

Studi Eksperimental Karakteristik Mikroskopik Dan Stabilitas Ultrafine Bubble Dalam Bahan Bakar Biodiesel B35

Husen Asbanu^{1*}, Sam Herodian², Tineke Mandang³, Anto Tri Sugiarto⁴, Riesta Anggarani⁵, Ade Supriatna⁶

¹Dosen Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada,

²Dosen Program Studi Teknik Mesin dan Biosistem Fakultas Teknik dan Teknologi IPB

³Dosen Program Studi Teknik Mesin dan Biosistem Fakultas Teknik dan Teknologi IPB

⁴Pusat Penelitian Mekatronika Cerdas, BRIN Jln Sangkuriang, Dago, Bandung

⁵Departemen Teknologi Penerapan Produk, Pengembangan Teknologi Migas LEMIGAS, Jakarta

⁶Dosen Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada

Koresponden : husenasbanu12@gmail.com

Abstrak

Biodiesel B35, yang merupakan campuran 35% biodiesel dan 65% minyak solar, telah digunakan secara luas sebagai bahan bakar pada mesin diesel. Salah satu pendekatan yang dikembangkan dalam penelitian bahan bakar adalah penerapan teknologi ultrafine bubbles oksigen, yang menghasilkan gelembung gas berukuran nano di dalam media cair. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik mikroskopik ultrafine bubbles oksigen pada bahan bakar biodiesel B35 melalui pengukuran ukuran dan distribusi gelembung, stabilitas selama penyimpanan, serta zeta potensial menggunakan metode Dynamic Light Scattering dan Nanoparticle Tracking Analysis. Hasil menunjukkan peningkatan waktu injeksi oksigen menghasilkan penurunan diameter gelembung, yaitu dari 531 nm (22%) pada sampel tanpa injeksi menjadi 458 nm, 396 nm, 255 nm (17%), dan mencapai 141 nm (15%) setelah 60 menit injeksi. Selama periode penyimpanan, diameter gelembung berubah dari 342 nm (16%) pada kondisi awal menjadi 141 nm (17%) pada minggu pertama, kemudian meningkat menjadi 190 nm, 220 nm, dan kembali 342 nm (23%) pada minggu keempat, yang mengindikasikan terjadinya proses koalesensi gelembung. Analisis zeta potensial menunjukkan puncak distribusi pada -25 mV dengan 205.808 counts, yang mengindikasikan bahwa dispersi ultrafine bubbles oksigen memiliki stabilitas yang relatif baik selama periode penyimpanan. Secara keseluruhan, penelitian ini mengonfirmasi bahwa teknologi ultrafine bubbles oksigen mampu membentuk gelembung berukuran nano dengan karakteristik ukuran, distribusi, dan stabilitas yang dapat diidentifikasi melalui pengujian Dynamic Light Scattering, dan zeta potensial. Hasil penelitian ini memberikan informasi dasar mengenai karakteristik mikroskopik ultrafine bubbles oksigen pada bahan bakar biodiesel B35 sebagai landasan untuk penelitian lanjutan mengenai pengaruhnya terhadap sifat fisik bahan bakar maupun kinerja pembakaran dan emisi gas buang.

Kata kunci: Biodiesel B35, ultrafine bubble, karakterisasi mikroskopik, distribusi ukuran, stabilitas.

1. Pendahuluan

Biodiesel B35 merupakan bahan bakar campuran yang tersusun dari 35% biodiesel dan 65% solar, yang telah diaplikasikan pada berbagai jenis mesin diesel. Peningkatan mutu bahan bakar serta memperoleh proses pembakaran yang lebih efisien, berbagai metode pengembangan terus dilakukan, salah satunya melalui pemanfaatan teknologi *ultrafine bubble*. Kajian mengenai karakteristik *ultrafine bubble* pada biodiesel B35 menjadi penting untuk memahami kondisi gelembung yang terbentuk, seperti ukuran, persebaran, dan tingkat kestabilannya, sehingga dapat dievaluasi pengaruhnya terhadap peningkatan efektivitas proses pembakaran.

Peningkatan mutu biodiesel terus menjadi perhatian dalam berbagai penelitian karena berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan energi serta menekan emisi gas buang yang dihasilkan kendaraan [1], [2]. Penelitian [3] menemukan penambahan aditif beroksigen pada campuran bahan bakar diesel-biodiesel memberikan pengaruh positif terhadap proses pembakaran dan performa mesin diesel, Penambahan oksigen dalam bahan bakar mampu memperbaiki proses pembakaran, sehingga emisi karbon monoksida, hidrokarbon, dan asap hasil pembakaran dapat ditekan secara lebih efektif, berdasarkan penelitian [4]. Bahan bakar yang mengandung nano oksigen mampu meningkatkan kualitas pembakaran, menurunkan emisi gas buang, dan mempertahankan efisiensi bahan bakar serta kinerja mesin diesel. Namun, efektivitasnya dipengaruhi oleh pengaturan waktu injeksi, sehingga optimasi kondisi operasi mesin diperlukan untuk

meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi pembentukan jelaga [5], [6], [7]. Emisi partikulat masih memerlukan penelitian yang lebih mendalam agar keterkaitan antara peningkatan efisiensi pembakaran, proses pembentukan jelaga, dan variasi kondisi operasi mesin dapat dijelaskan secara lebih menyeluruh [8].

