



Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel Minyak Atsiri Apel Merah untuk Formulasi Nanoparfum Berbasis Air

Yulianita Cristy Anjawati Simalango*, Horasdia Saragih

Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Advent Indonesia, Bandung, Indonesia

ABSTRAK

Kebutuhan parfum berbasis air dan menggunakan bahan pewangi minyak atsiri alami sangat diperlukan karena parfum berbasis alkohol dan bahan pewangi sintetis cenderung membuat kulit kering dan iritasi. Namun, minyak atsiri alami bersifat hidrofobik sehingga tidak larut dalam air. Untuk mengatasi masalah ini teknologi nanopartikel telah digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dikembangkan untuk formulasi nanoparfum berbasis air. Tujuan penelitian ini adalah untuk menghasilkan nanoparfum berbasis air dari bahan pewangi minyak atsiri apel merah. Sintesis dilakukan dengan menggunakan teknik atomisasi dan polimer PEG-40 HCO digunakan sebagai surfaktan. Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konsentrasi minyak atsiri yang digunakan saat sintesis sangat mempengaruhi banyaknya populasi nanopartikel yang dihasilkan, mempengaruhi distribusi ukurannya, diameter rata-rata dan potensial zeta. Diameter rata-rata nanopartikel yang dihasilkan adalah $\leq 296,7$ nm. Potensial zetanya terentang dari -1,4 mV sampai -5,4 mV, yang tergolong sangat rendah dan mengindikasikan stabilitas elektrostatis yang lemah. Pada sebagian formula, ditemukan terbentuknya dua populasi nanopartikel dengan ukuran yang berbeda secara signifikan, yang merupakan temuan penting dalam penelitian ini. Penelitian ini berada pada tahap sintesis dan karakterisasi nanopartikel, belum mencakup evaluasi performa parfum seperti stabilitas aroma atau uji sensorik.

Kata kunci: Nanopartikel, minyak atsiri apel merah, nanoparfum berbasis air.

Synthesis And Characterization Of Red Apple Essential Oil Nanoparticles For Water-Based Nanoperfume Formulation

ABSTRACT

This study aims to synthesize and characterize red apple essential oil nanoparticles developed for water-based nanoperfume formulation. The demand for water-based perfumes that use natural essential oil fragrances is increasing, as alcohol-based perfumes and synthetic fragrances tend to cause skin dryness and irritation. However, natural essential oils are hydrophobic and therefore do not dissolve in water. To address this issue, nanoparticle technology has been employed. The synthesis was performed using an atomization technique, with PEG-40 HCO polymer used as a surfactant. The results indicate that the concentration of essential oil used during synthesis significantly affects the nanoparticle population, size distribution, average diameter, and zeta potential. The average diameter of the resulting nanoparticles was ≤ 296.7 nm, and the zeta potential ranged from -1.4 mV to -5.4 mV, which is notably low and indicates weak electrostatic stability. In some formulations, two distinct nanoparticle populations with significantly different sizes were observed, representing a key finding of this study. This research is at the stage of nanoparticle synthesis and characterization, and does not yet cover evaluation of perfume performance such as aroma stability or sensory testing.

Keywords: Nanoparticles, red apple essential oil, water-based nanoparticles.

Penulis Korespondensi :

Yulianita Cristy Anjawati Simalango
Program Studi Farmasi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan
Alam Universitas Advent Indonesia
yulianitasimalango@gmail.com

Info Artikel :

Submitted : 03 Mei 2026
Revised : 11 Mei 2026
Accepted : 28 Juni 2026
Published : 29 Juni 2026

PENDAHULUAN

Parfum berbasis air dan penggunaan bahan pewangi alami dari tumbuh-tumbuhan telah menjadi tren yang signifikan dalam industri kosmetik karena beberapa keunggulannya. Parfum berbasis air menawarkan alternatif yang lebih ramah kulit, minim risiko iritasi, dan lebih aman bagi lingkungan dibandingkan dengan parfum berbasis alkohol yang umum dijumpai (Herayati & Elianasari, 2024). Penggunaan minyak atsiri sebagai bahan pewangi memberikan aroma yang lebih otentik dan menawarkan manfaat terapeutik tambahan seperti relaksasi atau efek menenangkan (Vora *et al.*, 2024).

Namun, tantangan utama dalam pengembangan parfum berbasis air adalah ketidaklarutan minyak atsiri yang bersifat hidrofobik dalam air. Masalah ini menyebabkan aroma tidak stabil, mudah menguap, dan memiliki umur simpan yang pendek. Untuk mengatasi kendala tersebut, teknologi nanopartikel menjadi solusi yang ideal. Dengan mengenkapsulasi minyak atsiri ke dalam nanopartikel, stabilitas aroma dapat ditingkatkan, dispersi dalam air menjadi homogen, dan pelepasan aroma dapat dikontrol secara lebih efektif, sehingga menghasilkan produk yang stabil dan beraroma tahan lama (Flekka *et al.*, 2024).

Minyak atsiri apel merah (*Malus domestica*) adalah salah satu bahan pewangi alami yang memiliki potensi besar. Minyak ini dikenal memiliki aroma segar dan manis yang sangat disukai konsumen, menjadikannya pilihan yang sangat baik untuk formulasi parfum. Di Indonesia, buah apel merah telah dibudidayakan secara

luas, terutama di daerah sentra penghasil buah seperti Malang.

Ketersediaan bahan baku yang melimpah ini membuka peluang besar untuk pengembangan industri parfum berbasis minyak atsiri apel merah. Pemanfaatan minyak atsiri dari komoditas lokal ini tidak hanya meningkatkan nilai ekonomi produk pertanian, tetapi juga mendukung pengembangan inovasi produk kosmetik dalam negeri yang berkelanjutan (Manshur *et al.*, 2023). Untuk mengenkapsulasi minyak atsiri apel merah dalam formulasi berbasis air, diperlukan surfaktan yang efektif. Dalam penelitian ini, polimer *polyethylene glycol-40 hydrogenated castor oil* (PEG-40 HCO) dipilih sebagai surfaktan karena merupakan surfaktan non-ionik yang aman, stabil, dan memiliki kemampuan emulsifikasi yang baik untuk membentuk nanopartikel yang homogen dalam medium air (Edison & Sethuraman, 2012).

Proses sintesis nanopartikel dilakukan menggunakan teknik atomisasi dengan Teknik atomisasi menggunakan pressure atomizer dipilih karena kemampuannya menghasilkan droplet berukuran sangat kecil secara efisien, sehingga cocok untuk produksi nanopartikel skala laboratorium (Carvalho *et al.*, 2016). Karakterisasi nanopartikel yang dihasilkan mencakup pengukuran empat parameter utama: distribusi diameter nanopartikel (indeks polidispersitas), diameter rata-rata, mobilitas elektroporetik, dan potensial zeta. Parameter-parameter ini digunakan untuk mengevaluasi keseragaman ukuran dan stabilitas koloid nanopartikel yang terbentuk (Iskandar *et al.*, 2024). Indeks

polidispersitas, mobilitas elektroporetik, dan potensial zeta.

