JURNAL FARMASIMED (JFM)
E-ISSN: 2655-0814
https://ejournal.medistra.ac.id/index.php/JFM

Pengaruh Waktu Homogenisasi, Kecepatan Pengadukan, dan Suhu terhadap Karakteristik Fisikokimia Sediaan Nanoemulsi

Effects of Homogenization Time, Stirring Speed, and Temperature on Physicochemical Characteristics of Nanoemulsion Preparation

Diski Wahyu Wijianto[1], Arifah Sri Wahyuni[2*], Anita Sukmawati[3], Hanidya Fidela Ulayya[4]

[1]*Doctoral Program in Pharmacy, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. Ahmad Yani No. 157, Pabelan, Sukoharjo, Jawa Tengah, Indonesia 5716*
[2,3]*Faculty of Pharmacy, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. Ahmad Yani No. 157, Pabelan, Sukoharjo, Jawa Tengah, Indonesia 57169*
[4]*Department of Pharmacy, Faculty of Health Sciences, Universitas Kusuma Husada Surakarta, Jl. Jaya Wijaya No.11, Kadipiro, Bajarsari, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia 57136*
[1]*Department of Pharmacy, Faculty of Health Sciences, Universitas Aisyah Pringsewu, Jl. Raya Ahmad Yani No.1A, Tambak Rejo, Wonodadi, Pringsewu, Lampung, Indonesia, 35372*
Email: asw224@ums.ac.id

Abstrak

Latar Belakang: Kinerja nanoemulsi dipengaruhi oleh kondisi proses, tetapi kontribusi relatif waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu terhadap berbagai atribut fisikokimia belum sepenuhnya dipahami. **Tujuan:** Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu terhadap karakteristik fisikokimia nanoemulsi berbasis air suling, minyak kemiri, dan Span 80 serta menentukan kondisi proses optimum. **Metode:** Nanoemulsi diformulasikan menggunakan candlenut oil 11,2% sebagai fase minyak, Span 80 81,4% sebagai emulsifier, dan aquadest 7,4% sebagai fase air. Formulasi diproses pada variasi waktu homogenisasi 10–20 menit, kecepatan pengadukan 1.000–5.000 rpm, dan suhu 35–55 °C. Transmitansi, pH, ukuran partikel, dan indeks polidispersitas (PDI) dievaluasi, kemudian dianalisis menggunakan regresi linear berganda dan analisis varians untuk menentukan pengaruh faktor proses dan kondisi optimum. **Hasil:** Kecepatan pengadukan merupakan faktor dominan terhadap transmitansi, ukuran partikel, dan PDI, sedangkan suhu memberikan pengaruh terbesar terhadap pH. Kondisi optimum diperoleh pada waktu homogenisasi 20 menit, kecepatan 5.000 rpm, dan suhu 55 °C, menghasilkan transmitansi 94,7%, ukuran partikel 86,3 nm, PDI 0,11, dan pH 5,4. **Kesimpulan:** Optimasi kondisi proses secara sistematis menghasilkan nanoemulsi dengan karakteristik fisikokimia yang baik, ditandai oleh transmitansi tinggi, ukuran partikel kecil, distribusi ukuran sempit, dan pH yang dapat diterima.

Kata kunci: Nanoemulsi; Optimasi proses; Kecepatan pengadukan; Ukuran partikel; Indeks polidispersitas

Abstract

Background: *Nanoemulsion performance is influenced by processing conditions; however, the relative contributions of homogenization time, stirring speed, and temperature to various physicochemical attributes are not yet fully understood.* ***Objective:*** *This study aimed to evaluate the effects of homogenization time, stirring speed, and temperature on the physicochemical characteristics of nanoemulsions composed of distilled water, candlenut oil, and Span 80, and to determine the optimum processing conditions.* ***Methods:*** *Nanoemulsions were formulated using 11.2% candlenut oil as the oil phase, 81.4% Span 80 as the emulsifier, and 7.4% distilled water as the aqueous phase. The formulations were processed using varying homogenization times (10–20 minutes), stirring speeds (1,000–5,000 rpm), and temperatures (35–55°C). Transmittance, pH, particle size, and polydispersity index (PDI) were evaluated and subsequently analyzed using multiple linear regression and analysis of variance to determine the influence of process factors and identify optimum conditions.*

[*]Corresponding author: Diski Wahyu Wijianto, Faculty of Pharmacy, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. Ahmad Yani No. 157, Pabelan, Sukoharjo, Jawa Tengah, Indonesia
E-mail : asw224@ums.ac.id
Doi : 10.35451/jfm.v9i1.3902
Received : September 10, 2026, Accepted: September 19, 2026, Published: October 30, 2026
Copyright: © 2026 Diski Wahyu Wijianto (s). Creative Commons License This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Results: *Stirring speed was the dominant factor affecting transmittance, particle size, and PDI, whereas temperature had the greatest influence on pH. Optimum conditions were achieved at a homogenization time of 20 minutes, a stirring speed of 5,000 rpm, and a temperature of 55°C, yielding a transmittance of 94.7%, a particle size of 86.3 nm, a PDI of 0.11, and a pH of 5.4.* ***Conclusion:*** *Systematic optimization of processing conditions resulted in nanoemulsions with favorable physicochemical characteristics, characterized by high transmittance, small particle size, narrow size distribution, and an acceptable pH.*

