

Penerapan *Micro/Nanobubble* Generator Tipe Nosel Aliran Berputar pada Aerosol Serai Wangi

Application of a Rotational Flow Nozzle-Type Micro/Nanobubble Generator in Citronella Aerosol

Asep Yusuf^{1*}, Naufal Fauzi Ramadhan¹, Hilman Syaeful Alam²

¹Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Sumedang 45363, Indonesia

²Pusat Riset Mekatronika Cerdas, BRIN, Jl. Sangkuriang Dago, Bandung 40135, Indonesia

*E-mail: asepyusuf@unpad.ac.id

Diterima: 15 Juni 2025; Disetujui: 11 Desember 2025

ABSTRAK

Produk samping dari proses penyulingan minyak atsiri berupa aerosol sering kali tidak dimanfaatkan secara optimal dan bahkan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan teknologi *nanobubble* sebagai metode alternatif dalam memisahkan minyak atsiri dari aerosol, serta mengurangi beban limbah biologis, kimia, dan fisik. *Nanobubble* dihasilkan melalui generator tipe nosel aliran berputar berbasis kavitasi hidrodinamik, menggunakan berbagai jenis gas (udara, oksigen, dan ozon). Karakterisasi dilakukan dengan mengukur konsentrasi oksigen terlarut, pH, konduktivitas, dan ukuran gelembung mikro. Hasil menunjukkan bahwa generator yang dikembangkan mampu menghasilkan *nanobubble* dengan ukuran rata-rata gelembung mikro 18,85 μm , serta meningkatkan efisiensi pemisahan minyak atsiri dalam aerosol serai wangi. *Nanobubble* ozon dan oksigen menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan udara biasa dalam meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut dan perubahan parameter fisik-kimia lainnya. Teknologi ini berpotensi untuk diterapkan dalam pengolahan limbah industri minyak atsiri secara berkelanjutan.

Kata kunci: Aerosol; konsentrasi oksigen terlarut; *nanobubble*; serai wangi

ABSTRACT

Aerosol, a by-product of essential oil distillation, is often underutilized and may cause environmental issues if improperly discarded. This study aims to develop and apply nanobubble technology as an alternative method for separating essential oils from aerosol and reducing the biological, chemical, and physical load of the resulting waste. Nanobubbles were generated using a hydrodynamic cavitation-based rotary flow nozzle generator, utilizing various gases (air, oxygen, and ozone). Characterization was conducted by measuring dissolved oxygen concentration, pH, conductivity, and microbubble size. The results show that the developed generator successfully produced nanobubbles with an average microbubble size of 18.85 μm , and significantly improved the separation efficiency of essential oils from citronella aerosols. Ozone and oxygen nanobubbles outperformed air nanobubbles in enhancing dissolved oxygen levels and altering key physicochemical parameters. This technology demonstrates strong potential for sustainable waste treatment in the essential oil industry

Keywords: Aerosol; citronella; dissolved oxygen concentration; nanobubble.

PENDAHULUAN

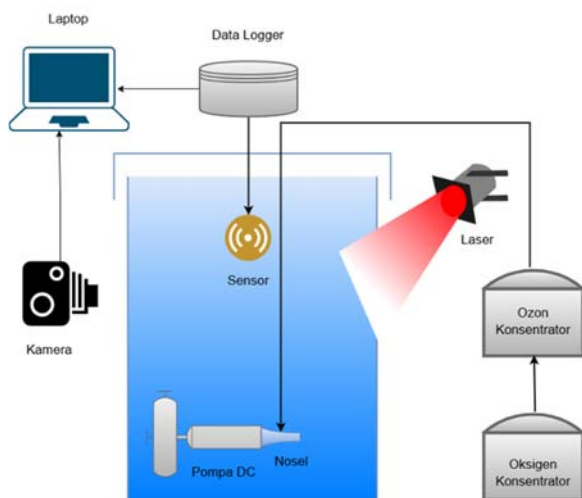
Produk samping dari penyulingan minyak atsiri yaitu aerosol dan hidrosol. Salah satu metode dalam penyulingan minyak atsiri yaitu distilasi uap, dimana setelah proses penguapan yang melewati kondensor akan ditampung dalam wadah yang berisi minyak dan aerosol. Minyak dan aerosol ini masih harus dilakukan pemurnian untuk memisahkan aerosol dan minyaknya. Proses pemurnian ini menggunakan kain monyl untuk mendapatkan minyak atsiri murni (FTIP, 2019). Metode lain dalam pemisahan air minyak dalam aerosol yaitu elektrolisis. Pengetahuan tentang keterikatan air dengan membran dan permukaan protein yang bersifat hidrofilik, kini dapat dijadikan hipotesis terhadap larutan air yang bercampur dengan minyak (Said dkk., 2015). Proses pemisahan aerosol dan minyak atsiri menggunakan alat separator. Separator merupakan alat yang berfungsi sebagai pemisah minyak dan air. Minyak atsiri yang diperoleh dibebaskan dari sisa aerosol. Proses pemurnian minyak menggunakan bahan kimia MgSO_4 (magnesium sulfat) (Aryani dkk., 2020). Teknologi *nanobubble* dipandang

