

ULASAN KRITIS: KEMAJUAN NANOFORMULASI MINYAK ATSIRI UNTUK PENGAWETAN PANGAN

Critical Review: Advancements of Essential Oil Nanoformulation for Food Preservation

Kavadya Syska^{1*)}

^{1*)} Mahasiswa S3 Program Studi Ilmu Pangan, Sekolah Pascasarjana, IPB University

^{1*)} Dosen Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

^{*)} email korespondensi: syska.kavadya@gmail.com; syska.kavadya@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

Essential oils have great potential as antimicrobial and antioxidant agents for food preservation, but their effectiveness is influenced by factors such as concentration and interactions with food components. Nanoformulation design can improve the stability and bioavailability of essential oils, overcoming volatility and degradation issues, although challenges in emulsifier selection and production methods must be addressed. Mathematical modeling approaches allow the prediction of interactions in food systems, accelerating formulation development, but must be integrated with experimental data for validation. By improving stability, nanoformulations can potentially extend the shelf life of food products, reduce waste, and improve safety, although further research is needed to understand the long-term impacts and interactions with other food ingredients.

Keywords: *Essential Oils, Nanoformulation, Food Preservation, Mathematical Modeling, Bioactive Stability*

PENDAHULUAN

Pengawetan pangan merupakan tantangan penting dalam industri pangan, terutama dalam meningkatnya permintaan akan produk alami dan sehat. Menurut Novais *et al.* (2022), dengan meningkatnya kesadaran konsumen akan kesehatan dan keamanan pangan, ada dorongan yang kuat untuk mengurangi penggunaan bahan pengawet sintetis dan beralih ke alternatif yang lebih alami. Minyak atsiri yang diekstrak dari berbagai tanaman, menawarkan alternatif alami untuk pengawet sintetis. Minyak atsiri tidak hanya memiliki sifat antimikroba, tetapi juga dapat meningkatkan aroma dan rasa produk pangan, hal ini menjadikannya pilihan yang menarik untuk pengawetan pangan (Olaniran *et al.*, 2024).

Meskipun minyak atsiri memiliki banyak manfaat, penggunaannya dalam

industri pangan tidak tanpa tantangan. Salah satu masalah utama adalah volatilitas minyak atsiri yang dapat menyebabkan kehilangan komponen aktif selama penyimpanan dan pengolahan pangan (Al-Maqtari *et al.*, 2021). Selain itu menurut Carpena *et al.* (2021), stabilitas minyak atsiri dalam sistem pangan sering menjadi tantangan utama, mengingat banyak jenis minyak atsiri yang rentan mengalami degradasi akibat pengaruh lingkungan seperti paparan cahaya, suhu yang tinggi, dan oksigen. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan perubahan sifat kimia dan penurunan efektivitas minyak atsiri dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme, sehingga mengurangi potensinya sebagai agen pengawet alami. Bioavailabilitas juga menjadi isu, karena minyak atsiri yang tidak terenkapsulasi mungkin tidak dapat diserap

dengan baik oleh sistem pencernaan manusia (Grgić *et al.*, 2020).

Guna mengatasi masalah ini, pengembangan nanoformulasi menjadi penting untuk dikembangkan. Nanoformulasi adalah teknik yang melibatkan pengemasan minyak atsiri dalam sistem nanometer, yang dapat meningkatkan stabilitas dan bioavailabilitasnya (Soni *et al.*, 2023). Dengan menggunakan teknik ini, minyak atsiri dapat dilindungi dari degradasi dan volatilitas, serta dapat dirilis secara bertahap dalam sistem pangan. Kajian Soni *et al.* (2023) menunjukkan bahwa nanoemulsi yang mengandung minyak atsiri dapat memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap mikroorganisme, sehingga memperpanjang umur simpan produk pangan.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghasilkan nanoformulasi minyak atsiri, termasuk emulsifikasi tinggi dan rendah, serta teknik pemrosesan lainnya. Emulsifikasi tinggi menggunakan energi tinggi untuk menciptakan partikel nano yang stabil, sementara emulsifikasi rendah memanfaatkan surfaktan untuk mencapai stabilitas tanpa memerlukan energi tinggi (Jasmina *et al.*, 2017). Penggunaan biopolimer sebagai bahan pendukung untuk nanoformulasi menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan stabilitas dan efektivitas minyak atsiri (Rehman *et al.*, 2020).

Kemajuan teknologi kecerdasan buatan dan *machine learning* (pembelajaran mesin) juga telah berkontribusi pada pengembangan nanoformulasi (Soni *et al.*, 2023). Algoritma pembelajaran mesin dapat digunakan untuk menduga stabilitas dan perilaku rilis minyak atsiri dari nanoemulsi, memungkinkan penelitian dapat mengoptimalkan formulasi dengan lebih efisien (Yakoubi *et al.*, 2023). Dengan memanfaatkan data besar dan model matematika, dirancang sistem pengantaran yang lebih efektif untuk minyak atsiri dalam penerapan produk pangan (Soni *et al.*, 2023).

Penerapan nanoformulasi minyak atsiri dalam pengawetan pangan sangat luas. Dari pengawetan sayuran dan buah-buahan hingga produk daging, nanoemulsi dapat digunakan untuk meningkatkan umur simpan dan menjaga kualitas organoleptik pangan (Singh

et al., 2021). Penggunaan nanoformulasi juga dapat membantu dalam pengembangan kemasan yang lebih cerdas, yang dapat merespons perubahan lingkungan dan memberikan perlindungan tambahan terhadap kontaminasi mikroba (Thirumalai *et al.*, 2023).

