

Karakteristik *Solid Lipid Nanoparticle* Fe-Sulfat Berbasis Asam Stearat dan Lemak Kaya Monolaurin dengan Metode Evaporasi Pelarut

Characteristics of Solid Lipid Nanoparticle Fe-Sulfate Based on Stearic Acid and Monolaurin-Rich Fat by Solvent Evaporation Method

Edy Subroto*, Deta Hartini, Yana Cahyana, Rossi Indiarso

Departemen Teknologi Industri Pangan, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Sumedang 40600, Indonesia

*E-mail: edy.subroto@unpad.ac.id

Diterima: 10 November 2025; Disetujui: 6 April 2026

ABSTRAK

Zat besi sangat penting bagi tubuh manusia, terutama untuk mencegah anemia atau defisiensi zat besi. Hal ini dapat dicegah dengan mengonsumsi suplemen zat besi atau produk terfortifikasi zat besi, tetapi zat besi memiliki rasa dan bau menyengat sehingga tidak disukai. Nanoenkapsulasi menawarkan teknik enkapsulasi dimana bahan aktif terperangkap di dalam nanopartikel, diantaranya dalam sistem *Solid Lipid Nanoparticle* (SLN) berbasis asam stearat dan lemak kaya monolaurin menggunakan metode evaporasi pelarut. Penelitian ini bertujuan menentukan konsentrasi lemak kaya monolaurin dan konsentrasi Fe-sulfat yang menghasilkan SLN dengan efisiensi enkapsulasi yang optimal dan sifat fisikokimia yang baik. Lemak kaya monolaurin digunakan pada konsentrasi 20%, 30% dan 40% (b/b lipid), sedangkan Fe-sulfat pada konsentrasi 10%, 20% dan 30% b/b total lipid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi lemak kaya monolaurin dan konsentrasi Fe-sulfat mempengaruhi karakteristik SLN Fe-sulfat. Perlakuan konsentrasi lemak kaya monolaurin 40% dengan konsentrasi Fe-sulfat 2% menghasilkan karakteristik SLN terbaik, yaitu nilai *Z-Average* sebesar 128,40 nm, *polydispersity index* (PI) sebesar 0,877, dan efisiensi enkapsulasi 97,38%. SLN Fe-sulfat memiliki morfologi partikel berbentuk bulat dan nilai *loading capacity* sebesar 0,17% dimana zat besi yang terkandung di dalamnya sebesar 12,97%. Dengan demikian, enkapsulasi Fe-sulfat berbasis asam stearat dan lemak kaya monolaurin dengan metode evaporasi pelarut efektif menghasilkan SLN dengan efisiensi enkapsulasi yang tinggi dan karakteristik fisikokimia yang baik.

Kata kunci: Enkapsulasi; solid lipid nanoparticle; zat besi; monolaurin; asam stearat

ABSTRACT

Iron is essential for the human body, especially to prevent anemia or iron deficiency. This can be prevented by consuming iron supplements or iron-fortified products, but iron has a strong taste and odor that is not preferred. Nanoencapsulation offers an encapsulation technique where the active ingredient is trapped inside nanoparticles, including in the Solid Lipid Nanoparticle (SLN) system based on stearic acid and monolaurin-rich fat using the solvent evaporation method. This study aimed to determine the concentration of monolaurin-rich fat and Fe-sulfate concentration that produces SLN with optimal encapsulation efficiency and good physicochemical properties. The results showed that the concentration of monolaurin-rich fat and Fe-sulfate concentration affected the characteristics of Fe-sulfate SLN. The treatment of 40% monolaurin-rich fat concentration with 2% Fe-sulfate concentration produced the best SLN characteristics, namely a Z-Average value of 128.40 nm, a polydispersity index (PI) of 0.877, and an encapsulation efficiency of 97.38%. Fe-sulfate SLN has a spherical particle morphology and a loading capacity of 0.17%, with an iron content of 12.97%. Therefore, the encapsulation of stearic acid-based Fe-sulfate and monolaurin-rich fat using the solvent evaporation method effectively produces SLN with high encapsulation efficiency and good physicochemical characteristics.

Keywords: encapsulation; solid lipid nanoparticle; iron; monolaurin; stearic acid

PENDAHULUAN

Asupan zat besi perlu diimbangi untuk menjaga keseimbangan asupan dan ekskresi yang berguna untuk kebutuhan produksi eritrosit. Jika asupan zat besi rendah dan tidak akurat dapat menyebabkan cadangan zat besi dalam tubuh berkurang, sehingga mengganggu proses eritropoesis (Kolarš et al., 2025). Keadaan dimana kurangnya ketersediaan zat besi dalam tubuh sehingga menyebabkan zat besi yang diperlukan untuk eritropoesis tidak cukup disebut dengan anemia defisiensi besi. Frekuensi defisiensi besi di negara berkembang akan meningkat 2-5 kali menjadi anemia defisiensi zat besi yang

disebabkan beberapa faktor seperti infeksi dan malnutrisi (García López et al., 2011).

Zat besi dapat bersumber dari nabati seperti kacang-kacangan dan sayuran atau juga berasal dari hewani seperti daging, telur dan ikan. Pada penyerapan zat besi terdapat faktor-faktor yang dapat mempercepat atau pun memperlambat. Kebutuhan besi di dalam tubuh per hari dipengaruhi oleh kondisi fisiologis seperti menstruasi, kehamilan, menyusui dan masa pertumbuhan (Burke et al., 2014; Subroto, Indiarso, et al., 2023).

Suplemen zat besi digunakan saat seseorang mengalami kekurangan zat besi atau saat seseorang tidak bisa memenuhi kebutuhan zat besi secara alami. Suplemen zat besi tersedia dalam bentuk tablet, sirup, atau kapsul.

