

Pengaruh Penyimpanan dan Pemanasan terhadap Perubahan Ukuran Nanopartikel Campuran Minyak *Royal Musk* dan Minyak Atsiri Lili yang Disintesis menggunakan Surfaktan Polimer PEG-40 HCO

Ratu Sesillia Winarti¹, Horasdia Saragih^{1*}

¹Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Advent Indonesia, Jl. Kolonel Masturi No. 288 Parongpong, Bandung Barat, Jawa Barat 40559, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 2 Juli 2025

Direvisi: 18 Agustus 2025

Diterima: 22 September 2025

Kata kunci:

Atomisasi

Minyak Esensial

Nanopartikel Parfum

PEG-40 HCO

Stabilitas

Keywords:

Atomization

Essential Oils

Perfume Nanoparticles

PEG-40 HCO

Stability

Penulis Korespondensi:

Horasdia Saragih

Email: horas@unai.edu

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan nanopartikel parfum berbahan campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili yang dapat didispersi dalam medium air serta mempelajari stabilitas ukurannya. Setelah penyimpanan dan pemanasan. Nanopartikel parfum disintesis menggunakan teknik *pressure-swirl atomization* dengan surfaktan PEG-40 HCO. Stabilitas ukuran partikel diukur menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) berdasarkan diameter rata-rata dan standar deviasi selama penyimpanan 120 hari dan pemanasan sampai temperatur 45°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyimpanan selama 120 hari secara signifikan meningkatkan diameter rata-rata partikel sebesar 51,1-231,7% pada populasi partikel kecil dan 33,5-88,0% pada populasi besar. Pemanasan juga menyebabkan pertambahan ukuran nanopartikel secara signifikan, terutama pada suhu 40°C dan 45°C. Ketidakstabilan ini diduga karena rendahnya potensial zeta (–3,0 hingga –1,3 mV), yang mengindikasikan lemahnya perlindungan elektrostatis, serta ketidakefektifan lapisan surfaktan PEG-40 HCO dalam memberikan perlindungan sterik yang memadai. Akibatnya, terjadi koalesensi dan pertumbuhan Oswald pada nanopartikel.

The objective of this study was to produce perfume nanoparticles made from a mixture of royal musk oil and lily essential oil that can be dispersed in an aqueous medium and to study their size stability. After storage and heating, the perfume nanoparticles were synthesized using the pressure-swirl atomization technique with PEG-40 HCO surfactant. Particle size stability was measured using a Particle Size Analyzer (PSA) based on the average diameter and standard deviation during 120 days of storage and heating to a temperature of 45°C. The results showed that storage for 120 days significantly increased the average particle diameter by 51.1-231.7% in the small particle population and 33.5-88.0% in the large population. Heating also caused a significant increase in nanoparticle size, especially at 40°C and 45°C. This instability is thought to be due to low zeta potential (–3.0 to –1.3 mV), which indicates weak electrostatic protection, as well as the ineffectiveness of the PEG-40 HCO surfactant layer in providing adequate steric protection. As a result, coalescence and Oswald growth occurred in the nanoparticles.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Industri parfum menghadapi tantangan dalam mengembangkan produk ramah kulit yang bebas alkohol namun tetap stabil dan tahan lama. Alkohol pada parfum konvensional dapat menyebabkan iritasi dan mempercepat penguapan aroma, sedangkan parfum berbasis air lebih lembut tetapi menghadapi kendala stabilitas dan solubilitas minyak atsiri yang hidrofobik (Miastkowska et al., 2018). Minyak royal musk dan minyak atsiri lili memiliki aroma khas yang populer, namun sifat hidrofobiknya menyulitkan formulasi dalam medium air tanpa alkohol. Teknologi enkapsulasi nanopartikel dengan surfaktan telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ini (Miyazawa et al., 2021).

Surfaktan seperti PEG-40 *Hydrogenated Castor Oil* (PEG-40 HCO) berperan menstabilkan nanopartikel minyak di air dengan HLB 14–16, menurunkan tegangan permukaan, serta berfungsi sebagai solubilizer dan emolien (Rachmawati et al., 2017). Stabilitas nanopartikel dipengaruhi waktu penyimpanan dan temperatur; perubahan ukuran dapat terjadi akibat koalisi, Ostwald ripening, atau reorganisasi antarmuka (Gupta & Kumar, 2007; Cheng et al., 2019).

Hingga kini, belum ada laporan mengenai sintesis nanopartikel campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili menggunakan PEG-40 HCO serta pengaruh waktu penyimpanan dan pemanasan terhadap ukurannya. Penelitian ini bertujuan menghasilkan nanopartikel campuran tersebut untuk parfum berbasis air dan mengevaluasi perubahan ukuran akibat waktu penyimpanan dan pemanasan, dengan harapan memberikan kontribusi pada pengembangan parfum yang stabil dan ramah kulit.

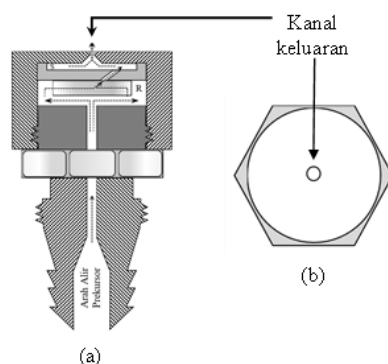
II. METODE

2.1 Penyajian Prekursor

Campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili (1:1) diaduk hingga homogen menggunakan magnetic stirrer pada 100 rpm selama 30 menit. Tiga replika masing-masing 10 mL kemudian dicampur dengan 1 mL PEG-40 HCO dan diaduk kembali pada kondisi yang sama hingga homogen. Selanjutnya, campuran minyak dan surfaktan ditambahkan ke 200 mL air destilasi dan diaduk selama 60 menit pada 100 rpm.

2.2 Sintesis Nanopartikel Campuran Minyak Royal Musk dan Minyak Atsiri Lili

Prekursor yang telah disiapkan kemudian diatomisasi menggunakan pressure atomizer dengan konstruksi nosel (Gambar 1) untuk menghasilkan nanopartikel campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili yang terenkapsulasi PEG-40 HCO.