Keywords**:** *Nanoemulsion; Process optimization; Stirring speed; Particle size; Polydispersity index*

1. PENDAHULUAN

Nanoemulsi merupakan dispersi koloid yang stabil secara kinetik, yang dicirikan oleh ukuran droplet yang kecil, polidispersitas yang rendah, dan sifat optik yang baik. Karakteristik fisikokimianya sangat dipengaruhi oleh komposisi fase minyak, fase air, dan surfaktan, serta energi dan kondisi yang diterapkan selama proses pembuatan [1–4]. Emulsifikasi berenergi tinggi mendorong pemecahan droplet melalui gaya geser dan turbulensi, sehingga parameter proses menjadi faktor penting yang menentukan ukuran dan distribusi droplet akhir [2,3,5]. Di antara variabel proses, waktu homogenisasi dan kecepatan pengadukan secara langsung memengaruhi energi yang diberikan ke dalam emulsi. Peningkatan intensitas pengadukan dapat meningkatkan pemecahan droplet dan menurunkan ukuran droplet, meskipun proses yang berlebihan tidak selalu menghasilkan perbaikan lebih lanjut [6,7].

Suhu juga dapat memengaruhi proses emulsifikasi dengan mengubah viskositas dan interaksi antarmuka, sehingga memengaruhi pembentukan dan distribusi droplet [3,8]. Studi optimasi terkini lebih lanjut menunjukkan bahwa kondisi proses perlu dipertimbangkan secara bersama-sama untuk memperoleh karakteristik emulsi yang konsisten dan dapat direproduksi [7,8]. Sistem yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas air suling, minyak kemiri, dan Span 80. Kualitas fisikokimianya dievaluasi berdasarkan transmitansi, pH, ukuran partikel, dan indeks polidispersitas (PDI), yang secara keseluruhan menggambarkan kejernihan optik, kesesuaian fisikokimia, ukuran droplet, dan keseragaman distribusi ukuran [1,9,10]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kecepatan pengadukan dapat secara signifikan memengaruhi transmitansi dan ukuran partikel, sedangkan optimasi secara statistik dapat mengidentifikasi kondisi proses atau formulasi yang memberikan keseimbangan pada berbagai atribut mutu [9,11].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan pentingnya parameter proses dalam menghasilkan nanoemulsi dengan karakteristik fisikokimia yang optimal. Pada penelitian Nan dkk, melaporkan bahwa waktu pencampuran menggunakan *high-speed homogenizer* memengaruhi ukuran d*roplet* dan kecenderungan *creaming*, dengan keunggulan pada evaluasi dinamika pencampuran dan kombinasi surfaktan, tetapi belum mengevaluasi suhu dan kecepatan pengadukan secara simultan pada sistem minyak kemiri [12]. Sedangkan pada penelitian Karami dkk, menggunakan desain faktorial untuk mengoptimasi nanoemulsi minyak zaitun dengan mempertimbangkan konsentrasi komponen, kecepatan dan waktu homogenisasi, serta suhu, dengan keunggulan pada evaluasi multivariat dan ukuran droplet sekitar 40 nm; namun, sistem tersebut ditujukan untuk penghantaran obat intravena dan menggunakan minyak zaitun serta kombinasi surfaktan [13].Pada penelitian Adena dkk, menerapkan *Quality by Design* dan regresi linier berganda untuk mengevaluasi pengaruh suhu, laju penambahan air, dan kecepatan pengadukan terhadap ukuran droplet dan stabilitas, tetapi menggunakan metode *catastrophic phase inversion*, minyak MCT, dan Tween 80 [14]. Dengan demikian, penelitian ini melengkapi penelitian sebelumnya dengan mengevaluasi secara simultan waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu pada sistem air suling, minyak kemiri, Span 80, serta mengkaji pengaruhnya terhadap transmitansi, pH, ukuran partikel, dan PDI.

Oleh karena itu, penelitian ini menyelidiki pengaruh waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses terhadap transmitansi, pH, ukuran partikel, dan PDI menggunakan regresi linier berganda dan analisis varians. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kondisi proses yang memberikan kombinasi yang

seimbang antara kejernihan optik yang tinggi, ukuran partikel yang lebih kecil, distribusi ukuran yang sempit, dan pH yang dapat diterima.