Suplemen ini termasuk dalam golongan obat bebas. Suplemen zat besi yang banyak beredar secara umum memiliki rasa dan bau zat besi yang sangat kuat sehingga kurang nyaman untuk dikonsumsi (Wang et al., 2016).

Berdasarkan permasalahan tersebut, pemerintah memiliki program fortifikasi makanan dalam intervensi gizi untuk memperbaiki gizi. Fortifikasi ferro-sulfat secara langsung akan menghasilkan rasa logam serta perubahan warna akibat adanya interaksi antara zat besi dengan senyawa lain. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghindari adanya interaksi antara mineral dengan mineral lainnya saat proses fortifikasi adalah dengan enkapsulasi (Muñoz-More et al., 2023).

Enkapsulasi merupakan teknik penyalutan suatu bahan aktif baik berupa padatan, cairan, atau gas yang dilapisi oleh bahan penyalut. Enkapsulasi menggunakan nanoteknologi merupakan teknik enkapsulasi dimana mikronutrien terperangkap di dalam nanopartikel dengan ukuran partikel berkisar 10-1000 nm yang dapat dibuat dari surfaktan, lipid, protein, dan/atau karbohidrat (Trindade et al., 2021). Teknik nanoteknologi yang banyak digunakan untuk mengenkapsulasi mikronutrien dan senyawa bioaktif lainnya dalam makanan yaitu dengan sistem *Solid Lipid Nanoparticle* (SLN). Penggunaan lipid padat dapat meningkatkan kontrol pelepasan mikronutrien yang terperangkap di dalam lipid dibandingkan dengan penggunaan lipid cair, serta dapat menjaga kestabilan mikronutrien dari kontak lingkungan (air, cahaya), sehingga pelepasan dan penyerapan mikronutrien dapat dikontrol dengan tepat dalam sistem gastrointestinal (GIT) yaitu melalui penyerapan dalam usus (Aditya et al., 2014; Subroto et al., 2023).

Umumnya pada pembuatan SLN berasal dari campuran lemak, surfaktan atau emulsifier, dan air. Lemak yang digunakan berfungsi sebagai bahan pembentuk matriks yang memiliki sifat berbentuk padat baik pada suhu ruangan maupun pada suhu tubuh. Sementara surfaktan yang digunakan berfungsi untuk menstabilkan SLN dengan cara menurunkan tegangan permukaan antara air dengan lemaknya. Pemilihan dalam penggunaan surfaktan bergantung pada lemak yang digunakan serta rute administrasinya (Deshpande et al., 2017). Macam-macam lemak yang digunakan pada pembuatan SLN salah satunya adalah trigliserida, gliserida parsial, asam stearat, dan wax tergantung dari produk yang akan dibuat (Maravajhala et al., 2012; Subroto et al., 2023). Sedangkan surfaktan yang biasa digunakan untuk SLN adalah tween 80, *poloxamer 188*, *pluronic F68*, dan *soya lecithin* (Mukherjee et al., 2009).

Lemak yang digunakan umumnya merupakan lemak jenuh dimana lemak jenuh itu sendiri diketahui memiliki dampak yang kurang baik pada Kesehatan. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif pengganti lemak jenuh yang lebih sehat, salah satunya yaitu monolaurin yang merupakan salah satu bentuk monoasilgliserol (MAG) yang memiliki kandungan asam laurat yang cukup tinggi. Asam laurat merupakan asam lemak jenuh rantai sedang yang mengandung 12 gugus hidrokarbon non polar dan asam karboksilat yang polar. Pembuatan monolaurin dapat dilakukan dengan menggunakan campuran bahan baku minyak nabati dan gliserol serta dibantu dengan penambahan katalis kimia maupun enzim dengan dilakukan proses gliserolisis. Seperti kebanyakan MAG lainnya, monolaurin dapat digunakan sebagai emulsifier non ionik dalam industri pangan maupun farmasetikal karena memiliki aktivitas antimikroba yang cukup tinggi (Ngatirah et al., 2024; Subroto & Indiarjo, 2020).

Lemak kaya monolaurin pada penelitian sebelumnya telah berhasil digunakan untuk sintesis solid lipid nanoparticle melalui pembentukan double emulsion W/O/W untuk mengenkapsulasi zat besi ferro sulfat (Subroto et al.,

2022). Namun demikian, SLN yang dihasilkan memiliki ukuran partikel yang cukup besar karena terbentuknya lapisan ganda pada partikelnya. Oleh sebab itu, diperlukan metode alternatif lainnya, diantaranya dengan evaporasi pelarut. Evaporasi merupakan salah satu proses yang bertujuan memekatkan larutan yang terdiri atas pelarut yang volatil dan zat terlarut yang non-volatil. Metode evaporasi pelarut membentuk emulsi dengan cara mendispersikan fase lipid ke dalam fase air yang mengandung surfaktan. Pelarut yang digunakan akan menguap dengan menggunakan alat evaporator. Karena terjadi penguapan pelarut organik, SLN berada dalam fase air (Qushawy & Nasr, 2020). Dengan menggunakan metode evaporasi pelarut, proses enkapsulasi dalam bentuk SLN dapat diskalakan, berkelanjutan serta dapat dilakukan secara komersial (Ekambaram et al., 2012).

