

## **Analisis Kinerja Pembangkit Gelembung Mikro dan Nano Tipe *Pressurized Dissolution* untuk Mengidentifikasi Potensi Penggunaannya di Bidang Pertanian**

**Yuniar Fauziyah<sup>1\*</sup>, Muhammad Achirul Nanda<sup>2</sup>, Asep Yusuf<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Industri Pertanian,  
Universitas Padjadjaran

\* *Corresponding author: yuniar16002@mail.unpad.ac.id*

---

### Abstrak

Gelembung gelembung mikro dan nano memiliki karakteristik unik seperti luas permukaan yang besar karena diameternya yang sangat kecil dan laju kenaikan yang lambat yang berguna untuk meningkatkan efisiensi perpindahan massa dalam berbagai operasi pemrosesan. Pembangkit gelembung mikro dan nano tipe *pressurized dissolution* merupakan salah satu teknologi gelembung yang bekerja berdasarkan hukum Henry yang menghasilkan gelembung berkonsentrasi tinggi dan kenampakan emulsi seperti susu. Tujuan penelitian ini adalah meningkatkan efisiensi dan efektifitas pembangkit untuk diaplikasikan di bidang pertanian. Sistem pembangkit gelembung tipe *pressurized dissolution* meliputi pompa serta mesin *reverse osmosis* (RO) yang digunakan untuk memurnikan bahan berupa air. Kinerja pembangkit gelembung diuji berdasarkan pengaruh variasi laju aliran air dan tekanan pada tangki disolusi terhadap ukuran dan laju kenaikan gelembung dan kadar oksigen terlarut pada larutan. Metode *Particle Image Velocimetry* (PIV) digunakan sebagai alat ukur karakteristik gelembung. Hasil percobaan menunjukkan kemampuan mesin RO dalam memurnikan air hingga nilai *total dissolved solids* (TDS) mencapai 9 ppm. Gelembung mikro dengan ukuran dan distribusi terbaik dihasilkan pada laju aliran air 30 L/menit dengan tekanan 5 bar, yaitu berkisar 5 – 40  $\mu\text{m}$ . Laju kenaikan gelembung yaitu sebesar 0,015 – 0,968 mm/s. Berdasarkan karakteristik gelembung tersebut, sistem pembangkit gelembung dapat dimanfaatkan di bidang pertanian secara luas.

Kata kunci: Agroteknologi, Gelembung, Pembangkit, *Pressurized dissolution*, Uji kinerja

---

### Abstract

*Micro- and nanobubble (MNBs) has unique characteristics such as large surface area caused by its ultra-small size and slow rise velocity which is able to enhance mass transfer efficiency in various processing operation. Pressurized dissolution type of MNB generator is a part of bubbling technology based on Henry's Law principle, resulting in high concentration bubbles and milk-like appearance. This study aims to enhance efficiency and effectivity of the generator for agricultural applications. The system of MNB generator includes the pump and reverse osmosis machine for water purifying process. Generator performance test was conducted by measuring effects of water flow velocity and pressure of the dissolution tank towards bubble's characteristics and dissolved oxygen (DO) of the solution. Particle Image Velocimetry (PIV) was used to evaluate bubble's size. This experiment results RO machine ability in reducing total dissolved solids (TDS) of the water up to 9 ppm. Finest microbubbles size and distribution attained by operating condition at 30 L/min of water flow velocity and 5 bar of dissolution tank's pressure, which is 5-40  $\mu\text{m}$  in range. Bubbles rise velocity range is 0,015 – 0,968 mm/s. According to this result, pressurized dissolution type of MNB generator has wide potential in agricultural sector applications.*

*Keywords: Agricultural technology, Bubble, Generator, Pressurized dissolution, Performance test*

