 333–354. <https://doi.org/10.1021/cr60093a009>
- Brunner, G., & Machado, N. T. (2012). Process design methodology for fractionation of fatty acids from palm fatty acid distillates in countercurrent packed columns with supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*, 66, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2012.02.012>
- Burhan, R. Y. P., Zetra, Y., Pusparatu, Suprpto, & Hidayat, A. T. (2020). Utilization of fatty acids from the edible oil industry in synthesis of 2-hydroxy propyl palmitate as a bioadditive solar fuel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1517(1), 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1517/1/012087>
- Cermak, S. C., Evangelista, R. L., & Kenar, J. A. (2012). Distillation of Natural Fatty Acids and Their Chemical Derivatives. Dalam *Distillation—Advances from Modeling to Applications*. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/38601>
- Cerone, M., & Smith, T. K. (2021). A Brief Journey into the History of and Future Sources and Uses of Fatty Acids. *Frontiers in Nutrition*, 8.

- <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.570401>
- Chenite, A., & Brisse, F. (1992). Poly(tetrahydrofuran)-urea adduct: A structural investigation. *Macromolecules*, 25(2), 776–782. <https://doi.org/10.1021/ma00028a042>
- Clavijo-Bernal, E. J., Sánchez, R., Villoslada-Valbuena, M., DeAndrés-Gil, C., Garcés, R., Martínez-Force, E., Salas, J. J., & Venegas-Calerón, M. (2023). How Do High School Students Learn the Importance of Fats in the Diet? Analysis of the Fatty Acid Composition of Bakery Products. *Journal of Chemical Education*, 100(5), 1958–1964. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01044>
- Cogliano, T., Russo, V., Eränen, K., Tesser, R., Di Serio, M., & Salmi, T. (2025). Comparison of continuous technologies for vegetable oils epoxidation. *Chemical Engineering Science*, 301, 120726. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120726>
- Couzi, M., Guillaume, F., & Harris, K. D. M. (2018). A phenomenological model for structural phase transitions in incommensurate alkane/urea inclusion compounds. *Royal Society Open Science*, 5(6), 180058. <https://doi.org/10.1098/rsos.180058>
- Couzi, M., Guillaume, F., Harris, K. D. M., Palmer, B. A., Christensen, K., & Collins, S. P. (2016). The true structural periodicities and superspace group descriptions of the prototypical incommensurate composite materials: Alkane/urea inclusion compounds. *EPL (Europhysics Letters)*, 116(5), 56001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/116/56001>
- Crexi, V. T., Monte, M. L., Monte, M. L., & Pinto, L. A. A. (2011). Polyunsaturated Fatty Acid Concentrates of Carp Oil: Chemical Hydrolysis and Urea Complexation. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(2), 329–334. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1899-4>
- da Silva, T. L. T., & Martini, S. (2024). Recent Advances in Lipid Crystallization in the Food Industry. *Annual Review of Food Science and Technology*, 15(1), 355–379. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034403>
- Dasgupta, S., Ay, P., Kommolk, R., & Xu, S. (2013). Kinetics of Melt Crystallization of a Sunflower Oil-Based Polyunsaturated Fatty Acid Mixture. *Chemical Engineering & Technology*, 36(7), 1225–1230. <https://doi.org/10.1002/ceat.201200524>
- Dasgupta, S., Rettig, F., & Ay, P. (2016). Nucleation Kinetics during Melt Crystallization of Plant Based High Oleic and Linoleic Polyunsaturated Fatty Acid Mixtures. *Crystal Growth & Design*, 16(2), 861–866. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b01432>
- Elkacmi, R., Kamil, N., Boulmal, N., & Bennajah, M. (2016). Experimental investigations of oleic acid separation from olive oil and olive mill wastewater: A comparative study. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(5), 1485–1494.