Penelitian mengenai *Solid Lipid Nanoparticle* (SLN) Fe-sulfat berbasis asam stearat dan lemak kaya monolaurin dengan metode evaporasi pelarut masih terbatas. Oleh sebab itu, kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan lemak kaya monolaurin untuk sintesis SLN Fe-sulfat dengan metode evaporasi pelarut. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi lemak kaya monolaurin dan konsentrasi Fe-sulfat yang menghasilkan SLN dengan efisiensi enkapsulasi yang optimal dan sifat fisikokimia yang baik.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam pembuatan lemak kaya monolaurin yaitu *beaker glass*, *chamber*, *hot plate*, plat TLC, refluks, *rotary evaporator*, tabung reaksi dan *vortex*. Sedangkan alat-alat yang digunakan dalam enkapsulasi *solid lipid nanoparticle* Fe-sulfat dengan metode evaporasi pelarut diantaranya, *beaker glass*, *freezer*, *freeze dryer*, *hot plate*, *magnetic stirrer*, mikropipet, neraca analitik, *rotary evaporator*, ultrasonikator.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah akuades, air, asam stearat, aseton, besi sulfat, diklorometan, eluen, iodin, lemak kaya monolaurin, minyak, monolaurin, stearin kelapa dan tween 20.

Pembuatan Lemak Kaya Monolaurin

Proses pembuatan lemak kaya monolaurin diawali dengan menambahkan gliserol dengan rasio molar 1:5 ke dalam beaker glass yang telah berisi stearin minyak kelapa dengan pemanasan pada hot plate di suhu 60 °C. Selanjutnya menambahkan tert-butanol dengan rasio 1:2 (b/v) dan katalis NaOH sebanyak 3% dari substrat. Kemudian memanaskan refluks dengan suhu 174 °C hingga terdapat gelembung selama 4 jam. Netralisasi larutan dilakukan dengan menambahkan asam sitrat sebanyak 20% dan hexan dengan perbandingan 1:4 hingga pH mencapai 7. Lalu melakukan evaporasi dengan rotary evaporator selama 1 jam dengan kecepatan 80 rpm sehingga dihasilkan stearin minyak kelapa yang kaya monolaurin.

Fabrikasi *Solid Lipid Nanoparticle*

Fabrikasi SLN menggunakan metode evaporasi pelarut (Varshosaz et al., 2010). Prosesnya diawali dengan mencampurkan lemak padat (asam stearat) sebanyak 1 gram dengan lemak kaya monolaurin dengan persentase 20%, 30% dan 40% (b/b lipid) dan dipanaskan di atas suhu 60 °C. Selanjutnya menambahkan ferro-sulfat dengan konsentrasi 10%, 20% dan 30% b/b total lipid lalu dilarutkan dengan menambahkan 15 mL campuran aseton dan diklorometan dengan rasio 1:1. Kemudian menambahkan

larutan 10% tween 20 dalam 37,5 mL aquades sedikit demi sedikit lalu dicampurkan dengan magnetic stirrer selama 5 menit. Selanjutnya melakukan ultrasonikasi selama 5 menit pada amplitudo 45% (500 W) dengan pengaturan *pulse on* 10 detik, *pulse off* 2 detik. Kemudian melakukan pendispersian emulsi ganda ke dalam 125 mL aquades dingin (5-10 °C) yang mengandung 1,6% Tween 20 untuk meningkatkan solidifikasi partikel SLN lalu melakukan ultrasonikasi kembali selama 15 menit. Untuk menghilangkan sisa pelarut, dilakukan dengan evaporasi menggunakan *rotary evaporator* selama 1 jam pada suhu kamar. Untuk mendapatkan SLN dalam bentuk padat, menyaring dispersi sampel menggunakan kertas saring lalu dibekukan pada suhu -50 °C selama 24 jam. Kemudian melakukan liofilisasi selama 72 jam pada suhu -50 °C menggunakan *freeze dryer*.

Analisis Ukuran Partikel

Analisis ini menggunakan metode PSA yang dilakukan pada sampel SLN yang belum diliofilisasi (dispersi) menggunakan HORIBA SZ-100 dengan mengambil sampel sebanyak 1 mikro liter lalu diencerkan hingga konsentrasi 1 ppm dan dianalisis pada *scattering angle* 90 serta polidispersi indeksnya dinyatakan sebagai representasi dari *scattering light intensity*.

Analisis Efisiensi Enkapsulasi

Analisis efisiensi enkapsulasi atau *entrapment efficiency* ini dilakukan dengan menggunakan metode AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) pada supernatan SLN yang sebelumnya sudah didestruksi (Varshosaz et al., 2010). Nilai *entrapment efficiency* dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$EE (\%) = \frac{\text{kons.fe awal} - \text{kons.fe supernatan}}{\text{kons.fe awal}} \times 100 \quad (1)$$

Analisis Morfologi Partikel

Analisis ini menggunakan *Scanning Electron Microscope* (TM3000 Tabletop Microscope) pada sampel SLN yang telah diliofilisasi selama 72 jam. Sampel ditempatkan pada *double-faced carbon tapes* yang dipasang pada stub aluminium. Mikrogaf ditangkap pada tegangan 15 kV dengan perbesaran 5.000 kali.

Analisis Loading Capacity Fe-Sulfat

Analisis ini menggunakan metode AAS pada sampel SLN yang telah diliofilisasi selama 72 jam yang sebelumnya telah didestruksi. Nilai *loading capacity* dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$LC (\%) = \frac{\text{jumlah Fe yang terperangkap}}{\text{berat SLN}} \times 100 \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimasi SLN Fe-Sulfat Pada Berbagai Konsentrasi Lemak Kaya Monolaurin

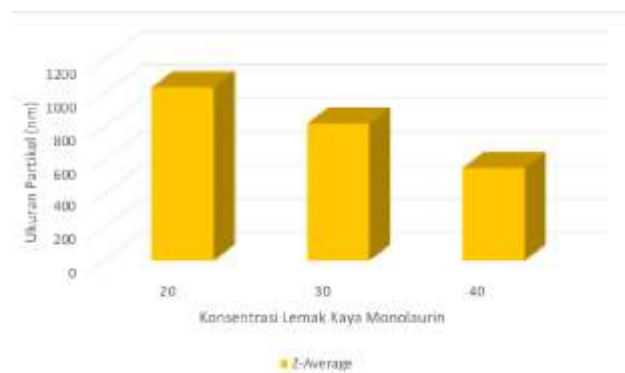
Ukuran Partikel dan Polydispersity Index (PI) pada Berbagai Konsentrasi Lemak Kaya Monolaurin