---

## PENDAHULUAN

Teknologi gelembung mikro dan nano atau *micro- and nanobubbles* (MNBs) saat ini telah banyak diteliti dan dikembangkan untuk dimanfaatkan oleh banyak bidang (Han *et al.*, 2022). Dibandingkan gelembung makro, teknologi MNB memiliki karakteristik luas permukaan yang besar karena diameternya yang sangat kecil, yang berguna untuk meningkatkan efisiensi perpindahan massa dalam berbagai operasi pemrosesan. Karakteristik lainnya seperti laju kenaikan lambat, potensial tinggi dan muatan negatif pada permukaannya, dan radikal bebas berjumlah banyak juga membuat MNB banyak dimanfaatkan di berbagai bidang (Han *et al.*, 2022; Hu & Xia, 2018; Tsuge, 2014). Penggunaan *nanobubble* (NB) sendiri efektif digunakan di bidang bioproses karena karakteristiknya yang mampu bertahan hingga satu bulan dengan kemampuan pelarutan gas yang tinggi (Patel *et al.*, 2021).

Pembangkit MNB tipe *pressurized dissolution* merupakan salah satu teknologi MNB yang fenomena pembentukan kaviti udara terjadi pada cairan mengalir oleh perubahan tekanan di dalam cairan berisi gas terlarut yang terjadi secara cepat di mana tekanan relatif lebih rendah (Han *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2021). Pembangkit ini bekerja berdasarkan Hukum Henry yang menyatakan bahwa jumlah gas yang larut di dalam cairan adalah proporsional terhadap tekanan gas pada permukaan gelembung dalam kesetimbangan saat sistem berada pada suhu konstan (Tsuge, 2014). Berdasarkan hukum tersebut, ukuran dan populasi MNB yang dihasilkan ditentukan oleh konsentrasi gas terlarut yang bergantung pada tekanan di dalam tangki disolusi sistem pembangkit (Maeda *et al.*, 2010 dalam Wang *et al.*, 2022). Gelembung yang dihasilkan berkonsentrasi tinggi dan kenampakan emulsinya terlihat seperti susu dengan ukuran berkisar 200  $\mu\text{m}$  hingga dalam ukuran nano yaitu 50-40 nm. MNB tergolong stabil di dalam larutan (Swart *et al.*, 2020; Tsuge, 2014; Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2022). Kekurangan dari pembangkit MNB ini yaitu konsumsi energinya tinggi sehingga biaya operasinya juga tinggi (Swart *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022). Penyumbatan suplai air akibat sirkulasi air terkontaminasi juga mungkin terjadi (Shen *et al.*, 2022). Namun karakteristik gelembung yang dihasilkan memungkinkan untuk diaplikasikan di beberapa bidang (Han *et al.*, 2022), termasuk di bidang pertanian secara luas (Hidayat, 2019).

Penelitian-penelitian mengenai teknologi MNB berdasarkan metode *pressure dissolution* telah dilakukan, salah satunya oleh Etchepare *et al.* (2017) yang menyimpulkan bahwa kondisi operasi pembangkit MNB tipe *pressurized dissolution*

dengan kombinasi katup jarum (venturi) pada tekanan tangki disolusi sebesar 5 bar menghasilkan kinerja *microbubble* (MB) yang lebih baik dibandingkan tekanan 3,5 bar. NB yang dihasilkan juga dapat meningkatkan proses flotasi. Jeon *et al.* (2018) yang menguji aspek teknik pompa dan operasional (kinerja) pembangkit menemukan bahwa aspek operasional berupa perbedaan tekanan pompa dengan rasio laju aliran gas terhadap cairan berpengaruh terhadap konsentrasi dan ukuran gelembung. Uji kinerja pembangkit gelembung yang dilakukan Wang *et al.* (2022) untuk pemanfaatan MB dalam pengujian alat *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) menghasilkan MB berukuran <100  $\mu\text{m}$  dengan konsentrasi dan stabilitas paling tinggi yang sesuai untuk kebutuhan aplikasinya di lautan. Selain tipe *pressurized dissolution*, penelitian yang menguji kinerja teknologi pembangkit MNB tipe lain dilakukan oleh Liew *et al.* (2020), yang menyimpulkan aspek efisiensi energi pembangkit MB dapat dioptimalisasi dengan berfokus pada ukuran gelembung dan laju volume udara untuk meningkatkan laju transfer oksigen. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, analisis kinerja pembangkit MNB tipe *pressurized dissolution* yang baru perlu dilakukan untuk menjadi pembaharuan dari penelitian Liew *et al.* (2020) yang meneliti pembangkit gelembung tipe *venturi-orifice* serta perbanyak dari penelitian pembangkit tipe *pressurized dissolution* yang sudah ada. Penelitian ini menguji kinerja pembangkit gelembung dengan desain yang berbeda dari penelitian terdahulu dan berfokus pada aplikasi teknologi MNB untuk bidang pertanian.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat berguna untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitasnya, demi mengevaluasi potensi aplikasinya di berbagai bidang (Han *et al.*, 2022; Patel *et al.*, 2021; Salim *et al.*, 2021), yaitu dalam penelitian ini di bidang pertanian secara luas. Tujuannya yaitu mengembangkan teknologi MNB khususnya yang menggunakan metode *pressurized dissolution* sebagai bagian dari agroteknologi untuk mengatasi berbagai permasalahan di bidang pertanian.