Gambar 1 Konstruksi nosel atomizer bertipe pressure atomizer. (a) tampak samping dan (b) tampak atas.

$$We = \frac{\rho_g v^2 d}{\sigma} \quad (1)$$

Cairan prekursor diinjeksikan secara tangensial ke dalam nosel sehingga membentuk aliran vorteks akibat hukum kekekalan momentum sudut (Liu, 2016). Vorteks yang terintensifikasi mendorong cairan keluar melalui orifice dalam bentuk film tipis berputar, khas nosel *pressure-swirl* (Bang et al., 2020). Film ini kemudian terdisintegrasi menjadi butiran kecil melalui instabilitas Rayleigh–Plateau

(Kulkarni et al., 2023), butiran tersebut selanjutnya dapat mengalami disintegrasi sekunder akibat gaya aerodinamis yang melampaui tegangan permukaan, sesuai persamaan Weber (We) pada Persamaan 1.

dimana ρ_g adalah massa jenis udara, v adalah kecepatan relatif butiran, d adalah diameter butiran, dan σ adalah tegangan permukaan cairan. Pada penelitian ini, debit keluaran cairan prekursor dari lubang keluaran nosel ditetapkan sebesar 25ml/menit.

Ketika bilangan Weber (We) melebihi nilai kritis ($We > 12$), butiran cairan mengalami pemecahan berulang hingga mencapai ukuran kritis berorde nanometer, di mana tegangan permukaan mencegah pecahan lebih lanjut (Kirar et al., 2024). Pada tahap ini, surfaktan PEG-40 HCO mulai berperan aktif. Sifat amfifilik surfaktan membuat bagian hidrofobik mengelilingi tetesan minyak atsiri (royal musk dan lili), sedangkan bagian hidrofilik menghadap fase air, sehingga membentuk lapisan pelindung yang mencegah koalisi dan aglomerasi, menghasilkan nanopartikel emulsi stabil dalam air (Barradas et al., 2020).

2.3 Karakterisasi

Nanopartikel campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili hasil sintesis di atas selanjutnya dikarakterisasi. Karakterisasi yang dilakukan mencakup pengukuran: (1) diameter rata-rata, (2) indeks polidispersitas, dan (3) potensial zeta. Pengukuran semua parameter ini dilakukan menggunakan peralatan Particle Size Analyzer (PSA) merek HORIBA SZ-100 (Japan).

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengaruh Penyimpanan selama 120 Hari

Diameter rata-rata nanopartikel dalam skala nanometer ditentukan menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) HORIBA SZ-100 (Japan) dengan metode dynamic light scattering (DLS). Instrumen ini secara otomatis menghitung ukuran partikel berdasarkan pola hamburan cahaya dari nanopartikel yang terdispersi dalam medium air. Hasil pengukuran yang diperoleh berupa distribusi ukuran dengan dua populasi dominan, yang kemudian dinyatakan sebagai populasi #1 (ukuran lebih kecil) dan populasi #2 (ukuran lebih besar)

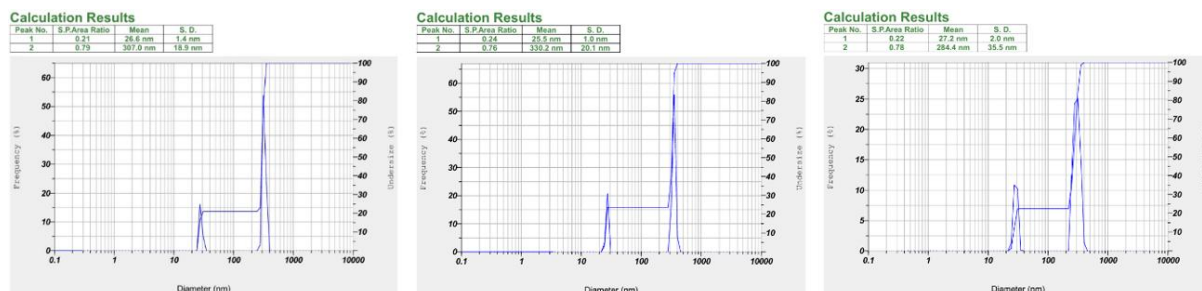
Ringkasan seluruh hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1. Hasil pengukuran diameter rata-rata (mean) dan standar deviasi (SD) nanopartikel campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili segera setelah sintesis (0 hari) ditampilkan pada Gambar 2, sedangkan hasil setelah penyimpanan 120 hari ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai mobilitas elektroforetik dan potensial zeta ditampilkan pada Gambar 4.

Tabel 1. Mobilitas elektroforetik, potensial zeta, dan diameter rata-rata nanopartikel pada hari ke-0 dan hari ke-120

