

Synthesis and Characterization of Gardenia Essential Oil Nanoparticles Using a PEG-40 Hydrogenated Castor Oil Protective Polymer Layer

Sintesis Nanopartikel Minyak Atsiri Gardenia Menggunakan Lapisan Pelindung Polimer Peg-40 *Hydrogenated Castor Oil* Dan Karakterisasinya

Mario Epindonta ^{a*}, Horasdia Saragih ^b

^a *Study of pharmacy, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Advent Indonesia, Bandung Barat 40559, West Java, Indonesia*

^b *Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Advent Indonesia, Bandung Barat, West Java, Indonesia.*

*Corresponding Authors: nurrio.epindnta@gmail.com

Abstract

This study focused on the preparation of Gardenia essential oil nanoemulsions using PEG-40 Hydrogenated Castor Oil (PEG-40 HCO) as a surfactant through an atomization method to evaluate the effect of oil concentration on the physical characteristics and electrokinetic properties of the resulting system. Four oil volumes, namely 4, 6, 8, and 10 mL in 80 mL of water, were used as precursors and subsequently analyzed to determine particle size, polydispersity index (PDI), electrophoretic mobility, and zeta potential. The results showed that increasing oil concentration tended to increase the average particle diameter. The obtained PDI values were relatively low; however, their interpretation was conducted cautiously because the system exhibited a bimodal particle size distribution. The zeta potential values ranged from -2.3 to -7.8 mV, while the electrophoretic mobility values ranged from -0.000017 to -0.000060 cm²/Vs. These results indicate changes in particle surface characteristics with increasing essential oil concentration. The characteristics of the resulting nanoemulsion suggest that PEG-40 HCO plays a role in the formation and dispersion of oil droplets in an aqueous medium. Overall, the findings indicate that PEG-40 HCO has potential for the preparation of Gardenia essential oil nanoemulsions with particle sizes in the nanometer range and relatively favorable size distribution characteristics, making them promising for further development in water-based perfume formulations and other cosmetic applications. However, the long-term stability of the system still requires further stability evaluation.

Keywords: *Gardenia essential oil, PEG-40 Hydrogenated Castor Oil, nanoemulsion, atomization, particle size, zeta potential*

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada pembuatan nanoemulsi minyak atsiri Gardenia menggunakan surfaktan PEG-40 Hydrogenated Castor Oil (PEG-40 HCO) melalui metode atomisasi untuk menilai pengaruh variasi jumlah minyak terhadap karakteristik fisik dan sifat elektrokinetik sistem yang terbentuk. Empat volume minyak, yaitu 4, 6, 8, dan 10 mL dalam 80 mL air, digunakan sebagai prekursor, kemudian dianalisis untuk menentukan ukuran partikel, indeks polidispersitas (PDI), mobilitas elektroforetik, dan nilai zeta potensial. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi minyak memberikan kecenderungan pembesaran diameter rata-rata partikel. Nilai PDI yang diperoleh relatif rendah, namun interpretasinya dilakukan secara hati-hati karena sistem menunjukkan distribusi ukuran partikel bimodal. Nilai zeta potensial berkisar antara -2,3 hingga -7,8 mV, sedangkan mobilitas elektroforetik berada pada rentang -0,000017 hingga -0,000060 cm²/Vs. Hasil tersebut menunjukkan adanya perubahan karakteristik permukaan partikel seiring peningkatan konsentrasi minyak atsiri. Karakteristik nanoemulsi yang terbentuk mengindikasikan adanya peran PEG-40 HCO dalam pembentukan dan dispersi tetesan minyak dalam medium air. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa PEG-40 HCO berpotensi digunakan dalam pembentukan nanoemulsi minyak atsiri Gardenia dengan ukuran partikel pada rentang nanometer dan distribusi ukuran yang relatif baik, sehingga berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada formulasi parfum berbasis air maupun aplikasi kosmetik lainnya. Namun, evaluasi kestabilan jangka panjang sistem masih memerlukan pengujian stabilitas lebih lanjut.

Kata Kunci: *Minyak atsiri Gardenia, PEG-40 Hydrogenated Castor Oil, nanoemulsi, atomisasi, ukuran partikel, zeta potensial*



Copyright © 2020 The author(s). You are free to : **Share** (copy and redistribute the material in any medium or format) and **Adapt** (remix, transform, and build upon the material) under the following terms: **Attribution** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use; **NonCommercial** — You may not use the material for commercial purposes; **ShareAlike** — If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original. Content from this work may be used under the terms of the a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\) License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

<https://doi.org/10.36490/journal-jps.com.v9i2.1547>

Article History:

Received: 09/04/2026,
Revised: 07/06/2026
Accepted: 07/06/2026,
Available Online: 16/06/2026.

QR access this Article



Pendahuluan

Selama bertahun-tahun, produk parfum banyak bergantung pada formula yang berbasis alkohol. Namun tren konsumen mulai berubah seiring meningkatnya perhatian terhadap isu kesehatan dan keberlanjutan lingkungan. Hal ini membuat parfum berbahan dasar air semakin populer sebagai pilihan yang dinilai lebih aman dan ramah tubuh [2]. Penggunaan air sebagai pelarut utama memberikan sejumlah kelebihan, seperti mengurangi kemungkinan iritasi, rasa kering pada kulit, serta reaksi alergi yang sering muncul akibat kandungan alkohol. Tantangan utama dari pengembangan parfum berbasis air adalah bagaimana menstabilkan minyak atsiri yang secara alami mudah menguap dan sulit bercampur dengan air. Oleh karena itu, teknik pembentukan nanopartikel menjadi langkah penting. Dengan mengubah minyak atsiri termasuk minyak atsiri Gardenia menjadi partikel berukuran nano, penyebarannya di dalam air dapat berlangsung lebih merata dan stabil. Hasilnya adalah parfum yang tetap homogen, tidak mudah terpisah, dan lebih nyaman digunakan.

Minyak atsiri gardenia dikenal memiliki aroma yang lembut dan menenangkan, sehingga sangat diminati untuk produk kecantikan dan aromaterapi. Namun, karena bersifat hidrofobik, minyak ini sulit diformulasikan dalam sistem berbasis air tanpa bantuan bahan pendukung. Agar minyak atsiri dapat stabil ketika berada dalam medium berair, diperlukan suatu polimer yang mampu membungkus dan mempertahankan dispersi partikel dalam ukuran nano. Salah satu bahan yang efektif untuk tujuan tersebut adalah PEG-40 Hydrogenated Castor Oil (PEG-40 HCO). Surfaktan non-ionik ini mempunyai biokompatibilitas yang baik, tingkat toksisitas yang rendah, dan kemampuan tinggi dalam menurunkan tegangan antarmuka serta meningkatkan kelarutan minyak [3]. Dibandingkan dengan bahan lain seperti PVA atau kitosan, PEG-40 HCO lebih unggul karena dapat membentuk struktur misel yang stabil dan memberikan perlindungan sterik sehingga partikel tidak mudah menggumpal. Selain itu, polimer ini membantu minyak atsiri menyebar secara merata dalam air tanpa menyebabkan perubahan signifikan pada karakter aromanya. Stabilitas tersebut menjadi faktor penting agar nanopartikel tetap terjaga kualitasnya selama penyimpanan maupun penggunaan, sehingga produk parfum berbasis air dapat mempertahankan performa dan efektivitasnya.

Beragam metode telah digunakan untuk menghasilkan nanopartikel, namun pendekatan atomisasi memberikan sejumlah kelebihan ketika diaplikasikan pada pembuatan nanopartikel dari minyak atsiri. Pada proses ini, larutan prekursor diubah menjadi droplet berukuran sangat kecil yang kemudian dapat berinteraksi dengan polimer pelapis, sehingga membentuk partikel nano yang stabil dan seragam. Cara kerja yang memadukan pembentukan semprotan halus dengan proses penyalutan inilah yang membuat atomisasi menjadi salah satu teknik yang efektif dan efisien untuk sistem berbasis minyak atsiri [4]. Keunggulan utama teknik atomisasi dibandingkan metode lain, seperti emulsifikasi atau presipitasi, adalah kemampuannya untuk mengontrol ukuran partikel dengan presisi tinggi, produksi berskala besar yang efisien, dan potensi untuk menghindari penggunaan pelarut organik yang berlebihan, menjadikannya metode yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, teknik atomisasi dapat menghasilkan partikel dengan distribusi ukuran yang sempit, yang sangat penting untuk aplikasi parfum karena ukuran partikel mempengaruhi stabilitas, penampilan, dan bahkan sensasi produk saat diaplikasikan.

