

## NANO-PEKTIN SEBAGAI NANOMATERIAL PANGAN: TINJAUAN KRITIS TENTANG PREPARASI DAN KARAKTERISASINYA

### Nano-Pectin as a Food Nanomaterial: A Critical Review of Its Preparation and Characterization

Yoedi Wicaksono<sup>1</sup>, Yohan Ariesto<sup>1a</sup>, Ari Handoko<sup>1</sup>, Prima Yaumil Fajri<sup>1,2</sup>, Nazwa Nurhaliza<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, IPB University

<sup>2</sup>Teknologi Hasil Pertanian, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh

<sup>a</sup>Korespondensi : Yohan Ariesto, E-mail: ariestoyohan@apps.ipb.ac.id

Diterima: 17 - 12 - 2025 , Disetujui: 13 - 02 - 2026

#### ABSTRACT

Pectin is a naturally occurring polysaccharide that could be produced, especially using nanotechnology techniques, as a functional biopolymer in food systems. The goal of converting pectin into nano-pectin is to increase its specific surface area, colloidal stability, and ability to encapsulate and transport bioactive substances. In order to assess the synthesis techniques, characteristics, benefits, and drawbacks of nanopectin for food applications, this paper provides a critical literature assessment. The study was carried out using the PRISMA standards and a Scopus literature search for the years 2015–2025. Chemical alteration and physical engineering were the two primary methods that were examined. For Pickering emulsions, the chemical method via polyelectrolyte complexation yields small nanoparticles (~82 nm) with strong interfacial stability, but it has drawbacks in terms of food safety. On the other hand, despite restricted molecular structural control, the stepwise physical approach yields bigger nano-pectin (~278 nm) with potent antioxidant bioactivity, proven safety, and successful direct application in functional food products. Combining the two methods could result in nano-pectin that is stable, safe, and useful for contemporary culinary applications.

**Keywords:** functional pectin; food nanotechnology; nano-pectin.

#### ABSTRAK

Pektin adalah polisakarida alami yang dapat diproduksi, terutama dengan menggunakan teknik nanoteknologi, sebagai biopolimer fungsional dalam sistem pangan. Modifikasi pektin menjadi nano-pektin bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik, stabilitas koloid, serta kemampuan enkapsulasi zat bioaktif. Untuk mengevaluasi teknik sintesis, karakteristik, manfaat, dan kelemahan nano-pektin dalam aplikasi pangan, makalah ini menyajikan tinjauan literatur kritis. Studi ini dilakukan menggunakan standar PRISMA dan pencarian literatur Scopus untuk periode 2015–2025. Dua metode utama yang dianalisis adalah modifikasi kimia dan rekayasa fisik. Untuk emulsi Pickering, metode kimia melalui kompleksasi polielektrolit menghasilkan nanopartikel kecil (~82 nm) dengan stabilitas antarmuka yang kuat, tetapi memiliki kelemahan dalam hal keamanan pangan. Di sisi lain, meskipun kontrol struktur molekuler terbatas, pendekatan fisik bertahap menghasilkan nanopektin yang lebih besar (~278 nm) dengan aktivitas antioksidan yang kuat, keamanan yang teruji, dan aplikasi langsung yang sukses dalam produk makanan fungsional. Kombinasi kedua metode dapat menghasilkan nanopektin yang stabil, aman, dan berguna untuk aplikasi kuliner modern.

**Kata kunci:** nano-pektin; nanoteknologi pangan; pektin fungsional

## PENDAHULUAN

Dinding sel tumbuhan secara alami mengandung pektin, suatu polimer kompleks, terutama pada buah-buahan sitrus dan umbi-umbian. Karena ketersediaan kelompok karboksil, hidroksil, dan metoksil yang memungkinkan berbagai perubahan kimia dan fisik, pektin memiliki potensi sebagai biopolimer fungsional selain penggunaannya yang luas di sektor pangan sebagai pengental, stabilisator, dan pembentuk gel (Jacob et al., 2020). Aplikasi pektin kini semakin luas sebagai elemen struktural serta sistem pengangkut untuk zat bioaktif, antioksidan, dan elemen fungsional yang mendukung kesehatan berkat penelitian di bidang nanoteknologi pangan.

Transformasi pektin ke bentuk nanopartikel (nano-pektin) telah terbukti meningkatkan luas permukaan, kelarutan, serta reaktivitasnya, sehingga memperkuat kapasitas pengikatan senyawa lipofilik dan memperbaiki bioavailabilitas komponen aktif. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menghasilkan nano-pektin, mulai dari modifikasi kimiawi untuk mengubah sifat permukaan molekul, hingga teknik fisik berenergi tinggi seperti ultrasonikasi, homogenisasi, atau spray drying yang mampu mengubah struktur pektin secara mekanis tanpa mengubah komposisi dasarnya. Meskipun kedua pendekatan tersebut bertujuan serupa, karakteristik dan performa nano-pektin yang dihasilkan dapat sangat berbeda tergantung pada jenis metode yang digunakan (Dib et al., 2023).

Artikel tinjauan ini disusun menggunakan dua penelitian terkini yang menyoroiti dua pendekatan yang kontras namun saling melengkapi yaitu modifikasi kimia dan rekayasa fisik. Pendekatan dengan modifikasi kimia menonjol karena mampu menghasilkan nanopartikel dengan ukuran sangat kecil, kestabilan tinggi melalui modifikasi kimia. Sebaliknya, pendekatan fisik bertahap (*successive processing*) berhasil menghasilkan nano-pektin dari kulit jeruk melalui kombinasi microwave, homogenisasi, ultrasonikasi, dan spray drying. Pendekatan ini berfokus pada peningkatan bioaktivitas, keamanan pangan, dan penerapan praktis nano-pektin dalam produk pangan fungsional seperti selai stroberi.