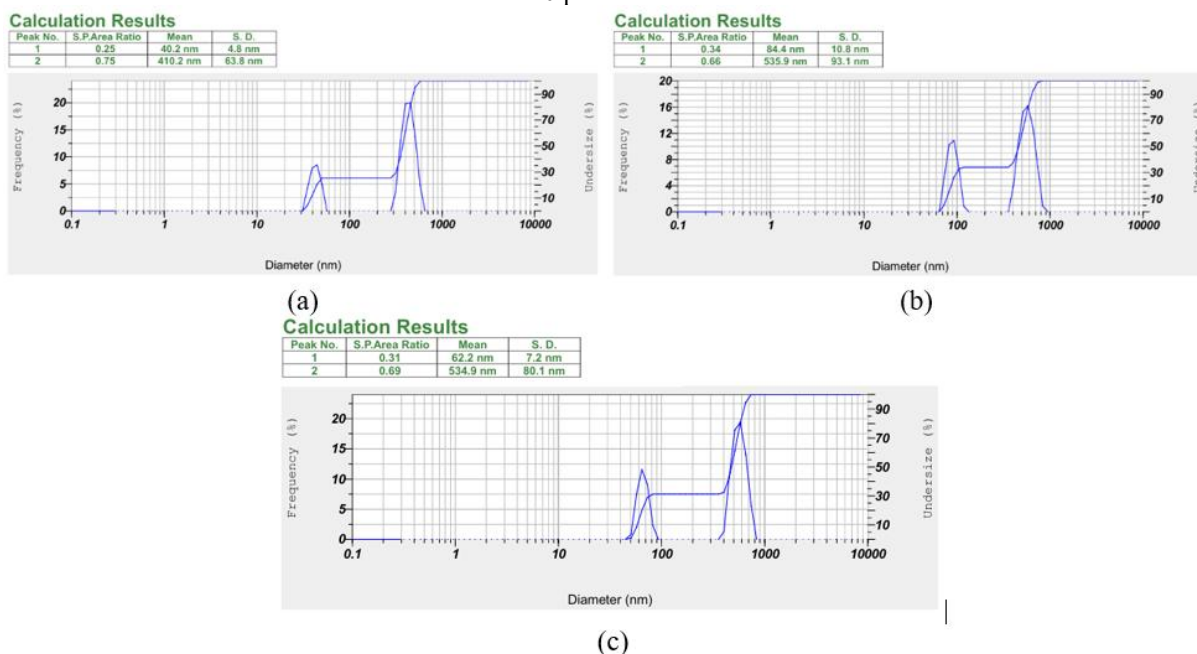
Repli- ka	Potensial Zeta (mV) 0 hari	Popu- lasi	Diameter Rata-rata (nm)			Standar Deviasi (nm)		
			0 hari	120 hari	Peruba- han (%)	0 hari	120 hari	Peruba- han (%)
#1	-2,6	#1	26,6	40,2	51,1	1,4	4,8	242,8
		#2	307,0	410,2	33,5	18,9	63,8	237,5
#2	-1,3	#1	25,5	84,4	231,7	1,0	10,8	980,0
		#2	330,2	535,9	62,2	330,2	93,1	-71,80
#3	-3,0	#1	27,2	62,2	128,6	2,0	7,2	260,0
		#2	284,4	534,9	88,0	35,5	80,1	125,6

Dari hasil yang diperoleh pada pengukuran awal ini (0 hari) terlihat bahwa setiap replika (replika #1, #2, dan #3) memiliki dua populasi nanopartikel yang berbeda secara signifikan, yang didefinisikan sebagai populasi #1 dan populasi #2. Untuk replika #1, diameter rata-rata awal adalah 26,6 nm (populasi #1) dan 307,0 nm (populasi #2). Replika #2 menunjukkan diameter rata-rata awal 25,5 nm (populasi #1) dan 330,2 nm (populasi #2). Sementara itu, replika #3 memiliki diameter rata-

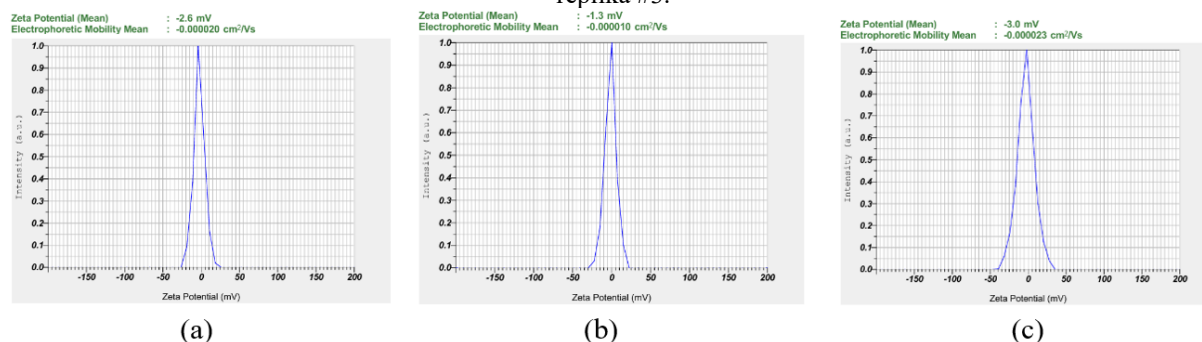
rata awal 27,2 nm (populasi #1) dan 284,4 nm (populasi #2). Potensial zeta nanopartikel masing-masing replika secara berurutan adalah -2,6 mV, -1,3 mV, dan -3,0 mV. Setelah 120 hari penyimpanan, terjadi peningkatan diameter rata-rata yang signifikan pada semua populasi di setiap replika. Populasi #1 mengalami perubahan diameter rata-rata sebesar 51,1%, 231,7%, dan 128,6% untuk replika #1, #2, dan #3. Sementara itu, populasi #2 menunjukkan perubahan yang lebih kecil, yaitu 33,5%, 62,2%, dan 88,0%.



Gambar 2 Distribusi ukuran nanopartikel: (a) replika #1, (b) replika #2, (c) replika #3. Pengukuran pada hari ke-0 pascasintesis.



Gambar 3 Distribusi ukuran nanopartikel setelah penyimpanan 120 hari: (a) replika #1, (b) replika #2, (c) replika #3.



Gambar 4 Profil mobilitas elektroforetik dan potensial zeta ketiga replika nanopartikel: (a) #1, (b) #2, dan (c) #3. Pengukuran dilakukan pada hari ke-0 setelah sintesis.

Peningkatan diameter rata-rata nanopartikel setelah 120 hari menunjukkan ketidakstabilan nanopartikel campuran minyak *royal musk* dan lili, yang terutama disebabkan oleh koalisi dan/atau Ostwald ripening (Koroleva & Yurtov, 2020; Barradas et al., 2020). Molekul minyak hidrofobik

cenderung saling berinteraksi untuk meminimalkan kontak dengan air, mendorong terjadinya kedua proses tersebut. Surfaktan PEG-40 HCO membentuk lapisan pelindung di sekitar nanopartikel, memberikan hambatan sterik untuk mencegah koalisi (Javed et al., 2020), namun efektivitasnya dapat menurun seiring waktu akibat degradasi, desorpsi, atau redistribusi, memungkinkan nanopartikel berinteraksi dan bergabung.