## METODE

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Alat dan Mesin Pertanian, Pedca, Universitas Padjadjaran pada bulan Juni sampai Juli 2023. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental kuantitatif yang melalui tahap observasi dan pengukuran untuk memperoleh data. Variabel bebas pada penelitian eksperimental ini adalah laju aliran air dan tekanan tangki disolusi yang divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap variabel terikat yaitu karakteristik MNB berupa diameter dan laju kenaikan serta tingkat oksigen terlarut (*dissolved oxygen*, DO). Selain itu juga ada variabel

kontrol yaitu laju aliran udara bebas dan suhu air yang dikondisikan agar tetap stabil pada angka 25°C dan tidak mengintervensi hubungan variabel bebas dengan variabel terikat.

Percobaan laju aliran air dilakukan dengan mengatur bukaan katup masukan sehingga terbaca 10, 20, 30, dan 40 L/min pada laju aliran udara masuk bebas. Tekanan tangki disolusi diatur berdasarkan waktu pembukaan katup dekomresi (kran keluaran) pada tekanan 3, 4, dan 5 bar. Pada setiap percobaan, data karakteristik gelembung diambil menggunakan metode *Particle Image Velocimetry* (PIV) dan kadar DO selama pengoperasian pembangkit gelembung diukur menggunakan sensor DO pada alat ukur *water quality meter*. Data kemudian diolah menggunakan perangkat lunak SPSS untuk memperoleh sajian data dalam bentuk grafik. Adapun alat dan bahan dipaparkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian beserta spesifikasinya

No	Nama alat	Alat	Spesifikasi
1.	Pembangkit MNB Tipe <i>Pressure Dissolution</i>	Merk dan Tipe: Airlux Aqua Jet 100A;	Debit maksimum: 40 L/menit
2.	Mesin <i>Reverse Osmosis</i> (RO)	Merk: Micron; Model: S-076-004-0;	Debit aliran: 4 L/menit
3.	Reservoir/akuarium kaca	Ukuran: 30 L	
4.	<i>Water Quality Meter</i>	Model: WAC-2019	
5.	<i>Pressure gauge</i>	Merk: Wiebrock; Tipe: Dry-pressure gauge 2,5”;	
6.	<i>Flow meter</i>	Merk/Model: K24; Tipe: <i>Electronic turbine flow meter</i>	
7.	TDS meter	Model: TDS-3 TDS/TEMP	
8.	Kamera <i>slow motion</i>	Merk/Model: Sony RX200 IV; Tipe: Kamera CMOS, <i>slow motion</i> 240 fps; Resolusi: 20.1 MP	
9.	Laptop	Lenovo Tipe G405, <i>Processor AMD E1 Essential</i> , Windows 7 32-bit	
No	Perangkat Lunak		
10.	SCILAB	Versi 6.1.1; Kompatibilitas: Windows Vista, 7, 8, 10, 32-bit	
Bahan			
12.	Air murni	20 Liter	