Pengembangan nanoformulasi minyak atsiri merupakan langkah inovatif dalam menghadapi tantangan pengawetan pangan. Dengan mengatasi masalah volatilitas, stabilitas, dan bioavailabilitas, nanoformulasi dapat memberikan solusi yang efektif dan alami untuk industri pangan. Kajian dan penelitian lebih lanjut dalam bidang ini diharapkan dapat menghasilkan formulasi yang lebih baik dan penerapan yang lebih luas dalam pengawetan pangan, sehingga memenuhi permintaan konsumen akan produk yang lebih sehat dan aman.

Tujuan Penelitian

Tujuan kajian ini yaitu memberikan “*critical review*” terhadap kemajuan dalam perancangan nanoformulasi minyak atsiri: pendekatan integratif terhadap pemodelan matematika dengan penerapan potensial dalam pengawetan pangan.

METODOLOGI PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Kajian ini menggunakan pendekatan tinjauan kritis (*critical review*) untuk mengevaluasi dan menganalisis berbagai teknik dan strategi yang terkait dengan nanoemulsifikasi minyak atsiri dan penerapannya dalam pengawetan pangan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren, tantangan, dan peluang dalam bidang ini.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan sebagai berikut: (1) Literatur yang relevan: dilakukan pencarian literatur yang luas untuk mengumpulkan informasi dari berbagai sumber, termasuk jurnal ilmiah, artikel konferensi, dan publikasi terkait lainnya. Fokus utama adalah pada penelitian terbaru yang membahas teknik nanoemulsifikasi, karakterisasi, dan penerapan minyak atsiri. (2) Kriteria inklusif dan eksklusif: penetapan kriteria untuk memilih studi yang relevan,

termasuk kualitas penelitian, relevansi topik, dan kontribusi terhadap pemahaman tentang nanoemulsifikasi minyak atsiri. Studi utama yang dikritisi yaitu: *Soni, M., Yadav, A., Maurya, A., Das, S., Dubey, N. K., & Dwivedy, A. K. (2023). Advances in Designing Essential Oil Nanoformulations: An Integrative Approach to Mathematical Modeling with Potential Application in Food Preservation. Foods, 12(21), 4017.*

Analisis dan Sintesis Data

Analisis dan sintesis data dilakukan sebagai berikut: (1) Kategorisasi: Data yang dikumpulkan dikategorikan berdasarkan kata kunci utama, seperti teknik pembuatan nanoemulsi, karakterisasi, penerapan dalam pangan, dan penggunaan kecerdasan buatan dalam pengembangan formulasi. (2) Evaluasi metodologi: evaluasi metodologi yang digunakan dalam studi-studi yang ditinjau, termasuk teknik pembuatan nanoemulsi, parameter yang dioptimalkan, dan metode karakterisasi yang diterapkan. (3) Identifikasi tren dan inovasi: Dilakukan identifikasi tren penelitian nanoemulsifikasi, termasuk teknologi baru seperti kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin untuk meningkatkan formulasi dan stabilitas nanoemulsi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

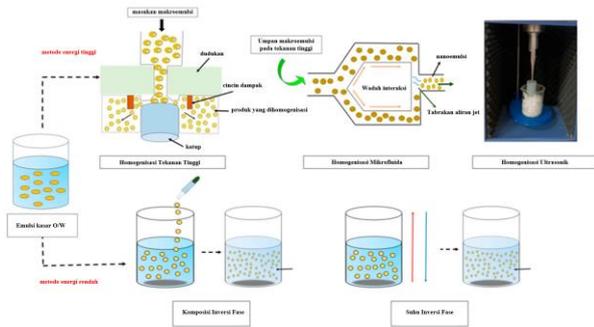
Karakteristik Minyak Atsiri

Minyak atsiri merupakan senyawa alami yang diekstraksi dari berbagai bagian tanaman, seperti daun, bunga, dan kulit, yang dikenal karena sifat aromatik dan bioaktifnya (Yeshi & Wangchuk, 2022). Komponen bioaktif dalam minyak atsiri memberikan berbagai manfaat, termasuk sifat antimikroba dan antioksidan, yang menjadikannya kandidat potensial untuk digunakan dalam pengawetan pangan (Carpena *et al.*, 2021). Menurut Pateiro *et al.* (2021) beberapa minyak atsiri seperti minyak cengkeh dan minyak kayu manis, menunjukkan efektivitas yang signifikan dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen, yang merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pangan dan masalah kesehatan.

Namun demikian, meskipun potensi manfaatnya yang besar, penggunaan minyak atsiri dalam penerapan dalam pangan tidak tanpa tantangan. Salah satu masalah utama adalah sifat volatil dari komponen-komponen dalam minyak atsiri. Volatilitas ini dapat menyebabkan kehilangan aroma dan aktivitas antimikroba selama penyimpanan dan pengolahan pangan, yang pada gilirannya dapat mengurangi efektivitasnya sebagai agen pengawet (Al-Maqtari *et al.*, 2021). Selain itu, menurut Sabaghi *et al.* (2022), reaktivitas tinggi dari beberapa komponen bioaktif dapat menyebabkan interaksi yang tidak diinginkan dengan bahan pangan lainnya, yang dapat mengubah sifat organoleptik dan mengurangi kualitas produk akhir.