2. METODE

Bahan dan Instrumentasi

Minyak kemiri, Span 80 (sorbitan monooleat), dan akuades masing-masing digunakan sebagai fase minyak, pengemulsi, dan fase air. Nanoemulsi dibuat menggunakan homogenizer high-shear Ultra-Turrax dan penangas air yang dikontrol secara termostatik (Memmert, Jerman). Komponen formulasi ditimbang menggunakan neraca analitik (OHAUS, USA). Persentase transmitansi diukur menggunakan spektrofotometer UV–Vis (UV MINI-1240, Shimadzu, Jepang), sedangkan ukuran partikel dan indeks polidispersitas (PDI) ditentukan menggunakan *particle size analyzer* berbasis dynamic light scattering (SZ-100 NanoPartica, Horiba, Jepang). pH diukur menggunakan pH meter (STARTER 3100, OHAUS, USA).

Pembuatan Nanoemulsi

Nanoemulsi dibuat menggunakan minyak kemiri sebagai fase minyak, Span 80 sebagai pengemulsi, dan akuades sebagai fase air. Komposisi formulasi dipertahankan konstan selama desain eksperimen, sedangkan kondisi proses divariasikan secara sistematis (Tabel 1). Pendekatan ini digunakan untuk mengisolasi pengaruh parameter proses terhadap karakteristik nanoemulsi sekaligus meminimalkan kemungkinan kontribusi variabilitas komposisi formulasi. Formulasi yang dipilih terdiri atas 11,2% minyak kemiri, 81,4% Span 80, dan 7,4% akuades, dengan total komposisi 100% [15]. Penggunaan energi mekanik yang terkontrol merupakan faktor penting dalam proses pemecahan droplet dan menentukan karakteristik nanoemulsi [1–3].

Tabel 1. Komposisi formulasi nanoemulsi

Komponen	Fungsi	Konsentrasi
Candlenut oil	Fase minyak	11,2%
Span 80	*Emulsifier*	81,4%
Aquadest	Fase Air	7,4%
Total komponen		100%

Komponen formulasi dicampurkan dan kemudian menjalani homogenisasi mekanik dalam kondisi proses yang terkontrol. Tiga parameter proses diteliti sebagai variabel independen, yaitu waktu homogenisasi (10–20 menit), kecepatan homogenisasi (1.000–5.000 rpm), dan suhu proses (35–55 °C). Parameter-parameter tersebut dipilih karena masukan energi mekanik dan kondisi proses dapat secara substansial memengaruhi pemecahan droplet, distribusi ukuran droplet, dan karakteristik fisikokimia nanoemulsi [2,3,6,7]. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa laju dan waktu homogenisasi dapat dioptimalkan secara sistematis untuk mengendalikan ukuran partikel dan respons fisikokimia lainnya dalam sistem nanoemulsi [15,16]. Homogenisasi high-speed rotor–stator juga telah terbukti sebagai pendekatan yang efektif untuk menghasilkan nanoemulsi dengan droplet berukuran kecil dan relatif seragam [6]. Selain itu, suhu proses dapat memengaruhi viskositas fase terdispersi, pemecahan droplet, dan stabilitas fisik nanoemulsi yang dihasilkan [6,15–17].

Rentang eksperimen 10–20 menit untuk waktu homogenisasi, 1.000–5.000 rpm untuk kecepatan homogenisasi, dan 35–55 °C untuk suhu proses dipilih berdasarkan uji pendahuluan dan mengacu pada kondisi proses yang telah dilaporkan sebelumnya [6,15–17]. Rentang tersebut dirancang untuk memberikan variasi yang memadai dalam masukan energi mekanik dan kondisi termal guna mengidentifikasi potensi efek individual dan interaktifnya terhadap karakteristik nanoemulsi, sekaligus menghindari proses yang terlalu intensif dan tidak diperlukan.

Karakterisasi Fisikokimia

Nanoemulsi yang dihasilkan dievaluasi berdasarkan persentase transmitansi, pH, ukuran partikel, dan indeks polidispersitas (PDI). Transmitansi digunakan untuk menilai kejernihan optik, sedangkan ukuran partikel dan

PDI digunakan untuk mengkarakterisasi dimensi droplet dan keseragaman distribusinya 1,7). pH diukur sebagai atribut mutu fisikokimia tambahan.

Analisis Statistik dan Optimasi Proses

Pengaruh waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu terhadap keempat respons dievaluasi menggunakan regresi linier berganda dan analisis varian (ANOVA). Kecukupan model dinilai menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan R^2 terkoreksi, sedangkan koefisien regresi terstandar digunakan untuk mengidentifikasi kontribusi relatif dari setiap variabel proses. Optimasi multi-respons dilakukan dengan mempertimbangkan transmitansi, ukuran partikel, PDI, dan pH secara simultan, sesuai dengan pendekatan optimasi nanoemulsi yang telah dilaporkan sebelumnya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Parameter Proses terhadap Transmitansi

Transmitansi merupakan salah satu parameter penting untuk mengevaluasi kejernihan optik dan homogenitas sistem nanoemulsi. Semakin besar nilai transmitansi, semakin kecil droplet yang terbentuk, semakin sedikit cahaya yang dihamburkan, dan semakin transparan dispersi yang dihasilkan [18]. Transmitansi nanoemulsi meningkat dari 59,0% menjadi 94,7% dengan adanya variasi parameter proses (Tabel 2). Transmitansi maksimum (94,7%) dicapai pada waktu homogenisasi 20 menit, kecepatan pengadukan 5000 rpm, dan suhu proses 55°C, sedangkan transmitansi minimum (59,0%) diamati pada waktu 10 menit, kecepatan 1000 rpm, dan suhu 35°C. Pengaruh waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses terhadap transmitansi dianalisis menggunakan analisis regresi linier berganda [10].

