Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 14, No. 6, November 2025, hal. 595 – 605
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.14.6.595-605.2025

Open Access

Nanoemulsi Campuran Minyak *Flower Musk* dan Minyak Atsiri Lili menggunakan Surfaktan PEG 40 *Hydrogenated Castor Oil* dan Uji Stabilitas Ukurannya

Flora Angelita, Horasdia Saragih*
Fakultas 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: 14 Oktober 2025
Diterima: 22 November 2025

Kata kunci:
Minyak Atsiri Lili
Minyak Flower Musk
Nanoemulsi
PEG-40 HCO
Stabilitas Ukuran

ABSTRAK

Penggunaan parfum berbahan alkohol sering menyebabkan iritasi kulit sehingga mendorong pengembangan parfum berbasis air. Namun tantangannya, minyak atsiri sebagai bahan utama wewangian parfum, bersifat hidrofobik. Teknologi nanoemulsi menawarkan solusi untuk mengatasi masalah ini. Bahan wewangian parfum diformulasi berukuran nanometer, kemudian dienkapsulasi dengan suatu surfaktan sehingga dapat didispersi secara homogen di dalam air. Penelitian ini bertujuan untuk memformulasi nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili sebagai parfum berbasis air dan menguji stabilitasnya. Stabilitas diukur melalui diameter rata-rata, standar deviasi, dan potensial zeta. Nanoemulsi disintesis menggunakan surfaktan PEG-40 HCO dengan teknik atomisasi. Stabilitas diuji dengan mengukur diameter rata-rata dan standar deviasi pada hari ke-0 dan setelah 120 hari penyimpanan. Selain itu, dilakukan uji pemanasan pada temperatur 35°C, 40°C dan 45°C. Hasil yang diperoleh menunjukkan, setelah 120 hari penyimpanan terjadi peningkatan diameter rata-rata dan pelebaran distribusi ukuran. Ini disebabkan oleh fenomena Ostwald *ripening* dimana molekul-molekul dari nanoemulsi yang lebih kecil berdifusi dan menyatu dengan nanoemulsi yang lebih besar. Nilai potensial zeta nanoemulsi rendah (-6,6 hingga -8,1 mV) sehingga tidak cukup untuk mencegah ketidakstabilan. Namun, ketika nanoemulsi dipanaskan diameter rata-ratanya menjadi menurun. Terjadi restrukturisasi termal pada molekul-molekul penyusun nanoemulsi dan molekul-molekul PEG-40 HCO yang mengenkapsulasinya.

Keywords:
Lily Essential Oil
Flower Musk Oil
Nanoemulsion;
PEG-40 HCO
Size Stability

Penulis Korespondensi:
Horasdia Saragih
Email: horas@unai.edu

The use of alcohol-based perfumes often causes skin irritation, prompting the development of water-based perfumes. However, the challenge is that essential oils, the main ingredient in perfumes, are hydrophobic. Nanoemulsion technology offers a solution to this problem. Perfume ingredients are formulated in nanometer sizes, then encapsulated with a surfactant so that they can be dispersed homogeneously in water. This study aims to develop a nanoemulsion mixture of flower musk oil and lily essential oil as a water-based perfume and test its stability. Stability is measured by average diameter, standard deviation, and zeta potential. The nanoemulsion is made using PEG-40 HCO surfactant with the atomization technique. Stability was tested by measuring the average diameter and standard deviation on day 0 and after 120 days of storage. In addition, heating tests were conducted at temperatures of 35°C, 40°C, and 45°C. The results showed that after 120 days of storage, there was an increase in the average diameter and a widening of the size distribution. This was due to the Ostwald ripening phenomenon, whereby smaller nanoemulsion molecules diffused and merged with larger ones. The zeta potential of the nanoemulsion was low (-6.6 to -8.1 mV), which was insufficient to prevent instability. However, when the nanoemulsion was heated, its average diameter decreased. Thermal restructuring occurs in the molecules that make up the nanoemulsion and the PEG-40 HCO molecules that encapsulate the nanoemulsion.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Parfum berbasis alkohol telah lama mendominasi pasar, namun penggunaan alkohol sebagai pelarut sering menimbulkan efek samping, seperti: iritasi, kekeringan dan rasa terbakar pada kulit. Hal ini mendorong pengembangan parfum baru berbasis air yang lebih aman dan ramah lingkungan, serta penggunaan bahan alami minyak atsiri sebagai bahan dasar wewangian.

Minyak atsiri, seperti minyak *Flower Musk* dan minyak atsiri Lili, kaya akan senyawa bioaktif volatil yang memiliki aroma yang menyenangkan dan memiliki aktivitas biologis sebagai antioksidan (Amin & Guspiana, 2025). Minyak *Flower Musk* memiliki daya tarik olfaktori yang kuat (Kawasaki et al., 2017), sementara minyak atsiri Lili dapat menawarkan profil senyawa unik yang menarik untuk aroma dan stabilitas (Farsaam et al., 2003). Pemanfaatan kombinasi kedua minyak atsiri ini menawarkan sinergi aroma dan fungsi yang potensial (Azizah et al., 2022). Namun, penggunaan formulasi dua kombinasi minyak ini mengalami kendala ketika digunakan sebagai bahan wewangian pada pembuatan parfum berbasis air karena sifatnya yang hidrofobik. Untuk mengatasi kendala ini, pendekatan nanoemulsi dengan menggunakan suatu surfaktan dapat dilakukan (Soni et al., 2023).

Pada penelitian ini surfaktan yang digunakan adalah PEG-40 *Hydrogenated Castor Oil* (PEG-40 HCO). Surfaktan ini digunakan karena bersifat non-ionik, biokompatibel dan efektif menurunkan tegangan antarmuka minyak-air serta ramah terhadap kulit (Rachmawati et al., 2017). Nanoemulsi dibuat dengan teknik atomisasi tanpa panas untuk menjaga kestabilan senyawa aktifnya (Purnami, 2011). Stabilitas nanoemulsinya diuji melalui pengukuran diameter rata-rata, indeks polidispersitas (PDI), serta potensial zeta, yang bertujuan untuk melihat homogenitas dispersi nanoemulsi dan kestabilan sistemnya (Sanchez et al., 2025; Nugroho et al., 2024).