- El-Zanati, E. M., & Khedr, M. A. (1991). Separation of saturated and unsaturated acids from rice bran oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 68(6), 436–439. <https://doi.org/10.1007/BF02663763>
- Ericson, A. T., & Clegg, R. E. (1952). Effect of Varying the Urea Concentration on the Efficiency of the Extraction of Unsaturated Fatty Acids from Corn Oil. *Transactions of the Kansas Academy of Science (1903-)*, 55(4), 493. <https://doi.org/10.2307/3626004>
- Eskandari, Z., Hosseini, S. F., & Yaghmur, A. (2024). Production of Omega-3 Fatty Acid Concentrates from Common Kilka Oil: Optimization of the Urea Complexation Process. *Molecules*, 29(11), 2430. <https://doi.org/10.3390/molecules29112430>
- Fadzel, F. M., Salimon, J., & Derawi, D. (2021). Low-Energy Separation Technique on Purification of Unsaturated Fatty Acids of Palm Stearin using Methanol Crystallization Method. *Sains Malaysiana*, 50(1), 151–160. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5001-15>
- Fei, C. Y., Salimon, J., & Said, M. (2010). Optimisation of urea complexation by Box-Behnken design. *Sains Malaysiana*, 39(5), 795–803.
- Foreman, H. D., & Brown, J. B. (1944). Solubilities of the fatty acids in organic solvents at low temperatures. *Oil & Soap*, 21(7), 183–187. <https://doi.org/10.1007/bf02544166>
- Fraile-Rodríguez, A., Rubio-Peña, L., & López-Echarri, A. (2004). The Specific Heat of the Urea/Alkane Inclusion Compounds Around the Structural Phase Transition. *Ferroelectrics*, 301(1), 207–209. <https://doi.org/10.1080/00150190490455863>
- Gao, Y., Shi, J., Wang, J., Zhang, F., Tian, S., Zhou, Z., & Ren, Z. (2023). Enrichment of nervonic acid in Acer truncatum Bunge oil by combination of two-stage molecular distillation, one-stage urea complexation and five-stage solvent crystallization.

- Chinese Journal of Chemical Engineering*, 59, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.10.007>
- Gunawan, E. R., Suhendra, D., Oktavia, D. M., & Murniati. (2023). Separation of Unsaturated Fatty Acids of Nyamplung Oil Using Urea Crystallization as Basic Ingredients of Synthesis Dihydroxy Stearic Acid. *Advances in Physics Research*, 286–299. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-232-3_29
- Guo, W., Cai, Y., Zhu, Y., Li, Y., & Sun, Y. (2021). Comparative Studies on Flotation Performance of Saturated Fatty Acids and Unsaturated Fatty Acids Separated from Hogwash Oil. *Minerals*, 11(1), 50. <https://doi.org/10.3390/min11010050>
- Guo, W., Zhu, Y., Han, Y., Luo, B., & Wei, Y. (2017). Separation Mechanism of Fatty Acids from Waste Cooking Oil and Its Flotation Performance in Iron Ore Desiliconization. *Minerals*, 7(12), 244. <https://doi.org/10.3390/min7120244>
- Gupta, A. (2022). Role of critical area in nanofiltration of fatty acids by polymer membrane. *Materials Today: Proceedings*, 49, 2324–2329. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.350>
- Gupta, A., & Bowden, N. B. (2013). Separation of cis-Fatty Acids from Saturated and trans-Fatty Acids by Nanoporous Polydicyclopentadiene Membranes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(3), 924–933. <https://doi.org/10.1021/am3025867>
- Handayani, S. S., Gunawan, E. R., Suhendra, D., Murniati, M., Hermanto, D., & Karnila, L. (2022). Utilization Of Moringa Seed Oil Fatty Acids for Azelaic Acid Base Stock Production. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(5), 2319–2323. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i5.1964>
- Handojo, L., Indarto, A., Shofinita, D., Saadi, M., Yulistia, D., & Hasyiyati, F. (2019). Calcium soap from palm fatty acid distillate for ruminant feed: Calcium oxide particles size. *MATEC Web of Conferences*, 268, 03001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926803001>
- Haraldsson, G. (1984). Separation of saturated/unsaturated fatty acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61(2), 219–222. <https://doi.org/10.1007/BF02678772>
- Hayes, D. G., Van Alstine, J. M., & Setterwall, F. (2000). Urea-based fractionation of seed oil samples containing fatty acids and acylglycerols of polyunsaturated and hydroxy fatty acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(2), 207–213. <https://doi.org/10.1007/s11746-000-0033-5>
- Iakovlieva, A., Boichenko, S., Lejda, K., Vovk, O., & Shkilniuk, I. (2017). Vacuum Distillation of Rapeseed Oil Esters for Production of Jet Fuel Bio-Additives. *Procedia Engineering*, 187, 363–370. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.387>
- Idris, N. A., Loh, S. K., & Choo, Y. M. (2014). Urea fractionation of used palm oil methyl esters. *Journal of Oil Palm Research*, 26(3), 226–231.
