

FONDASI APLIKASI STRATEGIS MASA DEPAN PICKERING NANOEMULSION (PNE) : TINJAUAN KOMPREHENSIF

Foundations for Future Strategic Applications of Pickering Nanoemulsion (PNE): A Comprehensive Review

Adham Prayudi^{1*}, Dwi Lestari Rahayu², Rozi Satria Utama², Sarah E. A. Soliman², Hanny Srimulyani Dulimarta^{2,3}, Hana Ankrissa Hondo²

¹Program Studi Teknologi Pengolahan Hasil Perikanan, Politeknik Ahli Usaha Perikanan, Jakarta Selatan, Indonesia

²Program Studi Ilmu Pangan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

³Badan Pengawas Obat dan Makanan, Jakarta, Indonesia

*email : prayudiadham@gmail.com

ABSTRAK

Peningkatan kesadaran kesehatan memicu pertumbuhan pasar nutrasetikal global. Tantangan utamanya adalah rendahnya kelarutan dan kerentanan degradasi oleh panas, pH, oksidasi pada senyawa bioaktif lipofilik sehingga membatasi bioavailabilitasnya. Pickering Nanoemulsi (PNE) muncul sebagai platform penghantaran superior yang memanfaatkan partikel padat alami (food grade) seperti protein dan polisakarida sebagai stabilisator ireversibel, selaras dengan permintaan pasar clean label. Tinjauan literatur naratif deskriptif ini mensintesis 24 artikel penelitian eksperimental terkini tahun 2021–2025 untuk menganalisis perkembangan mutakhir PNE berbasis biopolimer pangan. Kestabilan PNE diperoleh melalui adsorpsi partikel amfifilik pada antarmuka, dengan membentuk penghalang sterik yang kaku. Partikel stabilisator direkayasa melalui pengendalian pH, modifikasi kimia (konjugat), atau rekayasa nanopolimer, dan diproduksi dengan teknik berenergi tinggi (ultrasonikasi, homogenisasi tekanan tinggi). PNE menunjukkan ketahanan yang luar biasa terhadap sterilisasi termal (121°C), fluktuasi pH pada titik isoelektrik, dan salinitas tinggi (hingga 500 mM NaCl). Fungsionalitasnya mencakup efisiensi enkapsulasi (>80% untuk kurkumin) dan pelepasan terkontrol. PNE berbasis biopolimer pangan ini menjadi fondasi teknologi strategis untuk peningkatan stabilitas dan bioavailabilitas dalam sektor pangan fungsional, biomedis, dan material fungsional.

Kata kunci : bioavailabilitas; pelepasan terkendali; konjugat protein-polisakarida; nutrasetikal; senyawa bioaktif lipofilik

ABSTRACT

Rising health awareness is fueling the growth of the global nutraceutical market. The main challenges are the low solubility and susceptibility to degradation by heat, pH, and oxidation of lipophilic bioactive compounds, thus limiting their bioavailability. Pickering Nanoemulsions (PNEs) are emerging as a superior delivery platform utilizing natural (food-grade) solid particles such as proteins and polysaccharides as irreversible stabilizers, in line with the clean label market demand. This descriptive narrative literature review synthesizes 24 recent experimental research articles from 2021–2025 to analyze the latest developments in food biopolymer-based PNEs. PNE stability is achieved through the adsorption of amphiphilic particles at the interface, forming a rigid steric barrier. Stabilizer particles are engineered through pH control, chemical modification (conjugates), or nanopolymer engineering, and are produced by high-energy techniques (ultrasonication, high-pressure homogenization). PNE exhibits exceptional resistance to thermal sterilization (121°C), pH fluctuations at the isoelectric point, and high salinity (up to 500 mM NaCl). Its functionalities include encapsulation efficiency (>80% for curcumin) and controlled release. This food biopolymer-based

PNE serves as a strategic technological foundation for improving stability and bioavailability in the functional food, biomedical, and functional material sectors.

Keyword : *bioavailability; controlled release; protein-polysaccharide conjugate; nutraceutical; lipophilic bioactive compound*

PENDAHULUAN

Tumbuhnya kesadaran masyarakat terhadap pentingnya pencegahan diri dari penyakit telah meningkatkan minat terhadap produk kesehatan berbahan alami yang memiliki manfaat fungsional termasuk pangan fungsional dan nutrasetikal. Kebutuhan akan produk yang memiliki manfaat alami terus meningkat setiap tahun. Berdasarkan laporan Grand View Analysis, (2025), pasar global untuk nutrasetikal diperkirakan akan mencapai 919,1 miliar pada 2030, naik dari 591,1 miliar pada 2024, dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan sebesar 7,6% antara 2025 hingga 2030. Banyak konsumen mencari suplemen makanan dan pangan fungsional karena dianggap memberikan manfaat bagi kesehatan.

Selain suplemen makanan dan pangan fungsional, produk nutrasetikal lainnya meliputi pangan medis, cosmeceutical, fitokimia, suplemen nutrisi dan produk herbal (Puri et al., 2022; Singh et al., 2023). Seluruh jenis produk tersebut adalah pangan atau komponen pangan yang memberikan manfaat bagi kesehatan tubuh maupun efek terapeutik setelah dikonsumsi. Contoh manfaat yang diperoleh dari mengonsumsi makanan fungsional, prebiotik,

dan probiotik menurut Chhabra et al., (2025) adalah mencegah atau menurunkan risiko penyakit akibat gaya hidup yang buruk seperti diabetes, kardiovaskular dan obesitas.

Saat ini pengembangan produk pangan fungsional dan nutrasetikal masih diperlukan untuk menghasilkan produk dengan fungsional yang lebih baik. Namun, terdapat tantangan dalam merancang formulasi dan proses produksinya. Beberapa senyawa bioaktif sebagai senyawa fungsional dalam produk nutrasetikal mudah terdegradasi selama proses produksi sehingga aktivitas biologisnya hilang atau membentuk produk samping yang tidak diinginkan. Selain hal tersebut, senyawa bioaktif lipofilik memiliki kelarutan yang rendah dalam air. Rendahnya kelarutan dan stabilitas senyawa bioaktif menyebabkan ketersediaan senyawa tersebut dalam saluran pencernaan terbatas dan penyerapan untuk memperoleh manfaat senyawa bioaktif tidak optimal (Jiang et al., 2024).

Produksi pangan fungsional membutuhkan pemilihan pendekatan yang tepat agar senyawa bioaktif terlindung dari degradasi atau kehilangan selama pemrosesan yang dipicu oleh panas, variasi pH, cahaya, perubahan kekuatan ion dan

kondisi oksidatif dalam produk akhir (Lee et al., 2024). Salah satu pendekatan untuk mengatasi masalah sistem penghantaran senyawa bioaktif dan availabilitas adalah Pickering nanoemulsi (PNE). Sistem PNE memberikan keunggulan dalam meningkatkan bioavailabilitas melalui stabilitas yang lebih baik terhadap suhu, pH dan proses oksidatif serta memungkinkan ukuran droplet dan laju pelepasan senyawa bioaktif di dalam tubuh dikendalikan. Dengan mempertahankan sifat sensorik dan nilai fungsionalitas produk, sistem emulsi ini juga dapat memperpanjang masa simpan produk (Cassani & Gomez-Zavaglia, 2024). PNE menggunakan partikel alami sebagai penstabil antarmuka minyak-air, berbeda dengan emulsi konvensional yang menggunakan surfaktan sintetis. Penstabil alami ini dapat berupa partikel flavonoid, kristal lemak, polisakarida, atau protein (Meng et al., 2024). Metode ini sesuai dengan tren konsumen yang lebih suka makanan yang alami dan bersih label.

Menurut penelitian terbaru, menambahkan bahan bioaktif ke dalam PNE dapat mempertahankan nilai gizi makanan dan memiliki efek antimikroba dan antioksidan yang lebih besar, yang berarti makanan dapat lebih lama disimpan (Cassani & Gomez-Zavaglia, 2024). Untuk mendukung keberlanjutan dan keamanan pangan, penelitian tentang partikel penstabil alami yang memiliki sifat antioksidan dan

biokompatibel masih diperlukan. Sifat biokompatibel partikel penstabil membuat PNE menjadi pendekatan yang relevan untuk diterapkan tidak hanya pada pangan tetapi juga pada bidang lain, seperti farmasi. Penulisan artikel review ini ditujukan untuk mengkaji perkembangan mutakhir penelitian PNE yang distabilkan menggunakan biopolimer pangan. Tinjauan ini berfokus pada tiga aspek yakni metode pembentukan PNE, analisis penstabil biopolimer pangan dan mekanisme interaksi serta kestabilan emulsi yang dihasilkan dan identifikasi penerapan PNE di bidang pangan dan sistem penghantaran senyawa bioaktif.

METODOLOGI PENELITIAN

Review artikel ini merupakan penelitian secara deskriptif yang dilakukan menggunakan metode *narrative review*. Data diperoleh dari 24 artikel jurnal internasional yang ditelusuri melalui Google Scholar dan Science Direct. Artikel jurnal yang dipilih merupakan artikel penelitian eksperimental (bukan artikel review) yang dipublikasikan tahun 2021 hingga 2025. Artikel tersebut memiliki topik sesuai dengan *Pickering Nanoemulsi* (PNE) yang menggunakan biopolimer pangan sebagai stabilisator, digunakan dalam pangan dan sistem penghantaran senyawa bioaktif. Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan beberapa kata kunci seperti *pickering nanoemulsion*, *pickering emulsion*, *food grade emulsion*, *bioactive delivery*,

biopolymer, baik secara tunggal maupun kombinasi menggunakan operator logika (AND, OR). Analisis dilakukan dengan menelaah dan mengelompokkan informasi dari setiap artikel berdasarkan tema penelitian, meliputi jenis penstabil, metode dan mekanisme pembentukan nanoemulsi, stabilitas dan uji stabilitas nanoemulsi, serta aplikasi PNE di segala bidang. Untuk memastikan relevansi artikel jurnal yang dipilih, kesesuaian topik dan keaslian data diperiksa terlebih dahulu sebelum sintesis naratif dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode dan Mekanisme Pembentukan Pickering Nanoemulsi (PNE)

Pembuatan *Pickering Nanoemulsion* (PNE) dilakukan dengan memanfaatkan partikel padat berukuran nano sebagai agen penstabil. Tahapan proses dimulai dengan penyiapan partikel penstabil, yang kemudian diikuti oleh proses emulsifikasi untuk memperkecil ukuran tetesan fase terdispersi hingga mencapai rentang 50–500 nanometer. Menurut Lu et al., (2025), pembentukan PNE terutama dikendalikan oleh adsorpsi irreversibel nanopartikel amfifilik pada antarmuka minyak air. Nanopartikel tersebut berfungsi sebagai pengemulsi dengan membentuk lapisan pelindung yang mengelilingi tetesan fase terdispersi sehingga menghambat terjadinya koalesensi. Lapisan partikel yang terbentuk menciptakan penghalang sterik yang

signifikan, yang pada gilirannya meningkatkan stabilitas sistem nanoemulsi.