Didasarkan pada uraian di atas, penelitian ini secara khusus menginvestigasi pengaruh variasi konsentrasi minyak atsiri apel merah terhadap karakteristik nanopartikel yang dihasilkan melalui teknik atomisasi menggunakan PEG-40 HCO sebagai surfaktan, untuk aplikasi formulasi nanoparfum berbasis air.

Novelty penelitian ini terletak pada penggunaan minyak atsiri apel merah lokal sebagai bahan pewangi dan eksplorasi pengaruh konsentrasinya terhadap diameter rata-rata, indeks polidispersitas, mobilitas elektroporetik, dan potensial zeta nanopartikel yang dihasilkan.

METODE

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah: (1) minyak atsiri apel merah; (2) polimer PEG-40 HCO; dan (3) air destilasi. Polimer PEG-40 HCO dibeli dari Merck KGaA Germany. Minyak atsiri apel merah dibeli dari C.V. Mikaya Makmur Sejahtera, Surabaya, Indonesia.

Minyak atsiri yang digunakan merupakan produk komersial, identitas kimia komponen volatilnya bergantung pada spesifikasi pemasok dan tidak dikarakterisasi lebih lanjut dalam penelitian ini; hal ini merupakan keterbatasan yang perlu diperhatikan. Semua bahan digunakan langsung tanpa perlakuan tambahan.

Penyiapan Prekursor Minyak Atsiri Apel Merah

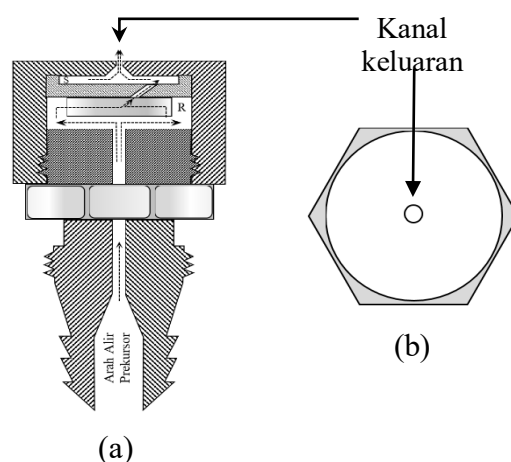
Pada penelitian ini, empat ragam konsentrasi minyak atsiri apel merah digunakan. Minyak atsiri apel merah dengan volume: 4, 6, 8, dan 10 mL masing-masing dicampur ke dalam 1 mL polimer PEG-40 HCO. Campuran ini dihomogenisasi dengan cara mengaduknya menggunakan *magnetic stirrer* yang dioperasikan pada 100 rpm selama 30 menit pada temperatur ruang.

Pencampuran Prekursor Minyak Atsiri Apel Merah dengan Air

Keempat prekursor minyak atsiri apel merah yang telah homogen di atas selanjutnya masing-masing dicampur ke dalam 80 mL air. Setiap campuran dihomogenisasi dengan cara mengaduknya menggunakan *magnetic stirrer* yang dioperasikan pada 100 rpm selama 60 menit pada temperatur ruang. Selanjutnya keempat campuran homogen ini siap diatomisasi.

Atomisasi

Keempat campuran homogen prekursor minyak atsiri apel merah dan air di atas, selanjutnya masing-masing diatomisasi untuk menghasilkan nanoparfum, yaitu nanopartikel minyak atsiri apel merah yang terlapisi polimer PEG-40 HCO dan terdispersi di dalam air. Atomisasi dilakukan dengan menggunakan *atomizer* bertipe *pressure atomizer*, yaitu *atomizer* yang proses atomisasinya dibangkitkan oleh tekanan, dengan menggunakan nosel *pressure-swirl*.



Gambar 1. Konstruksi nosel *pressure-swirl*. (a) tampak samping (penampang lintang) dan (b) tampak atas (lubang kanal keluaran).

Cairan prekursor ditekan masuk ke dalam nosel, kemudian masuk ke ruang R dan bersirkulasi. Selanjutnya dari ruang R, cairan prekursor masuk ke ruang S dan kembali bersirkulasi. Sirkulasi ini diperlukan untuk menghomogenisasi kembali campuran bahan yang terdapat di dalam prekursor. Pada saat bersirkulasi di ruang S, cairan prekursor keluar dari lubang nosel melalui kanal keluaran nosel. Kanal keluaran ini memiliki diameter yang sangat kecil. Konstruksi nosel yang digunakan memiliki tinggi dan diameter ruang R dan ruang S masing-masing adalah 7 mm, 3 mm dan 5 mm, 2 mm. Sementara diameter lubang kanal keluaran nosel adalah 0,5 mm.

Pada saat cairan prekursor keluar dari nosel, cairan ini berada pada kondisi bersirkulasi dan melewati lubang kanal yang sempit (kecil). Karena bersirkulasi dan melewati kanal yang sempit, maka cairan akan keluar dalam bentuk semburan butiran-butiran yang sangat kecil (halus) dan menyebar di luar nosel. Butiran-butiran yang berdiameter sangat kecil ini selanjutnya mengalami tumbukan dan

gesekan dengan partikel-partikel udara yang dilewatinya. Akibatnya, butiran-butiran tersebut terpecah menjadi butiran-butiran yang lebih kecil lagi. Hal ini akan terjadi terus menerus sampai ukuran kritis butiran tercapai. Ketika ukuran kritis butiran tercapai, molekul-molekul polimer PEG-40 HCO yang terdapat di dalam butiran tersebut akan melapisi seukuran kecil (berorde nanometer) butiran-butiran minyak atsiri apel merah. Hasil semburan butiran-butiran kecil minyak atsiri apel merah yang terlapisi PEG-40 HCO ini selanjutnya ditampung dengan menggunakan suatu wadah kaca berbentuk bulat berdiameter 30 cm. Atomisasi dilakukan dengan debit keluaran cairan prekursor dari lubang keluaran nosel sebesar 25 mL/det (catatan: satuan ini perlu diverifikasi kembali sesuai data alat yang digunakan).

Karakterisasi

Nanopartikel minyak atsiri apel merah yang telah dilapisi oleh polimer PEG-40 HCO yang dihasilkan di atas, yang telah didispersi di dalam medium air, selanjutnya

dikarakterisasi. Karakterisasi dilakukan mencakup: (1) pengukuran diameter rata-rata, (2) pengukuran indeks polidispersitas (distribusi diameter), (3) pengukuran mobilitas elektroporetik, dan (4) pengukuran potensial zeta. Pengukuran semua parameter ini dilakukan dengan menggunakan sistim peralatan *Particle Size Analyzer* (PSA) merek HORIBA SZ-100 (Japan). Setiap sampel diukur sebanyak tiga kali ulangan (triplo), dan data diameter rata-rata serta standar deviasi diperoleh dari hasil rata-rata ketiga pengukuran tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

