REKAYASAMESIN V13 N2
eISSN 2477-6041 artikel 6, pp. 361 – 371, 2022

PENGARUH JARAK NOSEL UDARA DENGAN *OUTLET* TERHADAP DISTRIBUSI UKURAN *BUBBLE* YANG DIHASILKAN OLEH MBG TIPE *SWIRL*

Drajat Indah Mawarni
Tenaga Pengajar (Dosen)
Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe Cepu
Jurusan Teknik Mesin
drajatindah74@gmail.com

Indarto
Guru Besar (Dosen)
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
Jurusan Teknik Mesin
indarto@ugm.ac.id

Deendarlianto
Guru Besar (Dosen)
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
Jurusan Teknik Mesin
deendarlianto@ugm.ac.id

Wiratni Budhijanto
Dosen
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
Jurusan Teknik Kimia
wiratni@ugm.ac.id

This research uses a swirl type MBG (MBG) with the gap variation between the air nozzle and the outlet of 1, 5 and10 mm. In this experiment, we used a tangential inlet of 25 mm and an outlet of 20 mm with a water flow rate of 20 – 70 l/min and an air flow rate range of 0.1 – 0.8 l/min, to determine the characteristics of MBG which include bubble distribution, pressure drop, hydraulic power, and efficiency. The probability of the diameter of the microbubble formed was in the range of 90 – 150 µm for all variations of the air nozzle gap. The larger the incoming water flow rate, the smaller the diameter of the bubbles formed, whereas if the water flow rate decreases, the diameter of the bubbles formed will increase. In contrast to the water flow rate, if the air flow rate increases, the diameter of the bubbles formed will increase, whereas if it decreases, the diameter of the bubbles will decrease. From the signal processing data, information was obtained about the comparison of the pressure drop of the three variations of the air nozzle gap, as follows: The higher the water flow rate, the pressure drop and hydraulic values increase significantly, while for air flow rate, the higher the air flow rate, the pressure drop and hydraulic power values will increase albeit not significantly. As for MBG efficiency, it will decrease significantly with increasing water flow rate and will increase insignificantly with decreasing water flow rate.

Keywords: *MBG, Bubble, Swirl, Hydraulic Power, Pressure Drop.*

1. PENDAHULUAN

Microbubble adalah *bubble* yang mempunyai ukuran dengan rentang antara milimeter dan mikrometer [4]. Beberapa keunikan dari *microbubble* adalah karena ukuran *bubble* yang sangat kecil, sehingga luas kontak antara permukaan fase cair dan gas besar sehingga efisiensinya meningkat. [9], [11], [16], memiliki waktu tinggal dalam cairan lebih lama, memiliki kecepatan slip lebih rendah karena laju kelarutan yang dihasilkan lebih tinggi dengan kecepatan naik(*rising velocity*) lebih lambat. Melalui analisis tersebut, teknologi *microbubble* terus dikembangkan oleh para peneliti. Alat yang digunakan untuk menghasilkan *microbubble* disebut *Microbubble Generator* (MBG) dan dalam dua dekade terakhir banyak peneliti yang fokus untuk menciptakan MBG [15]. Secara umum, pengembangan penelitian MBG dilakukan untuk mengetahui kemampuan MBG dalam menghasilkan unjuk kerja yang lebih baik, yaitu mampu menggenerasi *microbubble* dengan diameter kecil dan konsumsi daya yang rendah [3]. MBG menunjukkan potensi di berbagai aplikasi, sebagai perangkat aerasi, generator ini dapat meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut di dalam air untuk menambah laju pertumbuhan ikan dan tumbuhan, dan telah berhasil diterapkan pada budidaya ikan [2], [5] dan produksi pertanian [7]. Dengan kemampuan menyuplai gelembung halus dalam jumlah besar, MBG memiliki prospek yang bagus dalam pengolahan air limbah [13], [17], flotasi mineral [18], dan bioreaktor [12]. Eksperimen dengan menggunakan MBG tipe *orifice-cyclone* untuk mempelajari karakteristik *microbubble* dilakukan oleh [15], dimana semakin kecil ukuran diameter *bubble* maka semakin turun nilai *Pressure Drop* dan *Hydraulik Power*nya, namun meningkatkan *efisiensi* pompanya. Saat ini, peneliti melakukan eksperimen lanjutan dengan menggunakan MBG tipe *Swirl* untuk mengetahui *performa* MBG dalam menghasilkan *bubble* berukuran lebih kecil dengan memvariasi jarak nosel udara terhadap *outlet*. Bagian utama dari MBG ini, terdiri dari *tangential*

Corresponding Author: drajatindah74@gmail.com Received on: July 2021 Accepted on: May 2022
DOI: https://doi.org/10.21776/jrm.v13i2.977

inlet, *swirling chamber*, *nozzle breakup* dan nosel udara. *Outlet* nosel udara, diletakkan pada titik yang mengalami vakum(tekanan dibawah 1 atm) di dalam *swirling chamber* agar nosel gas mampu menghisap udara luar secara otomatis. Pada eksperimen ini nosel udara di diletakkan dengan variasi jarak 1, 5, 10 mm dari *outlet*. Fluida masuk melalui *inlet tangential* menuju swirling *chamber*. Dengan meningkatnya intensitas turbulensi akibat aliran *swirling*, maka udara akan dicacah oleh aliran air yang berputar membentuk *bubble* yang mempunyai ukuran lebih kecil.

Eksperimental dilakukan untuk menghimpun data berupa hasil rekaman video *microbubble* dengan menggunakan kamera video kecepatan tinggi Phantom Miro M310 dan data penurunan tekanan pada *inlet* dan *outlet MBG* dengan menggunakan Pressure transduser merk Validyne P55D yang kemudian diolah untuk mengetahui performa MBG. Pengolahan data eksperimen berupa probabilitas distribusi ukuran bubble dilakukan dengan menggunakan *image processing* sedangkan pengolahan data *pressure drop* dilakukan melalui *signal analysis* dengan pendekatan statistik untuk mendapatkan hasil yang lebih terperinci[1].