Dua metode dalam rekayasa nano-pektin memprioritaskan aktivitas biologis makanan dan keberlanjutan proses, sementara metode lainnya berfokus pada pengaturan karakteristik kimia dan interaksi molekuler. Untuk memahami bagaimana variasi dalam teknik modifikasi pektin dapat memengaruhi karakteristik fisik, kimia, dan biologis nanopartikel yang dihasilkan, sangat penting untuk mengevaluasi kedua penelitian tersebut secara kritis. Untuk menciptakan nanopektin yang aman, stabil, dan berguna untuk aplikasi pangan modern dan sistem pengiriman bioaktif yang akan datang, analisis kritis ini juga akan menyoroiti manfaat, kelemahan, dan jalur pengembangan yang mungkin.

## METODE

Critical Literature Review dilakukan dengan menggunakan metode pelaporan yang dianjurkan untuk pelaporan Systematic Review dan Meta-analyses, yaitu metode PRISMA Statement (Moher et al., 2009)

### **Mendefinisikan Research Question dan Kriteria Screening Paper**

Research Question yang akan menjadi basis penyusunan review ini adalah “Bagaimana metode preparasi nano-pektin yang telah dikembangkan sejauh ini untuk aplikasi pangan, dan apa kelebihan serta keterbatasan masing-masing metode?”. Research question dibentuk dengan menggunakan PICO framework. Dalam review ini berbagai jenis nanopartikel berbahan dasar polisakarida dikumpulkan dan digunakan sebagai populasi, perlakuan pada nanopartikel menjadi intervensi, emulsi konvensional menjadi pembanding, dan kelebihan dari pickering emulsion diharapkan menjadi outcome. Kriteria screening dilakukan dengan memastikan paper berbahasa Inggris, berada pada rentang waktu 2015 hingga 2025 dan

mengandung pokok bahasan nanopartikel polisakarida untuk pickering emulsion dari segi zeta potensial, morfologi emulsi, ataupun ukuran partikel droplet.

### **Metode Screening Paper**

Studi dilakukan dengan menggunakan database scopus pada 4 Oktober 2025. Pencarian pada database scopus dilakukan dengan menyusun boolean code sebagai berikut: ("nano pectin" OR "nanostructured pectin" OR "pectin nanoparticles" OR "pectin nanomaterial") AND ("food application" OR "food system" OR "food nanotechnology"). Paper akan didata melalui Mendeley Reference Manager (Mendeley Ltd., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands). Total Record yang didapatkan adalah sekitar 1.992 paper, dengan memisahkan artikel yang tidak berbahasa inggris dan hanya open to access, paper tersisa 256. Dari 256 paper dilakukan eksklusi dengan kriteria pembahasan zeta potensial dan droplet size menjadi poin yang dianalisis sehingga dipilih menjadi 12 paper.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Metode Sintesis dan Analisis**

Pada penelitian Chen et al. (2022), pendekatan yang digunakan bersifat kimiawi dan molekuler, dengan tujuan menghasilkan nanopartikel kompleks polielektrolit antara tannic acid dan aminated sugar beet pectin (SBP-NH<sub>2</sub>). Tahap pertama dalam penelitian ini adalah memodifikasi pektin dari gula bit melalui reaksi aminasi menggunakan ethylenediamine (EDA) dan aktivator 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl) carbodiimide (EDC). Proses ini bertujuan untuk menambahkan gugus amina pada rantai pektin sehingga memiliki muatan positif dan dapat berinteraksi elektrostatis dengan tannic acid yang bermuatan negatif. Setelah diperoleh pektin termodifikasi (SBP-NH<sub>2</sub>), peneliti kemudian mencampurkan pektin termodifikasi dengan larutan tannic acid pada berbagai rasio massa (1:1 hingga 30:1) dan menyesuaikan pH sistem (3–9) untuk menentukan kondisi optimum pembentukan nanopartikel.

Pembentukan nanopartikel terjadi melalui mekanisme kompleksasi polielektrolit, dimana interaksi utama yang berperan adalah gaya elektrostatis antara gugus amina positif dari SBP-NH<sub>2</sub> dan gugus karboksilat negatif dari tannic acid, disertai kontribusi ikatan hidrogen dan interaksi hidrofobik. Setelah terbentuk suspensi nanopartikel yang stabil, sampel diliofilisasi untuk menghasilkan bentuk kering. Karakterisasi nanopartikel dilakukan secara komprehensif meliputi pengukuran ukuran partikel dan zeta potential (menggunakan Zetasizer), pengamatan morfologi dengan TEM dan AFM, analisis struktur kimia menggunakan FTIR, XRD, dan XPS, serta pengujian stabilitas termal melalui TGA.

Selanjutnya, nanopartikel yang diperoleh digunakan untuk menstabilkan emulsi Pickering berfase internal tinggi (HIPE) dengan minyak MCT sebagai fase minyak. Sistem ini kemudian dievaluasi melalui analisis ukuran droplet, viskoelastisitas ( $G'$  dan  $G''$ ), serta uji fotostabilitas  $\beta$ -karoten di bawah paparan sinar UV. Pendekatan ini menunjukkan karakter penelitian yang sangat sistematis dan terkontrol, dengan fokus pada optimasi kondisi pembentukan nanopartikel dan pemahaman mekanisme kimia di balik stabilitasnya.

Sebaliknya, penelitian Mahmoud et al. (2025) menggunakan pendekatan yang bersifat fisik dan berurutan (successive processing) tanpa melibatkan bahan kimia reaktif, sehingga metode ini lebih aman dan sesuai untuk aplikasi pangan langsung. Sumber pektin yang digunakan berasal dari kulit jeruk (*Citrus sinensis*), yang diekstraksi melalui proses asam. Pektin kering kemudian diolah melalui empat tahap berturut-turut, yaitu perlakuan microwave, homogenisasi, ultrasonikasi, dan spray drying.

Tahap microwave berfungsi memecah jaringan pektin dan meningkatkan kelarutan serta reaktivitasnya. Setelah itu, homogenisasi berkecepatan tinggi (10.000 rpm selama 30

menit) digunakan untuk memperkecil ukuran partikel secara mekanis. Tahap ultrasonikasi (20 kHz) menghasilkan efek kavitasasi yang memutus rantai polimer pektin, membentuk fragmen berukuran nano. Tahap terakhir yaitu spray drying pada suhu inlet 180°C dan outlet 90°C menghasilkan bubuk nano-pektin kering dengan ukuran rata-rata 278 nm dan morfologi sferis hingga doughnut-like.