Dalam tinjauan ini, penting untuk mempertimbangkan pendekatan inovatif yang dapat mengatasi tantangan ini. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah nanoemulsifikasi, yang dapat meningkatkan stabilitas dan bioavailabilitas minyak atsiri. Dengan mengenkapsulasi minyak atsiri dalam sistem nanoemulsi, volatilitas dapat diminimalkan, dan komponen bioaktif dapat dilindungi dari degradasi. Selain itu, teknologi ini dapat memungkinkan pelepasan terkontrol dari komponen aktif, sehingga meningkatkan efektivitas antimikroba dan antioksidan dalam penerapan pangan.

Secara keseluruhan, meskipun minyak atsiri memiliki potensi yang besar sebagai agen pengawet alami, tantangan yang terkait dengan volatilitas dan reaktivitas tinggi dari komponen bioaktifnya perlu diatasi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi teknik pengemasan dan formulasi yang dapat meningkatkan stabilitas dan efektivitas minyak atsiri dalam sistem pangan (Soni *et al.*, 2023). Dengan pendekatan yang tepat, minyak atsiri dapat menjadi alternatif yang aman dan efektif untuk pengawet sintetis dalam industri pangan, memberikan manfaat kesehatan tambahan bagi konsumen (Falleh *et al.*, 2020).



Gambar 1. Strategi enkapsulasi minyak atsiri (Sumber: Soni *et al.*, 2023)

Teknologi Nano dalam Pengawetan Pangan

Teknologi nano telah muncul sebagai inovasi yang menjanjikan dalam bidang pengawetan pangan, terutama melalui penerapan nanoformulasi. Menurut Jayari *et al.* (2022), proses ini melibatkan pengurangan ukuran partikel minyak atsiri hingga skala nanometer, yang berpotensi meningkatkan stabilitas dan distribusi minyak atsiri dalam struktur bahan pangan. Dengan ukuran yang lebih kecil, partikel nano dapat meningkatkan area permukaan, memungkinkan interaksi yang lebih baik dengan komponen pangan dan mikroorganisme, yang pada gilirannya dapat memperpanjang umur simpan produk (Hosseini & Jafari, 2020).

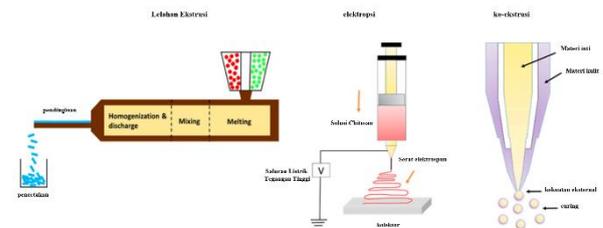
Salah satu pendekatan utama dalam teknologi nano adalah penggunaan nanopartikel lipid dan sistem emulsi (Kumar, 2019). Nanopartikel lipid dapat berfungsi sebagai pengantaran yang efektif untuk minyak atsiri, melindungi komponen bioaktif dari degradasi dan volatilitas. Selain itu, menurut Gupta *et al.* (2022) sistem pengantaran berbasis polimer juga menawarkan keunggulan dalam hal biodegradabilitas dan biokompatibilitas, yang sangat penting dalam keamanan pangan dan keberlanjutan.

Teknik nanoemulsi, khususnya telah terbukti efektif dalam mendispersikan minyak atsiri secara merata dalam produk pangan (Rehman *et al.*, 2021). Hal ini dikuatkan dengan distribusi yang lebih seragam, minyak atsiri dapat berinteraksi lebih baik dengan mikroorganisme, meningkatkan efektivitas antimikroba dan antioksidan (Basavegowda & Baik, 2021). Hal ini tidak hanya membantu dalam menghambat pertumbuhan mikroba

patogen, tetapi juga menjaga kualitas organoleptik produk pangan, yang terpengaruh oleh penggunaan pengawet sintetis.

Namun demikian, meskipun teknologi nano menawarkan banyak keuntungan, ada beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Proses produksi nanoformulasi sering kali memerlukan teknik yang kompleks dan biaya yang lebih tinggi, yang dapat menjadi kendala bagi industri pangan, terutama bagi produsen kecil (McClements, 2020). Selain itu, ada juga kekhawatiran mengenai potensi dampak kesehatan dari nanopartikel yang tidak sepenuhnya dipahami, sehingga memerlukan penelitian lanjut untuk memastikan keamanan penggunaannya dalam bahan pangan.

Secara keseluruhan, teknologi nano dalam pengawetan pangan menunjukkan potensi yang besar untuk meningkatkan efektivitas minyak atsiri sebagai agen pengawet alami (Kumar *et al.*, 2020). Dengan pengembangan lebih lanjut dan pemahaman yang lebih baik tentang implikasi kesehatan dan lingkungan, nanoformulasi dapat menjadi solusi inovatif untuk tantangan yang dihadapi dalam industri pangan saat ini (Kumar *et al.*, 2020). Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengeksplorasi penerapan praktis untuk mengatasi tantangan, sehingga teknologi ini dapat diadopsi dalam industri pangan.



Gambar 2. Tipe teknologi ekstrusi (Sumber: Soni *et al.*, 2023)

Pemodelan Matematika dalam Desain Nanoformulasi

Pemodelan matematika telah menjadi komponen krusial dalam desain dan optimasi nanoformulasi, terutama dalam penerapan minyak atsiri untuk pengawetan pangan. Dengan kemajuan teknologi, penggunaan algoritma pembelajaran mesin dan jaringan saraf tiruan telah memungkinkan penelitian untuk menduga perilaku dan efektivitas formulasi berdasarkan variabel input (Soni *et*

al., 2023). Variabel ini mencakup jenis minyak atsiri, jenis surfaktan, dan kondisi pemrosesan, yang berkontribusi pada karakteristik nanoformulasi (Bayat *et al.*, 2024).