II. METODE

2.1 Bahan

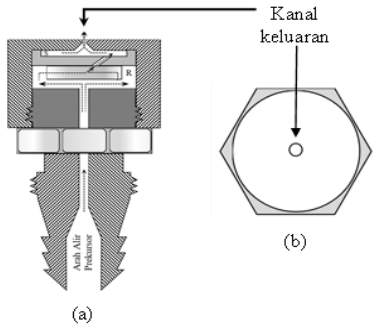
Bahan yang digunakan: (1) minyak *flower musk*; (2) minyak atsiri lili; (3) surfaktan PEG 40 HCO dengan kemurnian 99%; dan (4) air destilasi. Surfaktan PEG 40 HCO dibeli dari Merck KGaA Germany. Minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili dibeli dari C.V. Mikaya Makmur Sejahtera, Surabaya, Indonesia. Semua bahan di atas langsung digunakan tanpa perlakuan tambahan.

2.2 Metode

2.2.1 Prekursor Campuran Minyak *Flower Musk* dan Minyak Atsiri Lili

Campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili dibuat dengan perbandingan 50:50% dan diaduk hingga homogen menggunakan *magnetic stirrer*. Dari campuran ini, tiga replika masing-masing 10 mL diambil dan dicampur dengan 1 mL surfaktan PEG-40 HCO, kemudian diaduk hingga homogen. Selanjutnya, setiap replika ditambahkan 200 mL air dan diaduk kembali hingga homogen, menghasilkan prekursor siap untuk proses atomisasi menjadi nanoemulsi.

2.2.2 Nanoemulsi Campuran Minyak *Flower Musk* dan Minyak Atsiri Lili



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

Masing-masing replika prekursor campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili di atas dinanoemulsi dengan teknik atomisasi menggunakan atomizer bertipe *pressure atomizer* yang memiliki *nosel pressure-swirl* dengan konstruksi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Diameter dan tinggi ruang

R (ruang *swirl*) masing-masing adalah 7 mm dan 3 mm. Diameter dan tinggi ruang S (*swirl chamber*) masing-masing adalah 5 mm dan 2 mm. Diameter lubang kanal keluaran nosel adalah 0,5 mm.

Pada nosel *pressure-swirl*, cairan prekursor bertekanan tinggi masuk secara tangensial ke ruang pusaran, membentuk rotasi kuat dan inti udara *(air core)* yang memecah cairan menjadi tetesan halus, sesuai prinsip kekekalan momentum sudut di mana kecepatan tangensial meningkat saat jari-jari pusaran mengecil (Swastika & Nugroho, 2024; Nagargoje et al., 2025). Setelah meninggalkan ruang pusaran, cairan berputar menuju lubang keluaran sempit dengan peningkatan kecepatan tangensial dan aksial, menghasilkan tegangan geser tinggi yang memecah cairan menjadi partikel lebih kecil sebelum keluar dari nosel (Swastika & Nugroho, 2024; Sinamo, 2015).

Ketika cairan prekursor yang berputar keluar dari ruang pusaran melalui kanal keluaran yang sempit, pusaran fluida yang berkecepatan tinggi membentuk film cair tipis berbentuk kerucut berongga (*hollow conical liquid sheet*) akibat konversi energi tekanan menjadi energi kinetik (Sinamo, 2015). Film ini tidak stabil karena adanya ketidakstabilan Rayleigh–Taylor dan Kelvin–Helmholtz, sehingga pecah menjadi butiran halus (Drazin, 2015). Ukuran butiran dipengaruhi oleh rasio gaya inersia terhadap tegangan permukaan yang dinyatakan dalam bilangan Weber (We):

$$We = \frac{\rho g v^2 d}{\sigma} \tag{1}$$

dengan ρ_g = massa jenis udara, v = kecepatan relatif butiran, d = diameter butiran, dan σ = tegangan permukaan cairan (Mahdi et al., 2024).

Setelah keluar dari nosel, tetesan cairan mengalami gaya gesek udara (*drag force*) yang menyebabkan deformasi dan fragmentasi lanjutan. Proses ini terus terjadi hingga ukuran butiran mencapai batas kritis berorde nanometer di mana gaya inersia tidak lagi mampu mengatasi gaya kohesif akibat tegangan permukaan (Tamburrino et al., 2025).

2.2.3 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

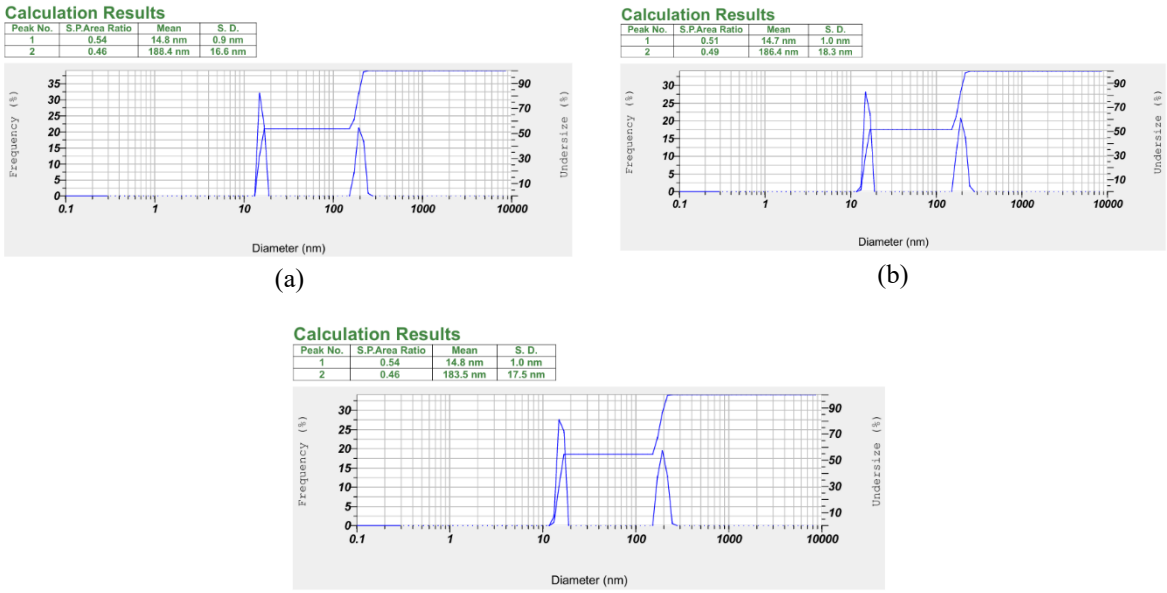
3.1 Pengaruh Penyimpanan terhadap Stabilitas Ukuran Nanoemulsi

Diameter rata-rata dan standar deviasi tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili diukur tepat setelah disintesis (0 hari) dan setelah 120 hari, ditunjukkan pada Gambar 2 dan 4. Hasil pengukuran potensial zeta dan mobilitas elektroporetik pada 0 hari ditunjukkan pada Gambar 3. Semua data diameter rata-rata, mobilitas elektroporetik, dan potensial zeta dirangkum pada Tabel 1, sedangkan standar deviasi dirangkum pada Tabel 2. Semua replika menunjukkan dua puncak distribusi diameter (populasi #1 dan #2), dengan luas puncak (% S.P. *area ratio*) yang merepresentasikan persentase masing-masing populasi dalam setiap replika.