Setelah proses tersebut, karakterisasi dilakukan menggunakan SEM untuk morfologi, FTIR untuk identifikasi gugus fungsi dan perhitungan degree of esterification (DE), serta DLS (Zetasizer) untuk ukuran dan zeta potential. Selain itu, dilakukan analisis aktivitas antioksidan (DPPH dan FRAP) untuk menilai peningkatan kapasitas reduktif akibat pengolahan bertahap.

Metode Mahmoud et al. (2025) tidak berhenti pada tahap karakterisasi fisik, tetapi dilanjutkan dengan uji biologis *in vivo* menggunakan tikus Wistar untuk mengevaluasi efek nano-pektin terhadap stres oksidatif yang diinduksi natrium nitrit. Parameter biologis yang diukur meliputi kadar MDA dan GSH, kadar serotonin otak, ekspresi gen penanda neuronal (NSE dan GFAP), serta analisis histopatologi jaringan otak. Sebagai validasi keamanan, dilakukan pula uji toksisitas akut ( $LD_{50} > 0,7$  g/kg) dan pengujian sensoris pada produk selai stroberi yang difortifikasi dengan nano-pektin pada berbagai konsentrasi (0,5–1,5%). Pendekatan yang dilakukan oleh Mahmoud et al. (2025) lebih aplikatif dibandingkan Chen et al. (2022) karena menggabungkan proses fisik ramah lingkungan dengan verifikasi biologis dan uji produk pangan nyata, meskipun tingkat pengendalian parameter nano-struktur tidak sedetail penelitian berbasis kimia.

**Table 1.** Tabulasi proses sintesis nanopartikel

Sumber pektin	Pembentukan nanopartikel			Referensi
	Pendekatan	Tahapan	Tujuan	
<i>Sugar beet pectin</i>	Kimia	Reaksi aminasi	Memodifikasi pektin dari <i>sugar beet pectin</i> untuk menambahkan gugus amina pada rantai pektin sehingga dapat berinteraksi elektrostatis dengan <i>tannic acid</i>	Chen et al. 2022
		<i>Mixing</i> dengan <i>tannic acid</i>	Membentuk nanopartikel	
Kulit jeruk ( <i>Citrus sinensis</i> )	Fisik	<i>Microwave</i>	Memecah jaringan pektin dan meningkatkan kelarutan dan reaktivitas	Mahmoud et al. 2025
		Homogenisasi	Memperkecil ukuran partikel secara mekanis	
		Ultrasonikasi	Memutus rantai polimer pektin, membentuk fragmen berukuran nano	
		<i>Spray drying</i>	Mengeringkan nanopartikel yang terbentuk	

## Analisis Kritis Metode

Metode yang digunakan oleh Chen et al. bersifat presisi dan mekanistik, berorientasi pada pemahaman interaksi molekuler antara pektin termodifikasi dan polifenol. Pendekatan ini ideal untuk studi fundamental yang ingin menjelaskan mekanisme pembentukan nanopartikel dan sifat permukaannya. Namun, metode ini menggunakan bahan kimia seperti EDA dan EDC yang tidak seluruhnya food-grade, sehingga diperlukan langkah lanjut sebelum diaplikasikan pada pangan.

Sebaliknya, metode Mahmoud et al. (2025) lebih bersifat teknologis dan terapan, dengan keunggulan pada keamanan dan kesesuaian untuk produk pangan. Namun, metode ini lebih bersifat deskriptif dan tidak mengeksplorasi detail molekuler dari perubahan struktur pektin selama proses nano-engineering. Selain itu, tidak ada optimasi kuantitatif terhadap variabel proses seperti waktu, suhu, atau intensitas, sehingga hasilnya lebih menunjukkan arah trend dibandingkan model prediktif yang presisi.

Secara keseluruhan, pendekatan Chen et al. (2022) unggul dari sisi kontrol kimia dan karakterisasi struktur, sedangkan Mahmoud et al. (2025) unggul dari sisi relevansi industri, keamanan pangan, dan validasi biologis. Kombinasi dari keduanya yaitu modifikasi molekuler yang presisi seperti Chen dengan proses fisik berkelanjutan dan food-safe seperti Mahmoud berpotensi menghasilkan nano-pektin dengan performa tinggi sekaligus layak untuk aplikasi pangan fungsional.

## Ukuran dan Morfologi Partikel

Penelitian Chen et al. (2022) menghasilkan nanopartikel dengan ukuran rata-rata 82 nm pada kondisi optimum (pH 5 dan rasio massa TA:SBP-NH<sub>2</sub> sebesar 20:1). Ukuran ini tergolong sangat kecil dan seragam, menandakan proses pembentukan yang terkontrol dengan baik melalui mekanisme kompleksasi polielektrolit. Hasil pengamatan melalui TEM dan AFM menunjukkan bahwa partikel berbentuk elipsoidal dengan ukuran sekitar 40 - 100 nm) dengan distribusi homogen, serta menunjukkan sifat permukaan halus dan tidak beragregasi pada pH optimum.

Sebaliknya, penelitian Mahmoud et al. (2025) menghasilkan nano-pektin dengan ukuran partikel sekitar 278 nm setelah seluruh tahap fisik selesai (microwave, homogenizer, ultrasound, spray drying). Penurunan ukuran terjadi secara bertahap dari 1402 nm (pektin awal) menjadi 219 nm setelah ultrasonikasi, kemudian sedikit meningkat menjadi 278 nm setelah proses pengeringan semprot. Hasil SEM menunjukkan morfologi partikel yang sferis hingga menyerupai bentuk "doughnut-like", yang menunjukkan efek viskositas dan penguapan cepat selama spray drying. bentuk sferis ini berdampak pada kestabilan dan kelarutan nano-pektin yang dihasilkan.