Salah satu keuntungan utama pendekatan ini adalah kemampuannya untuk mempercepat proses pengembangan formulasi. Dengan memanfaatkan algoritma pembelajaran mesin, kajian dalam bidang ini dapat menganalisis data yang kompleks dan menemukan pola yang mungkin tidak terlihat melalui metode tradisional (Soni *et al.*, 2023). Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dalam pengembangan formulasi, tetapi juga memungkinkan untuk merancang produk yang lebih efektif dengan meminimalkan percobaan yang tidak perlu (Grangeia *et al.*, 2020).

Jaringan saraf tiruan sebagai bagian dari pendekatan ini, menawarkan kemampuan untuk menangkap hubungan non-linear antara variabel input dan output (Soni *et al.*, 2023). Hal ini sangat penting dalam nanoformulasi, dimana interaksi antara komponen dapat sangat kompleks (Hwang *et al.*, 2020). Dengan jaringan saraf tiruan dapat dikembangkan model pendugaan yang lebih akurat, dapat digunakan untuk mengoptimalkan formulasi berdasarkan kriteria tertentu, seperti stabilitas, ukuran partikel, dan efisiensi pengawetan (Abdolrasol *et al.*, 2021).

Namun demikian, meskipun pemodelan matematika menawarkan banyak manfaat, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi (Soni *et al.*, 2023). Kualitas data yang digunakan untuk melatih model sangat penting. Data yang tidak lengkap atau tidak akurat dapat menghasilkan model yang tidak dapat diandalkan, yang dapat mengarah pada kesalahan dalam pendugaan dan pengembangan formulasi. Selain itu, pemahaman yang mendalam tentang mekanisme di balik interaksi antara komponen nanoformulasi tetap diperlukan untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan mencerminkan kenyataan (Soni *et al.*, 2023).

Pemodelan matematika memainkan peran penting dalam pengembangan nanoformulasi, memungkinkan pendugaan yang lebih akurat tentang interaksi antara minyak atsiri dan komponen pangan lainnya (Soni *et al.*, 2023). Dengan menggunakan algoritma dan teknik pemodelan yang canggih,

dapat dirancang sistem nanoformulasi yang lebih efisien dan efektif. Namun demikian, tantangan tetap ada dalam mengintegrasikan data dari berbagai sumber dan memastikan bahwa model yang dikembangkan dapat diterapkan secara praktis dalam skala industri.

Tabel 1. Model dan persamaan matematika untuk kinetika pelepasan minyak atsiri

Model Kinetik	Persamaan	Spesifikasi	Keunggulan	Ref
Zero-order	$Q_t = k_A \times Q_A$	$Q_t =$ persentase kumulatif minyak atsiri yang dilepaskan pada waktu t ; $k_A =$ konstanta laju; $Q_A =$ persentase awal minyak atsiri yang dilepaskan; $t =$ waktu	Perilaku pelepasan d-limonene dari nanoemulsi yang mengandung minyak atsiri serai dipelajari, yang mengikuti kinetika orde nol yang menunjukkan pola pelepasan berkelanjutan	[1]
First-order	$\ln(A) = \ln(A_0) - kt$	$A =$ persentase minyak atsiri yang dilepaskan pada waktu t ; $A_0 =$ persentase minyak atsiri yang dilepaskan pada waktu 0 ; $k =$ konstanta laju; $t =$ waktu	Pelepasan minyak cengkeh dari mikrokapsul etil selulosa menunjukkan pola pelepasan terkendali bersama dengan perlindungan yang lebih baik terhadap volatilitas	[2]
Second-order	$y(t) = k \left[\frac{1 - (1 - kt)^2}{2k} \exp(-kt) \right]$	$y(t) =$ persentase pembentukan krim pada waktu t ; $k =$ nilai maksimum persentase pembentukan krim yang dicapai selama penyimpanan; $d =$ waktu saat emulsi benar-benar stabil; $k_1 = (1/\text{hari})$ konstanta proses pembentukan krim	Minyak atsiri oregano dibungkus dalam emulsi ganda (w/o/w), dan stabilitasnya dianalisis. Perilaku pembentukan krim selama penyimpanan mengikuti kinetika orde kedua sejak hari pertama dan seterusnya, dengan nilai maksimum antara 15% dan 35% dan laju pembentukan krim antara	[3]

			3,16% dan 7,3% per hari.	
Higuchi	$M_t/M_{\infty} = k_H \times t^{0.5}$	$M_t/M_{\infty} =$ persentase minyak atsiri yang dilepaskan pada waktu t; $k_H =$ konstanta pelarutan Higuchi; t = waktu	The Higuchi model is based on Fick's Law and makes use of pseudo-steady-state hypotheses to characterize the release kinetics of essential oils or any bioactive component from the porous matrix.	[4]
Kopcha	$M_t = A \times t^{0.5} + B \times t$	A = konstanta laju difusi; B = konstanta laju erosi; t = waktu	Persamaan ini digunakan untuk menilai pelepasan komponen bioaktif berbasis difusi atau erosi dari sistem pengiriman. Rasio A/B digunakan untuk menduga mekanisme dominan pelepasan minyak atsiri. A/B > 1 menunjukkan mekanisme difusi; A/B < 1 menunjukkan mekanisme erosi; A/B = 1 menunjukkan bahwa difusi dan erosi akan terjadi.	[5]
Avrami	$\ln(-\ln R) = n \ln k + n \ln t$	(-ln R) = faktor retensi; n = parameter pelepasan; t = waktu; k = konstanta laju	Jika nilai n = 1, maka sesuai dengan kinetika orde pertama; n = 0,5, sesuai dengan mekanisme difusi; n ≤ 0,5 sesuai dengan mekanisme difusi pseudo-Fickian.	[6]
Hixson-Crowell	$(100 - Q)^{1/3} = -kt + b$	Q = fraksional pelepasan minyak atsiri pada waktu t; k = konstanta	Model Hixson-Crowell menyatakan bahwa luas permukaan partikel bulat	[7]