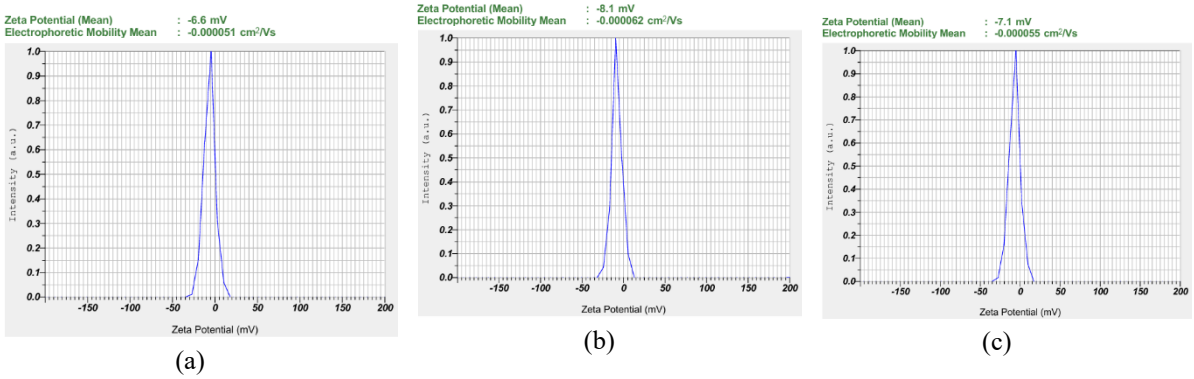
Pada hari ke-0, populasi #1 berdiameter rata-rata 14,8 nm dan populasi #2 185 nm. Setelah 120 hari, ukuran meningkat menjadi 18 nm dan 272–290 nm, disertai penurunan proporsi populasi kecil dan kenaikan populasi besar, menandakan difusi massa dari droplet kecil ke besar. Standar deviasi meningkat signifikan (1,0 menjadi 2,7 nm dan 17,5 menjadi 148,7 nm), menunjukkan distribusi melebar dan polidispersitas tinggi akibat Ostwald *ripening*. Fenomena ini dipicu oleh kelarutan senyawa volatil pada minyak *flower musk* dan lili; meskipun PEG-40 HCO memberi penghalang sterik, difusi antar droplet tetap terjadi (Dianingsih et al., 2016; Bezerra et al., 2024).

Secara teoritis, ketidakstabilan nanoemulsi selama penyimpanan disebabkan oleh kombinasi Ostwald *ripening* dan koalisi. Menurut persamaan Kelvin, kelarutan (P) droplet berbanding terbalik dengan jari-jari (r):

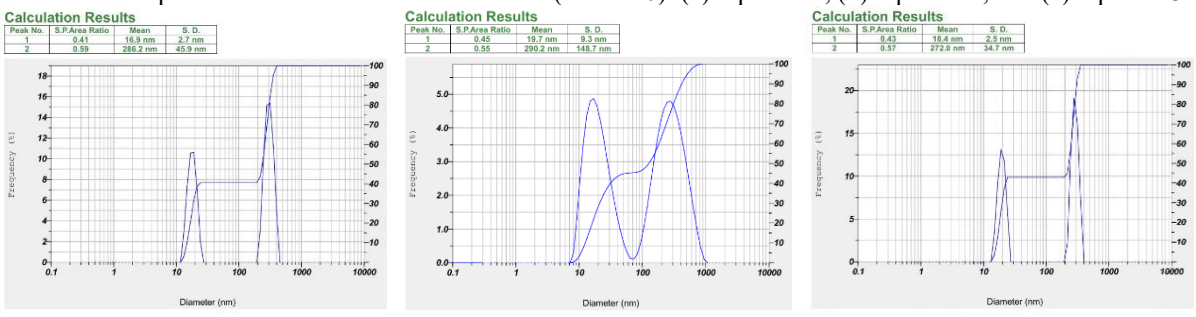
$$P(r) = P_0 \exp\left(\frac{2\gamma V_m}{rRT}\right) \tag{2}$$



Gambar 2 Distribusi diameter dan standar deviasi (SD) tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur tepat setelah sintesis selesai dilakukan (hari ke-0): (a) replika #1, (b) replika #2, dan (c) replika #3



Gambar 3 Potensial zeta (zeta potential) dan mobilitas elektroporetik (electrophoretic mobility mean) tiga replika nanoemulsi campuran minyak flower musk dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur tepat setelah sintesis selesai dilakukan (hari ke-0): (a) replika #1, (b) replika #2, dan (c) replika #3.



Gambar 4 Distribusi diameter dan standar deviasi (SD) tiga replika nanoemulsi campuran minyak flower musk dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur setelah 120 hari penyimpanan: (a) replika #1, (b) replika #2, dan (c) replika #3

dimana P_0 adalah kelarutan permukaan datar, γ adalah tegangan antarmuka, V_m adalah volume molar fase terdispersi, R adalah konstanta gas ideal, dan T adalah temperatur absolut. Nanoemulsi kecil memiliki kelarutan lebih tinggi sehingga molekulnya berdifusi ke droplet lebih besar, menyebabkan

pertumbuhan partikel (Firmansyah et al., 2022). Nilai potensial zeta -6,6 hingga -8,1 mV menunjukkan tolakan elektrostatik lemah, sehingga koalisi antar partikel masih terjadi dan menurunkan stabilitas sistem.