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kinerja Mesin *Reverse Osmosis* dalam Proses Purifikasi Air

Penyumbatan suplai air di dalam saluran pembangkit gelembung mikro dan nano tipe *pressurized dissolution* sering terjadi akibat sirkulasi air terkontaminasi (Shen *et al.*, 2022). Oleh karena itu, pada penelitian air yang berasal dari kran dipurifikasi terlebih

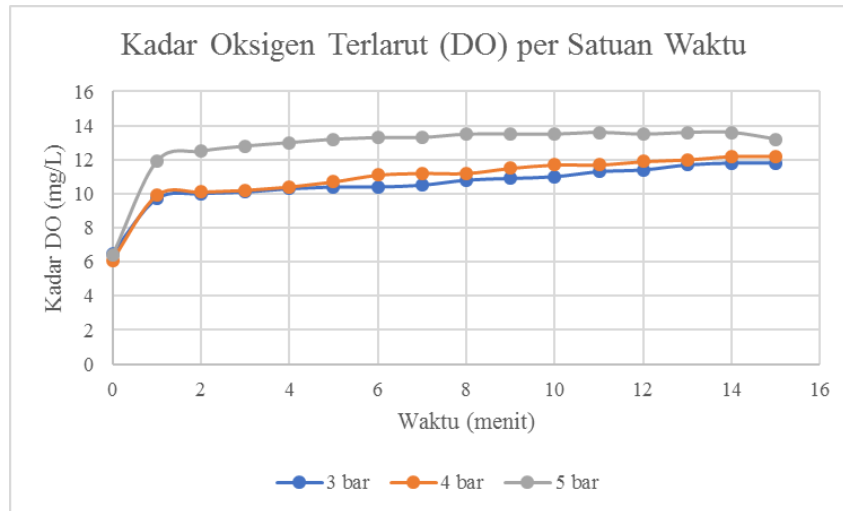
dahulu menggunakan mesin *reverse osmosis* (RO). Mesin yang digunakan menunjukkan kinerja yang baik dalam menurunkan nilai *total dissolved solids* (TDS) yang pada mulanya berkisar 121-163 ppm menjadi 8-12,9 ppm. Dari hasil tersebut, air dapat digunakan dalam pembangkitan gelembung. Mesin RO menjadi salah satu bagian dari sistem pembangkit gelembung mikro dan nano. Tabel 2 menunjukkan data hasil pengukuran nilai TDS air yang dipurifikasi.

Tabel 2. Hasil pengukuran TDS air hasil purifikasi mesin RO menggunakan TDS meter dan *water quality meter*

Pengukuran ke-	Total Dissolved Solids (TDS) (ppm)			Alat ukur
	Air baku	Air reversed	Air murni (hasil RO)	
I	125	184	10	TDS meter
II	121	177	8	TDS meter
	121	160	9	TDS meter
III	163	213	13,9	<i>Water quality meter</i>
	Nilai TDS akhir			9

#### Kadar Oksigen Terlarut (*Dissolved Oxygen, DO*)

Kadar oksigen terlarut atau DO diukur menggunakan *water quality meter* tipe WAC-2019 dengan *probe* untuk mengukur DO. Dari hasil pengukuran selama 15 menit pengoperasian pembangkit gelembung, kadar DO paling tinggi yaitu 13,6 mg/L pada saat tekanan di tangki disolusi sebesar 5 bar. Hal ini sesuai dengan prinsip Hukum Henry yang berlaku pada pembangkit gelembung tipe ini yang menyatakan bahwa jumlah gas terlarut proporsional terhadap tekanan parsial di sekitarnya. Semakin tinggi tekanan yang bekerja pada aliran air dan udara di dalam sistem pembangkit gelembung, semakin banyak pula gas oksigen yang larut ke dalam air. Grafik perubahan kadar DO terhadap waktu pada kondisi operasi yaitu tekanan 3-5 bar dan rasio laju aliran udara bebas terhadap air tetap dapat dilihat pada Gambar 1.