Penyiapan penstabil berbasis partikel

Partikel yang digunakan sebagai penstabil dalam pembentukan PNE harus memenuhi kriteria tertentu seperti ukuran partikel yang sesuai dan bersifat amfifilik (Lu et al., 2025). Partikel harus dapat berinteraksi dengan air dan juga minyak. Dalam emulsifikasi pickering, bahan penstabil berfungsi sebagai perisai koloid. Bahan penstabil memiliki fungsi lebih dari sekadar mengurangi ketegangan pada antarmuka, seperti yang dilakukan oleh surfaktan. Mereka juga membentuk lapisan padat yang mencegah penggabungan kembali tetesan. Penstabil ini bertindak sebagai perisai, dan mereka menjaga emulsi tetap stabil bahkan dalam kondisi ekstrem seperti perubahan pH, variasi suhu, atau gaya sentrifugal (Gauthier & Capron, 2021). Untuk mencapai tujuan ini, partikel penstabil yang digunakan harus memiliki ukuran antara 5 hingga 10 kali lebih kecil dibandingkan dengan diameter rata-rata tetesan emulsi yang ingin dihasilkan (Gauthier & Capron, 2021). Bahan penstabil pada pembuatan emulsi terdiri dari jenis protein, polisakarida yang dimodifikasi untuk mencapai ukuran nano, biopolimer kompleks dan nanopartikel sintesis yang direkayasa. Ko stabilisator dapat ditambahkan pada bahan penstabil. Ko stabilisator berupa surfaktan molekul kecil yang digunakan bersama *Whey Protein Isolate* (WPI) untuk meningkatkan

stabilitas fisik dan mengurangi ukuran tetapan masing-masing jenis penstabil untuk nanoemulsi (Kim et al., 2023). Contoh pembuatan PNE dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis penstabil *Pickering Nanoemulsi* (PNE)

Jenis penstabil	Penstabil Pickering nanoemulsi (PNE)	Referensi
Protein dan agregat protein murni	1. Protein isolat nabati (<i>pea protein isolate</i> (PPI); <i>soy protein isolate</i> (SPI); <i>whey protein isolate</i> (WPI)) 2. <i>Zein</i> 3. Kolagen	Aryanti et al., 2025; Du et al., 2024; Kim et al., 2023; Taghizadeh et al., 2025
Nanopolimer polisakarida alami	1. Kitosan 2. Nanokristal selulosa pati termodifikasi (<i>sulfated CNCs</i> ; <i>desulfated CNCs</i>) 3. Pati termodifikasi (pati <i>tartary buckwheat</i> termodifikasi dengan <i>Octenyl Succinic Anhydride</i> (OSA-TBS); high amylose corn starch (HCS); starch nanoparticles)	Bhutto et al., 2024; Mitbumrung & Matsukawa, 2024; Lin et al., 2023; Geng et al., 2023; Chutia & Mahanta, 2021
Kompleks polimer biner	1. Konjugat PPI Dextran 2. Kompleks PPI Kitosan 3. Kompleks WPI kitosan 4. <i>Zein-quercetin-HTCC nanoparticle</i> 5. Kompleks polifenol-pati seperti <i>soybean isolate protein-curcumin nanoparticle</i> (SPI-Cur-NPs)	Zhao et al., 2022 ; Aryanti et al., 2025 ; Geng et al., 2023.
Nanopartikel sintetis	1. <i>Diblock copolymer</i> berbasis PDMAc-PDAAM (poli(N,N'-dimetilakrilamida)–poli(diaseton akrilamida)) 2. <i>Diblock copolymer</i> berbasis PSMA-PTFEMA (poli(glisierol monometakrilat)–poli (2,2,2-trifluoroetil metakrilat))	Hunter & Armes, 2022
Protein partikulat (<i>whey protein isolate</i> /WPI) bersama ko-stabilisator	1. WPI SDS Ko-stabilisator anionik : <i>sodium dodecyl sulfate</i> 2. WPI CTAB Ko-stabilisator kationik : <i>Hexadecyltrimethylammonium</i> 3. WPI Tween 4. Ko-stabilisator nonionik: Tween 20	Kim et al., 2023.

Tabel di atas menunjukkan bahwa formulasi partikel penstabil NPE umumnya mengikuti tiga jalur utama yaitu pengendalian pH, modifikasi kimiawi, dan rekayasa nanopolimer. Sistem berbasis kitosan biasanya menggunakan pengaturan pH

untuk memicu agregasi terkontrol. Ketika pH dinaikkan mendekati nilai pKa kitosan (6,3–6,5), struktur teragregasi yang memiliki keterbasahan antarmuka yang ideal dan dapat berfungsi sebagai penstabil yang baik terbentuk. Metode ini sangat penting karena

memungkinkan produksi partikel Pickering berbasis biopolimer tanpa melakukan perubahan kimia tambahan. Modifikasi kimiawi digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas dalam menyesuaikan sifat permukaan partikel. Reaksi Maillard antara protein dan polisakarida meningkatkan kelarutan dan fleksibilitas antarmuka dalam sistem PPI dextran (Kim et al., 2024). Konjugasi protein dengan senyawa bioaktif seperti kurkumin meningkatkan interaksi hidrofobik dan sifat fungsional, seperti aktivitas antioksidan. Akibatnya, pati termodifikasi OSA sangat diminati (Du et al., 2024; Lin et al., 2023). Dalam situasi ini, modifikasi kimiawi memungkinkan desain partikel yang lebih presisi daripada pendekatan yang bergantung pada pH. Metode rekayasa nanopolimer melalui *Polymerization Induced Self Assembly* (PISA) sedang berkembang pesat karena kemampuan untuk menghasilkan nanopartikel berukuran sangat kecil (10–20 nm) dengan stabilisasi sterik bawaan (Gauthier & Capron, 2021; Hunter & Armes, 2022). Ketahanan partikel terhadap proses berenergi tinggi ditingkatkan dengan menambah *core-crosslinking* menggunakan agen seperti *adipic acid dihydrazide*. Ini membuatnya calon penstabil yang bertahan lama.

Semua penelitian yang dilakukan pada komponen proses emulsifikasi yang dikaji menunjukkan bahwa metode berenergi

tinggi lebih populer daripada metode berenergi rendah. Teknik satu tahap yang menggunakan ultrasonikasi atau pengolahan dengan geser tinggi telah terbukti dapat menghasilkan tetesan nano secara langsung melalui gaya kavitasi dan geser tinggi (Bhutto et al., 2024; Zhao et al., 2022). Dalam sistem yang lebih sensitif, proses dua tahap lebih umum digunakan. Proses ini dimulai dengan pengolahan emulsion menggunakan pengolahan berkecepatan tinggi, kemudian diikuti oleh pengolahan dengan tekanan tinggi atau pengolahan mikrofluida untuk menurunkan ukuran (Hunter & Armes, 2022; Kim et al., 2024). Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa keberhasilan PNE bergantung pada kesesuaian antara kondisi proses dan desain partikel. Dibutuhkan optimalisasi bersama untuk parameter penting seperti keterbasahan partikel, stabilitas struktural, pH, dan intensitas gaya mekanik. Dengan bekerja sama, ketiga pendekatan penyediaan partikel pH responsif, modifikasi kimia, dan PISA memberikan banyak ruang desain untuk membangun sistem *pickering* yang stabil dan berfungsi.

Proses emulsifikasi

Teknik emulsifikasi berenergi tinggi digunakan dalam beberapa penelitian terbaru untuk menghasilkan PNE. Namun, belum ada laporan mengenai pendekatan berenergi rendah yang bergantung pada mekanisme spontan yang didasarkan pada

ketidakseimbangan energi internal (Geng et al., 2023). Penggunaan energi tinggi dianggap lebih efektif karena dapat menghasilkan tetesan berukuran nanometer sambil memaksimalkan adsorpsi dan fragmentasi partikel padat pada antarmuka (Lu et al., 2025). Produksi PNE dilakukan dalam dua konfigurasi utama dalam literatur. Yang pertama menggunakan energi mekanik tinggi melalui ultrasonikasi atau homogenisasi tekanan tinggi untuk menghentikan percikan dan stabilisasi antarmuka di satu lintasan kerja. Yang kedua adalah proses satu tahap. *Ultrasonic homogenizer* digunakan secara luas pada rentang daya 100–760 W untuk sistem berbasis kolagen essential oil, nanopartikel kitosan, ataupun partikel pH responsif (Bhutto et al., 2024; Gauthier & Capron, 2021; Zhao et al., 2022). Teknik *high shear* menunjukkan kemampuan serupa dalam menghasilkan tetesan submikron tanpa perlakuan lanjutan bertekanan tinggi (Taghizadeh et al., 2025; Yin et al., 2025). Sebaliknya, pendekatan dua tahap memisahkan pembentukan emulsi kasar dari pemecahan intensif pada tekanan tinggi. Rotor–stator atau blender berkecepatan tinggi digunakan terlebih dahulu untuk mendispersikan penstabil dalam sistem PPI kitosan, WPI surfaktan, maupun partikel selulosa (Aryanti et al., 2025; Kim et al., 2023; Mitbumrung & Matsukawa, 2024). Pada tahap berikutnya, *high-pressure homogenizer* atau *microfluidizer* menurunkan

ukuran tetesan hingga 50–500 nm dan memastikan adsorpsi ireversibel partikel pada antarmuka (Hunter & Armes, 2022). Ultrasonikasi kadang digunakan sebagai alternatif tahap kedua ketika penstabil sensitif terhadap tekanan, sebagaimana dilaporkan untuk konjugat PPI dextran (Kim et al., 2024). Secara keseluruhan, interaksi antara sifat amfifilik partikel dan parameter pemrosesan, seperti pH, intensitas homogenisasi, dan durasi perlakuan, memengaruhi keberhasilan emulsifikasi. Agregasi tetesan atau aglomerasi partikel dapat terjadi karena pengaturan kondisi yang tidak tepat, yang menghambat pembentukan struktur *pickering* yang stabil (Mitbumrung & Matsukawa, 2024). Oleh karena itu, faktor utama dalam mencapai PNE yang stabil dan terkontrol adalah optimasi dinamika proses dan karakteristik penstabil secara bersamaan.