- Japir, A. A. W., Salimon, J., Derawi, D., Yahaya, B. H., Jamil, M. S. M., & Yusop, M. R. (2018a). Optimization of methanol crystallization for highly efficient separation of palmitic acid from palm fatty acid mixture using response surface methodology. *Grasas y Aceites*, 68(4), 224. <https://doi.org/10.3989/gya.0552171>
- Japir, A. A.-W., Salimon, J., Derawi, D., Yahaya, B. H., Bahadi, M., Al-Shuja'a, S., & Yusop, M. R. (2018b). A highly efficient separation and physicochemical characteristics of saturated fatty acids from crude palm oil fatty acids mixture using methanol crystallization method. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 25(2), A203. <https://doi.org/10.1051/ocl/2018003>
- Jiang, B., & Liu, Y. (2014). Study on the concentration of unsaturated fatty acid methyl esters by urea complexation. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 36(6), 1013–1020.
- Joelianingsih, Tambunan, A. H., & Nabetani, H. (2014). Reactivity of Palm Fatty Acids for the Non-catalytic Esterification in a Bubble Column Reactor at Atmospheric Pressure. *Procedia Chemistry*, 9, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.05.022>
- Jumaah, M. A., Yusoff, M. F. M., Salimon, J., & Bahadi, M. (2019). Separation of saturated and unsaturated fatty acids of palm fatty acid distilled via low-temperature methanol crystallization. *Malaysian Journal of Chemistry*, 21(2), 8–16.
- Kossev, K., Sbirkova, H., Petrova, N., Shivachev, B., & Nikolova, R. (2013). Crystal structure and properties of urea and thiourea adducts of tetraalkyl ammonium hydrogen sulphate. *Bulgarian Chemical Communications*, 45(4), 446–454.
- Lewandowski, G., Musik, M., Malarczyk-Matusiak, K., Sałaciński, Ł., & Milchert, E. (2020). Epoxidation of Vegetable Oils, Unsaturated Fatty Acids and Fatty Acid Esters: A Review. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*, 17(4), 412–422.

