

Gelatin–Alginat Koaservat Berstruktur Nano untuk Meningkatkan Stabilitas Minyak Sacha Inchi dalam Sistem Pangan

Yuszda K. Salimi^{1*}, Afrilia Ali¹, La Alio², Astin Lukum³ dan Arviani Arviani⁴

¹Jurusan Kimia, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia

ABSTRAK

Minyak biji Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) kaya akan asam lemak tak jenuh ganda, seperti asam alfa-linolenat (ω -3) dan asam linoleat (ω -6), yang bermanfaat bagi kesehatan namun rentan terhadap oksidasi. Penelitian ini bertujuan menghasilkan sistem mikroenkapsulasi stabil dan efisien untuk melindungi minyak tersebut dari degradasi oksidatif menggunakan metode koaservasi kompleks dengan gelatin dan natrium alginat sebagai bahan pelapis, serta kalsium klorida (CaCl_2 2%) sebagai agen pengikat silang. Proses dilakukan pada pH 3,75, homogenisasi 12.000 rpm selama 7 menit, dan pengeringan rendah suhu. Karakterisasi meliputi rendemen, efisiensi enkapsulasi, kadar air, ukuran partikel, dan morfologi mikrokapsul. Hasil menunjukkan rendemen $75,00 \pm 2,10\%$, efisiensi enkapsulasi $93,85 \pm 0,93\%$, dan kadar air $11,26 \pm 1,37\%$. Analisis Particle Size Analyzer berbasis *Dynamic Light Scattering* menunjukkan diameter hidrodinamik $\sim 0,100 \mu\text{m}$ (PDI 0,321) dengan dispersi baik (transmisi 88,4%). Pengamatan *Scanning Electron Microscope* memperlihatkan morfologi sferis dengan permukaan halus tanpa retakan. Kombinasi gelatin–natrium alginat efektif sebagai bahan pelapis, menghasilkan mikrokapsul dengan efisiensi tinggi, stabilitas fisik baik, dan potensi aplikasi untuk produk pangan fungsional serta suplemen nutraseutikal.

Kata kunci: efisiensi enkapsulasi; gelatin; koaservasi kompleks; mikroenkapsulasi; minyak sacha inchi; natrium alginat.

ABSTRACT

Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seed oil is rich in polyunsaturated fatty acids, such as alpha-linolenic acid (ω -3) and linoleic acid (ω -6), which are beneficial for health but are susceptible to oxidation. This study aimed to develop a stable and efficient microencapsulation system to protect oil from oxidative degradation using a complex coacervation method with gelatin and sodium alginate as coating materials, and calcium chloride (CaCl_2 , 2%) as a crosslinking agent. The process was carried out at pH 3.75, with homogenization at 12,000 rpm for 7 minutes, followed by low-temperature drying. Characterization included yield, encapsulation efficiency, moisture content, particle size, and the morphology of the microcapsules. The results showed a yield of $75.00 \pm 2.10\%$, an encapsulation efficiency of $93.85 \pm 0.93\%$, and a moisture content of $11.26 \pm 1.37\%$. Dynamic Light Scattering-based Particle Size Analyzer analysis showed a hydrodynamic diameter of $\sim 0.100 \mu\text{m}$ (PDI 0.321) with good dispersion (88.4% transmittance). In the meantime, Scanning Electron Microscope observations revealed a spherical morphology with a smooth, crack-free surface. The gelatin-sodium alginate combination proved effective as a coating material, yielding microcapsules with high efficiency, good physical stability, and potential applications in functional food products and nutraceutical supplements.

Keywords: complex coacervation; encapsulation efficiency; gelatin; microencapsulation; sachu inchi oil; sodium alginate.

Received: 25-11-2025, Accepted: 11-02-2026, Online: 10-03-2026

PENDAHULUAN

Minyak nabati telah dikenal luas sebagai sumber asam lemak esensial yang penting bagi kesehatan tubuh manusia, berperan dalam menjaga kesehatan kardiovaskular, mendukung fungsi otak, serta mengurangi peradangan (Abdillah et al., 2018). Selain manfaat kesehatan,

*Corresponding author:
yuszda.salimi@ung.ac.id

minyak nabati juga memiliki aplikasi luas dalam industri kosmetik dan farmasi sebagai agen pelembap dan emolien alami. Di antara berbagai minyak nabati, minyak biji Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) menjadi salah satu yang menarik perhatian karena kandungan gizi dan profil asam lemaknya yang khas. Minyak ini berpotensi besar untuk pengembangan produk pangan fungsional dan suplemen kesehatan (Maya et al., 2024).

Minyak biji Sacha inchi terkenal karena kandungan asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) yang sangat tinggi, terutama asam α -linolenat (omega-3) dan asam linoleat (omega-6), yang bersama-sama mencapai lebih dari 80% total asam lemaknya (Le et al., 2024; Salimi et al., 2025). Rasio yang seimbang antara omega-3 dan omega-6 memberikan manfaat kesehatan yang besar, termasuk pencegahan penyakit degeneratif dan perbaikan kesehatan metabolik (Rojanaverawong et al., 2023; Yanti et al., 2022). Selain itu, minyak ini juga kaya akan tokoferol, vitamin A, dan berbagai senyawa antioksidan yang berfungsi untuk melawan radikal bebas serta memperkuat sistem imun (Hadzich et al., 2023; Maya et al., 2024).

Namun, meskipun memiliki kandungan gizi yang sangat baik, minyak Sacha inchi memiliki kelemahan yang signifikan, yaitu kerentanannya terhadap oksidasi. Proses oksidasi ini disebabkan oleh kandungan ikatan rangkap pada asam lemak tak jenuh, yang menyebabkan minyak ini mudah teroksidasi selama pengolahan dan penyimpanan, menghasilkan senyawa peroksida dan aldehida yang merusak kualitas sensoris serta nilai gizi minyak tersebut (Kittibunchakul et al., 2022; X. Zhao et al., 2021). Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang efektif untuk meningkatkan kestabilan minyak ini selama penyimpanan dan mengurangi degradasinya akibat oksidasi.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan stabilitas senyawa bioaktif lipofilik seperti minyak Sacha inchi adalah teknologi mikroenkapsulasi. Mikroenkapsulasi adalah proses pembungkusan minyak atau senyawa bioaktif lainnya dalam matriks polimer yang berfungsi untuk melindungi bahan inti dari paparan oksigen, cahaya, dan faktor lingkungan lainnya, serta memungkinkan pelepasan bahan aktif secara terkontrol (N. Chasquibol et al., 2023; Otálora et al., 2020). Dengan mikroenkapsulasi, minyak Sacha inchi dapat terlindungi lebih baik dari kerusakan oksidatif, sekaligus memperbaiki dispersibilitas dan bioaksesibilitasnya dalam tubuh (Otálora et al., 2020). Teknologi ini membuka peluang baru untuk pengembangan produk pangan yang mempertahankan manfaat gizi minyak tersebut tanpa mengubah sifat sensorinya (Landoni et al., 2020).