sebagai metode alternatif yang efektif dalam pemurnian minyak atsiri karena mampu meningkatkan pemisahan pengotor tanpa menurunkan kualitas senyawa volatil utama, yang sering terjadi pada metode konvensional berbasis suhu tinggi seperti distilasi ulang (Reineccius, 2006). *Nanobubble* berukuran kurang dari 200 nm memiliki luas permukaan spesifik yang besar, stabilitas tinggi, serta muatan permukaan (zeta potential) yang memungkinkan interaksi intensif dengan senyawa pengotor non-volatil, residu oksidasi, dan penyebab bau tidak diinginkan pada fase minyak (Agarwal et al., 2011; Temesgen et al., 2017). Selain itu, kemampuan *nanobubble* untuk bekerja secara efektif pada suhu rendah membuat proses pemurnian lebih aman bagi komponen sensitif panas seperti monoterpen dan ester, sekaligus mengurangi konsumsi energi serta kebutuhan bahan kimia tambahan (Meegoda et al., 2018).

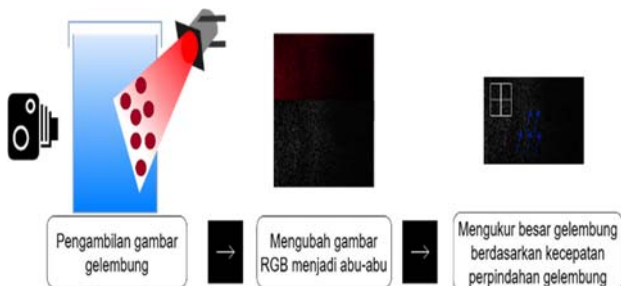
Mayoritas produsen minyak atsiri tidak memanfaatkan aerosol yang dihasilkan. Alasannya adalah karena aerosol tidak dapat digunakan sebagai rendemen minyak atsiri dalam pemasaran. Intensitas aerosol yang dihasilkan bahkan melebihi intensitas kadar minyak yang diperoleh.

Selain itu, aerosol yang terbuang ke perairan justru akan menimbulkan masalah baru, seperti meningkatnya nilai kebutuhan oksigen kimiawi (Said dkk., 2015). Chen dkk., (2017) melaporkan dua tahap ekstraksi yang secara efektif melakukan pemisahan minyak dari aerosol dan pengurangan kadar organik dalam aerosol untuk mengurangi beban pembuangan limbah yang dihasilkan menggunakan pelarut organik. Limbah aerosol yang didapat dari produksi minyak atsiri sebanyak 50-60% merupakan emulsi minyak atsiri yang terikat pada air dan masih mengandung 0,02% minyak atsiri. Penanganan limbah aerosol ini dapat dijadikan produk turunan seperti pembersih lantai, bahan pencuci tangan, serta pengendali hama dan penyakit. Potensi aerosol sebagai bahan pestisida botani adalah kandungan bahan aktif di dalam air suling sekitar 0,2 persen (Lina dkk., 2021).

Nanobubble merupakan gelembung berbentuk bola yang berisi gas dengan diameter 100-200 nm (Nirmalkar dkk., 2018). *Nanobubble* atau dapat disebut sebagai gelembung nano merupakan gelembung yang berukuran sangat kecil. *Nanobubble* yang dimaksud terbagi kedalam dua kategori yaitu *nanobubble* permukaan dan *nanobubble* massal. Gelembung nano memiliki sifat fisisokimia yang unik sehingga banyak di eksplorasi dalam pengaplikasian di berbagai bidang (Oh & Kim, 2017). Aplikasi *nanobubble* sudah dilakukan dalam berbagai bidang, salah satunya yaitu penggunaan *nanobubble* dalam pengolahan air. Bidang medis juga telah menerapkan pengaplikasian dari *nanobubble* khususnya penelitian berfokus pada pencitraan *ultrasound* dan peningkatan pengiriman obat (Wang dkk., 2010). Penelitian *nanobubble* hidrogen diproduksi terbukti dapat meningkatkan BSFC dan efisiensi termal dalam pembakaran mesin bensin (Hoon dkk., 2013).



Gambar 1. Skema pengujian penerapan *nanobubble* pada aerosol



Gambar 2. Pengukuran gelembung mikro menggunakan metode PIV

Penambahan gas ozon untuk produksi *nanobubble* juga dapat digunakan untuk penanganan air limbah (Agarwal dkk., 2011). *Nanobubble* dapat diaplikasikan dalam pemisahan mineral menggunakan flotasi buih (Calgaroto dkk., 2016). Pengaplikasian *nanobubble* dalam pengolahan air diyakini karena kemampuan *nanobubble* menghasilkan radikal bebas yang sangat reaktif (Yamasaki dkk., 2010). Efek dari radikal bebas dan gelombang kejut yang dihasilkan selama ledakan *nanobubble* dapat menonaktifkan mikroorganisme (Ito & Sugai, 2021). *Nanobubbles* menarik untuk digunakan dalam aplikasi pembersihan karena dispersi *nanobubble* menghadirkan area permukaan yang signifikan dari tegangan antarmuka tinggi yang dapat menarik kontaminan sebagai hasil dari energi yang menguntungkan dan dengan demikian mencegah pengendapannya ke permukaan (Alheshibri dkk., 2016).