Tabel 2. Hasil pengaruh variabel (waktu (menit), kecepatan pengadukan (rpm), dan suhu (°C) terhadap nilai respons % transmitansi, pH, ukuran partikel (nm), dan indeks polidispersitas

No.	Waktu (menit)	Kecepatan pengadukan (rpm)	Suhu (°C)	Transmitan (%)	pH	Ukuran partikel (nm)	PDI
1.	10	1000	35	59,0	5,4	1020,1	0,70
2.	10	1000	45	62,2	5,4	863,5	0,63
3.	10	1000	55	68,8	5,3	737,8	0,56
4.	10	2500	35	70,0	5,5	667,7	0,51
5.	10	2500	45	74,5	5,4	561,4	0,48
6.	10	2500	55	77,5	5,4	482,4	0,43
7.	10	5000	35	85,0	5,5	328,2	0,35
8.	10	5000	45	87,2	5,4	246,7	0,30
9.	10	5000	55	88,8	5,4	197,7	0,23
10.	20	1000	35	62,5	5,4	851,1	0,64
11.	20	1000	45	68,1	5,4	719,0	0,56
12.	20	1000	55	71,9	5,3	640,0	0,49
13.	20	2500	35	85,0	5,4	319,6	0,33
14.	20	2500	45	87,2	5,4	252,3	0,31
15.	20	2500	55	88,8	5,3	200,8	0,24
16.	20	5000	35	90,2	5,4	165,1	0,20
17.	20	5000	45	92,5	5,4	122,5	0,15
18.	20	5000	55	94,7	5,4	86,3	0,11

Hasil ANOVA pada Tabel 3 menunjukkan bahwa model regresi sangat signifikan ($F = 41,594$) dengan koefisien determinasi ($R^2 = 0,899$), Hal ini berarti bahwa 89,9% variasi transmitansi dapat dijelaskan oleh ketiga parameter proses, Selain itu, koefisien determinasi terkoreksi (Adjusted $R^2 = 0,878$) menunjukkan bahwa model

regresi memiliki kemampuan prediksi yang kuat dan tingkat *overfitting* yang rendah, Persamaan regresi yang diperoleh adalah sebagai berikut:

Transmitansi (%) = 36,149 + 0,754(Waktu) + 0,006(Kecepatan pengadukan) + 0,323(Suhu)

Koefisien regresi menunjukkan bahwa semua variabel proses memberikan pengaruh positif terhadap transmitansi [9], Analisis statistik juga menunjukkan bahwa transmitansi dipengaruhi secara signifikan oleh waktu homogenisasi ($p = 0,001$), kecepatan pengadukan ($p < 0,001$), dan suhu proses ($p = 0,015$) (Tabel 4),

Tabel 3, Data ANOVA dan faktor dominan (variabel dengan pengaruh terbesar terhadap respons)

Variabel	R	R^2	Adjusted R	F	Faktor dominan (β)
Transmitan (%)	0,948	0,899	0,878	41,594	Kecepatan pengadukan (0,855)
pH	0,949	0,900	0,879	42,123	Suhu (-0,901)
Ukuran partikel	0,948	0,899	0,877	41,509	Kecepatan pengadukan (-0,851)
Indeks Polidispersitas	0,969	0,938	0,925	70,892	Kecepatan pengadukan (-0,856)

Keterangan: Faktor dominan ditentukan berdasarkan nilai absolut tertinggi dari koefisien β yang signifikan ($p < 0,05$),

Semua variabel proses memiliki koefisien regresi positif, yang berarti bahwa transmitansi meningkat seiring dengan peningkatan waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses, Dari variabel yang diteliti (Tabel 4), koefisien regresi terstandarisasi tertinggi ($\beta = 0,855$) menunjukkan bahwa transmitansi paling dipengaruhi oleh kecepatan pengadukan, diikuti oleh waktu homogenisasi ($\beta = 0,335$) dan suhu proses ($\beta = 0,235$), Kontribusi utama kecepatan pengadukan berkaitan dengan peningkatan gaya geser selama proses homogenisasi, Kecepatan pengadukan yang lebih tinggi menyebabkan pemecahan droplet dan menghasilkan ukuran droplet yang lebih kecil dan seragam, Hal ini mengurangi hamburan cahaya sehingga meningkatkan transmitansi karena lebih banyak cahaya dapat diteruskan melalui dispersi [8,18,19], Peningkatan suhu proses menurunkan viskositas fase minyak dan fase air sehingga meningkatkan pencampuran dan transfer energi selama homogenisasi serta meningkatkan efisiensi emulsifikasi [3,8], Namun, kontribusi suhu lebih kecil dibandingkan kecepatan pengadukan, yang menunjukkan bahwa energi mekanik memberikan pengaruh lebih besar terhadap transparansi nanoemulsi dibandingkan energi termal pada kondisi proses yang diteliti,