Tabel 1 Mobilitas elektroporetik, potensial zeta, dan diameter rata-rata tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur tepat setelah sintesis selesai dilakukan (0 hari) dan setelah 120 hari masa penyimpanan.

Replika	Mobilitas Elektroporetik Rata-rata ($cm^2/V.s$)	Potensial Zeta (mV)	Populasi	0 hari		120 hari	
				Diameter Rata-rata (nm)	% luas puncak	Diameter Rata-rata (nm)	% luas puncak
#1	-0,000051	-6,6	#1	14,8	54	16,9	41
			#2	188,4	46	286,2	59
#2	-0,000062	-8,1	#1	14,7	51	19,7	45
			#2	186,4	49	290,2	55
#3	-0,000055	-7,1	#1	14,8	54	18,4	43
			#2	183,5	46	272,0	57

Tabel 2 Standar deviasi tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO yang diukur pada 0 hari dan setelah 120 hari masa penyimpanan.

Replika	Populasi	Standar Deviasi (nm)	
		0 hari	120 hari
#1	#1	0,9	2,7
	#2	16,6	45,9
#2	#1	1,0	9,3
	#2	18,3	148,7
#3	#1	1,0	2,5
	#2	17,5	34,7

Koalisi, yaitu penggabungan droplet menjadi partikel lebih besar, umumnya dihambat oleh penghalang sterik rantai PEG dari surfaktan PEG-40 HCO (Katz et al., 2024). Namun setelah 120 hari, lapisan antarmuka menipis sehingga terjadi koalisi, ditunjukkan oleh kenaikan diameter populasi #2 dari 185 menjadi 286 nm dan standar deviasi dari 17,5 menjadi 148,7 nm. Penurunan luas puncak populasi kecil dan pertumbuhan partikel besar menegaskan terjadinya Ostwald *ripening*. Secara keseluruhan nanoemulsi bersifat kinetik tidak stabil karena PEG-40 HCO belum sepenuhnya menghambat difusi molekul minyak.

3.2 Pengaruh Pemanasan terhadap Stabilitas Ukuran Nanoemulsi

Tabel 3 Diameter rata-rata tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO sebelum dipanaskan dan setelah dipanaskan pada temperatur 35°C, 40°C, dan 45°C, masing-masing selama 15 menit.

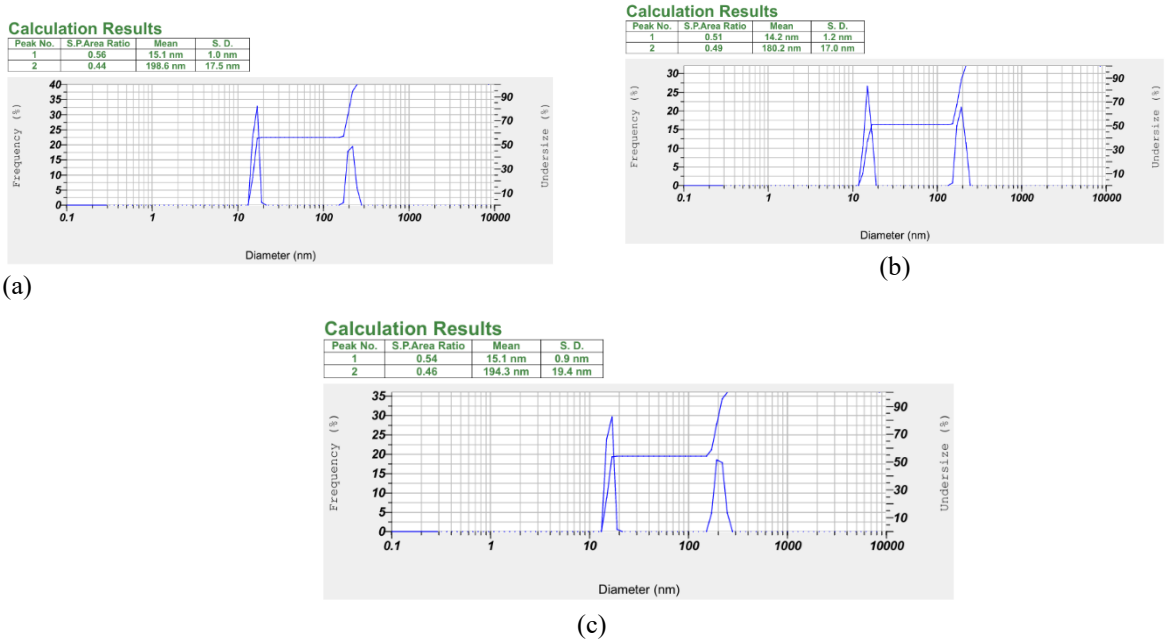
Replika	Populasi	Diameter Rata-rata (nm)							
		Sebelum dipanaskan		Setelah dipanaskan (masing-masing selama 15 menit)					
		24 °C	% luas puncak	35 °C	% luas puncak	40 °C	% luas puncak	45 °C	% luas puncak
#1	#1	16,9	41	15,1	56	15,3	56	14,7	58
	#2	286,2	59	198,6	44	193,7	44	184,5	42
#2	#1	19,7	45	14,2	51	15,4	56	15,5	59
	#2	290,2	55	180,2	49	194,8	44	185,8	41
#3	#1	18,4	43	15,1	54	15,3	56	14,8	58
	#2	272,0	57	194,3	46	185,8	44	192,2	42

Setelah 120 hari penyimpanan, tiga replika nanoemulsi dipanaskan bertahap dari 24°C ke 35°C, 40°C, dan 45°C masing-masing selama 15 menit untuk mengamati stabilitas ukuran partikel. Diameter rata-rata (*mean*) dan standar deviasi (SD) tiap replika pada setiap temperatur ditampilkan di Gambar 5–

7, sedangkan ringkasan diameter rata-rata dan % luas puncak (S.P. *area ratio*) disajikan di Tabel 3, dan SD di Tabel 4.

Tabel 4 Standar Deviasi tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO sebelum dipanaskan (temperatur lingkungan, 24ºC) dan setelah dipanaskan pada temperatur 35ºC, 40ºC, dan 45ºC, masing-masing selama 15 menit.