Di antara berbagai teknik mikroenkapsulasi yang ada, salah satu metode yang banyak dipilih adalah koaservasi kompleks. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan interaksi elektrostatis antara biopolimer bermuatan positif dan negatif, seperti gelatin dan natrium alginat, untuk membentuk mikrokapsul yang stabil. Keunggulan metode koaservasi kompleks terletak pada kemampuannya untuk berlangsung dalam kondisi lembut, yang mampu menjaga integritas senyawa bioaktif yang sensitif terhadap panas (Echeverri et al., 2020). Gelatin berfungsi sebagai bahan pembentuk film yang fleksibel, sementara natrium alginat memberikan stabilitas terhadap ion kalsium, menghasilkan dinding kapsul yang kuat dan elastis (Kodahl et al., 2022).

Gelatin dan natrium alginat merupakan dua bahan pelapis yang sering digunakan dalam mikroenkapsulasi karena sifat keduanya yang saling melengkapi. Gelatin, sebagai bahan alami yang dapat terurai secara hayati, memiliki kemampuan membentuk gel yang baik dan berfungsi untuk mengikat fase minyak dan air. Sementara itu, natrium alginat, yang berasal dari rumput laut, memiliki kemampuan untuk membentuk gel yang stabil saat berinteraksi dengan ion kalsium (Bi et al., 2022). Kombinasi kedua bahan ini memberikan stabilitas yang lebih baik pada mikrokapsul, menjadikannya pilihan yang cocok untuk minyak kaya asam lemak tak jenuh ganda seperti minyak Sacha inchi (Rojanaverawong et al., 2023; Vargas et al., 2025).

Namun, meskipun penggunaan kombinasi gelatin dan natrium alginat dalam mikroenkapsulasi minyak Sacha inchi menjanjikan, masih terdapat tantangan dalam mengoptimalkan efisiensi enkapsulasi dan kontrol terhadap ukuran partikel dan morfologi mikrokapsul yang dihasilkan. Faktor-faktor seperti pH, rasio biopolimer, dan konsentrasi kalsium mempengaruhi karakteristik fisik mikrokapsul yang dihasilkan, dan perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan parameter-parameter tersebut (Kodahl et al., 2022; Villamil et al., 2023).

Berdasarkan permasalahan dan celah penelitian yang ada, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan proses koaservasi kompleks menggunakan kombinasi gelatin dan natrium alginat untuk mikroenkapsulasi minyak biji Sacha inchi. Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan efisiensi enkapsulasi, menganalisis kadar air mikrokapsul, serta mengkarakterisasi morfologi dan distribusi ukuran partikel mikrokapsul yang dihasilkan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat utama meliputi magnetic stirrer untuk pengadukan larutan, pH meter untuk pengaturan keasaman, timbangan analitik untuk pengukuran massa, *Ultra-Turrax homogenizer* untuk pembentukan emulsi, *Particle Size Analyzer* untuk analisis ukuran partikel, dan *Scanning Electron Microscope* untuk pengamatan morfologi.

Bahan pokok terdiri dari minyak biji Sacha inchi sebagai inti kapsul, gelatin dan natrium alginat sebagai bahan pelapis polimerik, kalsium klorida sebagai agen pengikat silang, asam asetat untuk pengaturan pH, Tween 80 sebagai emulsifier, serta akuades sebagai pelarut. Semua bahan memenuhi standar *food-grade* untuk memastikan kesesuaian aplikasi pangan.

Prosedur Mikroenkapsulasi

Mikroenkapsulasi minyak biji Sacha Inchi dilakukan menggunakan metode koaservasi kompleks yang dimodifikasi dari (Puspita et al., 2020). Sebanyak 4 g gelatin dilarutkan dalam 140 mL akuades dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 600 rpm hingga suhu mencapai 60 ± 1 °C. Selanjutnya ditambahkan 0,5 g Tween 80 sebagai agen emulsifikasi dan 1 g minyak biji Sacha Inchi secara perlahan sambil diaduk selama 2 menit. Emulsi minyak-dalam-air kemudian dihomogenisasi menggunakan *Ultra-Turrax homogenizer* pada 12.000 rpm selama 7 menit untuk membentuk emulsi stabil.

Larutan natrium alginat (0,5 g dalam 40 mL akuades) ditambahkan bertahap ke dalam emulsi pada suhu 40 °C. pH campuran diatur menggunakan asam asetat 2,5% hingga mencapai pH 3,75 untuk memicu pembentukan kompleks elektrostatik antara gelatin bermuatan positif dan natrium alginat bermuatan negatif, membentuk fase koaservat di sekitar tetesan minyak. Campuran kemudian didinginkan dalam penangas es (5–10 °C, 600 rpm) untuk memastikan pembentukan koaservat tanpa merusak emulsi. Sebanyak 600 μ L larutan CaCl_2 2% ditambahkan perlahan untuk memperkuat struktur dinding mikrokapsul melalui mekanisme ikatan silang *egg-box*, kemudian diinkubasi pada suhu 35 °C selama 3–4 jam.

Mikrokapsul yang terbentuk disaring dengan filtrasi vakum menggunakan corong Büchner dan dicuci menggunakan akuades serta n-heksana. Mikrokapsul kemudian disimpan dalam lemari pendingin selama 24 jam untuk pematangan.

Pengeringan Mikrokapsul

Mikrokapsul basah dikeringkan dalam oven bersuhu rendah hingga mencapai bobot konstan. Serbuk mikrokapsul disimpan dalam wadah tertutup berwarna gelap pada suhu ruang dalam kondisi kering untuk mencegah fotooksidasi dan reabsorpsi uap air.