Tabel 4, Hasil analisis regresi linier berganda parameter proses terhadap karakteristik fisik nanoemulsi (transmitansi, pH, ukuran partikel, PDI)

Respon	Variabel	B	β	t	P-Value
Transmitan	Waktu (X_1)	0,754	0,335	3,948	0,001
	Kecepatan pengadukan (X_2)	0,006	0,855	10,078	<0,001
	Suhu (X_3)	0,323	0,235	2,763	0,015
pH	Waktu (X_1)	-0,002	-0,216	-2,556	0,023
	Kecepatan pengadukan (X_2)	$5,374 \times 10^{-6}$	0,203	2,400	0,031

Ukuran partikel	Suhu (X_3)	-0,005	-0,901	-10,681	<0,001
	Waktu (X_1)	-19,432	-0,341	-4,015	0,001
	Kecepatan pengadukan (X_2)	-0,147	-0,851	-10,020	<0,001
Indeks Polidispersitas (PDI)	Suhu (X_3)	-8,390	-0,240	-2,830	0,013
	Waktu (X_1)	-0,013	-0,370	-5,572	<0,001
	Kecepatan pengadukan (X_2)	$-9{,}034 \times 10^{-5}$	-0,856	-12,888	<0,001
	Suhu (X_3)	-0,006	-0,262	-3,942	0,001

Pengaruh Parameter Proses terhadap pH

Nilai pH merupakan parameter penting dalam karakterisasi nanoemulsi karena memengaruhi stabilitas fisikokimia dan keamanan produk, terutama untuk formulasi topikal, Seperti ditunjukkan pada Tabel 2, nilai pH nanoemulsi yang dibuat berada pada rentang 5,3–5,5, yang menunjukkan bahwa semua formulasi mempertahankan pH yang relatif stabil meskipun terdapat variasi waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses, Rentang pH tersebut juga sesuai dengan pH fisiologis kulit (4,5–6,5), sehingga menunjukkan kompatibilitas pH yang baik untuk aplikasi topikal [11,18], Hubungan antara parameter proses dan pH direpresentasikan melalui persamaan berikut, sebagaimana diperoleh dari analisis regresi linier berganda:

$$pH = 5{,}630 - 0{,}002(\text{Waktu}) + 5{,}374 \times 10^{-6}(\text{Kecepatan pengadukan}) - 0{,}005(\text{Suhu})$$

Koefisien regresi menunjukkan bahwa peningkatan waktu homogenisasi dan suhu proses cenderung menurunkan pH nanoemulsi [20], Peningkatan kecepatan pengadukan menunjukkan pengaruh positif yang kecil terhadap pH, Analisis regresi parsial (Tabel 3) menunjukkan bahwa waktu homogenisasi ($p = 0{,}023$), kecepatan pengadukan ($p = 0{,}031$), dan suhu proses ($p < 0{,}001$) memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap pH nanoemulsi ($p < 0{,}05$), Selain itu, hasil ANOVA (Tabel 4) menunjukkan bahwa model regresi memiliki kinerja prediktif yang baik dengan nilai R^2 sebesar 0,900 dan Adjusted R^2 sebesar 0,879, yang menunjukkan bahwa 90,0% variabilitas pH dapat dijelaskan oleh pengaruh gabungan waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses,

Berdasarkan koefisien regresi terstandarisasi (β), suhu proses ($\beta = -0{,}901$) merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap pH, diikuti oleh waktu homogenisasi ($\beta = -0{,}216$) dan kecepatan pengadukan ($\beta = 0{,}203$), Nilai β negatif pada suhu menunjukkan sedikit penurunan pH nanoemulsi seiring dengan peningkatan suhu proses, Suhu kemungkinan menjadi faktor dominan karena adanya perubahan sifat fisikokimia sistem emulsi selama proses [21], Peningkatan suhu proses menurunkan viskositas fase minyak dan fase air serta meningkatkan difusi molekuler, sehingga menghasilkan pencampuran fase minyak, surfaktan, dan fase air yang lebih baik [22], Meskipun pengaruh suhu terhadap pH signifikan secara statistik, perubahan yang diamati relatif kecil, menunjukkan bahwa formulasi mempertahankan pH yang relatif stabil pada kondisi proses yang diteliti [23,24],