Penerapan *nanobubble* memiliki potensi dalam pengolahan air dan air limbah serta dalam pemisahan mineral dengan flotasi buih. Pengolahan limbah aerosol sebagai produk samping dari produksi minyak atsiri menjadi salah satu tantangan untuk diterapkannya *nanobubble* dalam pemisahan minyak dari aerosol serta pengurangan beban biologis, kimia, dan fisik dari limbah yang dihasilkan.

METODOLOGI

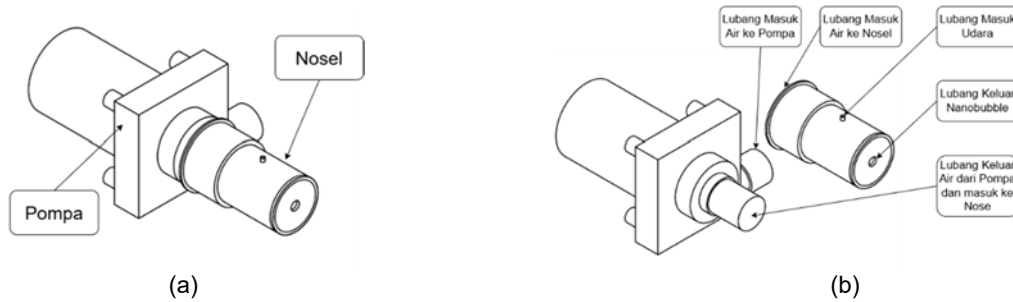
Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Nanobubble* generator tipe nosel aliran berputar, akuarium, oksigen konsentrator, ozon konsentrator, DO meter WAC-2019SD, kamera digital Sony RX-100 IV, dioda laser 635 nm, dan mesin pemurnian air untuk menghasilkan air reverse osmosis. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu air *reverse osmosis*, aerosol serai wangi dari CV Atsiri Garden Indonesia, udara, oksigen yang dihasilkan dari oksigen konsentrator, dan ozon yang dihasilkan dari ozon konsentrator.

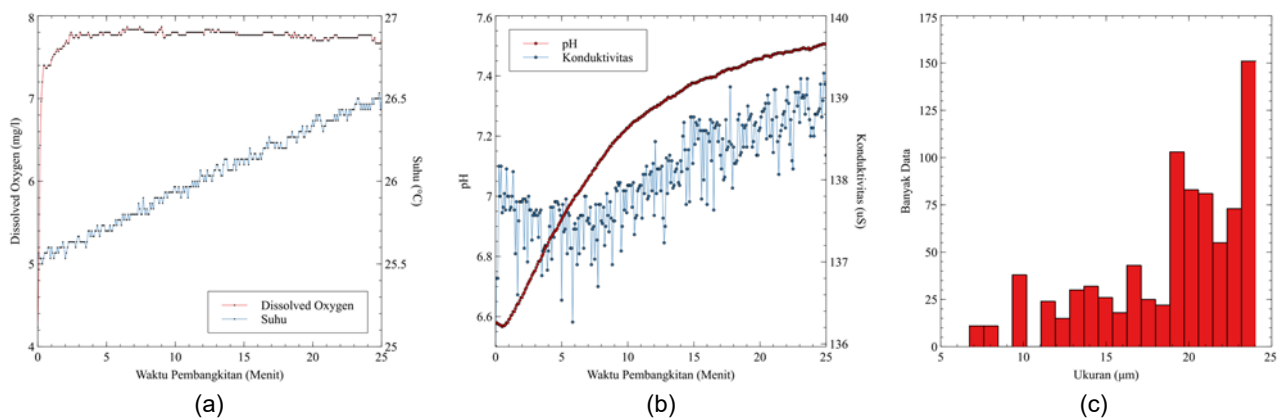
Prosedur Penelitian

Pembuatan *nanobubble* generator menggunakan pompa dc 12 volt 30 watt dengan aliran 1000 liter/jam dengan nosel yang terbuat dari pipa berukuran 0,5 *inchi*. *Nanobubble* diharapkan dapat diproduksi dari *nanobubble* generator yang telah dibuat dengan menggunakan sistem kavitas hidrodinamik. Produksi *nanobubble* dapat dilakukan melalui kavitas hidrodinamik yang merupakan metode paling banyak digunakan karena dapat menghasilkan gelembung nano dalam volume besar dalam larutan curah. Aliran berputar adalah metode kavitas hidrodinamik yang secara efisien menghasilkan gelembung nano dengan laju aliran kontinyu. Beberapa publikasi, termasuk makalah dan paten, telah melaporkan bahwa metode aliran berputar dapat menghasilkan diameter gelembung hingga tingkat skala nano. Generator yang menggunakan sistem kavitas hidrodinamik menggunakan *nozzle* saluran dua ruang sebagai tempat nukleasi gelembungnya (Alam dkk., 2022).