Replika	Populasi	Standar Deviasi (nm)			
		Sebelum dipanaskan	Setelah dipanaskan masing-masing selama 15 menit pada temperatur		
		24 ºC	35 ºC	40 ºC	45 ºC
#1	#1	2,7	1,0	0,9	1,0
	#2	45,9	17,5	11,8	17,5
#2	#1	9,3	1,2	0,8	1,5
	#2	148,7	17,0	11,8	22,6
#3	#1	2,5	0,9	0,8	0,9
	#2	34,7	19,4	11,1	19,6

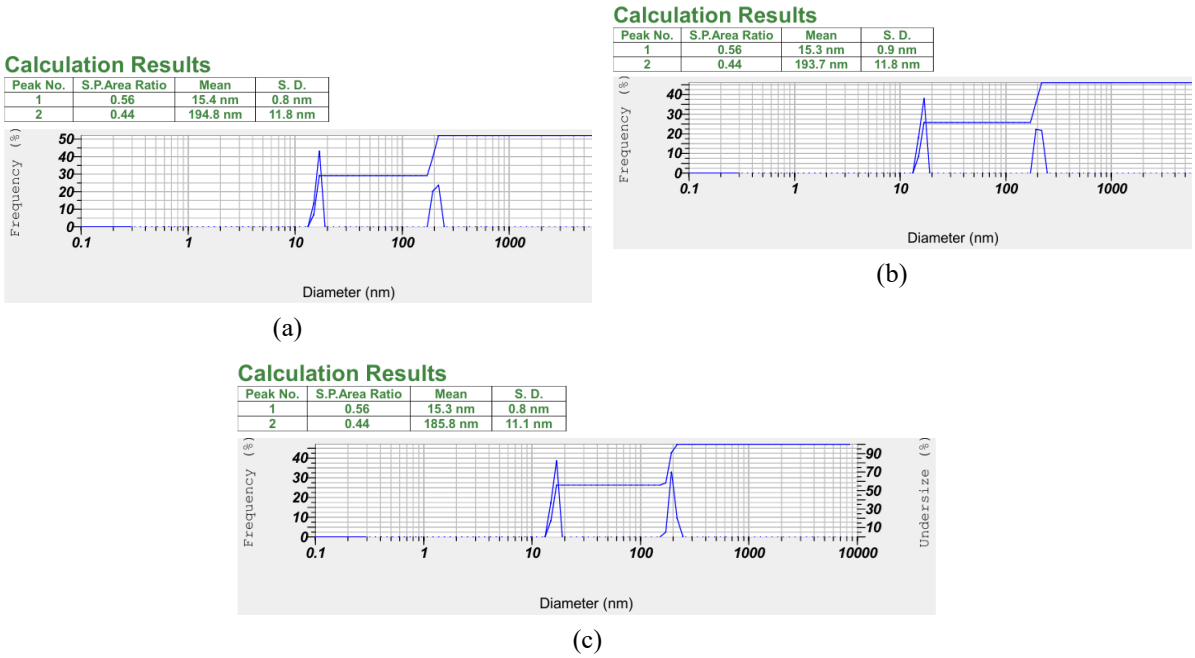


Gambar 5 Distribusi diameter dan standar deviasi (SD) tiga replika nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur setelah pemenasan dilakukan pada temperatur 35ºC selama 15 menit: (a) replika #1, (b) replika #2, dan (c) replika #3

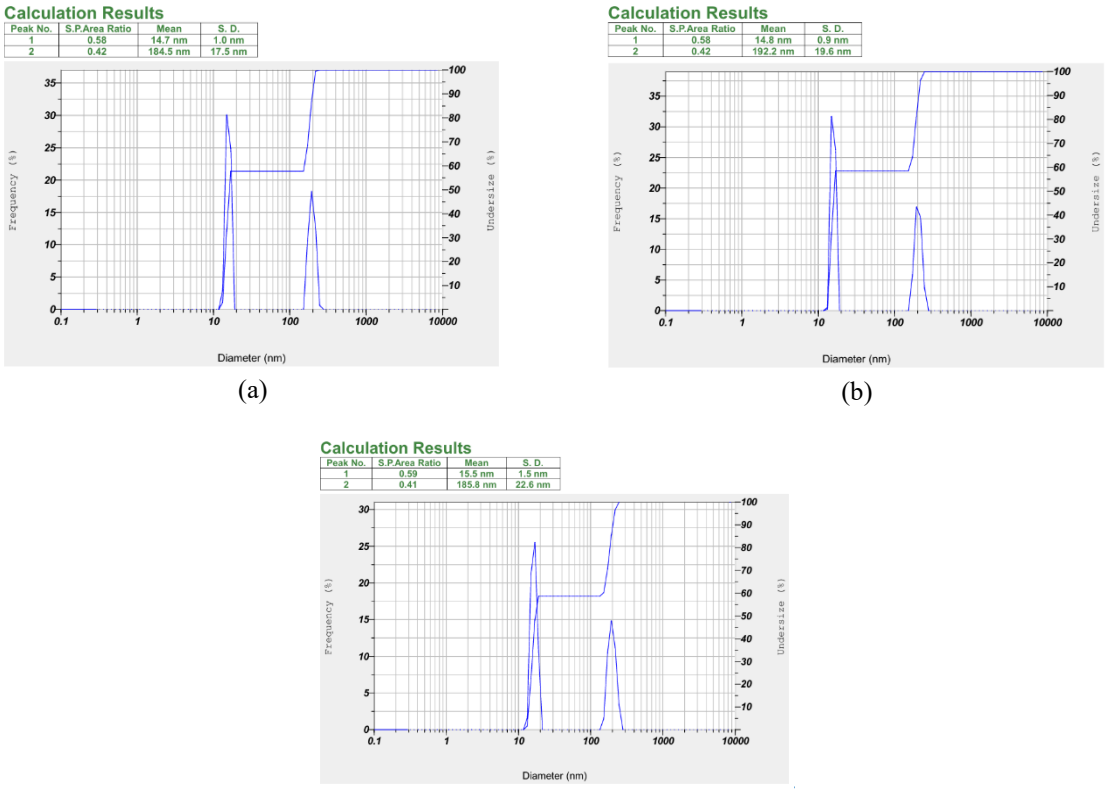
Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, populasi #1, yang merupakan populasi yang memiliki persentasi % luas puncak lebih kecil, memiliki diameter rata-rata yang sangat kecil (16.9–19.7 nm), sedangkan populasi #2 memiliki diameter rata-rata yang jauh lebih besar (272.0–290.2 nm). Pemanasan dari temperatur 24°C ke 35°C, ke 40°C, dan ke 45°C selama masing-masing 15 menit menunjukkan tren yang konsisten, yaitu diameter rata-rata kedua populasi, baik yang kecil maupun yang besar, cenderung menurun seiring dengan peningkatan temperatur. Penurunan diameter rata-rata pada populasi #2 (yaitu dari 286.2 nm menjadi 184.5 nm pada replika #1) jauh lebih signifikan dari pada populasi #1. Perubahan ini disertai dengan perubahan persentasi populasi (% luas puncak), dimana persentasi populasi #1 meningkat secara substansial, sementara persentasi populasi populasi #2 menurun.