Penentuan Kadar Air

Kadar air ditentukan dengan metode gravimetri yang dimodifikasi dari (Hasrini et al., 2017). Sebanyak 0,05 g mikrokapsul ditimbang dalam cawan yang telah diketahui beratnya, dikeringkan pada 105 °C selama 3 jam, didinginkan dalam desikator, kemudian ditimbang hingga berat konstan.

Efisiensi Enkapsulasi

Efisiensi enkapsulasi (EE%) dihitung dengan metode ekstraksi minyak bebas menggunakan n-heksana yang dimodifikasi dari (El-Messery et al., 2020). Sebanyak 0,3 g mikrokapsul kering dicampur dengan 10 mL n-heksana dan divorteks selama 2 menit. Campuran disaring, dan minyak bebas diuapkan untuk memperoleh massa minyak bebas (Wf). Efisiensi dihitung dengan rumus:

$$EE\% = \frac{W_t - W_f}{W_t} \times 100$$

dengan W_t = berat total minyak yang digunakan dan W_f = berat minyak bebas yang tidak terenkapsulasi.

Analisis Ukuran Partikel

Distribusi ukuran partikel ditentukan menggunakan *Particle Size Analyzer* berbasis *Dynamic Light Scattering* (DLS). Sebanyak 1 g mikrokapsul didispersikan dalam akuades dan segera dianalisis untuk menentukan diameter hidrodinamik rata-rata, indeks polidispersitas (PDI), dan kurva distribusi ukuran.

Karakterisasi Morfologi

Morfologi mikrokapsul diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Sampel serbuk dipasang pada *stub* konduktif dan dilapisi emas tipis untuk mencegah muatan listrik. Pengamatan dilakukan pada perbesaran 3.000× - 5.000× untuk menilai bentuk dan homogenitas permukaan mikrokapsul.

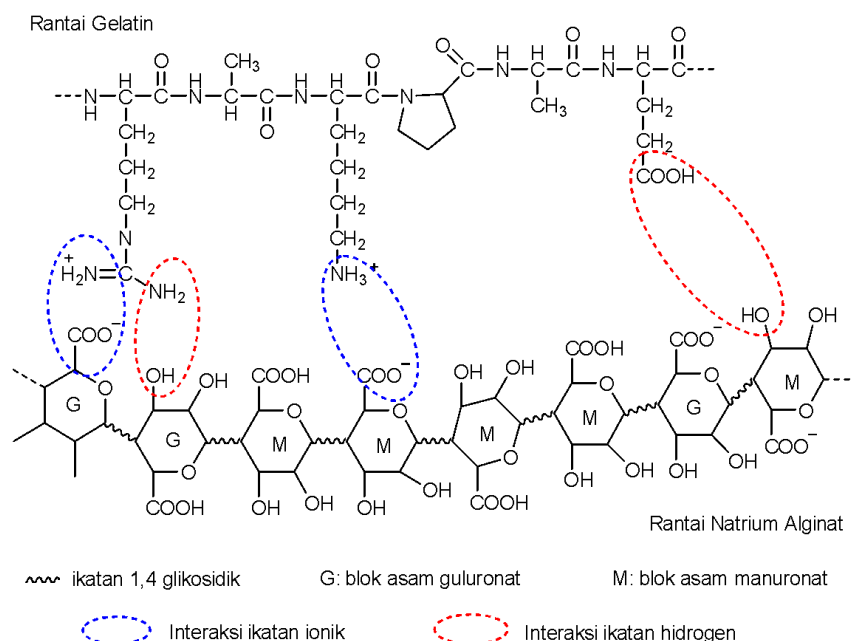
Analisis Data

Data hasil pengujian dinyatakan sebagai rata-rata ± simpangan baku (SD) dari dua kali pengulangan. Uji normalitas dilakukan sebelum analisis statistik komparatif untuk memastikan data berdistribusi normal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Mikroenkapsulasi

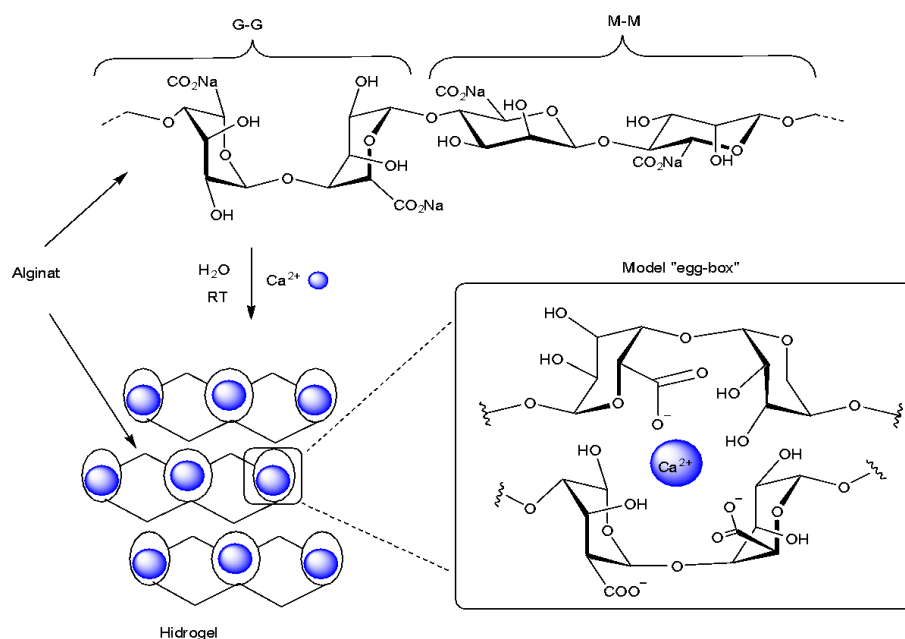
Mikroenkapsulasi minyak biji Sacha Inchi berhasil dilakukan melalui metode koaservasi kompleks menggunakan kombinasi biopolimer gelatin dan natrium alginat. Produk akhir berupa padatan remah berwarna kuning muda dengan rendemen sebesar 75,0%.



Gambar 1. Mekanisme Reaksi Koaservasi Kompleks antara Gelatin dan Natrium Alginat (diadaptasi dari Puspita et al., 2020).