Meskipun demikian, penelitian tentang pengaruh konsentrasi minyak atsiri terhadap karakteristik nanopartikel masih terbatas, terutama dalam konteks sistem PEG-40 HCO dan sintesis atomisasi. Sebagian besar studi yang ada berfokus pada jenis minyak atsiri yang berbeda atau menggunakan polimer pelindung dan metode sintesis yang berbeda [5,6]. Dari studi literatur yang kami lakukan, sintesis nanopartikel minyak

atsiri gardenia menggunakan lapisan pelindung polimer PEG-40 Hydrogenated Castor Oil dan studi karakteristiknya, belum ada dilaporkan.

Di dasarkan pada hasil identifikasi kesenjangan di atas, masalah utama yang ingin dipecahkan dalam penelitian ini adalah bagaimana variasi konsentrasi minyak atsiri Gardenia selama sintesis nanopartikel menggunakan PEG-40 HCO dan teknik atomisasi memengaruhi karakteristiknya yang mencakup distribusi diameter, indeks polidispersitas, dan diameter rata-rata, serta sifat listriknya yang mencakup distribusi mobilitas elektroporetik, mobilitas elektroporetik rata-rata, dan potensial zeta. Pemahaman mendalam tentang hubungan ini sangat penting untuk mengoptimalkan formulasi nanopartikel minyak atsiri Gardenia yang stabil dan efektif untuk aplikasi parfum berbasis air.

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mensintesis nanopartikel minyak atsiri gardenia menggunakan polimer PEG-40 HCO sebagai lapisan pelindung melalui teknik atomisasi, serta untuk menyelidiki pengaruh konsentrasi minyak atsiri gardenia terhadap karakteristiknya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengembangan parfum berbasis air yang inovatif, sehat, dan stabil, berkontribusi pada kemajuan di bidang nanoteknologi kosmetik dan aromaterapi.

Metode Penelitian

Bahan

Penelitian ini memanfaatkan tiga jenis material utama, yaitu: (1) minyak atsiri gardenia, (2) surfaktan PEG-40 Hydrogenated Castor Oil (PEG-40 HCO), dan (3) air destilasi. PEG-40 HCO diperoleh dari Merck KGaA, Jerman, sedangkan minyak atsiri gardenia diperoleh dari C.V. Mikaya Makmur Sejahtera, Surabaya, Indonesia. Seluruh bahan digunakan sebagaimana adanya tanpa proses pemurnian atau perlakuan lanjutan.

Penyiapan prekursor minyak atsiri gardenia

Pada tahap ini disiapkan empat variasi konsentrasi minyak atsiri gardenia. Masing-masing volume minyak atsiri: 4, 6, 8, dan 10 mL dicampurkan dengan 1 mL PEG-40 HCO. Campuran kemudian dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan 100 rpm selama 30 menit dalam kondisi suhu ruang, hingga diperoleh prekursor dengan konsistensi campuran yang seragam.

Pencampuran prekursor minyak atsiri gardenia dengan air

Setiap prekursor yang sudah homogen dituangkan ke dalam 80 mL air destilasi. Selanjutnya proses homogenisasi kembali dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 100 rpm selama 60 menit pada suhu ruang. Setelah mencapai homogenitas yang stabil, masing-masing campuran disiapkan untuk proses atomisasi.

Atomisasi

Campuran prekursor minyak atsiri Gardenia dan air yang telah dipra-emulsifikasi kemudian diproses melalui tahap atomisasi untuk menghasilkan sistem nanoemulsi. Produk yang diharapkan berupa nanopartikel minyak atsiri gardenia yang terdispersi dalam air dan terdifusi oleh PEG-40 HCO. Proses atomisasi menggunakan alat bertipe pressure atomizer dengan nozzle pressure-swirl sebagaimana digambarkan pada gambar 1.

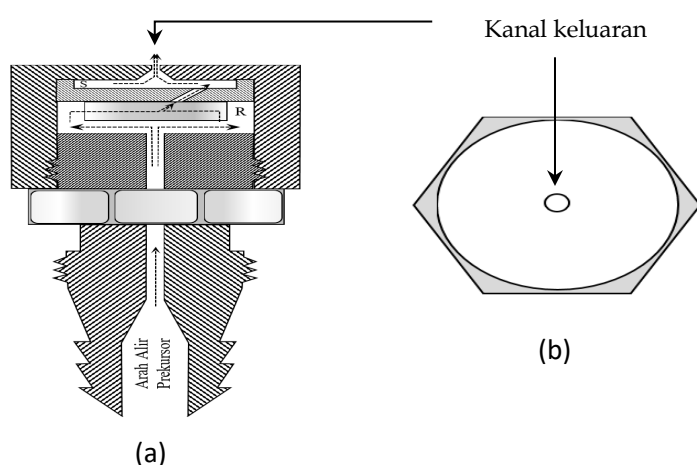
Cairan prekursor dialirkan masuk ke dalam nosel dengan bantuan tekanan, kemudian fluida tersebut memasuki ruang R dan mulai mengalami proses sirkulasi internal. Setelah itu, cairan bergerak dari ruang R menuju ruang S, di mana proses sirkulasi kembali terjadi. Mekanisme sirkulasi bertingkat ini berfungsi untuk mempertahankan konsistensi homogen dari campuran bahan yang terdapat dalam prekursor, sehingga tidak terjadi pengendapan atau pemisahan komponen selama tahap atomisasi berlangsung. Ketika prekursor berada di ruang S, sebagian cairan terdorong keluar melalui lubang nosel melalui kanal keluaran yang berdiameter sangat kecil. Desain nosel pada penelitian ini memiliki dimensi ruang R dengan tinggi 7 mm dan diameter 3 mm, sementara ruang S memiliki tinggi 5 mm dan diameter 2 mm. Kanal keluaran nosel itu sendiri memiliki diameter bukaan sebesar 0,5 mm.

Pada saat fluida prekursor keluar dari nosel, aliran cairan berada dalam kondisi bergerak cepat sambil melewati saluran sempit tersebut. Tekanan internal yang dipadukan dengan diameter kanal yang kecil menyebabkan cairan terpecah menjadi semburan aerosol yang terdiri dari droplet berukuran sangat halus dan menyebar secara merata di luar nosel. Droplet-dropped kecil ini kemudian mengalami interaksi fisik

berupa gesekan dan tumbukan dengan udara di sekitarnya, sehingga ukuran droplet terus menurun menjadi lebih kecil. Proses fragmentasi ini berlangsung secara berkesinambungan hingga ukuran tertentu tercapai, yang dikenal sebagai ukuran kritis droplet.

Pada penelitian ini, proses atomisasi berperan sebagai tahap utama dalam pembentukan droplet berukuran kecil. Gaya geser, turbulensi, dan fragmentasi yang terjadi ketika prekursor melewati nosel berdiameter sempit menyebabkan pemecahan droplet secara berulang sehingga menghasilkan distribusi ukuran yang lebih kecil. Oleh karena itu, pembentukan sistem nanoemulsi pada penelitian ini diduga lebih banyak dipengaruhi oleh proses atomisasi dibandingkan tahap pengadukan awal menggunakan magnetic stirrer yang berfungsi sebagai tahap pra-emulsifikasi.

Pada saat ukuran kritis ini terbentuk, molekul surfaktan PEG-40 HCO yang terdapat dalam sistem mulai mengelilingi dan membentuk lapisan pada permukaan droplet minyak atsiri gardenia. Tahapan ini menghasilkan struktur nanopartikel dengan ukuran berada pada rentang nanometer, serta memberikan stabilitas dispersi dalam medium air. Droplet nanopartikel minyak atsiri gardenia yang telah terlapis PEG-40 HCO tersebut kemudian ditangkap menggunakan wadah kaca berbentuk bola dengan diameter 30 cm agar tidak hilang atau tersebar ke lingkungan. Seluruh proses atomisasi berlangsung dengan laju alir prekursor melalui nosel sebesar 25 mL/menit pada tekanan operasi 3 bar.