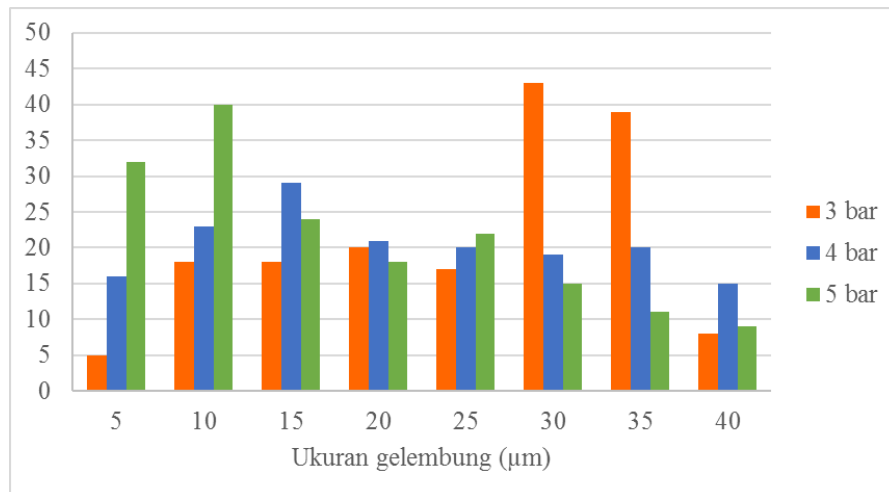
Gambar 1. Kadar oksigen terlarut pada tekanan tangki disolusi berbeda dan laju aliran air dan udara yang sama

### Karakteristik Gelembung yang Dihasilkan Pembangkit Tipe *Pressurized Dissolution*

Gelembung mikro yang dihasilkan pembangkit tipe *pressurized dissolution* dan terukur oleh metode *particle image velocimetry* (PIV) berkisar antara 5 – 60  $\mu\text{m}$  dengan kondisi operasi terbaik yaitu pada laju aliran air sebesar 30 L/menit yang menghasilkan gelembung berukuran 5 – 40  $\mu\text{m}$  yang lebih seragam. Sebagaimana ditunjukkan pada grafik di Gambar 2, tekanan disolusi yang menghasilkan gelembung berukuran <15  $\mu\text{m}$  paling banyak adalah 5 bar. Dengan ukuran gelembung mikro paling kecil tersebut, laju kenaikan terminal dari gelembung dapat diestimasi menggunakan rumus Hadamard-Rybczynski pada saat rasio viskositas udara terhadap viskositas air diasumsikan hampir tak terhingga, sehingga larutan tunduk pada hukum Stokes untuk aliran *creeping* tunak (bilangan  $Re < 1$ ) yang melalui bola kejur dengan kondisi tanpa slip, yaitu sebagai berikut (Swart *et al.*, 2020; Tanaka *et al.*, 2020):

$$U_{t(ST)} = \frac{\Delta\rho g D^2}{18\mu}$$

di mana  $U_{t(ST)}$  adalah laju kenaikan terminal gelembung,  $\Delta\rho$  perbedaan densitas antara air dan gas,  $g$  percepatan gravitasi,  $D$  diameter gelembung, dan  $\mu$  viskositas air. Berdasarkan rumus tersebut, pada suhu larutan 25 °C dan densitas udara 1,2 kg/m<sup>3</sup>, dapat dihitung laju kenaikan gelembung sebagai mana yang ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 2. Distribusi ukuran gelembung pada laju aliran air 30 L/menit dengan tekanan tangki disolusi berbeda.