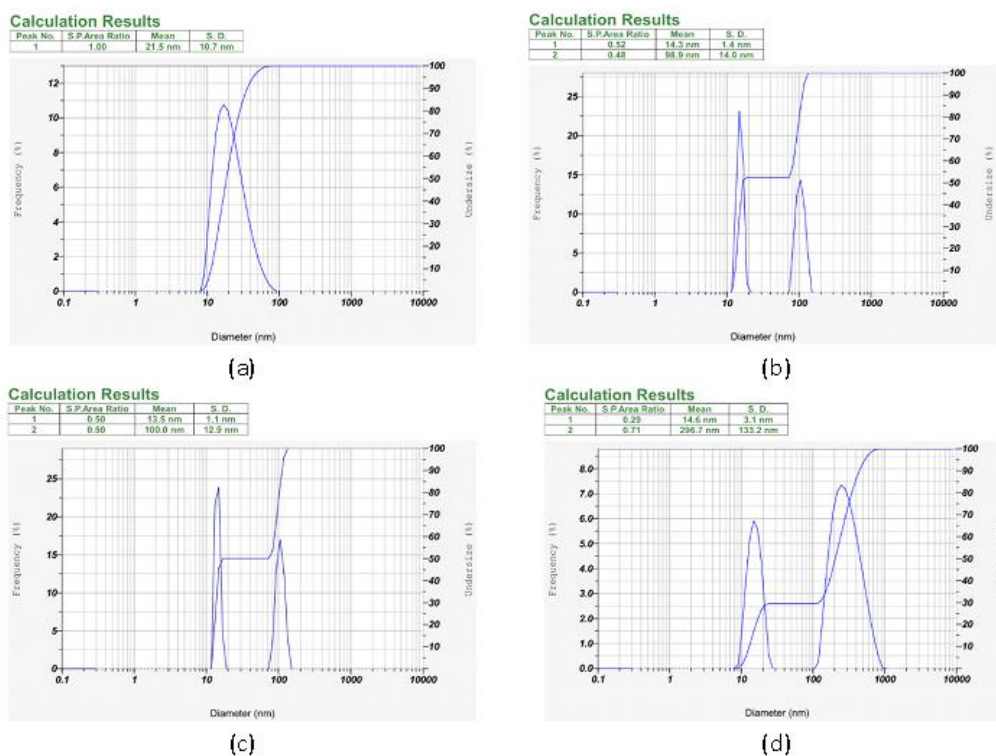
Pengaruh Konsentrasi Minyak Atsiri Apel Merah terhadap Diameter Rata-rata Nanopartikelnya

Hasil pengukuran diameter rata-rata dan standar deviasi nanopartikel minyak

atsiri apel merah dari keempat sampel yang dihasilkan, ditunjukkan pada gambar 2.

Diperoleh, nanopartikel yang disintesis menggunakan 4 mL minyak atsiri apel merah, yang dicampur dengan 1 mL PEG-40 HCO, menghasilkan satu populasi nanopartikel (satu puncak distribusi), sementara sampel yang lain menghasilkan dua populasi (dua puncak distribusi).

Diameter rata-rata terkecil nanopartikel yang dihasilkan adalah 13,5 nm (populasi pertama (puncak #1) dari nanopartikel yang disintesis menggunakan 8 mL minyak atsiri) dan yang terbesar adalah 296,7 nm (populasi kedua (puncak #2) dari nanopartikel yang disintesis menggunakan 10 mL minyak atsiri). Seluruh hasil pengukuran diameter rata-rata dan standar deviasi ini dirangkumkan pada tabel 1.



Gambar 2. Diameter rata-rata (nm) (*mean*) dan standar deviasi (SD) nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dienkapsulasi polimer PEG-40 HCO. Nanopartikel disintesis dengan menggunakan: (a) 4 mL, (b) 6 mL, (c) 8 mL, dan (d) 10 mL minyak atsiri apel merah yang masing-masing dicampurkan ke dalam 1 mL polimer PEG-40 HCO.

Tabel 1. Besar diameter rata-rata (nm) dan standar deviasi (nm) nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dienkapsulasi polimer PEG-40 HCO. Nanopartikel disintesis menggunakan empat ragam konsentrasi minyak atsiri.

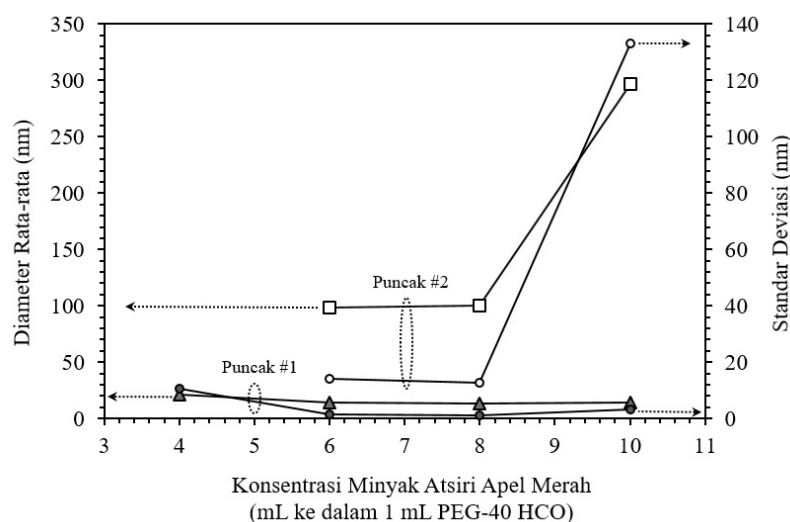
Konsentrasi Minyak Atsiri Apel Merah (mL ke dalam 1 mL PEG-40 HCO)	Puncak #1		Puncak #2	
	Diameter Rata-rata (nm)	Standar Deviasi (nm)	Diameter Rata-rata (nm)	Standar Deviasi (nm)
4	21,5	10,7	-	-
6	14,3	1,4	98,9	14
8	13,5	1,1	100	12,9
10	14,6	3,1	296,7	133,2

Dari hasil yang disajikan pada tabel 1 menunjukkan adanya hubungan antara peningkatan konsentrasi minyak atsiri apel merah dengan perubahan diameter rata-rata nanopartikel. Pada gambar 3 grafik hubungan kedua parameter ini dan terhadap standar deviasinya, ditunjukkan.

Pada populasi nanopartikel pertama (puncak #1), diameter rata-rata cenderung menurun dari 21,5 nm (pada 4 mL) menjadi 13,5 nm (pada 8 mL), sebelum sedikit meningkat menjadi 14,6 nm (pada 10 mL). Sebaliknya, pada populasi kedua (puncak #2), diameter rata-rata menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring dengan bertambahnya konsentrasi minyak atsiri.

Pada konsentrasi 6 mL, diameter rata-rata puncak #2 adalah 98,9 nm, meningkat menjadi 100 nm pada 8 mL, dan melonjak tajam menjadi 296,7 nm pada konsentrasi 10 mL.

Perbedaan ini mengindikasikan bahwa konsentrasi minyak atsiri memiliki dampak yang berbeda terhadap pembentukan dua populasi nanopartikel tersebut. Konsentrasi surfaktan PEG-40 HCO yang tetap (1 mL) memainkan peran kunci dalam menstabilkan nanopartikel ini, namun jumlah surfaktan yang terbatas tidak mampu menstabilkan keseluruhan minyak atsiri pada konsentrasi yang lebih tinggi.