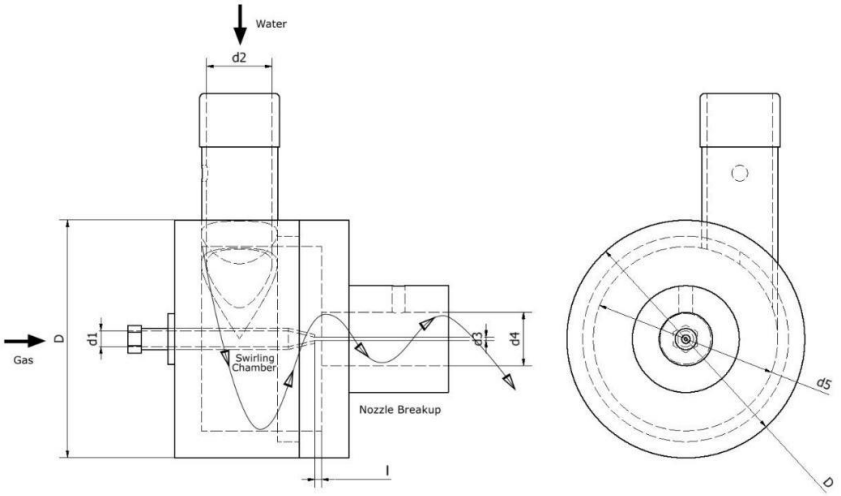
Untuk mendapatan informasi yang lengkap tentang performa MBG tipe *Swirl*, peneliti melakukan penelitian dengan judul "Karakteristik MBG Tipe *Swirl* dengan Variasi Jarak Nosel Udara terhadap *Outlet*". Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih lengkap terkait dengan performa MBG untuk bisa dikembangkan dalam bidang industri dan melengkapi data base penelitian pengembangan MBG di masa depan.

2. TINJUAN TEORITIS

Microbubble merupakan *bubble* yang memiliki ukuran diameter dalam skala yang kecil dengan rentang antara milimeter dan mikrometer. Para ahli memiliki pendapat yang berbeda – beda mengenai definisi dari *microbubble* itu sendiri. Menurut [11], *microbubble* adalah *bubble* yang memiliki diameter kurang dari 200 μm dan kelarutan yang tinggi di dalam air. Sedangkan,[19] menjelaskan bahwa *microbubble* adalah *bubble* kecil yang memiliki batasan ukuran 10 – 50 μm.

Sebagai alat pembangkit *bubble*, MBG memiliki beberapa tipe. Namun demikian MBG tipe *Swirl* yaitu MBG yang dalam menghaslkan *bubble* memanfaatkan aliran berputar, masih diyakini mampu menghasilkan ukuran diameter lebih kecil dibandingkan MBG tipe yang lain. MBG dengan tipe *swirling fine* pertama kali dirancang oleh Ohnari pada tahun 2002 dan dipatenkan dengan nomor paten US 6382601. MBG jenis ini memiliki bagian *container* dengan bentuk seperti botol. Untuk menghasilkan aliran berputar, cairan yang masuk dibuat arah *tangensial* pada bagian permukaan yang melingkar di dinding dalam. Udara masuk melalui ruangan yang berada di tengah *container*, dan keluaran dari campuran udara dan cairan diletakkan di bagian ujung dari ruang *container*. Berikutnya MBG tipe *swirling jet*, yang dirancang oleh Tabei dkk. pada tahun 2007, [8], dan [20]. Untuk menghasilkan aliran berputar, fluida air masuk melalui *inlet tangensial* pada sisi *swirling chamber*. Kemudian udara yang masuk kedalam *swirling chamber* bercampur dengan aliran berputar membentuk *bubble* berukuran mikro. Metode pengambilan data menggunakan *transmisi* cahaya yang mengalami perubahan akibat naiknya gelembung udara ke permukaan air.

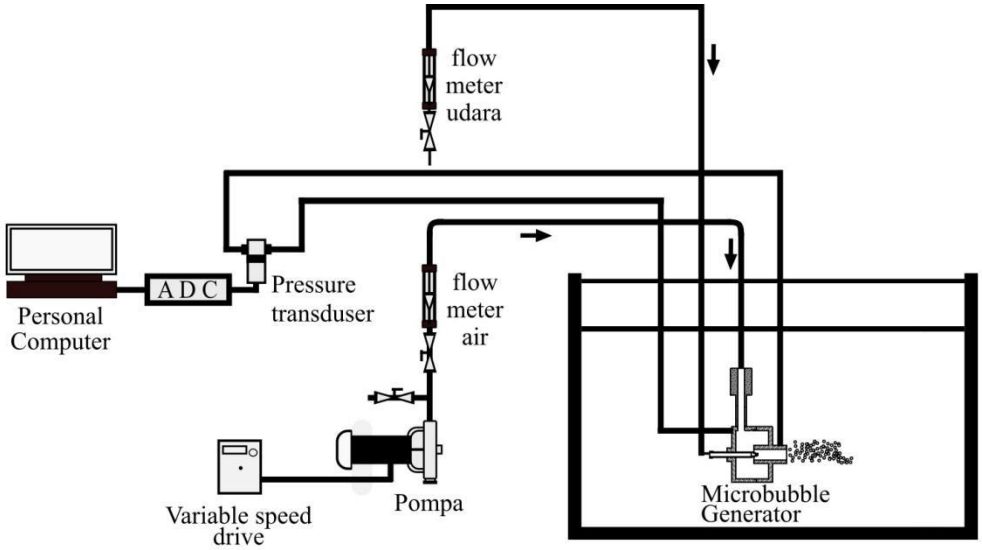
Eksperimen yang dilakukan oleh peneliti menggunakan MBG tipe *Swirl*, yang merupakan pengembangan dari tipe *swirling fine* dan *swirling jet*. Alat ini menggunakan *tangential inlet* 25 mm; diameter outlet 20 mm; nosel udara 1,2 mm yang diletakkan dengan variasi jarak 1, 5, 10 mm dari *outlet* MBG.