Karakterisasi *nanobubble* generator dilakukan untuk mengamati waktu optimal dalam produksi *nanobubble* berdasarkan konsentrasi dissolved oxygen, pH dan konduktivitas, serta besar ukuran gelembung mikro. Pengukuran besar ukuran gelembung mikro yang dihasilkan dari produksi *nanobubble* generator dilakukan untuk mendeteksi keberadaan gelembung nano. Hal ini berdasarkan penelitian sebelumnya dari (Yasui dkk., 2018), yang menyebutkan bahwa gelembung nano merupakan residu dari gelembung mikro atau penyusutan dari gelembung mikro yang berukuran <50 μm .



Gambar 3. a) *Nanobubble* generator, b) pompa dan nosel



Gambar 4. a) Grafik kenaikan *dissolved oxygen* dan suhu pembangkitan *nanobubble*, b) Grafik pH dan konduktivitas pembangkitan *nanobubble*, c) Distribusi ukuran gelembung mikro.

Penerapan *nanobubble* generator pada aerosol serai wangi dilakukan dengan memproduksi *nanobubble* pada aerosol serai wangi (Gambar 1). Produksi *nanobubble* dilakukan dengan beberapa jenis gas yaitu udara, oksigen, dan ozon. Respon yang diamati setelah produksi *nanobubble* pada aerosol yaitu konsentrasi *dissolved oxygen*, stabilitas *dissolved oxygen*, pH, konduktivitas, dan ukuran gelembung mikro.

Metode yang digunakan merupakan metode experimental dengan metode analisis deskriptif. Metode *Particle Image Velocimetry* (PIV) juga digunakan untuk mengukur besar gelembung mikro yang dihasilkan (Gambar 2). Metode PIV dilakukan dengan pengambilan gambar gelembung yang berhasil diproduksi sesaat setelah produksi *nanobubble* menggunakan *nanobubble* generator. Gelembung mikro akan terbentuk dengan indikasi air berwarna putih susu pada saat produksi *nanobubble*. Fenomena tersebut direkam menggunakan kamera yang memiliki kecepatan tinggi atau *high frame rate camera*. Hal tersebut diperlukan karena gelembung mikro yang terbentuk akan segera menghilang atau pecah sesaat setelah generator dimatikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan *Nanobubble* Generator

Pembuatan *nanobubble* generator tipe nosel aliran berputar dengan sistem kavitas hidrodinamik yang bertujuan untuk mem-produksi *nanobubble* dalam zat cair (Gambar 3a). Penelitian kali ini menggunakan pompa dan nosel dalam pembuatan *nanobubble* generator. Sistem yang digunakan *nanobubble* generator yang dibuat yaitu kavitas

hidrodinamik dengan memanfaatkan nosel aliran berputar saluran dua ruang sebagai tempat pembentukan gelembung (Gambar 3b). Pompa yang digunakan merupakan pompa celup yang dimasukkan ke dalam air pada saat pembangkitan *nanobubble* berlangsung.

Pompa yang digunakan untuk *nanobubble* generator merupakan pompa DC 12 volt 30 watt, dengan aliran sebesar 1000 liter/jam. Pompa berfungsi untuk mengalirkan air ke dalam nosel, dan mensirkulasikan air selama pembangkitan *nanobubble* berlangsung. Nosel yang digunakan terbuat dari pipa berukuran 0,5 *inci*. Nosel yang digunakan memiliki tiga lubang luar dengan fungsi yang berbeda. Lubang pertama sebagai lubang masuknya air, lubang kedua sebagai lubang masuknya gas, dan lubang ketiga sebagai lubang keluaran *nanobubble*. Nosel yang digunakan memiliki sistem *self suction*, hal ini bertujuan agar gas yang digunakan sebagai bahan pembuatan *nanobubble* tidak perlu diinjeksikan.

Karakterisasi *Nanobubble* Generator

Karakterisasi generator *nanobubble* pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui waktu optimal yang dalam membangkitkan *nanobubble* berdasarkan perpindahan massa gas ke cair (konsentrasi *dissolved oxygen*) dan besar ukuran gelembung mikro yang dihasilkan oleh *nanobubble* generator. Berdasarkan karakterisasi yang dilakukan pada *nanobubble* generator (Gambar 4a) terjadi kenaikan yang signifikan pada menit pertama yang kemudian stabil setelah menit kedua. Konsentrasi *dissolved oxygen* tertinggi dari tiga kali percobaan dicapai pada menit ke-sembilan dengan konsentrasi 7,86 mg/l. Pembangkitan *nanobubble* setelah menit ke-sepuluh tidak terjadi kenaikan konsentrasi *dissolved oxygen*, namun cukup stabil yang kemudian turun perlahan. Penurunan suhu pada pembangkitan *nanobubble*

tersebut dikarenakan semakin lama pembangkitan, suhu air semakin naik. Kenaikan suhu setelah pembangkitan selama 25 menit yaitu sebesar 1°C . Sehingga ditentukan waktu optimal pembangkitan yaitu 10 menit.