Gambar 3. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan saat sintesis dengan besar diameter rata-rata dan standar deviasi (nm) nanopartikel yang dihasilkan

Secara teoritis (Tayeb & Sainsbury, 2018), pembentukan nanopartikel dari emulsi minyak dalam air melibatkan proses nukleasi dan pertumbuhan. Ketika minyak atsiri dicampurkan dengan surfaktan polimer PEG-40 HCO dalam larutan air, molekul surfaktan akan mengorientasikan diri di antarmuka minyak-air dan membentuk misel. Gaya bebas Gibbs (ΔG) untuk pembentukan misel harus negatif ($\Delta G < 0$) agar prosesnya spontan.

Pada konsentrasi minyak atsiri yang rendah, semua minyak atsiri dapat terenkapsulasi dengan efisien oleh misel yang dibentuk oleh molekul surfaktan. Molekul PEG-40 HCO memiliki bagian hidrofobik yang berinteraksi dengan minyak atsiri dan bagian hidrofilik yang berinteraksi dengan air, menciptakan lapisan pelindung yang menstabilkan nanopartikel (Tuomela et al., 2016).

Hubungan antara teori di atas dengan data hasil penelitian yang diperoleh sebagaimana ditunjukkan pada tabel 1 dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada konsentrasi minyak atsiri 4 mL, rasio surfaktan terhadap minyak atsiri masih sangat optimal, sehingga seluruh minyak atsiri dapat terenkapsulasi secara efektif oleh molekul PEG-40 HCO dan menghasilkan populasi nanopartikel tunggal dengan diameter rata-rata yang kecil (21,5 nm).

Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3, penurunan diameter rata-rata populasi nanopartikel pertama (puncak #1) saat konsentrasi minyak atsiri meningkat dari 4 mL hingga 8 mL menunjukkan bahwa jumlah molekul minyak atsiri yang terenkapsulasi dalam setiap misel yang dibentuk oleh molekul polimer PEG-40 HCO

menjadi lebih sedikit sehingga ukuran nanopartikelnya menjadi kecil. Fenomena ini diduga juga dapat disebabkan oleh reorganisasi susunan molekul polimer PEG-40 HCO yang menghasilkan ukuran misel lebih kecil atau lapisan pelindung yang lebih merata; namun mekanisme ini bersifat interpretatif dan perlu dikonfirmasi lebih lanjut melalui analisis morfologi seperti TEM atau SEM. Namun, saat konsentrasi minyak atsiri mencapai 6 mL, 8 mL, dan 10 mL, jumlah minyak atsiri melebihi kapasitas enkapsulasi dari 1 mL PEG-40 HCO yang tersedia. Kelebihan minyak atsiri ini diduga mulai membentuk populasi partikel kedua (puncak #2) yang ukurannya jauh lebih besar.

Peningkatan diameter rata-rata puncak #2 yang drastis dari 98,9 nm menjadi 296,7 nm seiring dengan penambahan konsentrasi minyak atsiri dari 6 mL hingga 10 mL merupakan bukti kuat bahwa surfaktan yang terbatas tidak lagi mampu menstabilkan seluruh minyak atsiri. Ketika rasio minyak atsiri terhadap surfaktan meningkat, molekul surfaktan tidak cukup untuk melapisi seluruh permukaan partikel minyak yang terbentuk. Akibatnya, partikel minyak yang tidak terstabilkan secara optimal akan bertumbukan dan berkoalisi dan menghasilkan partikel dengan ukuran yang lebih besar (Marhamati et al., 2021).

Oleh karena itu, kehadiran dua populasi partikel diduga menunjukkan bahwa pada konsentrasi minyak atsiri yang lebih tinggi, terbentuk nanopartikel yang relatif stabil (puncak #1) dan nanopartikel berukuran lebih besar yang kemungkinan terbentuk akibat koalisi droplet yang tidak terstabilkan secara optimal (puncak #2).

Peningkatan signifikan pada diameter puncak #2 pada konsentrasi 10 mL mengindikasikan bahwa kapasitas stabilisasi surfaktan telah terlampaui; namun konfirmasi mekanisme ini memerlukan data morfologi langsung seperti TEM atau SEM. Dengan demikian, dapatlah dinyatakan bahwa konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan saat sintesis memiliki pengaruh signifikan terhadap diameter rata-rata nanopartikelnya.

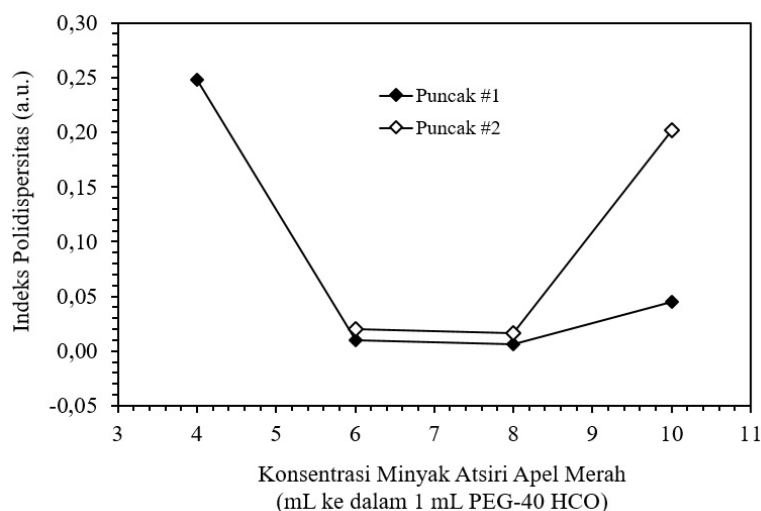
Peningkatan konsentrasi minyak atsiri dari 4 mL ke 6 mL, 8 mL, dan 10 mL, dengan jumlah surfaktan PEG-40 HCO yang konstan, menyebabkan terbentuknya dua populasi partikel. Satu populasi relatif stabil pada ukuran yang kecil (~13-21 nm), sementara populasi kedua menunjukkan peningkatan diameter yang sangat signifikan.

Pengamatan ini secara kuat mendukung teori bahwa surfaktan PEG-40 HCO memiliki kapasitas enkapsulasi terbatas, dan ketika kapasitas ini terlampaui, kelebihan minyak atsiri akan membentuk partikel yang lebih besar melalui koalisi. Temuan ini memberikan petunjuk pentingnya rasio surfaktan-minyak yang optimal untuk memastikan sintesis nanopartikel yang seragam dan stabil dalam aplikasi nanoparfum berbasis air.

Pengaruh Konsentrasi Minyak Atsiri Apel Merah terhadap Indeks Polidispersitas Nanopartikelnya

Pada gambar 3, besar standar deviasi (SD) dari setiap distribusi ukuran populasi nanopartikel, juga ditunjukkan. Dari besar standar deviasi ini, besar indeks polidispersitas (IP) nanopartikel dari setiap distribusi ukuran nanopartikel, dapat dihitung, $IP = (SD/d)^2$, dimana d adalah diameter rata-rata nanopartikel. Indeks polidispersitas (tanpa satuan, *a.u.*) adalah nilai yang mengukur seberapa seragam ukuran nanopartikel dalam suatu populasi.