Gambar 1: MBG *tipe Swirl* pengembangan dari MBG tipe *swirling fine* dan MBG tipe *swirling jet*.

3. METODE PENELITIAN

Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, air masuk melalui *inlet tangential* menuju *swirling chamber* dengan debit berkisar 20 – 70 l/min dan udara masuk melalui nosel udara dengan debit berkisar 0.1 – 0.8 l/min. Udara akan terhisap secara otomatis karena tekanan pada MBG kurang dari 1 atmosfir atau bernilai negatif akibat dari *intensitas turbulensi* air yang meningkat sebagai akibat aliran air yang berputar dan peristiwa *suddent constraction* akibat perubahan diameter yang tiba tiba mengecil[6]. Berikutnya *bubble* mulai terbentuk pada *nosel breakup* dalam bentuk saluran bergelembung, sebelum akhirnya mengalami pecah atau *breakup* pada outlet MBG akibat *diferensial* tekanan yang terjadi. Dengan pengaturan jarak nosel udara terhadap *outlet* MBG, ketika bertemu dengan aliran berputar, maka akan bisa diketahui kondisi optimum distribusi ukuran *microbubble* yang diinginkan.



Gambar 2: Skema peralatan penelitian karakteristik MBG tipe Swirl

Aparatus penelitian disajikan pada Gambar 2. Air bersih digunakan sebagai fluida cair dan udara pada tekanan 1 atmosfer sebagai fluida gas. MBG yang digunakan adalah tipe *swirl*. Seksi uji berupa bak berdinding kaca dengan ketebalan 13 mm, panjang 280 cm, lebar 60 cm, tinggi 60 cm dan berisi air dengan ketinggian 40 cm. MBG ditempatkan 20 cm dari permukaan air dan pada pertengahan lebar bak. Air disirkulasikan secara tertutup dengan menggunakan pompa. Debit sirkulasi air divariasi dengan cara mengatur putaran pompa menggunakan *variable speed drive*. Debit sirkulasi air diukur dengan flow meter tipe rotameter air. Udara mengalir dari atmosfer menuju ke MBG secara alami karena tekanan di dalam MBG lebih rendah dari tekanan udara atmosfer. Debit udara yang mengalir diatur dengan katup dan diukur dengan rotameter. Perbedaan tekanan pada sisi masuk air dan sisi keluar pada MBG diukur dengan *pressure transduser* yang dihubungkan *analog to digital converter* (ADC). Data pengukuran yang telah dikonversi ke data digital oleh ADC kemudian direkam oleh personal komputer. Untuk memposisikan jarak nosel udara terhadap *outlet* MBG, dilakukan dengan cara memutar nosel udara berlawanan arah jarum jam. Satu putaran penuh sama dengan jarak 1 mm.

Pengukuran unjuk kerja meliputi penurunan tekanan (P_1-P_2), daya/*hydraulic power* dan efisiensi MBG. Daya yang diperlukan dihitung dengan merujuk pada persamaan [11]. Persamaan daya yang diperlukan MBG tipe *swirl* adalah sebagai berikut :

$$\textit{Hydraulic power } (L_W) = (P_1 - P_2) \cdot (Q_G + Q_L) \tag{1}$$

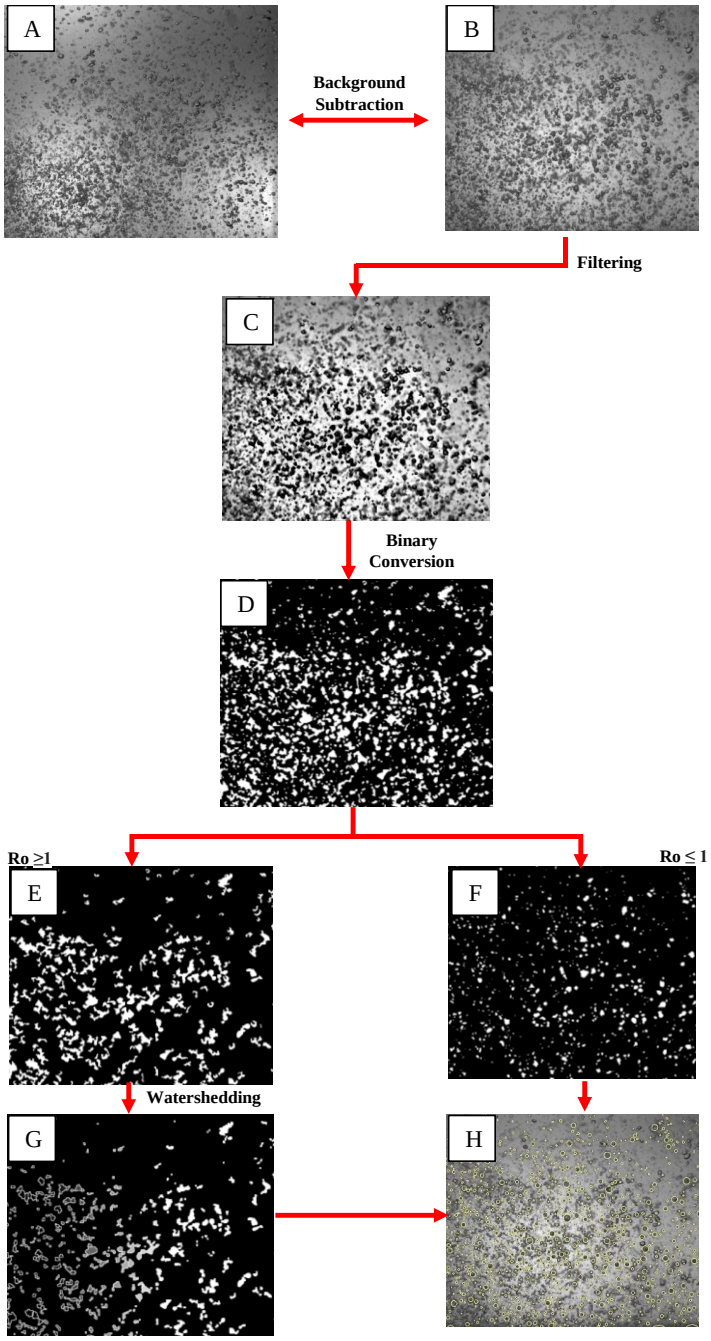
dimana P_1 adalah tekanan pada sisi masuk air(P_1), P_2 adalah tekanan pada sisi keluar MBG(P_2), Q_L adalah laju aliran air(l/min) dan Q_G adalah laju aliran udara(l/min). Sedangkan *efisiensi* dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{\rho.\mathrm{g.H}}{\mathrm{L}_W}.Q_G \tag{2}$$