Perbedaan tingkat perubahan diameter rata-rata antara populasi #1 (nanopartikel yang lebih kecil) dan populasi #2 (nanopartikel yang lebih besar) dapat dijelaskan oleh dinamika molekuler yang berbeda. Partikel-partikel yang lebih kecil (populasi #1) memiliki luas permukaan per volume yang lebih besar, sehingga membuatnya lebih rentan terhadap koalisi (Gupta et al., 2016). Hal ini sesuai dengan persentase perubahan diameter yang jauh lebih besar pada populasi #1 dibandingkan dengan populasi #2.

Fenomena ini didorong oleh perbedaan kelarutan (solubility) partikel yang bergantung pada ukurannya, yang dijelaskan oleh Persamaan Kelvin:

$$\ln \frac{S}{S_0} = \frac{2\gamma V_m}{rRT} \quad (2)$$

dimana S adalah kelarutan partikel berjari r , S_0 adalah kelarutan pada permukaan datar, γ adalah tegangan antarmuka, V_m adalah volume molar, R adalah konstanta gas, dan T adalah temperatur.

Berdasarkan persamaan ini, nanopartikel-nanopartikel yang lebih kecil (r kecil) memiliki kelarutan yang lebih tinggi, sehingga molekul-molekul penyusun nanopartikel tersebut akan berdifusi melalui fase air dan mengendap pada nanopartikel-nanopartikel yang lebih besar. Fenomena ini menjelaskan mengapa diameter nanopartikel kecil (populasi #1) berubah secara drastis, karena molekul-molekulnya berdifusi untuk pertumbuhan nanopartikel yang lebih besar (populasi #2).

Stabilitas ukuran suatu nanopartikel, ditinjau dari sisi elektrostatis, sebenarnya dapat dijaga oleh potensial zetanya. Namun pada sistem nanopartikel campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili yang dihasilkan di atas untuk ketiga replika, potensial zetanya sangat rendah. Bhattacharjee (2016) melaporkan bahwa bila suatu populasi nanopartikel memiliki potensial zeta yang rendah ($< \pm 10$ mV), maka nanopartikel di dalam populasi tersebut dari segi elektrostatis, sangat tidak stabil. Oleh karena potensial zeta ketiga nanopartikel di atas sangat rendah maka tidak cukup untuk menghasilkan gaya tolak elektrostatis untuk menghindari terjadinya koalisi maupun *Ostwald ripening*. Nilai potensial zeta yang ideal untuk stabilitas jangka panjang nanopartikel biasanya berada di atas 30 mV (Bhattacharjee, 2016). Kondisi ini memungkinkan partikel-partikel untuk saling berdekatan dan berinteraksi secara fisik, memfasilitasi baik koalesensi maupun pertumbuhan Ostwald.

Hasil yang diperoleh di atas secara kuat mendukung mekanisme koalisi dan pertumbuhan Ostwald yang difasilitasi oleh potensial zeta yang rendah. Replika #2, dengan potensial zeta yang paling rendah (-1,3 mV), menunjukkan perubahan diameter rata-rata terbesar pada populasi #1 (231,7%), yang mengindikasikan ketidakstabilan paling tinggi. Hasil ini konsisten dengan literatur yang menunjukkan bahwa sistem dengan potensial zeta mendekati nol memiliki stabilitas koloid terburuk (Huang et al., 2020). Sebaliknya, replika #3 dengan potensial zeta -3,0 mV menunjukkan perubahan diameter yang lebih kecil pada populasi #1 (128,6%) dibandingkan replika #2, meskipun masih signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun seluruh sampel tidak stabil secara elektrostatis, variasi kecil pada potensial zeta dan distribusi ukuran awal partikel secara signifikan memengaruhi derajat ketidakstabilannya. Hal ini sejalan dengan penelitian An et al. (2022) yang melaporkan bahwa partikel dengan ukuran berbeda dalam populasi yang sama mengalami perubahan dimensi berbeda selama penyimpanan melalui mekanisme Ostwald ripening.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penyimpanan selama 120 hari signifikan meningkatkan diameter rata-rata nanopartikel. Koalesensi dan Ostwald ripening menjadi mekanisme utama peningkatan ukuran ini, khususnya pada populasi partikel lebih kecil yang memiliki luas permukaan per volume lebih besar. PEG-40 HCO sebagai penstabil sterik terbukti tidak cukup efektif mencegah kedua mekanisme tersebut dalam jangka panjang, terutama didukung oleh potensial zeta yang rendah. Optimasi formulasi melalui peningkatan konsentrasi surfaktan atau penambahan penstabil elektrostatis diperlukan untuk memperoleh stabilitas jangka panjang yang lebih baik.

Standar deviasi dari setiap populasi nanopartikel juga berubah setelah selama 120 hari penyimpanan. Untuk populasi #1, standar deviasi awal berkisar antara 1,0 nm hingga 2,0 nm, menunjukkan distribusi ukuran yang sangat sempit dan homogen pada setiap replika. Populasi #2 memiliki standar deviasi awal yang jauh lebih besar, mulai dari 18,9 nm hingga 330,2 nm, yang mengindikasikan distribusi ukuran yang lebih lebar dan heterogen. Setelah 120 hari, terjadi peningkatan signifikan pada standar deviasi untuk sebagian besar populasi. Populasi #1 mengalami kenaikan drastis sebesar 242,8% (replika #1), 980,0% (replika #2), dan 260,0% (replika #3). Untuk populasi #2, replika #1 dan #3 juga mengalami kenaikan standar deviasi masing-masing sebesar 237,5% dan 125,6%. Namun, replika #2 menunjukkan anomali dengan penurunan standar deviasi sebesar -71,80%.