Sejumlah penelitian terkait penggunaan *ultrafine bubble* pada bahan bakar cair menunjukkan bahwa teknologi ini mampu menghasilkan gelembung berukuran nano yang relatif stabil dan memberikan pengaruh terhadap peningkatan kualitas proses pembakaran. Keberadaan nano bubbles di dalam bahan bakar dapat memengaruhi proses pengurapan serta pembakaran droplet melalui mekanisme pembentukan, perkembangan, dan pecahnya gelembung selama proses berlangsung. Kondisi tersebut membantu memperbaiki proses pencampuran antara bahan bakar dan udara, sehingga pembakaran dapat terjadi secara lebih efektif dan menghasilkan performa pembakaran yang lebih optimal serta dapat menurunkan emisi [9], [10]. Perkembangan penelitian mengenai penggunaan bahan bakar yang mengandung nanogelembung pada mesin diesel mengindikasikan bahwa teknologi ini dapat memengaruhi karakteristik fisikokimia bahan bakar. Perubahan tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kualitas pembakaran yang pada akhirnya berpotensi meningkatkan kinerja mesin diesel [11], [12]. Penambahan gelembung gas ke dalam bahan bakar cair mampu mengubah karakteristik semprotan secara signifikan, perubahan tersebut memberi dampak terhadap peningkatan proses atomisasi serta pencampuran bahan bakar dengan udara sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih efisien [13], [14].

Pengembangan bahan bakar berbasis nanobubble telah berhasil menghasilkan bahan bakar diesel yang mengandung *ultrafine bubble* udara dengan konsentrasi tinggi dan stabil. Keberadaan *ultrafine bubble* tidak mengubah sifat dasar diesel secara signifikan, tetapi mampu menurunkan tegangan permukaan, sehingga berpotensi meningkatkan proses atomisasi dan efisiensi pembakaran. Pengembangan teknologi bahan bakar diesel berbasis nanobubble untuk menghemat bahan bakar dan meningkatkan kinerja mesin sekaligus mengurangi emisi gas buang [15], [16]. Keberadaan nanobubbles memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik semprotan bahan bakar dengan meningkatkan kualitas atomisasi, menghasilkan distribusi tetesan yang lebih homogen, mengurangi spray penetration, serta memperbaiki proses pencampuran bahan bakar dan udara. Kondisi ini berpotensi meningkatkan efisiensi pembakaran dan kinerja mesin pembakaran dalam [6], [17], [18].

Teknologi *ultrafine bubble* dalam beberapa tahun terakhir semakin banyak mendapat perhatian karena memiliki potensi penerapan yang luas di berbagai bidang. *Ultrafine bubble* didefinisikan sebagai gelembung berukuran sangat kecil yang terdispersi di dalam fase cair. Karakteristik utamanya, yaitu ukuran yang sangat kecil, muatan permukaan yang tinggi, dan luas permukaan spesifik yang besar, membuat nanobubble memiliki stabilitas yang tinggi di dalam cairan. Sifat-sifat tersebut menjadikan nanobubble berpotensi dimanfaatkan untuk meningkatkan berbagai proses, seperti perpindahan massa, efisiensi reaksi, serta kinerja berbagai sistem berbasis fluida [11], [19]. Stabilitas *ultrafine bubble* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ukuran gelembung, kondisi permukaan antara fase gas dan cairan, serta proses perpindahan gas yang terjadi dengan lingkungan di sekitarnya. Faktor-faktor tersebut menyebabkan nanobubble mampu mempertahankan keberadaannya di dalam cairan dalam periode tertentu, sehingga memiliki peluang untuk diterapkan pada berbagai sistem berbasis fluida yang memerlukan gelembung berukuran sangat kecil dengan tingkat kestabilan yang baik [20], [21].

Penerapan *ultrafine bubble* pada bahan bakar meningkatkan karakteristik semprotan dengan menghasilkan tetesan yang lebih kecil dan seragam, sehingga atomisasi serta pencampuran bahan bakar-udara menjadi lebih optimal. Kondisi ini meningkatkan efisiensi pembakaran dan berpotensi mengurangi emisi gas buang [15], [22]. Kestabilan yang dimiliki oleh nanobubble merupakan salah satu aspek utama yang menentukan keberhasilan penerapannya dalam berbagai sektor. Sifat tersebut memungkinkan *ultrafine bubble* dimanfaatkan secara lebih luas, antara lain untuk meningkatkan efektivitas perpindahan massa, mendukung pengembangan bahan bakar berbasis nanoteknologi, proses pengolahan air, serta berbagai aplikasi lain yang melibatkan sistem fluida [21], [23], [24]. Peningkatan kualitas biodiesel dapat dilakukan melalui pemurnian, penambahan aditif, dan optimasi proses produksi untuk memperbaiki karakteristik pembakaran, meningkatkan kinerja mesin, serta mendukung pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [25], [26]. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik mikroskopik *ultrafine bubble* yang terbentuk dalam biodiesel B35 sebagai langkah awal dalam menilai kualitas pembentukan gelembung serta mengetahui potensinya dalam mendukung peningkatan kinerja bahan bakar.