		laju; b = konstanta;	yang mengandung molekul bioaktif sebanding dengan akar pangkat tiga volumenya. Model ini digunakan untuk mengkaraktisasi pelepasan pelarutan, dengan asumsi bahwa faktor permukaan partikel bulat tetap konstan jika pelarutan konstan di seluruh sistem.
Neiber gull	$(100 - Q)^{1/2} = -kt + b$	Q = pelepasan fraksional bioaktif dalam waktu t; k = konstanta laju; b = konstanta	Memperkirakan an pelepasan bioaktif yang terkendali dari nanopartikel asam polilaktat/kitosan.

Sumber: Soni *et al.* (2023)

Keterangan: [1] Li *et al.* (2019); [2] Patil *et al.* (2016); [3] Cardoso-Ugarte *et al.* (2021); [4] Lamarra *et al.* (2020); [5] Charles *et al.* (2022); [6] Julaeha *et al.* (2023); [7] Razavi *et al.* (2021); [8] Wang *et al.* (2015).

Penerapan dalam Pengawetan Pangan

Penggunaan minyak atsiri yang diformulasikan secara nano dalam pengawetan pangan menunjukkan potensi yang signifikan untuk meningkatkan kualitas dan keamanan produk pangan (Homayounpour *et al.*, 2021). Dengan kemampuan untuk diterapkan pada berbagai jenis produk, termasuk daging, produk susu, dan sayuran, nanoemulsi minyak atsiri menawarkan solusi inovatif untuk tantangan yang dihadapi dalam industri pangan saat ini (Soni *et al.*, 2023).

Salah satu manfaat utama dari penggunaan nanoemulsi adalah kemampuannya untuk mengurangi pertumbuhan mikroba (Garcia *et al.*, 2022). Kajian Soni *et al.* (2023) menunjukkan bahwa formulasi ini dapat secara efektif menghambat perkembangan mikroorganisme patogen dan pembusuk, yang merupakan faktor utama dalam penurunan kualitas dan keamanan pangan. Penerapan nanoemulsi minyak atsiri

tidak hanya berkontribusi pada perpanjangan umur simpan produk, tetapi juga meningkatkan keamanan konsumen.

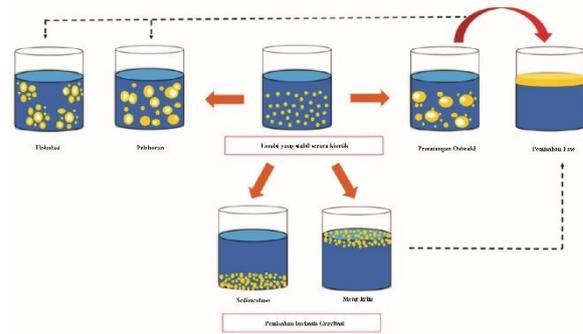
Selain aspek mikrobiologis, penggunaan nanoemulsi juga memberikan keuntungan dalam hal kualitas sensorik produk. Formulasi ini dapat meningkatkan rasa dan aroma, yang merupakan elemen penting dalam pengalaman konsumen. Dengan meningkatkan karakteristik organoleptik, menurut da Silva *et al.* (2022), produk yang diawetkan dengan nanoemulsi minyak atsiri tidak hanya lebih aman untuk dikonsumsi, tetapi juga lebih menarik bagi konsumen. Hal ini dapat berkontribusi pada peningkatan kepuasan pelanggan dan potensi penjualan produk.

Namun demikian, meskipun potensi penerapan ini sangat menjanjikan, ada beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Stabilitas nanoemulsi dalam berbagai kondisi penyimpanan dan pemrosesan harus dievaluasi secara menyeluruh. Faktor-faktor seperti suhu, pH, dan interaksi dengan komponen lain dalam produk pangan dapat mempengaruhi efektivitas nanoemulsi (Marhamati *et al.*, 2021). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami bagaimana kondisi ini dapat mempengaruhi kinerja nanoemulsi dalam penerapan nyata.

Selain itu, aspek regulasi dan penerimaan konsumen terhadap penggunaan teknologi baru dalam pangan juga perlu dipertimbangkan. Meskipun nanoemulsi minyak atsiri menawarkan banyak manfaat, penting untuk memastikan bahwa produk yang dihasilkan memenuhi standar keamanan dan kualitas yang ditetapkan oleh badan regulasi. Edukasi konsumen tentang manfaat dan keamanan nanoemulsi juga akan menjadi kunci dalam penerimaan teknologi ini di pasar.

Penerapan nanoemulsi minyak atsiri dalam pengawetan pangan menunjukkan potensi yang besar untuk meningkatkan kualitas dan keamanan produk. Dengan penelitian lebih lanjut dan perhatian terhadap tantangan yang ada, teknologi ini dapat menjadi alat yang efektif dalam industri pangan, memberikan manfaat tidak hanya bagi produsen tetapi juga bagi konsumen (Soni *et al.*, 2023). Ditambahkan oleh Soni *et al.* (2023) bahwa integrasi nanoemulsi dalam praktik

pengawetan pangan dapat membuka jalan bagi inovasi yang lebih besar dalam pengembangan pangan yang aman dan berkualitas tinggi.