Warna kuning muda tersebut menandakan bahwa senyawa bioaktif alami seperti karotenoid dan tokoferol masih terjaga selama proses koaservasi. Nilai rendemen yang diperoleh menunjukkan efisiensi pemisahan yang tinggi, sejalan dengan kisaran 70–80% yang dilaporkan oleh (da Silva Soares et al., 2019) dan (Landoni et al., 2020) pada penelitian sejenis berskala laboratorium. Kehilangan massa sekitar 25% diduga disebabkan oleh penguapan air selama emulsifikasi, kehilangan sebagian minyak permukaan saat pencucian, serta pembentukan koaservat yang tidak sempurna akibat distribusi pH dan suhu yang belum sepenuhnya homogen.

Mekanisme pembentukan mikrokapsul terjadi melalui interaksi elektrostatis antara gugus amino terprotonasi ($-\text{NH}_3^+$) dari gelatin dengan gugus karboksilat terdeprotonasi ($-\text{COO}^-$) dari natrium alginat pada pH optimum 3,75. Interaksi muatan berlawanan tersebut menghasilkan kompleks polielektrolit yang mengendap di sekitar droplet minyak, membentuk lapisan koaservat yang kemudian mengalami pematangan dan dehidrasi hingga terbentuk dinding kapsul yang padat (Puspita et al., 2020). Skema reaksi ini ditunjukkan pada Gambar 1. Penambahan CaCl_2 2% berfungsi sebagai agen pengikat silang, membentuk struktur egg-box model melalui interaksi ion Ca^{2+} dengan blok asam guluronat dan manuronat pada rantai alginat, sebagaimana digambarkan Pada Gambar 2. Pembentukan jaringan tiga dimensi tersebut memperkuat struktur dinding serta meningkatkan ketahanan oksidatif mikrokapsul (Sarker et al., 2014; Silva Neto et al., 2024).



Gambar 2. Mekanisme Ikatan Silang dan Proses Pembentukan Struktur *Egg-Box Model* (diadaptasi dari Angsari & Agustini, 2020)

Morfologi padatan remah yang dihasilkan merupakan ciri khas produk dari proses koaservasi kompleks pada suhu rendah, berbeda dengan teknik spray drying yang menghasilkan partikel berbentuk sferis sempurna. Tekstur padatan remah mencerminkan dinding polimer yang kuat dan fleksibel serta memungkinkan integrasi yang baik dalam formulasi produk pangan (Rasdi et al., 2021). Secara keseluruhan, kombinasi kondisi proses yang meliputi pH 3,75, konsentrasi CaCl_2 2%, dan homogenisasi intensif terbukti menghasilkan sistem mikrokapsul yang stabil dan efisien, konsisten dengan temuan (Echeverri et al., 2020) dan (Landoni et al., 2020).

Efisiensi Enkapsulasi (EE)

Nilai efisiensi enkapsulasi (EE) minyak biji Sacha Inchi mencapai $93,85\% \pm 0,93\%$ (Tabel 1), menunjukkan kemampuan tinggi dinding mikrokapsul dalam menahan minyak inti selama proses koaservasi. Variasi antarulangan yang rendah ($<1,5\%$) mencerminkan kestabilan

sistem yang baik dan reproduibilitas proses yang tinggi. Nilai EE yang diperoleh tergolong tinggi dan sebanding dengan sistem ovalbumin–alginat (94,12%) serta gelatin–alginat pada minyak jeruk nipis (92,04%) (da Silva Soares et al., 2019; Puspita et al., 2020).

Tingginya EE disebabkan oleh pengaturan parameter proses yang optimal. Penggunaan Tween 80 sebagai surfaktan menurunkan tegangan antarmuka dan menstabilkan emulsi (Vicente et al., 2018); pH 3,75 memaksimalkan interaksi elektrostatik antara kedua polimer (Kodahl et al., 2022); sedangkan penambahan CaCl_2 2% memperkuat dinding kapsul melalui pembentukan ikatan ionik yang rapat (Chen et al., 2023). Proses homogenisasi berkecepatan tinggi selama 7 menit menghasilkan droplet minyak yang seragam, sehingga memperluas luas permukaan antarmuka dan meningkatkan efisiensi pelapisan (Villamil et al., 2023).

Secara teoritis, keseimbangan muatan antara gelatin dan alginat menghasilkan lapisan dinding yang padat dengan difusi minyak yang minimal selama pengeringan (Landoni et al., 2020; Rojanaverawong et al., 2023). Nilai EE yang tinggi memperkuat kemampuan sistem ini dalam melindungi komponen minyak kaya asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) dari oksidasi, sebagaimana dilaporkan oleh (Otálora et al., 2020). Dengan demikian, sistem gelatin–alginat terbukti efektif sebagai matriks pelindung dalam mikroenkapsulasi minyak nabati bernilai gizi tinggi.

Tabel 1. Rendemen, Efisiensi Enkapsulasi dan Kadar Air Mikro kapsul Minyak Biji Sacha Inchi

Variabel respons	Nilai prediksi (%)	Nilai eksperimen (%)	Deviasi (%)
Rendemen	80.0	75.00 ± 2.10	6.3
Efisiensi enkapsulasi (EE)	90.0	93.85 ± 0.93	4.3
Kadar air	10.0	11.26 ± 1.37	12.6

Kadar Air Mikro kapsul

Kadar air mikro kapsul sebesar 11,26% ± 1,37% sebagaimana disajikan dalam Tabel 1, menunjukkan dehidrasi yang cukup baik untuk proses laboratorium tanpa spray drying. Meskipun sedikit lebih tinggi dari rentang ideal 4–8% (N. Chasquibol et al., 2022), kadar air ini masih dalam batas aman untuk menjaga integritas struktur dinding. Kandungan air tersebut terutama berupa air terikat akibat keberadaan gugus hidrofilik seperti $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, dan $-\text{COOH}$ pada gelatin dan alginat, yang membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air (Napiórkowska et al., 2024).

Permukaan mikro kapsul yang halus dan tidak berpori dari hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa air tersimpan di bagian internal matriks, bukan di permukaan (Echeverri et al., 2020). Air terikat ini berperan sebagai plastisizer yang meningkatkan elastisitas dan mencegah retak selama pengeringan (Landoni et al., 2020). Namun, kadar air yang sedikit tinggi dapat meningkatkan permeabilitas oksigen, sehingga perlu pengeringan lanjutan seperti *vacuum drying* atau *fluidized bed drying* untuk aplikasi industri (Wintachai & Voravuthikunchai, 2022).