2. Metode Penelitian

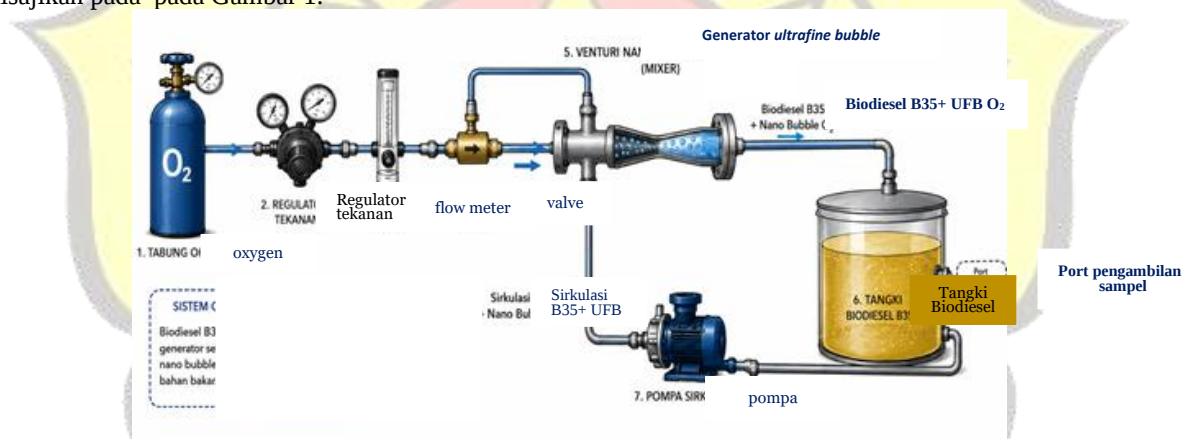
2.1. Material

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah biodiesel B35 dengan nilai cetane number (CN) sebesar 48 (B35-CN48) yang diperoleh dari stasiun pengisian bahan bakar di wilayah Bogor. Gas

oksigen dengan kemurnian 95% digunakan sebagai media pembentukan *ultrafine bubble* (UFB) dan diperoleh dari pemasok gas lokal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi waktu injeksi oksigen *ultrafine bubble* terhadap karakteristik bahan bakar B35-CN48 serta tingkat kestabilan gelembung selama periode penyimpanan 30 hari. Proses pembentukan *ultrafine bubble* dilakukan dengan menginjeksikan oksigen pada laju aliran tetap sebesar 5 lpm menit ke dalam 3 liter biodiesel B35, dengan variasi waktu injeksi antara 10 hingga 60 menit. Pengamatan kestabilan *ultrafine bubble* dilakukan secara berkala setiap tujuh hari selama masa penyimpanan satu bulan. Setiap perlakuan eksperimen dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk memperoleh data yang lebih akurat dan menghasilkan nilai rata-rata yang representatif untuk analisis.

2.2. Metode Pengukuran

Karakterisasi diameter rata-rata *ultrafine bubble* dilakukan menggunakan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS), sedangkan evaluasi kestabilan gelembung dilakukan melalui pengukuran menggunakan Zetasizer dan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS) untuk mengetahui perubahan ukuran serta perilaku stabilitas *ultrafine bubble* selama periode penyimpanan. Pengujian pembentukan *ultrafine bubble* pada biodiesel B35 dilakukan dengan membandingkan kondisi bahan bakar tanpa perlakuan *ultrafine bubble* (blanko) dan bahan bakar yang diberi perlakuan injeksi oksigen dengan laju aliran 5 lpm. Variasi waktu injeksi yang digunakan yaitu 10, 27, 44, dan 60 menit untuk mengetahui pengaruh durasi injeksi terhadap karakteristik gelembung yang terbentuk. Pengujian stabilitas *ultrafine bubble* dilakukan pada kondisi optimum, yaitu dengan injeksi oksigen sebesar 5 lpm selama 60 menit. Sampel kemudian disimpan selama 30 hari dan dilakukan pengukuran secara berkala setiap satu minggu untuk mengamati perubahan karakteristik dan kestabilan gelembung selama masa penyimpanan. Data hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif dan disajikan dalam bentuk tabel maupun grafik untuk mengevaluasi karakteristik diameter dan stabilitas gelembung *ultrafine bubble* dalam biodiesel B35. Rangkaian alat *bubbling* bahan bakar biodiesel B35 dapat disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian system pembangkit bahan bakar B-35 berbasis ultrafine bubble

3. Hasil dan Pembahasan

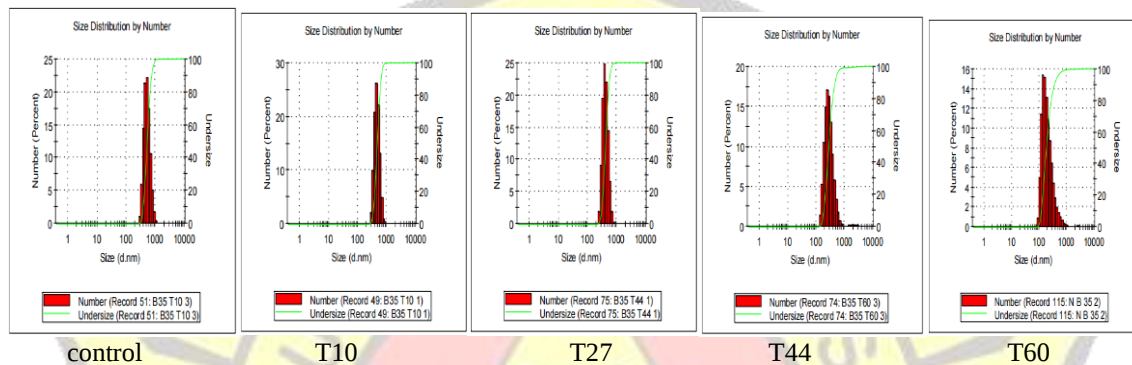
3.1. Injeksi nano bubble oksigen dalam bahan bakar Biodiesel B35

Hasil pengamatan berdasarkan Gambar 2. dan Tabel 1. menunjukkan bahwa perbedaan lama waktu injeksi nanobubble oksigen memengaruhi karakteristik ukuran gelembung yang terbentuk pada biodiesel B35. Pada kondisi tanpa perlakuan (normal), diameter gelembung berada pada nilai 531 nm dengan distribusi sebesar 22%. Pemberian perlakuan injeksi selama 10 menit menyebabkan ukuran gelembung berkurang menjadi 458 nm, sementara distribusinya meningkat menjadi 26%. Seiring bertambahnya waktu injeksi hingga 27 menit, diameter gelembung mengalami penurunan lebih lanjut menjadi 396 nm dengan distribusi 24,8%. Perlakuan injeksi selama 44 menit dan 60 menit menghasilkan ukuran gelembung yang lebih kecil, masing-masing sebesar 255 nm dan 141 nm. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa semakin lama waktu injeksi, proses pembentukan nanobubble oksigen menghasilkan ukuran gelembung yang semakin halus, sehingga mendukung peningkatan homogenitas dispersi oksigen dalam biodiesel B35.