Interaksi dan Penyerapan Partikel Penstabil di Antarmuka Minyak Air

Kestabilan PNE terutama ditentukan oleh kemampuan partikel padat untuk teradsorpsi secara ireversibel pada antarmuka minyak air, membentuk lapisan pelindung yang menghalangi koalesensi tetesan (Bhutto et al., 2024; Mitbumrung & Matsukawa, 2024). Adsorpsi ini jauh lebih stabil dibandingkan surfaktan molekul kecil karena energi pelepasan partikel dari antarmuka sangat tinggi, sehingga partikel tetap melekat dan mempertahankan integritas struktur antarmuka (Hunter &

Armes, 2022). Partikel memiliki afinitas ganda terhadap fase minyak dan air, yang memungkinkan penurunan tegangan antarmuka dan stabilisasi termodinamik sistem. Ini adalah alasan mengapa partikel dapat berfungsi sebagai penstabil. Sudut kontak tiga fase (θ_w), yang memiliki nilai mendekati 90 derajat, menghasilkan stabilisasi yang paling efisien. Di sisi lain, partikel yang lebih hidrofilik cenderung menghasilkan emulsi minyak dalam air (Aryanti et al., 2025; Hunter & Armes, 2022). Rekayasa kimia dapat digunakan untuk mengubah parameter keterbasahan dalam biopolimer. Ini dapat mencakup penurunan derajat deasetilasi kitosan, yang pada gilirannya meningkatkan hidrofobisitas dan meningkatkan adsorpsi pada antarmuka minyak (Bhutto et al., 2024).

Setelah partikel teradsorpsi, stabilitasnya dijaga melalui kombinasi dari hambatan sterik dan tolakan elektrostatik. Hambatan sterik berasal dari lapisan padat yang mengelilingi tetesan, yang mencegah terjadinya koalesensi dan mengurangi interaksi antara tetesan. Sistem yang menggunakan konjugat PPI dextran dan jenis protein polisakarida lainnya memperlihatkan pengaruh ini secara jelas melalui pembentukan lapisan tebal yang meningkatkan kekuatan fisik serta mengurangi tekanan difusi oksidan, sehingga memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap degradasi (Bhutto et al., 2024).

Sebaliknya, muatan pada permukaan partikel menciptakan tolakan elektrostatik, yang terlihat dari nilai potensial zeta yang tinggi. Kondisi pH, struktur protein, dan perubahan kimia sangat memengaruhi kekuatan tolakan ini. Konjugat protein polisakarida cenderung memiliki muatan negatif yang lebih besar dan menunjukkan stabilitas yang lebih tinggi jika pH mendekati titik isoelektrik, sehingga sistem menjadi lebih rentan terhadap agregasi (Kim et al., 2023, 2024).

Perilaku stabilisasi juga dipengaruhi oleh interaksi partikel dengan bagian lain sistem. Surfaktan molekul kecil dapat bertindak sebagai ko-stabilisator dan meningkatkan efisiensi adsorpsi partikel. Ini terlihat pada sistem WPI SDS atau WPI CTAB, yang memiliki ketahanan panas yang lebih baik karena tolakan elektrostatik yang lebih kuat (Kim et al., 2023). Selain itu, peningkatan hidrofobisitas partikel dan pengecilan ukuran tetesan meningkatkan keterikatan partikel dengan matriks protein, yang pada gilirannya mengarah pada struktur jaringan yang lebih kompak (Du et al., 2024). Meski demikian, konsentrasi partikel yang berlebihan dalam fase kontinu dapat memicu instabilitas jangka panjang, termasuk fenomena *Ostwald ripening* yang mengganggu distribusi ukuran tetesan (Hunter & Armes, 2022).

Sifat kelembapan partikel, daya tarik antarmuka, dan metode perlindungan fisik dan elektrostatis secara keseluruhan

memengaruhi stabilitas PNE. Daya tahannya yang lama adalah karakteristik emulsi yang paling penting dalam sistem dispersi modern. Ini didukung oleh kombinasi adsorpsi permanen, hambatan sterik yang besar, dan nilai potensial zeta yang tinggi (Lu et al., 2025).

Pengendalian ukuran dan stabilitas nanoemulsi pickering

Stabilitas emulsi selama penyimpanan dipengaruhi oleh ukuran droplet. Secara umum, semakin kecil ukuran droplet akan semakin stabil emulsinya secara termodinamika. Droplet dengan ukuran nanoemulsi (< 500 nm) memiliki kestabilan kinetik tinggi, luas permukaan besar, serta meningkatkan bioavailabilitas senyawa aktif (Aryanti et al., 2025). Pengendalian ukuran dan kestabilan nanoemulsi sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama yaitu karakteristik penstabil yang digunakan, komposisi formulasi emulsi, serta metode pembuatannya.

Kestabilan PNE dan pengendalian ukuran bergantung pada kerja sama sinergis antara atribut penstabil, komposisi formulasi, dan kondisi proses. Untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi antarmuka, partikel yang ideal untuk penstabil harus berukuran nano (biasanya 5–10 kali lebih kecil daripada diameter droplet yang diinginkan), memiliki bentuk yang seragam, dan memiliki wettabilitas mendekati sudut kontak $< 90^{\circ}\text{C}$. Selain itu, konsentrasi penstabil memiliki titik

optimum yang cukup untuk menutup antarmuka dan meningkatkan viskositas fase kontinu tetapi tidak berlebihan sehingga memicu efek samping seperti creaming atau bridging (Aryanti et al., 2025; Foo et al., 2022; Hunter et al., 2024). Modifikasi permukaan partikel, misalnya derivatisasi pati dengan OSA atau pembentukan konjugat protein polisakarida, terbukti meningkatkan amfifilisitas dan kemampuan menahan ukuran tetesan selama penyimpanan.

Komposisi formulasi secara langsung menentukan keseimbangan termodinamik lokal dan dinamika antarmuka. Karena penutupan partikel antarmuka menjadi kurang efektif, peningkatan fraksi minyak cenderung membuat droplet lebih besar dan menurunkan resistensi terhadap creaming. Di sisi lain, parameter elektrokinetik seperti pH dan potensial zeta mengatur tolakan elektrostatik antar tetesan pH di dekat titik isoelektrik protein (seperti PPI pada pH 4.3–4.5), yang menurunkan muatan dan memicu agregasi. Di sisi lain, peningkatan kekuatan ionik dapat menyebabkan screening muatan yang merusak stabil (Aryanti et al., 2025; Kim et al., 2023; Lin et al., 2023). Kehadiran surfaktan molekul kecil sebagai ko-stabilisator kadang-kadang membantu mengurangi tegangan antarmuka dan memperbaiki penutupan partikel, tetapi komposisi ini harus diatur untuk menghindari ripening Ostwald atau destabilisasi jangka panjang.

Pembuatan adalah faktor terakhir yang menentukan distribusi ukuran. Teknik berenergi tinggi seperti homogenisasi dengan geser tinggi, homogenisasi dengan tekanan tinggi, dan ultrasonikasi secara konsisten menghasilkan droplet di bawah-500 nm dengan PDI rendah karena kavitasi dan geser yang intens. Namun, parameter proses harus dioptimalkan untuk menghindari *over-processing*, yang dapat menyebabkan *re-coalescence* atau kerusakan struktur partikel penstabil (Chutia & Mahanta, 2021; Geng et al., 2023; Lu et al., 2025). Kestabilan kinetik, performa fungsional, dan umur simpan sistem emulsi bergantung pada perubahan ketiga komponen ini (Bhutto et al., 2024; Kim et al., 2024; Mitbunrung & Matsukawa, 2024).

Metode pengujian stabilitas emulsi

Pengukuran kestabilan emulsi dan PNE pada umumnya membutuhkan karakterisasi fisik, reologi, dan mikroskopis yang saling melengkapi. Fokus evaluasi awal biasanya pada ukuran droplet dan distribusinya melalui dispersi cahaya dinamis (DLS). Sheikhi et al., (2025) menyatakan bahwa sistem yang stabil dan konsisten memiliki PDI di bawah 0,3. Salah satu komponen umum dari analisis ini adalah pengukuran potensial zeta untuk menilai tolakan elektrostatik antardroplet. Kestabilan dan risiko agregasi yang lebih rendah selalu dikaitkan dengan nilai absolut minimal 30 mV (Hosseiniyeh et al., 2024).

Studi reologi menunjukkan perilaku aliran dan ketahanan struktur internal emulsi, serta formulasi yang sangat stabil yang dapat berperilaku seperti gel (R. Ahmed et al., 2021; Kim et al., 2023). Sistem pickering biasanya memiliki sifat penurunan sinar dan dominasi komponen viskos. Uji ramp suhu juga menunjukkan perubahan struktur selama panas dan dingin. Selain itu, ini menunjukkan bahwa emulsi tahan terhadap panas (Bhutto et al., 2024).

Stabilitas gravitasi dan stabilitas penyimpanan dapat diukur dengan indeks kuantitatif seperti *Creaming Index* (CI), *Emulsification Index* (EI), dan *Emulsion Stability Index* (ESI). Nilai CI yang meningkat biasanya menunjukkan pemisahan fase atau sedimentasi, sedangkan nilai EI dan ESI menunjukkan efisiensi emulsifikasi dan kemampuan sistem untuk mempertahankan homogenitas selama penyimpanan (R. Ahmed et al., 2021; Aryanti et al., 2025; Lin et al., 2023). Banyak orang menggunakan analisis turbidimetri, yang menggunakan perubahan backscattering dan perhitungan *Turbiscan Stability Index* (TSI), untuk mendapatkan pemahaman yang lebih sensitif tentang destabilisasi. Ini disebabkan fakta bahwa mereka dapat menemukan fenomena flokulasi kecil bahkan sebelum gejala visual muncul, dan nilai TSI yang rendah jelas dikaitkan dengan stabilitas kinetik yang baik (Kim et al., 2023).

Setelah itu, karakterisasi

mikroskopis sangat penting untuk memastikan bahwa struktur fisik yang diukur secara makroskopis benar. Teknik seperti TEM dan FE-TEM memungkinkan visualisasi droplet secara langsung pada resolusi nanometer, menunjukkan morfologi sferis dan penyebaran partikel penstabil di antarmuka. Sebaliknya, SEM memberikan representasi topografi permukaan yang berkaitan dengan pemahaman karakteristik partikel penstabil dan kecenderungan agregasinya (Kim et al., 2023). Integrasi ketiga kelompok analitis ini memberikan gambaran komprehensif tentang perilaku fisik PNE. Hal ini juga memastikan bahwa proses formulasi dan parameter dapat dikaitkan secara jelas dengan kinerja stabilitas jangka panjang.