dimana ρ adalah densitas air(kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi(m/s^2), H adalah kedalaman penempatan

MBG dari permukaan air(m), Q_G adalah laju aliran udara(l/min) dan L_W adalah hydraulic power(watt).

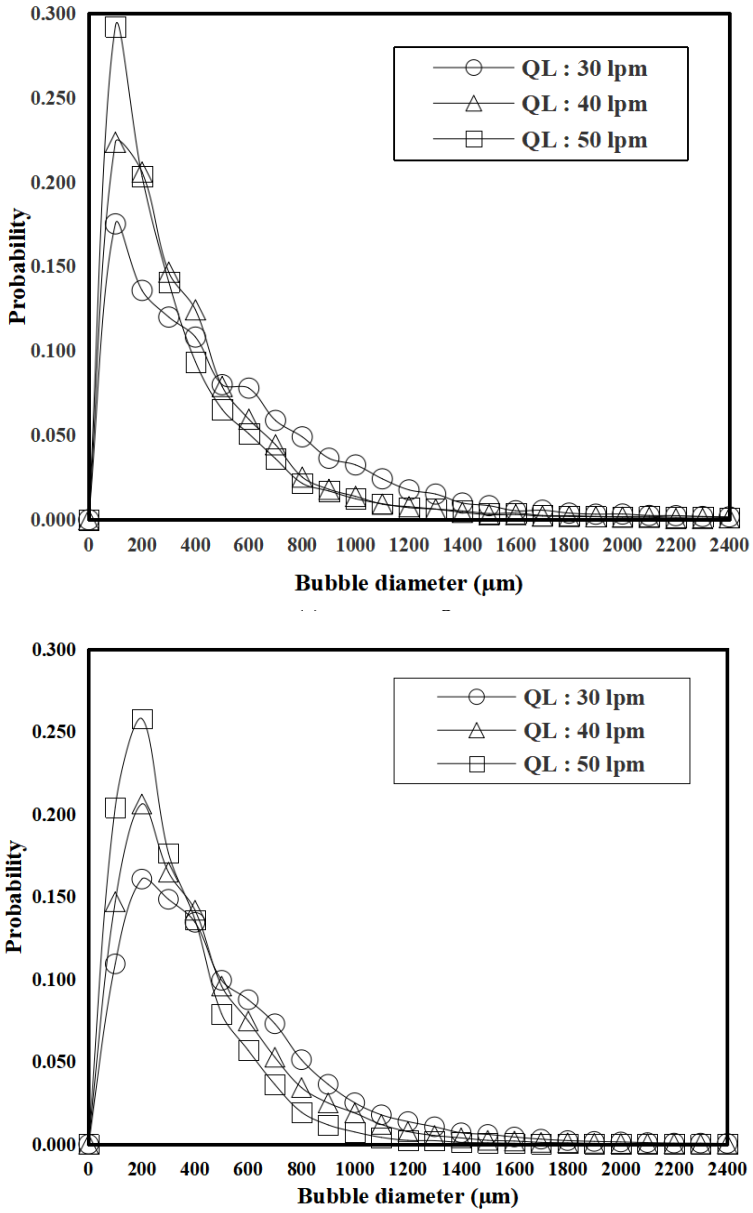
4. HASIL DAN PEMBAHASAN



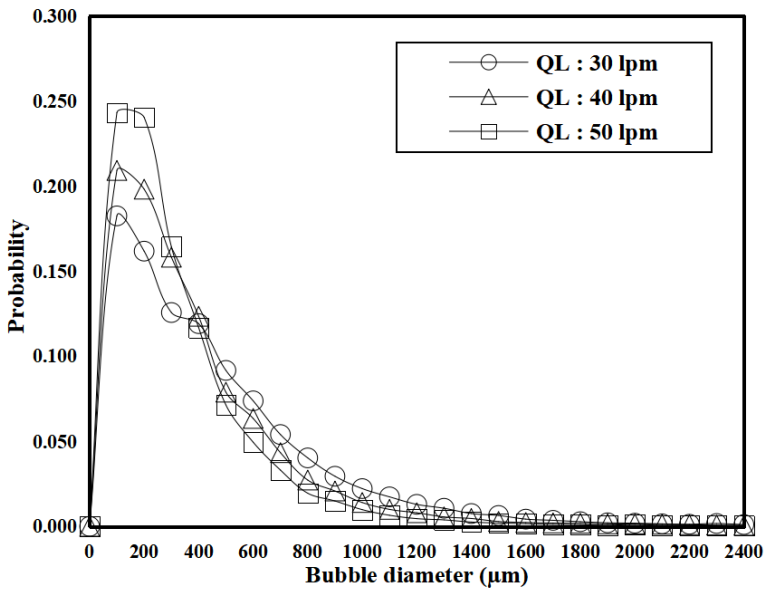
Gambar 3: Langkah – langkah *digital image processing* dengan kecepatan perekaman diatur pada 3000 fps, a*perture* pada 2.8 dan *focal lenght* pada 85 mm.