Tabel 1. Injeksi *nano bubble* oksigen dalam bahan bakar Biodiesel B35

normal		10 menit		27 menit		44 menit		60 menit	
size	%	size	%	size	%	size	%	size	%
531	22	458	26	396	24,8	255	17	141	15

Hasil analisis Dynamic Light Scattering pada Gambar 2. Menunjukkan bahwa peningkatan waktu injeksi menyebabkan penurunan diameter *ultrafine bubble* oksigen dalam biodiesel B35. Perubahan ini mengindikasikan bahwa lama proses injeksi berperan dalam pembentukan dan karakteristik fisik gelembung yang dihasilkan. Ukuran gelembung yang semakin kecil berpotensi meningkatkan kestabilan sistem karena mampu mempertahankan distribusi oksigen secara lebih homogen dalam biodiesel B35. Selain itu, variasi waktu injeksi juga memengaruhi distribusi ukuran partikel, dengan persentase tertinggi diperoleh pada injeksi selama 10 menit dan mengalami penurunan secara bertahap hingga 15% pada injeksi 60 menit. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu injeksi berpengaruh terhadap ukuran serta distribusi *ultrafine bubble* dalam biodiesel B35.

Gambar 2. Injeksi *nano bubble* oksigen dalam bahan bakar Biodiesel B35

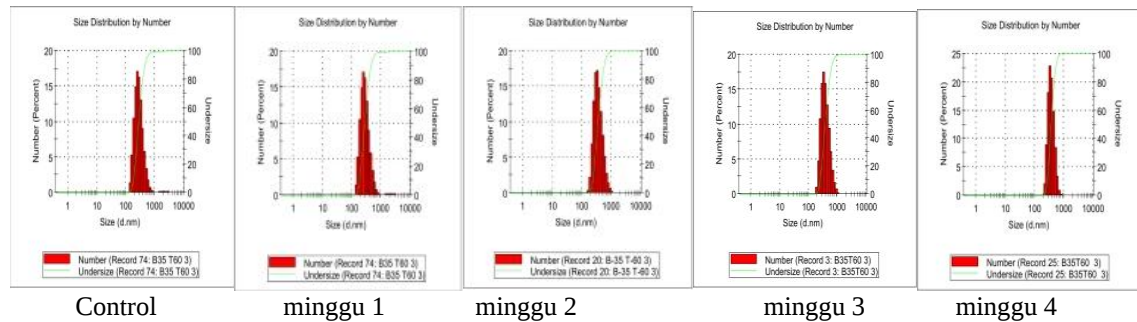
3.2. Stabilitas Gelembung *ultrafine bubble* oksigen bahan bakar Biodiesel B35

Hasil pengujian pada Tabel 2. Menunjukkan perbedaan karakteristik ukuran gelembung antara bahan bakar B35 tanpa perlakuan dan B35 berbasis *ultrafine bubble*. Sampel kontrol memiliki diameter dominan sekitar 342 nm dengan persentase 16%, yang menunjukkan stabilitas dispersi lebih rendah. Perlakuan *ultrafine bubble* menghasilkan penurunan ukuran gelembung menjadi 141 nm pada minggu pertama dengan persentase 17%. Selama penyimpanan hingga minggu keempat, ukuran gelembung meningkat secara bertahap menjadi 342 nm, namun masih berada dalam rentang *ultrafine bubble* dengan distribusi partikel yang relatif stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa aplikasi *ultrafine bubble* mampu meningkatkan dan mempertahankan stabilitas dispersi bahan bakar B35 selama penyimpanan.

Tabel 2. Hasil pengukuran stabilitas gelembung UFB bahan bakar B35 UFB

Percobaan	normal	minggu 1	minggu 2	minggu 3	minggu 4
size (nm)	342	141	190	220	342
presentasi (%)	16	17	17	17	23

Gelembung *ultrafine bubble* bahan bakar B35 dianalisis menggunakan metode *Dynamic Light Scattering* (DLS) tanpa perlakuan *ultrafine bubble* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Bagian control. Hasil analisis *number-based size distribution* menunjukkan bahwa sampel B35 tanpa perlakuan *ultrafine bubble* memiliki diameter gelembung dominan sebesar 342 nm dengan persentase 16%, yang mengindikasikan stabilitas sistem masih rendah karena gelembung berukuran besar lebih mudah mengalami koalesensi dan dipengaruhi oleh gaya apung.

Gambar 3. Stabilitas gelembung *ultrafine bubble* bahan bakar B35

Stabilitas *ultrafine bubble* pada bahan bakar B35 selama empat minggu penyimpanan disajikan pada Gambar 3. Hasil analisis *Dynamic Light Scattering* menunjukkan bahwa distribusi ukuran gelembung *ultrafine bubble* berbasis jumlah (*number-based size distribution*) tetap membentuk pola unimodal dengan diameter gelembung dominan berturut-turut sekitar 141 nm, 190 nm, 220 nm, dan 342 nm pada minggu ke-1 hingga minggu ke-4. Walaupun adanya peningkatan diameter secara bertahap selama penyimpanan, namun seluruh gelembung masih berada dalam rentang ukuran *ultrafine bubble*. Distribusi ukuran yang relatif sempit serta tidak ditemukannya fraksi gelembung berukuran besar mengindikasikan bahwa proses koalesensi dan aglomerasi berlangsung sangat terbatas, sehingga sistem *ultrafine bubble* pada bahan bakar B35 mampu mempertahankan kestabilan fisiknya selama empat minggu penyimpanan, meskipun terjadi sedikit pertumbuhan ukuran gelembung yang diduga dipengaruhi oleh difusi gas dan interaksi antar gelembung.