Karakteristik *Pickering Nanoemulsion* (PNE)

Ukuran droplet, struktur antarmuka, dan dinamika destabilisasi diperlukan untuk karakterisasi PNE. Distribusi droplet dan ukurannya masih sangat penting karena menentukan respons sistem terhadap gaya gravitasi, koalesensi, dan perubahan lingkungan. Pengukuran berbasis difraksi laser, atau DLS, banyak digunakan untuk menjelaskan distribusi ukuran secara kuantitatif dan sensitivitasnya terhadap keberadaan partikel penstabil (Stobba et al., 2024;). Analisis mikroskopis kemudian menambah informasi ini. Teknik seperti CLSM, SEM, dan TEM memberikan

visualisasi morfologi permukaan, distribusi partikel penstabil, dan derajat penutupan antarmuka dalam tiga dimensi. Penggunaan pewarna fluoresen memungkinkan identifikasi struktur antarmuka yang lebih akurat karena meningkatkan kontras antara fase minyak dan padatan (Gündoğdu et al., 2024; Stobba et al., 2024).

Kondisi lingkungan, terutama pH dan muatan permukaan, sangat memengaruhi kestabilan PNE dalam jangka panjang. Potensial zeta telah lama digunakan sebagai alat penting untuk mengukur kestabilan elektrostatik; nilai absolut yang tinggi menunjukkan gaya tolak yang kuat antar droplet. Studi menunjukkan bahwa perubahan pH ekstrim dapat secara signifikan mengurangi stabilitas. Misalnya, pada pH 7, emulsi yang stabil dengan efisiensi emulsifikasi lebih dari 90% dapat turun menjadi sekitar 18% pada pH 2, karena gaya tolak elektrostatik berkurang (Gündoğdu et al., 2024). Selain itu, ukuran partikel penstabil sangat menentukan ketahanan emulsinya; partikel yang terlalu kecil dapat kehilangan kemampuan menutup antarmuka secara stabil akibat dominasi gerak brownian yang mengganggu konfigurasi di antarmuka (W. Li et al., 2022; Maphosa & Jideani, 2018).

Struktur penutupan antarmuka dan sifat kelembaban partikel penstabil juga berperan penting dalam menjaga stabilitas. Partikel yang hidrofilik hidrofofik seimbang

cenderung meningkatkan adsorpsi pada antarmuka minyak air, menurunkan tegangan antarmuka, serta meningkatkan integritas lapisan pelindung terhadap koalesensi (Stobba et al., 2024; T. Xiao et al., 2025). Evaluasi karakteristik ini banyak dilakukan dengan metode tensiometri, pengukuran kenaikan kapiler, atau mikroskop gaya atom untuk memahami bagaimana interaksi partikel pada antarmuka berkontribusi terhadap ketahanan mekanik droplet. Model matematis seperti teori koalesensi dan analisis transien sering digunakan untuk menunjukkan dinamika perubahan ukuran droplet dan perilaku emulsi di bawah kondisi tidak seimbang untuk memperkuat penilaian eksperimental (T. Xiao et al., 2025).

Dalam konteks aplikasi, efisiensi enkapsulasi sangat penting. Ini terutama berlaku untuk pengiriman bioaktif. Sistem pickering, terutama yang berbasis pati termodifikasi atau protein, dapat mencapai efisiensi enkapsulasi lebih dari 80 hingga 90% dan menawarkan ketahanan termal dan oksidatif yang lebih baik daripada emulsifikasi konvensional karena lapisan pelindung yang kuat yang dibentuk pada antarmuka (Wang et al., 2024). Dengan demikian, literatur secara konsisten menunjukkan bahwa kombinasi pendekatan fisik, mikroskopis, dan analitis diperlukan untuk memahami secara menyeluruh sifat dan potensi aplikasi PNE.

Kelebihan *Pickering Nanoemulsion* (PNE)

PNE muncul sebagai strategi

stabilisasi antarmuka yang menjanjikan dengan menggabungkan keuntungan fungsional, lingkungan, dan aplikatif. Pertama dan terpenting, penggunaan partikel padat alami meningkatkan profil keberlanjutan dan keamanan untuk aplikasi pangan dan farmasi karena mengurangi ketergantungan pada surfaktan sintetis yang berpotensi toksik (Aryanti et al., 2025; Samant & Kaliappan, 2025). Kedua, stabilitas fisik jangka panjang dan ketahanan terhadap koalesensi diperoleh melalui mekanisme penstabilan partikel, yang membentuk penghalang antarmuka yang ireversibel. Ini adalah keuntungan penting untuk memperpanjang umur simpan produk. Ketiga, fleksibilitas rheologis yang diberikan oleh kemampuan untuk mengontrol jenis dan konsentrasi partikel memungkinkan untuk menyesuaikan viskositas, thixotropy, dan perilaku pemangsaan sinar sesuai dengan persyaratan aplikasi industri. Keempat, pembuatan emulsi dengan distribusi tetesan yang beragam dimungkinkan oleh kontrol mikrostruktur melalui desain ukuran dan bentuk partikel. Ini adalah komponen penting dari sistem penghantaran obat dan kosmetik. Kajian ini menunjukkan bahwa studi skala industri, evaluasi toksisitas jangka panjang, dan standar karakterisasi diperlukan untuk mempercepat translasi teknologi, meskipun bukti menunjukkan potensi adopsi industri yang luas.

Partikel Berbasis Polisakarida untuk

Pickering Nanoemulsion (PNE)

Banyak polisakarida alami, yang dikenal karena sifatnya yang aman, biodegradabel, dan biokompatibel, telah dipelajari sebagai penstabil dalam formulasi emulsi Pickering (Deng et al., 2022; Pang et al., 2021). Polisakarida memiliki afinitas alami terhadap air, yang seringkali memerlukan modifikasi fisik atau kimia untuk mencapai keseimbangan yang tepat untuk adsorpsi pada antarmuka minyak-air. Ini merupakan masalah utama dalam pemanfaatannya (Deng et al., 2022; Pang et al., 2021). Sebagai polimer karbohidrat murah, pati dapat diubah menjadi nanokristal atau nanopartikel (SNCs atau SNPs) dengan menggunakan metode hidrolisis asam atau nanoprecipitation. Ini meningkatkan luas permukaan dan memudahkan penataan antarmuka yang lebih padat (Deng et al., 2022; Pang et al., 2021). Modifikasi tambahan, seperti esterifikasi dengan Octenyl Succinic Anhydride (OSA), menambah rantai hidrofobik, meningkatkan afinitasnya terhadap fase minyak. Efek emulsifikasi telah terbukti berkorelasi langsung dengan tingkat substitusi OSA (Deng et al., 2022; Pang et al., 2021). Modifikasi ini telah ditunjukkan untuk menghasilkan emulsi yang stabil pada kisaran pH dan suhu yang berbeda (Deng et al., 2022; Pang et al., 2021).

Selain itu, selulosa sebagai polimer alam melimpah dengan stabilitas mekanik

dan termal yang tinggi dianggap sebagai stabilisator Pickering yang ideal (Deng et al., 2022; Pang et al., 2021). Material turunan selulosa, seperti Serat Selulosa Mikro (MFC) dan Nanokristal Selulosa (CNC), diproduksi melalui pemrosesan mekanik atau kimia. CNC memiliki dimensi skala nano (sekitar 5-20 nm dan dapat menstabilkan emulsi minyak dalam air meskipun sifatnya secara alami hidrofilik; hal ini disebabkan oleh pemrosesan yang memperlihatkan bidang kristal hidrofobik yang memadai untuk berinteraksi dengan antarmuka minyak (Aziz et al., 2025; Sonowal & Wani, 2025). Permukaan CNC yang bermuatan negatif (karena kelompok ester sulfat) memberikan stabilitas elektrostatik, dan peningkatan hidrofobisitas melalui penambahan kelompok ester dapat lebih meningkatkan kemampuan penstabilannya (Aziz et al., 2025). CNC juga terbukti menstabilkan Emulsi Fase Internal Tinggi (HIPEs) dengan kandungan minyak melebihi 90% (Sonowal & Wani, 2025).

Sementara itu, kitin dan kitosan juga menjadi fokus utama. Kitosan, yang diperoleh dari penghilangan gugus asetil kitin, memiliki kelarutan dan muatan yang sensitif terhadap perubahan pH (Aziz et al., 2025; Sonowal & Wani, 2025). Di bawah nilai pKa-nya (sekitar 6,5), gugus amina terprotonasi, menghasilkan partikel bermuatan positif yang larut dan memfasilitasi pembentukan PNE yang responsif terhadap pH; emulsi yang dibuat pada pH netral akan pecah pada pH

yang lebih rendah (Aziz et al., 2025). Nanokristal Kitin (ChNC), yang berbentuk batang (250 nm panjang dan 18 nm lebar), juga menunjukkan permukaan bermuatan positif yang mempromosikan tarik elektrostatik dengan tetesan minyak bermuatan negatif (Sonowal & Wani, 2025). Kitosan telah berhasil digunakan untuk enkapsulasi senyawa seperti kurkumin dan hesperidin, memberikan pelepasan berkelanjutan yang bergantung pada pH dan perlindungan yang lebih baik dibandingkan emulsi tradisional (Aziz et al., 2025).

Partikel Berbasis Protein untuk *Pickering Nanoemulsion* (PNE)

Partikel berbasis protein adalah salah satu jenis stabilisator pickering berstandar pangan yang sangat diminati karena sifatnya yang fleksibel dan kemampuan alaminya untuk beradsorpsi di antarmuka minyak air (Aziz et al., 2025; Zhang et al., 2023). Kemampuan ini memungkinkan partikel protein membentuk lapisan pelindung yang kuat dan elastis di sekitar tetesan emulsi. Beberapa arsitektur yang dapat diubah termasuk nanogel, serat protein (fibril), mikrogel, dan partikel protein emulsi (Zhang et al., 2023). Semua arsitektur ini memiliki manfaat fungsional yang berbeda-beda emulsi (Zhang et al., 2023).

Partikel protein dan mikrogel yang tidak larut biasanya berasal dari protein globular seperti kedelai, kacang polong, *whey*, zein, gelatin, dan protein telur.

Mereka dibuat dengan menggunakan teknik denaturasi terkontrol, penggumpalan, dan silang taut (Aziz et al., 2025; Sonowal & Wani, 2025). Sifat lunak dan fleksibel mikrogel merupakan keunggulan utamanya; tidak seperti partikel kaku, mereka dapat menyesuaikan diri di antarmuka, meningkatkan area permukaan yang lebih besar, dan membentuk lapisan tebal yang sangat stabil terhadap penggabungan tetesan (Aziz et al., 2025). Dalam emulsi fase internal tinggi (HIPEs), stabilitas ini sangat penting karena konsentrasi gelatin yang rendah (0,5% berat) dapat menstabilkan lebih dari 74% kandungan minyak (Sonowal & Wani, 2025). Untuk meningkatkan kekuatan mekanis dan stabilitas dalam jangka panjang, silang taut, baik melalui ikatan disulfida maupun agen silang pangan seperti genipin, sangat penting (Aziz et al., 2025).