Dari segi implikasi, nanopartikel pada penelitian Chen memiliki ukuran lebih kecil dan distribusi lebih sempit, yang ideal untuk membentuk lapisan stabil di antarmuka emulsi (emulsion interface). Sementara itu, ukuran partikel yang sedikit lebih besar pada Mahmoud justru lebih sesuai untuk aplikasi pangan padat atau semi-padat seperti selai, karena dapat berfungsi sebagai agen penebal atau pembentuk tekstur tanpa menimbulkan rasa sepat atau perubahan sensori yang ekstrem.

## Zeta Potential dan Stabilitas Koloid

Zeta potential merupakan indikator dari stabilitas elektrostatis nanopartikel dalam sistem koloid. Pada penelitian Chen et al. menunjukkan bahwa nanopartikel TA/SBP-NH<sub>2</sub> memiliki muatan positif sebesar +27,6 mV pada pH 7, yang cukup tinggi untuk mencegah agregasi dan menjaga kestabilan suspensi. Nilai zeta potential ini berasal dari gugus amina yang diperoleh melalui reaksi aminasi. Nilai zeta tersebut dapat menjelaskan mengapa sistem emulsi Pickering yang dihasilkan dalam penelitian Chen et al. (2022) sangat stabil terhadap koalesensi dan creaming.

Sebaliknya, Mahmoud et al. (2025) menemukan bahwa pektin dan nano-pektin memiliki muatan negatif dengan nilai bervariasi sepanjang proses  $-23,5$  mV pada pektin awal, meningkat menjadi  $-49,6$  mV setelah tahap homogenisasi, dan sedikit menurun kembali menjadi  $-26,4$  mV setelah spray drying. Perubahan ini menunjukkan bahwa proses fisik seperti homogenisasi dan ultrasonikasi meningkatkan ionisasi gugus karboksilat bebas, sementara spray drying menyebabkan sebagian gugus tersebut berikatan kembali atau tertutupi selama pembentukan partikel kering.

Dari segi stabilitas, sistem dengan zeta potential  $> \pm 30$  mV umumnya dianggap stabil secara elektrostatis. Maka, sistem pada Chen et al. (2022) ( $+27,6$  mV) dan Mahmoud et al. (2025) ( $-49,6$  mV pada tahap homogenisasi) sama-sama menunjukkan potensi stabilitas tinggi. Namun, stabilitas pada Chen lebih disebabkan oleh pengikatan kimia dan pembentukan kompleks polielektrolit, sedangkan pada Mahmoud lebih dipengaruhi oleh gaya elektrostatis alami akibat disosiasi gugus karboksilat.

### **Struktur Kimia dan Perubahan Gugus Fungsional**

Perubahan struktur kimia dikaji melalui FTIR dan XPS pada Chen et al., serta FTIR dan Degree of Esterification (DE) pada Mahmoud et al. (2025). Pada Chen et al. (2022), spektrum FTIR menunjukkan puncak khas pada  $1510\text{ cm}^{-1}$  (N-H bending) yang menandakan keberhasilan aminasi pektin, serta pergeseran pita C=O dan O-H akibat interaksi dengan tannic acid. XPS mengonfirmasi adanya elemen nitrogen (N1s) baru dengan kandungan 5,7%, yang menunjukkan penambahan gugus amina. Selain itu, hasil XRD dan TGA mengindikasikan peningkatan keteraturan struktural dan kestabilan termal akibat pembentukan kompleks nano antara TA dan SBP-NH<sub>2</sub>. Dengan demikian, nanopartikel yang dihasilkan tidak hanya kecil, tetapi juga memiliki struktur molekuler stabil dan tahan panas, yang penting untuk sistem emulsi pangan berenergi tinggi.

Sementara itu, Mahmoud et al. (2025) melaporkan bahwa perlakuan bertahap tidak secara signifikan mengubah degree of esterification (DE) pektin (sekitar 50%), tetapi memengaruhi intensitas puncak FTIR pada daerah  $1733\text{ cm}^{-1}$  (C=O ester) dan  $1632\text{ cm}^{-1}$  (COOH bebas). Ini menunjukkan bahwa sebagian kecil gugus metoksil terlepas akibat kavitas ultrasonik, yang meningkatkan jumlah gugus karboksilat bebas dan memperkuat kemampuan antioksidan serta kelarutan pektin. Secara keseluruhan, struktur dasar pektin tetap terjaga, menjadikan metode ini aman dan sesuai untuk produk pangan.

### **Aktivitas Fungsional dan Aplikasi**

Perbedaan paling mencolok antara kedua studi terletak pada fungsi akhir nanopartikel. Chen et al. (2022), menekankan fungsi fisik dan protektif dari nanopartikel dalam sistem emulsi Pickering. Hasilnya menunjukkan bahwa emulsi yang distabilkan oleh TA/SBP-NH<sub>2</sub> memiliki sifat viskoelastis tinggi (nilai  $G'$  dan  $G''$  meningkat dengan konsentrasi nanopartikel) dan mampu meningkatkan fotostabilitas  $\beta$ -karoten secara signifikan di bawah paparan UV selama 16 jam. Perlindungan ini diatribusikan pada sifat antioksidan dan kemampuan penyerapan UV dari tannic acid yang berikatan di permukaan partikel. Dengan demikian, sistem ini efektif untuk mengenkapsulasi senyawa lipofilik yang sensitif terhadap oksidasi, seperti karotenoid, vitamin D, atau asam lemak tak jenuh.

Sebaliknya, Mahmoud et al. (2025) berfokus pada fungsi biologis dan aplikasi pangan nyata. Nano-pektin hasil proses bertahap menunjukkan aktivitas antioksidan sangat tinggi, dengan nilai DPPH scavenging mencapai 96,5% dibandingkan pektin biasa (42,15%). Selain itu, uji in vivo pada tikus menunjukkan bahwa nano-pektin secara signifikan menurunkan kadar MDA (penanda peroksidasi lipid), meningkatkan kadar GSH (antioksidan endogen), dan memulihkan ekspresi gen penanda neuron (NSE dan GFAP) ke arah normal. Secara sensori, penambahan 0,5% nano-pektin ke dalam selai stroberi meningkatkan tekstur dan penerimaan keseluruhan tanpa mengubah warna secara signifikan. Implikasi hasil ini menunjukkan bahwa

pendekatan Mahmoud mampu mengubah pektin dari sekadar agen pengental menjadi bahan fungsional bioaktif dengan efek antioksidan dan neuroprotektif, sekaligus mempertahankan sifat fisikokimia yang sesuai untuk industri pangan.