3.3. Zeta Potensial

Pengujian zeta potensial menggunakan zeta sizer pada Tabel 3. Menampilkan seluruh gelembung *ultrafine bubble* pada bahan bakar B35 berada pada rentang muatan negatif dengan puncak distribusi sekitar -25 mV selama empat minggu penyimpanan. Nilai zeta potensial yang relatif konstan mengindikasikan bahwa muatan permukaan gelembung tetap terjaga, sehingga menghasilkan gaya tolak elektrostatis yang mampu menghambat terjadinya aglomerasi dan koalesensi. Selain itu, distribusi jumlah partikel tidak menunjukkan perubahan yang signifikan dari minggu pertama hingga minggu keempat, yang mengindikasikan bahwa sistem *ultrafine bubble* memiliki kestabilan elektrostatis yang baik dan mampu mempertahankan karakteristiknya selama periode penyimpanan.

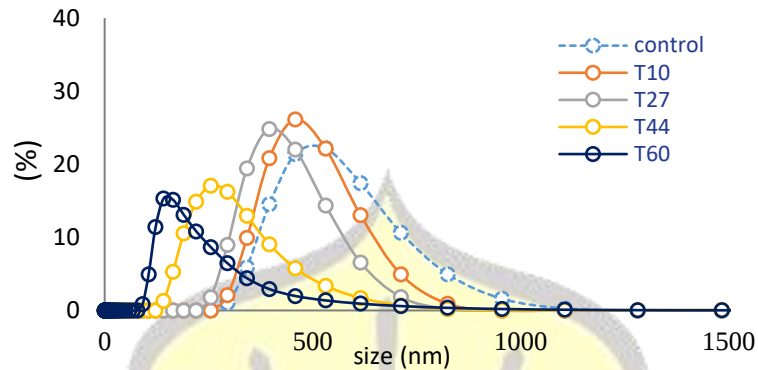
Tabel 3. Hasil Pengujian zeta potensial bahan bakar B35 *ultrafine bubble*

No	Zeta potential bahan bakar B35 <i>ultrafine bubble</i>							
	Minggu 1		Minggu 2		Minggu 3		Minggu 4	
	(mV)	counts	(mV)	counts	(mV)	counts	(mV)	counts
1	-42,14	0	-42,14	0	-42,14	0	-42,14	0
2	-37,92	28013,03516	-37,92	28013,03516	-37,92	28013,03516	-37,92	28013,03516
3	-33,69	87103,32813	-33,69	87103,32813	-33,69	87103,32813	-33,69	87103,32813
4	-29,47	161800,9375	-29,47	161800,9375	-29,47	161800,9375	-29,47	161800,9375
5	-25,25	205807,9531	-25,25	205807,9531	-25,25	205807,9531	-25,25	205807,9531
6	-21,03	159344,7344	-21,03	159344,7344	-21,03	159344,7344	-21,03	159344,7344
7	-16,80	83417,10156	-16,80	83417,10156	-16,80	83417,10156	-16,80	83417,10156
8	-12,58	29963,42578	-12,58	29963,42578	-12,58	29963,42578	-12,58	29963,42578
9	-8,36	4322,391602	-8,36	4322,391602	-8,36	4322,391602	-8,36	4322,391602
10	-4,14	0	-4,14	0	-4,14	0	-4,14	0

3.4. Pengamatan karakteristik mikroskopik *ultrafine bubble* dalam bahan bakar B35

Berdasarkan analisis Gambar 4, peningkatan durasi injeksi *ultrafine bubble* oksigen pada biodiesel B35 menunjukkan penurunan ukuran diameter gelembung secara bertahap, dari 531 nm pada kondisi awal menjadi 141 nm setelah 60 menit perlakuan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu injeksi berperan dalam menghasilkan *ultrafine bubble* dengan ukuran lebih kecil dan distribusi oksigen yang lebih homogen.

Penurunan ukuran gelembung ini diduga dipengaruhi oleh peningkatan turbulensi dan gaya geser selama proses injeksi yang mempercepat fragmentasi gelembung [27], [28]. Kajian lain melaporkan bahwa keberadaan gelembung ultrafine bubble dalam sistem cair berperan dalam meningkatkan proses pembentukan *ultrafine bubble* dengan ukuran yang lebih kecil dapat memperbesar area interaksi gas-cair, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan oksigen dan menghasilkan distribusi oksigen yang lebih merata [14], [29], [30].

