

Stabilisasi Elektrostatis *Pickering Emulsion* Berbasis CNC–Kitosan dan Minyak Biji Kelor sebagai *Edible Coating* pada Buah Tomat

Electrostatic Stabilization of CNC–Chitosan and Moringa Seed Oil-Based Pickering Emulsion as Edible Coating on Tomato Fruit

Chandra Gunawan¹, Mhd. Andry Kurniawan^{1*}, Eko Wahyudi², Angga Pramana¹, Nur Hasnah Ar¹, Annisa Nazifa Salman¹, Jeany Ristia¹, Yelmira Zalfiatri¹, Nasya Zulhayada¹, Dwi Seprina Wulandari¹

¹Departemen Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Riau, Pekanbaru, Riau, 28293, Indonesia

²Departemen Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Riau, Pekanbaru, Riau, 28293, Indonesia

*E-mail: andry.kurniawan@lecturer.unri.ac.id

Diterima: 31 Desember; Disetujui: 24 Juni 2026

ABSTRAK

Stabilitas dan sifat antarmuka emulsi pickering berperan penting dalam menentukan efektivitas *edible coating* untuk mengendalikan susut bobot buah pascapanen. Penelitian ini bertujuan mengembangkan emulsi Pickering berbasis kompleks selulosa nanokristalin–kitosan (CNC–kitosan) dan minyak biji kelor, serta mengevaluasi keterkaitan sifat fisikokimia emulsi terhadap penurunan susut bobot tomat selama penyimpanan. Emulsi diformulasikan dengan variasi rasio minyak:air yaitu 1:1 (NCM1), 1:2 (NCM2), dan 1:3 (NCM3) dan dikarakterisasi berdasarkan potensial zeta, sudut kontak, viskositas, indeks emulsifikasi (EI), dan indeks kriming (CI). Struktur antarmuka dianalisis menggunakan SEM. Emulsi diaplikasikan sebagai *edible coating* pada tomat, dan susut bobot diamati selama 15 hari. Hasil menunjukkan bahwa perbedaan komposisi emulsi secara signifikan memengaruhi stabilitas dan sifat antarmuka. Emulsi NCM2 menunjukkan performa terbaik dengan sudut kontak tertinggi (105,6°), EI stabil, CI terendah, serta lapisan antarmuka yang lebih rigid, sehingga menghasilkan susut bobot tomat terendah, yaitu sekitar 12,6% pada hari ke-15. Emulsi NCM3 juga stabil akibat viskositas dan repulsi elektrostatis yang tinggi, namun efektivitasnya sedikit lebih rendah dibanding NCM2. Temuan ini menegaskan bahwa rigiditas antarmuka lebih menentukan performa *edible coating* dibandingkan stabilitas koloid semata dan berpotensi memperpanjang umur simpan tomat.

Kata kunci: *Edible coating*; minyak kelor; nanokristal selulosa; pengawetan buah; *pickering emulsion*; kitosan

ABSTRACT

The stability and interfacial properties of Pickering emulsions play an important role in determining the effectiveness of edible coatings to control postharvest fruit weight loss. This study aimed to develop Pickering emulsions based on nanocrystalline cellulose–chitosan (CNC–chitosan) complexes and moringa seed oil, and to evaluate the relationship between the emulsion's physicochemical properties and the reduction in tomato weight loss during storage. Emulsions were formulated with varying oil:water ratios of 1:1 (NCM1), 1:2 (NCM2), and 1:3 (NCM3) and characterized by zeta potential, contact angle, viscosity, emulsification index (EI), and creaming index (CI). The interfacial structure was analyzed using SEM. The emulsions were applied as edible coatings on tomatoes, and weight loss was observed for 15 days. The results showed that differences in emulsion composition significantly affected the stability and interfacial properties. The NCM2 emulsion showed the best performance with the highest contact angle (105.6°), stable EI, lowest CI, and a more rigid interfacial layer, resulting in the lowest tomato weight loss, which was around 12.6% on day 15. The NCM3 emulsion was also stable due to its high viscosity and electrostatic repulsion, but its effectiveness was slightly lower than that of NCM2. These findings confirm that interfacial rigidity is more important in determining the performance of edible coatings than colloidal stability alone and has the potential to extend the shelf life of tomatoes.

Keywords: Cellulose nanocrystals (CNC); chitosan; edible coating; fruit preservation; moringa seed oil; pickering emulsion

PENDAHULUAN

Buah-buahan segar merupakan salah satu komponen penting dalam pola makan sehat karena mengandung berbagai vitamin, mineral, serat pangan, dan senyawa fitokimia yang bermanfaat bagi kesehatan manusia. Namun, buah segar memiliki kadar air yang tinggi dan metabolisme yang tetap aktif setelah panen sehingga rentan mengalami penurunan mutu dan pembusukan selama penyimpanan (Singh & Thakur, 2024). Kondisi ini berkontribusi terhadap meningkatnya food loss dan food waste di sektor hortikultura. Berdasarkan laporan Bappenas (2023), kehilangan pangan di Indonesia mencapai 20–68 kg per kapita per tahun,

dengan kehilangan terbesar berasal dari komoditas buah-buahan, yaitu sekitar 24–57%. Oleh karena itu, strategi inovatif untuk memperpanjang umur simpan dan mempertahankan mutu buah segar sangat diperlukan dalam mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan pascapanen.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengatasi kerusakan pascapanen buah adalah penggunaan *edible coating*, yaitu lapisan tipis berbahan dasar biopolimer yang dapat dikonsumsi dan berfungsi sebagai primary packaging alami. *Edible coating* mampu memperlambat laju respirasi, transpirasi, dan oksidasi, serta menghambat pertumbuhan mikroba dengan membentuk

penghalang terhadap uap air dan gas (de Carvalho-Guimarães et al., 2022). Meski demikian, formulasi *edible coating* berbasis emulsi konvensional masih menghadapi kendala utama berupa ketidakstabilan emulsi, seperti koalesensi, flocculation, dan fase separation yang menurunkan efektivitas perlindungan pada buah (Aw et al., 2022; Cheon et al., 2023).

Dalam dekade terakhir, muncul pendekatan baru berbasis *Pickering Emulsion* (PE) yaitu sistem emulsi yang distabilkan oleh partikel padat mikro/nano yang terserap pada antarmuka minyak–air (Ding et al., 2024; Restiana & Cahyana, 2023). Tidak seperti emulsi konvensional, PE tidak memerlukan surfaktan sintesis, sehingga dianggap lebih ramah lingkungan, aman untuk pangan, dan memiliki stabilitas fisik tinggi (Restiana & Cahyana, 2023). Salah satu partikel padat yang banyak digunakan untuk menstabilkan PE adalah cellulose nanocrystal (CNC), yang memiliki sifat biodegradable, biokompatibel, serta dapat diperoleh dari sumber terbarukan seperti limbah lignoselulosa pertanian. CNC memiliki area permukaan luas dan kemampuan membentuk struktur semikristalin yang memberikan stabilitas tinggi terhadap koalesensi dan agregasi tetesan emulsi (Gunawan et al., 2021; Ji & Wang, 2023).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa CNC dapat dikombinasikan dengan chitosan untuk meningkatkan performa coating. Kombinasi ini memberikan hidrofobisitas dan stabilitas termal lebih baik terutama pada kondisi kelembaban relatif tinggi ($RH > 80\%$) (J. Liu et al., 2022). Selain itu, fase minyak dalam sistem *Pickering* dapat berperan sebagai pembawa (carrier) bagi senyawa bioaktif yang memberikan aktivitas fungsional tambahan pada coating (Cassani & Gomez-Zavaglia, 2024).