Perubahan standar deviasi nanoemulsi ditunjukkan pada tabel 4. Pada temperatur ruang 24°C, populasi #1 memiliki standar deviasi yang relatif rendah (2.5–9.3 nm), sedangkan populasi #2 memiliki standar deviasi yang sangat tinggi (34.7–148.7 nm). Standar deviasi yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa distribusi ukurannya sangat tidak seragam. Pemanasan secara bertahap terlihat menurunkan standar deviasi yang drastis pada kedua populasi, dengan nilai standar deviasi populasi #1 mendekati 1 nm, dan populasi #2 menurun secara signifikan pada temperatur 35°C dan 40°C. Namun, pada

temperatur 45°C, standar deviasi populasi #2 kembali meningkat, mengindikasikan bahwa pada temperatur ini, stabilitasnya mulai terpengaruh.



Gambar 6 Distribusi diameter dan standar deviasi (SD) tiga replika nanoemulsi campuran minyak flower musk dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur setelah pemenasan dilakukan pada temperatur 40oC selama 15 menit: (a) replika #1, (b) replika #2, dan (c) replika #3



Gambar 7 Distribusi diameter dan standar deviasi (SD) tiga replika nanoemulsi campuran minyak flower musk dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi surfaktan PEG-40 HCO. Diukur setelah pemenasan dilakukan pada temperatur 45oC selama 15 menit: (a) replika #1, (b) replika #2, dan (c) replika #3

Perubahan diameter rata-rata, standar deviasi, dan persentasi populasi yang teramati pada nanoemulsi ini dapat dianalisis dari perspektif dinamika molekuler pada antarmuka. Inti dari nanoemulsi terdiri dari molekul-molekul lipofilik dari minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili, yang di sekelilingnya terdapat lapisan pelindung yang dibentuk oleh surfaktan polimer PEG-40 HCO. Peningkatan temperatur memberikan energi kinetik yang lebih tinggi pada sistim nanoemulsi tersebut, yakni meningkatkan frekuensi tumbukan antar molekul-molekul pada sistim. Namun, alih-alih menyebabkan ketidakstabilan, pemanasan justru memicu restrukturisasi. Penurunan drastis diameter rata-rata populasi #2 dan peningkatan persentasi pada populasi #1 (% luas puncak) hanya mungkin dapat terjadi jika pemanasan memfasilitasi pecahnya agregat nanoemulsi menjadi nanoemulsi-nanoemulsi yang lebih kecil, yang kemudian bergabung dengan populasi #1.

Perubahan persentasi % luas puncak dari populasi #2 ke populasi #1 pada ketiga replika, secara jelas menunjukkan bahwa nanoemulsi berukuran besar bertransformasi menjadi nanoemulsi berukuran kecil yang lebih stabil. Fenomena ini dapat disebabkan oleh peningkatan mobilitas rantai polimer PEG-40 HCO pada temperatur yang lebih tinggi, yang memungkinkan molekul surfaktan untuk menata ulang dirinya secara lebih efisien di antarmuka minyak-air. Penataan ulang ini menciptakan lapisan pelindung yang lebih rapat dan stabil, yang pada akhirnya menghasilkan nanoemulsi-nanoemulsi dengan ukuran yang lebih kecil dan lebih seragam (Redhita et al., 2022) serta mencegah koalisi meski kelarutan minyak meningkat (Muneer et al., 2020). Perubahan ini dapat juga melibatkan peningkatan kelarutan molekul minyak ke dalam fase air akibat naiknya tempertur, yang memfasilitasi transfer massa dari nanoemulsi yang berukuran lebih besar ke nanoemulsi yang berukuran lebih kecil yang lebih stabil.

Pemanasan nanoemulsi umumnya mendorong terjadinya ketidakstabilan, utamanya melalui dua mekanisme: koalisi dan Ostwald *ripening*. Koalisi, dimana dua atau lebih nanoemulsi bergabung (berkoalisi) menjadi satu nanoemulsi yang lebih besar, adalah proses yang didorong oleh tabrakan nanoemulsi yang meningkat akibat naiknya energi kinetik termal. Namun, koalisi pada sistem ini efektif dicegah oleh stabilisasi sterik yang disediakan oleh surfaktan polimer PEG-40 HCO. Rantai polimer PEG-40 HCO ini, yang teradsorpsi pada antarmuka nanoemulsi, bertindak sebagai penghalang fisik. Ketika dua nanoemulsi mendekat, tumpang tindih rantai polimer ini menciptakan gaya tolak yang signifikan, yang secara efektif mencegah koalisi. Gaya gaya tolak ini dapat dimodelkan menggunakan teori DLVO yang diperluas, dimana gaya tolak sterik menjadi dominan pada jarak antar-nanoemulsi yang sangat dekat, mencegah energi kinetik termal (terkait dengan koalisi) untuk mengatasi hambatan potensial tersebut.

Mekanisme kedua, Ostwald *ripening*, melibatkan difusi molekul minyak dari nanoemulsi kecil (yang memiliki tekanan Laplace lebih tinggi) ke nanoemulsi yang lebih besar (yang memiliki tekanan Laplace lebih rendah) melalui fase air. Proses ini dijelaskan oleh persamaan Kelvin-Laplace, yang menunjukkan bahwa kelarutan minyak (C) pada antarmuka nanoemulsi meningkat secara eksponensial seiring dengan penurunan radius nanoemulsi (r):

$$C = C_0 \exp\left(\frac{2\gamma v}{rkT}\right) \tag{3}$$

dimana C_0 adalah kelarutan pada permukaan datar, γ adalah tegangan antarmuka, v adalah volume molekul, k adalah konstanta Boltzmann, dan T adalah temperatur. Secara teoretis, peningkatan temperatur meningkatkan C_0 (kelarutan minyak), sehingga mempercepat Ostwald *ripening*.