Ukuran partikel dan PI sangat dipengaruhi oleh konsentrasi lemak dan surfaktan. Semakin besar konsentrasi lemak yang digunakan, maka semakin besar pula ukuran partikel dan PI. Peningkatan konsentrasi lemak padat yang digunakan mengakibatkan lemak mudah mengalami aglomerasi karena adanya permukaan yang tidak tertutupi oleh surfaktan (Tiyaboonchai et al., 2007).

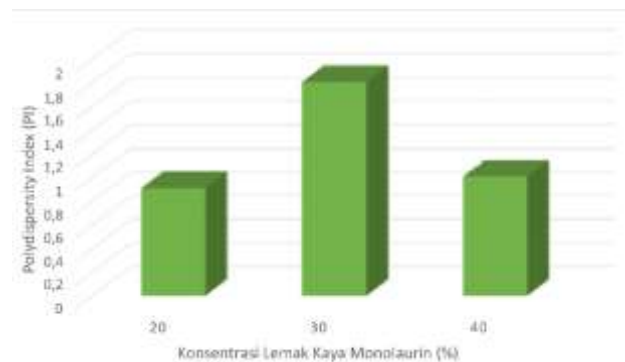
Fungsi penambahan surfaktan dalam pembuatan sediaan SLN sangat mempengaruhi ukuran partikel karena surfaktan memiliki sifat hidrofilik dan hidrofobik yang dapat menghambat partikel untuk bergabung membentuk gumpalan (Wardiyati et al., 2007). Semakin banyak konsentrasi surfaktan yang digunakan maka akan memperkecil ukuran partikel. Surfaktan yang memiliki tegangan permukaan yang kecil akan menghasilkan ukuran diameter partikel yang lebih kecil (Jiang et al., 2019; Ogunmokun & Wallach, 2024). Ukuran partikel (*Z-average*) SLN Fe-Sulfat pada berbagai konsentrasi lemak kaya monolaurin dapat dilihat pada Gambar 1.

Ukuran partikel sediaan SLN yang dapat dilihat pada Gambar 1. menunjukkan bahwa konsentrasi lemak kaya monolaurin sebagai emulsifier sangat berpengaruh. Pada konsentrasi lemak kaya monolaurin tertinggi yaitu 40% didapatkan *Z-Average* sebesar 553,4 nm. Hal ini membuat formulasi pembuatan SLN optimal adalah menggunakan lemak kaya monolaurin dengan konsentrasi tertinggi. Sediaan tersebut memenuhi rentang ukuran sistem SLN yaitu 10-1000 nm (Trindade et al., 2021), dibandingkan dengan sediaan dengan formula lemak kaya monolaurin 20% dan 30% dimana *Z-Average* didapatkan masing-masing yaitu 1.035,4 nm dan 819,9 nm. Ukuran partikel dipengaruhi oleh berbagai faktor diantaranya berat molekul, viskositas, dan tegangan permukaan dari bahan yang digunakan (Martins et al., 2012).

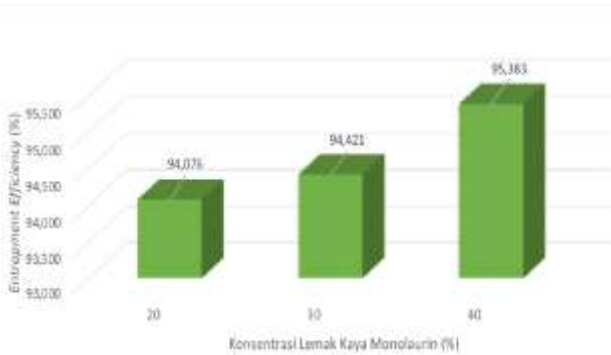
Polydispersity index (PI) merupakan nilai dari keseragaman ukuran dan distribusi ukuran partikel dimana nilai PI yang mendekati nol dan tidak lebih dari 0,3 maka distribusi ukuran partikel semakin sempit dan ukuran partikel semakin seragam (Jafar et al., 2019). Berikut hasil pengukuran nilai PI berdasarkan konsentrasi lemak kaya monolaurin sebagai emulsifier yang berbeda-beda yang dapat dilihat pada Gambar 2.



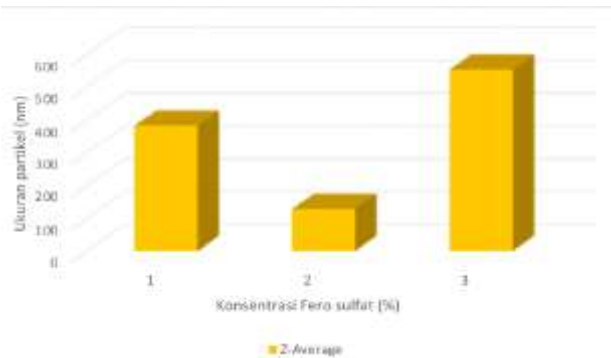
Gambar 1. Ukuran partikel (*Z-average*) SLN Fe-Sulfat pada berbagai konsentrasi lemak kaya monolaurin.



Gambar 2. Ukuran partikel (*Z-average*) SLN Fe-Sulfat pada berbagai konsentrasi lemak kaya monolaurin.



Gambar 3. Entrapment Efficiency SLN Fe-Sulfat Pada Berbagai Konsentrasi Lemak Kaya Monolaurin.