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

Karakterisasi

Nanopartikel minyak atsiri gardenia yang telah terbentuk dan terlapis oleh polimer PEG-40 HCO serta terdispersi secara stabil dalam medium air kemudian melalui tahap karakterisasi. Proses karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui sifat fisik dan kestabilan nanopartikel yang dihasilkan. Parameter yang dianalisis meliputi: (1) ukuran rata-rata diameter partikel, (2) indeks polidispersitas yang menggambarkan distribusi ukuran partikel dalam sistem, (3) nilai mobilitas elektroporetik yang berkaitan dengan pergerakan partikel dalam medan listrik, dan (4) nilai potensial zeta yang digunakan sebagai indikator stabilitas koloid. Seluruh pengukuran tersebut dilakukan menggunakan perangkat Particle Size Analyzer (PSA) dengan model HORIBA SZ-100 (Japan)

Hasil Dan Pembahasan

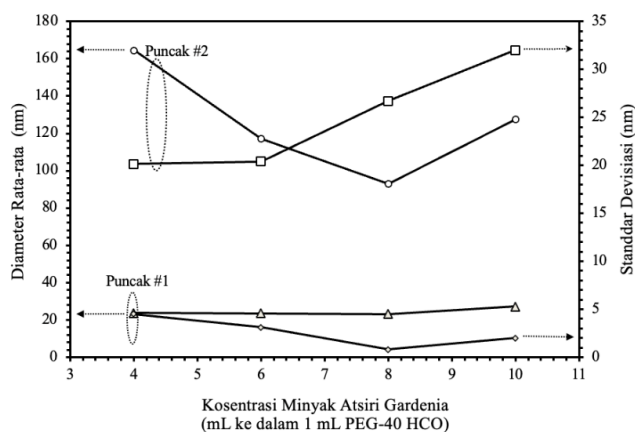
Pengaruh konsentrasi minyak atsiri Gardenia terhadap diameter rata-rata droplet nanoemulsi

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap pengaruh variasi konsentrasi minyak atsiri gardenia terhadap ukuran nanopartikel yang dihasilkan melalui proses nanoemulsifikasi menggunakan PEG-40 HCO sebagai surfaktan. Empat variasi konsentrasi minyak atsiri digunakan, yaitu 4 mL, 6 mL, 8 mL, dan 10 mL dalam 80 mL air. Hasil pengukuran menggunakan alat analisis distribusi ukuran partikel menunjukkan bahwa pada setiap konsentrasi terbentuk dua puncak distribusi ukuran partikel, yang mengindikasikan adanya distribusi bimodal dalam sistem (Gambar 3). Data lengkap diameter rata-rata dan simpangan baku dari masing-masing puncak dapat dilihat pada Tabel 1.

Pada konsentrasi 4 mL, diameter rata-rata nanopartikel pada Puncak 1 adalah 23,7 nm dengan standar deviasi 4,5 nm, sedangkan pada Puncak 2 diameternya mencapai 103,5 nm dengan standar deviasi 32 nm. Untuk konsentrasi 6 mL, diameter Puncak 1 adalah 23,5 nm (SD 3,1 nm), dan Puncak 2 sebesar 105 nm (SD 22,8 nm). Selanjutnya, pada konsentrasi 8 mL, diameter Puncak 1 sedikit menurun menjadi 23,1 nm (SD 0,8 nm), sementara Puncak 2 meningkat menjadi 137,4 nm (SD 18,1 nm). Terakhir, pada konsentrasi tertinggi yaitu 10 mL, diameter Puncak 1 mengalami peningkatan menjadi 27,1 nm (SD 2 nm), sedangkan Puncak 2 naik lebih lanjut hingga 164,7 nm dengan standar deviasi 24,8 nm (Tabel 1)

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

Konsentrasi Minyak Atsiri Gardenia (mL di dalam 80 mL Air)	Puncak #1		Puncak #2	
	Diameter Rata-rata (nm)	Standar Deviasi (nm)	Diameter Rata-rata (nm)	Standar Deviasi (nm)
4	23,7	4,5	103,5	32
6	23,5	3,1	105	22,8
8	23,1	0,8	137,4	18,1
10	27,1	2	164,7	24,8



Gambar 2. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri gardenia yang digunakan saat sintesis dengan besar diameter rata-rata dan standar deviasi (nm) nanopartikel yang dihasilkan.

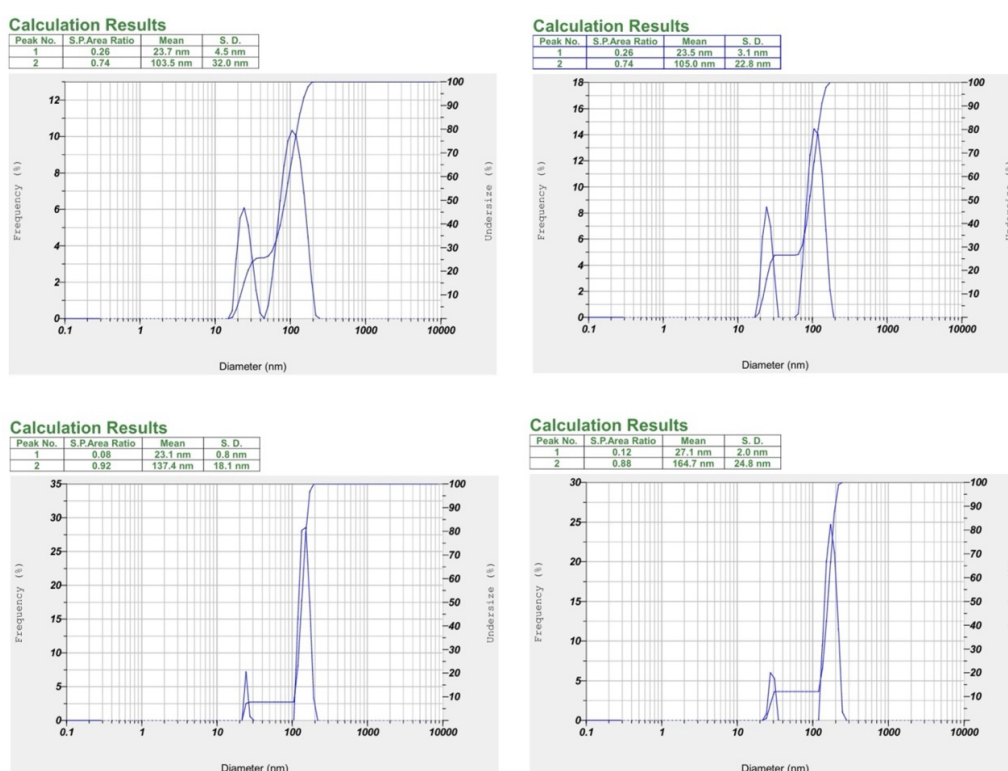
Puncak pertama memiliki diameter rata-rata yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan Puncak kedua. Secara teoritis, hubungan antara konsentrasi minyak atsiri dan diameter rata-rata nanopartikel pada sistem nanoemulsi sangat kompleks dan multifaktorial. Peningkatan konsentrasi fase terdispersi (minyak atsiri) dapat menyebabkan peningkatan frekuensi tumbukan antar tetesan, yang berpotensi mendorong koalesensi dan menghasilkan ukuran partikel yang lebih besar. Namun, keberadaan agen pengemulsi seperti PEG-40 HCO berperan penting dalam pembentukan dan dispersi tetesan minyak, sehingga berpotensi menghambat pertumbuhan ukuran partikel, termasuk pada konsentrasi minyak yang lebih tinggi [7]. Keseimbangan antara energi yang dibutuhkan untuk membentuk antarmuka dan energi yang disediakan oleh input energi (misalnya, sonikasi atau homogenisasi), serta stabilisasi sterik atau elektrostatis yang diberikan oleh surfaktan, menentukan ukuran akhir nanopartikel yang terbentuk [8].

Pada data Puncak 1 (Tabel 1), diameter rata-rata nanopartikel menunjukkan tren yang relatif stabil pada konsentrasi rendah (4 mL dan 6 mL), dengan nilai masing-masing 23,7 nm dan 23,5 nm, diikuti oleh sedikit penurunan pada 8 mL (23,1 nm), dan kemudian peningkatan yang signifikan pada 10 mL (27,1 nm). Fenomena ini dapat dijelaskan oleh peran molekul PEG-40 HCO sebagai agen penstabil. PEG-40 HCO merupakan surfaktan non-ionik yang memiliki bagian hidrofilik (rantai polietilen glikol) dan bagian lipofilik (turunan minyak jarak terhidrogenasi) [9].

Pada konsentrasi minyak atsiri yang lebih rendah (4–8 mL), jumlah molekul PEG-40 HCO diduga cukup untuk mengadsorpsi pada antarmuka tetesan minyak-air dan membentuk lapisan sterik di sekitar tetesan. Keberadaan lapisan sterik tersebut berpotensi mengurangi interaksi antar tetesan minyak sehingga ukuran partikel yang terbentuk cenderung tetap berada pada rentang yang relatif kecil. Mekanisme stabilisasi sterik melibatkan interaksi repulsif antara rantai polimer yang terentang, yang mencegah tetesan mendekat

terlalu dekat dan bergabung [10]. Namun, pada konsentrasi minyak yang lebih tinggi (10 mL), peningkatan ukuran Puncak 1 mengindikasikan bahwa rasio surfaktan terhadap minyak mulai menjadi kurang optimal atau terjadi pembentukan agregat dengan ukuran yang lebih besar yang tidak seluruhnya terlapisi oleh PEG-40 HCO.