Gambar 3. Stabilitas nanoemulsi minyak atsiri (Sumber: Soni *et al.*, 2023)

Tantangan dan Prospek Masa Depan

Meskipun kemajuan telah dicapai dalam penggunaan minyak atsiri yang diformulasikan secara nano untuk pengawetan pangan, tantangan yang ada tetap menjadi perhatian utama yang perlu diatasi untuk memastikan keberhasilan implementasi teknologi ini di industri pangan. Tiga aspek utama yang menjadi tantangan adalah regulasi, keamanan, dan penerimaan konsumen (Soni *et al.*, 2023).

Regulasi merupakan salah satu tantangan terbesar dalam penerapan nanoemulsi minyak atsiri (da Silva *et al.*, 2022). Badan regulasi di berbagai negara memiliki standar yang ketat terkait penggunaan bahan tambahan pangan, termasuk minyak atsiri. Proses untuk mendapatkan persetujuan regulasi dapat memakan waktu dan sumber daya yang signifikan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian yang komprehensif dan transparan untuk menunjukkan keamanan dan efektivitas nanoemulsi dalam produk pangan. Penelitian ini mencakup pengujian toksisitas, efek samping, dan interaksi dengan komponen pangan lainnya untuk memenuhi persyaratan regulasi yang ada (Soni *et al.*, 2023).

Keamanan juga menjadi perhatian utama, terutama terkait dengan potensi reaksi alergi atau efek samping yang mungkin ditimbulkan oleh minyak atsiri (Wojtunik-Kulesza, 2022). Meskipun banyak minyak atsiri memiliki sifat antimikroba dan antioksidan yang bermanfaat, penting untuk mengevaluasi dampak jangka panjang dari

konsumsi minyak atsiri dalam bentuk nanoemulsi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami bagaimana nanoformulasi dapat berinteraksi dengan sistem biologis manusia dan untuk memastikan bahwa penggunaan teknologi ini tidak menimbulkan risiko kesehatan yang tidak terduga.

Penerimaan konsumen terhadap penggunaan minyak atsiri dalam produk pangan juga merupakan tantangan yang tidak boleh diabaikan. Meskipun ada kesadaran yang meningkat tentang manfaat kesehatan dari bahan alami, konsumen mungkin masih skeptis terhadap penggunaan teknologi baru seperti nanoemulsi (Shunin *et al.*, 2018). Edukasi yang efektif tentang manfaat, keamanan, dan efektivitas nanoemulsi minyak atsiri dalam pengawetan pangan sangat penting untuk meningkatkan penerimaan konsumen (Ozogul *et al.*, 2022). Strategi komunikasi yang jelas dan transparan dapat membantu mengatasi kekhawatiran dan meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk nanoemulsi.

Di sisi lain, prospek masa depan untuk penggunaan nanoemulsi minyak atsiri dalam pengawetan pangan sangat menjanjikan (Soni *et al.*, 2023). Dengan meningkatnya permintaan akan produk pangan yang lebih aman dan berkualitas tinggi, teknologi ini dapat menjadi solusi inovatif untuk memenuhi kebutuhan pasar. Penelitian yang berkelanjutan dan kolaborasi antara ilmuwan, produsen, dan regulator akan menjadi kunci untuk mengatasi tantangan yang ada dan memanfaatkan potensi penuh dari nanoemulsi dalam industri pangan.

Meskipun kemajuan yang dicapai sangat signifikan, tantangan dalam penerapan teknologi ini di industri pangan tetap ada. Regulasi yang ketat, kekhawatiran tentang keamanan, dan penerimaan konsumen adalah faktor-faktor yang perlu diatasi (Soni *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian yang komprehensif dan transparan, serta mengedukasi konsumen tentang manfaat dan keamanan penggunaan nanoformulasi minyak atsiri.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, kemajuan dalam desain nanoformulasi minyak atsiri menawarkan potensi besar untuk meningkatkan keamanan dan kualitas produk pangan. Namun demikian, untuk mewujudkan potensi ini secara maksimal, diperlukan penelitian lebih lanjut dan kolaborasi yang kuat antara berbagai pemangku kepentingan. Dengan pendekatan yang tepat, teknologi ini dapat merevolusi cara kita mengawetkan dan meningkatkan kualitas produk pangan, memberikan manfaat yang signifikan bagi industri pangan dan konsumen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada: (1) Monisha Soni, Arati Yadav, Akash Maurya, Somenath Das, Nawal Kishore Dubey dan Abhishek Kumar Dwivedy dimana artikelnya yang berjudul: “Advances in Designing Essential Oil Nanoformulations: An Integrative Approach to Mathematical Modeling with Potential Application in Food Preservation” dikaji sebagai bahan utama untuk “*Critical review*”. (2) Prof. Dr. Nugraha Edhi Suyatma, S.T.P., D.E.A. selaku pengampu Matakuliah Ilmu Pangan Lanjut (IPN1701) pada topik yang dikaji pada artikel ini. (3) Prof. Dr. Ir. Purwiyatno Hariyadi, M.Sc. selaku Koordinator pada Matakuliah Ilmu Pangan Lanjut (IPN1701) yang telah membuka wawasan mengenai critical review dalam bidang teknologi pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolrasol, M. G., Hussain, S. S., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Hannan, M. A., Mohamed, R., Ali, J.A., Mekhilef, S., & Milad, A. (2021). Artificial neural networks based optimization techniques: A review. *Electronics*, 10(21), 2689.
- Al-Maqtari, Q. A., Rehman, A., Mahdi, A. A., Al-Ansi, W., Wei, M., Yanyu, Z., Phyo, H.M., Galeboe, O., & Yao, W. (2021). Application of essential oils as preservatives in food systems: challenges and future perspectives—a review. *Phytochemistry Reviews*, 1-38.