**Analisis Kelebihan dan Keterbatasan Riset**

Kedua penelitian, baik Chen et al. (2022), maupun Mahmoud et al. (2025), memberikan kontribusi penting dalam pengembangan nano-pektin sebagai bahan multifungsi di bidang pangan dan kesehatan. Namun, keduanya mewakili dua pendekatan yang berbeda, Chen et al. lebih berorientasi pada rekayasa molekuler dan stabilitas fisik, sedangkan Mahmoud lebih menonjol pada bioaktivitas, keamanan, dan aplikasi pangan langsung. Kelebihan Chen et al. (2022) terdapat pada presisi rekayasa kimia dan tingkat karakterisasi yang mendalam. Proses aminasi pektin dan kompleksasi dengan tannic acid memungkinkan pengendalian sifat permukaan nanopartikel, termasuk ukuran, muatan, dan sudut kontak antarmuka. Penggunaan berbagai instrumen analitik (FTIR, XPS, XRD, TGA, TEM, AFM, rheometer) memberikan pemahaman komprehensif terhadap struktur dan kestabilan fisik nanopartikel. Hasilnya, Chen et al. (2022) berhasil menunjukkan bahwa nanopartikel TA/SBP-NH<sub>2</sub> mampu menstabilkan emulsi Pickering berfase internal tinggi (HIPE) dan melindungi β-karoten dari fotodegradasi secara efektif. Ini menunjukkan keberhasilan desain sistem delivery lipofilik berbasis polisakarida-polifenol. Dari sisi keilmuan, penelitian ini memperluas konsep complex coacervate dan polyelectrolyte nanocomplex dalam sistem pangan, serta menjadi model bagi pengembangan bahan penstabil alami dengan fungsi antioksidan bawaan. Kekuatan dan kelebihan kedua penelitian secara ringkas dapat dilihat pada pada Tabel 2 dan 3.

**Tabel 2.** Kelebihan dan Kekurangan Jurnal Hasil Penelitian Chen et al. (2022)

Parameter	Kelebihan	Parameter	Kekurangan
Desain molekuler presisi.	Modifikasi kimia pektin dengan EDA → SBP-NH <sub>2</sub> , kemudian kompleksasi TA melalui ikatan elektrostatik & hidrogen.	Tanpa pengujian biologis	Fokus fisikokimia & emulsi, tanpa uji toksisitas atau bioefek dalam sistem biologis (in vitro/in vivo)
Karakterisasi fisikokimia sangat mendalam.	Menggunakan FTIR, XRD, XPS, AFM, TEM, TGA, ζ-potential, dan contact-angle untuk mengonfirmasi struktur & stabilitas.	Kompleksitas sintesis.	Reaksi aminasi + kompleksasi TA memerlukan pH dan rasio massa spesifik → sulit di-scale up industri.
Kontribusi pada sains emulsi.	Menunjukkan kemampuan TA/SBP-NH <sub>2</sub> NP (82 nm, wettability ≈ 91°) menstabilkan HIPEs dengan viskoelastisitas tinggi & retensi β-karoten > 90 %.	Lingkup terbatas	Hanya memanfaatkan β-karoten sebagai model lipofilik → belum diuji untuk senyawa lain.
Pendekatan mekanistik interfacial	Mengaitkan komposisi kimia dengan perilaku antar-muka (oil-water interface), pH optimum 5-7, dan pola degradasi termal.	Potensi instabilitas pH tinggi.	Suspensi TA/SBP-NH <sub>2</sub> tidak stabil pH > 7 → membatasi aplikasi di pangan pH-netral/alkalin.
Potensi luas	Menawarkan konsep nano stabilizer multifungsi (antioksidan + UV shield + metal-chelating) untuk sistem lipid bioaktif.	Tidak mengevaluasi efek sensorik	Meski relevan untuk pangan, tidak diuji rasa, warna, atau tekstur produk akhir

**Tabel 3.** Kelebihan dan Kekurangan Jurnal Hasil Penelitian Mahmoud et al. (2025)

Parameter	Kelebihan	Parameter	Kekurangan
Pendekatan komprehensif proses-struktur-fungsi	Menelusuri setiap tahap (microwave, homogenizer, ultrasonik, spray-dryer) dengan analisis morfologi (SEM), FTIR, $\zeta$ -potential, dan uji antioksidan.	Kurang kontrol kimia spesifik	Tidak mengeksplorasi reaksi kimia antar-gugus (GALA, metoksilasi, hidrosilasi) selama perlakuan; hanya deskriptif via FTIR.
Integrasi uji biologi in vivo	Menguji efek nano-pektin pada stres oksidatif tikus (Wistar); indikator MDA, GSH, serotonin, GFAP/NSE; menunjukkan efek neuroprotektif nyata.	Skala laboratorium	Belum menilai kestabilan jangka panjang, distribusi ukuran dalam matriks pangan, atau interaksi dengan komponen kompleks.
Aplikasi langsung ke pangan	Penambahan 0.5–1.5 % nano-pektin pada selai stroberi → peningkatan tekstur & sensorik tanpa memengaruhi warna.	Tidak ada data interfacial	Tidak mengevaluasi perilaku pektin sebagai penstabil emulsi atau delivery carrier.
Aspek keamanan	Uji LD <sub>50</sub> > 0.7 g/kg menunjukkan tidak toksik.	Variasi biologis terbatas	Uji in vivo hanya 24 tikus jantan belum menjawab mekanisme biotransformasi & bioavailabilitas sistemik.
Nilai translasi industri tinggi	Relevan untuk fortifikasi serat larut & clean-label antioxidant.	Analisis kinetika oksidatif minim	Tidak menganalisis laju oksidasi atau stabilitas radikal secara kinetik (EPR, ORAC).