Gambar 4. Ukuran Partikel SLN Fe-Sulfat Pada Berbagai Konsentrasi Fe-sulfat.

Nilai PI yang ditunjukkan pada Gambar 2. memiliki nilai yang sangat tinggi artinya distribusi partikel kurang baik karena kemungkinan penggunaan surfaktan/pengemulsi yang sedikit hanya dapat menyelimuti luas bidang permukaan partikel yang lebih kecil saja. Hal tersebut membuat partikel cenderung membesar dan kestabilan fisik SLN menurun yang ditunjukkan pada nilai PI yang besar (Jafar et al., 2019).

Entrapment Efficiency pada Berbagai Konsentrasi Lemak Kaya Monolaurin

Efisiensi penjebakan atau *entrapment efficiency* (EE) pada SLN adalah persentase bahan aktif yang terjebak di dalam matriks lipid partikel SLN. Untuk bahan aktif yang bersifat lipofilik biasanya memiliki nilai EE antara 90-98%. Penentuan persentase *entrapment efficiency* pada penelitian ini dilakukan dengan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Sampel yang dianalisis dilakukan pada dispersi SLN kemudian didestruksi menggunakan HNO₃. Kandungan zat besi ditentukan menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy (Double Beam Spectrophotometer U-2900/2910; Hitachi)*.

Entrapment efficiency ditentukan oleh kelarutan bahan aktif dalam matriks lipid, berat molekul bahan aktif, dan interaksi bahan aktif dengan lipid. Penggunaan lipid yang lebih banyak akan meningkatkan viskositas pada fase luar sehingga untuk bahan aktif terdifusi ke fase luar akan semakin kecil, hal ini akan meningkatkan efisiensi penjebakan SLN (Jafar et al., 2019). Pengukuran *entrapment efficiency* dilakukan pada formulasi SLN dengan konsentrasi lemak kaya monolaurin sebagai emulsifier sebanyak 20%, 30%, dan 40%, didapatkan nilai EE seperti pada Gambar 3.

Hasil pada Gambar 3. menunjukkan bahwa *entrapment efficiency* meningkat dengan bertambahnya jumlah lipid yaitu lemak kaya monolaurin sebagai emulsifier. Formulasi konsentrasi lemak kaya monolaurin tertinggi yaitu 40% memiliki presentasi *entrapment efficiency* terbesar yaitu

95,38%. Penggunaan lipid padat dalam sediaan SLN sangat berpengaruh dimana semakin besar konsentrasi yang digunakan maka nilai EE akan semakin besar dikarenakan peningkatan jumlah lemak akan memberikan bahan aktif untuk lebih terinkorporasi dalam sistem SLN. Selain itu, ukuran partikel yang kecil diduga mendukung hasil *entrapment efficiency* yang besar. Semakin kecil ukuran partikel menyebabkan luas permukaan semakin besar sehingga kontak dengan bahan aktif juga semakin besar (Savjani et al., 2012).

Optimasi SLN Fe-Sulfat pada Berbagai Konsentrasi Fe-Sulfat

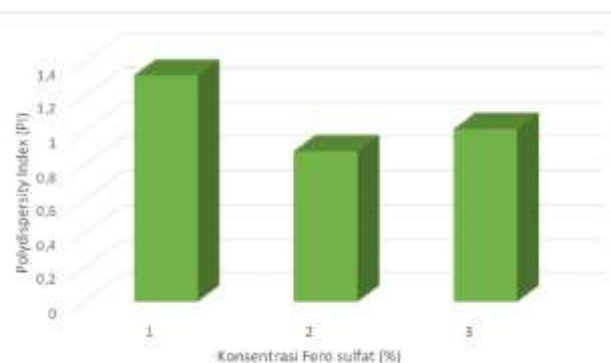
Ukuran Partikel dan Polydispersity Index (PI) pada Berbagai Konsentrasi Fe-Sulfat

Pemeriksaan ukuran partikel dan *polydispersity index* (PI) kembali dilakukan kepada formulasi sediaan SLN dengan konsentrasi Fe-sulfat sebagai bahan aktif yang berbeda-beda yaitu 1%, 2%, dan 3%. Hasil pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4.

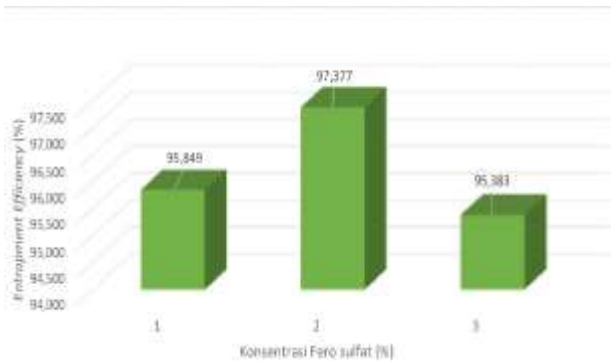
Hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4. menunjukkan ukuran yang memenuhi rentang ukuran untuk sediaan SLN. Ukuran partikel terkecil ditunjukkan pada hasil *Z-Average* formulasi konsentrasi Fe-sulfat sebesar 2% yaitu 128,4 nm. Konsentrasi bahan aktif yang rendah dapat membuat kecil ukuran partikel pada sediaan SLN. Berdasarkan hasil tersebut, jumlah bahan aktif yang terjebak pada matriks lipid dapat mempengaruhi ukuran partikel sediaan SLN yang terbentuk. Semakin banyak bahan aktif yang terjebak didalam lipid sediaan SLN dapat memicu peningkatan pada ukuran partikel sediaan SLN yang ada (Xu et al., 2022).