- <https://doi.org/10.2174/1570193x16666190430154319>
- Liu, J., Tao, B. Y., Feng, H., & Mosier, N. S. (2023). Efficient rapid fractionation of fatty acid methyl esters (FAMEs) through evaporative urea inclusion. *Chemical Engineering Journal*, 454, 140266. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140266>
- Lund, J., & Rustan, A. C. (2020). Fatty Acids: Structures and Properties. Dalam *Encyclopedia of Life Sciences* (pp. 283–292). <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0029198>
- Lv, E., Ding, S., Lu, J., Yi, W., & Ding, J. (2020). Separation and purification of fatty acids by membrane technology: A critical review. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(9). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2019-0224>
- Maeda, K., Naito, Y., Kuramochi, H., Arafune, K., Itoh, K., Taguchi, S., & Yamamoto, T. (2021). High-Pressure crystallization of binary unsaturated fatty acids in cylindrical cell. *Journal of Crystal Growth*, 576, 126380. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126380>
- Maruyama, H., Fukuchi, K., & Seki, H. (2022). Modeling of separation of fatty acid methyl esters derived from fisheries waste by urea complexation method. *Biochemical Engineering Journal*, 188, 108689. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108689>
- Mohammadi, M. A., Safavizadeh, V., Yousefi, M., & Hosseini, S. M. (2024). A short review of supercritical fluid extraction of plant extracts. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(5), 3651–3664. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02440-x>
- Muckerheide, V. J. (1954). Production of fatty acids. Separation methods. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 31(11), 544–548. <https://doi.org/10.1007/bf02638570>
- Nasori, A. S., Wiguna, B., Mufti, A., Laksono, H., Budiyo, B., Kusumasmarawati, A. D., Permana, A. W., & Untoro, M. (2023). Pemanfaatan palm fatty acid distillate sebagai sumber asam oleat: Diversifikasi produk samping minyak kelapa sawit sebagai produk antara untuk industri hilir. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 33(2), 181–187. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2023.33.2.181>
- Nizam, A. F. A., Muthiyah, K., & Mahmud, M. S. (2020). Free fatty acid formation in oil palm fruits during storage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 991(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/991/1/012009>
- Norris, F. A., Rusoff, I. I., Miller, E. S., & Burr, G. O. (1941). Fractional distillation of unsaturated fatty acids: The effect of vacuum distillation on the absorption spectra of polyethenoid esters from cod liver oil. *Journal of Biological Chemistry*, 1, 199–206. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(19\)51377-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(19)51377-1)
- Norris, F. A., Rusoff, I. I., Miller, E. S., & Burr, G. O. (1943). Fractional distillation of unsaturated fatty acids: The effect of heat on the rearrangements produced in unsaturated fatty acid esters. *Journal of Biological Chemistry*, 147(2), 273–280. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)72381-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)72381-8)
- Norris, F. A., & Terry, D. E. (1945). Precise laboratory fractional distillation of fatty acid esters. *Oil & Soap*, 22(2), 41–46. <https://doi.org/10.1007/bf02637476>
- Othman, N. H., Alias, N. H., Fuzil, N. S., Marpani, F., Shahrudin, M. Z., Chew, C. M., David Ng, K. M., Lau, W. J., & Ismail, A. F. (2021). A Review on the Use of Membrane Technology Systems in Developing Countries. *Membranes*, 12(1), 30. <https://doi.org/10.3390/membranes12010030>
- Perez-Vazquez, A., Barciela, P., Carpena, M., Donn, P., Seyyedi-Mansour, S., Cao, H., Fraga-Corral, M., Otero, P., Simal-Gandara, J., Prieto, M. A., & Cassani, L. (2023). *Supercritical Fluid Extraction as a Potential Extraction Technique for the Food Industry*. 115. <https://doi.org/10.3390/ecp2023-14674>
- Potts, R. H., & White, F. B. (1953). Fractional distillation of fatty acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 30(2), 49–53. <https://doi.org/10.1007/bf02634995>
- Prihatiningtyas, I., Heryadi, E., Ramadhan, R., Purnomo, A., Alfyya, A., & Abdullah, H. (2024). Processing and characterization of oil palm loose fruits as a raw material for biodiesel. *Chimica Didactica Acta*, 12(1), 6–11. <https://doi.org/10.24815/jcd.v12i1.34955>
- Putrawan, I. D. G. A., & Azharuddin, A. (2024). Valorization of palm oil refining by-product for organotin mercaptide as a polyvinyl chloride thermal stabilizer: Synthesis, efficacy and comparison to mixed metal stearate. *Journal of Bioresources and Bioproducts*.