Namun, data yang diperoleh di atas menunjukkan hasil yang berlawanan. Pada rentang temperatur 35°C hingga 45°C, terjadi penurunan diameter rata-rata kedua populasi nanoemulsi dan perubahan persentasi dari populasi #2 ke populasi #1. Fenomena ini mengindikasikan bahwa energi termal yang diterapkan tidak mendukung ketidakstabilan, melainkan mendorong restrukturisasi termal yang menguntungkan. Pada temperatur ruang (24°C), populasi #2 yang besar dan sangat polidispers (ditandai dengan standar deviasnya yang sangat tinggi) kemungkinan besar terdiri dari agregat nanoemulsi yang tidak stabil atau nanoemulsi yang tidak tersurfaktan secara sempurna selama sintesis awal. Pemanasan menyediakan energi yang cukup untuk mengatasi hambatan kinetik yang menjaga agregat-agregat ini tetap bersama. Akibatnya, energi ini memecah agregat menjadi nanoemulsi-nanoemulsi yang lebih kecil, yang kemudian dapat distabilkan oleh molekul-molekul PEG-40 HCO yang lebih lincah pada temperatur yang lebih tinggi. Efisiensi stabilisasi ini meningkat seiring dengan naiknya temperatur (hingga titik tertentu), karena molekul polimer PEG-40 HCO dapat menyesuaikan

konformasi rantainya dengan lebih baik pada antarmuka nanoemulsi, membentuk lapisan pelindung yang lebih optimal dan rapat.

Peningkatan standar deviasi populasi #2 pada 45°C dapat diinterpretasikan sebagai titik dimana kinetika sistem mulai mendekati ambang batas stabilitas. Meskipun restrukturisasi masih mendominasi (karena diameter rata-ratanya terus menurun), laju tumbukan nanoemulsi juga meningkat. Pada temperatur 45°C ini, beberapa nanoemulsi yang baru terbentuk mungkin tidak memiliki cukup surfaktan untuk menstabilisasinya secara sempurna, yang dapat menyebabkan awal dari koalisi minor. Namun, efek ini tidak cukup signifikan untuk membalikkan tren penurunan diameter rata-rata, dan mekanisme restrukturisasi dan stabilisasi oleh PEG-40 HCO, masih lebih dominan.

Secara keseluruhan, sebagaimana ditunjukkan oleh data hasil pengukuran di atas, pemanasan nanoemulsi yang distabilkan oleh PEG-40 HCO ini tidak menyebabkan destabilisasi, melainkan memicu restrukturisasi positif yang menghasilkan penurunan diameter rata-rata dan peningkatan homogenitas. Penurunan standar deviasi yang signifikan dan perubahan persentasi populasi dari ukuran besar ke kecil menunjukkan bahwa energi termal memfasilitasi pemecahan agregat yang tidak stabil, yang kemudian distabilkan secara efektif oleh surfaktan polimer PEG-40 HCO.

IV. KESIMPULAN

Nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dienkapsulasi PEG-40 HCO telah berhasil disintesis dan didispersi di dalam air. Stabilitas ukurannya sebagai pengaruh waktu penyimpanan selama 120 hari dan pemanasan sampai pada temperatur 45ºC, telah diuji. Dari hasil yang diperoleh menunjukkan, diameter rata-rata nanoemulsi bertambah secara signifikan selama 120 hari masa penyimpanan. Penambahan diameter rata-ratanya terjadi karena Ostwald *ripening* dan koalisi antar nanoemulsi. Ketika nanoemulsi dipanaskan secara bertahap, dari temperatur 24ºC ke temperatur 30ºC, ke 40ºC, dan ke 45ºC, diameter rata-rata nanoemulsi juga berubah, hanya perubahannya dari besar menjadi lebih kecil. Pemanasan nanoemulsi menyebabkan terjadinya restrukturisasi molekul-molekul penyusun nanoemulsi dan molekul-molekul surfaktan PEG-40 HCO sehingga memperkecil ukurannya. Pemanasan menyebabkan peningkatan mobilitas molekul-molekul polimer PEG-40 HCO sehingga molekul-molekul ini menata ulang dirinya secara lebih efisien di antarmuka campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili dengan air. Penataan ulang ini menciptakan lapisan pelindung yang lebih rapat dan stabil, yang pada akhirnya menghasilkan nanoemulsi-nanoemulsi dengan ukuran yang lebih kecil. Jadi, nanoemulsi campuran minyak *flower musk* dan minyak atsiri lili yang dihasilkan pada penelitian ini, memiliki stabilitas ukuran yang rendah.

DAFTAR PUSTAKA

Amin, S., & Guspiana, R. (2025). Tinjauan Kimia Medisinal Potensi Ekstrak Minyak Atsiri Cengkeh (Syzygium Aromaticum) Bagi Kesehatan. Journal of Public Health Science (JoPHS), 2(2), 153-56. https://doi.org/10.70248/jophs.v2i2.2194

Azizah, S.R., & Qotrunnada, N. (2022). Kajian Pustaka Pemanfaatan Essential Oils Sebagai Aromaterapi Dalam Perawatan Kulit. MEDFARM: Jurnal Farmasi dan Kesehatan, 11(1), 62–77. https://doi.org/10.48191/medfarm.v11i1.98

Bezerra, I.C., Santos, E.R., Bisneto, J.S.R., Perruci, P.P., Ferreira, A.I., Macedo, D.C., Luz, M.A., Galdino, T.P., Machado, G., Magalhaes, N.S., Nogueira, M.C., & Gubert, P. (2024). Synthesis and Physicochemical Stability of a Copaiba Balsam Oil (Copaifera sp.) Nanoemulsion and Prospecting of Toxicological Effects on the Nematode Caenorhabditis Elegans. Jurnal ACS OMEGA, 9(9), 39100−39118. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05930

Dianingsih, N., Purnomo, E.H., & Muchtadi, T.R. (2016). Sifat Reologi Dan Stabilitas Fisik Minuman Emulsi Minyak Sawit [Rheological Properties and Physical Stability of Palm Oil Emulsion Drink]. J. Teknol. dan Industri Pangan, 27(2), 165-174. https://doi.org/10.6066/jtip.2016.27.2.165

Drazin, P. (2015). Kelvin – Helmholtz Instability. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 3(2), 343. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00190-0

Farsam, H., Amanlou, M., Amin, G., Chegini, G.N., Salehisurmaghi, M.H. & Shafiee, A. (2003). Anatomical and Phytochemical Study of Lilium Ledebourii (Baker) Boiss: A Rare Endemic Species in Iran. DARU: Journal of Pharmaceutical Sciences, 11(4), 164-170.