PI merupakan rasio antara simpangan baku dengan rata-rata ukuran partikel, sehingga mengindikasikan keseragaman ukuran partikel pada sediaan yang terbentuk. Semakin rendah nilai PI yang didapatkan, maka semakin tinggi keseragaman ukuran partikel pada sediaan yang terbentuk (Chhabra et al., 2011). Berikut hasil pengukuran nilai PI berdasarkan konsentrasi tertinggi lemak kaya monolaurin sebagai emulsifier dengan Fe-sulfat sebagai bahan aktif tersalut yang berbeda-beda.

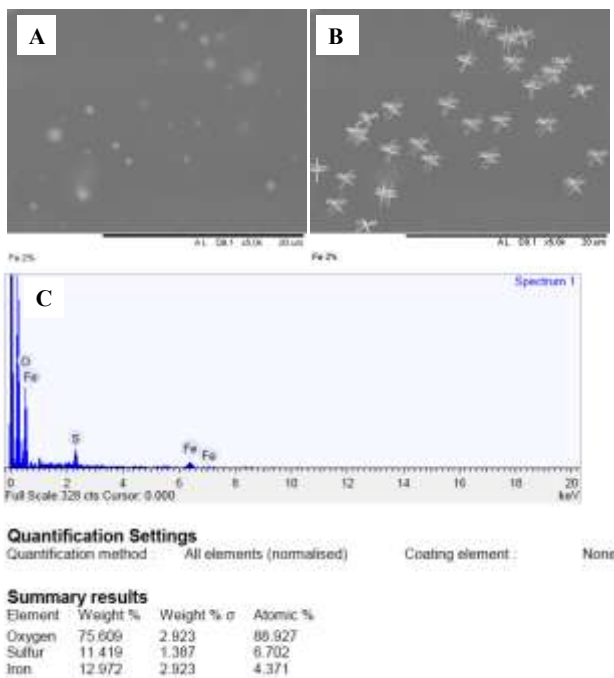
Hasil nilai PI yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 5. menunjukkan nilai yang sangat tinggi tidak jauh berbeda dengan penggunaan formulasi konsentrasi lemak kaya monolaurin yang berbeda-beda. Hal ini membuat konsentrasi bahan aktif pada sediaan SLN tidak berpengaruh dalam nilai PI yang lebih baik. Keseragaman ukuran partikel yang ditunjukkan dengan nilai PI artinya distribusi partikel tidak baik karena kemungkinan penggunaan surfaktan/pengemulsi yang sedikit hanya dapat menyelimuti luas bidang permukaan partikel yang lebih kecil saja. Hal tersebut membuat partikel cenderung membesar dan kestabilan fisik SLN menurun yang ditunjukkan pada nilai PI yang besar (Jafar et al., 2019).



Gambar 5. Polydispersity Index (PI) SLN Fe-Sulfat pada berbagai konsentrasi Fe-sulfat.



Gambar 6. Entrapment Efficiency SLN Fe-Sulfat Pada Berbagai Konsentrasi Fe-sulfat.



Gambar 7. Morfologi SLN dengan perbesaran 5000 \times menggunakan SEM (A); area analisis SEM-EDX (B); dan elemen analisis SEM-EDX (C).

Entrapment Efficiency pada Berbagai Konsentrasi Fe-Sulfat

Pemerangkapan bahan aktif pada SLN mempunyai keuntungan yaitu dapat meningkatkan stabilitas bahan aktif dari pengaruh lingkungan dan juga dapat memberikan efek pelepasan terkontrol. Pengukuran *entrapment efficiency* dilakukan pada formulasi SLN dengan konsentrasi Fe-sulfat sebagai bahan aktif tersebut sebanyak 1%, 2%, dan 3%, didapatkan nilai *entrapment efficiency* seperti pada Gambar 6.

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 6, formulasi konsentrasi bahan aktif yaitu Fe-sulfat memiliki *entrapment efficiency* lebih dari 95%. Nilai tersebut cukup besar untuk Fe-sulfat sebagai bahan aktif yang bersifat hidrofilik. Konsentrasi Fe-sulfat 2% menunjukkan formulasi bahan aktif tersalut dengan tinggi untuk sediaan SLN pada penelitian. Hal ini dapat terjadi dikarenakan konsentrasi bahan aktif pada matriks lipid sesuai dengan konsentrasi lemak kaya monolaurin sebagai emulsifier, sehingga meningkatkan nilai *entrapment efficiency* sediaan SLN.

Karakteristik Solid Lipid Nanoparticle Setelah Liofilisasi

Dispersi SLN optimal dengan konsentrasi lemak kaya monolaurin sebesar 40% dan Fe-sulfat 2% dilakukan liofilisasi menggunakan *freeze dryer*. Kemudian hasil SLN

setelah liofilisasi dilakukan analisis morfologi partikel menggunakan TM EDS serta *loading capacity*.

Morfologi Partikel

Struktur koloid dari SLN dapat diamati dengan metode *scanning electron microscopy* (SEM). Analisis morfologi partikel ditujukan untuk mengetahui distribusi dan bentuk atau karakter dari partikel SLN yang terbentuk. Bentuk partikel ini mempengaruhi lapisan film yang terbentuk. Partikel sferis akan menghasilkan bentukan lapisan film yang baik karena jarak yang dihasilkan antar partikel lebih kecil dan rapat (Mehta et al., 2023).