Secara fisis, kenaikan signifikan pada populasi #1 dapat dijelaskan oleh ukurannya yang lebih kecil, yang memberikan rasio luas permukaan terhadap volume lebih besar dan energi permukaan spesifik yang lebih tinggi dibandingkan populasi #2. Kondisi ini membuat populasi partikel kecil jauh lebih rentan terhadap destabilisasi. Molekul-molekul dari partikel kecil cenderung berdifusi ke partikel besar melalui mekanisme Ostwald ripening atau bergabung langsung melalui koalesensi. Selain itu, nilai potensial zeta yang sangat rendah (-1,3 hingga -3,0 mV) tidak mampu menghasilkan gaya tolak elektrostatis yang memadai, sehingga interaksi antarpartikel sulit dicegah. Faktor-faktor ini secara bersamaan menyebabkan peningkatan standar deviasi pada populasi #1 jauh lebih drastis dibandingkan populasi #2.

Peningkatan standar deviasi mengonfirmasi ketidakstabilan sistem nanopartikel. Mekanisme koalesensi dan *Ostwald ripening* menyebabkan partikel kecil bergabung atau melarut, sehingga distribusi ukuran menjadi lebih lebar dan heterogen, khususnya pada populasi #1 yang awalnya homogen. Hal ini sejalan dengan teori bahwa partikel lebih kecil, dengan energi permukaan tinggi, memang lebih rentan terhadap koalesensi (McClements, 2015). Anomali penurunan standar deviasi sebesar -71,80% pada populasi #2 replika #2 diduga disebabkan oleh dominasi Ostwald ripening, di mana partikel kecil larut dan berdifusi ke partikel besar, menyempitkan distribusi ukuran meskipun diameter rata-rata meningkat.

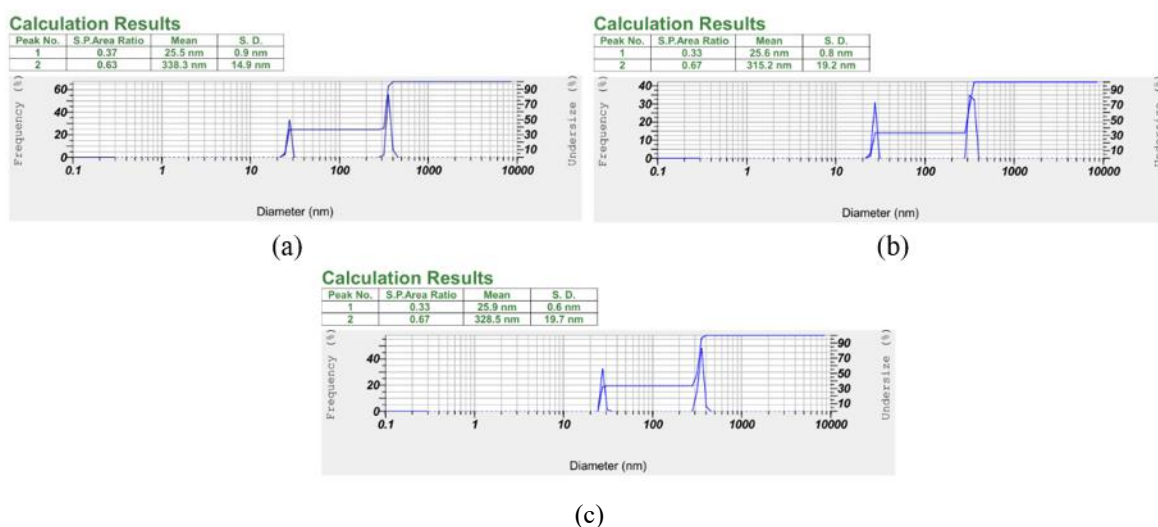
3.2 Pengaruh Pemanasan

Pemanasan bertahap dilakukan pada nanopartikel ketiga replika, dan diameter rata-rata serta standar deviasinya diukur pada setiap tahap dan dirangkum pada Tabel 2. Nanopartikel awal (24 °C) dipanaskan pada 35 °C, 40 °C, dan 45 °C masing-masing selama 15 menit, dengan pengukuran diameter rata-rata dan standar deviasi setelah setiap pemanasan. Hasil pengukuran untuk tiap tahap ditampilkan pada Gambar 5 (35 °C), Gambar 6 (40 °C), dan Gambar 7 (45 °C).

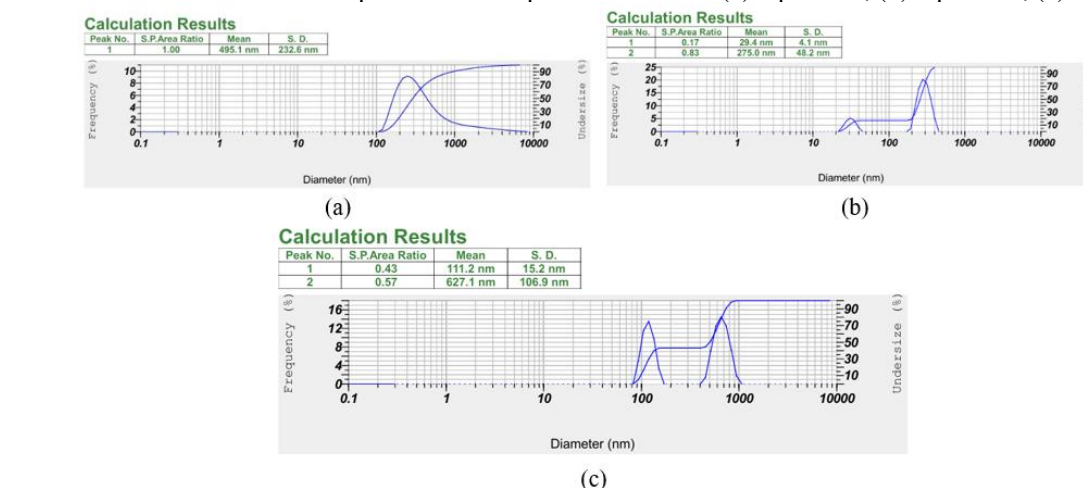
Tabel 2. Diameter rata-rata nanopartikel sebelum dan setelah pemanasan berbagai suhu selama 15 menit.