Salah satu kandidat minyak nabati yang potensial adalah minyak biji kelor (*Moringa seed oil*), yang diketahui kaya akan asam oleat ($\geq 70\%$), senyawa fenolik, flavonoid, dan tokoferol dengan aktivitas antioksidan dan antimikroba tinggi (Moosavi & Eslami, 2025). Kandungan asam ferulat, apigenin, dan naringenin di dalam minyak biji kelor berkontribusi terhadap kemampuan menghambat oksidasi lipid serta pertumbuhan mikroba pada bahan pangan. Integrasi minyak biji kelor ke dalam sistem *pickering emulsion* yang distabilkan oleh CNC dan chitosan diharapkan tidak hanya memberikan fungsi protektif terhadap degradasi fisik buah, tetapi juga memperpanjang masa simpan melalui aktivitas antimikroba dan antioksidan alami (Moosavi & Eslami, 2025; Wang et al., 2023).

Beberapa studi terdahulu telah membuktikan efektivitas CNC sebagai stabilizer PE dalam melindungi senyawa bioaktif. Misalnya, sistem PE berbasis CNC murni terbukti mampu memperpanjang half-life kurkumin hingga 98 hari, meningkat hampir 20 kali lipat dibandingkan PE konvensional (Fahim et al., 2025). Namun, studi yang mengintegrasikan CNC–chitosan dengan minyak biji kelor untuk aplikasi *edible coating* buah segar masih sangat terbatas. Penelitian yang ada umumnya hanya fokus pada formulasi coating polimer tunggal atau penggunaan minyak esensial umum (misalnya minyak thyme, oregano, atau lemon), bukan minyak biji kelor yang memiliki komposisi asam lemak unik dan potensi fungsional tinggi (Cai et al., 2024).

Berdasarkan gap analysis tersebut, penelitian ini berbeda secara signifikan dengan studi sebelumnya karena menggabungkan modifikasi CNC melalui modifikasi adsorpsi elektrostatis dengan chitosan untuk menghasilkan partikel amfifilik bermuatan positif yang dapat beradsorpsi kuat pada antarmuka minyak–air. Modifikasi ini diharapkan meningkatkan stabilitas PE serta adhesi coating terhadap permukaan buah bermuatan negatif, sehingga pelapisan menjadi lebih efektif. Selain itu, penggunaan minyak biji kelor

sebagai fase minyak bioaktif merupakan novelty statement utama, karena belum banyak diterapkan pada sistem PE berbasis biopolimer alami untuk aplikasi pascapanen buah.

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan *edible coating* inovatif berbasis *pickering emulsion* yang distabilkan oleh CNC–chitosan dan mengandung minyak biji kelor, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan buah segar. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem coating ramah lingkungan yang mengintegrasikan teknologi nano, biopolimer alami, dan minyak nabati fungsional untuk mendukung keberlanjutan rantai pasok pangan.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan yaitu CNC (Cellufoce, Canada), minyak biji kelor hasil ekstraksi cold pressing, dan kitosan (Sigma-Aldrich, USA). Bahan tambahan meliputi gliserol (Merck, Germany) sebagai *plasticizer*, asam asetat glasial (Merck, Germany) sebagai pelarut kitosan, serta akuades sebagai pelarut. Buah segar yang digunakan adalah buah tomat (*Solanum lycopersicum*) yang diperoleh dari kebun percobaan Universitas Riau dengan tingkat kematangan yang seragam (*stadium breaker–turning*).

Peralatan yang digunakan meliputi homogenizer Ultra-Turrax T25 (IKA®, Germany), magnetic stirrer Heidolph MR Hei-Standard (Heidolph Instruments, Germany), pH meter Mettler Toledo Seven Compact, viskosimeter Brookfield DV-E, colorimeter Konica Minolta CR-400, dan mikroskop elektron SEM JEOL JSM-6510LA (Japan). Penyimpanan dilakukan dalam lemari pendingin Sharp SJ-236ND pada suhu $5 \pm 1^\circ\text{C}$.

Modifikasi CNC–Chitosan (Adsorpsi Elektrostatis)

Modifikasi adsorpsi elektrostatis pada CNC–Chitosan mengacu pada Xie et al. (2024) yang dimodifikasi. Suspensi Cellulose Nanocrystal (CNC) 0,4% (w/v) disiapkan dan disonikasi menggunakan Ultra-Turrax T25 selama 5 menit hingga terdispersi homogen. Larutan chitosan dibuat dengan melarutkan kitosan 1% (w/v) dalam asam asetat 2% (w/v) pada suhu 60°C sampai terbentuk larutan homogen. Larutan kitosan kemudian dicampurkan secara perlahan ke dalam suspensi CNC dengan rasio 1:1 dan diaduk menggunakan magnetic stirrer pada suhu 40°C selama 2 jam untuk memfasilitasi interaksi elektrostatis antara kedua komponen. Campuran selanjutnya disonikasi pada frekuensi 20–40 kHz selama 10 menit untuk memperkuat pembentukan kompleks polielektrolit CNC–Chitosan. Setelah proses interaksi selesai, gliserol 2% (v/v) ditambahkan sebagai *plasticizer* dan campuran diaduk selama 15 menit hingga homogen. Kemudian didiamkan pada suhu ruang selama 1 jam untuk memperoleh dispersi CNC–Chitosan yang stabil, yang selanjutnya digunakan sebagai agen stabilisasi *pickering emulsion* (NC).

Pembuatan *Pickering Emulsion*

Fase air berupa agen stabilisasi *pickering emulsion* (CNC–Chitosan) dari pembentukan kompleks polielektrolit dan penambahan gliserol 2% (v/v). Sementara fase minyak berupa minyak biji kelor. Setiap percobaan, minyak biji kelor ditakar sehingga diperoleh rasio minyak:air 1:1, 1:2, dan 1:3 (v/v) (NCM1, NCM2, NCM3). Masing-masing rasio dibuat menjadi pra-emulsi kasar dengan menambahkan minyak secara perlahan ke fase air sambil diaduk cepat, kemudian emulsifikasi dilanjutkan menggunakan Ultra-Turrax pada kecepatan 10.000–18.000 rpm selama 1–3 menit sampai

diperoleh emulsi yang tampak halus. Setelah sonikasi, emulsi dibiarkan pada suhu ruang dan kestabilannya dipantau secara berkala pada waktu 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 14 hari melalui pengamatan visual (pemisahan fase/creaming), pengukuran ukuran tetesan (mikroskop optik), serta uji morfologi menggunakan SEM.