Populasi nanopartikel yang memiliki IP yang rendah (monodispers) memiliki stabilitas yang lebih baik karena nanopartikel dengan ukuran yang seragam memiliki interaksi yang lebih homogen sehingga mengurangi kecenderungan untuk saling menempel (agregasi) dan koalisi. Agregasi dapat menyebabkan nanopartikel mengendap, mengubah sifat fisika-kimianya, dan pada akhirnya merusak formulasi. Populasi yang stabil memiliki umur simpan yang lebih lama dan kinerjanya lebih konsisten dari waktu ke waktu. Dengan menggunakan perumusan di atas, IP dari setiap populasi nanopartikel di atas telah dihitung, dan hubungan konsentrasi minyak atsiri terhadap besar IP dari setiap populasi nanopartikel tersebut.



Gambar 4. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan saat sintesis dengan besar indeks polidispersitas nanopartikel yang dihasilkan.

Hasil yang diperoleh di atas menunjukkan bahwa, pada konsentrasi minyak atsiri 4 mL, nanopartikel minyak atsiri apel merah terbentuk dengan satu populasi dengan $IP = 0.247679827$. Peningkatan konsentrasi minyak atsiri menjadi 6 mL dan 8 mL menghasilkan dua populasi dengan IP yang sangat rendah, yang terentang dari 0.006639232 hingga 0.020038421. Ketika konsentrasi minyak atsiri yang digunakan 10 mL, IP kedua populasi meningkat tajam, mencapai 0.045083505 untuk puncak pertama dan 0.201545617 untuk puncak kedua.

Peningkatan konsentrasi minyak atsiri dari 4 mL ke 6 mL dan 8 mL secara paradoks menurunkan IP (puncak #1). Ini mengindikasikan bahwa distribusi ukuran nanopartikel menjadi lebih sempit dan homogen (Kheybari *et al.*, 2010). Penurunan ini menunjukkan adanya kondisi sintesis yang optimal, di mana nanopartikel yang terbentuk cenderung memiliki ukuran yang seragam. Namun, ketika konsentrasi minyak atsiri ditingkatkan lebih lanjut ke 10 mL, IP kembali meningkat secara signifikan,

yang mengindikasikan distribusi ukuran partikel yang meluas dan kurang stabil (Astutiningsih *et al.*, 2022). Karakteristik yang unik ini sangat dipengaruhi oleh peran stabilisator sterik dari surfaktan polimer PEG-40 HCO. Molekul polimer PEG-40 HCO yang mengelilingi nanopartikel minyak atsiri, membentuk lapisan pelindung sehingga mencegah nanopartikel-nanopartikel untuk saling berkoalisi dan beraglomerasi. Dengan demikian, IP populasi nanopartikel menjadi kecil (Gebauer *et al.*, 2022).

Besar IP suatu populasi nanopartikel sangat dipengaruhi oleh proses nukleasi dan pertumbuhan nuklei-nuklei membentuk nanopartikel. Nukleasi adalah pembentukan inti-inti partikel stabil dari molekul-molekul prekursor, yang terjadi ketika tingkat supersaturasi larutan mencapai ambang batas tertentu. Pertumbuhan nuklei-nuklei dipengaruhi oleh molekul-molekul surfaktan. Laju nukleasi dapat dijelaskan secara teoritis dengan menggunakan persamaan Gibbs-Thomson, yang menghubungkan energi

bebas Gibbs pembentukan inti (ΔG) dengan tegangan antarmuka (γ), jari-jari inti kritis (r_c), dan supersaturasi (Polte, 2015). Peningkatan konsentrasi prekursor (minyak atsiri) secara langsung meningkatkan supersaturasi, yang pada gilirannya meningkatkan laju nukleasi.

Pada tahap pertumbuhan, molekul-molekul prekursor yang tersisa berdifusi menuju nuklei yang telah terbentuk. Laju pertumbuhan nuklei membentuk nanopartikel sangat bergantung pada konsentrasi prekursor dan koefisien difusi. Kehadiran PEG-40 HCO secara fisik menghambat difusi molekul prekursor ke permukaan nuklei yang sedang tumbuh (nanopartikel). Lapisan polimer yang menutupi nanopartikel menciptakan tolakan sterik (*entropic repulsion*) yang secara efektif mencegah nanopartikel-nanopartikel bertabrakan dan berkoalisi, sehingga mengendalikan pertumbuhan dan mencegah aglomerasi (Price *et al.*, 2009).

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4, sangat relevan dengan teori di atas. Pada konsentrasi minyak atsiri 4 mL, IP yang relatif tinggi (0.247679827) dapat diartikan sebagai kondisi supersaturasi yang kurang optimal. Laju nukleasi yang lambat menyebabkan pembentukan inti partikel tidak serentak, yang kemudian mengakibatkan pertumbuhan partikel yang tidak terkontrol, sehingga IP menjadi lebih tinggi (Kheybari *et al.*, 2010).

Saat konsentrasi minyak atsiri ditingkatkan menjadi 6 mL dan 8 mL, terjadi peningkatan supersaturasi yang memicu nukleasi yang cepat dan serentak. Pada titik ini, jumlah molekul PEG-40 HCO yang tersedia secara efektif cukup untuk melapisi

semua inti yang terbentuk. Lapisan stabilisator ini menekan pertumbuhan partikel yang tidak terkontrol dan secara efisien mencegah koalisi dan aglomerasi. Akibatnya, partikel-partikel tumbuh dengan kecepatan yang seragam, menghasilkan nanopartikel dengan distribusi ukuran yang sangat sempit dan IP yang sangat rendah (Lalegani & Seyyed Ebrahimi, 2020).

Terbentuknya dua populasi nanopartikel ketika menggunakan minyak atsiri pada konsentrasi 6 mL dan 8 mL, menunjukkan bahwa mekanisme pembentukan nanopartikel terjadi melalui dua jalur yang berbeda, yang terkait dengan perbedaan ukuran inti awal atau dinamika adsorpsi molekul surfaktan yang kompleks. Namun, pada konsentrasi 10 mL, rasio antara prekursor minyak atsiri dan surfaktan PEG-40 HCO menjadi tidak seimbang. Tingginya supersaturasi menghasilkan jumlah inti yang jauh melampaui kapasitas stabilisasi molekul PEG-40 HCO. Sebagian inti tidak terstabilkan sepenuhnya, sehingga rentan mengalami koalisi dan aglomerasi (Astutiningsih *et al.*, 2022).

Hal ini menghasilkan dua populasi nanopartikel dengan IP yang lebih tinggi, di mana IP puncak #2 (0.201545617) dapat mewakili partikel-partikel yang mengalami koalisi dan aglomerasi. Studi lain juga melaporkan bahwa rasio surfaktan-prekursor yang tidak optimal dapat menyebabkan peningkatan IP dan koalisi dan aglomerasi nanopartikel (Goel *et al.*, 2021).