Pengaruh Parameter Proses terhadap Ukuran Partikel

Ukuran partikel merupakan parameter penting dalam karakterisasi nanoemulsi karena menentukan stabilitas fisik, kejernihan optik, dan kinerja penghantaran obat [25], Ukuran partikel berada pada rentang 86,3 hingga 1020,1 nm (Tabel 2) dan secara umum menurun seiring dengan peningkatan waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses, Korelasi antara parameter proses dan ukuran partikel dinyatakan melalui persamaan regresi linier berganda berikut:

Ukuran Partikel = 1555,564 − 19,432(Waktu) − 0,147(Kecepatan pengadukan) − 8,390(Suhu)

Analisis regresi parsial menunjukkan bahwa ketiga parameter proses memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ukuran partikel ($p < 0,05$) (Tabel 4), Selain itu, model regresi menunjukkan kinerja prediktif yang baik, dengan $R^2 = 0,899$ dan Adjusted $R^2 = 0,877$, yang menunjukkan bahwa 89,9% variabilitas ukuran partikel dapat dijelaskan oleh model (Tabel 4).

Berdasarkan koefisien regresi terstandarisasi (β), kecepatan pengadukan memberikan pengaruh paling signifikan terhadap ukuran partikel (β = −0,851), diikuti oleh waktu homogenisasi (β = −0,341) dan suhu proses (β = −0,240), Pengaruh dominan kecepatan pengadukan dapat dikaitkan dengan gaya geser yang lebih tinggi yang dihasilkan selama homogenisasi, yang mendorong pemecahan droplet dan adsorpsi surfaktan pada antarmuka minyak–air [26], Sementara itu, waktu homogenisasi yang lebih lama dan suhu proses yang lebih tinggi meningkatkan efisiensi emulsifikasi dengan menurunkan viskositas sistem dan meningkatkan transfer energi yang lebih efektif [7,26], Penurunan ukuran partikel juga disertai dengan peningkatan transmitansi dan penurunan nilai PDI, yang menunjukkan terbentuknya droplet yang lebih kecil dan terdistribusi secara lebih seragam [18],

Pengaruh Parameter Proses terhadap Indeks Polidispersitas (PDI)

Indeks Polidispersitas (Polydispersity Index/PDI) merupakan ukuran keseragaman distribusi ukuran droplet dalam sistem nanoemulsi, Nilai PDI yang lebih rendah menunjukkan sistem yang lebih homogen dan distribusi ukuran yang lebih sempit [27], Nilai PDI dalam penelitian ini berada pada rentang 0,11–0,70, Nilai terendah sebesar 0,11 ditemukan pada waktu homogenisasi 20 menit, kecepatan pengadukan 5000 rpm, dan suhu proses 55°C, Kondisi ini juga dikaitkan dengan ukuran partikel terkecil dan transmitansi tertinggi, yang menunjukkan karakteristik dispersi yang lebih baik, Hubungan antara parameter proses dan PDI dinyatakan melalui persamaan regresi linier berganda berikut:

PDI = 1,102 − 0,013(Waktu) − $9,034 \times 10^{-5}$(Kecepatan pengadukan) − 0,006(Suhu)

Koefisien seluruh regresi bernilai negatif, yang berarti bahwa PDI cenderung menurun seiring dengan peningkatan waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses, Analisis regresi menunjukkan bahwa PDI dipengaruhi secara signifikan ($p < 0,05$) oleh ketiga parameter proses, Model regresi menunjukkan kinerja yang baik dengan $F = 70,892$, $R^2 = 0,938$, dan Adjusted $R^2 = 0,925$, Nilai R^2 menunjukkan bahwa waktu homogenisasi, kecepatan pengadukan, dan suhu proses secara bersama-sama dapat menjelaskan 93,8% variabilitas PDI, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model.

Parameter yang paling berpengaruh terhadap PDI adalah kecepatan pengadukan (β = −0,856), diikuti oleh waktu homogenisasi (β = −0,370) dan suhu proses (β = −0,262), berdasarkan koefisien regresi terstandarisasi, Pengaruh dominan kecepatan pengadukan menunjukkan bahwa intensitas homogenisasi yang lebih besar mendorong distribusi ukuran droplet yang lebih seragam, Homogenisasi yang lebih lama memberikan paparan energi mekanik yang lebih besar, sedangkan peningkatan suhu dapat memfasilitasi dispersi melalui penurunan viskositas sistem, Penurunan PDI sejalan dengan penurunan ukuran partikel dan peningkatan transmitansi, yang menunjukkan terbentuknya droplet yang lebih kecil dan terdistribusi secara lebih seragam pada kondisi proses yang lebih intensif [10,19],