Ketika protein dihidrolisis atau didenaturasi, serat protein atau nanofibril terbentuk, menciptakan struktur panjang yang semi-fleksibel melalui ikatan non kovalen dan interaksi hidrofobik (Aziz et al., 2025; Zhang et al., 2023). Fibril ini sering dibentuk oleh protein seperti β -laktoglobulin (dari *whey*) dan ovo transferrin (dari putih telur). Fibril menawarkan keuntungan rasio panjang lebar yang tinggi, memfasilitasi penataan yang saling terhubung di antarmuka dan sekitarnya, yang memberikan ketahanan mekanis efektif terhadap pecahnya tetesan (Aziz et al., 2025; Zhang et

al., 2023). Misalnya, emulsi yang distabilkan fibril β laktoglobulin mempertahankan stabilitas di seluruh rentang kekuatan ionik (0-1000 mM) dan pH netral (2-7), kondisi di mana stabilisator standar mungkin gagal (Xia et al., 2021). Terakhir, nanogel protein adalah partikel hidrogel kecil berukuran nanometer yang menggabungkan hidrasi tinggi dan porositas (Aziz et al., 2025; Zhang et al., 2023). Nanogel kasein, yang dibuat melalui metode seperti presipitasi sendiri atau koaservasi, telah menstabilkan HEPs dengan viskoelastisitas tinggi. Ini menjadikannya kandidat yang ideal untuk penghantaran bahan hidrofobik atau nutraceutical (Aziz et al., 2025; Zhang et al., 2023). Nanogel juga dapat diubah secara khusus. Sebagai contoh, isolat protein rapeseed yang diasialasi dapat menghasilkan PNE yang sangat tahan terhadap penggabungan bahkan dalam situasi dengan pH dan konsentrasi garam yang sangat tinggi (Aziz et al., 2025; Zhang et al., 2023).

Jenis Partikel Penstabil

Koloidal kristalin yang terbuat dari trigliserida atau molekul lipid lainnya dikenal sebagai kristal lemak memiliki kemampuan untuk menstabilkan emulsi air dalam minyak (W/O), yang biasanya ditemukan dalam margarin dan produk olesan (Aziz et al., 2025; Sonowal & Wani, 2025). Dalam kedua stabilisasi pickering dan stabilisasi jaringan, kristal lemak melakukan dua fungsi yang

seringkali saling melengkapi untuk menstabilkan emulsi. Dalam stabilisasi pickering, kristal lemak individu menempel di antarmuka minyak air, membentuk jaringan tiga dimensi dalam fase minyak kontinu, yang memungkinkan tetesan air uap (Sonowal & Wani, 2025). Mekanisme yang dominan bergantung pada jenis lemak, trigliserida cenderung menstabilkan melalui pembentukan jaringan, sedangkan lemak yang lebih aktif di permukaan, seperti monogliserida jenuh (misalnya, gliserol monostearat, GMS), lebih mengandalkan mekanisme *pickering* (Sonowal & Wani, 2025).

Efektivitas stabilisasi ini sangat sensitif terhadap mikrostruktur kristal (Sonowal & Wani, 2025). Ukuran dan bentuk kristal sangat menentukan, kristal yang lebih kecil dan berbentuk lempengan menawarkan penutupan permukaan yang lebih padat di antarmuka, menghasilkan emulsi yang lebih stabil (Sonowal & Wani, 2025). Sebaliknya, kristal besar dan berbentuk jarum dapat merusak stabilitas, menonjol keluar dari antarmuka, dan menghubungkan tetesan, yang menyebabkan agregasi dan destabilisasi (Sonowal & Wani, 2025). Selain itu, polimorfisme lemak eksistensi dalam bentuk kristal yang berbeda memainkan peran krusial. Bentuk α yang tidak stabil, serta bentuk β' dan β , adalah polimorf yang umum; transisi dari α ke β sering menghasilkan kristal berbentuk jarum yang

tidak diinginkan (Sonowal & Wani, 2025). Oleh karena itu, mengontrol dan mempertahankan polimorf β yang tepat sangat penting untuk mencapai stabilitas emulsi jangka panjang (Sonowal & Wani, 2025). Kristal lemak juga sering bekerja secara sinergis dengan emulsifier lain, seperti sistem yang mengandung 12% kristal GMS dan 12% poliglycerol polyricinoleate (PGPR) untuk menstabilkan sistem penghantaran *self double emulsifying* (Aziz et al., 2025; Sonowal & Wani, 2025).

Fondasi Aplikasi Strategis Masa Depan Pickering Nanoemulsion (PNE)

Arsitektur koloid Pickering Nanoemulsion (PNE) telah menjadi revolusioner di bidang ilmiah dan industri. PNE adalah alternatif yang menarik terhadap penggunaan surfaktan konvensional karena stabilitas dan fungsionalitasnya yang meningkat (Kilinc, 2025; Q. Li et al., 2021; W. Li et al., 2022). Ini dapat digunakan di berbagai industri yang menghadapi keterbatasan penggunaan surfaktan sintetis karena masalah toksisitas, kompatibilitas, dan biodegradabilitas (Fernandes et al., 2023; Hossain et al., 2021). Selain itu, PNE semakin banyak digunakan dalam berbagai bentuk karena kebutuhan akan lebih banyak material yang tidak berbahaya, aman bagi lingkungan, dan mudah terurai (Hossain et al., 2021). Salah satu manfaat utama PNE adalah penggunaan potongan-potongan padat, biasanya berupa potongan-potongan

kecil alami atau aman untuk pangan seperti protein, pati, atau biopolimer, yang melekat kuat pada minyak dan air di tempat bertemunya. Kemampuan nanodroplet PNE (berukuran 50–500 nm) untuk meningkatkan dispersibilitas air dan bioavailabilitas nutrisi lipofilik menjadikannya strategi yang sangat efektif untuk memajukan teknologi stabilisasi nutrisi dan penghantaran bertarget. Emulsi ini berperan penting dalam meningkatkan penyampaian nutrisi melalui proses enkapsulasi senyawa sensitif secara efektif, sehingga memastikan perlindungannya dan memungkinkan pelepasan yang terkontrol dalam matriks pangan (Deng et al., 2022; Kilinc, 2025). Selain fungsi utamanya menjaga kesegaran, emulsi Pickering juga membantu menciptakan pilihan makanan rendah lemak yang baru dan menarik. Hal ini dilakukan dengan menjaga rasa dan tekstur makanan tetap baik sekaligus mengurangi jumlah lemak di dalamnya secara signifikan (Deng et al., 2022; Kilinc, 2025).

Perlindungan dan Peningkatan Bioavailabilitas pada bidang Farmasi, Kosmetik, dan Pelapis

Kualitas khusus PNE, terutama ketika distabilkan oleh partikel yang dapat kita makan, membuatnya sangat bermanfaat untuk obat-obatan dan produk kecantikan (Deng et al., 2022; W. Li et al., 2022). Keunggulan utamanya adalah seberapa baik PNE dapat menjaga keamanan bahan aktif dan seberapa akurat mereka dapat mengatur

pelepasan bahan-bahan tersebut. Hal tersebut penting bagi sistem penghantaran obat tingkat lanjut maupun formulasi kosmetik modern (Deng et al., 2022). Pemilihan partikel berbasis polisakarida, protein, lipid, atau kombinasi di antaranya secara cermat berperan sebagai agen penstabil yang mampu memenuhi kebutuhan akan bahan yang lebih aman dan lebih kompatibel dalam aplikasinya (Hossain et al., 2021). PNE juga memberikan pilihan yang baik untuk digunakan dalam pelapisan, karena lebih sedikit iritasi dan sangat kecil kemungkinannya membahayakan lingkungan (Hossain et al., 2021; M. Xiao et al., 2018). Kekuatan dan kestabilan yang ditingkatkan sangat penting untuk membuat produk lebih tahan lama dan bekerja lebih baik dengan lapisan pelindung (Kilinc, 2025; W. Li et al., 2022; M. Xiao et al., 2018). Selain itu, kemampuannya dalam mengendalikan pelepasan bahan aktif sangat diinginkan pada sistem pelapis canggih, karena memungkinkan enkapsulasi senyawa sensitif dan pelepasannya secara terkontrol sesuai kebutuhan (Kilinc, 2025; W. Li et al., 2022). Kemampuan PNE untuk membentuk kapsul-kapsul kecil dan zat-zat berpori menunjukkan potensinya dalam menciptakan pola pelepasan yang dapat diubah dalam struktur pelapis (M. Xiao et al., 2018). Beragamnya jenis partikel yang dapat dikonsumsi, beserta kemampuannya untuk diperbarui, kemudahan penyiapan, dan kompatibilitas

yang tinggi dengan jaringan hidup, juga memungkinkan terciptanya pelapis yang ramah lingkungan dan dirancang khusus dengan beragam fitur yang dibutuhkan.

Enkapsulasi Kurkumin

Kurkumin, suatu unsur polifenol alami dengan aksi antioksidan dan anti-inflamasi, memiliki keterbatasan karena sulit larut dalam air dan tidak terlalu stabil (Kharat et al., 2018; Silva et al., 2024). Namun, PNE dapat mengatasi berbagai masalah ini dengan sangat baik. PNE yang dijaga kestabilannya oleh ikatan protein-polisakarida, seperti ikatan Pea Protein Isolate Dextran (PPI DX), menunjukkan efisiensi yang tinggi dalam mengikat kurkumin, seringkali lebih dari 80% (Kim et al., 2024; Xue & Luo, 2023). Peningkatan ini berasal dari perubahan protein melalui reaksi Maillard.

Konjugat PPI DX yang terbentuk dapat beradsorpsi pada antarmuka tetesan minyak dan membentuk lapisan pelindung yang tebal serta kokoh, sehingga mampu membatasi difusi dan degradasi kurkumin (Kim et al., 2024; Xue & Luo, 2023).

Kinerja sistem penghantaran kurkumin sangat dipengaruhi oleh karakteristik molekuler partikel penstabil. Dalam sistem yang menggunakan kitosan, jumlah obat yang dapat dimuat dan efektivitasnya ditentukan oleh ukuran dan tingkat deasetilasi material kitosan (Bidooki et al., 2024; Herdiana et al., 2024). Nanopartikel

kitosan yang lebih besar dan memiliki tingkat deasetilasi yang lebih rendah (sekitar 80%) lebih tahan air, sehingga lebih efektif dan melepaskan kurkumin dengan cara yang lebih teratur. Misalnya, kitosan berukuran besar dapat memperlambat pelepasan kurkumin pada pH 7,4 dibandingkan dengan kitosan berukuran kecil, yang penting untuk sistem penghantaran obat yang ditujukan ke usus (Bidooki et al., 2024; Herdiana et al., 2024).