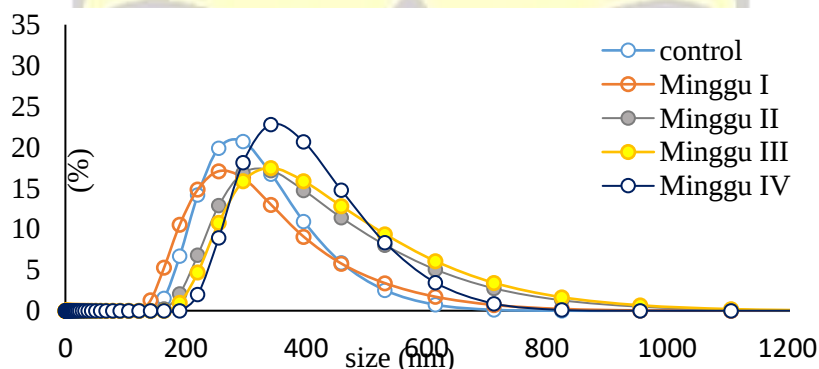


Gambar 4. Diameter gelembung ultrafine bubble

3.5. Analisis Stabilitas *ultrafine bubble* dalam Bahan Bakar Disel B35

Analisis stabilitas gelembung *ultrafine bubble* bahan bakar biodiesel B35 disajikan Gambar 5. Pengamatan selama empat minggu menunjukkan adanya perubahan diameter ukuran gelembung yang mengindikasikan proses penyesuaian sistem selama penyimpanan. Kondisi awal (control), rata-rata diameter gelembung sebesar 295 nm dengan 21%, setelah injeksi oksigen *ultrafine bubble*, ukuran gelembung menurun menjadi 141 nm dengan presentasi 15%, yang menunjukkan terbentuknya gelembung berukuran lebih kecil dan lebih seragam. Selama penyimpanan, ukuran gelembung meningkat secara bertahap menjadi 190 nm pada minggu ke-2 dengan diameter gelembung 220 nm pada minggu ke-3, dan 342 nm pada minggu ke-4 disertai peningkatan distribusi partikel dari 16 % menjadi 23%.

Peningkatan tersebut mengindikasikan terjadinya proses koalesensi yang menyebabkan pertumbuhan ukuran gelembung hingga sistem mencapai kondisi yang lebih stabil. Ukuran diameter gelembung meningkat dari 141 nm menjadi 342 nm menunjukkan bahwa selama penyimpanan memicu pertumbuhan dan koalesensi gelembung sebagai mekanisme menuju kestabilan sistem. Temuan ini sejalan dengan [31] yang melaporkan tingkat kestabilan *ultrafine bubble* tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik gelembung, tetapi juga oleh kondisi penyimpanan dan jenis wadah yang digunakan, penggunaan wadah kaca yang tertutup rapat dengan kondisi suhu yang terjaga mampu mempertahankan keberadaan *ultrafine bubble* dalam waktu lebih dari sembilan bulansedangkan penggunaan wadah berbahan polimer menyebabkan penurunan konsentrasi nanobubble yang lebih cepat karena adanya kemungkinan interaksi antara gelembung dan permukaan wadah serta terjadinya pelepasan gas ke lingkungan. Tingkat stabilitas bulk *ultrafine bubble* dipengaruhi oleh interaksi pada antarmuka gas-cair, terutama keberadaan muatan permukaan yang menghasilkan gaya tolak elektrostatis sehingga mencegah terjadinya penggabungan gelembung. Selain itu, kondisi lingkungan seperti pH, suhu, jenis gas, dan komposisi larutan turut menentukan kemampuan nanobubbles untuk bertahan dalam jangka waktu yang panjang [24], [32].

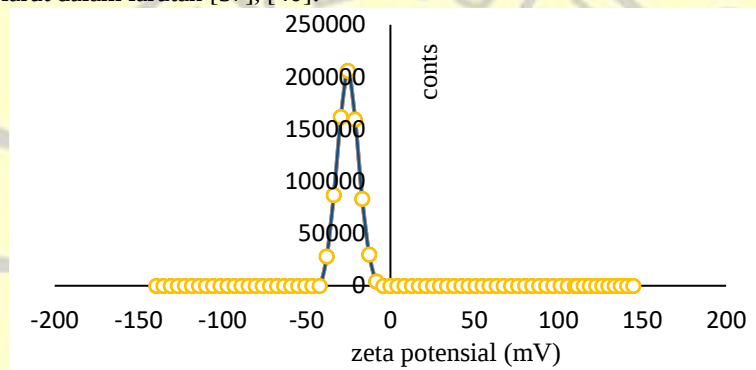


Gambar 5. Stabilitas *ultrafine bubble* bahan bakar B35

3.6. Zeta Potential

Analisis zeta potensial biodiesel B35 menunjukkan bahwa sistem dispersi mempertahankan stabilitas fisikokimia selama 30 hari penyimpanan. Nilai zeta potensial yang konsisten berada di sekitar -25 mV mengindikasikan bahwa gaya tolak elektrostatis masih efektif dalam menghambat koalesensi sehingga homogenitas dispersi ultrafine bubble tetap terjaga. Temuan ini selaras dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa ultrafine bubble memiliki stabilitas selama 3-4 minggu dengan nilai zeta potensial pada kisaran -25 mV. Rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa muatan negatif pada permukaan gelembung masih cukup kuat untuk menghasilkan gaya tolak elektrostatis, sehingga dapat meminimalkan penggabungan antargelembung dan menjaga kestabilan sistem dispersi selama penyimpanan [33], [34]. Penelitian lain terkait penggunaan nanobubble udara pada bahan bakar diesel melaporkan bahwa gelembung berukuran nano memiliki kestabilan yang cukup baik, dengan keberadaan partikel gelembung yang masih terdeteksi hingga periode penyimpanan selama 60 hari [16], [35]. Stabilitas nanobubbles yang mampu bertahan dalam larutan untuk waktu yang relatif lama menjadikannya berpotensi diterapkan pada berbagai bidang, seperti pengolahan air, proses kimia, pertanian, dan biomedis, dan bahan bakar [36], [37], [38].