- Basavegowda, N., & Baek, K. H. (2021). Synergistic antioxidant and antibacterial advantages of essential oils for food packaging applications. *Biomolecules*, 11(9), 1267.
- Bayat, F., Dadashzadeh, S., Aboofazeli, R., Torshabi, M., Baghi, A. H., Tamiji, Z., & Haeri, A. (2024). Oral delivery of posaconazole-loaded phospholipid-based nanoformulation: Preparation and optimization using design of experiments, machine learning, and TOPSIS. *International Journal of Pharmaceutics*, 653, 123879.
- Cardoso-Ugarte, G. A., López-Malo, A., Palou, E., Ramírez-Corona, N., Jiménez-Fernández, M., & Jiménez-Munguía, M. T. (2021). Stability of oregano essential oil encapsulated in double (w/o/w) emulsions prepared with mechanical or high-pressure homogenization and its effect in *Aspergillus niger* inhibition. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), e15104.
- Carpena, M., Nuñez-Estevez, B., Soria-Lopez, A., Garcia-Oliveira, P., & Prieto, M. A. (2021). Essential oils and their application on active packaging systems: A review. *Resources*, 10(1), 7.
- Charles, A. P. R., Mu, R., Jin, T. Z., Li, D., Pan, Z., Rakshit, S., Cui, S.W., & Wu, Y. (2022). Application of yellow mustard mucilage and starch in nanoencapsulation of thymol and carvacrol by emulsion electrospray. *Carbohydrate polymers*, 298, 120148.
- da Silva, B. D., do Rosário, D. K. A., Weitz, D. A., & Conte-Junior, C. A. (2022). Essential oil nanoemulsions: Properties, development, and application in meat and meat products. *Trends in Food Science & Technology*, 121, 1-13.
- Falleh, H., Jemaa, M. B., Saada, M., & Ksouri, R. (2020). Essential oils: A promising eco-friendly food preservative. *Food chemistry*, 330, 127268.
- Garcia, C. R., Malik, M. H., Biswas, S., Tam, V. H., Rumbaugh, K. P., Li, W., & Liu, X. (2022). Nanoemulsion delivery systems for enhanced efficacy of antimicrobials and essential oils. *Biomaterials Science*, 10(3), 633-653.
- Grangeia, H. B., Silva, C., Simões, S. P., & Reis, M. S. (2020). Quality by design in pharmaceutical manufacturing: A systematic review of current status, challenges and future perspectives. *European journal of pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 147, 19-37.
- Grgić, J., Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., & Bucić-Kojić, A. (2020). Role of the encapsulation in bioavailability of phenolic compounds. *Antioxidants*, 9(10), 923.
- Gupta, V., Biswas, D., & Roy, S. (2022). A comprehensive review of biodegradable polymer-based films and coatings and their food packaging applications. *Materials*, 15(17), 5899.
- Homayounpour, P., Alizadeh Sani, M., & Shariatifar, N. (2021). Application of nano-encapsulated *Allium sativum* L. essential oil to increase the shelf life of hamburger at refrigerated temperature with analysis of microbial and physical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11), e15907.
- Hosseini, H., & Jafari, S. M. (2020). Introducing nano/microencapsulated bioactive ingredients for extending the shelf-life of food products. *Advances in Colloid and Interface Science*, 282, 102210.
- Hwang, D., Ramsey, J. D., & Kabanov, A. V. (2020). Polymeric micelles for the delivery of poorly soluble drugs: From nanoformulation to clinical approval. *Advanced drug delivery reviews*, 156, 80-118.
- Jasmina, H., Džana, O., Alisa, E., Edina, V., & Ognjenka, R. (2017). Preparation of nanoemulsions by high-energy and lowenergy emulsification methods. In *CMBEBIH 2017: Proceedings of the International Conference on Medical and Biological Engineering 2017* (pp. 317-322). Springer Singapore.
- Jayari, A., Donsì, F., Ferrari, G., & Maaroufi, A. (2022). Nanoencapsulation of thyme essential oils: Formulation,