Dari hasil yang diperoleh di atas menunjukkan bahwa konsentrasi minyak atsiri apel merah memiliki pengaruh kritis terhadap indeks polidispersitas

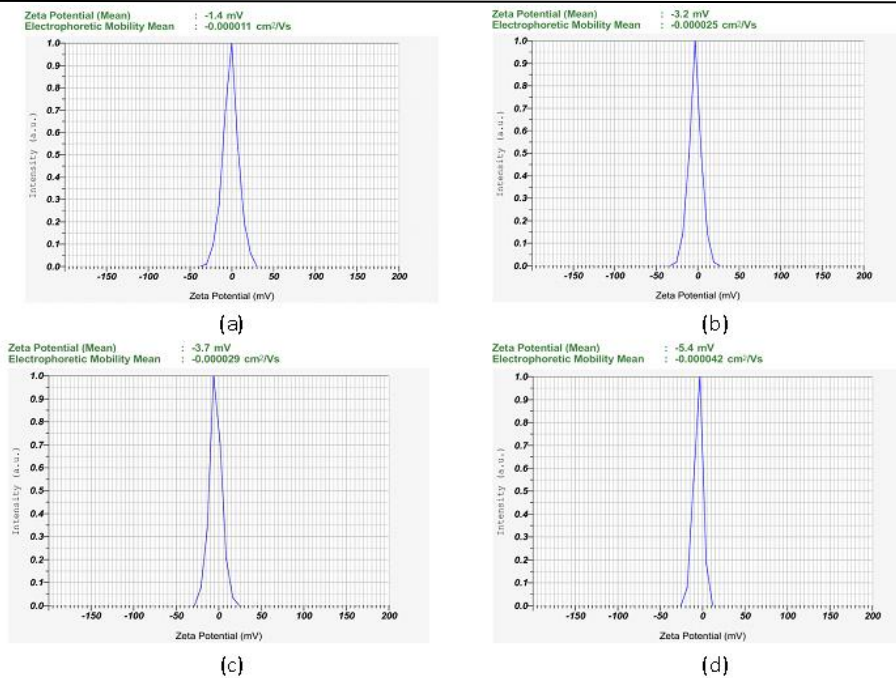
nanopartikel. Terdapat konsentrasi optimal dari segi IP masing-masing populasi (6-8 mL) di mana IP mencapai nilai minimum, menunjukkan distribusi ukuran yang sangat sempit dalam setiap populasi. Perlu dicatat bahwa istilah “optimal” di sini terbatas pada aspek IP per populasi, dan belum tentu optimal dari segi keseragaman sistem secara keseluruhan, mengingat pada konsentrasi tersebut sudah muncul dua populasi nanopartikel dengan ukuran yang berbeda.

Fenomena ini didorong oleh supersaturasi yang memadai untuk nukleasi serentak dan rasio prekursor-surfaktan yang seimbang, memungkinkan molekul PEG-40 HCO untuk secara efektif menstabilkan nanopartikel-nanopartikel yang terbentuk melalui mekanisme stabilisasi sterik. Namun, di luar rentang konsentrasi tersebut, ketidakseimbangan rasio surfaktan dan prekursor diduga menyebabkan koalisi dan aglomerasi, yang secara signifikan meningkatkan IP nanopartikel.

Hasil pengukuran mobilitas elektroporetik dan potensial zeta keempat

nanopartikel minyak atsiri di atas ditunjukkan pada gambar 5. Hasil ini menunjukkan bahwa nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dienkapsulasi molekul PEG-40 HCO dan didispersi di dalam medium air, menghasilkan mobilitas elektroporetik dan potensial zeta negatif. Ini menyatakan bahwa muatan permukaan nanopartikel minyak atsiri apel merah adalah negatif. Besar mobilitas elektroporetiknya tersebar dari $-0,000011 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ sampai $-0,000042 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dan besar potensial zetanya tersebar dari $-1,4 \text{ mV}$ sampai $-5,4 \text{ mV}$. Potensial zeta sebesar ini masuk dalam kategori sangat rendah.

(Bhattacharjee, 2016) melaporkan, bila suatu populasi nanopartikel memiliki potensial zeta yang rendah $< \pm 10 \text{ mV}$, maka nanopartikel di dalam populasi tersebut dari segi elektrostatis, sangat tidak stabil. Oleh karena itu nanopartikel minyak atsiri apel merah yang diperoleh di atas, secara elektrostatis sangat tidak stabil. Hasil pengukuran mobilitas elektroporetik dan potensial zeta nanopartikel minyak atsiri yang ditunjukkan pada gambar 5, selengkapnya dirangkumkan pada tabel 1.



Gambar 5. Mobilitas elektroporetik (*electrophoretic mobility*) dan potensial zeta (*zeta potential*) nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dienkapsulasi polimer PEG-40 HCO. Nanopartikel disintesis dengan menggunakan: (a) 4 mL, (b) 6 mL, (c) 8 mL, dan (d) 10 mL minyak atsiri apel merah yang masing-masing dicampurkan ke dalam 1 mL polimer PEG-40 HCO.

Tabel 1. Besar mobilitas elektroporetik (cm^2/Vs) dan potensial zeta (mV) nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dienkapsulasi polimer PEG-40 HCO, yang disintesis menggunakan empat ragam konsentrasi minyak atsiri.

Konsentrasi Minyak Atsiri Apel Merah (mL ke dalam 1 mL PEG-40 HCO)	Mobilitas Elektroporetik (cm^2/Vs)	Potensial Zeta (mV)
4	-0,000011	-1,4
6	-0,000025	-3,2
8	-0,000029	-3,7
10	-0,000042	-5,4

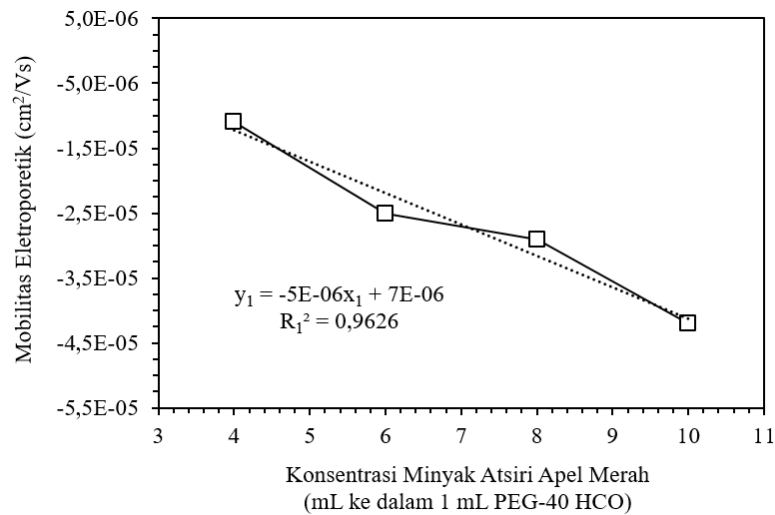
Dari hasil sebagaimana dirangkumkan pada tabel 1, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi minyak atsiri apel merah secara konsisten menyebabkan peningkatan nilai absolut mobilitas elektroporetik dan potensial zeta nanopartikelnya. Mobilitas elektroporetik nanopartikel bergeser dari $-0.000011 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ menjadi $-0.000042 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, dan potensial zetanya meningkat dari -1.4 mV menjadi -5.4 mV . Kedua parameter ini menunjukkan pergeseran ke arah nilai negatif yang lebih besar.

Perubahan mobilitas elektroporetik dan potensial zeta suatu nanopartikel ditentukan oleh perubahan muatan permukaannya (Pochapski *et al.*, 2021).