Untuk Puncak 2, terlihat tren peningkatan ukuran nanopartikel yang cukup konsisten dengan bertambahnya konsentrasi minyak (Tabel 1). Diameter rata-rata meningkat dari 103,5 nm (4 mL) menjadi 164,7 nm (10 mL). Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan keterbatasan jumlah surfaktan yang tersedia per unit luas antarmuka, terutama saat jumlah minyak meningkat tetapi jumlah surfaktan tetap konstan (1 mL). Akibatnya, kemampuan surfaktan untuk melapisi seluruh luas antarmuka minyak-air diduga menjadi lebih terbatas, sehingga memungkinkan terbentuknya tetesan dengan ukuran yang lebih besar atau meningkatnya interaksi antar tetesan selama proses emulsifikasi [11]. Selain itu, peningkatan konsentrasi fase minyak dapat meningkatkan viskositas sistem, yang menghambat efisiensi pemecahan tetesan saat emulsifikasi. Proses nanoemulsi sangat bergantung pada input energi tinggi untuk mengatasi tegangan antarmuka, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan Young–Laplace ($\Delta P = 2\gamma/r$), di mana ΔP adalah perbedaan tekanan, γ adalah tegangan antarmuka, dan r adalah jari-jari tetesan [11].



Gambar 3. Menyajikan nilai diameter rata-rata (nm) dan standar deviasi (SD) dari nanopartikel minyak atsiri gardenia yang dihasilkan melalui proses enkapsulasi menggunakan PEG-40 HCO. Sintesis dilakukan dengan penambahan minyak atsiri sebanyak 4 mL, 6 mL, 8 mL, dan 10 mL ke dalam 1 mL polimer PEG-40 HCO. Pengaruh konsentrasi minyak atsiri gardenia terhadap indeks nolidispersitas nanopartikelnya.

Distribusi bimodal yang terlihat pada seluruh sampel (Gambar 3) menunjukkan adanya dua populasi partikel: Puncak 1 kemungkinan mewakili populasi partikel dengan ukuran lebih kecil yang terbentuk selama proses emulsifikasi, sedangkan Puncak 2 menunjukkan populasi partikel berukuran lebih besar yang dapat berkaitan dengan proses pertumbuhan tetesan atau interaksi antarpartikel selama pembentukan nanoemulsi. Hal ini sesuai dengan temuan Ghayempour dan Gharekhani [12], yang menyatakan bahwa rasio surfaktan-minyak yang optimal sangat penting untuk menghasilkan nanoemulsi dengan distribusi ukuran partikel yang baik dan karakteristik fisik yang sesuai. Jika rasio tidak optimal, agregasi dan koalesensi cenderung meningkat, menyebabkan distribusi ukuran partikel menjadi lebih luas atau bimodal [13]. PEG-40 HCO, sebagai surfaktan non-ionik dengan nilai HLB sekitar 16, sangat sesuai untuk sistem emulsi minyak-dalam-air seperti ini. Kemampuannya membentuk lapisan sterik di sekitar tetesan minyak diduga berperan dalam proses pembentukan dan dispersi partikel selama nanoemulsifikasi. Namun, hasil pada Puncak 2 mengindikasikan bahwa pada konsentrasi minyak yang lebih tinggi, rasio surfaktan terhadap minyak yang

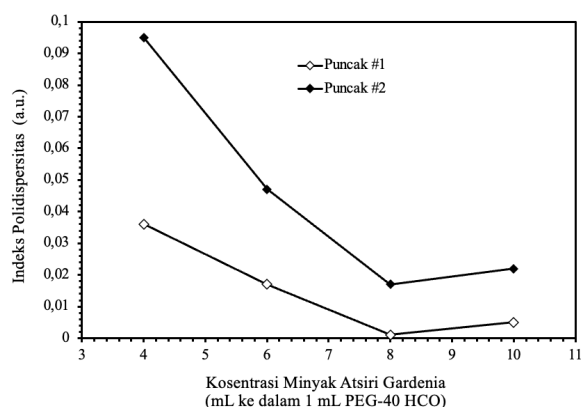
digunakan dalam penelitian ini mulai menunjukkan keterbatasan dalam menghasilkan partikel berukuran kecil secara konsisten. Oleh karena itu, optimasi rasio surfaktan terhadap minyak maupun metode emulsifikasi masih diperlukan pada penelitian selanjutnya.

Selain diameter rata-rata nanopartikel, parameter penting lainnya yang dianalisis dalam penelitian ini adalah Indeks Polidispersitas (PDI). Pengukuran PDI dilakukan terhadap dua puncak distribusi partikel (Puncak 1 dan Puncak 2) pada masing-masing variasi konsentrasi minyak atsiri Gardenia, yaitu 4 mL, 6 mL, 8 mL, dan 10 mL per 80 mL air. Pada Puncak 1, nilai PDI menunjukkan penurunan bertahap dari 0,036 pada konsentrasi 4 mL menjadi 0,017 pada 6 mL, dan mencapai nilai terendah sebesar 0,001 pada konsentrasi 8 mL. Meskipun terjadi sedikit kenaikan menjadi 0,005 pada 10 mL, nilai tersebut masih tergolong rendah. Namun demikian, karena seluruh sampel menunjukkan dua puncak distribusi ukuran partikel, interpretasi nilai PDI perlu dilakukan secara hati-hati dan tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menyatakan keseragaman sistem. Sementara itu, Puncak 2 memiliki nilai PDI yang lebih tinggi dibandingkan Puncak 1, namun tetap menunjukkan tren penurunan, dari 0,095 pada 4 mL menjadi 0,047 pada 6 mL, kemudian turun menjadi 0,017 pada 8 mL, dan sedikit meningkat menjadi 0,022 pada 10 mL.

Indeks Polidispersitas (PDI) merupakan parameter yang umum digunakan untuk menggambarkan lebar distribusi ukuran partikel dalam suatu sampel. Nilai PDI berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih rendah umumnya menunjukkan distribusi ukuran yang lebih sempit, sedangkan nilai yang lebih tinggi menunjukkan distribusi ukuran yang lebih lebar. Namun, pada sistem yang menunjukkan distribusi ukuran bimodal atau multimodal, satu nilai PDI tidak selalu dapat merepresentasikan keseluruhan karakteristik distribusi partikel karena metode cumulant analysis pada dasarnya dikembangkan untuk distribusi monomodal. Oleh karena itu, pada penelitian ini karakteristik distribusi ukuran partikel dievaluasi berdasarkan diameter rata-rata dan standar deviasi masing-masing puncak distribusi yang teramati.

Tabel 2. Menampilkan nilai indeks polidispersitas (a.u.) dari nanopartikel minyak atsiri gardenia yang diformulasikan dengan PEG-40 HCO. Sintesis dilakukan dengan menggunakan empat tingkat konsentrasi minyak atsiri yang berbeda

Konsentrasi (mL/80 mL Air)	Indeks Polidispersitas Minyak Atsiri Gardenia (Puncak 1, PDI)	Indeks Polidispersitas Minyak Atsiri Gardenia (Puncak 2, PDI)
4	0,036	0,095
6	0,017	0,047
8	0,001	0,017
10	0,005	0,022



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

Pada Puncak 1, yang merepresentasikan nanopartikel dengan diameter rata-rata lebih kecil, nilai PDI menunjukkan tren penurunan yang signifikan seiring dengan peningkatan konsentrasi minyak atsiri dari 4 mL hingga 8 mL, yaitu dari 0,036 menjadi 0,001. Penurunan PDI ini menunjukkan kecenderungan penyempitan distribusi ukuran partikel pada Puncak 1 seiring dengan peningkatan konsentrasi minyak hingga 8 mL. Namun, interpretasi tersebut perlu dilakukan secara hati-hati karena sistem menunjukkan distribusi ukuran partikel bimodal. Nilai PDI 0,001 pada konsentrasi 8 mL menunjukkan distribusi ukuran yang relatif sempit. Akan tetapi, keberadaan dua puncak distribusi mengindikasikan bahwa sistem bersifat

bimodal sehingga tidak dapat dikategorikan sebagai sistem monodispers. Hasil ini mengindikasikan bahwa PEG-40 HCO kemungkinan berperan dalam mempertahankan dispersi tetesan minyak selama proses nanoemulsifikasi pada konsentrasi minyak atsiri yang lebih rendah dan menengah. Keberadaan molekul PEG-40 HCO di antarmuka minyak-air berperan penting dalam mengurangi tegangan antarmuka dan menciptakan lapisan pelindung sterik yang mencegah tetesan berinteraksi dan bergabung [13]. Nilai PDI yang rendah menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel pada masing-masing puncak relatif sempit. Akan tetapi, karena sistem menunjukkan distribusi bimodal, hasil ini tidak dapat digunakan sebagai dasar untuk mengategorikan sistem sebagai monodispers.