- <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.06.001>
Putrawan, I. D. G. A., Azharuddin, A., & Jumrawati, J. (2023). Preparing epoxidized vegetable oil from waste generated by the kapok fiber industry and assessing its thermal stabilization effect as a co-stabilizer for polyvinyl chloride. *Heliyon*, 9(9), e19624.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19624>
Putrawan, I. D. G. A., Indarto, A., & Octavia, Y. (2022). Thermal stabilization of polyvinyl chloride by calcium and zinc carboxylates derived from byproduct of palm oil refining. *Heliyon*, 8(8), e10079.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10079>
Sathivel, S., Prinyawiwatkul, W., Negulescu, I. I., & King, J. M. (2008). Determination of Melting Points, Specific Heat Capacity and Enthalpy of Catfish Visceral Oil During the Purification Process. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85(3), 291–296. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1191-9>
Schiessler, R. W., & Flitter, D. (1952). Urea and Thiourea Addition of C5—C42-Hydrocarbons. *Journal of the American Chemical Society*, 74(7), 1720–1723. <https://doi.org/10.1021/ja01127a033>
Schlenk, H. (1954). Urea inclusion compounds of fatty acids. *Progress in the Chemistry of Fats and Other Lipids*, 2, 243–267. [https://doi.org/10.1016/0079-6832\(54\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0079-6832(54)90007-5)
Schlenk, H., & Holman, R. T. (1950). Separation and Stabilization of Fatty Acids by Urea Complexes. *Journal of the American Chemical Society*, 72(11), 5001–5004. <https://doi.org/10.1021/ja01167a048>
Scott, T. A., Macmillan, D., & Melvin, E. H. (1952). Vapor pressures and distillation of methyl esters of some fatty acids. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(1), 172–175. <https://doi.org/10.1021/ie50505a049>
Setyawardhani, D. A., Ihsani, I. F., Lestari, S. A. D., Zhafirah, H. R., Silvia, V., Fadilah, & Danarto, Y. C. (2024). Crystallization temperature and solvent composition effect for enhancement of unsaturated fatty acids from palm oil using urea complexation. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 87(1). <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v87.21669>
Setyawardhani, D. A., Margono, M., Pratama, A., & Petratama, F. (2018). The Concentration of Polyunsaturated Fatty Acid in Palm Oil by Urea Complexation. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 2(1), 25. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v2i1.40430>
Setyawardhani, D. A., Sulistyono, H., Sediawan, W. B., & Fahrurrozi, M. (2015). Separating poly-unsaturated fatty acids from vegetable oil using urea complexation: The crystallisation temperature effects. *Journal of Engineering Science and Technology*, 3(1), 41–49.
Shahidi, F. (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. John Wiley & Sons.
Smith, G., Baldry, K. E., Kennard, C. H. L., & Byriel, K. A. (1997). The Preparation and Crystal Structure of the 1: 1 Adduct of Glycine with Urea. *Australian Journal of Chemistry*, 50(7), 737. <https://doi.org/10.1071/c96205>
Smolińska, K., Szopa, A., Sobczyński, J., Serefko, A., & Dobrowolski, P. (2024). Nutritional Quality Implications: Exploring the Impact of a Fatty Acid-Rich Diet on Central Nervous System Development. *Nutrients*, 16(7), 1093. <https://doi.org/10.3390/nu16071093>
Stage, H. (1984). Fatty acid fractionation by column distillation: Purity, energy consumption and operating conditions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61(2), 204–214. <https://doi.org/10.1007/bf02678770>
Stage, H. (1987). Optimal Conditions for Fatty Acid Distillation and Fractionation in Relation to Energy Consumption, Product Quality, Yield and Environmental Load. *Lipid / Fett*, 89(9), 345–352. <https://doi.org/10.1002/lipi.19870890906>