Secara keseluruhan, kadar air 11,26% menunjukkan keseimbangan antara kestabilan struktural dan fleksibilitas mekanik dinding kapsul, tanpa adanya minyak bebas yang terdeteksi di permukaan, menandakan keberhasilan sistem enkapsulasi.

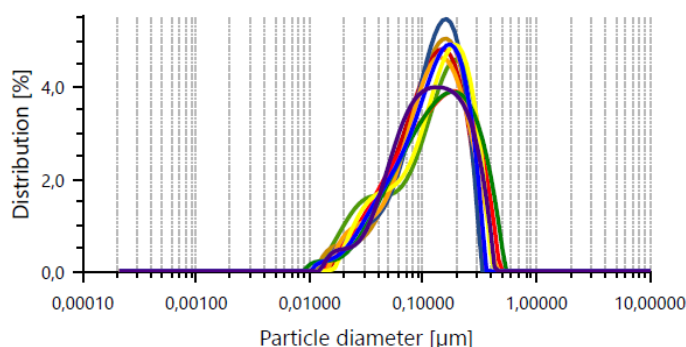
Distribusi Ukuran Partikel (PSA/DLS)

Analisis menggunakan *Dynamic Light Scattering* menunjukkan bahwa mikro kapsul memiliki diameter hidrodinamik rata-rata $0,10012 \pm 0,00401 \mu\text{m}$ (sekitar 100 nm) dengan indeks polidispersitas (PDI) $0,321 \pm 0,018$, sebagaimana disajikan pada Gambar 3 dan Tabel 2. Distribusi unimodal dan nilai PDI <0,4 menandakan keseragaman partikel yang baik. Nilai ini menunjukkan bahwa mikro kapsul berada pada skala nano, yang berbeda signifikan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menghasilkan ukuran mikrometer (N. A. Chasquibol et al., 2019; Suwannasang et al., 2021).

Ukuran partikel yang kecil diperoleh berkat kombinasi homogenisasi intensif dan kondisi pH optimum, yang memungkinkan pembentukan droplet nano stabil dengan muatan permukaan

seimbang (Echeverri et al., 2020; Kodahl et al., 2022). Sistem ini memiliki transmitansi tinggi (88,4%), menunjukkan kestabilan koloid yang baik serta minim aglomerasi. Menurut (Danaei et al., 2018), partikel berukuran nano meningkatkan luas permukaan spesifik dan memperbaiki bioavailabilitas komponen aktif.

Implikasinya, mikrokapsul nano memiliki potensi pelepasan terkontrol dengan efisiensi penyerapan tinggi dalam sistem biologis, menjadikannya prospektif untuk aplikasi pangan fungsional dan suplemen nutraseutikal (Barbosa et al., 2021; Safithri et al., 2020).



Gambar 3. Distribusi ukuran partikel (PSA/DLS) mikrokapsul minyak biji Sacha inchi yang terdispersi dalam air. Kurva yang ditumpangtindihkan menunjukkan puncak utama di sekitar 0,14 μm , menandakan distribusi partikel yang sempit dan relatif seragam. Warna kurva mewakili hasil dari beberapa replikasi pengujian, yaitu hijau tua (replikasi 1), coklat (replikasi 2), merah tua (replikasi 3), biru tua (replikasi 4), merah (replikasi 5), oranye (replikasi 6), kuning (replikasi 7), hijau (replikasi 8), biru (replikasi 9), dan ungu (replikasi 10). Setiap replikasi memperlihatkan profil distribusi yang konsisten dengan deviasi kecil antar sampel, yang mengindikasikan stabilitas sistem koaservasi dan reproduktibilitas proses enkapsulasi yang baik.

Tabel 2. Metrik Hamburan Cahaya Dinamis untuk Mikrokapsul Minyak Sacha Inchi (Rata-rata $\pm$ SD;RSD).

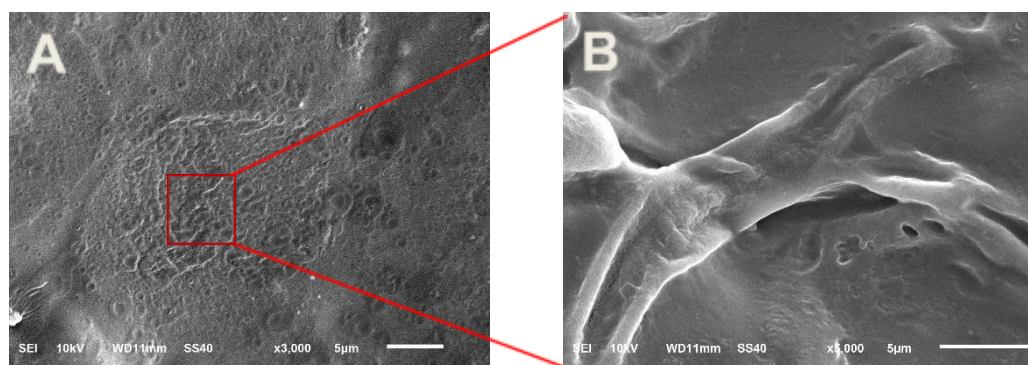
Parameter	Rata-rata $\pm$ SD	RSD (%)
Diameter hidrodinamik (μm)	0,10012 $\pm$ 0,00401	4,00%
Polydispersity Index (%)	32,1 $\pm$ 1,8	5,74%
Peak 1 (μm)	0,14013 $\pm$ 0,01039	7,41%
Transmittansi (%)	88,4 $\pm$ 0,3	0,37%
Koefisien difusi ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)	4,9 $\pm$ 0,2	3,88%

Morfologi Mikrokapsul (SEM)

Citra SEM pada perbesaran 3.000 $\times$ dan 5.000 $\times$ menunjukkan permukaan mikrokapsul halus dengan kontur bergelombang ringan tanpa retakan atau deformasi besar (Gambar 4). Struktur ini mengindikasikan proses pengeringan yang lembut serta integritas mekanik yang baik. Tekstur bergelombang mencerminkan fleksibilitas dinding akibat kandungan air terikat, sedangkan pola bercabang menunjukkan adanya ikatan silang antar polimer yang membentuk jaringan tiga dimensi stabil seperti *egg-box model* (Landoni et al., 2020; Sarker et al., 2014).