Kekuatan Mahmoud et al. (2025) penelitian ini terletak pada pendekatan bertahap yang sederhana, ramah lingkungan, dan sesuai dengan regulasi pangan. Dengan memanfaatkan teknologi fisik (microwave, homogenizer, ultrasound, dan spray dryer), pektin dapat direkayasa menjadi bentuk nano tanpa melibatkan bahan kimia sintetis. Keunggulan lain yang sangat menonjol adalah validasi bioaktivitas dan keamanan. Mahmoud et al. tidak hanya menilai sifat fisik nano-pektin, tetapi juga mengujinya in vivo pada model tikus. Hasilnya menunjukkan bahwa nano-pektin secara signifikan mengurangi stres oksidatif, memperbaiki biomarker fungsi otak (NSE, GFAP, serotonin), dan aman dikonsumsi (LD<sub>50</sub> > 0.7 g/kg). Penambahan nano-pektin ke dalam selai stroberi juga terbukti meningkatkan tekstur dan penerimaan sensori tanpa mengubah warna, menjadikannya kandidat nyata untuk bahan pangan fungsional.

### Perbandingan Nanopartikel Berbahan Dasar Pektin dan Polisakarida Lain dalam Sistem Emulsi dan Penghantaran Bioaktif

Berdasarkan rangkuman pada Tabel 4 dan 5, terlihat perbedaan yang jelas antara nanopartikel berbahan dasar pektin dan partikel berbahan dasar polisakarida lain dalam hal ukuran partikel, metode sintesis, mekanisme stabilisasi, serta arah aplikasinya. Perbedaan karakteristik ini menentukan peran fungsional masing-masing material dalam sistem emulsi dan penghantaran senyawa bioaktif.

**Tabel 4.** Sintesis Karakteristik Partikel, Kelebihan, dan Aplikasi Partikel berbasis Pektin

Referensi	Jenis Sistem/ Bioaktif	Metode Pembuatan	Ukuran Partikel/ $\zeta$ (mV)	Uji / Aplikasi	Hasil Utama	Relevansi terhadap Gap
Siles-Sánchez <i>et al.</i> 2024	Pektin rendah metoksil + fenolik marjoram	Ionic gelation dan spray-drying	267 nm (nano); $\pm$ -22 mV	Simulasi GIT (in vitro)	Nano/mikropartikel pektin mempertahankan fenolik hingga kolon; pelepasan bertarget $\uparrow$ bioavailabilitas	Melengkapi Mahmoud 2025 (uji in vivo tanpa data GIT) dan Chen 2022 (tidak bahas bioavailabilitas)
Elmizadeh <i>et al.</i> 2024	Pectin-Zein nanocarrier + tanshinone (lipofilik)	Anti-solvent precipitation	140-180 nm / $\zeta \approx$ -30 mV	In vitro release + stabilitas termal	EE > 85 %; pelepasan terkendali $\pm$ 24 h $\rightarrow$ stabilitas tinggi tanpa agregasi	Tambahan interfacial design (protein-pektin hybrid) untuk melengkapi Chen dan Mahmoud
Fu <i>et al.</i> 2023	SPI-Pectin-Curcumin nanocomposite	Self-assembly nanoprecipitation	120 nm / $\zeta \approx$ -25 mV	Antioxidan & bioavailabilitas	Stabilitas & aktivitas antioksidan $\uparrow$ 2-3 $\times$ ; bioavailabilitas $\uparrow$ 4 $\times$ dibanding curcumin bebas	Menunjang fungsi antioksidan & bioaktif (melengkapi Mahmoud 2025)
Rosales dan Fabi. 2023	Nano-pectin untuk berbagai bioaktif (polifenol, vit E)	Ionotropik, nanoemulsi, spray-drying	90-300 nm	Simulasi GIT + model pangan	Nano-pektin $\uparrow$ stabilitas & bioavailabilitas; aman food-grade dan clean-label	Menjembatani laboratorium untuk produk pangan nyata ( <i>functional foods</i> )
de Rezende <i>et al.</i> 2025	Pectin-Curcumin spray-dried particles untuk Pickering emulsion	Spray-drying + emulsifikasi	150-220 nm / $\zeta \approx$ -28 mV	Stabilitas emulsi $\phi =$ 0.5-0.8	Model prediktif hubungan $\phi$ dan konsentrasi partikel untuk optimasi HIPE stabil	Melengkapi Chen 2022 (HIPE Pickering) untuk menyediakan data desain & optimasi

**Tabel 5.** Sintesis Karakteristik Partikel, Kelebihan, dan Aplikasi Partikel berbasis Polisakarida

Referensi	Jenis Sistem/ Bioaktif	Metode Pembuatan	Ukuran Partikel / $\zeta$ (mV)	Uji / Aplikasi	Hasil Utama
Li <i>et al.</i> 2021 dan Tanaka <i>et al.</i> 2024	Cellulose nanofiber (CNF)	Ionic gelation dan spray-drying	4,2 $\mu$ m / $\zeta \approx$ -36,9 mV	Sistem emulsi dengan minyak (IE, 0.5 mL, 3.3 mmol) dan fase aqueous CNF (0.4 wt%, 4.5 mL)	Mikropartikel ini mampu menyerap sinar UVB, memberikan stabilitas emulsi yang baik, serta bersifat biodegradable.
Phosanam <i>et al.</i> 2023	Pineapple Cellulose Nanocrystal	Hidrolisis Asam dan Ultrasonikasi	6,2 $\mu$ m / $\zeta \approx$ -47,8 mV	Sistem emulsi Ginger Essential Oil dan dispersi Aqueous	Pembentukan network amorph dan viskoelastic yang secara efektif mampu mencegah koalesensi.
Naji-Tabasi <i>et al.</i> , 2024	Baneh Gum Nanoparticle	Nanoprecipitation dan Shear homogenisasi	1.74 $\mu$ m / $\zeta \approx$ -26,05 mV	Sistem emulsi Minyak Sunflower dan dispersi Baneh Gum Nanoparticle	Pembentukan penghalang antarmuka yang efektif serta stabil terhadap pemanasan dan sentrifugasi.