Morfologi partikel SLN dianalisis menggunakan mikroskop elektron pemindaian (TM 3000 Tabletop Microscope, Jepang). Sampel ditempatkan pada pita karbon dua sisi (Ted Pella, Inc., Redding, USA) yang dipasang pada stub aluminium. Mikrograf ditangkap pada tegangan 5 kV dan perbesaran 5.000 \times , yang dapat dilihat pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7 (A) dan (B), menunjukkan hasil bahwa partikel-partikel SLN memiliki bentuk bulat yang tersebar dengan rentang ukuran 46,9 – 707 nm (a) dan 3,4 – 949 nm (b). Pada penelitian sebelumnya, diketahui morfologi partikel SLN dengan lipid asam stearate berbentuk oval ataupun bulat. Struktur permukaan dari partikel SLN tidak terlihat dikarenakan sampel yang ditempatkan pada preparat tidak banyak dan tidak terlalu kering sehingga sulit untuk diamati lebih jauh. Selain digunakan untuk pengamatan kondisi morfologi dari partikel SLN, distribusi unsur penyusun dari partikel SLN dapat ditentukan dengan SEM yang dikombinasikan dengan EDS.

Distribusi unsur penyusun dalam partikel SLN menggunakan SEM yang dikombinasikan dengan EDS dapat dilihat pada Gambar 7 (C), dimana hasil EDS menunjukkan unsur oksigen (O), sulfur (S), dan besi (Fe). Unsur oksigen yang didapatkan merupakan unsur dari penyusun lemak yang digunakan sebagai matriks lipid SLN yaitu sebesar 75,61%. Unsur sulfur dapat berasal dari kandungan preparat yang digunakan pada alat TM EDS selain itu juga dapat berasal dari bahan tersalut karena menggunakan Fe-sulfat. Fe yang merupakan bahan aktif tersalut pada penelitian terdapat pada hasil distribusi unsur penyusun yang mengartikan bahwa pada partikel SLN ini terdapat Fe-sulfat yang tersalut. Fe yang berhasil tersalut dalam partikel SLN sebesar 12,97%.

Loading Capacity

Penelitian ini mengenkapsulasi Fe-sulfat dalam bentuk SLN. Untuk mengetahui kapasitas Fe-sulfat yang terenkapsulasi dalam partikel SLN, dilakukan analisis *loading capacity* menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Sampel yang dianalisis dilakukan pada SLN yang telah liofilisasi selama 72 jam kemudian didestruksi menggunakan HNO₃. Kandungan zat besi ditentukan menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (*Double Beam Spectrophotometer U-2900/2910; Hitachi*). Sampel yang digunakan sebanyak 3 g. Hasil AAS menunjukkan kadar Fe yang terkandung dalam sampel sebanyak 169 mg/kg, sehingga nilai *loading capacity* yang diperoleh pada partikel SLN ini sebesar 0,17%.

KESIMPULAN

Konsentrasi lemak kaya monolaurin yang ditambahkan sebagai *emulsifier* dan konsentrasi Fe-sulfat sebagai bahan aktif tersalut mempengaruhi karakteristik SLN fe-sulfat yang terbentuk. SLN dengan konsentrasi lemak kaya monolaurin 40% dan konsentrasi Fe sulfat 2% memiliki *Z-Average*