Morfologi ini sejalan dengan hasil penelitian (Q. Zhao et al., 2022) dan (Hernández-Fernández et al., 2020), yang menyatakan bahwa kontraksi selama dehidrasi menghasilkan struktur padat dengan permukaan mikro bergelombang. Topografi tersebut memperkuat dinding dan menurunkan permeabilitas terhadap oksigen, sehingga menekan oksidasi minyak kaya PUFA (N. Chasquibol et al., 2023).

Konsistensi antara hasil SEM dan pengamatan optik menunjukkan bahwa sistem koaservasi menghasilkan dinding padat, kontinu, dan homogen suatu indikator efisiensi enkapsulasi tinggi dan kestabilan jangka panjang.



Gambar 4. Mikrograf SEM Mikrokapsul Minyak Sacha Inchi: (A) 3.000× Menunjukkan Permukaan yang Umumnya Halus dan Bergelombang Halus; (B) 5.000× Menunjukkan Dinding Utuh dengan Pori-Pori Kecil dan Cekungan Dangkal. Skala Batang: 5 µm.

Analisis Kritis dan Integrasi Hasil

Integrasi seluruh parameter menunjukkan bahwa sistem koaservasi kompleks gelatin–natrium alginat yang diperkuat dengan CaCl_2 2% berhasil menghasilkan mikrokapsul nano stabil dengan performa fungsional tinggi. Rendemen sebesar 75% dan EE mencapai 93,85% menegaskan efisiensi proses, sementara kadar air 11,26% memberikan keseimbangan antara kestabilan dan fleksibilitas struktural. Ukuran partikel sekitar 100 nm dengan PDI 0,321 menunjukkan distribusi seragam dan stabilitas koloid yang baik, sedangkan morfologi halus tanpa retakan menandakan kekuatan mekanik dinding kapsul.

Hubungan antarkarakteristik ini bersifat sinergis dinding padat meningkatkan efisiensi enkapsulasi, ukuran nano memperluas bioaksesibilitas, dan kadar air moderat menjaga elastisitas matriks pelindung. Kombinasi tersebut menghasilkan sistem mikrokapsulasi yang efektif untuk melindungi minyak Sacha Inchi dari oksidasi serta mendukung pelepasan terkontrol selama penyimpanan atau pencernaan. Hasil ini konsisten dengan laporan (N. Chasquibol et al., 2022; Otálora et al., 2020) mengenai keunggulan sistem biopolimer alami dalam mempertahankan stabilitas minyak kaya PUFA dan tokoferol.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa metode koaservasi kompleks berbasis gelatin–natrium alginat yang diperkuat ion Ca^{2+} mampu menghasilkan mikrokapsul minyak *Sacha Inchi* dengan efisiensi enkapsulasi tinggi, struktur nano yang stabil, dan morfologi padat berpermukaan halus. Kombinasi parameter proses yang terkontrol memberikan sistem pelindung efektif terhadap oksidasi minyak dan menjaga bioaktivitas komponen fungsionalnya. Temuan ini berkontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi mikrokapsulasi berbasis biopolimer alami, dengan potensi aplikasi luas pada produk pangan fungsional dan suplemen kesehatan berbasis minyak nabati kaya PUFA.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode koaservasi kompleks berbasis gelatin–natrium alginat dengan penambahan kalsium klorida (CaCl_2) sebagai agen pengikat silang efektif dalam menghasilkan mikrokapsul minyak biji Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) yang stabil dan efisien. Kondisi proses optimal pada pH 3,75, kecepatan homogenisasi 12.000 rpm, dan konsentrasi CaCl_2 sebesar 2% menghasilkan sistem koaservat dengan struktur polielektrolit padat dan kohesif. Efisiensi enkapsulasi mencapai 93,85%, menunjukkan kemampuan tinggi dinding mikrokapsul dalam mempertahankan minyak inti dari kehilangan selama proses pembentukan. Mikrokapsul yang diperoleh memiliki ukuran partikel rata-rata sekitar 100 nm dengan indeks polidispersitas rendah, menandakan distribusi seragam dan kestabilan koloid yang baik. Morfologi permukaan halus tanpa retakan serta kadar air moderat ($\pm 11,26\%$) menunjukkan keseimbangan antara elastisitas dinding dan integritas struktural, yang penting