Penghantaran Nutrisi Lipofilik

PNE sangat efektif untuk mengenkapsulasi berbagai nutrisi lipofilik seperti lutein, β -karoten, kurkumin, dan

resveratrol sehingga dapat meningkatkan stabilitas serta bioaksesibilitasnya secara keseluruhan (Ardila et al., 2024; Roig et al., 2023). Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah pati yang telah dimodifikasi secara kimia. Pati *Tartary Buckwheat* yang dimodifikasi dengan Octenyl Succinic Anhydride (OSTBS) dapat berfungsi sebagai penstabil untuk PNE yang sangat kecil (Lin et al., 2023). Perubahan ini memberikan partikel pati sifat yang menolak air, memungkinkan partikel OS-TBS melekat erat pada batas minyak dan air, menjaga tetesan nanoemulsi tetap stabil pada ukuran sekitar 300–400 nm.

Tabel 2. Keunggulan fungsional PNE dalam sistem penghantaran bioaktif

Senyawa Bioaktif	Tujuan Aplikasi	Keunggulan PNE	Referensi
Kurkumin (Lipofilik, Sensitif)	Pangan fungsional, farmasi, kosmetik	Peningkatan EE/DLC (>80%); stabilitas termal dan pelepasan terkendali (pH-responsive)	Kim et al., 2024; Xue & Luo, 2023
Minyak Atsiri (Eucalyptus)	Pengawet pangan, pelapis bioaktif, <i>Wound dressing</i>	Peningkatan bioaktivitas antimikroba; stabilitas termal matriks tinggi; peningkatan hidrofobisitas	Khan et al., 2023; Lopes et al., 2025
Nutrisi Lipofilik (Lutein, Resveratrol)	Minuman diperkaya suplemen	Peningkatan dispersibilitas air; perlindungan oksidatif	Ardila et al., 2024; Roig et al., 2023
Rutin	Farmasi, <i>wound healing</i>	Pembawa biokompatibel; stabilitas jangka panjang; pelepasan terkendali	Pires et al., 2023; Saghazadeh et al., 2018

Aplikasi fungsional : ketahanan PNE terhadap tekanan proses industri

Ketahanan PNE di bawah tekanan suhu, pH, dan ionik adalah prasyarat utama untuk aplikasi pada skala industri makanan, minuman, dan farmasi.

Stabilitas termal dan sterilisasi

PNE menunjukkan kemampuan yang luar biasa untuk menahan panas, sehingga cocok untuk barang-barang yang membutuhkan sterilisasi yang kuat. PNE yang distabilkan oleh *Whey Protein Isolate* (WPI) dengan zat pembantu positif

(Hexadecyltrimethylammonium bromide / CTAB) atau negatif (Sodium Dodecyl Sulfate/SDS) telah terbukti sangat stabil (Kezwoń et al., 2016; Xin et al., 2013). Bahkan setelah diautoklaf selama 15 menit pada suhu 121°C, emulsi kecil ini masih dapat mempertahankan ukuran droplet dan Indeks Polidispersitas (PDI). Ini adalah sesuatu yang WPI dan WPI Tween 20 tidak dapat lakukan tanpa zat pembantu (Borba et al., 2019; Khalid et al., 2017). Selain itu, campuran Pea Protein Isolate Dextran (PPI-DX) melindungi kurkumin lebih baik selama pemanasan (Guo et al., 2020; Kim et al., 2024). Jumlah kurkumin yang tersisa masih lebih dari 44% setelah autoklaf, jauh lebih banyak dibandingkan dengan PPI biasa (Guo et al., 2020; Kim et al., 2024). Kekuatan ini berasal dari desain antarmuka yang lebih baik, di mana ikatan yang kuat dalam campuran atau gaya tolak-menolak yang kuat antar droplet mencegah penggumpalan akibat kerusakan akibat panas.

Ketahanan terhadap fluktuasi pH dan kekuatan ionik

PNE telah terbukti mampu mengatasi masalah umum penggumpalan

protein ketika berada di sekitar titik isoelektrik (pI). Campuran PPI DX menunjukkan perlindungan yang lebih baik terhadap penggumpalan di dekat pI protein ($pI \approx 4,3$), sekaligus menjaga ukuran tetesan tetap relatif kecil dibandingkan dengan PPI murni (Tamnak et al., 2016; Velzi et al., 2025). Demikian pula, PNE yang distabilkan oleh WPI dengan bahan pembantu seperti Tween 20 atau SDS dapat menjaga ukuran tetesan nano tetap stabil di sekitar pI WPI (sekitar pH 5,5) (Teo et al., 2016). PNE yang distabilkan oleh nanopartikel kitosan tetap stabil secara fisik antara 100 dan 500 mM natrium klorida. Ini menunjukkan bahwa PNE sangat efektif di lingkungan dengan banyak ion (Bashir et al., 2022; Mwangi et al., 2016). Kestabilan ini sangat penting untuk pembuatan obat-obatan dan makanan yang biasanya mengandung garam. Ketika partikel kitosan menggumpal secara terkendali dan mempertahankan ukuran tetesan potensial zeta positif selama 60 hari pada suhu 40°C, ini menunjukkan bahwa partikel tersebut dapat disimpan untuk waktu yang lama (M. Ahmed & Lu, 2025; Gamboa et al., 2024; Szymańska & Winnicka, 2015).

Tabel 3. PNE dalam mengatasi tantangan pemrosesan pangan dan lingkungan

Tantangan lingkungan / proses	Contoh PNE yang teruji (Stabilisator)	Kinerja stabilitas	Referensi
Perlakuan termal ekstrem (Autoclave)	WPI-SDS/CTAB; PPI-DX Konjugat	Mempertahankan ukuran nano droplet (stabil); retensi muatan tinggi	Borba et al., 2019; Khalid et al., 2017
Fluktuasi pH (Dekat pI protein)	PPI-DX Konjugat; WPI-SDS/Tween 20	Menghambat agregasi droplet; stabilitas unggul pH 3.0-9.0	Tamnak et al., 2016; Velzi et al., 2025
Kekuatan ionik tinggi	Nanopartikel	Stabilitas fisik yang baik	Bashir et al.,

(Salinitas)	Kitosan; WPI-Tween 20	(hingga 300–500 mM NaCl)	2022; Mwangi et al., 2016
Stabilitas jangka panjang (hingga 60 hari)	Nanopartikel kitosan (HMW); OS-TBS Starch	Ukuran droplet stabil; indeks kremasi rendah	Lin et al., 2023

Aplikasi PNE dalam biomedis, material fungsional, dan teknik kimia

PNE bertindak sebagai desain yang bermanfaat untuk menciptakan material dan sistem kerja baru di luar area makanan biasa, seperti dalam penggunaan medis, material tahan lama, dan rekayasa kimia yang aman.

Aplikasi farmasi dan biomedis

PNE berfungsi sebagai pembawa yang ramah tubuh untuk mengantarkan obat ke seluruh tubuh atau ke kulit, misalnya dalam perawatan luka (Pires et al., 2023; Saghazadeh et al., 2018). Kitosan, yang bekerja dengan baik di dalam tubuh dan melawan kuman, dapat digunakan dalam metode pengantaran yang bertujuan mempercepat penyembuhan luka (Naveedunissa et al., 2025; Shah et al., 2025). Selain itu, PNE sedang diuji sebagai cara untuk mengantarkan obat kemoterapi, seperti doksorubisin hidroklorida, dan sebagai bahan pembantu yang fleksibel dalam campuran vaksin yang dapat membuat lebih banyak antigen diserap oleh sel yang menunjukkan antigen (Begines et al., 2020; Bhadran et al., 2025). Lebih lanjut, emulsi Pickering digunakan sebagai templat untuk membentuk perancah makroberpori (*scaffolds*) yang sesuai untuk aplikasi

rekayasa jaringan (*tissue engineering*) (Ajayi et al., 2025; Dikici & Claeysens, 2020).

Material fungsional dan film edible bioaktif

PNE yang mengandung minyak atsiri (*essential oil*/EO) dapat dimasukkan ke dalam matriks biopolimer untuk menghasilkan edible film yang fungsional dan berkelanjutan, dapat digunakan sebagai pelapis bioaktif maupun bahan pengemas (Khan et al., 2023; Lopes et al., 2025). Film komposit yang diperkaya dengan EO eucalyptus yang distabilkan oleh PNE menunjukkan peningkatan aktivitas antimikroba yang signifikan, misalnya zona inhibisi sebesar $15 \pm 2,5$ mm terhadap *Staphylococcus aureus*, serta peningkatan stabilitas termal hingga sekitar 600°C (Fang et al., 2025; Sheikhi et al., 2025). PNE juga meningkatkan sifat penghalang film. Jika sesuatu lebih buram, maka ia lebih mampu menghalangi sinar UV, dan jika sudut kontak air meningkat, permukaannya lebih mampu menolak air, yang membantu pelapis makanan menjauhkan kelembapan.

KESIMPULAN

Pickering Nanoemulsion (PNE) yang terbuat dari bahan pangan alami terbukti menjadi cara yang ampuh untuk mengatasi masalah kelarutan dan kemudahan penguraian zat bioaktif yang menyukai lemak.