Nie <i>et al.</i> , 2022	Cellulose nanocrystals and Peanut protein Complex	Hidrolisis asam dan self assembly	6,72 $\mu\text{m}/\zeta$ -37 mV	Sistem minyak dan CNP/PPI Complex	emulsi Rapeseed dispersi	Distribusi seragam, penyimpanan tinggi, perlindungan antioksidan yang baik akibat sinergi protein-polisakarida.
Li <i>et al.</i> 2024	Insoluble Rice Bran Protein-Polyphenol-Polysaccharide Complex	Acid-Base Extraction, Dialysis, and Freeze Drying	67.89 $\mu\text{m}/\zeta$ -18.7 mV	Sistem Minyak dengan partikel IRBPPP	Emulsi Soybean Dispersi	Pembentukan kompleks terniar tak larut dari protein polisakarida, dan polifenol dengan potensi aktivitas antarmuka yang baik, stabilitas emulsi yang memadai, serta sifat antioksidan intrinsik.

### Ukuran Partikel dan Fungsionalitas

Berdasarkan hasil yang dilampirkan pada tabel 4 dan 5, dapat dibuat perbandingan dari segi ukuran partikel serta hubungannya dengan fungsionalitasnya. Partikel-partikel berbahan dasar pektin menunjukkan kemampuan membentuk partikel berukuran skala nano di rentang  $\pm 90\text{--}300$  nm dengan nilai zeta potensial yang cukup konsisten di kisaran  $-22$  hingga  $-30$  mV, sebagaimana dilaporkan oleh Siles-Sánchez *et al.* 2024, de Rezende *et al.*, 2025; Elmizadeh *et al.*, 2024; Fu *et al.*, 2023; Rosales & Fabi, 2023. Ukuran partikel yang lebih kecil memberikan korelasi positif terhadap luas permukaan spesifik, yang mana semakin tingginya luas permukaan ini berarti adanya kemampuan meningkatkan efisiensi enkapsulasi senyawa bioaktif yang secara langsung dapat meningkatkan nilai bioavailabilitasnya. Hasil ini tercermin dari pembentukan partikel yang berhasil dilakukan oleh Siles-Sánchez *et al.* 2024 dan Fu *et al.* 2023, dimana partikel yang dibentuk dapat mempertahankan senyawa fenolik hingga di kolon. Di sisi lain, Partikel-partikel berbahan dasar polisakarida non-pektin menunjukkan ukuran partikel pada rentang mikro, yaitu sekitar  $1\text{--}70$   $\mu\text{m}$  dengan Zeta potensial yang jauh lebih tinggi apabila dibandingkan dengan bahan pektin, yaitu di kisaran  $-30$  hingga  $-40$  mV, seperti yang sudah dijelaskan dalam penelitian H. Li *et al.*, 2024; Q. Li *et al.*, 2021; Naji-Tabasi *et al.*, 2024; Nie *et al.*, 2022; Phosanam *et al.*, 2023; Tanaka *et al.*, 2024. Meski ukuran yang dihasilkan jauh lebih besar, partikel ini tetap mampu menjaga kestabilan sistem emulsi dengan mekanisme membentuk jaringan dan penghalang mekanik pada interface minyak dan air. Secara ukuran partikel, pectin based nanopartikel menghasilkan ukuran yang lebih kecil dibandingkan varian partikel berbasis polisakarida lainnya, hasil ini memungkinkan peningkatan kestabilan sistem emulsi, kemampuan enkapsulasi dan juga bioavailabilitas dari produk terenkapsulasi.

### Metode Sintesis dan Kompleksitas Sistem

Hasil tabel 4 dan 5 menunjukkan pula bahwa metode sintesis antara partikel berbahan pektin dan polisakarida non pektin cukup berbeda. Partikel berbasis pektin cenderung dibentuk dengan metode sintesis yang lebih rendah intensitas, seperti metode presipitasi, ionic gelation, dan spray drying, seperti yang dilakukan pada penelitian oleh Siles-Sánchez *et al.* 2024, de Rezende *et al.*, 2025; Elmizadeh *et al.*, 2024; Fu *et al.*, 2023; Rosales & Fabi, 2023. Metode yang lebih rendah intensitas ini memberikan kemampuan untuk membentuk ukuran partikel yang lebih fine dan mudah dikontrol untuk reproducibility-nya, serta memiliki kompatibilitas yang baik dengan sistem pangan. Partikel-partikel berbahan polisakarida non-pektin menunjukkan mekanisme sintesis yang lebih tinggi intensitas dengan memanfaatkan perlakuan mekanik dan chemical. Perlakuan seperti acid-hydrolysis, Ultrasonikasi, dan juga defibrilisasi banyak dimanfaatkan seperti yang dijelaskan dalam penelitian Nie *et al.*, 2022; Phosanam *et al.*, 2023. Perlakuan ini menghasilkan partikel dengan struktur lebih kaku namun secara mekanik dianggap lebih stabil, meski demikian perlakuan ini memiliki reproducibility yang kurang baik apabila dibanding dengan pektin.

### Arah Aplikasi: Penghantaran Bioaktif vs Stabilisasi Emulsi

Berdasarkan hasil tabel 4 dan 5, nanopartikel berbahan dasar pektin lebih sering digunakan dalam pengujian enkapsulasi melalui simulasi saluran pencernaan dalam rangka analisis peningkatan bioavailabilitas. Selain itu peneliti *de Rezende et al. (2025)* juga memperlihatkan bahwa pektin ini juga dimanfaatkan sebagai stabilizer pickering emulsion pada sistem dengan fraksi minyak tinggi. Di sisi lain, partikel berbasis polisakarida non-pektin lebih banyak diaplikasikan dan diujikan pada simulasi kestabilan sistem emulsi, baik konvensional ataupun pickering emulsion. Simulasi kestabilan ini dilakukan dengan melihat ketahanan terhadap koalesensi, pemanasan, dan ketahanan fisik via sentrifugasi (*Q. Li et al., 2021; Moher et al., 2009; Naji-Tabasi et al., 2024; Tanaka et al., 2024*). Dari segi pengaplikasian, partikel berbasis pektin sudah lebih banyak diaplikasikan dalam uji enkapsulasi bioaktif dibandingkan dengan partikel polisakarida lainnya, yang masih banyak berada dalam tahap simulasi sistem emulsi.