Tabel 3. Laju kenaikan gelembung mikro yang dihasilkan pembangkit gelembung tipe *pressurized dissolution*

Diameter gelembung (μm)	Laju kenaikan (mm/s)
5	0,0152
10	0,0604
15	0,13598
20	0,2417
25	0,3777
30	0,5439
35	0,7403
40	0,9679

### Potensi Pemanfaatan Pembangkit Gelembung Tipe *Pressurized Dissolution* di Bidang Pertanian

Pembangkit *pressurized dissolution* yang bekerja berdasarkan metode nukleasi menghasilkan MNB dengan kinerja yang lebih baik dibandingkan pembangkit yang berdasarkan metode kolaps gelembung (*break up*) (Wang *et al.*, 2022). Hal ini karena ukuran gelembung <100 μm dan berkonsentrasi tinggi. MNB dengan karakteristik seperti ini dapat diaplikasikan di berbagai operasi pemrosesan di lingkup pertanian. Misalnya, laju perpindahan massa yang tinggi dapat berguna pada pengairan dan pemberian nutrisi tanaman hidroponik. MB gas ozon yang dibentuk oleh sistem pembangkit gelembung dinilai lebih efisien dibandingkan tipe sirkulasi gas-air dalam menghilangkan residu pestisida pada sayuran (Jeon *et al.*, 2018).

Gelembung yang dihasilkan juga dapat digunakan dalam menangani air sungai atau di sekitar DAS yang terkontaminasi oleh limbah peternakan atau pupuk kimia dan obat-obatan pertanian. Menurut Maeda *et al.* (2010) (dalam Wang *et al.* 2022), gelembung mikro atau MB berukuran antara 50-200  $\mu\text{m}$  atau lebih kecil dengan angka densitas (konsentrasi) yang tinggi dapat digunakan dalam memurnikan air terkontaminasi. Remediasi air tanah dapat dilakukan menggunakan MNB ozon untuk mengeliminasi cemaran zat organik dari aktivitas pertanian (Hu & Xia, 2018). Meskipun densitas gelembung tidak dianalisis, namun kenampakan larutan MNB yang berwarna putih susu mengindikasikan konsentrasi gelembung yang tinggi. Dalam industri pertanian, MB dengan diameter berkisar 20-100  $\mu\text{m}$  dapat secara efektif digunakan untuk memisahkan atau mengeliminasi minyak hingga mencapai angka >84% (Shen *et al.*, 2022).

Dari hasil pengukuran kadar DO, pembangkit MNB tipe *pressurized dissolution* dapat digunakan pada budidaya perikanan berskala besar, menggantikan aerasi konvensional yang efisiensinya lebih rendah (Foudas *et al.*, 2023). Aerasi menggunakan MNB dapat memperpendek waktu kontak untuk oksigen berpindah ke dalam cairan dan mencapai level DO yang lebih tinggi per satuan waktu yang diberikan (Zhou *et al.*, 2022). Ukuran MNB yang sangat kecil untuk aerasi perikanan atau budidaya hasil laut dapat meningkatkan bioaktivitas di dalam tubuhnya sehingga meningkatkan laju peredaran darah dan pertumbuhannya (Tsuge, 2014). Untuk memperoleh kadar DO yang lebih baik, penggunaan generator atau kompresor oksigen dapat dimasukkan ke dalam satu kesatuan sistem pembangkit gelembung mikro dan nano tipe *pressurized dissolution*.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan dari penelitian ini adalah pembangkit gelembung mikro dan nano (*micro-and nanobubbles*, MNB) tipe *pressurized dissolution* menghasilkan gelembung dengan ukuran dan distribusi seragam pada laju aliran air 30 L/menit dan tekanan sebesar 5 bar. Kadar DO paling tinggi yaitu pada tekanan di tangki disolusi sebesar 5 bar. Ukuran gelembung sebesar 5 – 40  $\mu\text{m}$  yang dihasilkan dapat diaplikasikan di berbagai sub-sektor pertanian yang kompleks. Dari simpulan ini, saran yang dapat diberikan diantaranya yaitu: a) perlunya menganalisis aspek teknik dan ekonomi dari penggunaan pembangkit MNB tipe *pressurized dissolution* untuk memperoleh data aktual mengenai efisiensi sistem dibandingkan teknologi lain; b) mengukur diameter gelembung nano dengan metode lain seperti *dynamic light scattering* (DLS) atau lainnya yang mampu mendeteksi gelembung



berskala nano; dan c) menguji kinerja pembangkit gelembung berdasarkan studi kasus pengaplikasiannya di bidang pertanian.