Stabilitas PNE yang tahan lama berasal dari partikel padat yang menempel pada batas antara minyak dan air, sehingga membentuk penghalang fisik yang kuat dan mampu menahan perubahan suhu dan pH dengan sangat baik. Fitur-fitur bermanfaat ini, seperti kemampuan untuk memerangkap banyak zat dan melepaskannya secara perlahan, menjadikan PNE sebagai teknologi kunci untuk meningkatkan stabilitas dan pemanfaatan makanan fungsional dan penggunaan medis dalam hal penggunaan yang lebih baik oleh tubuh

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, M., & Lu, Y. (2025). Synthesis of Chitosan Nanoparticles via Microfluidic Approach: The Role of Temperature in Tailoring Aggregation for Enhanced Uniformity. *Micromachines*, 16(6), 642. <https://doi.org/10.3390/mi16060642>
- Ahmed, R., Wang, M., Qi, Z., Hira, N. ul ain, Jiang, J., Zhang, H., Iqbal, S., Wang, J., Stuart, M. A. C., & Guo, X. (2021). Pickering Emulsions Based on the pH-Responsive Assembly of Food-Grade Chitosan. *ACS Omega*, 6(28), 17915–17922. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01490>
- Ajayi, S. M., Olusanya, S. O., Abimbade, S. F., Faboya, O. L., Olumayede, E. G., Akintayo, C. O., & Malomo, D. (2025). Pickering emulsions: Physicochemical properties and recent applications in engineering. *Hybrid Advances*, 11, 100509. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100509>
- Ardila, A. H., Carvajal, M. X. Q., & Moreno, F. L. (2024). Emulsification and stabilisation technologies used for the inclusion of lipophilic functional ingredients in food systems. *Heliyon*, 10(11), e32150. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32150>
- Aryanti, N., Adina, A. R., Nafiunisa, A., & Wardhani, D. H. (2025). Engineering novel stabilizers for Pickering nanoemulsions: The role of ultrasonic modification in pea protein-chitosan complexes. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101228. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101228>
- Aziz, T., Rohullah, Ullah, A., Zeb, U., Hussain, M., Ali, A., Haq, F., & Kiran, M. (2025). Advancements in cellulose nanocrystals: A review of functionalization, applications, and challenges. *International Journal of Biological Macromolecules*, 315, 144552. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144552>
- Bashir, S. M., Ahmed Rather, G., Patricio, A., Haq, Z., Sheikh, A. A., Shah, M. Z. ul H., Singh, H., Khan, A. A., Imtiyaz, S., Ahmad, S. B., Nabi, S., Rakhshan, R., Hassan, S., & Fonte, P. (2022). Chitosan Nanoparticles: A Versatile Platform for Biomedical Applications. *Materials*, 15(19), 6521. <https://doi.org/10.3390/ma15196521>
- Begines, B., Ortiz, T., Pérez-Aranda, M., Martínez, G., Merinero, M., Argüelles-Arias, F., & Alcudia, A. (2020). Polymeric Nanoparticles for Drug Delivery: Recent Developments and Future Prospects. *Nanomaterials*, 10(7), 1403. <https://doi.org/10.3390/nano10071403>
- Bhadran, A., Polara, H., Babanyinah, G. K., Baburaj, S., & Stefan, M. C. (2025). Advances in Doxorubicin

- Chemotherapy: Emerging Polymeric Nanocarriers for Drug Loading and Delivery. *Cancers*, 17(14), 2303. <https://doi.org/10.3390/cancers17142303>
- Bhutto, R. A., Bhutto, N. ul ain H., Wang, M., Iqbal, S., & Yi, J. (2024). Curcumin-loaded Pickering emulsion stabilized by pH-induced self-aggregated chitosan particles: Effects of degree of deacetylation and molecular weight. *Food Hydrocolloids*, 147, 109422. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109422>
- Bidooki, S. H., Spitzer, L., Petitpas, A., Sánchez-Marco, J., Martínez-Beamonte, R., Lasheras, R., Pellerin, V., Rodríguez-Yoldi, M. J., Navarro, M. A., Osada, J., & Fernandes, S. C. M. (2024). Chitosan Nanoparticles, a Novel Drug Delivery System to Transfer Squalene for Hepatocyte Stress Protection. *ACS Omega*, 9(52), 51379–51393. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c08258>
- Borba, C. M., Tavares, M. N., Macedo, L. P., Araújo, G. S., Furlong, E. B., Dora, C. L., & Burkert, J. F. M. (2019). Physical and chemical stability of β -carotene nanoemulsions during storage and thermal process. *Food Research International*, 121, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.045>
- Cassani, L., & Gomez-Zavaglia, A. (2024). Pickering emulsions in food and nutraceutical technology: from delivering hydrophobic compounds to cutting-edge food applications. *Exploration of Foods and Foodomics*, 2(5), 408–442. <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00044>
- Chhabra, N., Shiriskar, J., & Srinivasan, G. (2025). Current and Future Market of the Dietary Supplements and Nutraceuticals in the Global Economy. In *Dietary Supplements and Nutraceuticals* (pp. 965–1012). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8622-3_29
- Chutia, H., & Mahanta, C. L. (2021). Properties of starch nanoparticle obtained by ultrasonication and high pressure homogenization for developing carotenoids-enriched powder and Pickering nanoemulsion. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 74, 102822. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102822>
- Deng, W., Li, Y., Wu, L., & Chen, S. (2022). Pickering emulsions stabilized by polysaccharides particles and their applications: a review. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.24722>
- Dikici, B. A., & Claeysens, F. (2020). Basic Principles of Emulsion Templating and Its Use as an Emerging Manufacturing Method of Tissue Engineering Scaffolds. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00875>
- Du, C., Zhu, G., Hu, H., Duan, Z., Luo, S., Lin, L., Lu, J., & Zheng, Z. (2024). Influence of droplet size and surface hydrophobicity of soybean protein-based nanoemulsion fillers on the quality of silver carp myofibrillar protein gels. *Food Chemistry: X*, 24, 101866. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101866>
- Fang, Z., Yang, Y., Lin, S., Xu, L., Chen, S., Lv, W., Wang, N., Dong, S., Lin, C., Xie, Y., Liu, J., Meng, M., Wen, W., & Yang, Y. (2025). Development and antimicrobial activity of composite edible films of chitosan and nisin incorporated with perilla essential oil-glycerol monolaurate emulsions.

- Food Chemistry*, 462, 141006.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141006>
- Fernandes, N. A. T., Simões, L. A., & Dias, D. R. (2023). Comparison of Biodegradability, and Toxicity Effect of Biosurfactants with Synthetic Surfactants. In *Advancements in Biosurfactants Research* (pp. 117–136). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-21682-4_6
- Foo, M. L., Ooi, C. W., Tan, K. W., & Chew, I. M. L. (2022). Preparation of black cumin seed oil Pickering nanoemulsion with enhanced stability and antioxidant potential using nanocrystalline cellulose from oil palm empty fruit bunch. *Chemosphere*, 287, 132108.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132108>
- Gamboa, R. E. D. B., Oca, G. de M., Baudrit, J. R. V., Ríos Duarte, L. C., Lopretti, M., Rentería Urquiza, M., Zúñiga-Umaña, J. M., Barreiro, F., & Vázquez, P. (2024). Synthesis of chitosan nanoparticles (CSNP): effect of CH-CH-TPP ratio on size and stability of NPs. *Frontiers in Chemistry*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1469271>
- Gauthier, G., & Capron, I. (2021). Pickering nanoemulsions: An overview of manufacturing processes, formulations, and applications. *JCIS Open*, 4, 100036.
<https://doi.org/10.1016/j.jciso.2021.100036>
- Geng, S., Yuan, Y., Jiang, X., Zhang, R., Ma, H., Liang, G., & Liu, B. (2023). An investigation on pickering nano-emulsions stabilized by dihydromyricetin/high-amylose corn starch composite particles: Preparation conditions and carrier properties. *Current Research in Food Science*, 6, 100458.
<https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100458>
- Gündoğdu, G., Yılmaz Topuzlu, E., Mutlu, F., Ertekin, U. E., & Okur, H. I. (2024). Oil-in-Water Emulsions Probed Using Fluorescence Multivariate-Curve-Resolution Spectroscopy. *Langmuir*, 40(25), 13116–13121.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c01018>
- Guo, Q., Su, J., Xie, W., Tu, X., Yuan, F., Mao, L., & Gao, Y. (2020). Curcumin-loaded pea protein isolate-high methoxyl pectin complexes induced by calcium ions: Characterization, stability and in vitro digestibility. *Food Hydrocolloids*, 98, 105284.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105284>
- GVA. (2025). *Market analysis report : nutraceutical market summary (2025-2030)*.
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/nutraceuticals-market>
- Herdiana, Y., Febrina, E., Nurhasanah, S., Gozali, D., Elamin, K. M., & Wathoni, N. (2024). Drug Loading in Chitosan-Based Nanoparticles. *Pharmaceutics*, 16(8), 1043.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16081043>
- Hossain, K. M. Z., Deeming, L., & Edler, K. J. (2021). Recent progress in Pickering emulsions stabilised by bioderived particles. *RSC Advances*, 11(62), 39027–39044.
<https://doi.org/10.1039/D1RA08086E>
- Hosseiniyeh, N., Mohtarami, F., Almasi, H., & Azizi, S. (2024). Soy protein isolate film activated by black seed oil nanoemulsion as a novel packaging for shelf-life extension of bulk bread. *Food Science & Nutrition*, 12(3), 1706–1723.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.3864>
- Hunter, S. J., & Armes, S. P. (2022). Long-Term Stability of Pickering

- Nanoemulsions Prepared Using Diblock Copolymer Nanoparticles: Effect of Nanoparticle Core Crosslinking, Oil Type, and the Role Played by Excess Copolymers. *Langmuir*, 38(26), 8021–8029. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00821>
- Hunter, S. J., Chohan, P., Varlas, S., & Armes, S. P. (2024). Effect of Temperature, Oil Type, and Copolymer Concentration on the Long-Term Stability of Oil-in-Water Pickering Nanoemulsions Prepared Using Diblock Copolymer Nanoparticles. *Langmuir*. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03423>
- Jiang, L., Zhang, Z., Qiu, C., & Wen, J. (2024). A Review of Whey Protein-Based Bioactive Delivery Systems: Design, Fabrication, and Application. *Foods*, 13(15), 2453. <https://doi.org/10.3390/foods13152453>
- Kezwoń, A., Góral, I., Frączyk, T., & Wojciechowski, K. (2016). Effect of surfactants on surface activity and rheological properties of type I collagen at air/water interface. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 148, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.08.058>
- Khalid, N., Shu, G., Holland, B. J., Kobayashi, I., Nakajima, M., & Barrow, C. J. (2017). Formulation and characterization of O/W nanoemulsions encapsulating high concentration of astaxanthin. *Food Research International*, 102, 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.019>
- Khan, S., Abdo, A., Shu, Y., Zhang, Z., & Liang, T. (2023). The Extraction and Impact of Essential Oils on Bioactive Films and Food Preservation, with Emphasis on Antioxidant and Antibacterial Activities—A Review. *Foods*, 12(22), 4169. <https://doi.org/10.3390/foods12224169>
- Kharat, M., Zhang, G., & McClements, D. J. (2018). Stability of curcumin in oil-in-water emulsions: Impact of emulsifier type and concentration on chemical degradation. *Food Research International*, 111, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.021>
- Kilinc, I. (2025). Pickering emulsion technology: An overview of stability and functionality in food processing. *Food Nutrition Chemistry*, 3(2), 354. <https://doi.org/10.18686/fnc354>
- Kim, Y. J., Kim, B.-K., & Lee, M. H. (2023). Effect of small molecular surfactants on physical, turbidimetric, and rheological properties of Pickering nanoemulsions stabilized with whey protein isolate. *Food Bioscience*, 51, 102214. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102214>
- Kim, Y. J., Yong, H. I., Chun, Y. G., Kim, B.-K., & Lee, M. H. (2024). Physicochemical characterization and environmental stability of a curcumin-loaded Pickering nanoemulsion using a pea protein isolate-dextran conjugate via the Maillard reaction. *Food Chemistry*, 436, 137639. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137639>
- Lee, M. H., Kim, H. Do, & Jang, Y. J. (2024). Delivery systems designed to enhance stability and suitability of lipophilic bioactive compounds in food processing: A review. *Food Chemistry*, 437, 137910. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137910>
- Li, Q., Wu, Y., Fang, R., Lei, C., Li, Y., Li, B., Pei, Y., Luo, X., & ShilinLiu. (2021). Application of Nanocellulose as particle stabilizer in food Pickering emulsion: Scope, Merits and

- challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.027>
- Li, W., Jiao, B., Li, S., Faisal, S., Shi, A., Fu, W., Chen, Y., & Wang, Q. (2022). Recent Advances on Pickering Emulsions Stabilized by Diverse Edible Particles: Stability Mechanism and Applications. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.864943>
- Lin, J., Fan, S., Ruan, Y., Wu, D., Yang, T., Hu, Y., Li, W., & Zou, L. (2023). Tartary Buckwheat Starch Modified with Octenyl Succinic Anhydride for Stabilization of Pickering Nanoemulsions. *Foods*, 12(6), 1126. <https://doi.org/10.3390/foods12061126>
- Lopes, A. I., Melo, A., Afonso, T. B., Silva, S., Barros, L., Tavará, F. K., & Pintado, M. (2025). Alginate Edible Films Containing Essential Oils: Characterization and Bioactive Potential. *Polymers*, 17(9), 1188. <https://doi.org/10.3390/polym17091188>
- Lu, J., Yin, X., Wu, Q., Wang, M., Han, L., & Su, S. (2025). Fabrication and stability of Pickering nanoemulsion stabilized by self-aggregated chitosan nanoparticles. *Food Chemistry*, 484, 144445. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144445>
- Maphosa, Y., & Jideani, V. A. (2018). Factors Affecting the Stability of Emulsions Stabilised by Biopolymers. In *Science and Technology Behind Nanoemulsions*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75308>
- Meng, W., Sun, H., Mu, T., & Garcia-Vaquero, M. (2024). Future trends in the field of Pickering emulsions: Stabilizers, spray-dried microencapsulation and rehydration for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 150, 104610. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104610>
- Mitbumrung, W., & Matsukawa, S. (2024). Cellulose nanocrystal stabilized pickering nanoemulsions and their coalescence stability studied by fluorescence microscopy. *Food Hydrocolloids*, 149, 109594. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109594>
- Mwangi, W. W., Ho, K.-W., Tey, B.-T., & Chan, E.-S. (2016). Effects of environmental factors on the physical stability of pickering-emulsions stabilized by chitosan particles. *Food Hydrocolloids*, 60, 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.04.023>
- Naveedunissa, S., Meenalotchani, R., Manisha, M., Ankul Singh, S., Nirenjen, S., Anitha, K., Harikrishnan, N., & Prajapati, B. G. (2025). Advances in chitosan based nanocarriers for targetted wound healing therapies: a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 11, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100891>
- Pang, B., Liu, H., & Zhang, K. (2021). Recent progress on Pickering emulsions stabilized by polysaccharides-based micro/nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 296, 102522. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102522>
- Pires, P. C., Mascarenhas-Melo, F., Pedrosa, K., Lopes, D., Lopes, J., Macário-Soares, A., Peixoto, D., Giram, P. S., Veiga, F., & Paiva-Santos, A. C. (2023). Polymer-based biomaterials for pharmaceutical and biomedical applications: A focus on topical drug administration. *European Polymer Journal*, 187, 111868. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.111868>

- 023.111868
- Puri, V., Nagpal, M., Singh, I., Singh, M., Dhingra, G. A., Huanbutta, K., Dheer, D., Sharma, A., & Sangnim, T. (2022). A Comprehensive Review on Nutraceuticals: Therapy Support and Formulation Challenges. *Nutrients*, 14(21), 4637. <https://doi.org/10.3390/nu14214637>
- Risnawati, R., Muharram, M., & Jusniar, J. (2021). Isolasi dan Identifikasi Senyawa Metabolit Sekunder Ekstrak n-heksana Tumbuhan Meniran (*Phyllanthus niruri* Linn.). *Chemica: Jurnal Ilmiah Kimia Dan Pendidikan Kimia*, 22(1), 65. <https://doi.org/10.35580/chemica.v22i1.21730>
- Roig, J. T., Oliu, G. O., Serrano, I. O., & Belloso, O. M. (2023). Emulsion-Based Delivery Systems to Enhance the Functionality of Bioactive Compounds: Towards the Use of Ingredients from Natural, Sustainable Sources. *Foods*, 12(7), 1502. <https://doi.org/10.3390/foods12071502>
- Saghazadeh, S., Rinoldi, C., Schot, M., Kashaf, S. S., Sharifi, F., Jalilian, E., Nuutila, K., Giatsidis, G., Mostafalu, P., Derakhshandeh, H., Yue, K., Swieszkowski, W., Memic, A., Tamayol, A., & Khademhosseini, A. (2018). Drug delivery systems and materials for wound healing applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 127, 138–166. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.04.008>
- Samant, B. S., & Kaliappan, R. (2025). The use of surfactants in the extraction of active ingredients from natural resources: a comprehensive review. *RSC Advances*, 15(29), 23569–23587. <https://doi.org/10.1039/D5RA02072G>
- Shah, J., Patel, D., Ranavavare, D., Hudson, D., Tran, M., Schloss, R., Langrana, N., Berthiaume, F., & Kumar, S. (2025). Recent Advancements in Chitosan-Based Biomaterials for Wound Healing. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(2), 45. <https://doi.org/10.3390/jfb16020045>
- Sheikhi, M., Moghimi, R., & Rezazadeh, F. (2025). Development of bio-based nanoemulsion and pickering emulsion systems of eucalyptus essential oil stabilized by Persian Gum–HPMC–chitosan biopolymers: Toward industrial applications in functional films and sustainable biomaterials. *Industrial Crops and Products*, 234, 121642. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121642>
- Silva, C. B., Vlad, A., Ricciarelli, R., Fassini, P. G., Suen, V. M. M., & Zingg, J.-M. (2024). Enhancing the Bioavailability and Bioactivity of Curcumin for Disease Prevention and Treatment. *Antioxidants*, 13(3), 331. <https://doi.org/10.3390/antiox13030331>
- Singh, S., Bhardwaj, S., & Singhal, S. (2023). Current trends and regulatory aspects of nutraceutical: A comprehensive review. *International Journal of Green Pharmacy*, 17(2), 108.
- Sonowal, D., & Wani, K. M. (2025). Comprehensive review of cellulose nanocrystals: preparation, properties, modifications and applications. *Bulletin of the National Research Centre*, 49(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s42269-025-01349-9>
- Stobba, B. K., Domagała, J., & Kasprzak, M. M. (2024). Critical Review of Techniques for Food Emulsion Characterization. *Applied Sciences*, 14(3), 1069. <https://doi.org/10.3390/app14031069>
- Szymańska, E., & Winnicka, K. (2015). Stability of Chitosan—A Challenge for Pharmaceutical and Biomedical

- Applications. *Marine Drugs*, 13(4), 1819–1846.
<https://doi.org/10.3390/md13041819>
- Taghizadeh, M., Nezhad Fard, R. M., Aman Mohammadi, M., Abbasi, A., Ntsomboh-Ntsefong, G., Darani, K. K., Mohammadi, M., Khosroshahi, N. K., & Hosseini, H. (2025). Enhancing hamburger shelf life with nanoparticles, pickering nanoemulsion, and nanophytosomes of *Zataria multiflora* essential oil: A comparative and predictive study. *LWT*, 225, 117869.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117869>
- Tamnak, S., Mirhosseini, H., Tan, C. P., Ghazali, H. M., & Muhammad, K. (2016). Physicochemical properties, rheological behavior and morphology of pectin-pea protein isolate mixtures and conjugates in aqueous system and oil in water emulsion. *Food Hydrocolloids*, 56, 405–416.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.033>
- Teo, A., Goh, K. K. T., Wen, J., Oey, I., Ko, S., Kwak, H.-S., & Lee, S. J. (2016). Physicochemical properties of whey protein, lactoferrin and Tween 20 stabilised nanoemulsions: Effect of temperature, pH and salt. *Food Chemistry*, 197, 297–306.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.086>
- Velzi, I., Yslas, E. I., & Molina, M. (2025). Designing Polymeric Multifunctional Nanogels for Photothermal Inactivation: Exploiting Conjugate Polymers and Thermoresponsive Platforms. *Pharmaceutics*, 17(7), 827.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17070827>
- Wang, Y., Xie, Y., Li, T., Wang, Y., Jiang, J., Zhang, X., Xia, B., Wang, S., Huang, J., & Dong, W. (2024). Pickering emulsions with high ionic strength resistance stabilized by pea protein isolate-polyglycerol conjugate particles with good biocompatibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, 269, 131797.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131797>
- Xiao, M., Xu, A., Zhang, T., & Hong, L. (2018). Tailoring the Wettability of Colloidal Particles for Pickering Emulsions via Surface Modification and Roughness. *Frontiers in Chemistry*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00225>
- Xiao, T., Ma, X., Hu, H., Xiang, F., Zhang, X., Zheng, Y., Dong, H., Adhikari, B., Wang, Q., & Shi, A. (2025). Advances in emulsion stability: A review on mechanisms, role of emulsifiers, and applications in food. *Food Chemistry: X*, 29, 102792.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102792>
- Xin, X., Zhang, H., Xu, G., Tan, Y., Zhang, J., & Lv, X. (2013). Influence of CTAB and SDS on the properties of oil-in-water nano-emulsion with paraffin and span 20/Tween 20. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 418, 60–67.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.10.065>
- Xue, J., & Luo, Y. (2023). Protein-polysaccharide nanocomplexes as nanocarriers for delivery of curcumin: a comprehensive review on preparation methods and encapsulation mechanisms. *Journal of Future Foods*, 3(2), 99–114.
<https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.12.002>
- Yin, L., Cao, Y., Wang, M., Deng, Y., Li, F., Kong, B., Liu, Q., & Wang, H. (2025). Effect of adding Pickering emulsion containing oregano essential oil on the storage quality of Harbin red sausage. *Food Bioscience*, 68, 106484.

- <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106484>
- Zhang, M., Li, X., Zhou, L., Chen, W., & Marchioni, E. (2023). Protein-Based High Internal Phase Pickering Emulsions: A Review of Their Fabrication, Composition and Future Perspectives in the Food Industry. *Foods*, 12(3), 482. <https://doi.org/10.3390/foods12030482>
- Zhao, R., Guan, W., Zhou, X., Lao, M., & Cai, L. (2022). The physiochemical and preservation properties of anthocyanidin/chitosan nanocomposite-based edible films containing cinnamon-perilla essential oil pickering nanoemulsions. *LWT*, 153, 112506. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112506>