Distribusi diameter *microbubble* didapatkan dengan melakukan *digital image processing* dengan menggunakan software matlab dan pengolahan statistik dengan menggunakan software excel. *Digital image processing* menghasilkan data grafik antara rentang ukuran *microbubble* terhadap *probability density function* (PDF). PDF menunjukkan probabilitas terbentuknya *bubble* pada rentang diameter tertentu. Untuk melakukan *digital image processing* maka diperlukan langkah – langkah seperti pada Gambar 3. Gambar 3A menunjukkan tahap awal, dimana data dalam bentuk video aliran *bubble* diekstrak menjadi gambar tunggal aliran *bubble*. Gambar tunggal dari aliran bubble kemudian dilakukan proses *filtering/tuning* dengan *image processing*. Gambar 3B menunjukkan gambar tunggal yang telah dilakukan substraksi pada *background* sehingga tidak

terdapat *noise*. Gambar 3C merupakan gambar hasil pengaturan *threshold* melalui algoritma filtering. Gambar 3D menunjukkan gambar *grayscale* yang telah dikonversi menjadi *binary image* melalui pengaturan *threshold*. Elemen *bubble* pada *binary image* dikelompokkan menjadi *bubble* tunggal (*solitary bubbles*) dan bubble berkelompok (*cluster bubbles*) berdasarkan faktor bentuknya *(shape factor*) pada *bubble* yang disebut sebagai *roundness factor* (Ro). Gambar 3E memperlihatkan gambar *bubble* berkelompok dengan nilai Ro ≥ 1. Gambar 3F merupakan gambar *bubble* tunggal dengan nilai Ro ≤ 1. Gambar yang merupakan *bubble* berkelompok, kemudian diproses dengan menggunakan algoritma *watershedding*. Algoritma ini digunakan untuk mendeteksi garis pembatas (*boundary*) atau *watershed* pada setiap *bubble* tunggal berdasarkan *pixel value* sehingga dapat dipisahkan dengan *bubble* berkelompok. Gambar 3G merupakan hasil pemisahan *bubble* berkelompok dengan *algoritma watershedding*. Gambar *bubble* berkelompok yang telah melalui proses *algoritma watershedding* dan didapatkan bubble tunggal, kemudian digabungkan kembali menjadi satu frame dengan *bubble* tunggal yang diperoleh sebelumnya. Proses pengukuran gambar gabungan tersebut dilakukan sehingga diperoleh nilai properti berupa luas area *bubble*, ukuran diameter *bubble*, serta titik pusat (*centroid*) *bubble*. Gambar 3H menunjukkan tahap akhir dari metode *image processing* yaitu validasi dengan mencocokkan akurasi gambar mentah (*raw*) dalam bentuk lingkaran kuning dengan *bubble* yang ada.



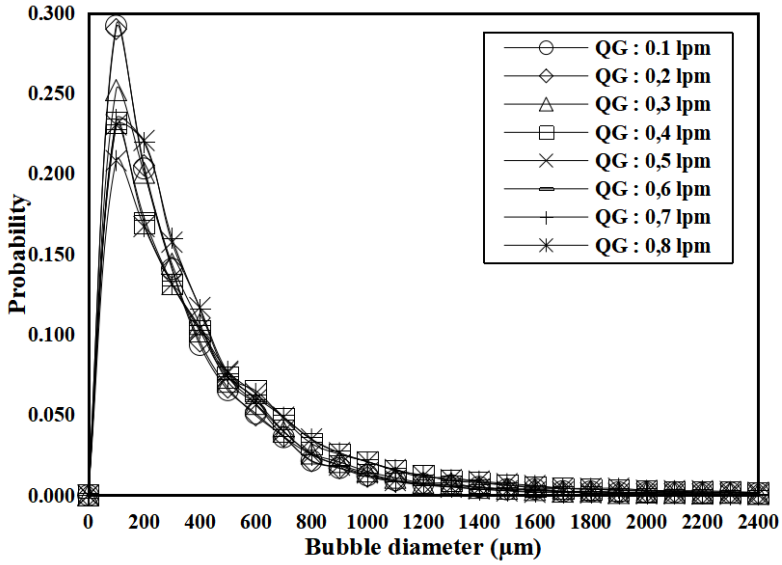
(b) Jarak nosel gas 5 mm



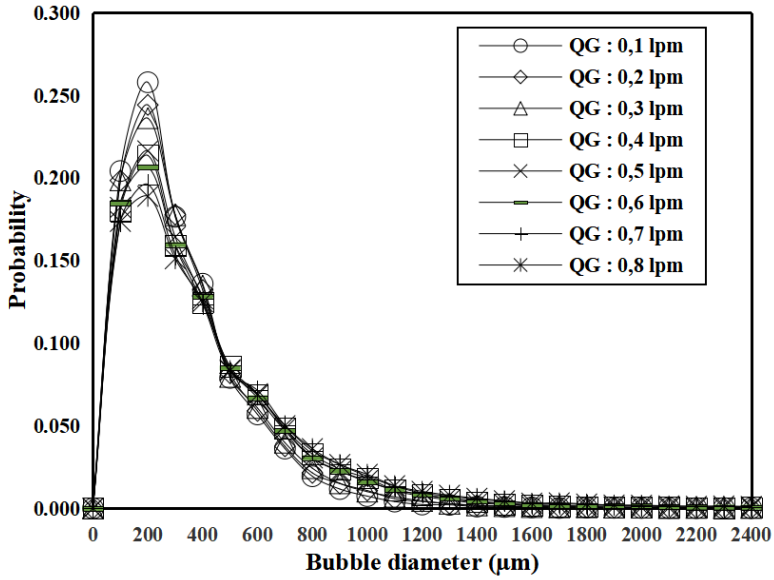
(c) Jarak nosel gas 10 mm

Gambar 4: Pengaruh laju aliran air terhadap distribusi diameter *bubble* pada berbagai jarak nosel gas dengan Q_G sebesar 0,1 l/min.