Hasil kajian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem bahan bakar yang mengandung nanobubble mampu mempertahankan stabilitasnya hingga 60 hari penyimpanan. Stabilitas tersebut didukung oleh konsentrasi gelembung yang berkisar antara 10^7 hingga 10^8 gelembung/mL dan nilai zeta potensial sekitar -40 mV. Nilai zeta potensial yang relatif tinggi secara negatif menunjukkan bahwa interaksi tolak-menolak antargelembung cukup kuat, sehingga dispersi nanobubble tetap stabil dan proses penggabungan gelembung [35], [39]. peninjauan tentang stabilitas *ultrafine bubble* dalam cairan dipengaruhi oleh beberapa mekanisme, termasuk muatan permukaan gelembung (zeta potensial), tekanan internal, lapisan antarmuka gas-cair, serta keberadaan zat terlarut dalam larutan [37], [40].



Gambar 6. Zeta potential BBM B35

4. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa karakteristik mikroskopik *ultrafine bubbles* oksigen pada bahan bakar biodiesel B35 telah berhasil dikaji melalui analisis ukuran dan distribusi gelembung, stabilitas selama penyimpanan, serta nilai zeta potensial menggunakan metode *Dynamic Light Scattering*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lamanya waktu injeksi oksigen memengaruhi pembentukan UFB, yang ditandai dengan penurunan diameter gelembung secara bertahap dari 531 nm (22%) pada sampel tanpa injeksi menjadi 458 nm, 396 nm, 255 nm (17%), hingga mencapai 141 nm (15%) setelah proses injeksi selama 60 menit. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penambahan durasi injeksi menghasilkan gelembung dengan ukuran yang semakin kecil.
2. Selama penyimpanan, ukuran gelembung mengalami perubahan dari 342 nm (16%) menjadi 141 nm (17%) pada minggu pertama, kemudian meningkat menjadi 190 nm, 220 nm, dan kembali mencapai 342 nm (23%) pada minggu keempat. Pola ini mengindikasikan terjadinya koalesensi gelembung seiring waktu. Meskipun demikian, hasil analisis zeta potensial menunjukkan puncak distribusi pada -25 mV dengan intensitas 205.808 counts, yang mengindikasikan bahwa dispersi UFB oksigen tetap memiliki kestabilan yang relatif baik selama periode penyimpanan.
3. Penelitian ini membuktikan bahwa teknologi UFB oksigen menghasilkan gelembung nano pada biodiesel B35 dengan karakteristik yang teridentifikasi melalui uji DLS dan analisis zeta potensial. Hasilnya menjadi dasar bagi penelitian lanjutan mengenai pengaruh UFB terhadap sifat bahan bakar, proses pembakaran, performa mesin diesel, dan emisi gas buang.

Datar Pustaka

- [1] K. Masera and A. K. Hossain, "Advancement of biodiesel fuel quality and NOx emission control techniques," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 178, p. 113235, 2023.
- [2] B. Shadidi and M. D. Dezdarani, "Fuel Additives for Biodiesel: Impacts on Fuel Properties, Combustion Behavior, Engine Performance, and Emissions—A Systematic Review," *J. Energy Inst.*, p. 102557, 2026.
- [3] H. Deviren, "Enhancing diesel engine efficiency and emission performance through oxygenated and non-oxygenated additives: A comparative study of alcohol and cycloalkane impacts on diesel-biodiesel blends," *Energy*, vol. 307, p. 132569, 2024.
- [4] N. J. English, "Environmentally Sustainable and Energy-Efficient Nanobubble Engineering: Applications in the Oil and Fuels Sector," *Fuels*, vol. 6, no. 3, p. 50, 2025.
- [5] S. Herodian, "EFFECT OF ADDING ULTRA FINE BUBBLE TO DIESEL AND BIODIESEL FUEL ON TWO WHEEL TRACTORS DIESEL ENGINE PERFORMANCE," *Sci. Contrib. Oil Gas*, vol. 48, no. 1 April, pp. 21–30, 2025.
- [6] H. Hosseinzadeh-Bandbafha *et al.*, "Applications of nanotechnology in biodiesel combustion and post-combustion stages," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 182, p. 113414, 2023.
- [7] M. S. Gad *et al.*, "A comprehensive review on the usage of the nano-sized particles along with diesel/biofuel blends and their impacts on engine behaviors," *Fuel*, vol. 339, p. 127364, 2023.
- [8] H. Wang *et al.*, "Optical diagnostic study on the combustion and soot formation process of nanobubble diesel," *Fuel*, vol. 405, p. 136670, 2026.
- [9] M. Brayek, Z. Driss, M. A. Jemni, A. Damak, and M. S. Abid, "Effect of hydroxygen nanobubble addition on performance characteristics and emission formations of a spark-ignition engine," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 1, pp. 457–463, 2023.
- [10] V. Kurumanghat, A. Sharma, N. Nirmalkar, A. Saurabh, and L. Kabiraj, "Utilization of bulk nanobubbles to influence combustion characteristics of liquid fuels," *Appl. Energy Combust. Sci.*, vol. 26, p. 100474, 2026.
- [11] L. Sun *et al.*, "Research progress on bulk nanobubbles," *Particuology*, vol. 60, pp. 99–106, 2022.
- [12] Y. Nakatake, S. Kisu, K. Shigyo, T. Eguchi, and T. Watanabe, "Effect of nano air-bubbles mixed into gas oil on common-rail diesel engine," *Energy*, vol. 59, pp. 233–239, 2013.
- [13] V. Kurumanghat, H. Sharma, N. Nirmalkar, and L. Kabiraj, "Experimental studies on the effect of bulk nanobubbles on the combustion of Jet A-1," *Fuel*, vol. 398, p. 135385, 2025.
- [14] R. Xuan *et al.*, "Study on spray characteristics of micro-nano bubble premixed fuel," *Fuel*, vol. 363, p. 131035, 2024.
- [15] C. Yu *et al.*, "Study on the effects of nanobubble-enhanced diesel spray technology on the performance of heavy-duty gas turbines," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, p. 104677, 2026.
- [16] J. Yang, X. Xu, H. Jin, and Q. Yang, "Preparation of Air Nanobubble-Laden Diesel," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 17, p. 1309, 2025.
- [17] A. Biswal, S. P. Sharma, R. Cracknell, H. Zhao, and X. Wang, "Generation and stability of bulk nanobubbles in liquid fuel and their influence on spray characteristics," *Fuel*, vol. 416, p. 138474, 2026.
- [18] B. K. M. Mahgoub, "Effect of nano-biodiesel blends on CI engine performance, emissions and combustion characteristics—Review," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, 2023.
- [19] A. Chang, B. Niu, J. Liu, H. Han, Z. Zhang, and W. Wang, "Enrichment of surface charge contributes to the stability of surface nanobubbles," *Particuology*, vol. 81, pp. 128–134, 2023.
- [20] X. Wang, P. Li, R. Ning, R. Ratul, X. Zhang, and J. Ma, "Mechanisms on stability of bulk nanobubble and relevant applications: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 426, p. 139153, 2023.
- [21] R. I. Kosheleva, A. A. Moutzouroglou, G. Z. Kyzas, and A. Mitropoulos, "Some Aspects of the Stability of Nanobubbles," *Colloids and Interfaces*, vol. 10, no. 3, p. 36, 2026.
- [22] K. Yamamoto, Y. Akai, and N. Hayashi, "Numerical Simulation of Spray Combustion with Ultrafine Oxygen Bubbles," *Energies*, vol. 15, no. 22, p. 8467, 2022.
- [23] E. P. Favvas, G. Z. Kyzas, E. K. Efthimiadou, and A. C. Mitropoulos, "Bulk nanobubbles, generation methods and potential applications," *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 54, p. 101455, 2021.
- [24] Y. Zhou *et al.*, "Long-term stability of different kinds of gas nanobubbles in deionized and salt water," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 7, p. 1808, 2021.
- [25] S. I. Umeh and P. A. Okonkwo, "The essential properties of oils for biodiesel production," *Biodiesel Plants-Fueling Sustain. Outlooks*, 2025.
- [26] H. B. Saka, F. A. Aderibigbe, A. G. Adeniyi, K. Iwuozor, E. C. Emenike, and A. Saka, "The role of