Pengaruh Umum Optimasi Proses terhadap Sifat Nanoemulsi

Parameter proses yang diteliti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat fisikokimia nanoemulsi, Parameter yang signifikan untuk transmitansi (β = 0,855), ukuran partikel (β = −0,851), dan PDI (β = −0,856) adalah kecepatan pengadukan, sedangkan untuk pH (β = −0,901) adalah suhu proses, Pola ini menunjukkan bahwa energi mekanik merupakan faktor utama yang mengendalikan karakteristik dispersi, sedangkan kondisi termal terutama dipengaruhi oleh lingkungan fisikokimia selama proses [7], Oleh karena itu, optimasi proses tidak seharusnya hanya berfokus pada meminimalkan ukuran partikel, tetapi juga pada pencapaian

keseimbangan yang memadai antara ukuran partikel, distribusi ukuran, kejernihan optik, dan stabilitas pH, Di antara kondisi yang diteliti, karakteristik fisikokimia yang paling menguntungkan diperoleh pada waktu 20 menit, kecepatan pengadukan 5000 rpm, dan suhu 55°C, dengan transmitansi 94,7%, ukuran partikel 86,3 nm, dan PDI 0,11, serta mempertahankan pH sebesar 5,4,

5. KESIMPULAN

Kondisi proses berpengaruh terhadap karakteristik fisikokimia nanoemulsi, dengan kecepatan pengadukan menjadi faktor paling dominan terhadap transmitansi, ukuran partikel, dan PDI, sedangkan suhu paling berpengaruh terhadap pH. Kondisi optimum diperoleh pada waktu homogenisasi 20 menit, kecepatan pengadukan 5.000 rpm, dan suhu 55 °C, menghasilkan transmitansi 94,7%, ukuran partikel 86,3 nm, PDI 0,11, dan pH 5,4. Kondisi tersebut menghasilkan kombinasi karakteristik yang menunjukkan kejernihan optik tinggi, ukuran partikel kecil, distribusi ukuran yang sempit, dan pH yang dapat diterima, sehingga memenuhi tujuan optimasi proses nanoemulsi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Gupta A, Eral HB, Hatton TA, Doyle PS. Nanoemulsions: formation, properties and applications. Soft Matter 2016;12:2826–41. https://doi.org/10.1039/c5sm02958a.

[2] Yukuyama MN, Ghisleni DDM, Pinto TJA, Bou-Chacra NA. Nanoemulsion: process selection and application in cosmetics-a review. Int J Cosmet Sci 2016;38:13–24. https://doi.org/10.1111/ics.12260.

[3] Jacob S, Kather FS, Boddu SHS, Shah J. Innovations in Nanoemulsion Technology : Enhancing Drug Delivery for Oral , Parenteral , and Ophthalmic Applications. Pharmaceutics 2024;16:1–41. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16101333.

[4] Humaira H, Juwita NA, Lubis MF. Biosintesis Nanopartikel Zink Oksida menggunakan Bioreduktor Daun Sirsak (Annona muricata L .) sebagai Antimikroba Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Annona Muricata L . Leaf as Antimicrobial. J Farm 2026;8:844–57. https://doi.org/https://doi.org/10.35451/661yzr29.

[5] Meirista I, Mitra AD, Firira CP. Histopathology Test in Dyslipidemic Female White Rats (Rattus Norvegicus) Treated With Chitosan Nanoparticle Gel of Pineapple Peel Extract (Ananas Comosus (L.) Merr) as Anti-Cellulite. J Farm 2026;8:903–414. https://doi.org/https://doi.org/10.35451/ms60zx36.

[6] Scholz P, Keck CM. Nanoemulsions produced by rotor-stator high speed stirring. Int J Pharm 2015;482:110–7. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.12.040.

[7] Alharbi GG, Abdulhamid MA. Optimization of Water/Oil Emulsion Preparation : Impact of Time, Speed, and Homogenizer Type on Droplet Size and Dehydration Efficiency. Chemosphere 2023;335:1–6. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139136.

[8] Salum P, Ulubaş Ç, Güven O, Cam M, Yurdaer L. The Impact of Homogenization Techniques and Conditions on Water- - Oil Emulsions for Casein Hydrolysate – Loaded Double Emulsions : A Comparative Study. Food Sci Nutr 2024;12:9585–99. https://doi.org/10.1002/fsn3.4525.

[9] Diedrich C, Zittlau IC, Khalil NM, Leontowich AFG, Freitas RA De, Badea I, et al. Optimized Chitosan-Based Nanoemulsion Improves Luteolin Release. Pharmaceutics 2023;15:1592. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15061592.

[10] Namira ZR, Paramita V, Kusumayanti H. The Effect of Rotational Speed of Homogenization on Emulsion Results Obtained Using Soy Lecithin Emulsifier. J Vocat Stud Appl Reasearch 2021;3:14–7. https://doi.org/10.14710/jvsar.v3i1.10916.

[11] Yahya NA, Wahab RA, Attan N, Hashim SE, Abdul Hamid M, Mohamed Noor N, et al. Optimization of oil-in-water nanoemulsion system of Ananas comosus peels extract by D-optimal mixture design and its physicochemical properties. J Dispers Sci Technol 2022;43:302–15. https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1839485.