bagi ketahanan selama penyimpanan. Sistem ini terbukti mampu melindungi asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) dan tokoferol dari oksidasi, sekaligus berpotensi mendukung pelepasan terkontrol dalam aplikasi pangan atau nutraseutikal. Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa pendekatan koaservasi kompleks gelatin–alginat yang diperkuat ion Ca^{2+} merupakan metode mikroenkapsulasi yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk meningkatkan stabilitas serta umur simpan minyak nabati kaya PUFA. Pendekatan ini dapat menjadi dasar pengembangan teknologi enkapsulasi berbasis biopolimer alami pada produk pangan fungsional dan suplemen kesehatan. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan dilakukan optimasi proses pengeringan dengan metode vacuum drying atau fluidized bed drying guna menurunkan kadar air mikrokapsul hingga kisaran ideal tanpa mengurangi kekuatan dinding. Evaluasi stabilitas oksidatif jangka panjang serta profil pelepasan senyawa aktif secara in vitro perlu dilakukan untuk memastikan efektivitas fungsional sistem pada kondisi penyimpanan nyata. Selain itu, eksplorasi ko-enkapsulasi dengan antioksidan alami, seperti polifenol atau tokoferol tambahan, berpotensi meningkatkan perlindungan terhadap oksidasi primer dan sekunder.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdillah, M. N., Musfiroh, I., & Indriyati, W. (2018). Analisis Senyawa Antioksidan Pada Minyak Biji Labu Kuning (Cucurbita Pepo L.). *Journal of Pharmacopolium*, 1(2), 53–61.
- Angsari, T. F., & Agustini, R. (2020). Pengaruh Variasi Konsentrasi Amilase dari Kedelai (Glycine max L.) dan Natrium Alginat sebagai Matriks Enzim terhadap Efektivitas Imobilisasi. *Unesa Journal of Chemistry*, 9(3), 203–211. <https://doi.org/10.26740/UJC.V9N3.P203-211>
- Barbosa, A. E. G., Bastos, L. P. H., & Garcia-Rojas, E. E. (2021). Complex Coacervates Formed between Whey Protein Isolate and Carboxymethylcellulose for Encapsulation of β -Carotene from Sacha Inchi Oil: Stability, In Vitro Digestion and Release Kinetics. *Food Biophysics*, 16(3), 293–305. <https://doi.org/10.1007/S11483-021-09670-2/METRICS>
- Bi, D., Yang, X., Yao, L., Hu, Z., Li, H., Xu, X., & Lu, J. (2022). Potential Food and Nutraceutical Applications of Alginate: A Review. *Marine Drugs*, 20(9), 564. <https://doi.org/10.3390/MD20090564>
- Chasquibol, N. A., Gallardo, G., Gómez-Coca, R. B., Trujillo, D., Moreda, W., & Pérez-Camino, M. C. (2019). Glyceridic and Unsaponifiable Components of Microencapsulated Sacha Inchi (Plukenetia huayllabambana L. and Plukenetia volubilis L.) Edible Oils. *Foods* 2019, Vol. 8, Page 671, 8(12), 671. <https://doi.org/10.3390/FOODS8120671>
- Chasquibol, N., Alarcón, R., Gonzales, B. F., Sotelo, A., Landoni, L., Gallardo, G., García, B., & Pérez-Camino, M. C. (2022). Design of Functional Powdered Beverages Containing Co-Microcapsules of Sacha Inchi P. huayllabambana Oil and Antioxidant Extracts of Camu Camu and Mango Skins. *Antioxidants*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/antiox11081420>
- Chasquibol, N., Gonzales, B. F., Alarcón, R., Sotelo, A., Gallardo, G., García, B., & Pérez-Camino, M. del C. (2023). Co-Microencapsulation of Sacha Inchi (Plukenetia huayllabambana) Oil with Natural Antioxidants Extracts. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 2126, 12(11), 2126. <https://doi.org/10.3390/FOODS12112126>
- Chen, J., Fang, W., Liu, W., Liu, J., & Gong, P. (2023). Microcapsules and Nanoliposomes Based Strategies to Improve the Stability of Blueberry Anthocyanins. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 7344, 28(21), 7344. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28217344>
- da Silva Soares, B., Siqueira, R. P., de Carvalho, M. G., Vicente, J., & Garcia-Rojas, E. E. (2019). Microencapsulation of sachu inchi oil (Plukenetia volubilis L.) using complex coacervation: Formation and structural characterization. *Food Chemistry*, 298, 125045. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125045>
- Danaei, M., Dehghankhold, M., Ataei, S., Hasanzadeh Davarani, F., Javanmard, R., Dokhani, A., Khorasani, S., & Mozafari, M. R. (2018). Impact of Particle Size and Polydispersity Index on the Clinical Applications of Lipidic Nanocarrier Systems. *Pharmaceutics* 2018, Vol. 10, Page 57, 10(2), 57. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS10020057>

- Echeverri, J. D., Alhajj, M. J., Montero, N., Yarcé, C. J., Barrera-Ocampo, A., & Salamanca, C. H. (2020). Study of In Vitro and In Vivo Carbamazepine Release from Coarse and Nanometric Pharmaceutical Emulsions Obtained via Ultra-High-Pressure Homogenization. *Pharmaceuticals* 2020, Vol. 13, Page 53, 13(4), 53. <https://doi.org/10.3390/PH13040053>
- El-Messery, T. M., Altuntas, U., Altin, G., & Özçelik, B. (2020). The effect of spray-drying and freeze-drying on encapsulation efficiency, in vitro bioaccessibility and oxidative stability of krill oil nanoemulsion system. *Food Hydrocolloids*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105890>
- Hadzich, A., Flores, S., Masucci, A. E., Gomez, E. D., & Groß, G. A. (2023). NMR and GPC Analysis of Alkyd Resins: Influence of Synthesis Method, Vegetable Oil and Polyol Content. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 1993, 15(9), 1993. <https://doi.org/10.3390/POLYM15091993>
- Hasrini, R. F., Zakaria, F. R., Adawiyah, D. R., & Suparto, I. H. (2017). Mikroenkapsulasi Minyak Sawit Mentah dengan Penyalut Maltodekstrin dan Isolat Protein Kedelai. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, 28(1), 10–19. <https://doi.org/10.6066/JTIP.2017.28.1.10>
- Hernández-Fernández, M. Á., García-Pinilla, S., Ocampo-Salinas, O. I., Gutiérrez-López, G. F., Hernández-Sánchez, H., Cornejo-Mazón, M., de Jesús Perea-Flores, M., & Dávila-Ortiz, G. (2020). Microencapsulation of Vanilla Oleoresin (*V. planifolia* Andrews) by Complex Coacervation and Spray Drying: Physicochemical and Microstructural Characterization. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/FOODS9101375>
- Kittibunchakul, S., Hudthagosol, C., Sanporkha, P., Sapwarobol, S., Temviriyankul, P., & Suttisansanee, U. (2022). Evaluation of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) By-Products as Valuable and Sustainable Sources of Health Benefits. *Horticulturae*, 8(4), 344. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8040344/S1>
- Kodahl, N., Frandsen, H. B., Lütken, H., Petersen, I. L., Paredes Andrade, N. J., García-Davila, C., & Sørensen, M. (2022). Lipid composition of the Amazonian ‘Mountain Sacha Inchi’ including *Plukenetia carolis-vegae* Bussmann, Paniagua & C.Téllez. *Scientific Reports*, 12(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/S41598-022-10404-8>;SUBJMETA
- Landoni, L., Alarcon, R., Vilca, L., Chasquibol, N., Pérez-Camino, M. C., & Gallardo, G. (2020). Physicochemical characterization and oxidative stability of microencapsulated edible sachá inchi seed oil by spray drying. *Grasas y Aceites*, 71(4), e387–e387. <https://doi.org/10.3989/GYA.1028192>
- Le, V. T. T., Huynh, T. H., Chen, L. Y., Praristiya, M. R. S., Lin, H. Y., Lai, K. H., Lee, Y. L., Chen, L. G., & Wang, C. C. (2024). Safety evaluation of *Plukenetia volubilis* seeds: a metabolomic profiling and network toxicology approach. *RSC Advances*, 14(40), 29319–29329. <https://doi.org/10.1039/D4RA03767G>
- Maya, I., Sriwidodo, S., Mita, S. R., Kusumawulan, C. K., Putriana, N. A., Amalia, E., Aulia, R. N., Sofyan, H. N., Dzulfannazhir, F., & Nugraha, M. H. (2024). Formulation and Evaluation of Facial Serum Containing Sacha Inchi Oil (*Plukenetia volubilis* L.) from Indonesia as an Anti-Aging: Stability, In Vitro, and Skin Irritation Assessments. *Cosmetics* 2024, Vol. 11, Page 226, 11(6), 226. <https://doi.org/10.3390/COSMETICS11060226>
- Napiórkowska, A., Szpicer, A., Górska-Horczyzak, E., & Kurek, M. A. (2024). Microencapsulation of Essential Oils Using Faba Bean Protein and Chia Seed Polysaccharides via Complex Coacervation Method. *Molecules* 2024, Vol. 29, Page 2019, 29(9). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29092019>
- Otálora, M. C., Camelo, R., Wilches-Torres, A., Cárdenas-Chaparro, A., & Gómez Castaño, J. A. (2020). Encapsulation Effect on the In Vitro Bioaccessibility of Sacha Inchi Oil (*Plukenetia volubilis* L.) by Soft Capsules Composed of Gelatin and Cactus Mucilage Biopolymers. *Polymers*, 12(9), 1995. <https://doi.org/10.3390/POLYM12091995>
- Puspita, S., Eddy, D. R., Wahyudi, T., & Julaeaha, E. (2020). Microencapsulation of Lime Peel Essential Oils (*Citrus aurantifolia*) with Complex Coacervation Methods using Gelatin/Sodium Alginate Coating. *Jurnal Kimia Valensi*, 6(1), 104–110. <https://doi.org/10.15408/jkv.v6i1.14618>