Respon dari pembangkitan *nanobubble* dalam zat cair yaitu perubahan pH dan konduktivitas yang ditunjukkan oleh Gambar 4b. Selama pembangkitan terjadi penurunan dan kenaikan pH, dimana pH sempat turun pada menit pertama lalu naik sampai pembangkitan *nanobubble* berakhir yaitu pada 25 menit. Konduktivitas air turun pada lima menit pertama, yang kemudian naik sampai pembangkitan *nanobubble* berakhir. Hal tersebut membuktikan bahwa pembangkitan *nanobubble* dalam zat cair memberikan perubahan nilai pH dan konduktivitas dalam zat cair tersebut.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui keberadaan *nanobubble* yaitu dengan mengukur ukuran gelembung mikronya. Berdasarkan hasil karakterisasi *nanobubble* generator, didapatkan bahwa ukuran gelembung mikronya $<25\ \mu\text{m}$. Rata-rata ukuran gelembung mikro yang dihasilkan oleh *nanobubble* generator pada penelitian kali ini yaitu $18,85\ \mu\text{m}$ (Gambar 4c). Hasil tersebut menandakan bahwa *nanobubble* generator yang dibuat dapat menghasilkan *nanobubble*, karena *nanobubble* merupakan residu dari gelembung mikro yang berukuran $<50\ \mu\text{m}$.

Penerapan *Nanobubble* pada Pemisahan Aerosol Serai Wangi

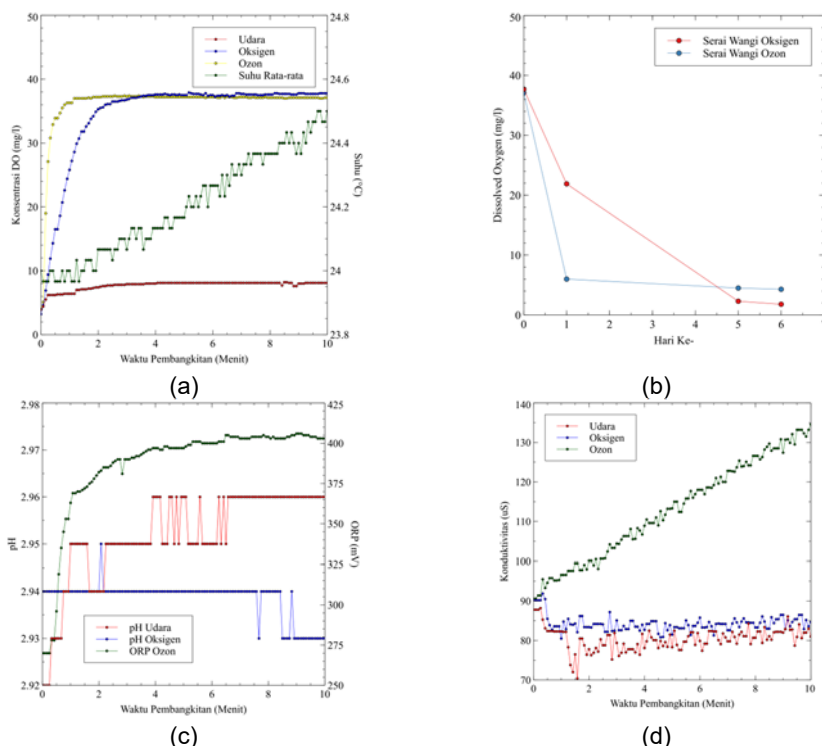
Penerapan *nanobubble* digunakan pada aerosol serai wangi, yang merupakan sisa hasil penyulingan minyak atsiri dari bahan serai wangi. Penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi menggunakan tiga perlakuan yaitu *nanobubble* udara, *nanobubble* oksigen, dan *nanobubble* ozon. Respon yang dilihat dalam penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi yaitu konsentrasi *dissolved oxygen*, stabilitas *dissolved oxygen* (lama waktu tinggal oksigen), nilai pH dan ORP (*Oxidation Reduction Potential*), nilai konduktivitas, dan ukuran gelembung mikro. Konsentrasi DO diukur untuk

melihat kadar oksigen yang dicapai dalam pembangkitan *nanobubble* pada aerosol yang ditunjukkan oleh Gambar 5a. Konsentrasi *dissolved oxygen* dari tiga perlakuan penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi. Konsentrasi DO tertinggi yang dicapai oleh penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi dihasilkan oleh *nanobubble* oksigen yaitu $37,8\ \text{mg/l}$. Konsentrasi DO *nanobubble* ozon pada aerosol serai wangi mencapai titik tertinggi pada $37,4\ \text{mg/l}$, namun turun kembali pada saat pembangkitan *nanobubble* berakhir menjadi $37,1\ \text{mg/l}$. Penerapan *nanobubble* udara mencapai konsentrasi DO tertinggi pada akhir pembangkitan yaitu $8,1\ \text{mg/l}$.