Puncak 2, yang mewakili nanopartikel dengan diameter rata-rata yang lebih besar, juga menunjukkan tren penurunan PDI seiring peningkatan konsentrasi minyak atsiri. Pada konsentrasi 4 mL, PDI adalah 0,095, kemudian menurun menjadi 0,047 pada 6 mL, 0,017 pada 8 mL, dan 0,022 pada 10 mL. Meskipun nilai PDI pada Puncak 2 cenderung lebih tinggi daripada Puncak 1 pada konsentrasi yang sama (misalnya, 0,095 vs 0,036 pada 4 mL), tren penurunannya menunjukkan kecenderungan penyempitan rentang distribusi ukuran partikel pada Puncak 2. Penurunan PDI pada Puncak 2 menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel pada populasi partikel yang lebih besar cenderung menjadi lebih sempit hingga konsentrasi 8 mL. Nilai PDI di bawah 0,1 umumnya menunjukkan distribusi ukuran yang relatif sempit. Namun, pada sistem dengan distribusi ukuran bimodal, parameter ini tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk mengevaluasi karakteristik keseluruhan distribusi partikel [14]. Peningkatan PDI sedikit pada 10 mL (0,022) dibandingkan 8 mL (0,017) pada Puncak 2, serupa dengan Puncak 1, mungkin menunjukkan adanya batasan efektivitas stabilisasi atau homogenisasi pada konsentrasi minyak yang sangat tinggi, meskipun nilai PDI secara keseluruhan masih sangat baik.

Secara umum, nilai PDI yang rendah pada kedua puncak mengindikasikan keberhasilan formulasi nanoemulsi dengan distribusi ukuran partikel yang relatif sempit. Peran PEG-40 HCO sebagai surfaktan non-ionik sangat krusial dalam mencapai PDI yang rendah. Molekul PEG-40 HCO bekerja dengan mengurangi tegangan antarmuka minyak-air, sehingga energi yang dibutuhkan untuk membentuk tetesan kecil menjadi lebih rendah. Selain itu, bagian hidrofilik dari PEG-40 HCO (rantai polietilen glikol) membentuk lapisan sterik yang kuat di sekitar tetesan minyak, mencegah koalesensi dan aglomerasi [11]. Karakteristik yang diperoleh mengindikasikan bahwa PEG-40 HCO berperan dalam pembentukan dan dispersi partikel selama proses nanoemulsifikasi. Bahkan pada konsentrasi minyak yang lebih tinggi, PEG-40 HCO masih mampu mempertahankan PDI yang rendah, meskipun pada Puncak 2 diameter partikelnya lebih besar. Ini mungkin menunjukkan bahwa, meskipun ada populasi partikel yang lebih besar (Puncak 2), distribusi ukuran dalam populasi tersebut masih tetap sempit, yang merupakan indikator formulasi yang baik.

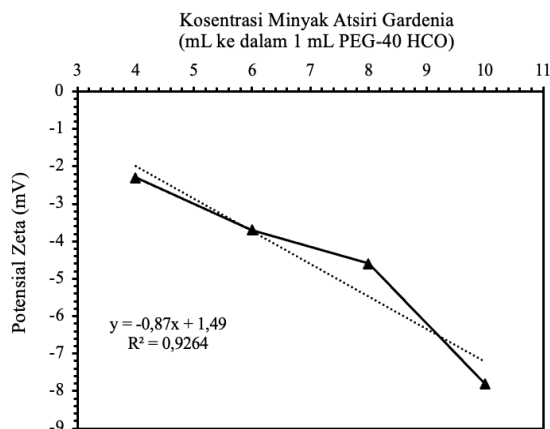
Secara umum, hasil analisis PDI menunjukkan bahwa masing-masing puncak distribusi memiliki rentang ukuran partikel yang relatif sempit. Namun, karena seluruh sampel menunjukkan distribusi ukuran partikel bimodal, evaluasi karakteristik sistem tidak dapat didasarkan pada nilai PDI saja, melainkan perlu mempertimbangkan diameter rata-rata dan standar deviasi masing-masing puncak distribusi. Hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa PEG-40 HCO berperan dalam proses pembentukan dan dispersi partikel selama nanoemulsifikasi minyak atsiri Gardenia.

Pengaruh konsentrasi minyak atsiri Gardenia terhadap potensial zeta nanoemulsi

Dalam penelitian ini, salah satu parameter penting yang diamati adalah nilai zeta potensial dari sistem nanoemulsi minyak atsiri Gardenia yang diformulasikan dengan PEG-40 HCO sebagai surfaktan non-ionik. Parameter ini dipilih karena memiliki peran penting dalam menentukan stabilitas fisik dari sistem koloid, terutama dalam aplikasi sediaan parfum berbasis nanoemulsi. Pengukuran dilakukan pada empat variasi konsentrasi minyak atsiri, yaitu 4 mL, 6 mL, 8 mL, dan 10 mL dalam 80 mL air, untuk melihat pengaruh peningkatan konsentrasi terhadap perubahan muatan permukaan partikel dalam sistem. Data hasil pengukuran tersebut ditampilkan pada Tabel 3 dan visualisasinya ditunjukkan pada Gambar 6(a-d). Zeta potensial adalah ukuran potensial listrik pada bidang geser partikel dalam suspensi, dan merupakan indikator kunci stabilitas koloid. Nilai zeta potensial yang tinggi, baik bernilai positif maupun negatif, mengindikasikan adanya gaya tolak-menolak elektrostatik yang kuat antar partikel. Gaya ini berperan penting dalam mencegah terjadinya agregasi dan koalesensi, sehingga secara langsung meningkatkan stabilitas sistem dispersi. Sebaliknya, nilai zeta potensial yang mendekati nol menunjukkan lemahnya tolakan elektrostatik, yang dapat menyebabkan kecenderungan partikel untuk saling mendekat dan membentuk agregat, serta berdampak pada ketidakstabilan sistem.

Tabel 3. Besar mobilitas elektroporetik (cm²/Vs) dan potensial zeta (mV) nanopartikel minyak atsiri gardenia yang dikapsulasi polimer PEG-40 HCO, yang disintesis menggunakan empat ragam konsentrasi minyak atsiri.

Konsentrasi Minyak Atsiri Gardenia (mL di dalam 80 mL Air)	Mobilitas Elektroporetik (cm ² /Vs)	Potensial Zeta (mV)
4	-0,000017	-2,3
6	-0,000028	-3,7
8	-0,000036	-4,6
10	-0,00006	-7,8



Gambar 5. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri gardenia yang digunakan saat sintesis dengan besar potensial zeta nanopartikel yang dihasilkan.

Seluruh nilai zeta potensial minyak atsiri Gardenia menunjukkan tanda negatif, dan nilainya semakin negatif seiring dengan peningkatan konsentrasi minyak atsiri. Pada konsentrasi 4 mL, zeta potensial tercatat sebesar -2,3 mV dengan mobilitas elektroforetik sebesar -0,000017 cm²/Vs. Nilai ini kemudian menurun menjadi -3,7 mV dengan mobilitas -0,000028 cm²/Vs pada konsentrasi 6 mL, -4,6 mV dengan mobilitas -0,000036 cm²/Vs pada 8 mL, dan mencapai nilai terendah -7,8 mV dengan mobilitas -0,00006 cm²/Vs pada konsentrasi 10 mL pada Gambar 6, sebagaimana terlihat pada Tabel 3.