Repli- ka	Popu- lasi	Diameter Rata-rata (nm)				Standar deviasi (nm)			
		Sebelum dipanas- kan (24 °C)	Dipanasakan (selama 15 menit)			Sebelum dipanas- kan (24 °C)	Dipanasakan (selama 15 menit)		
			35 °C	40 °C	45 °C		35 °C	40 °C	45 °C
#1	#1	40,2	25,5	495,1	15,9	4,8	0,9	232,6	4,4
	#2	410,2	338,3	-	298,7	63,8	14,9	-	174,7
#2	#1	84,4	25,6	29,4	45,8	10,8	0,8	4,1	19,1
	#2	535,9	315,2	275,0	372,3	93,1	19,2	48,2	106,9
#3	#1	62,2	25,9	111,2	331,4	7,2	0,6	15,2	88,9
	#2	534,9	328,5	627,1	-	80,1	19,7	106,9	-

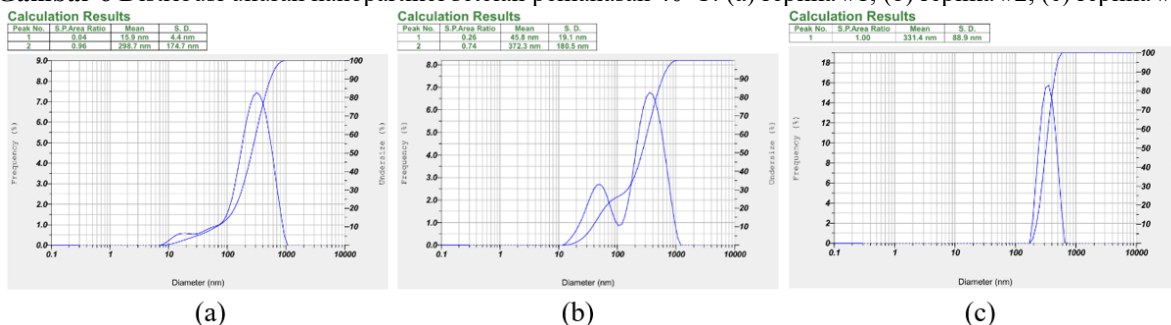
Diameter rata-rata awal nanopartikel (pada temperatur ruang, 24°C) dan standar deviasinya, untuk setiap populasi pada setiap replika, telah diketahui, yaitu: populasi #1 pada masing-masing replika memiliki diameter rata-rata secara berurut: 40,2 nm, 84,4 nm, dan 62,2 nm, dan standar deviasinya secara berurut: 4,8 nm, 10,8 nm, dan 7,2 nm. Populasi #2 memiliki diameter rata-rata yang jauh lebih besar, yaitu secara berurut: 410,2 nm, 535,9 nm, dan 534,9 nm, dan standar deviasinya yang sangat lebar secara berurut yaitu: 63,8 nm, 93,1 nm, dan 80,1 nm. Setelah pemanasan, terjadi perubahan signifikan dan bervariasi pada diameter rata-rata dan standar deviasi nanopartikel kedua populasi. Secara umum, pemanasan, terutama pada temperatur yang lebih tinggi (40°C dan 45°C), menyebabkan peningkatan diameter rata-rata dan standar deviasi yang masif, meskipun ada beberapa anomali pada pemanasan 35°C. Pada Gambar 8, grafik perubahan diameter rata-rata dan standar deviasi setiap populasi pada setiap replika, ditunjukkan.



Gambar 5 Distribusi ukuran nanopartikel setelah pemanasan 35°C: (a) replika #1, (b) replika #2, (c) replika #3.