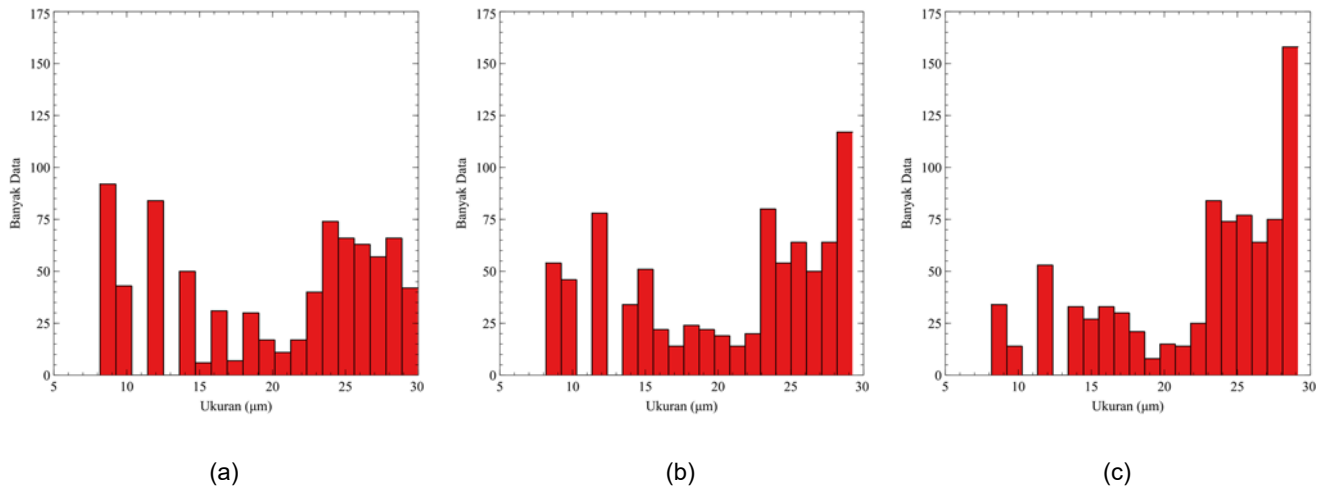
Pengukuran stabilitas DO dilakukan tiga kali pada perlakuan *nanobubble* oksigen dan *nanobubble* ozon setelah pembangkitan sampai hari ke-6 yang ditunjukkan oleh Gambar 5b. Stabilitas DO perlakuan *nanobubble* oksigen dan ozon terlihat berbeda berdasarkan Gambar 5b. Hal tersebut terlihat jelas pada pengukuran hari pertama setelah pembangkitan, yaitu terjadi penurunan yang signifikan pada aerosol serai wangi perlakuan *nanobubble* ozon. Stabilitas DO aerosol serai wangi perlakuan *nanobubble* ozon didapatkan dengan konsentrasi $6\ \text{mg/l}$, sangat jauh jika dibandingkan dengan perlakuan *nanobubble* oksigen yaitu $21,9\ \text{mg/l}$. Namun, pengukuran stabilitas hari ke-6 setelah pembangkitan konsentrasi DO *nanobubble* ozon lebih tinggi dibandingkan dengan *nanobubble* oksigen.

Respon penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi dilihat dari pengukuran pH untuk *nanobubble* udara dan oksigen, sedangkan ozon dilihat dari ORP (*Oxidation Reduction Potential*) yang ditunjukkan oleh Gambar 5c. Berdasarkan Gambar 5c, nilai pH *nanobubble* udara pada aerosol serai wangi setelah pembangkitan mengalami kenaikan, sedangkan pH *nanobubble* oksigen pada aerosol serai wangi turun setelah pembangkitan.