- skeletal based catalyst for biodiesel production—a review,” *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 20, no. 1, pp. 377–401, 2026.
- [27] Y. Murai, Y. Tasaka, Y. Oishi, and P. Ern, “Bubble fragmentation dynamics in a subsonic Venturi tube for the design of a compact microbubble generator,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 139, p. 103645, 2021.
- [28] S. Xue, G. Guo, J. Gao, Y. Zhang, T. Marhaba, and W. Zhang, “Optimizing nanobubble production in ceramic membranes: Effects of pore size, surface hydrophobicity, and flow conditions on bubble characteristics and oxygenation,” *Langmuir*, vol. 41, no. 5, pp. 3592–3602, 2025.
- [29] J. Chen, M. Lei, S. Lu, X. Xiao, M. Yao, and Q. Li, “Numerical simulation of single bubble motion fragmentation mechanism in Venturi-type bubble generator,” *Mech. Ind.*, vol. 25, p. 21, 2024.
- [30] F. Roshanti, S. D. P. Sidhi, and S. Kamal, “Pengaruh Sudut Puntiran Baffle pada Microbubble Generator Venturi terhadap Karakteristik Gelembung Mikro,” in *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)*, 2023, pp. 698–707.
- [31] W. Kanematsu, T. Tuziuti, and K. Yasui, “The influence of storage conditions and container materials on the long term stability of bulk nanobubbles—Consideration from a perspective of interactions between bubbles and surroundings,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 219, p. 115594, 2020.
- [32] C. Chen, Y. Gao, and X. Zhang, “The existence and stability mechanism of bulk nanobubbles: A review,” *Nanomaterials*, vol. 15, no. 4, p. 314, 2025.
- [33] S. Miyamoto *et al.*, “Physical Properties of Ultrafine Bubbles Generated Using a Generator System,” *In Vivo (Brooklyn)*, vol. 37, no. 6, pp. 2555–2563, 2023.
- [34] F. Y. Ushikubo *et al.*, “Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 361, no. 1–3, pp. 31–37, 2010.
- [35] B. H. Tan, H. An, and C.-D. Ohl, “Stability of surface and bulk nanobubbles,” *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 53, p. 101428, 2021.
- [36] J. N. Meegoda, S. Aluthgun Hewage, and J. H. Batagoda, “Stability of nanobubbles,” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 35, no. 11, pp. 1216–1227, 2018.
- [37] X. Ma, M. Li, P. Pfeiffer, J. Eisener, C.-D. Ohl, and C. Sun, “Ion adsorption stabilizes bulk nanobubbles,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 606, pp. 1380–1394, 2022.
- [38] N. Nirmalkar, A. W. Pacek, and M. Barigou, “On the existence and stability of bulk nanobubbles,” *Langmuir*, vol. 34, no. 37, pp. 10964–10973, 2018.
- [39] S. A. Hewage, J. Kewalramani, and J. N. Meegoda, “Stability of nanobubbles in different salts solutions,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 609, p. 125669, 2021.
- [40] L. Zhou, S. Wang, L. Zhang, and J. Hu, “Generation and stability of bulk nanobubbles: A review and perspective,” *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 53, p. 101439, 2021.