Stein, W. (1968). The hydrophilization process for the separation of fatty materials. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 45(6), 471–474. <https://doi.org/10.1007/bf02655512>
Szabó, R. T., Kovács-Weber, M., Zimborán, Á., Kovács, L., & Erdélyi, M. (2023). Effects of Short- and Medium-Chain Fatty Acids on Production, Meat Quality, and Microbial Attributes—A Review. *Molecules*, 28(13), 4956. <https://doi.org/10.3390/molecules28134956>
Talbot, G., Smith, K., & Bhaggan, K. (2012). Influence of minor components on fat crystallization. *Lipid Technology*, 24(4), 83–85. <https://doi.org/10.1002/lite.201200180>
Tewari, J. P., Dixit, B. B., & Mishra, S. S. (1965). Fractionation of Fatty Acids of Cassia tora Seed Oil

- with Urea. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 54(6), 923. <https://doi.org/10.1002/jps.2600540627>
- Tewari, J. P., & Srivastava, M. C. (1968). Fractionation of Fatty Acids of Cucurbita maxima Seed Oil With Urea. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 57(2), 328–329. <https://doi.org/10.1002/jps.2600570221>
- Thomas, A., Matthäus, B., & Fiebig, H.-J. (2015). Fats and Fatty Oils. Dalam *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 1–84). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a10_173.pub2
- Uwineza, P. A., & Waśkiewicz, A. (2020). Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials. *Molecules*, 25(17), 3847. <https://doi.org/10.3390/molecules25173847>
- Wanasundara, U. N., & Shahidi, F. (1999). Concentration of omega 3-polyunsaturated fatty acids of seal blubber oil by urea complexation: Optimization of reaction conditions. *Food Chemistry*, 65(1), 41–49. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(98\)00153-8](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(98)00153-8)
- Wang, J., Abbas, S. C., Li, L., Walker, C. C., Ni, Y., & Cai, Z. (2024). Cellulose Membranes: Synthesis and Applications for Water and Gas Separation and Purification. *Membranes*, 14(7), 148. <https://doi.org/10.3390/membranes14070148>
- Wang, W., Liu, H., Li, F., Wang, H., Ma, X., Li, J., Zhou, L., & Xiao, Q. (2021). Effects of unsaturated fatty acid methyl esters on the oxidation stability of biodiesel determined by gas chromatography-mass spectrometry and information entropy methods. *Renewable Energy*, 175, 880–886. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.132>
- Wang, X., Xiaohan, W., Chen, Y., Jin, W., Jin, Q., & Wang, X. (2020). Enrichment of branched chain fatty acids from lanolin via urea complexation for infant formula use. *LWT*, 117, 108627. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108627>
- Yamamoto, T., Fujikawa, T., Okamoto, N., Itoh, K., Maeda, K., Fukui, K., & Kuramochi, H. (2017). Melt crystallization of binary mixture of fatty acids as model biofuel. *Crystal Research and Technology*, 52(2). <https://doi.org/10.1002/crat.201600316>
- Yang, D., Lee, Y.-Y., Lu, Y., Wang, Y., & Zhang, Z. (2024). Internal Factors Affecting the Crystallization of the Lipid System: Triacylglycerol Structure, Composition, and Minor Components. *Molecules*, 29(8), 1847. <https://doi.org/10.3390/molecules29081847>
- Yong, Q., Yuan, G., & Li, H. (2021). Extraction and separation of unsaturated fatty acids from sunflower oil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 680(1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/680/1/012063>
- Yuan, W., Hansen, A., & Zhang, Q. (2005). Vapor pressure and normal boiling point predictions for pure methyl esters and biodiesel fuels. *Fuel*, 84(7–8), 943–950. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.01.007>
- Zimmerschied, W. J., Dinerstein, R. A., Weitkamp, A. W., & Marschner, R. F. (1950). Crystalline Adducts of Urea with Linear Aliphatic Compounds. *Industrial & Engineering Chemistry*, 42(7), 1300–1306. <https://doi.org/10.1021/ie50487a018>