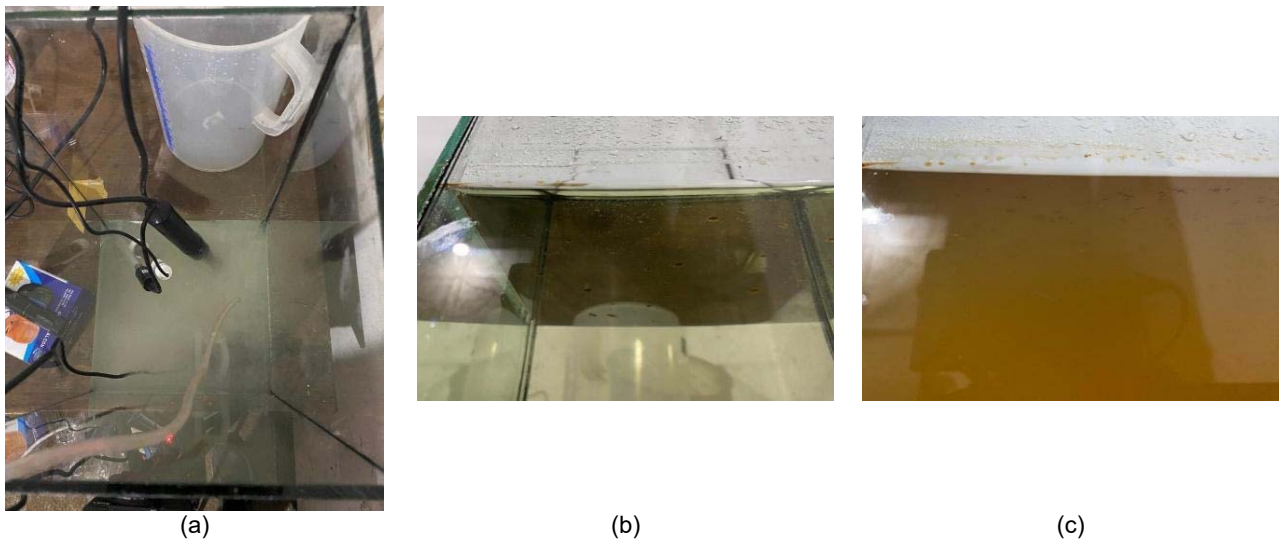
Nilai ORP *nanobubble* ozon pada aerosol serai wangi naik setelah pembangkitan sampai $403\ \text{Mv}$. Kenaikan nilai ORP ini sesuai dengan konsentrasi DO yang tinggi.



Gambar 5. a) Grafik konsentrasi DO dan suhu pembangkitan *nanobubble* aerosol serai wangi, b) Stabilitas DO pada aerosol serai wangi, c) Grafik pengukuran pH dan ORP aerosol serai wangi, d) Grafik nilai konduktivitas aerosol serai wangi



Gambar 6. a) Distribusi ukuran gelembung mikro serai wangi: a) udara, b) oksigen, c) ozon.



Gambar 7. Minyak yang terpisah dari aerosol hasil penerapan *nanobubble*: a) serai wangi udara, b) serai wangi oksigen, c) serai wangi ozon

Nilai konduktivitas dari ketiga perlakuan *nanobubble* dalam penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi ditunjukkan oleh Gambar 5d. Grafik nilai konduktivitas *nanobubble* udara dan oksigen cenderung memiliki penurunan dan kenaikan yang mirip, berbeda dengan nilai konduktivitas *nanobubble* ozon yang mengalami kenaikan sampai akhir pembangkitan *nanobubble*. Nilai konduktivitas *nanobubble* udara mengalami penurunan pada 90 detik pertama pembangkitan, yang kemudian mengalami kenaikan sampai akhir pembangkitan pada 81 uS namun tidak melebihi nilai konduktivitas pada awal pembangkitan yaitu 87,8 uS. *Nanobubble* oksigen mengalami penurunan nilai konduktivitas selama satu menit pertama pembangkitan *nanobubble* yang kemudian cenderung stabil dengan nilai konduktivitas pada akhir pembangkitan yaitu 84,7 uS.

Analisis ukuran gelembung mikro dilakukan dengan metode PIV (*particle image velocimetry*) dalam penerapan *nanobubble* pada aerosol serai wangi. Pengambilan video gelembung dilakukan sesaat setelah pembangkitan, kemudian video akan dikonversi kedalam bentuk gambar. Gambar yang dihasilkan menjadi bahan dalam analisis pengukuran ukuran gelembung mikro menggunakan *software scilab*.

Gambar 6. menunjukkan grafik distribusi ukuran gelembung mikro, dimana hasil tersebut didapatkan dari analisis data sebaran gelembung metode PIV. Data sebaran gelembung pada tiga perlakuan *nanobubble* terlihat berbeda. Hasil analisis rata-rata ukuran gelembung mikro pada *nanobubble* udara, oksigen, dan ozon berturut-turut yaitu 19,77 μm , 20,46 μm , dan 22,22 μm . Hasil ukuran gelembung mikro yang terdeteksi dalam pembangkitan *nanobubble* pada aerosol serai wangi menjadi salah satu parameter bahwa adanya *nanobubble* dalam penelitian pada aerosol serai wangi, karena semua perlakuan memiliki ukuran gelembung mikro <50 μm .

Respon Visual Penerapan *Nanobubble* pada Aerosol

Penelitian penerapan *nanobubble* pada aerosol yang masih mengandung minyak menjadi salah satu studi untuk melihat respon yang terjadi pada aerosol. *Nanobubble* menjadi salah satu teknologi yang digunakan dalam pemisahan mineral, sehingga penelitian kali ini memperlihatkan secara visual pemisahan minyak dari aerosol yang tersaji pada Gambar 7. Minyak yang terpisah dari aerosol serai wangi hasil penerapan *nanobubble* menunjukkan adanya perbedaan jumlah secara visual.