### DAFTAR PUSTAKA

- Etchepare, R., Oliveira, H., Azevedo, A., & Rubio, J. (2017). Separation of emulsified crude oil in saline water by dissolved air flotation with micro and nanobubbles. *Separation and Purification Technology*, 186, 326–332.
- Foudas, A. W., Kosheleva, R. I., Favvas, E. P., Kostoglou, M., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2023). Fundamentals and applications of nanobubbles: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 189, 64–86.
- Han, G., Chen, S., Su, S., Huang, Y., Liu, B., & Sun, H. (2022). A review and perspective on micro and nanobubbles: What They Are and Why They Matter. *Minerals Engineering*, 189, 107906.
- Hidayat, G. W. (2019). Peran Petani Transmigran dalam Percepatan Diseminasi Inovasi Teknologi Pertanian di Papua. *Jurnal Triton*, 10(1), 75-89.
- Hu, L., & Xia, Z. (2018). Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 446–453.
- Jeon, S.-Y., Yoon, J.-Y., & Jang, C.-M. (2018). Bubble Size and Bubble Concentration of a Microbubble Pump with Respect to Operating Conditions. *Energies*, 11(7).
- Liew, K. C. S., Rasdi, A., Budhijanto, W., Yusoff, M. H. M., Bilad, M. R., Shamsuddin, N., Md Nordin, N. A. H., & Putra, Z. A. (2020). Porous Venturi-Orifice Microbubble Generator for Oxygen Dissolution in Water. *Processes*, 8(10).
- Maeda, Y., Hosokawa, S., Taya, C., Tomiyama, A., Yamaguchi, S., & Ito, Y. (2010). Diameter and Number Density of Microbubbles Generated by a Pressurized Dissolution Method (in Japanese). *Japanese Journal of Multiphase Flow*, 24(4), 462–469.
- Patel, A. K., Singhanian, R. R., Chen, C.-W., Tseng, Y.-S., Kuo, C.-H., Wu, C.-H., & Dong, C. D. (2021). Advances in micro- and nano bubbles technology for application in biochemical processes. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101729.
- Salim, T. I., Juliastuti, E., & Nadhira, V. (2021). Pengembangan Karakterisasi Gelembung Mikro Menggunakan Metode PIV beserta Pemantauan dengan IoT. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, 5(5), 950–957.
- Shen, W., Mukherjee, D., Koirala, N., Hu, G., Lee, K., Zhao, M., & Li, J. (2022). Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: A review. *Environmental Reviews*, 30(3), 359–379.
- Swart, B., Zhao, Y., Khaku, M., Che, E., Maltby, R., Chew, Y. M. J., & Wenk, J. (2020). In situ characterisation of size distribution and rise velocity of microbubbles by high-speed photography. *Chemical Engineering Science*, 225, 115836.

- Tanaka, S., Kastens, S., Fujioka, S., Schlüter, M., & Terasaka, K. (2020). Mass transfer from freely rising microbubbles in aqueous solutions of surfactant or salt. *Chemical Engineering Journal*, 387, 121246.
- Tsuge, H. (2014). *Micro- and Nanobubbles: Fundamentals and Applications* (1st ed.). Jenny Stanford Publishing.
- Wang, Y., Thanyamanta, W., Bulger, C., & Bose, N. (2022). Experimental study to make gas bubbles as proxies for oil droplets to test AUV detection of oil plumes. *Applied Ocean Research*, 121, 103080.
- Zhang, M., Qiu, L., & Liu, G. (2020). Basic characteristics and application of micro-nano bubbles in water treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 510(4), 042050.
- Zhou, L., Wang, S., Zhang, L., & Hu, J. (2021). Generation and stability of bulk nanobubbles: A review and perspective. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 53, 101439.
- Zhou, S., Liu, M., Chen, B., Sun, L., & Lu, H. (2022). Microbubble- and nanobubble-aeration for upgrading conventional activated sludge process: A review. *Bioresource Technology*, 362, 127826.