Indeks Emulsifikasi

Pengukuran indeks emulsifikasi dilakukan mengacu pada (Aw et al., 2022). Emulsi pickering dimasukkan ke dalam gelas ukur dan disimpan selama 2 minggu. Pengukuran dilakukan terhadap volume lapisan krim (VE) dan total volume emulsi (VT) pada hari ke-1, 2, 3, 7, dan 14. Indeks emulsifikasi kemudian dihitung mengikuti persamaan:

$$EI (\%) = \frac{VE (ml)}{VT (ml)} \times 100 \quad (1)$$

Indeks Creaming

Pengukuran indeks creaming dilakukan mengacu pada (Aw et al., 2022). Stabilitas fisik emulsi diamati secara visual dengan menempatkan sampel emulsi ke dalam tabung vial transparan (10 mL) dan disimpan pada suhu ruang (25 ± 2 °C). Pengamatan dilakukan pada interval waktu tertentu (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 hari) untuk memantau pemisahan fase dan pembentukan lapisan krim (*creaming*). Setiap pengamatan didokumentasikan melalui foto digital.

Creaming Index (CI,%) dihitung menggunakan Persamaan:

$$CI (\%) = \frac{H_c}{H_t} \times 100 \quad (2)$$

H_c merupakan tinggi lapisan krim dan H_t merupakan tinggi total emulsi. Pengukuran dilakukan tiga kali ulangan dan hasil disajikan dalam bentuk nilai rata-rata ± simpangan baku (SD).

Analisis Zeta Potential

Nilai muatan permukaan (zeta potential) emulsi ditentukan menggunakan alat zeta potential analyzer (Malvern Zetasizer Nano ZS, Inggris) berdasarkan prinsip hamburan cahaya elektroforetik mengacu pada (Luo et al., 2023). Sampel emulsi diencerkan dengan akuades hingga konsentrasi padatan sekitar 0,01% (w/v) untuk mengurangi efek hamburan ganda. Pengukuran dilakukan pada suhu 25 °C dengan tiga kali ulangan, dan hasil disajikan dalam bentuk rata-rata ± SD.

Pengukuran Viskositas

Sifat rheologi emulsi diukur menggunakan *rotational rheometer* (Anton Paar MCR series, Austria) dengan geometri cone-plate (diameter 50 mm, sudut 1°). Pengukuran dilakukan pada suhu 25 °C dalam rentang laju

geser 0.1–1000 s⁻¹. Nilai viskositas nyata pada 10 s⁻¹ dan 100 s⁻¹ digunakan untuk perbandingan antar formula. Setiap pengujian dilakukan dalam tiga kali ulangan.

Pengamatan Morfologi dengan SEM

Morfologi emulsi yang distabilkan oleh CNC–Chitosan diamati menggunakan scanning electron microscope (SEM, JEOL JSM-6510, Jepang). Persiapan pengamatan morfologi mengacu pada (Qin et al., 2024). Sampel emulsi dibekukan kemudian dikeringkan dengan metode freeze-drying (–50 °C, 0,1 mbar) untuk menghilangkan air. Serbuk kering yang diperoleh ditempelkan pada dudukan aluminium menggunakan pita karbon konduktif, lalu dilapisi dengan lapisan emas (~5 nm) sebelum diamati. Pengamatan dilakukan pada tegangan percepatan 5 kV.

Pengamatan Visual dan Susut Bobot Buah

Perubahan visual (warna, pengerutan permukaan, dan tekstur buah) dipantau setiap tiga hari selama 15 hari. Penurunan bobot buah dihitung sebagai berikut:

$$\text{Susut Bobot (\%)} = \frac{W_0 - W_t (ml)}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

W₀ merupakan berat awal dan W_t merupakan berat pada waktu (hari) pengamatan. Pengukuran dilakukan tiga kali ulangan dan hasil disajikan dalam bentuk nilai rata-rata ± simpangan baku (SD).

Analisis Data

Seluruh pengujian dilakukan dalam tiga kali ulangan. Data hasil pengamatan disajikan sebagai nilai rata-rata ± SD. Analisis statistik dilakukan menggunakan one-way ANOVA diikuti dengan uji lanjut Tukey menggunakan perangkat lunak SPSS versi 25 (IBM Corp., USA). Perbedaan dianggap signifikan pada tingkat kepercayaan $p < 0,05$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisikokimia Droplet Emulsi Pickering Potensial Zeta

Analisis potensial zeta memberikan wawasan langsung tentang tolakan elektrostatis antar droplet dan stabilitas keseluruhan sistem emulsi. Suatu partikel dinyatakan memiliki kecenderungan stabil dan tidak mengalami agregasi jika memiliki potensial zeta kurang dari -30 mV atau lebih dari 30 mV ($-30 \text{ mV} < \zeta < 30 \text{ mV}$) (Restiana & Cahyana, 2023). CNC dan chitosan memiliki sifat kimia permukaan yang saling melengkapi, sehingga interaksi keduanya berperan penting dalam menentukan muatan, ukuran, dan stabilitas koloid NC sebelum proses emulsifikasi dimulai. Parameter-parameter tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik droplet *pickering emulsion*

Sampel	Parameter			
	Potensial Zeta (mV)	Sudut kontak (θ)	Viskositas (mPa·s)	pH
CNC	-35,4 ± 1,6	-	80 ± 7,9	6,5
Kitosan	+48,7 ± 2,2	-	432 ± 36,1	3,2
NC	+42,1 ± 2,7	60,5 ± 4,6	285 ± 10,1	4,1
NCM1	+27,5 ± 1,8	82,1 ± 4,6	45,6 ± 2,4	6,7
NCM2	+31,2 ± 2,1	105,6 ± 4,6	54,3 ± 1,9	6,7
NCM3	+34,8 ± 2,0	90,3 ± 4,6	63,2 ± 2,3	6,8

Pengukuran potensial zeta memberikan gambaran fundamental mengenai stabilitas koloid dan interaksi muatan antar-komponen dalam sistem pickering emulsion. CNC memiliki potensial zeta negatif tinggi ($-35,4 \pm 1,6$ mV) yang berasal dari gugus sulfat atau karboksilat sisa proses hidrolisis, sehingga menghasilkan gaya tolak-menolak antar partikel yang cukup kuat untuk menjaga stabilitas suspensi. Hal ini sesuai dengan karakteristik CNC yang telah dilaporkan pada berbagai penelitian, di mana nilai zeta negatif antara -25 hingga -45 mV menunjukkan stabilitas dispersif yang tinggi (Heidari et al., 2023).

Sebaliknya, kitosan memiliki muatan positif tinggi ($+48,7 \pm 2,2$ mV) akibat protonasi gugus $-NH_2$ menjadi $-NH_3^+$ pada pH rendah. Kombinasi sifat kitosan yang sangat kationik dan rantai polimer yang panjang menghasilkan suspensi dengan gaya tolak-menolak kuat antar-molekul, yang berdampak pada stabilitas kitosan dalam fase asam (Meng et al., 2023).

Ketika CNC dan kitosan dikombinasikan membentuk kompleks NC, muatan positif menurun menjadi $+42,1 \pm 2,7$ mV. Penurunan ini mengindikasikan terbentuknya kompleks elektrostatis antara muatan negatif CNC dan muatan positif kitosan (Xie et al., 2024). Adsorpsi kitosan pada permukaan CNC menyebabkan redistribusi muatan dan menghasilkan partikel kompleks dengan dominasi muatan positif. Nilai sekitar $+40$ mV merupakan indikasi sistem yang sangat stabil, di mana gaya repulsi antarpartikel cukup besar untuk mencegah agregasi partikel dalam fase air (Yu et al., 2023).