Penerapan pada aerosol serai wangi terlihat bahwa minyak yang paling banyak terpisah yaitu pada perlakuan *nanobubble* ozon. Perlakuan *nanobubble* ozon pada aerosol serai wangi juga menghasilkan kabut atau asap pada saat pembangkitan. Penerapan *nanobubble* ozon pada aerosol serai wangi menyebabkan aerosol berubah warna menjadi kuning kecoklatan. Hasil tersebut menunjukkan adanya respon minyak yang terpisah, asap atau kabut yang dihasilkan pada saat pembangkitan *nanobubble* ozon, dan mengubah warna cairan pada penerapan *nanobubble* ozon.

KESIMPULAN

Generator yang dikembangkan mampu menghasilkan *nanobubble* dengan ukuran rata-rata gelembung mikro 18,85 μm , serta meningkatkan efisiensi pemisahan minyak atsiri dalam aerosol serai wangi. *Nanobubble* ozon dan oksigen menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan udara biasa dalam meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut dan perubahan parameter fisik-kimia lainnya. Teknologi ini berpotensi untuk diterapkan dalam pengolahan limbah industri minyak atsiri secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A., Ng, W. J., & Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and *nanobubble* technology for water treatment. *Chemosphere*, 84(9), 1175–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Alam, H. S., Sutikno, P., Soelaiman, T. A. F., & Sugiarto, A. T. (2022). Bulk *Nanobubbles*: generation using a two-chamber swirling flow nozzle and long-term stability in water. *Journal of Flow Chemistry*, 12(2), 161–173. <https://doi.org/10.1007/s41981-021-00208-8>
- Alheshibri, M., Qian, J., Jehannin, M., & Craig, V. S. J. (2016). A History of *Nanobubbles*. *Langmuir*, 32(43), 11086–11100. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02489>
- Aryani, F., Noorcahyati, & Arbainsyah. (2020). Pengenalan Atsiri (Melaleuca cajuputi). In Jurusan Teknologi Pertanian Politeknik Pertanian Negeri Samarinda.
- Calgaroto, S., Azevedo, A., & Rubio, J. (2016). Separation of amine-insoluble species by flotation with nano and microbubbles. *Minerals Engineering*, 89, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.006>
- Chen, F., Zhang, Q., Gu, H., & Yang, L. (2017). A modified approach for separating essential oil from the roots and rhizomes of *Asarum heterotropoides* var. *mandshuricum*. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2075–2089. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.214>
- FTIP, U. (2019). Kajian Pengembangan Potensi Minyak Atsiri di Kabupaten Bangka Barat.
- Hoon, S., Hyun, S., Song, H., Guen, J., & Kim, J. (2013). Effect of hydrogen *nanobubble* addition on combustion characteristics of gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14849–14853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.063>
- Ito, M., & Sugai, Y. (2021). *Nanobubbles* activate anaerobic growth and metabolism of *Pseudomonas aeruginosa*. *Scientific Reports*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96503-4>
- Lina, E. C., Fithri, P., & Ningsih, V. S. (2021). Pemanfaatan Limbah Serai Wangi Menjadi Insektisida Botani Di Kota Solok. *Jurnal Hilirisasi IPTEKS*, 4(2), 110–118. <https://doi.org/10.25077/jhi.v4i2.512>
- Meegoda, J. N., Aluthgun Hewage, S., & Batagoda, J. H. (2018). Stability of nanobubbles. *Environmental Engineering Science*, 35(11), 1216–1227. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0162>
- Nirmalkar, N., Pacek, A. W., & Barigou, M. (2018). On the Existence and Stability of Bulk *Nanobubbles*. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, 34(37), 10964–10973. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01163>
- Oh, S. H., & Kim, J. M. (2017). Generation and Stability of Bulk *Nanobubbles*. *Langmuir*, 33(15), 3818–3823. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00510>
- Reineccius, G. (2006). *Flavor chemistry and technology* (2nd ed.). CRC Press.
- Said, A., Harti, R., Dharmawan, A., & Rahmah, T. (2015). Pemisahan Hidrosol Hasil Penyulingan Minyak Atsiri Dengan Metode Elektrolisis Untuk Meningkatkan Rendemen Minyak. *Khazanah*, 7(2), 82–94. <https://doi.org/10.20885/khazanah.vol7.iss2.art6>
- Wang, Y., Li, X., Zhou, Y., Huang, P., & Xu, Y. (2010). Preparation of *nanobubbles* for ultrasound imaging and intracellular drug delivery. *International Journal of Pharmaceutics*, 384(1–2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2009.09.027>
- Yamasaki, K., Sakata, K., & Chuhjoh, K. (2010). Water Treatment Method and Water Treatment System.
- Temesgen, T., Bui, T. T., Han, M., Kim, T. I., & Park, H. (2017). Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 246, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>