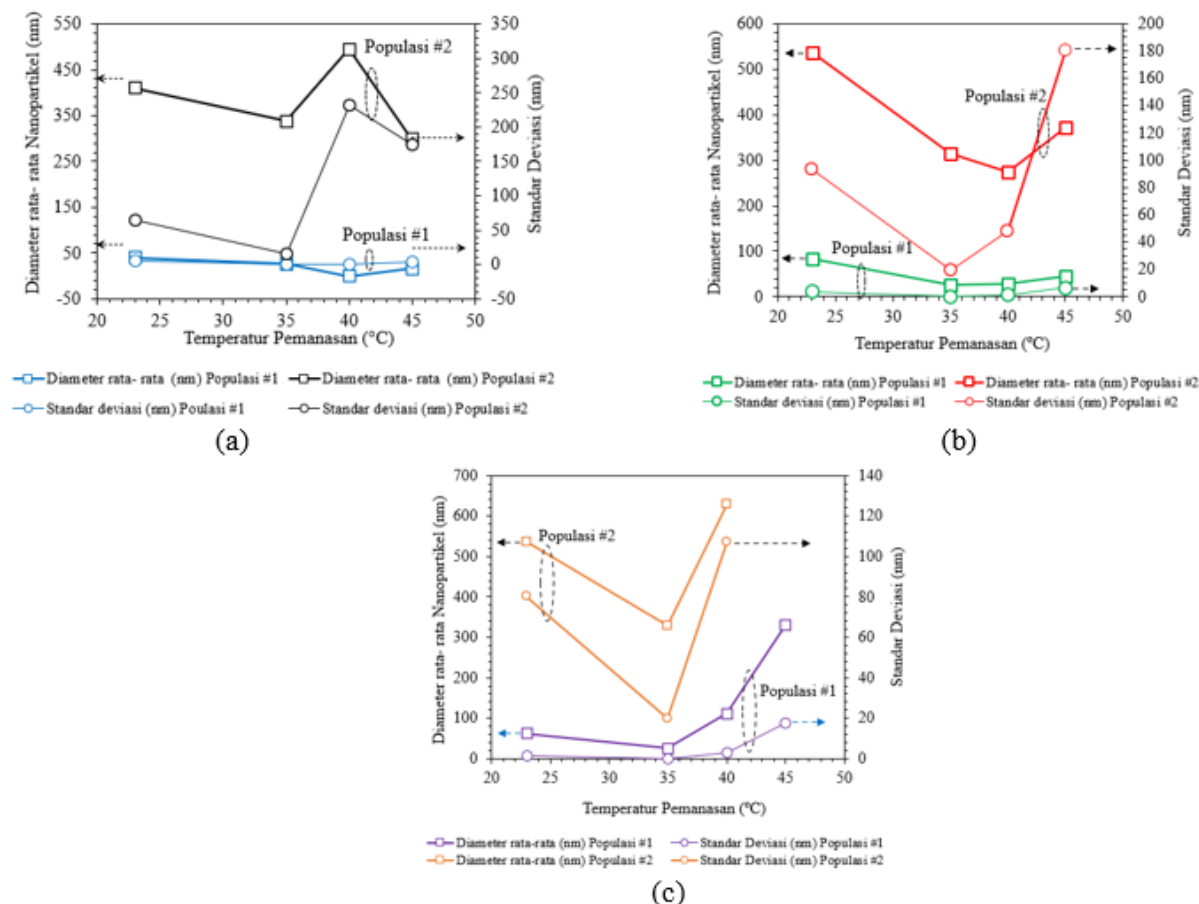


Gambar 6 Distribusi ukuran nanopartikel setelah pemanasan 40°C: (a) replika #1, (b) replika #2, (c) replika #3.



Gambar 7 Distribusi ukuran nanopartikel setelah pemanasan 45°C: (a) replika #1, (b) replika #2, (c) replika #3.

Pemanasan meningkatkan energi kinetik molekul, sehingga frekuensi tumbukan antar nanopartikel bertambah dan mempercepat koalisi (Ojha et al., 2024). Kehadiran surfaktan PEG-40 HCO yang menstabilkan nanopartikel melalui hambatan sterik menjadi terganggu pada temperatur tinggi, sehingga efektivitas lapisan pelindungnya menurun.



Gambar 8 Pengaruh suhu (24–45°C) terhadap diameter rata-rata dan standar deviasi nanopartikel: (a) replika #1, (b) replika #2, (c) replika #3.

Pada temperatur yang lebih tinggi, rantai polimer dapat mengalami kontraksi atau perubahan konfigurasi, mengurangi efektivitasnya sebagai penghalang sterik. Hal ini melemahkan perlindungan dan memungkinkan nanopartikel-nanopartikel hidrofobik untuk saling berinteraksi, menyebabkan mereka berkoalisi dan membentuk nanopartikel yang lebih besar (Guo & Gao, 2020). Penurunan diameter rata-rata dan standar deviasi pada temperatur 35°C (terutama pada replika #1 dan #2) adalah anomali yang menarik dan mungkin menunjukkan adanya transisi fase atau redistribusi molekul surfaktan yang sementara waktu meningkatkan homogenitas sistem sebelum mekanisme destabilisasi dominan pada temperatur yang lebih tinggi.

Perubahan diameter rata-rata nanopartikel saat pemanasan dapat dijelaskan juga oleh kombinasi koalisi dan pertumbuhan Ostwald. Peningkatan temperatur secara dramatis meningkatkan laju kedua proses ini. Energi kinetik yang lebih tinggi memungkinkan nanopartikel-nanopartikel mengatasi hambatan energi yang diberikan oleh lapisan surfaktan dan potensial zeta yang rendah, sehingga memfasilitasi koalisi. Laju tumbukan per volume antara dua nanopartikel, J_{ij} , dapat digambarkan oleh Persamaan Smoluchowski:

$$J_{ij} = k_T (R_i + R_j) \quad (3)$$

dimana k_T adalah konstanta laju yang bergantung pada temperatur, dan R_i , R_j adalah jari-jari masing-masing nanopartikel yang bertumbukan. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan

temperatur secara eksponensial meningkatkan frekuensi tumbukan yang berpotensi menyebabkan koalisi antar nanopartikel.

Selain itu, pertumbuhan Ostwald juga dipercepat. Peningkatan temperatur, meningkatkan kelarutan molekul-molekul minyak di dalam fase air sehingga memfasilitasi difusi mereka dari nanopartikel-nanopartikel kecil ke nanopartikel-nanopartikel besar (Jia & Zhang, 2024). Peran PEG-40 HCO sebagai penstabil sangat bergantung pada temperaturnya. Temperatur di atas titik transisi misel (*critical micelle temperature*) atau titik awan (*cloud point*) surfaktan, dapat menyebabkan hilangnya kemampuan stabilisasi. Karena potensial zeta semua nanopartikel sangat rendah, hambatan elektrostatis nanopartikel untuk berkoalisi hampir tidak ada sehingga membuat sistem sangat rentan terhadap destabilisasi termal.