Pada sistem *pickering emulsion*, potensial zeta meningkat secara bertahap dari NCM1 ($+27,5 \pm 1,8$ mV) ke NCM3 ($+34,8 \pm 2,0$ mV). Pola ini sangat penting secara mekanistik, karena nilai $> +30$ mV dikenal sebagai ambang praktis untuk mencegah flocculation melalui repulsi elektrostatis. Dengan rasio minyak–air yang lebih tinggi pada NCM3, jumlah NC dalam fase kontinu meningkat, memberikan kerapatan partikel yang lebih besar untuk menutupi antarmuka droplet minyak. Hal ini memperkuat repulsi antar droplet dan meminimalkan kontak langsung antara permukaan minyak, sehingga menurunkan kemungkinan koalesensi atau bridging flocculation.

Secara keseluruhan, tren ini menunjukkan bahwa kestabilan emulsi tidak hanya bergantung pada muatan awal CNC atau kitosan, tetapi pada kemampuan kompleks NC untuk mengatur muatan pada antarmuka minyak–air. Stabilitas elektrostatis NCM3 yang paling tinggi menjadi dasar kuat mengapa formula tersebut menunjukkan stabilitas makroskopik terbaik dalam sistem.

Sudut Kontak

Sudut kontak partikel NC pada antarmuka minyak–air merupakan faktor kunci dalam menentukan apakah partikel dapat berfungsi sebagai stabilisator Pickering yang efektif. Nilai $60,5 \pm 4,6^\circ$ menunjukkan bahwa NC memiliki sifat amfifilik moderat dengan kecenderungan lebih hidrofilik. Kondisi ini memungkinkan partikel untuk menembus antarmuka dan membentuk adsorpsi kuat, karena energi adsorpsi maksimum umumnya dicapai pada sudut kontak sekitar 90° (Moosavi & Eslami, 2025).

Setelah NC berinteraksi dengan minyak biji kelor dalam sistem emulsi, sudut kontak berubah signifikan sesuai rasio minyak–air. Pada NCM1 ($82,1 \pm 4,6^\circ$), nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar partikel NC mulai berada pada kondisi lebih seimbang dalam antarmuka, tetapi tidak berada pada titik optimum. Keterbatasan jumlah partikel NC dapat menyebabkan antarmuka tidak tertutupi secara merata, sehingga menyebabkan sudut kontak yang masih lebih hidrofilik (Ali et al., 2023).

NCM2 menunjukkan nilai sudut kontak tertinggi ($105,6 \pm 4,6^\circ$), mengindikasikan bahwa partikel NC menjadi lebih lipofilik. Hal ini mungkin terjadi karena meningkatnya jumlah minyak relatif terhadap jumlah NC, sehingga partikel

cenderung tertarik ke fase minyak. Sudut kontak yang terlalu tinggi dapat menyebabkan partikel mengalami overwetting oleh fase minyak, membuat adsorpsi antarmuka kurang stabil dan berpotensi melemahkan struktur armor dalam jangka panjang (Meng et al., 2023).

NCM3 kembali menunjukkan nilai yang hampir ideal ($90,3 \pm 4,6^\circ$). Kondisi ini menunjukkan bahwa pada rasio minyak–air 1:3, terdapat jumlah partikel NC yang cukup untuk menutupi antarmuka secara merata sehingga partikel dapat berada pada posisi stabil dengan keseimbangan energi optimum. Sudut kontak mendekati 90° memberikan energi adsorpsi tinggi sehingga partikel sulit teradsorpsi dari antarmuka, yang merupakan karakteristik penting dalam pembentukan *pickering emulsion* yang stabil (J. Liu et al., 2022; Qin et al., 2024). Dengan demikian, sudut kontak memberikan dukungan kuat terhadap hasil potensial zeta, menunjukkan bahwa NCM3 memiliki kualitas antarmuka paling stabil. Meskipun sudut kontak mendekati 90° secara teoritis memberikan kondisi wetting yang ideal, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa rigiditas lapisan antarmuka yang terbentuk pada sudut kontak $>100^\circ$ (NCM2) lebih dominan dalam menentukan kestabilan jangka panjang dan performa aplikasi coating.

Viskositas

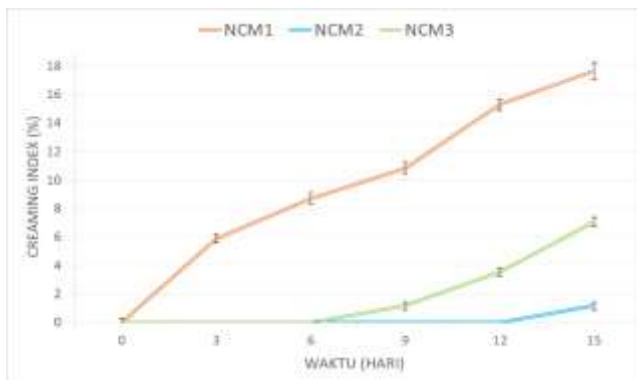
Profil viskositas memberikan informasi tambahan mengenai kemampuan sistem untuk menahan gerakan droplet dan menunda proses creaming. Suspensi CNC memiliki viskositas rendah ($80 \pm 7,9$ mPa·s) karena struktur nanokristal yang kaku dan non-gelling. Sementara itu, kitosan menunjukkan viskositas yang jauh lebih tinggi ($432 \pm 36,1$ mPa·s) akibat struktur polimer fleksibel yang terprotonasi dan mampu membentuk jaringan melalui interaksi intramolekuler. Kombinasi CNC–kitosan menghasilkan viskositas intermediate ($285 \pm 10,1$ mPa·s), menandakan terbentuknya jaringan kompleks NC yang stabil.

Pada sistem emulsi, viskositas meningkat seiring peningkatan rasio air. NCM1 memiliki viskositas terendah ($45,6 \pm 2,4$ mPa·s) dan NCM3 tertinggi ($63,2 \pm 2,3$ mPa·s). Peningkatan viskositas ini penting karena viskositas fase kontinu memengaruhi kecepatan creaming menurut persamaan Stokes. Viskositas yang lebih tinggi memberikan hambatan alir (*flow resistance*) yang lebih besar, sehingga memperlambat pergerakan droplet menuju permukaan. Hal ini membantu menjaga kestabilan emulsi terutama pada kondisi penyimpanan tanpa agitasi (Abbasov, 2025).

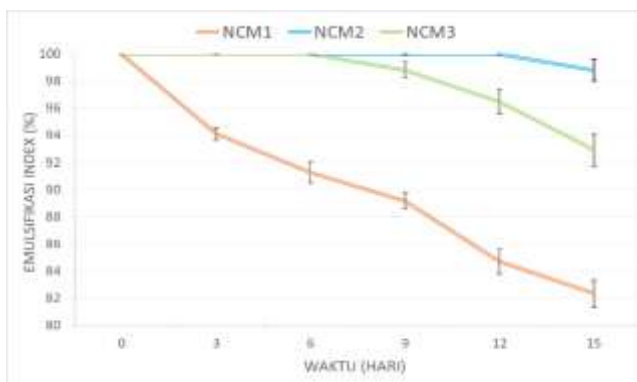
Selain itu, viskositas juga berperan dalam mengatur distribusi partikel NC dalam fase kontinu dan memengaruhi densitas partikel pada antarmuka. Kombinasi viskositas tinggi, muatan zeta tinggi, dan sudut kontak ideal seperti yang terlihat pada NCM3 merupakan penanda kuat bahwa sistem tersebut mampu mempertahankan stabilitas jangka panjang, baik secara fisik maupun antarmuka.