- characterization, storage stability, and biological activity. *Foods*, 11(13), 1858.
- Julaeha, E., Pandiangan, N. S., Eddy, D. R., Permadi, N., Harja, A., Wahyudi, T., & Al-Anshori, J. (2023). Ethyl cellulose-based microcapsules of Citrus aurantifolia (Christm.) Swingle essential oil with an optimized emulsifier for antibacterial cosmetotextiles. *Polymer*, 283, 126265.
- Kumar, A., Singh, P., Gupta, V., & Prakash, B. (2020). Application of nanotechnology to boost the functional and preservative properties of essential oils. In *Functional and preservative properties of phytochemicals* (pp. 241-267). Academic Press.
- Kumar, P., Mahajan, P., Kaur, R., & Gautam, S. (2020). Nanotechnology and its challenges in the food sector: A review. *Materials Today Chemistry*, 17, 100332.
- Kumar, R. (2019). Lipid-based nanoparticles for drug-delivery systems. In *Nanocarriers for drug delivery* (pp. 249-284). Elsevier.
- Lamarra, J., Calienni, M. N., Rivero, S., & Pinotti, A. (2020). Electrospun nanofibers of poly (vinyl alcohol) and chitosan-based emulsions functionalized with cabreuva essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 160, 307-318.
- Li, Z. H., Cai, M., Yang, K., & Sun, P. L. (2019). Kinetic study of d-limonene release from finger citron essential oil loaded nanoemulsions during simulated digestion in vitro. *Journal of Functional Foods*, 58, 67-73.
- Marhamati, M., Ranjbar, G., & Rezaie, M. (2021). Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review. *Journal of Molecular Liquids*, 340, 117218.
- McClements, D. J. (2020). Nanotechnology approaches for improving the healthiness and sustainability of the modern food supply. *ACS omega*, 5(46), 29623-29630.
- Novais, C., Molina, A. K., Abreu, R. M., Santo-Buelga, C., Ferreira, I. C., Pereira, C., & Barros, L. (2022). Natural food colorants and preservatives: A review, a demand, and a challenge. *Journal of agricultural and food chemistry*, 70(9), 2789-2805.
- Olaniran, A. F., Adeyanju, A. A., Olaniran, O. D., Erinle, C. O., Okonkwo, C. E., & Taiwo, A. E. (2024). Improvement of food aroma and sensory attributes of processed food products using essential oils/boosting up the organoleptic properties and nutritive of different food products. In *Applications of Essential Oils in the Food Industry* (pp. 119-128). Academic Press.
- Ozogul, Y., Karsli, G. T., Durmuş, M., Yazgan, H., Oztop, H. M., McClements, D. J., & Ozogul, F. (2022). Recent developments in industrial applications of nanoemulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 304, 102685.
- Pateiro, M., Munekata, P. E., Sant'Ana, A. S., Domínguez, R., Rodríguez-Lázaro, D., & Lorenzo, J. M. (2021). Application of essential oils as antimicrobial agents against spoilage and pathogenic microorganisms in meat products. *International Journal of Food Microbiology*, 337, 108966.
- Patil, D. K., Agrawal, D. S., Mahire, R. R., & More, D. H. (2016). Synthesis, characterization and controlled release studies of ethyl cellulose microcapsules incorporating essential oil using an emulsion solvent evaporation method. *American Journal of Essential Oils and Natural Products*, 4(1), 23-31.
- Razavi, M. S., Golmohammadi, A., Nematollahzadeh, A., Rovera, C., & Farris, S. (2021). Cinnamon essential oil encapsulated into a fish gelatin-bacterial cellulose nanocrystals complex and active films thereof. *Food Biophysics*, 1-9.
- Rehman, A., Jafari, S. M., Aadil, R. M., Assadpour, E., Randhawa, M. A., & Mahmood, S. (2020). Development of active food packaging via incorporation of biopolymeric nanocarriers containing essential oils. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 106-121.

- Rehman, A., Qunyi, T., Sharif, H. R., Korma, S. A., Karim, A., Manzoor, M. F., Mehmood, A., Iqbal, M.W., Raza, H., Ali, A., & Mehmood, T. (2021). Biopolymer based nanoemulsion delivery system: An effective approach to boost the antioxidant potential of essential oil in food products. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100082.
- Sabaghi, M., Tavasoli, S., Jamali, S. N., Katouzian, I., & Faridi Esfanjani, A. (2022). The pros and cons of incorporating bioactive compounds within food networks and food contact materials: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(11), 2422-2455.
- Shunin, Y., Bellucci, S., Gruodis, A., Lobanova-Shunina, T., Shunin, Y., Bellucci, S., Gruodis, A., & Lobanova-Shunina, T. (2018). Nanotechnology application challenges: nanomanagement, nanorisks and consumer behaviour. *Nonregular Nanosystems: Theory and Applications*, 337-395.
- Singh, B. K., Tiwari, S., & Dubey, N. K. (2021). Essential oils and their nanoformulations as green preservatives to boost food safety against mycotoxin contamination of food commodities: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(12), 4879-4890.
- Soni, M., Yadav, A., Maurya, A., Das, S., Dubey, N. K., & Dwivedy, A. K. (2023). Advances in Designing Essential Oil Nanoformulations: An Integrative Approach to Mathematical Modeling with Potential Application in Food Preservation. *Foods*, 12(21), 4017.
- Thirumalai, A., Harini, K., Pallavi, P., Gowtham, P., Girigoswami, K., & Girigoswami, A. (2023). Nanotechnology driven improvement of smart food packaging. *Materials Research Innovations*, 27(4), 223-232.
- Wang, W., Chen, S., Zhang, L., Wu, X., Wang, J., Chen, J. F., & Le, Y. (2015). Poly (lactic acid)/chitosan hybrid nanoparticles for controlled release of anticancer drug. *Materials Science and Engineering: C*, 46, 514-520.
- Wojtunik-Kulesza, K. A. (2022). Toxicity of selected monoterpenes and essential oils rich in these compounds. *Molecules*, 27(5), 1716.
- Yakoubi, S., Kobayashi, I., Uemura, K., Nakajima, M., Hiroko, I., & Neves, M. A. (2023). Recent advances in delivery systems optimization using machine learning approaches. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 188, 109352.
- Yeshi, K., & Wangchuk, P. (2022). Essential oils and their bioactive molecules in healthcare. In *Herbal biomolecules in healthcare applications* (pp. 215-237). Academic Press.