Firmansyah, F., Wulandari, W., Muhtadi, W.K., & Nofriyanti (2022). Optimasi Formula Nanoemulsi Antioksidan Minyak Nilam (Pogostemon cablin Benth) dengan Metode Box Behnken Design. Jurnal Mandala Pharmacon Indonesia, 8(2), 295–306. https://doi.org/10.35311/jmpi.v8i2.259

Gupta, A., Eral, H.B., Hatton, T.A., & Doyle, P.S. (2016). Nanoemulsions: Formation, Properties and Aplication. Royal Society Of Chemistry. http://dx.doi.org/10.1039/C5SM02958A

Katz, M., Santos, M.M.M. & Afonso, C.A.M. (2024). Striving for Uniformity: A Review on Advances and Challenges To Achieve Uniform Polyethylene Glycol. Jurnal Organic Process Research & Development (OPR&D), 8(2), 860–890. https://doi.org/10.1021/acs.oprd.3c00428

Kawasaki, M., Kuroyanagi, S., Ito, T., Morita, H., Tanaka, Y., & Toyooka, N. (2017). Synthesis and odor properties of Phantolide analogues. Tetrahedron, 73(15),2089-2099. https://doi.org/10.1016/j.tet.2017.02.055

Mahdi, L.A.A., Abdul, H.A., & Chaichan, M.T. (2024). Results in Engineering Using froude and weber numbers to represent the changes in the flow pattern from stratified to stratified-wavy or plug for wire-on-tube condenser. Results in Engineering, 24, 103001. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103001

Muneer, R., Hashmet, M.R., & Pourafshary, P. (2020). Fine Migration Control in Sandstones: Surface Force Analysis and Application of DLVO Theory. Jurnal CAS Omega, 5(5), 31624–31639. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03943

Nagargoje, M.S., Lazpita, E., Mena, J.G., & Clainche, S.L. (2025). A review on vortex dynamics in the healthy and dilated left ventricles and its application to heart health. Jurnal Flow, 5(10), 10-27. https://doi.org/10.1017/flo.2025.6

Nagtode, V.S., Cardoza, C., Yasin, H.K.A., Mali, S.N., Tambe, S.M., Roy, P., Singh, K., Goel, A., Amin, P.D., Thorat, B.R., Cruz, J.N., & Pratap, A.P. (2023). Green Surfactants (Biosurfactants) : A Petroleum-Free Substitute for Sustainability-Comparison, Applications, Market, and Future Prospects. Journal ACS OMEGA, 8(8), 11674−11699. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00591

Nugroho, R.D., Rahman, T., & Utomo, S.H.T. (2024). Investigasi Muatan Elektrik Permukaan dari Beberapa Jenis Tack Coat dan Agregat Bahan Perkerasan. Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur, 1–6. https://snti.ft.ugm.ac.id/wp-content/uploads/sites/25/2024/06/SNTI_Rizki-Damarsasi-Nugroho_2024.pdf

Purnami (2014). Studi Numerik Pengaruh Variasi Jumlah Saluran Masuk Pressure Swirl Atomizer Terhadap Karakteristik Spray. Jurnal Rekayasa Mesin, 5(3), 285-290. https://doi.org/10.0000/jrm.2014.129775

Rachmawati, H., Novel, M.A., Ayu, S., Berlian, G., Tandrasasmita, O.M., Tjandrawinata, R.R., & Anggadiredja, K. (2017). The In Vitro–In Vivo Safety Confirmation of PEG-40 Hydrogenated Castor Oil as a Surfactant for Oral Nanoemulsion Formulation. Sientica Pharmaceutica. https://doi.org/10.3390/scipharm85020018

Redhita, L.A., Beandrade, M.U., Putri, I.K., & Anindita, R. (2022). Formulasi dan Evaluasi Nanoemulsi Ekstrak Daun Kemangi (Ocimum basilicum L.) dengan Variasi Konsentrasi. Jurnal Mitra Kesehatan (JMK), 04, 80-91. https://doi.org/10.47522/jmk.v4i2.134

Sanchez-gaitán, E. & González-lópez, V. (2025). Polydispersity and Composition Stability in a Long-Term Follow-Up of Palmarosa (Cymbopogon Martini) and Tea Tree (Melaleuca Alternifolia) O/W Nanoemulsions for Antibacterial Use. Colloids and Interfaces, 9(5), 1–26. https://doi.org/10.3390/colloids9010005

Sinamo, A.S. (2015). Pengukuran Kecepatan Peluru Munisi Kaliber Kecil dengan Sistem Konversi Tekanan. Jurnal Inovasi Pertahanan, 1(1), 65–75. https://doi.org/10.5281/jip.v1i1.2015

Sitinjak, F.Y., Budiman, A., Aulifa, D.L., & Sinala, S. (2025). Aplikasi Teknologi Mikroenkapsulasi dalam Meningkatkan Stabilitas dan Efektivitas Bahan Aktif pada Produk Kosmetik : Kajian Literatur. Media Kesehatan Politeknik Kesehatan Makassar, XX(1), 153-162. https://doi.org/10.32382/medkes.v20i1.1451

Swastika, N.P.W.L., & Nugroho, G. (2024). Analisis Numerik Pengaruh Desain Kanal Inlet Terhadap Performansi Aliran Vortex pada Gravitational Water Vortex Power Plant (GWVPP). Jurnal Teknik ITS, 13(1), 34–41. https://doi.org/10.12962/j23373539.v13i1.144961

Soni, M., Yadav, A., Maurya, A., Das, S., Dubey, N.K., & Dwivedy, A.K., (2023). Advances in Designing Essential Oil Nanoformulations: An Integrative Approach to Mathematical Modeling with Potential Application in Food Preservation. Foods, 12(4017). https://doi.org/10.3390/foods12214017

Tamburrino, A., & Niño, Y. (2025). The Universal Presence of the Reynolds Number. fluids, 1-37. https://doi.org/10.3390/fluids10050117