Gambar 1. Stabilitas *pickering emulsion* pada 0, 7, dan 15 hari penyimpanan



Gambar 2. Creaming Index (CI) *pickering emulsion* selama 15 hari penyimpanan



Gambar 3. Emulsifikasi Index (EI) *pickering emulsion* selama 15 hari penyimpanan

Indeks Emulsifikasi dan Indeks Creaming

Indeks emulsifikasi (EI) dan indeks creaming (CI) mencerminkan stabilitas makroskopis dan kemampuan emulsi untuk menahan pemisahan gravitasi seiring waktu. Evaluasi stabilitas makroskopik *pickering emulsion* melalui Indeks Emulsifikasi (EI) dan Indeks Creaming (CI) memberikan gambaran komprehensif mengenai ketahanan sistem terhadap pemisahan fase selama penyimpanan yang terlihat pada Gambar 1.

Data CI dan EI (Gambar 2 dan 3) menunjukkan suatu perbedaan yang jelas antar formula NCM1, NCM2, dan NCM3, dan pola ini sangat konsisten dengan karakteristik fisikokimia yang telah ditetapkan sebelumnya, khususnya potensial zeta, sudut kontak, dan viskositas fase kontinu. Secara keseluruhan, stabilitas *pickering emulsion* pada penelitian ini dikendalikan oleh dua mekanisme utama: kekuatan interfacial armor yang dibangun oleh partikel NC pada antarmuka minyak–air, serta resistansi terhadap gaya gravitasi dan koalesensi yang ditentukan oleh viskositas dan repulsi elektrostatis.

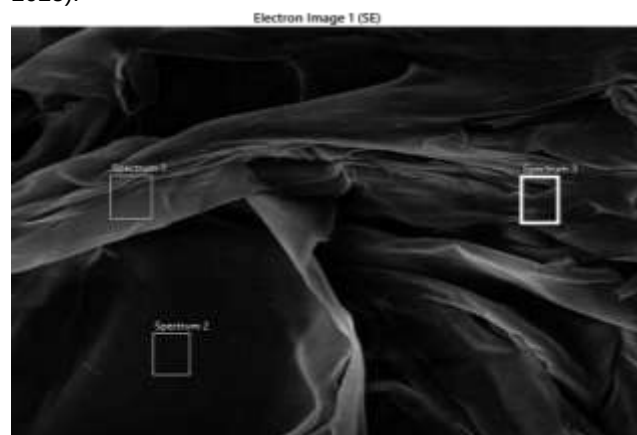
Formula NCM1 menunjukkan penurunan EI paling signifikan dari 100% menjadi 82,4% pada hari ke-15, dengan CI meningkat hingga 17,6%. Perilaku ini berkaitan erat dengan nilai potensial zeta yang relatif rendah (+27,5 mV), yang mengurangi gaya tolak-menolak antar droplet sehingga *flocculation* lebih mudah terjadi. Selain itu, sudut kontak 82,1° menunjukkan bahwa partikel NC belum mencapai posisi energi adsorpsi optimum; partikel terlalu hidrofilik untuk membentuk interfacial armor yang kuat. Kombinasi sifat ini menyebabkan droplet kurang terlindungi dari koalesensi dini, sementara viskositas rendah (45,6 mPa·s) mempercepat migrasi droplet ke permukaan sesuai persamaan Stokes (Kan et al., 2023). Dengan demikian, rendahnya EI dan meningkatnya CI pada NCM1 merupakan

konsekuensi logis dari stabilitas elektrostatis dan mekanis antarmuka yang kurang memadai.

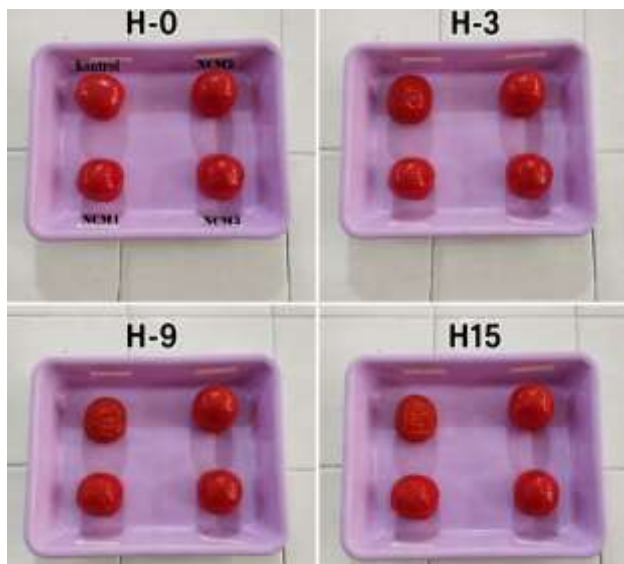
Sebaliknya, NCM2 menunjukkan stabilitas makroskopik luar biasa, dengan EI tetap 100% hingga hari ke-12 dan hanya menurun menjadi 98,8% pada hari ke-15, sedangkan CI tetap 0% hingga hari ke-12 dan hanya mencapai 1,2% pada hari ke-15. Superioritas formula ini terutama dipengaruhi oleh sudut kontak yang sangat tinggi (105,6°), yang mengindikasikan bahwa partikel NC memiliki preferensi menembus fase minyak secara dominan. Kondisi ini menghasilkan lapisan partikel antarmuka yang sangat rigid, dengan energi desorpsi tinggi yang dikenal sebagai indikator utama kestabilan *pickering emulsion* menurut literatur terbaru (Makiej et al., 2024). Meskipun viskositas NCM2 tidak setinggi NCM3, kekuatan interfacial armor lebih menentukan dalam menahan koalesensi, sehingga EI tetap tinggi sepanjang penyimpanan. Nilai potensial zeta yang cukup besar (+31,2 mV) membantu menekan *flocculation*, memperkuat keutuhan struktur droplet selama waktu penyimpanan.

Formula NCM3 menunjukkan stabilitas yang juga tinggi, dengan EI menurun perlahan dari 100% menjadi 92,9% dan CI meningkat hingga 7,1% pada hari ke-15. Stabilitas ini terutama didukung oleh viskositas tertinggi dari seluruh formula (63,2 mPa·s), yang secara signifikan memperlambat laju migrasi droplet dan secara efektif menekan creaming. Nilai potensial zeta sebesar +34,8 mV juga memberikan repulsi elektrostatis yang kuat antar droplet. Sudut kontak 90,3° menempatkan partikel NC pada posisi keseimbangan energi adsorpsi optimum, namun interfacial armor-nya relatif lebih elastis dibanding NCM2 yang memiliki sudut kontak >100°. Elastisitas ini memungkinkan terjadinya reorganisasi partikel pada permukaan droplet selama penyimpanan panjang, yang menjelaskan penurunan EI yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan NCM2. Dengan demikian, stabilitas NCM3 lebih dipengaruhi oleh kombinasi viskositas tinggi dan repulsi muatan, sementara rigiditas interfacial armor berperan lebih besar pada NCM2.