### KESIMPULAN

Secara umum, pektin menunjukkan potensi besar sebagai bahan dasar untuk pengembangan sistem nano yang multifungsi, namun melalui pendekatan yang berbeda. Pendekatan kimiawi dalam membentuk nanopartikel polielektrolit berbasis tannic acid-aminated pectin, menghasilkan partikel berukuran sangat kecil dan stabil secara fisik, ideal untuk aplikasi sebagai stabilizer dan carrier bioaktif lipofilik. Sebaliknya, dengan pendekatan fisik bertahap yang ramah lingkungan, menghasilkan nano-pektin dengan bioaktivitas tinggi, keamanan pangan terverifikasi, dan keberhasilan penerapan langsung pada produk pangan fungsional.

Perbandingan kedua metode ini menunjukkan bahwa dengan pendekatan kimia memberikan kontrol struktural yang lebih tinggi, sedangkan pendekatan fisik menawarkan keamanan dan kompatibilitas yang lebih baik untuk industri pangan. Arah pengembangan riset selanjutnya perlu mengintegrasikan keunggulan keduanya untuk menghasilkan nano-pektin yang stabil, food-grade, dan bioaktif, sehingga dapat berfungsi tidak hanya sebagai penstabil fisik, tetapi juga sebagai komponen bioaktif alami dalam pangan fungsional dan sistem penghantaran nutrisi yang lebih efisien.

### DAFTAR PUSTAKA

- Chen, H., Wang, Z., Guo, X., Yu, S., Zhang, T., Tang, X., Yang, Z., & Meng, H. (2022). Tannic Acid-Aminated Sugar Beet Pectin Nanoparticles as a Stabilizer of High-Internal-Phase Pickering Emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *70*(26), 8052–8063. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.1C04865>
- de Rezende, S. C., Santamaria-Echart, A., Ribeiro, A., Dias, M. M., & Barreiro, M. F. (2025). Advancing Pickering emulsions with natural-based solid dispersion particles: Particle screening and design of pectin-based emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *719*, 137003. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137003>
- Dib, T., Pan, H., & Chen, S. (2023). Recent Advances in Pectin-based Nanoencapsulation for Enhancing the Bioavailability of Bioactive Compounds: Curcumin Oral Bioavailability. *Food Reviews International*, *39*(6), 3515–3533. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012796>
- Elmizadeh, A., Goli, S. A. H., Mohammadifar, M. A., & Rahimmalek, M. (2024). Fabrication and characterization of pectin-zein nanoparticles containing tanshinone using anti-solvent precipitation method. *International Journal of Biological Macromolecules*, *260*, 129463. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129463>

- Fu, L., Tan, S., Si, R., Qiang, Y., Wei, H., Huang, B., Shi, M., Fang, L., Fu, J., & Zeng, S. (2023). Characterization, stability and antioxidant activity of curcumin nanocomplexes with soy protein isolate and pectin. *Current Research in Food Science*, 6, 100530. <https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2023.100530>
- Jacob, E. M., Borah, A., Jindal, A., Pillai, S. C., Yamamoto, Y., Maekawa, T., & Kumar, D. N. S. (2020). Synthesis and characterization of citrus-derived pectin nanoparticles based on their degree of esterification. *Journal of Materials Research* 2020 35:12, 35(12), 1514–1522. <https://doi.org/10.1557/JMR.2020.108>
- Li, H., Wu, X., & Wu, W. (2024). Natural protein-polysaccharide-phenol complex particles from rice bran as novel food-grade Pickering emulsion stabilizers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 134314. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.134314>
- 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>
- Mahmoud, M. H., Azab, D. E. S. H., Elbahnasawy, A. S., & Mahmoud, M. H. (2025). Impact of successive steps of nano-pectin preparation: characterization, role in combating increased oxidative stress in Wistar rats and its application in jam. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 2025 24:5, 24(5), 37-. <https://doi.org/10.1007/S44447-025-00026-7>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PMED.1000097>
- Naji-Tabasi, S., Shakeri, M. sadat, Modiri-Dovom, A., & Shahbazizadeh, S. (2024). Investigating Baneh (*Pistacia atlantica*) gum properties and applying its particles for stabilizing Pickering emulsions. *Food Chemistry: X*, 21, 101111. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2023.101111>
- Nie, C., Bu, X., Ma, S., Zhang, J., Ma, Q., Li, W., Zhang, X., Wu, H., Hu, S., Fan, G., & Wang, J. (2022). Pickering emulsions synergistically stabilized by cellulose nanocrystals and peanut protein isolate. *LWT*, 167, 113884. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113884>
- Phosanam, A., Moreira, J., Adhikari, B., Adhikari, A., & Losso, J. N. (2023). Stabilization of ginger essential oil Pickering emulsions by pineapple cellulose nanocrystals. *Current Research in Food Science*, 7, 100575. <https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2023.100575>
- Rosales, T. K. O., & Fabi, J. P. (2023). Pectin-based nanoencapsulation strategy to improve the bioavailability of bioactive compounds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 229, 11–21. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.12.292>
- Siles-Sánchez, M. de las N., García-Ponsoda, P., Fernandez-Jalao, I., Jaime, L., Santoyo, S., Siles-Sánchez, M. de las N., García-Ponsoda, P., Fernandez-Jalao, I., Jaime, L., & Santoyo, S. (2024). Development of Pectin Particles as a Colon-Targeted Marjoram Phenolic Compound Delivery System. *Foods* 2024, Vol. 13, 13(2). <https://doi.org/10.3390/FOODS13020188>
- Tanaka, Y., Li, Q., Hatakeyama, M., & Kitaoka, T. (2024). Synthesis and structural design of microspheres comprising cellulose nanofibers and artificial lignin polymer by enzyme-mediated Pickering emulsion templating. *RSC Sustainability*, 2(5), 1580–1589. <https://doi.org/10.1039/d4su00067f>