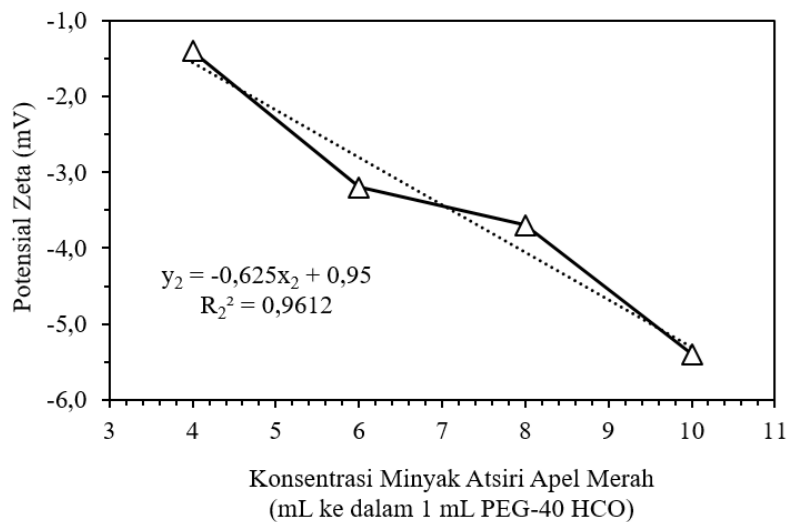
Perubahan mobilitas elektroporetik dan potensial zeta yang terjadi pada nanopartikel minyak atsiri di atas menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi fasa minyak, yang distabilkan oleh surfaktan polimer non-ionik PEG-40 HCO, secara langsung mempengaruhi muatan permukaan nanopartikel. Karena

proses sintesis nanopartikel ini menggunakan jumlah surfaktan polimer PEG-40 HCO yang tetap, yaitu 1 mL, maka perubahan mobilitas elektroforetik dan potensial zeta nanopartikel satu-satunya

dipengaruhi secara langsung oleh variasi konsentrasi minyak atsiri. Grafik yang disajikan pada gambar 6 dan gambar 7 lebih lanjut menguatkan korelasi ini.



Gambar 6. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan saat sintesis dengan besar mobilitas elektroforetik nanopartikel yang dihasilkan.



Gambar 7. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan saat sintesis dengan besar potensial zeta nanopartikel yang dihasilkan.

Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri apel merah terhadap mobilitas elektroporetik nanopartikel sebagaimana ditunjukkan pada gambar 6 menunjukkan tren linear negatif dengan koefisien determinasi (R_1^2) sebesar 0.9626. Ini berarti sekitar 96.26% perubahan mobilitas elektroporetik dapat dijelaskan oleh perubahan konsentrasi minyak atsiri. Demikian pula grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri apel merah terhadap besar potensial zeta nanopartikelnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 7, menunjukkan tren serupa dengan R_2^2 sebesar 0.9612. Nilai R^2 yang tinggi pada kedua grafik ini menegaskan hubungan linear yang kuat dan langsung antara konsentrasi minyak atsiri apel merah dengan mobilitas elektroforetik dan potensial zeta nanopartikel yang dihasilkan.

Persamaan regresi linear yang diperoleh dari kedua grafik memberikan informasi lebih rinci mengenai hubungan ini. Untuk mobilitas elektroporetik, persamaannya adalah $y_1 = -5E-06x_1 + 7E-06$, dimana y_1 adalah mobilitas elektroporetik dan x_1 adalah konsentrasi minyak atsiri. Koefisien kemiringannya sebesar $-5E-06$, menunjukkan bahwa setiap peningkatan konsentrasi minyak atsiri apel merah sebesar 1 mL akan menyebabkan mobilitas elektroporetik berkurang sebesar $-5E-06 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Begitu pula untuk potensial zeta, persamaannya adalah $y_2 = -0.625x_2 + 0.95$. Koefisien kemiringan sebesar -0.625 menunjukkan bahwa setiap peningkatan konsentrasi minyak atsiri sebesar 1 mL akan menyebabkan potensial zeta nanopartikel berkurang sebesar -0.625 mV .

Secara teoritis, pengaruh konsentrasi minyak atsiri apel merah terhadap mobilitas elektroforetik dan potensial zeta nanopartikel di atas dapat dijelaskan dari sudut pandang fisika koloid. Nanopartikel minyak atsiri apel

merah yang dihasilkan memiliki inti hidrofobik yang sebagian besar tersusun dari molekul non-polar atau semi-polar. Permukaan nanopartikel kemudian dienkapsulasi oleh molekul surfaktan polimer PEG-40 HCO. Meskipun PEG-40 HCO adalah surfaktan non-ionik, muatan permukaan nanopartikel dapat timbul dari adsorpsi ion-ion dari medium dispersi, seperti ion hidroksil (OH^-) dari air, yang menghasilkan muatan negatif (Liu et al., 2022).

Peningkatan konsentrasi minyak atsiri apel merah dapat menyebabkan pembentukan nanopartikel dengan area permukaan yang lebih luas atau struktur permukaan yang berbeda. Perubahan ini mempengaruhi cara molekul surfaktan PEG-40 HCO menstabilkan nanopartikel. Pada konsentrasi minyak atsiri yang lebih tinggi, ketersediaan molekul minyak untuk membentuk inti nanopartikel juga lebih banyak, yang dapat memodifikasi antarmuka nanopartikel-surfaktan. Modifikasi ini dapat menyebabkan adsorpsi ion negatif, seperti OH^- dari medium dispersi menjadi lebih intensif.

Akibatnya, kerapatan muatan negatif pada bidang geser (*shear plane*) lapisan ganda yang mengelilingi nanopartikel meningkat, yang memicu nilai potensial zeta menjadi lebih negatif. Dari hasil yang diperoleh di atas, secara keseluruhan menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi minyak atsiri apel merah dalam formulasi nanopartikel yang distabilkan dengan PEG-40 HCO menghasilkan peningkatan nilai absolut mobilitas elektroforetik dan potensial zeta.

Meskipun demikian, nilai potensial zeta yang sangat rendah ($-1,4$ hingga $-5,4 \text{ mV}$) menunjukkan bahwa stabilitas elektrostatik sistem ini lemah. Karena PEG-40 HCO merupakan surfaktan nonionik, stabilitas

sistem ini kemungkinan besar lebih ditentukan oleh mekanisme stabilisasi sterik dari lapisan polimer PEG-40 HCO yang mengelilingi nanopartikel, bukan oleh tolakan elektrostatis. Dengan demikian, homogenitas visual atau dispersi awal yang teramati tidak otomatis mencerminkan stabilitas koloid yang baik dalam jangka panjang, dan evaluasi lanjutan mengenai kestabilan penyimpanan masih diperlukan.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini, nanoparfum berbasis air berbahan nanopartikel minyak atsiri apel merah yang dienkapsulasi polimer PEG-40 HCO, telah berhasil disintesis. Diameter rata-rata dan potensial zeta nanopartikel yang dihasilkan, masing-masing adalah $\leq 296,7$ nm dan $-1,4$ mV sampai $-5,4$ mV. Pengaruh empat ragam konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan pada saat sintesis (4 mL, 6 mL, 8 mL, dan 10 mL, yang masing-masing dicampur ke dalam 1 mL polimer PEG-40 HCO) terhadap karakteristik nanopartikel yang dihasilkan, telah diinvestigasi. Konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan mempengaruhi populasi nanopartikel yang terbentuk.