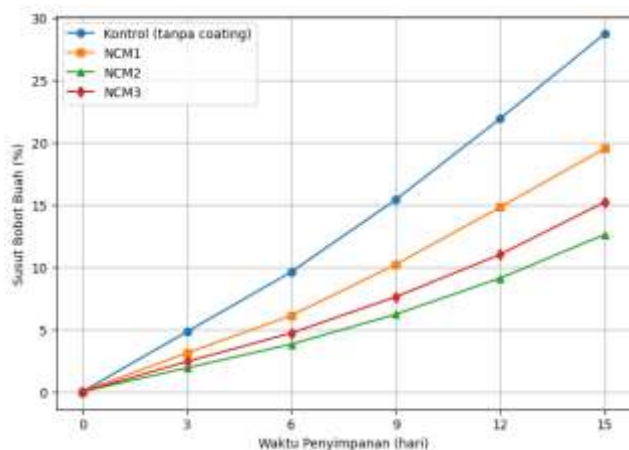
Integrasi fenomena EI dan CI yang diamati dalam penelitian ini menegaskan bahwa stabilitas *pickering emulsion* tidak bergantung pada satu parameter tunggal, tetapi merupakan hasil interaksi kompleks antara muatan permukaan, sudut kontak partikel, dan viskositas matriks. NCM1 gagal mempertahankan struktur karena ketidakefektifan ketiga parameter tersebut. NCM3 stabil karena dominasi viskositas dan potensial zeta, sementara NCM2 menjadi formula terbaik karena memiliki rigiditas antarmuka yang paling kuat, parameter yang terbukti paling menentukan bagi kestabilan jangka panjang menurut studi terbaru sistem *pickering* (Ajayi et al., 2025; Funami et al., 2025).



Gambar 4. Morfologi (SEM) agen penstabil NC (CNC-Chitosan)



Gambar 5. Pengamatan visual buah tomat



Gambar 6. Susut bobot buah tomat

Dengan demikian, EI dan CI secara konsisten memperkuat analisis fisikokimia sebelumnya, menunjukkan bahwa formula dengan wetting behavior paling berpihak pada fase minyak ($\theta > 100^\circ$) dan stabilitas muatan yang memadai memberikan keunggulan tertinggi sebagai stabilisator Pickering untuk minyak biji kelor dalam fase air berbasis NC. Novelty penting dari penelitian ini adalah bahwa kompleks NC tidak hanya berperan sebagai partikel stabilisator, tetapi juga membangun hubungan linier yang jelas antara sifat antarmuka dan stabilitas makroskopik, memberikan model prediktif yang berguna untuk aplikasi emulsi bioaktif dan *edible coating*. Kombinasi CNC–kitosan dan minyak biji kelor memberikan efek sinergis terhadap karakteristik emulsi. CNC berperan sebagai partikel padat pembentuk struktur interfacial armor, sementara kitosan meningkatkan muatan positif dan viskositas sistem. Di sisi lain, minyak biji kelor tidak hanya berfungsi sebagai fase terdispersi, tetapi juga memberikan sifat hidrofobik dan potensi aktivitas bioaktif. Interaksi ketiga komponen ini menghasilkan keseimbangan antara stabilitas elektrostatis, viskositas, dan energi adsorpsi partikel pada antarmuka, yang secara langsung menentukan performa emulsi sebagai *edible coating*.

Morfologi Pickering Emulsion (SEM)

Analisis SEM (Gambar 4) terhadap sampel NC (CNC–Chitosan) menunjukkan struktur morfologi khas yang mendukung perannya sebagai agen stabilisator dalam sistem *pickering emulsion*. Hasil analisis SEM menunjukkan

bahwa kompleks CNC–kitosan (NC) membentuk struktur komposit yang terintegrasi dengan permukaan bertekstur kasar dan agregasi mikro yang relatif homogen, tanpa indikasi pemisahan fase antara kedua komponen. Morfologi ini mengonfirmasi bahwa CNC tidak sekadar tercampur secara fisik, melainkan terikat dalam matriks kitosan melalui interaksi elektrostatis, menghasilkan partikel hibrida yang stabil secara struktural dan sesuai untuk berfungsi sebagai agen Pickering. Permukaan NC yang tidak rata dan berpori halus mendukung peningkatan luas kontak dan energi adsorpsi partikel pada antarmuka minyak–air, yang merupakan prasyarat utama pembentukan interfacial armor yang efektif.

Keberadaan kitosan dalam struktur NC menghasilkan lapisan polimer tipis yang menyelimuti permukaan nanokristal selulosa, yang tampak dari tekstur permukaan yang lebih halus dan jaringan yang lebih menyatu dibandingkan dengan CNC tanpa modifikasi. Hal ini memperkuat indikasi bahwa kitosan berperan sebagai binder yang menghubungkan nano-rod CNC menjadi struktur kompleks yang lebih stabil. Morfologi ini sangat penting, karena stabilisator Pickering yang efektif harus mampu menghasilkan partikel dengan sifat permukaan amfifilik moderat serta bentuk yang memungkinkan pembentukan “interfacial armor” yang rapat pada droplet minyak. Struktur NC yang kompak, namun tetap menunjukkan orientasi nano-rod CNC yang jelas, memberikan kemampuan bagi partikel untuk menyesuaikan sudut kontak pada antarmuka minyak–air, selaras dengan nilai sudut kontak 60.5° yang diperoleh secara eksperimental.

Analisis EDS mengonfirmasi bahwa NC tersusun terutama oleh unsur karbon (C, 51,81 wt%) dan oksigen (O, 45,04 wt%), yang merepresentasikan struktur polisakarida CNC dan kitosan, dengan keberadaan natrium (Na, 2,14 wt%) dan brom (Br, ~1 wt%) dalam jumlah minor. Variasi lokal rasio C/O pada spektrum titik (C ~69–77 wt%; O ~22–30 wt%) menunjukkan heterogenitas mikro permukaan yang berkontribusi pada sifat amfifilik NC (Yang et al., 2025). Karakter ini memungkinkan partikel berorientasi secara stabil pada antarmuka minyak–air dan menjelaskan kinerja NC dalam membentuk lapisan antarmuka yang kuat, selaras dengan stabilitas emulsi dan efektivitas aplikasinya sebagai *edible coating*.

Secara keseluruhan, hasil SEM menunjukkan bahwa NC memiliki karakteristik morfologi ideal untuk berfungsi sebagai agen stabilisator Pickering. Struktur komposit CNC–Chitosan yang kompak, seragam, dan terorganisasi dengan baik memberikan dasar fisik yang kuat bagi terbentuknya lapisan pelindung droplet yang stabil, seperti yang dibuktikan pada performa emulsi NCM2 dan NCM3. Dengan demikian, morfologi SEM NC mengonfirmasi bahwa kombinasi CNC dan kitosan menghasilkan partikel hibrida yang tidak hanya stabil secara koloidal, tetapi juga memiliki kemampuan tinggi untuk membentuk interfacial armor yang efektif pada sistem *pickering emulsion*.

Pengamatan Visual dan Susut Bobot Buah Tomat

Pengamatan visual dan penurunan susut bobot tomat selama penyimpanan memberikan gambaran komprehensif mengenai efektivitas *edible coating* dalam mempertahankan mutu fisik buah. Berdasarkan Gambar 5 dan 6, terlihat bahwa perubahan fisik buah meliputi penyusutan ukuran, pengurangan permukaan, dan penurunan kesegaran warna terjadi secara progresif seiring waktu penyimpanan, dengan tingkat keparahan yang berbeda antar pelakuan.