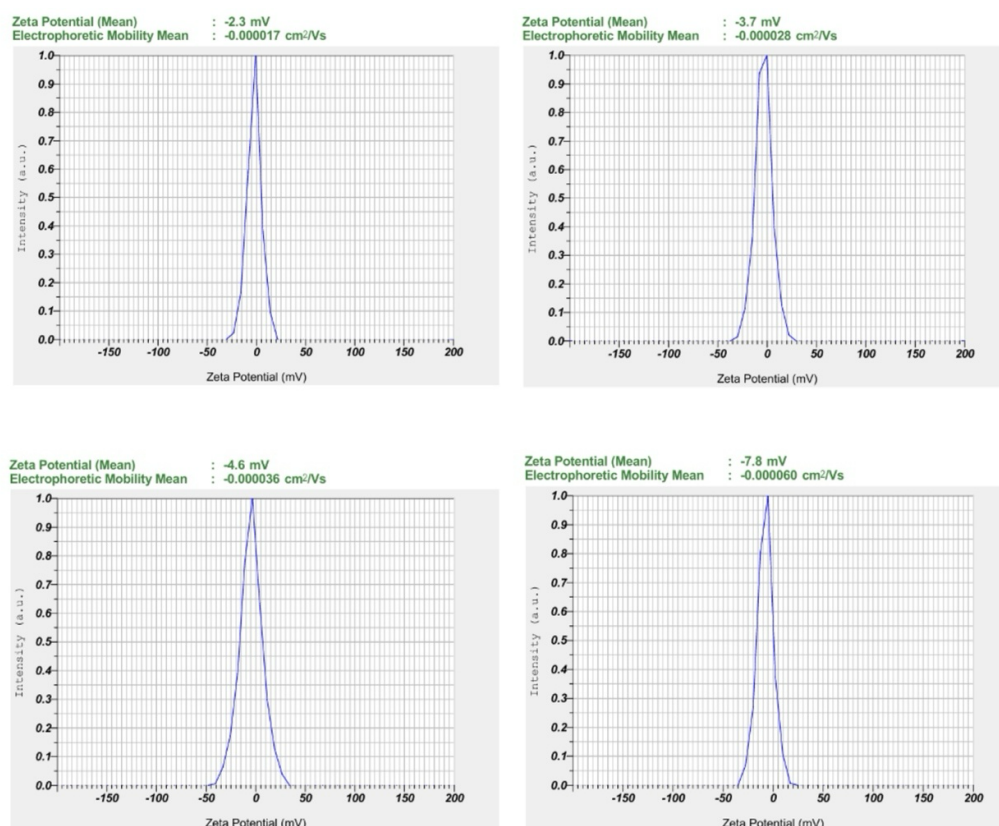
Tren peningkatan nilai zeta potensial negatif ini seiring dengan peningkatan konsentrasi minyak atsiri dapat dianalisis secara mendalam. Umumnya, untuk sistem yang distabilkan terutama oleh surfaktan non-ionik seperti PEG-40 HCO, nilai zeta potensial cenderung mendekati nol karena surfaktan jenis ini tidak membawa muatan listrik. Namun demikian, dalam sistem nanoemulsi, muatan permukaan partikel bisa berasal dari berbagai sumber lain. Misalnya, adsorpsi selektif ion-ion hidroksil dari air, adanya kontaminan ionik dalam komponen minyak atsiri atau air yang digunakan, atau bahkan dari disosiasi gugus fungsional tertentu yang terdapat pada molekul minyak atau polimer, dapat memberikan kontribusi terhadap muatan negatif pada antarmuka. Peningkatan nilai negatif absolut zeta potensial yang terjadi seiring peningkatan konsentrasi minyak atsiri dapat menunjukkan adanya peningkatan muatan bersih negatif pada permukaan partikel, atau bertambahnya jumlah situs bermuatan negatif yang terekspos ke medium.

Meskipun PEG-40 HCO sendiri adalah surfaktan non-ionik dan tidak memberikan kontribusi langsung terhadap muatan, mekanisme stabilisasi utamanya adalah sterik, bukan elektrostatis [15]. Oleh karena itu, nilai zeta potensial yang diamati kemungkinan besar lebih mencerminkan kontribusi kecil dari komponen lain dalam sistem, atau interaksi antara rantai polietilen glikol dengan ion-ion di dalam air, yang dapat menyebabkan terbentuknya muatan permukaan dalam jumlah kecil.

Dalam konteks nanoemulsi, nilai zeta potensial di atas ± 30 mV umumnya dianggap memberikan stabilisasi elektrostatis yang kuat [16]. Pada penelitian ini, nilai zeta potensial yang diperoleh berada pada rentang -2,3 mV hingga -7,8 mV, sehingga menunjukkan bahwa kontribusi stabilisasi elektrostatis pada sistem relatif terbatas. Meskipun PEG-40 HCO merupakan surfaktan non-ionik yang diketahui mampu membentuk lapisan sterik di sekitar tetesan minyak [17], efektivitas mekanisme tersebut terhadap kestabilan jangka panjang sistem belum dapat dikonfirmasi secara langsung karena penelitian ini tidak mencakup pengujian stabilitas selama penyimpanan. Peningkatan nilai negatif zeta potensial seiring bertambahnya konsentrasi minyak atsiri menunjukkan adanya perubahan karakteristik permukaan partikel, namun

kontribusinya terhadap kestabilan sistem masih memerlukan kajian lebih lanjut [18]. Namun demikian, karena nilai zeta potensial yang diperoleh tetap berada di bawah ambang batas yang umumnya digunakan untuk mengindikasikan stabilitas elektrostatis yang tinggi, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kontribusi mekanisme elektrostatis terhadap sistem relatif terbatas. Karakteristik fisik dan elektrokinetik yang diperoleh mengindikasikan bahwa PEG-40 HCO kemungkinan berperan dalam mempertahankan dispersi partikel melalui mekanisme sterik. Akan tetapi, efektivitas mekanisme tersebut terhadap kestabilan jangka panjang sistem masih memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui pengujian stabilitas selama penyimpanan.

Penelitian lebih lanjut mungkin diperlukan untuk mengidentifikasi sumber pasti muatan negatif yang muncul dalam sistem, dan untuk memahami secara lebih dalam bagaimana muatan tersebut berinteraksi dengan mekanisme sterik dalam menentukan kestabilan akhir nanoemulsi. Pendekatan lanjutan seperti spektroskopi permukaan atau pengujian ionik lebih lanjut mungkin diperlukan untuk menjelaskan asal usul muatan tersebut. Namun secara keseluruhan, nilai zeta potensial menunjukkan tren yang semakin negatif seiring peningkatan konsentrasi minyak atsiri. Meskipun nilainya relatif rendah, hasil ini memberikan informasi mengenai karakteristik elektrokinetik sistem nanoemulsi yang terbentuk. Akan tetapi, kestabilan sistem dalam jangka panjang masih memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui pengujian stabilitas selama penyimpanan.



Gambar 6. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri gardenia yang digunakan saat sintesis dengan besar potensial zeta nanopartikel yang dihasilkan

Pengaruh konsentrasi minyak atsiri gardenia terhadap potensial zeta nanopartikelnya

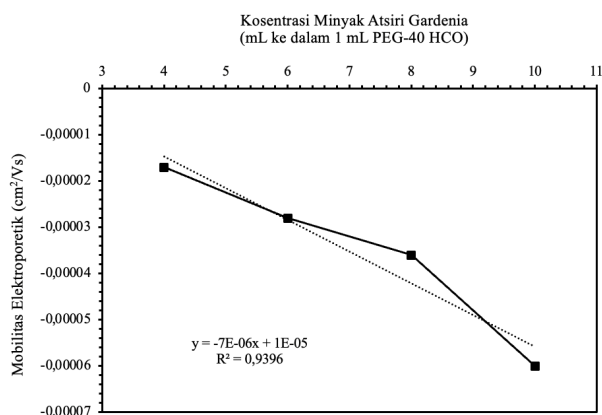
Mobilitas elektroforetik merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi sistem nanoemulsi, karena memberikan informasi mengenai kecepatan gerak partikel bermuatan dalam suatu medan listrik eksternal. Parameter ini berhubungan langsung dengan nilai zeta potensial dan dipengaruhi oleh sifat medium dispersi serta muatan permukaan partikel. Secara teoritis, mobilitas elektroforetik (μ_e) dapat dihitung menggunakan persamaan Henry:

$$\mu_e = \frac{2\varepsilon\zeta f(\kappa a)}{3\eta}$$

Dimana ε adalah permitivitas dielektrik medium, ζ adalah zeta potensial, η adalah viskositas medium, dan $f(\kappa a)$ merupakan fungsi Henry yang bergantung pada produk dari parameter Debye-Hückel (κ) dan jari-jari partikel (a). Untuk sistem nanoemulsi dalam medium dengan kekuatan ionik tinggi, fungsi Henry biasanya mendekati nilai 1,5 (batas Smoluchowski), sehingga persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$\mu_e = \frac{\epsilon \zeta}{\eta}$$

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditampilkan pada Gambar 6 dan dirangkum pada Tabel 3, nilai mobilitas elektroforetik rata-rata nanopartikel minyak atsiri Gardenia menunjukkan nilai negatif pada seluruh konsentrasi yang diuji. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel-partikel dalam sistem nanoemulsi cenderung bermuatan negatif dan bergerak menuju elektroda positif dalam medan listrik.