[12] Na Nan S, Luckanagul JA, Panapisal VR. The Impact of Surfactant Structures and High-Speed Mixing Dynamics in Achieving Nano-Sized Emulsions with Simple High-Speed Homogenization. Nanotechnol Sci Appl 2024;17:273–88. https://doi.org/10.2147/NSA.S492639.

[13] Karami Z, Khoshkam M, Hamidi M. Optimization of Olive Oil-Based Nanoemulsion Preparation for Intravenous Drug Delivery. Drug Res (Stuttg) 2019;69:256–64. https://doi.org/10.1055/a-0654-4867.

[14] Adena SKR, Herneisey M, Pierce E, Hartmeier PR, Adlakha S, Hosfeld MAI, et al. Quality by Design Methodology Applied to Process Optimization and Scale up of Curcumin Nanoemulsions Produced by Catastrophic Phase Inversion. Pharmaceutics 2021;13. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13060880.

[15] Niknam SM, Kashaninejad M, Escudero I, Sanz MT, Beltrán S, Benito JM. Preparation of Water-in-Oil

Nanoemulsions Loaded with Phenolic-Rich Olive Cake Extract Using Response Surface Methodology Approach. Foods 2022;11. https://doi.org/10.3390/foods11030279.

[16] Ngan CL, Basri M, Lye FF, Fard Masoumi HR, Tripathy M, Karjiban RA, et al. Comparison of process parameter optimization using different designs in nanoemulsion-based formulation for transdermal delivery of fullerene. Int J Nanomedicine 2014;9:4375–86. https://doi.org/10.2147/IJN.S65689.

[17] Li B, Wei N, Li Y, Ci Y, Gesang Q, Feng J. Optimised Preparation and Formula of Deltamethrin Nanoemulsion for Enhanced Insecticidal Efficacy and Superior Biosafety. Agriculture 2026;16. https://doi.org/10.3390/agriculture16080882.

[18] Ulayya HF, Wikantyasning ER. Nanoemulgel Optimization of Achatina fulica Mucus: A D-Optimal Mixture Design Approach for Enhanced Formulation and Penetration Evaluation In Vitro. Res J Pharm Technol 2025;18:5493–501. https://doi.org/10.52711/0974-360X.2025.00792.

[19] Wijayanti NPAD, Yustiantara PS, Devi IAS. Optimization of Stirring Speed on Physical Characteristics of Nanoemulsion on Mangosteen Rind (Garcinia mangostana L.) Fraction. Int J Pharm Res | 2020;11:717–20. https://doi.org/10.31838/ijpr/2019.11.04.053.

[20] Akhter A, Hussain J, Muhammad H, Delwar M, Kazi M. Heliyon Development and Evaluation of Nanoemulsion Gel Loaded with Bioactive Extract of Cucumis melo var. agrestis : A Novel Approach for Enhanced Skin Permeability and Antifungal Activity. Heliyon 2024;10:e35069. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35069.

[21] Chasanah U, Sugihartini N, Yuliani S. Formulation and Evaluation of Moringa Seed Oil Nanoemulsion Using Polyoxyl 40 Hydrogenated Castor Oil and Glycerin as a Surfactant- Cosurfactant System. Indones J Pharm 2025;36:622–37.

[22] Atirah S, Ismail R, Saaid M, Abbas A, Abubakar A, Umar A. A Critical Review of Development and Demulsification Mechanisms of Crude Oil Emulsion in The Petroleum Industry. J Pet Explor Prod Technol 2020;10:1711–28. https://doi.org/10.1007/s13202-020-00830-7.

[23] Al-Sakkaf MK, Onaizi SA. Crude Oil/Water Nanoemulsions Stabilized by Rhamnolipid Biosurfactant: Effects of Acidity/Basicity and Salinity on Emulsion Characteristics, Stability, and Demulsification. Fuel 2023;344. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128052.

[24] Iacob-tudose ET, Mamaliga I, Iosub AV. TES Nanoemulsions : A Review of Thermophysical Properties and Their Impact on System Design. Nanomaterials 2021;11:3415. https://doi.org/doi.org/10.3390/nano11123415.

[25] Alagarsamy S, Pazhanimuthu R, Balrajs D, Gnanasekar SK. Comprehensive Characterization Techniques for Nanoemulsions-Based Systems. J Innov Appl Pharm Sci 2026;11:22–32. https://doi.org/https://doi.org/10.37022/jiaps.v11i2.922.

[26] Zhou L, Zhang W, Wang J, Zhang R, Zhang J. Ultrasonics Sonochemistry Comparison of Oil-in-Water Emulsions Prepared by Ultrasound, High-Pressure Homogenization and High-Speed Homogenization. Ultrason Sonochem 2022;82. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105885.

[27] Wikantyasning ER, Setiyadi G, Pramuningtyas R, Kurniawati MD, Ho CY. Formulation of Nanoemulgel Containing Extract of Impatients Balsamina L. and Its Antibacterial Activity. Int J Appl Pharm 2023;15:67–70. https://doi.org/10.22159/ijap.2023v15i3.46670.