Tomat tanpa pelapisan (kontrol) menunjukkan perubahan visual paling cepat, ditandai dengan permukaan yang mulai keriput, tekstur yang melunak, serta warna yang cenderung kusam pada hari ke-9 hingga hari ke-15. Perubahan ini mengindikasikan kehilangan air yang tinggi

akibat proses transpirasi yang tidak terhambat, yang juga sejalan dengan nilai susut bobot tertinggi yang diamati. Dengan demikian, degradasi visual pada kontrol secara langsung mencerminkan laju kehilangan massa yang tinggi selama penyimpanan.

Pelapisan menggunakan NCM1 mampu memperlambat perubahan visual dibandingkan kontrol, namun efektivitasnya masih terbatas. Secara visual, buah mulai menunjukkan tanda-tanda pengerutan pada fase akhir penyimpanan, meskipun tidak seintens kontrol. Hal ini konsisten dengan data susut bobot yang menunjukkan penurunan yang lebih rendah dibandingkan dengan kontrol, tetapi masih relatif tinggi dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Keterbatasan ini berkaitan dengan struktur coating yang kurang kompak akibat stabilitas emulsi yang belum optimal.

Sebaliknya, tomat yang dilapisi NCM2 menunjukkan kualitas visual terbaik selama penyimpanan. Hingga hari ke-15, buah masih mempertahankan bentuk yang relatif utuh, permukaan lebih halus, serta warna yang lebih segar dibandingkan dengan perlakuan lain. Minimnya pengerutan pada permukaan menunjukkan bahwa kehilangan air dapat ditekan secara efektif (Ji & Wang, 2025). Temuan ini sangat selaras dengan data susut bobot terendah yang diperoleh pada perlakuan ini (sekitar 12,6%), yang menegaskan bahwa coating berbasis NCM2 mampu membentuk lapisan pelindung yang paling efektif dalam menghambat transpirasi dan respirasi.

Perlakuan NCM3 juga menunjukkan kemampuan mempertahankan kualitas visual yang baik, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan NCM2. Secara visual, buah masih tampak cukup segar, namun mulai menunjukkan sedikit pengerutan pada akhir penyimpanan. Hal ini mencerminkan bahwa meskipun kehilangan air dapat ditekan secara signifikan, efektivitasnya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan NCM2. Pola ini konsisten dengan nilai susut bobot yang lebih tinggi dibandingkan dengan NCM2, tetapi tetap jauh lebih rendah dibandingkan dengan kontrol.

Secara keseluruhan, terdapat korelasi yang kuat antara hasil pengamatan visual dan data susut bobot. Buah dengan tingkat susut bobot yang lebih rendah cenderung menunjukkan kualitas visual yang lebih baik, terutama dalam hal kekencangan jaringan dan minimnya pengerutan permukaan. Hal ini menegaskan bahwa efektivitas edible coating tidak hanya dapat dievaluasi melalui parameter kuantitatif seperti susut bobot, tetapi juga melalui indikator visual yang secara langsung mencerminkan tingkat kesegaran dan penerimaan konsumen.

Kombinasi CNC–kitosan dan minyak biji kelor menunjukkan efek sinergis dalam meningkatkan performa emulsi. CNC berperan sebagai partikel pembentuk struktur antarmuka (interfacial armor), kitosan meningkatkan muatan dan viskositas sistem, sedangkan minyak biji kelor memberikan sifat hidrofobik serta potensi bioaktif (Cassani & Gomez-Zavaglia, 2024; Shin et al., 2024). Interaksi ketiga komponen ini menghasilkan sistem emulsi yang tidak hanya stabil secara fisik, tetapi juga fungsional sebagai edible coating. Pengujian sensori tidak dilakukan dalam penelitian ini. Beberapa studi melaporkan bahwa penggunaan kitosan dan minyak nabati dalam edible coating dapat memengaruhi atribut sensori seperti aroma dan rasa. Kitosan diketahui dapat memberikan sedikit rasa pahit, sedangkan minyak biji kelor memiliki aroma khas yang berpotensi memengaruhi penerimaan konsumen (Y. Liu et al., 2025; Zhao et al., 2024). Oleh karena itu, evaluasi sensori perlu dipertimbangkan pada penelitian lanjutan.

KESIMPULAN

NC (CNC–kitosan) terbukti menjadi agen stabilisator Pickering yang efektif, ditunjukkan oleh muatan permukaan positif tinggi, sifat amfifilik moderat, dan morfologi komposit yang kompak. Sifat-sifat ini memungkinkan NC membentuk lapisan antarmuka yang kuat pada droplet minyak biji kelor, sehingga meningkatkan stabilitas emulsi. Di antara formula yang diuji, NCM2 menunjukkan stabilitas terbaik melalui kombinasi sudut kontak tertinggi, rigiditas antarmuka kuat, dan indeks emulsifikasi yang hampir konstan selama penyimpanan. NCM3 juga stabil, namun rigiditas lapisan antarmukanya sedikit lebih rendah dibanding NCM2.

Aplikasi emulsi sebagai *edible coating* pada buah tomat menegaskan bahwa kestabilan antarmuka berbanding langsung dengan efektivitas pelapisan dalam menekan susut bobot dan menjaga kualitas visual buah. NCM2 menghasilkan perlindungan paling optimal, diikuti oleh NCM3. Temuan ini menegaskan bahwa desain *pickering emulsion* berbasis CNC–kitosan tidak hanya meningkatkan stabilitas emulsi, tetapi juga memberikan potensi besar untuk aplikasi pangan lainnya seperti pengantaran minyak bioaktif dan pengembangan kemasan bioaktif berbasis biopolimer berdasarkan karakteristik emulsi yang didapatkan. Sistem ini berpotensi dikembangkan sebagai teknologi pelapisan ramah lingkungan untuk aplikasi industri pascapanen. Penelitian selanjutnya juga perlu mengkaji aspek sensori, uji mikrobiologi, serta mempertimbangkan optimasi metode coating yang aplikatif pada skala industri.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan pendanaan yang diberikan oleh DIPA LPPM Universitas Riau Tahun 2025 melalui skema RIPEKDOM.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasov, H. F. (2025). Modeling the effective thermal conductivity and viscosity of pickering emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 46(8), 1280–1288. <https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2325392>
- 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. In *Hybrid Advances* (Vol. 11). <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100509>
- Ali, D. C., Zhang, X., & Wang, Z. (2023). Adding nanoparticles to improve emulsion efficiency and enhance microbial degradation in Pickering emulsions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(18), 5843–5854. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12688-w>
- Aw, Y. Z., Lim, H. P., Low, L. E., Surjit Singh, C. K., Chan, E. S., & Tey, B. T. (2022). Cellulose nanocrystal (CNC)-stabilized Pickering emulsion for improved curcumin storage stability. *LWT*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113249>
- Bappenas. (2023). Food Loss and Waste Regional: West Java, Central Java, Bali. *UN Page*, 1–61. <https://www.un-page.org/static/d20a83fd822208373225d2022001d871/food-loss-waste-report-indonesia.pdf>