Gambar 7. Grafik hubungan konsentrasi minyak atsiri gardenia yang digunakan saat sintesis dengan besar mobilitas elektroforetik nanopartikel yang dihasilkan

Pada konsentrasi 4 mL minyak atsiri per 80 mL air, nilai mobilitas elektroforetik tercatat sebesar $-0,000017 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dengan nilai zeta potensial $-2,3 \text{ mV}$ (Gambar 6a). Ketika konsentrasi ditingkatkan menjadi 6 mL dan 8 mL, nilai mobilitas elektroforetik meningkat secara absolut menjadi $-0,000028 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ($-3,7 \text{ mV}$) dan $-0,000036 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ($-4,6 \text{ mV}$) (Gambar 6b–6c). Peningkatan nilai absolut mobilitas elektroforetik dari 4 hingga 8 mL menunjukkan adanya peningkatan muatan negatif efektif pada permukaan partikel. Fenomena ini sejalan dengan tren pada nilai zeta potensial yang juga semakin negatif. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai akibat dari peningkatan jumlah gugus bermuatan negatif yang terekspos di permukaan partikel, baik melalui senyawa aktif dalam minyak atsiri maupun perubahan struktur sterik dari surfaktan PEG-40 HCO

Meskipun PEG-40 HCO sebagai surfaktan non-ionik diketahui mampu memberikan mekanisme stabilisasi sterik, peran mekanisme tersebut dalam sistem yang diteliti belum dapat dikonfirmasi secara langsung karena penelitian ini tidak mencakup pengujian stabilitas selama penyimpanan. Namun demikian, kemungkinan adanya interaksi elektrostatis tetap dapat terjadi. Salah satunya adalah melalui adsorpsi ion hidroksil dari air atau keberadaan gugus polar dari senyawa-senyawa minor dalam minyak atsiri Gardenia. Penambahan konsentrasi minyak atsiri juga mungkin menyebabkan pengemulsi tersaturasi atau mengalami reorientasi, sehingga muatan pada permukaan lebih terekspos [19]. Namun demikian, pada konsentrasi 10 mL, nilai mobilitas elektroforetik mengalami penurunan absolut secara signifikan menjadi $-0,000060 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, sementara nilai zeta potensial justru meningkat lebih negatif menjadi $-7,8 \text{ mV}$ (Gambar 6d). Secara teoritis, nilai zeta potensial yang semakin negatif seharusnya disertai peningkatan mobilitas elektroforetik. Ketidaksiharian ini menunjukkan bahwa faktor lain memengaruhi pergerakan partikel dalam medan listrik. Selain itu, nilai zeta potensial yang diperoleh pada penelitian ini berada pada rentang yang relatif rendah ($-2,3$ hingga $-7,8 \text{ mV}$), sehingga belum dapat digunakan sebagai bukti langsung kestabilan sistem dalam jangka panjang [20]. Oleh karena itu, interpretasi mengenai mekanisme stabilisasi sistem pada penelitian ini dibatasi pada hasil karakterisasi ukuran partikel, mobilitas elektroforetik, dan zeta potensial yang diperoleh. Pengujian stabilitas selama penyimpanan masih diperlukan untuk mengevaluasi kestabilan fisik nanoemulsi secara lebih komprehensif.

Salah satu penjelasan yang mungkin adalah peningkatan viskositas sistem pada konsentrasi minyak atsiri yang tinggi. Sesuai dengan persamaan Smoluchowski, viskositas (η) berada di penyebut persamaan mobilitas elektroforetik, sehingga semakin tinggi viskositas medium, maka nilai μ_e akan semakin kecil, meskipun nilai ζ meningkat. Kemungkinan lainnya adalah terbentuknya agregat atau struktur partikel yang lebih kompleks pada konsentrasi tinggi, seperti yang terlihat dari distribusi ukuran partikel di mana muncul puncak kedua pada konsentrasi 10 mL dengan diameter rata-rata sekitar 164,7 nm. Kehadiran fraksi partikel yang lebih besar dapat meningkatkan hambatan hidrodinamik terhadap gerakan partikel, sehingga menurunkan nilai mobilitas elektroforetik secara keseluruhan [20]. Faktor tambahan yang juga perlu

diperhatikan adalah saturasi permukaan partikel oleh surfaktan pada konsentrasi tinggi, yang dapat menyebabkan desorpsi sebagian dari molekul PEG-40 HCO atau perubahan pada konformasi lapisan sterik, sehingga berpotensi menurunkan efektivitas gerakan elektrokinetik partikel.

Secara keseluruhan, kombinasi data antara nilai zeta potensial, mobilitas elektroforetik, dan distribusi ukuran partikel memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai karakteristik fisik dan sifat elektrokinetik sistem nanoemulsi yang dihasilkan. Meskipun nilai mobilitas elektroforetik yang diperoleh tergolong rendah, hasil ini masih konsisten dengan karakteristik sistem yang kemungkinan dipengaruhi oleh mekanisme sterik. Namun, hasil pada konsentrasi 10 mL mengindikasikan bahwa terdapat batas optimal konsentrasi minyak atsiri untuk menjaga karakteristik ukuran partikel dan efisiensi pergerakan elektrokinetik dalam medium. Temuan ini penting untuk dipertimbangkan dalam pengembangan formulasi nanoemulsi dengan distribusi ukuran partikel yang baik dan sifat fisik yang sesuai.

Secara keseluruhan, kombinasi data antara nilai zeta potensial, mobilitas elektroforetik, dan distribusi ukuran partikel memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai karakteristik fisik dan sifat elektrokinetik sistem nanoemulsi yang dihasilkan. Meskipun nilai mobilitas elektroforetik yang diperoleh tergolong rendah, hasil ini masih konsisten dengan karakteristik sistem yang kemungkinan dipengaruhi oleh mekanisme sterik. Namun, hasil pada konsentrasi 10 mL mengindikasikan bahwa terdapat batas optimal konsentrasi minyak atsiri untuk menjaga karakteristik ukuran partikel dan efisiensi pergerakan elektrokinetik dalam medium. Temuan ini penting untuk dipertimbangkan dalam pengembangan formulasi nanoemulsi dengan distribusi ukuran partikel yang baik dan sifat fisik yang sesuai.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Penelitian ini belum menyertakan formulasi kontrol (blanko) yang terdiri atas PEG-40 HCO dan air tanpa penambahan minyak atsiri Gardenia, sehingga kontribusi agregat PEG-40 HCO terhadap distribusi ukuran partikel yang terukur belum dapat dievaluasi secara langsung. Selain itu, penelitian ini juga belum mencakup pengujian efisiensi enkapsulasi (Encapsulation Efficiency, EE), sehingga jumlah minyak atsiri yang berhasil terdispersi dalam sistem maupun kemungkinan kehilangan minyak selama proses atomisasi belum dapat ditentukan secara kuantitatif. Penelitian ini juga belum mencakup pengujian stabilitas selama penyimpanan, seperti pengamatan perubahan ukuran partikel terhadap waktu, uji sentrifugasi, maupun pengujian pada berbagai kondisi suhu. Oleh karena itu, validitas asal distribusi ukuran partikel, efisiensi retensi minyak atsiri dalam sistem, serta kestabilan jangka panjang nanoemulsi yang dihasilkan belum dapat dipastikan secara eksperimental. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini lebih menggambarkan karakteristik fisik dan sifat elektrokinetik sistem pada saat pengukuran dilakukan. Pengujian blanko, pengukuran efisiensi enkapsulasi, dan evaluasi stabilitas selama penyimpanan diperlukan pada penelitian lanjutan untuk memperkuat interpretasi hasil karakterisasi ukuran partikel dan zeta potensial serta meningkatkan validitas sistem nanoemulsi yang dikembangkan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pembentukan nanoemulsi minyak atsiri Gardenia menggunakan surfaktan PEG-40 Hydrogenated Castor Oil (PEG-40 HCO) melalui teknik atomisasi berhasil menghasilkan sistem dengan ukuran partikel pada rentang nanometer dan distribusi ukuran yang relatif baik. Proses atomisasi diduga berperan sebagai tahapan utama dalam pembentukan droplet berukuran nanometer, sedangkan tahap pengadukan awal berfungsi sebagai pra-emulsifikasi untuk menghasilkan campuran yang homogen sebelum atomisasi. Variasi konsentrasi minyak atsiri Gardenia memberikan pengaruh terhadap karakteristik fisik dan sifat elektrokinetik droplet nanoemulsi yang terbentuk. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada konsentrasi 4–8 mL diperoleh ukuran partikel yang lebih kecil dengan distribusi ukuran yang relatif sempit. Hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa PEG-40 HCO berperan dalam pembentukan dan dispersi tetapan minyak selama proses nanoemulsifikasi. Pada konsentrasi 10 mL terjadi peningkatan diameter rata-rata partikel yang mengindikasikan bahwa rasio surfaktan terhadap minyak mulai kurang optimal, yang kemungkinan berkaitan dengan peningkatan viskositas sistem dan keterbatasan jumlah surfaktan yang tersedia pada antarmuka minyak-air. Nilai zeta potensial dan mobilitas elektroforetik menunjukkan kecenderungan semakin negatif seiring peningkatan konsentrasi minyak atsiri, meskipun nilainya masih relatif rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme stabilisasi sistem kemungkinan lebih dipengaruhi oleh efek sterik dari PEG-40 HCO dibandingkan mekanisme elektrostatik. Berdasarkan hasil karakterisasi yang diperoleh, formulasi dengan konsentrasi minyak atsiri 6–8 mL menunjukkan karakteristik yang paling baik ditinjau dari ukuran partikel dan distribusinya. Namun demikian, penelitian