- Rasdi, F. S., Zakaria, Z., Hussin, N., Tarmizi Ahmad, A. H., Abu Bakar, C. A., Anwar, N. Z. R., & Shahidan, N. (2021). A review on microencapsulation of Sacha inchi oil, flaxseed oil, chia seed oil and palm oil. *Bioscience Research*, 342–357. www.isisn.org
- Rojanaverawong, W., Wongmanee, N., & Hanchang, W. (2023). Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Oil Improves Hepatic Insulin Sensitivity and Glucose Metabolism through Insulin Signaling Pathway in a Rat Model of Type 2 Diabetes. *Preventive Nutrition and Food Science*, 28(1), 30–42. <https://doi.org/10.3746/PNF.2023.28.1.30>
- Safithri, M., Indariani, S., & Yuliani, R. (2020). Effect of Microencapsulation Techniques on Physical and Chemical Characteristics of Functional Beverage Based on Red Betel Leaf Extract (*Piper crocatum*). *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 23(8), 276–282. <https://doi.org/10.14710/JKSA.23.8.276-282>
- Salimi, Y. K., Tungadi, R., Liputo, S. A., Kilo, A. K., Rauf, A. N. P., & Dali, I. B. (2025). Physicochemical Properties, Fatty Acid and Amino Acid Profiles, and Antioxidant Activity of Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis* L.) Seed Oil and Press Cake Extracted Using Hydraulic Press and Soxhlet Methods. *Trends in Sciences*, 22(6), 9690. <https://doi.org/10.48048/tis.2025.9690>
- Sarker, B., Papageorgiou, D. G., Silva, R., Zehnder, T., Gul-E-Noor, F., Bertmer, M., Kaschta, J., Chrissafis, K., Detsch, R., & Boccaccini, A. R. (2014). Fabrication of alginate–gelatin crosslinked hydrogel microcapsules and evaluation of the microstructure and physico-chemical properties. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(11), 1470–1482. <https://doi.org/10.1039/C3TB21509A>
- Silva Neto, E. de S., Yamaguchi, M. M., Shirai, M. A., Ueno, C. T., Alvim, I. D., Yamashita, F., Grosso, C. R. F., & Sakanaka, L. S. (2024). Oxidative stability of sacha inchi oil microparticles covered with ovalbumin. *Polímeros*, 34(4), e20240041. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20240060>
- Suwannasang, S., Thumthanaruk, B., Zhong, Q., Uttapap, D., Puttanlek, C., Vatanyoopaisarn, S., & Rungsardthong, V. (2021). The Improved Properties of Zein Encapsulating and Stabilizing Sacha Inchi Oil by Surfactant Combination of Lecithin and Tween 80. *Food and Bioprocess Technology*, 14(11), 2078–2090. <https://doi.org/10.1007/S11947-021-02706-Y/METRICS>
- Vargas, J., Arbelaez, N., Cardenas, D., Murillo, J., Ospina, V., Robledo, S., & Soto, J. (2025). In vitro antitumor capacity of extracts obtained from the plants *Plukenetia volubilis* (Sacha inchi) and *Moringa oleifera* in gastric cancer. *F1000Research*, 14. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.158563.2/DOI>
- Vicente, J., Pereira, L. J. B., Bastos, L. P. H., de Carvalho, M. G., & Garcia-Rojas, E. E. (2018). Effect of xanthan gum or pectin addition on Sacha Inchi oil-in-water emulsions stabilized by ovalbumin or tween 80: Droplet size distribution, rheological behavior and stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 339–345. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.08.041>
- Villamil, R. A., Cortés, L. Y., & Gutiérrez, L. F. (2023). Physicochemical and sensory properties of Sacha Inchi oil-functionalised stirred yogurt. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(7), 3681–3692. <https://doi.org/10.1111/IJFS.16470>
- Wintachai, P., & Voravuthikunchai, S. P. (2022). Characterization of Novel Lytic Myoviridae Phage Infecting Multidrug-Resistant *Acinetobacter baumannii* and Synergistic Antimicrobial Efficacy between Phage and Sacha Inchi Oil. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/PH15030291>
- Yanti, S., Agrawal, D. C., Saputri, D. S., Lin, H. Y., & Chien, W. J. (2022). Nutritional Comparison of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) Residue with Edible Seeds and Nuts in Taiwan: A Chromatographic and Spectroscopic Study. *International Journal of Food Science*, 2022, 9825551. <https://doi.org/10.1155/2022/9825551>
- Zhao, Q., Gao, Y. S., Jin, F., & Zhu, L. Y. (2022). Preparation Process Optimization and Performance Characterization of Feed Plant Essential Oil Microcapsules. *Molecules*, 27(20), 7096. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27207096>

Zhao, X., Xiang, X., Huang, J., Ma, Y., Sun, J., & Zhu, D. (2021). Studying the Evaluation Model of the Nutritional Quality of Edible Vegetable Oil Based on Dietary Nutrient Reference Intake. *ACS Omega*, 6(10), 6691–6698. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.0C05544>