- Cai, D., Yan, X., Zhou, S., Meng, Y., Chen, X., Wang, G., & Ding, W. (2024). Cellulose nanocrystals from rice bran as excellent emulsifiers for independently stabilizing Pickering emulsions. *Industrial Crops and Products*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120098>
- Cassani, L., & Gomez-Zavaglia, A. (2024). Pickering emulsions in food and nutraceutical technology: from delivering hydrophobic compounds to cutting-edge food applications. In *Exploration of Foods and Foodomics* (Vol. 2, Number 5, pp. 408–442). <https://doi.org/10.37349/eff.2024.00044>
- Cheon, J., Haji, F., Baek, J., Wang, Q., & Tam, K. C. (2023). Pickering emulsions for functional food systems. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100510>
- de Carvalho-Guimarães, F. B., Correa, K. L., de Souza, T. P., Rodríguez Amado, J. R., Ribeiro-Costa, R. M., & Silva-Júnior, J. O. C. (2022). A Review of Pickering Emulsions: Perspectives and Applications. In *Pharmaceuticals* (Vol. 15, Number 11). <https://doi.org/10.3390/ph15111413>
- Ding, F., Long, S., Huang, X., Shi, J., Povey, M., & Zou, X. (2024). Emerging Pickering emulsion films for bio-based food packaging applications. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 42). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101242>
- Fahim, H., Motamedzadegan, A., Khaligh, N. G., & Farahmandfar, R. (2025). Cellulose nanocrystals (CNC) Pickering emulsions (PEs): Rheological aspects and stability of low-to-medium internal phase. *International Journal of Biological Macromolecules*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144120>
- Funami, T., Ishihara, S., Maeda, K., & Nakauma, M. (2025). Review paper: Recent development in Pickering emulsion gel technology for food and beverage applications. In *Food Hydrocolloids* (Vol. 162). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110901>
- Gunawan, C., Asben, A., Anggraini, T., & Amanda Septevani, A. (2021). Produksi dan karakterisasi selulosa mikrokristalin dari limbah batang kelapa sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.) hasil replanting perkebunan. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 29(3), 137–146. <https://doi.org/10.22302/iopri.jur.jpks.v29i3.139>
- Heidari, F., Jafari, S. M., Ziaifar, A. M., & Anton, N. (2023). Surface modification of silica nanoparticles by chitosan for stabilization of water-in-oil Pickering emulsions. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100381>
- Ji, C., & Wang, Y. (2023). Nanocellulose-stabilized Pickering emulsions: Fabrication, stabilization, and food applications. In *Advances in Colloid and Interface Science* (Vol. 318). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.102970>
- Ji, C., & Wang, Y. (2025). Lignin-containing cellulose nanocrystals from maple leaves: A natural Pickering emulsion stabilizer for food preservation. *Food Chemistry*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141407>
- Kan, G., Zi, Y., Li, L., Gong, H., Peng, J., Wang, X., & Zhong, J. (2023). Curcumin-encapsulated hydrophilic gelatin nanoparticle to stabilize fish oil-loaded Pickering emulsion. *Food Chemistry: X*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100590>
- Liu, J., Song, F., Chen, R., Deng, G., Chao, Y., Yang, Z., Wu, H., Bai, M., Zhang, P., & Hu, Y. (2022). Effect of cellulose nanocrystal-stabilized cinnamon essential oil Pickering emulsions on structure and properties of chitosan composite films. *Carbohydrate Polymers*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118704>
- Liu, Y., Qiu, W., Mo, Y., Tian, J., Liao, M., Jia, B., Zhou, Q., Liu, F., & Li, X. (2025). Application of a Pickering Emulsion Stabilized by Zein and Cellulose Nanocrystalline Composite Particles to Preserve Kiwifruit. *Molecules*, 30(17). <https://doi.org/10.3390/molecules30173478>
- Luo, Y., Wang, J., Lv, T., Wang, H., Zhou, H., Ma, L., Zhang, Y., & Dai, H. (2023). Chitosan particles modulate the properties of cellulose nanocrystals through interparticle interactions: Effect of concentration. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124500>
- Makiej, A., Hochór, Z., Smulek, W., & Kaczorek, E. (2024). The Bioactivity and Physicochemical Properties of Emulsions Based on Tamanu, Moringa, and Inca Inchi Oils. *Foods*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/foods13010062>
- Meng, W., Sun, H., Mu, T., & Garcia-Vaquero, M. (2023). Pickering emulsions with chitosan and macroalgal polyphenols stabilized by layer-by-layer electrostatic deposition. *Carbohydrate Polymers*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120256>
- Moosavi, F., & Eslami, F. (2025). Optimized formulation for moringa oil pickering emulsions using modified orange peel and rice starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(12), 9875–9892. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03675-y>
- Qin, W., Tang, S., Chen, C., & Xie, J. (2024). Preparation and characterization of cinnamon essential oil Pickering emulsion stabilized by zein/carboxylated cellulose nanocrystals composite nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109321>
- Restiana, R., & Cahyana, Y. (2023). Karakterisasi Fisikokimia dan Stabilitas Emulsi Pickering Menggunakan Tepung dan Pati Ganyong Termomodifikasi Dry-Heat sebagai Emulsifier. *Jurnal Teknotan*, 17(3), 173. <https://doi.org/10.24198/jt.vol17n3.3>
- Shin, W., Hong, J. S., Kim, D. Y., Kim, S. Y., Hyun, K., Park, J. D., & Ahn, K. H. (2024). Effect of cellulose nanocrystals on the emulsion stability and rheological properties of microalgal Pickering emulsions. *Algal Research*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103731>
- Singh, S. P., & Thakur, R. (2024). Postharvest applications of cold plasma treatment for improving food safety and sustainability outcomes for fresh horticultural produce. In *Postharvest Biology and Technology* (Vol. 209). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112694>
- Wang, X., Han, M., Zou, L., Huang, Z., Dong, W., Fan, J., & Huang, A. (2023). Preparation and characterization of Pickering emulsion with directionally embedded antimicrobial peptide MOp2 and its preservation effect on grass carp. *Current Research in Food Science*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2023.100569>
- Xie, L., Dai, X., Li, Y., Cao, Y., Shi, M., & Li, X. (2024). Pickering Emulsion of Curcumin Stabilized by

Cellulose Nanocrystals/Chitosan Oligosaccharide: Effect in Promoting Wound Healing. *Pharmaceutics*, 16(11).
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16111411>

Yang, L., Ge, J., Wu, H., Guo, H., Shan, J., & Zhang, G. (2025). Study on the Pickering emulsions stabilized by SiO₂ nanoparticles for enhanced oil recovery. *Journal of Surfactants and Detergents*, 28(2), 225–238. <https://doi.org/10.1002/jsde.12794>

Yu, X., Li, X., Ma, S., Wang, Y., Zhu, W., & Wang, H. (2023). Biomass-Based, Interface Tunable, and Dual-Responsive Pickering Emulsions for Smart Release of Pesticides. *Advanced Functional Materials*, 33(27). <https://doi.org/10.1002/adfm.202214911>

Zhao, Q., Fan, L., Li, J., & Zhong, S. (2024). Pickering emulsions stabilized by biopolymer-based nanoparticles or hybrid particles for the development of food packaging films: A review. In *Food Hydrocolloids* (Vol. 146). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109185>

Halaman ini sengaja dikosongkan