sebesar 128,4 nm dengan PI sebesar 0,877 dan *entrapment efficiency* sebesar 97,38%. SLN ini memiliki morfologi partikel berbentuk bulat dengan nilai *loading capacity* sebesar 0,17% dimana zat besi yang terkandung di dalamnya berdasarkan analisis EDS sebanyak 12,97%. Dengan demikian enkapsulasi Fe-sulfat berbasis asam stearat dan lemak kaya monolaurin dengan metode evaporasi pelarut efektif menghasilkan SLN dengan efisiensi enkapsulasi yang tinggi dan karakteristik fisikokimia yang baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Padjadjaran dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, N. P., Macedo, A. S., Doktorovova, S., Souto, E. B., Kim, S., Chang, P.-S., & Ko, S. (2014). Development and evaluation of lipid nanocarriers for quercetin delivery: A comparative study of solid lipid nanoparticles (SLN), nanostructured lipid carriers (NLC), and lipid nanoemulsions (LNE). *LWT - Food Science and Technology*, 59(1), 115–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.058>
- Burke, R. M., Leon, J. S., & Suchdev, P. S. (2014). Identification, Prevention and Treatment of Iron Deficiency during the First 1000 Days. *Nutrients*, 6(10), 4093–4114. <https://doi.org/10.3390/nu6104093>
- Chhabra, G., Chuttani, K., Mishra, A. K., & Pathak, K. (2011). Design and development of nanoemulsion drug delivery system of amlodipine besilate for improvement of oral bioavailability. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 37(8), 907–916. <https://doi.org/10.3109/03639045.2010.550050>
- Deshpande, A., Mohamed, M., Daftardar, S. B., Patel, M., Boddu, S. H. S., & Nesamony, J. (2017). Solid Lipid Nanoparticles in Drug Delivery: Opportunities and Challenges. In *Emerging Nanotechnologies for Diagnostics, Drug Delivery and Medical Devices* (pp. 291–330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-42978-8.00012-7>
- Ekambaram, P., Sathali, A. H., & Priyanka, K. (2012). Solid lipid nanoparticles- A review. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 2(2), 80–102.
- García López, S., Rubio, A., Poza, V., Bermejo, & García López, S. (2011). Optimal management of iron deficiency anemia due to poor dietary intake. *International Journal of General Medicine*, 741. <https://doi.org/10.2147/ijgm.s17788>
- Jafar, G., Agustin, E., Puryani, D., Tinggi, S., & Bandung, F. (2019). Pengembangan Formula Solid Lipid Nanoparticles (SLN) Hidrokortison Asetat. *Jurnal Pharmascience*, 06(01), 83–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.20527/jps.v6i1.6080>
- Jiang, P., Zhang, L., Tang, D., Li, L., Ge, J., Zhang, G., & Pei, H. (2019). Effect of nano-SiO₂ and surfactants on the oil-water interfacial properties. *Colloid and Polymer Science*, 297(6), 903–915. <https://doi.org/10.1007/s00396-019-04514-5>
- Kolarš, B., Mijatović Jovin, V., Živanović, N., Minaković, I., Gvozdrenović, N., Dickov Kokeza, I., & Lesjak, M. (2025). Iron Deficiency and Iron Deficiency Anemia: A Comprehensive Overview of Established and Emerging Concepts. *Pharmaceutics*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/ph18081104>
- Maravajhala, V., Papishetty, S., & Bandlapalli, S. (2012). Nanotechnology in development of drug delivery system. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 3(1), 84–96.
- Martins, S., Tho, I., Souto, E., Ferreira, D., & Brandl, M. (2012). Multivariate design for the evaluation of lipid and surfactant composition effect for optimisation of lipid nanoparticles. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 45(5), 613–623. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejps.2011.12.015>
- Mehta, M., Bui, T. A., Yang, X., Aksoy, Y., Goldys, E. M., & Deng, W. (2023). Lipid-Based Nanoparticles for Drug/Gene Delivery: An Overview of the Production Techniques and Difficulties Encountered in Their Industrial Development. *ACS Materials Au*, 3(6), 600–619. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00032>
- Mukherjee, S., Ray, S., & Thakur, R. S. (2009). Solid lipid nanoparticles: A modern formulation approach in drug delivery system. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 71(4), 349–358. <https://doi.org/10.4103/0250-474X.57282>
- Muñoz-More, H. D., Nole-Jaramillo, J. M., Valdiviezo-Marcelo, J., Espinoza-Delgado, M. del P., Socola-Juarez, Z. M., Ruiz-Flores, L. A., & Espinoza-Espinoza, L. A. (2023). Microencapsulated iron in food, techniques, coating material, efficiency, and sensory analysis: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Volume 7-2023. <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2023.1146873>
- Ngatirah, N., Kusumastuti, K., Tarigan, C. W., Suparyanto, T., Trinugroho, J. P., & Pardamean, B. (2024). Glycerolysis of palm kernel oil catalyzed by MgO on mono and diglyceride composition and their antibacterial activity. *BIO Web Conf.*, 94. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249402009>
- Ogunmokun, F. A., & Wallach, R. (2024). Effect of surfactant surface and interfacial tension reduction on infiltration into hydrophobic porous media. *Geoderma*, 441, 116735. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116735>
- Qushawy, M., & Nasr, A. (2020). Solid lipid nanoparticles (SLNs) as nano drug delivery carriers: Preparation, characterization and application. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 12(1), 1–9. <https://doi.org/10.22159/ijap.2020v12i1.35312>
- Savjani, K. T., Gajjar, A. K., & Savjani, J. K. (2012). Drug Solubility: Importance and Enhancement Techniques. *International Scholarly Research Notices*, 2012(1), 195727. <https://doi.org/https://doi.org/10.5402/2012/195727>
- Subroto, E., Andoyo, R., & Indiarso, R. (2023). Solid Lipid Nanoparticles: Review of the Current Research on Encapsulation and Delivery Systems for Active and Antioxidant Compounds. *Antioxidants*, 12(3), 633. <https://doi.org/10.3390/antiox12030633>
- Subroto, E., Andoyo, R., Indiarso, R., Wulandari, E., & Wadhiah, E. F. N. (2022). Preparation of Solid Lipid Nanoparticle-Ferrous Sulfate by Double Emulsion Method Based on Fat Rich in Monolaurin and Stearic Acid. *Nanomaterials*, 12, 3054. <https://doi.org/10.3390/nano12173054>
- Subroto, E., & Indiarso, R. (2020). Bioactive monolaurin as an antimicrobial and its potential to improve the

- immune system and against COVID-19: a review. *Food Research*, 4(6), 2355–2365. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).324](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).324)
- Subroto, E., Indiarso, R., & Andoyo, R. (2023). Bioavailability of iron and its potential to improve the immune system and ward off COVID-19: a review. *Food Research*, 7(1), 76–92. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.7\(1\).701](https://doi.org/10.26656/fr.2017.7(1).701)
- Tiyaboonchai, W., Tungpradit, W., & Plianbangchang, P. (2007). Formulation and characterization of curcuminoids loaded solid lipid nanoparticles. *International Journal of Pharmaceutics*, 337(1), 299–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.12.043>
- Trindade, L. R., da Silva, D. V. T., Baião, D. dos S., & Paschoalin, V. M. F. (2021). Increasing the Power of Polyphenols through Nanoencapsulation for Adjuvant Therapy against Cardiovascular Diseases. *Molecules*, 26(15). <https://doi.org/10.3390/molecules26154621>
- Varshosaz, J., Minayian, M., & Moazen, E. (2010). Enhancement of oral bioavailability of pentoxifylline by solid lipid nanoparticles. *Journal of Liposome Research*, 20(2), 115–123. <https://doi.org/10.3109/08982100903161456>
- Wang, A., Duncan, S. E., & Dietrich, A. M. (2016). Effect of iron on taste perception and emotional response of sweetened beverage under different water conditions. *Food Quality and Preference*, 54, 58–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.06.016>
- Wardiyati, S., Yusuf, S., & Handayani, A. (2007). Sintesis Nano Partikel Oksida Besi Dengan Metode Emulsi Menggunakan Surfaktan Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (Ctab). *Indonesian Journal of Materials Science*, 9(1). <https://doi.org/10.17146/jusami.2007.0.0.5129>
- Xu, L., Wang, X., Liu, Y., Yang, G., Falconer, R. J., & Zhao, C.-X. (2022). Lipid Nanoparticles for Drug Delivery. *Advanced NanoBiomed Research*, 2(2), 2100109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anbr.202100109>

Halaman ini sengaja dikosongkan