ini belum menyertakan formulasi kontrol (blanko) tanpa minyak atsiri Gardenia sehingga verifikasi asal distribusi ukuran partikel masih memerlukan pengujian lanjutan. Selain itu, efisiensi enkapsulasi minyak atsiri dalam sistem nanoemulsi belum dievaluasi sehingga jumlah minyak atsiri yang berhasil terdispersi maupun kemungkinan kehilangan minyak selama proses atomisasi belum dapat ditentukan secara kuantitatif dan masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi efisiensi enkapsulasi minyak atsiri, melakukan pengujian stabilitas selama penyimpanan, serta menyertakan formulasi kontrol (blanko) guna memverifikasi asal distribusi ukuran partikel yang teramati. Selain itu, pengembangan skala proses dan evaluasi performa nanoemulsi pada aplikasi parfum berbasis air juga perlu dilakukan untuk mendukung pemanfaatan sistem yang dikembangkan.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan terkait dengan publikasi naskah ini.

References

- [1] Herdiana Y. Alcohol in Daily Products: Health Risks, Cultural Considerations, and Economic Impacts. *Risk Manag Healthc Policy* 2025; Volume 18:217–37. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S495493>.
- [2] Sabrina LM, Zahra AA, Aini KN, Rafifa M, Maulida VS, Putra HE. Analisis Komparatif Surfaktan dan Kosurfaktan serta Parameter Fisik Dalam Formulasi Self-Nanoemulsifying Drug Delivery System (SNEDDS) Berbasis Tanaman Herbal. *Jurnal Ilmiah Respati* 2025;16:63–74.
- [3] Adeyemi SB, Akere AM, Orege JL, Ejeromeghene O, Orege OB, Akolade JO. Polymeric nanoparticles for enhanced delivery and improved bioactivity of essential oils. *Heliyon* 2023;9:e16543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16543>.
- [4] Buriti BMA de B, Figueiredo PLB, Passos MF, da Silva JKR. Polymer-Based Wound Dressings Loaded with Essential Oil for the Treatment of Wounds: A Review. *Pharmaceuticals* 2024;17:897. <https://doi.org/10.3390/ph17070897>.
- [5] Winarti RS, Saragih H. Pengaruh Penyimpanan dan Pemanasan Terhadap Perubahan Ukuran Nanopartikel Parfum Campuran Minyak Musk dan Minyak Atsiri Lili yang Disintesis Menggunakan Surfaktan Polimer PEG-40 HCO. *Jurnal Fisika Unand* 2025;14:516–25. <https://doi.org/10.25077/jfu.14.5.516-525.2025>.
- [6] Kumar M, Chauhan N, Kumar D, Mahmood S, Chopra S, Bhatia A. Revolutionizing nanomedicine: Expanding horizons of nanoemulsions in drug delivery and beyond. *J Dispers Sci Technol* 2024;1–26. <https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2369835>.
- [7] Jacob S, Kather FS, Boddu SHS, Shah J, Nair AB. Innovations in Nanoemulsion Technology: Enhancing Drug Delivery for Oral, Parenteral, and Ophthalmic Applications. *Pharmaceutics* 2024;16:1333. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16101333>.
- [8] Rachmawati H, Novel M, Ayu S, Berlian G, Tandrasasmita O, Tjandrawinata R, et al. The In Vitro–In Vivo Safety Confirmation of PEG-40 Hydrogenated Castor Oil as a Surfactant for Oral Nanoemulsion Formulation. *Sci Pharm* 2017;85:18. <https://doi.org/10.3390/scipharm85020018>.
- [9] Daneshmand H, Sazgar A, Araghchi M. Fabrication of robust and versatile superhydrophobic coating by two-step spray method: An experimental and molecular dynamics simulation study. *Appl Surf Sci* 2021;567:150825. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150825>.
- [10] Marquez R, Ontiveros JF, Barrios N, Tolosa L, Palazzo G, Nardello-Rataj V, et al. Advantages and limitations of different methods to determine the optimum formulation in surfactant–oil–water systems: A review. *J Surfactants Deterg* 2024;27:5–36. <https://doi.org/10.1002/jsde.12703>.
- [11] Singh PK, Joshi D, Mandal A, Pal N. Silica Nanoparticle-Stabilized Anionic Surfactant Microemulsions: Characterization, Technical Evaluation, and Core-Flooding Studies for Enhanced Oil Recovery. *Energy & Fuels* 2025;39:1870–88. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c05091>.
- [12] Goswami AS, Rawat R, Pillai P, Saw RK, Joshi D, Mandal A. Formulation and characterization of nanoemulsions stabilized by nonionic surfactant and their application in enhanced oil recovery. *Pet Sci Technol* 2024;42:2990–3008. <https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2181357>.
- [13] Putra AAGSP, Suhendra L, IAnggreni AAMD. Stabilitas Dan Ukuran Partikel Mikroemulsi Minyak Atsiri Sereh (*Cymbopogon Citratus*) Dengan Rasio Surfaktan Dan Ko-Surfaktan. *JURNAL REKAYASA DAN MANAJEMEN AGROINDUSTRI* 2025;13:196–204. <https://doi.org/10.24843/JRMA.2025.v13.i02.p05>.
- [14] Kurchavov D, Rustambek U, Haddad M, Ottochian A, Lefèvre G, Ciofini I, et al. Influence of PEG-containing cation on molecular state of water in water – Acetate based ionic liquids mixtures. *J Mol Liq* 2022;367:120564. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120564>.

- [15] Pochapski DJ, Carvalho dos Santos C, Leite GW, Pulcinelli SH, Santilli CV. Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Results. *Langmuir* 2021;37:13379–89. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02056>.
- [16] Hunter SJ, Penfold NJW, Chan DH, Mykhaylyk OO, Armes SP. How Do Charged End-Groups on the Steric Stabilizer Block Influence the Formation and Long-Term Stability of Pickering Nanoemulsions Prepared Using Sterically Stabilized Diblock Copolymer Nanoparticles? *Langmuir* 2020;36:769–80. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03389>.
- [17] Tran E, Richmond GL. Interfacial Steric and Molecular Bonding Effects Contributing to the Stability of Neutrally Charged Nanoemulsions. *Langmuir* 2021;37:12643–53. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02020>.
- [18] Artiga-Artigas M, Montoliu-Boneu J, Salvia-Trujillo L, Martín-Belloso O. Factors affecting the formation of highly concentrated emulsions and nanoemulsions. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 2019;578:123577. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123577>.
- [19] Dajic Stevanovic Z, Sieniawska E, Glowniak K, Obradovic N, Pajic-Lijakovic I. Natural Macromolecules as Carriers for Essential Oils: From Extraction to Biomedical Application. *Front Bioeng Biotechnol* 2020;8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00563>.
- [20] Aisyah N, Sriwidodo S, Husni P, Sinala S. Analisis Aktivitas Antioksidan Nanoemulsi Berbasis Tanaman dalam Aplikasi Farmasi dan Kosmetik : Kajian Literatur. *Media Kesehatan Politeknik Kesehatan Makassar* 2025;20:139–52. <https://doi.org/10.32382/medkes.v20i1.1458>.