Dari data hasil pengukuran yang diperoleh di atas mendukung teori bahwa pemanasan mempercepat destabilisasi nanopartikel. Peningkatan masif diameter rata-rata pada populasi #1 dan #2 saat temperatur mencapai 40°C dan 45°C adalah bukti kuat dari koalisi yang dominan. Kenaikan drastis standar deviasi yang menyertainya, seperti kenaikan 232,6 nm pada populasi #1 replika #1 pada temperatur 40°C, menunjukkan bahwa koalisi yang terjadi sangat tidak terkendali, menciptakan distribusi ukuran yang sangat lebar dan tidak homogen. Hasil ini konsisten dengan literatur yang melaporkan bahwa nanopartikel yang distabilkan oleh surfaktan non-ionik sering kali menunjukkan penurunan stabilitas termal di atas temperatur tertentu (Jufri et al., 2022). Anomali pada temperatur 35°C mengindikasikan bahwa pada temperatur ini, mekanisme transisi konformasi PEG-40 HCO mungkin mengarah pada reorientasi molekul yang sementara waktu mempersempit distribusi ukuran partikel sebelum kehilangan kemampuan stabilisasinya pada temperatur yang lebih tinggi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanasan nanopartikel campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili, terutama pada temperatur tinggi, menyebabkan peningkatan signifikan pada diameter rata-rata dan standar deviasi. Perubahan ini menegaskan terjadinya destabilisasi termal yang dipicu oleh koalesensi dan Ostwald ripening, seiring meningkatnya energi kinetik molekul dan melemahnya perlindungan sterik dari PEG-40 HCO. Rendahnya potensial zeta turut memperbesar kerentanan sistem terhadap destabilisasi. Untuk meningkatkan stabilitas, diperlukan modifikasi formulasi, misalnya penggunaan surfaktan dengan titik awan lebih tinggi atau kombinasi dengan penstabil elektrostatis.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mensintesis nanopartikel parfum campuran minyak royal musk dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi PEG-40 HCO serta mengevaluasi pengaruh penyimpanan dan pemanasan terhadap ukuran partikel. Penyimpanan selama 120 hari secara signifikan meningkatkan diameter rata-rata nanopartikel dengan kenaikan pada populasi #1 mencapai 51,1% hingga 231,7% dan pada populasi #2 sebesar 33,5% hingga 88,0%. PEG-40 HCO tidak sepenuhnya efektif sebagai stabilis sterik, dan potensial zeta juga tidak cukup untuk mencegah destabilisasi. Pemanasan, terutama pada temperatur tinggi (40–45 °C), menyebabkan peningkatan diameter rata-rata hingga ratusan nanometer disertai lonjakan standar deviasi lebih dari 200%, yang menunjukkan terjadinya koalesensi dan pertumbuhan Ostwald yang mempercepat destabilisasi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- An, R., Liang, Y., Deng, R., Lei, P., & Zhang, H. (2022). Hollow nanoparticles synthesized via Ostwald ripening and their upconversion luminescence-mediated Boltzmann thermometry over a wide temperature range. *Light: Science & Applications*, 11, 217. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00867-9>
- Bang, B. H., Kim, Y. I., Ahn, C. S., Jeong, S., Yoon, Y., An, S., ... & Yarin, A. L. (2020). Theoretical model of swirling thick film flow inside converging nozzles of various geometries. *Fuel*, 280, 118215.
- Barradas, T. N., & de Holanda e Silva, K. G. (2020). Nanoemulsions of essential oils to improve solubility, stability and permeability: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1153–1171. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01142-2>

- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential - What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337-351. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Cheng, L.-C., Hashemnejad, S., Zarket, B., & Muthukrishnan, S. (2019). Thermally and pH-responsive gelation of nanoemulsions stabilized by weak acid surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 556, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.054>.
- Gupta, A., & Kumar, R. (2007). Role of Brownian motion on the thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Applied Physics Letters*. <https://doi.org/10.1063/1.2816903>
- Gupta, A., Eral, H. B., Hatton, T. A., & Doyle, P. S. (2016). Nanoemulsions: Formation, properties and applications. *Soft Matter*, 12(11), 2826-2841. <https://doi.org/10.1039/C5SM02958A>
- Guo, P., & Gao, Y. (2020). Coalescence of Au nanoparticles without ligand detachment. *Physical Review Letters*, 124(6), 066101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.066101>
- Huang, G., Xu, B., Qiu, J., Peng, L., Luo, K., Liu, D., & Han, P. (2020). Symmetric electrophoretic light scattering for determination of the zeta potential of colloidal systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 587, 124339. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124339>
- Javed, R., Zia, M., Naz, S., Aisida, S. O., Ain, N. U., & Ao, Q. (2020). Role of capping agents in the application of nanoparticles in biomedicine and environmental remediation: Recent trends and future prospects. *Journal of Nanobiotechnology*, 18, Article 172. <https://doi.org/10.1186/s12951-020-00704-4>
- Jufri, M., Iswandana, R., & Sari, R. N. (2022). Formulation of red fruit oil nanoemulsion using sucrose palmitate. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 14(5), 157-162. <https://doi.org/10.22159/ijap.2022v14i5.44314>
- Jia, G., & Zhang, H. (2024). Control of emulsion crystal growth in low-temperature environments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 334, 103313. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103313>
- Koroleva, M. Y., & Yurtov, E. V. (2020). Ostwald ripening in macro- and nanoemulsions. *Russian Chemical Reviews*, 89(4), 293-307. <https://doi.org/10.1070/RCR4962>
- Kulkarni, V., Shirdade, N., Rodrigues, N., Radhakrishna, V., & Sojka, P. E. (2023). On interdependence of instabilities and average drop sizes in bag breakup. *Applied Physics Letters*, 123(2).
- Kirar, P. K., Kumar, N., & Sahu, K. C. (2024). Dynamics of jet breakup and the resultant drop size distribution-effect of nozzle size and impingement velocity. *Physics of Fluids*, 36(10).
- Liu, Z. (2016). A fundamental investigation of scaling up turbulent liquid-phase vortex reactor using experimentally validated CFD models. <https://doi.org/10.31274/ETD-180810-5583>
- McClements, D. J. (2012). Nanoemulsions versus microemulsions: Terminology, differences, and similarities. *Soft Matter*, 8(6), 1719-1729. <https://doi.org/10.1039/C2SM06903B>
- Miastkowska, M., Lasoń, E., Sikora, E., & Wolińska-Kennard, K. (2018). Preparation and Characterization of Water-Based Nano-Perfumes. *Nanomaterials*(12), 981. <https://doi.org/10.3390/nano8120981>
- Miyazawa, T., Itaya, M., Burdeos, G. C., Nakagawa, K., & Miyazawa, T. (2021). A critical review of the use of surfactant-coated nanoparticles in nanomedicine and food nanotechnology. *International Journal of Nanomedicine*, 3937-3999
- Ojha, A., Tamadate, T., & Hogan, C. J. (2024). Latent-to-sensible heat conversion kinetics during nanoparticle coalescence. *The Journal of Chemical Physics*, 160(21).
- Rachmawati, H., Novel, M., Ayu, S., Berlian, G., Tandrasasmita, O., Tjandrawinata, R., & Anggadiredja, K. (2017). The In Vitro-In Vivo Safety Confirmation of PEG-40 Hydrogenated Castor Oil as a Surfactant for Oral Nanoemulsion Formulation. *Scientia Pharmaceutica*, 85(2), 18. <https://doi.org/10.3390/scipharm85020018>