Ketika konsentrasi minyak atsiri yang digunakan rendah, 4 mL, nanopartikel yang dihasilkan berpopulasi tunggal, sementara ketika menggunakan konsentrasi 6 mL, 8 mL, dan 10 mL, nanopartikel yang dihasilkan berpopulasi ganda. Ditemukan juga bahwa konsentrasi minyak atsiri yang digunakan sangat mempengaruhi besar diameter rata-rata dan standar deviasi nanopartikel. Semakin tinggi konsentrasi minyak atsiri apel merah yang digunakan, semakin besar diameter rata-rata nanopartikel yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena konsentrasi surfaktan polimer PEG-40 HCO yang digunakan untuk masing-

masing konsentrasi minyak atsiri, tetap. Oleh karena itu pada saat konsentrasi minyak atsiri yang digunakan tinggi, maka laju pembentukan inti (nuklei) nanopartikel sangat tinggi dan laju pertumbuhan nanopartikel pun sangat tinggi. Akibatnya diameter rata-rata nanopartikel dan indeks polidispersitasnya menjadi besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Astutiningsih, F., Anggrahini, S., Fitriani, A., & Supriyadi, S. (2022). Optimization of Saffron Essential Oil Nanoparticles Using Chitosan-Arabic Gum Complex Nanocarrier with Ionic Gelation Method. *International Journal of Food Science*, 2022(1), 4035033. <https://doi.org/10.1155/2022/4035033>
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351. <https://doi.org/10.1016/J.JCONREL.2016.06.017>
- Carvalho, I. T., Estevinho, B. N., & Santos, L. (2016). Application of microencapsulated essential oils in cosmetic and personal healthcare products - A review. *International Journal of Cosmetic Science*, 38(2), 109–119. <https://doi.org/10.1111/ICS.12232>;WGR OUP:STRING:PUBLICATION
- Edison, T. J. I., & Sethuraman, M. G. (2012). Instant green synthesis of silver nanoparticles using Terminalia chebula fruit extract and evaluation of their catalytic activity on reduction of methylene blue. *Process Biochemistry*, 47(9), 1351–1357. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2012.04.025>
- Flekka, K., Dimaki, V. D., Mourelatou, E., Avgoustakis, K., Lamari, F. N., & Hatziantoniou, S. (2024). Stability and Retention of Nanoemulsion Formulations Incorporating Lavender Essential Oil. *Cosmetics*, 11(3), 65.

- <https://doi.org/10.3390/COSMETICS11030065/S1>
- Gebauer, D., Gale, J. D., & Cölfen, H. (2022). Crystal Nucleation and Growth of Inorganic Ionic Materials from Aqueous Solution: Selected Recent Developments, and Implications. *Small*, 18(28), 2107735. <https://doi.org/10.1002/SMLL.202107735>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Goel, A., Shikha, Shivani, & Tomar, S. (2021). Ir-ni based mono and bimetallic nanocrystals: Synthesis, characterization and effect of cationic, anionic, and non-ionic stabilizers. *Current Chemistry Letters*, 10(3), 209–220. <https://doi.org/10.5267/J.CCL.2021.1.005>
- Herayati, H., & Elianasari, E. (2024). Natural-Based Cosmetics: Trends, Challenges, and Scientific Innovations. *Indonesian Journal of Cosmetics*, 2(2), 55–81. <https://doi.org/10.35472/IJCOS.V2I2.1992>
- Iskandar, B., Liu, T.-W., Mei, H.-C., Kuo, I.-C., Surboyo, M. D. C., Lin, H.-M., Lee, C.-K., Iskandar, B., Liu, T.-W., Mei, H.-C., Kuo, I.-C., Surboyo, M. D. C., Lin, H.-M., & Lee, C.-K. (2024). Herbal nanoemulsions in cosmetic science: A comprehensive review of design, preparation, formulation, and characterization. *Journal of Food and Drug Analysis*, 32(4), 428–458. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3526>
- Kheybari, S., Samadi, N., Hosseini, S. V., Fazeli, A., & Fazeli, M. R. (2010). Synthesis and antimicrobial effects of silver nanoparticles produced by chemical reduction method. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 18(3), 168. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3304363/>
- Lalegani, Z., & Seyyed Ebrahimi, S. A. (2020). Optimization of synthesis for shape and size controlled silver nanoparticles using response surface methodology. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 595, 124647. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2020.124647>
- Liu, D., Xu, J., Zhao, H., Zhang, X., Zhou, H., Wu, D., Liu, Y., Yu, P., Xu, Z., Kang, W., & Fan, M. (2022). Nanoemulsions stabilized by anionic and non-ionic surfactants for enhanced oil recovery in ultra-low permeability reservoirs: Performance evaluation and mechanism study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 637, 128235. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2021.128235>
- Manshur, H. A., Putri, D. N., Pakpahan, O. P., Akalentera, Q. W., & Harini, N. (2023). The Application of Various Fermented Malang Apple Water As A Source of Natural Yeast for Sourdough Bread Processing. *Indonesian Food and Nutrition Progress*, 20(2), 52–59. <https://doi.org/10.22146/IFNP.65371>
- Marhamati, M., Ranjbar, G., & Rezaie, M. (2021). Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of Oil-in-water Nanoemulsions: A critical review. *Journal of Molecular Liquids*, 340, 117218. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2021.117218>
- Pochapski, D. J., Carvalho Dos Santos, C., Leite, G. W., Pulcinelli, S. H., & Santilli, C. V. (2021). Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Results. *Langmuir*, 37(45), 13379–13389. <https://doi.org/10.1021/ACS.LANGMUIR.1C02056>
- Polte, J. (2015). Fundamental growth principles of colloidal metal nanoparticles – a new perspective. *CrystEngComm*, 17(36), 6809–6830. <https://doi.org/10.1039/C5CE01014D>
- Price, D. A., Blagg, J., Jones, L., Greene, N., & Wager, T. (2009). Physicochemical drug

properties associated with in vivo toxicological outcomes: a review. *Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology*, 5(8), 921–931. <https://doi.org/10.1517/17425250903042318>

Tayeb, H. H., & Sainsbury, F. (2018). Nanoemulsions in Drug Delivery: Formulation to Medical Application. *Nanomedicine*, 13(19), 2507–2525. <https://doi.org/10.2217/NNM-2018-0088>

Tuomela, A., Hirvonen, J., & Peltonen, L. (2016). Stabilizing Agents for Drug Nanocrystals: Effect on Bioavailability. *Pharmaceutics* 2016, Vol. 8, Page 16, 8(2), 16. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS8020016>

Vora, L. K., Gholap, A. D., Hatvate, N. T., Naren, P., Khan, S., Chavda, V. P., Balar, P. C., Gandhi, J., & Khatri, D. K. (2024). Essential oils for clinical aromatherapy: A comprehensive review. *Journal of Ethnopharmacology*, 330, 118180. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2024.118180>

Jurnal Pharmacia Mandala Waluya (JPMW) is Licensed a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence