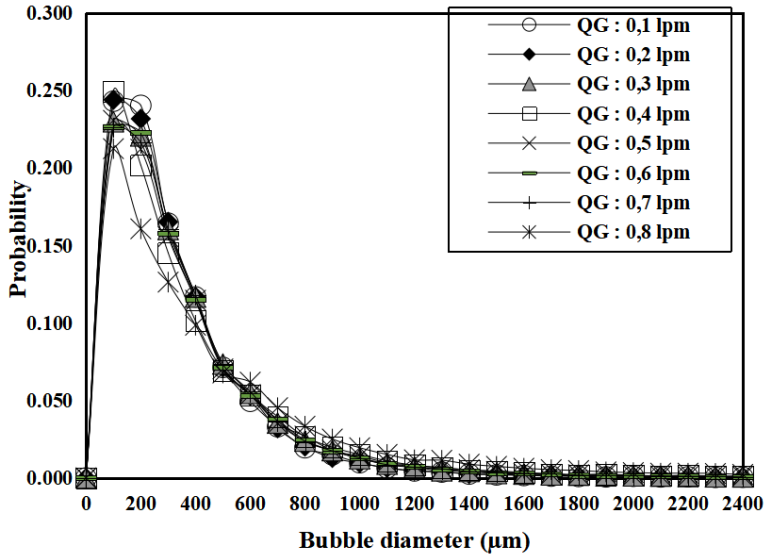
Gambar 4 menunjukkan distribusi diameter *bubble* pada berbagai variasi debit air(Q_L) dengan debit udara(Q_G) konstan 0,1 l/min pada variasi jarak nosel udara terhadap *outlet* MBG. Terlihat bahwa semakin besar debit ait(Q_L), maka nilai probabilitas(PDF) yang dihasilkan semakin meningkat pada semua jarak nosel udara. Semakin dekat jarak nosel udara terhadap *outlet* MBG, maka probabilitasnya semakin meningkat dibandingkan jarak nosel udara yang lebih jauh. Nilai probabilitas terbesar terjadi pada debit air (Q_L) 50 l/min sebesar 0.292, dengan ukuran diameter 100 µm pada jarak nosel udara 1 mm. Peningkatan Q_L mengakibatkan angka *Reynold Number* meningkat dan aliran semakin *turbulen*. Dengan meningkatnya *intensitas turbulensi*, kemudian pada sisi outlet MBG diameter mengalami perubahan secara tiba-tiba(*suddent enlargement*), maka bubble mengalami pecah(*breakup*) akibat diferrential tekanan yang terjadi. Jumlah *bubble* yang dihasilkan akibat peristiwa *breakup* semakin bertambah, sehingga nilai probabilitas nya menjadi semakin meningkat. Selain itu fenomena bubble *formation time* semakin singkat ketika jarak nosel udara terhadap outlet lebih pendek. Kenaikan kecepatan cairan, dalam hal ini sama dengan kenaikan debit cairan akan menaikkan *inertia force*, menyebabkan waktu pembentukan *bubble* menjadi lebih singkat, sehingga volume *bubble* yang terbentuk akan lebih kecil.



(a) Jarak nosel gas 1 mm



(b) Jarak nosel gas 5 mm



(c) Jarak nosel gas 10 mm

Gambar 5: Pengaruh laju aliran udara terhadap distribusi diameter *bubble* pada berbagai jarak nosel dengan Q_L sebesar 40 l/min.

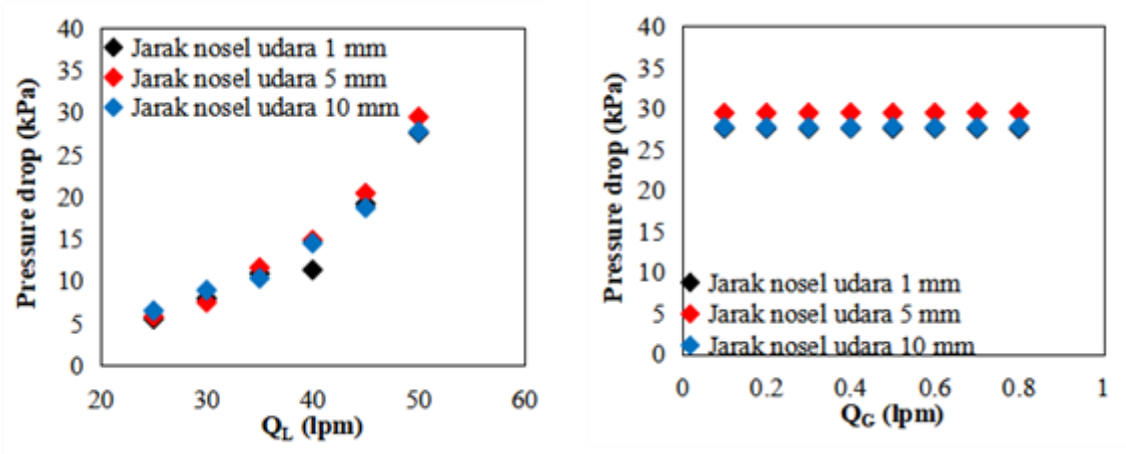
Pengaruh debit udara (Q_G) terhadap probabilitas *bubble* yang terbentuk ditunjukkan pada Gambar 5. Terlihat bahwa peningkatan debit udara (Q_G) menyebabkan probabilitas pembentukan *bubble* yang lebih besar meningkat. Proses pembentukan *bubble* terjadi apabila *inertia force* lebih kecil daripada *surface tension*. Sehingga kenaikan debit gas menyebabkan volume *bubble* lebih cepat bertambah, sehingga *bubble* yang terbentuk akan lebih besar.

Unjuk kerja berikutnya yaitu dengan melakukan perhitungan terhadap *pressure drop, hydraulic power* dan efisiensi MBG. Nilai unjuk kerja dari ketiga variasi jarak nosel udara terhadap *outlet* disajikan pada Tabel 1. Dipilih Q_G 0,1 l/min untuk variasi kecepaan aliran air dan dipilih Q_L 50 l/min untuk variasi kecepatan aliran udara dengan jarak nosel udara 1,5, dan 10 mm sebagai contoh yang disajikan pada Gambar 6, 7 dan 8.

Tabel 1: Nilai unjuk kerja MBG dengan variasi jarak nosel udara

***PRESSURE DROP*(KPA)**		**JARAK NOSEL UDARA(MM)**		
		1	5	10
Q_L (l/min)	25	5.52	5.794	6.505
	30	7.96	7.481	8.932
	35	10.906	11.6	10.336
	40	11.339	14.86	14.497
	45	19.161	20.414	18.689
	50	27.56	29.437	27.72
Q_G (l/min)	0.1	27.56	29.437	27.72
	0.2	27.536	29.433	27.686
	0.3	27.518	29.447	27.68
	0.4	27.563	29.479	27.66
	0.5	27.525	29.445	27.72
	0.6	27.54	29.456	27.679
	0.7	27.537	29.517	27.695
	0.8	27.509	29.511	27.726
***HYDRAULIC POWER* (WATT)**				
Q_L (l/min)	25	2.309	2.423	2.721
	30	3.993	3.753	4.481
	35	6.38	6.786	6.047
	40	7.578	9.932	9.689
	45	14.403	15.345	14.048
	50	23.012	24.58	23.146
Q_G (l/min)	0.1	23.012	24.58	23.146
	0.2	23.039	24.625	23.164
	0.3	23.07	24.686	23.205
	0.4	23.153	24.763	23.234
	0.5	23.167	24.783	23.331
	0.6	23.226	24.841	23.342
	0.7	23.268	24.942	23.402
	0.8	23.291	24.986	23.475
EFFISIENSI				
Q_L (l/min)	25	52.639	50.593	49.261
	30	48.617	47.873	46.297
	35	45.947	44.455	45.111
	40	45.562	42.784	42.733
	45	42.258	41.388	41.348
	50	40.735	40.211	39.694
Q_G (l/min)	0.1	40.735	40.211	39.694
	0.2	40.631	40.173	39.68
	0.3	40.652	40.077	39.6
	0.4	40.54	39.994	39.64
	0.5	40.5	40.101	39.503
	0.6	40.511	40.026	39.592
	0.7	40.471	39.899	39.498
	0.8	40.542	39.868	39.43

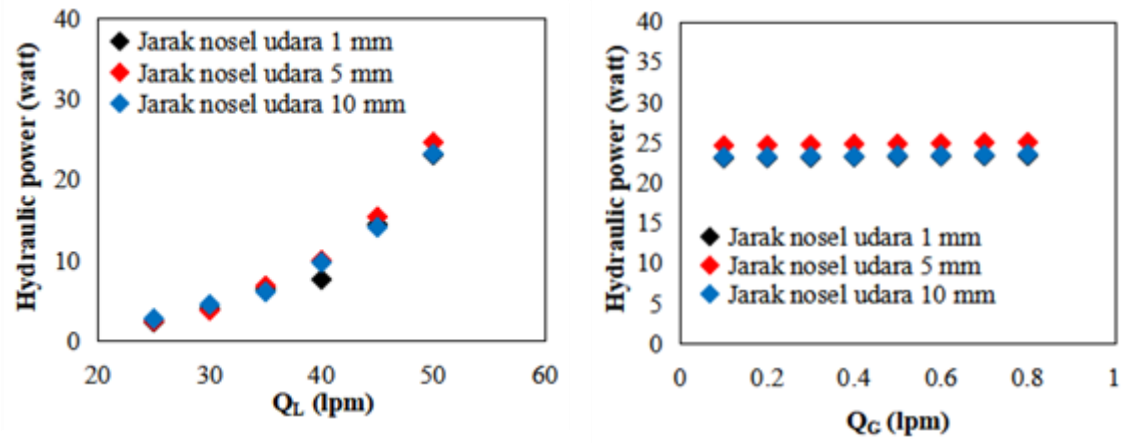
Pada Tabel 1 di atas, dapat dilihat bahwa p*ressure drop* dipengaruhi oleh Q_L dan Q_G. Dengan naiknya Q_L terjadi perubahan *pressure drop* secara signifikan. Sedangkan pada kenaikan Q_G, perubahan *pressure drop* yang terjadi tidak signifikan pada semua variasi jarak nosel udara. Hal tersebut dikarenakan aliran udara hanya pada daerah *nozzle breakup* saja. Hal ini berbeda dengan aliran air yang terjadi sepanjang aliran fluida air mulai dari *inlet tangensial* menuju *swirling chamber*, dan diteruskan sampai menuju *outlet* MBG. Sehingga perubahan tekanan yang terjadi akibat kenaikan Q_L menjadi lebih besar dibandingkan perubahan tekanan yang terjadi akibat kenaikan Q_G.



(a) (b)

Gambar 6: Pengaruh kecepatan aliran udara dan air terhadap *Presure Drop* pada tiga variasi jarak nosel udara, (a) Pengaruh Q_L terhadap *Pressure Drop* pada nilai Q_G konstan 0,1 l/min, (b) Pengaruh Q_G terhadap *Pressure Drop* pada Q_L konstan 50 l/min

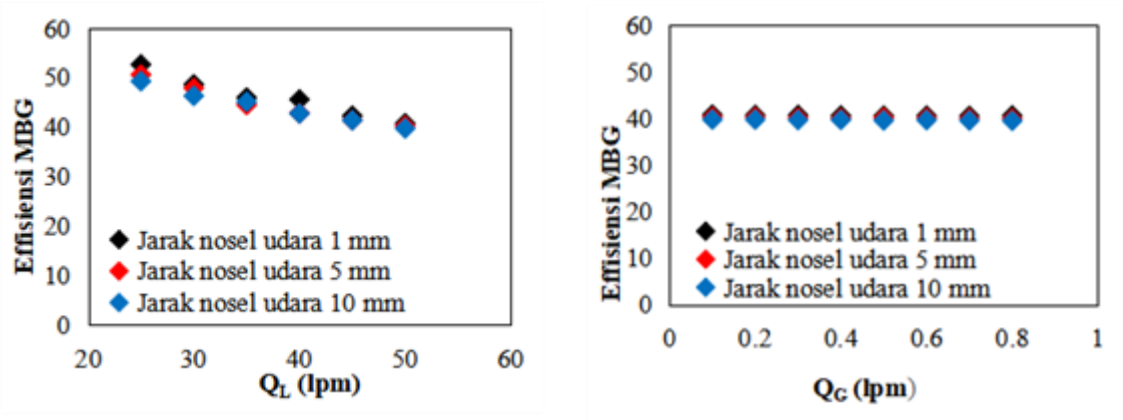
Nilai *pressure drop* terendah adalah 5,52 kPa pada Q_L 25 l/min dan Q_G 0,1 l/min dengan jarak nosel udara 1 mm, sedangkan nilai *pressure drop* tertinggi adalah 27.726 kPa pada Q_L 50 l/min dan Q_G 0,8 l/min pada jarak nosel udara 10 mm.



(a) (b)

Gambar 7: Pengaruh kecepatan aliran udara dan air terhadap *Hydraulic Power* pada tiga variasi jarak nosel udara, (a) Pengaruh Q_L terhadap *hydraulic power*(Lw) pada nilai Q_G konstan 0,1 l/min, (b) Pengaruh Q_G terhadap *hydraulic power*(Lw) pada Q_L konstan 50 l/min.

Pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa *hydraulic power* dipengaruhi oleh Q_L dan Q_G. Dengan naiknya Q_L, terjadi perubahan nilai *hydraulic power* secara signifikan. Sedangkan pada kenaikan Q_G, perubahan *hydraulic power* yang terjadi tidak signifikan pada semua variasi jarak nosel udara. Fenomena yang terjadi tersebut sama dengan fenomena yang terjadi pada *pressure drop*. Nilai terendah *hydraulic power* 2.309 watt pada Q_L 25 l/min dan Q_G 0,1 l/min pada jarak nosel udara 0,1 mm, sedangkan nilai tertinggi *hydraulic power* 23.475 watt pada Q_L 50 l/min dan Q_G 0,8 l/min pada jarak nosel udaras 10 mm. Berikutnya adalah data nilai *efisiensi* yang dihasilkan oleh MBG.



(a) (b)

Gambar 8: Pengaruh kecepatan aliran udara dan air terhadap *Effisiensi* pada tiga variasi jarak nosel udara, (a) Pengaruh QL terhadap *Effisiensi* MBG pada nilai Q_G konstan 0,1 l/min, (b) Pengaruh Q_G terhadap *Effisiensi* MBG pada Q_L konstan 50 l/min.

Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa nilai *efisiensi* MBG menurun seiring dengan naiknya Q_G dengan tidak signifikan dan nilai *efisiensi* MBG menurun secara signifikan seiring dengan bertambahnya Q_L. Nilai *efisiensi* terendah dari adalah 39.430 pada Q_L 50 l/min dan Q_G 0,8 l/min dengan jaran nosel udara 10 mm, sedangkan nilai *efisiensi* tertinggi adalah 52.639 pada Q_L 25 l/min dan Q_G 0,1 l/min pada jarak nosel udara 1 mm.

5. KESIMPULAN

Studi eksperimental tentang Karakteristik MBG Tipe *Swirl* dengan variasi jarak nosel udara terhadap *outlet* telah dilakukan secara komprehensif. Laju aliran udara dan air serta jarak nosel udara terhadap outlet MBG terbukti memainkan peran penting dalam menentukan unjuk kerja MBG, yang meliputi distribusi ukuran *bubble*, *pressure drop*, *hydraulic power* dan *efisiensi* MBG. Hasilnya dapat dirangkum sebagai berikut:

a. Peningkatan laju aliran udara akan meningkatkan diameter rata-rata *bubble*, demikin sebaliknya. Di sisi lain, peningkatan laju aliran air akan menyebabkan diameter rata-rata *bubble* menurun, demikian sebaliknya. Hal ini terjadi pada semua variasi jarak nosel udara.
b. Pada debit udara konstan, kenaikan laju aliran air akan meningkatkan probabilitas distribusi ukuran *bubble* yang dihasilkan, dan dengan penurunan laju aliran air akan menurunkan nilai probabilitas *bubble* yang dihasilkan. Hal ini terjadi pada semua variasi jarak nosel udara.
c. Peningkatan laju aliran air menyebabkan peningkatan *pressure drop* dan *hydraulic power* secara signifikan pada semua variasi jarak nosel udara. Sedangkan pengaruh laju aliran udara menyebabkan kenaikan *pressure drop* dan *hydraulic power* terjadi secara tidak signifikan.
d. Dengan laju aliran air yang meningkat, *efisiensi* MBG menurun secara signifikan dan menurun dengan tidak signifikan dengan meningkatnya laju aliran udara.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Pekerjaan ini dilakukan dalam proyek penelitian yang sedang berlangsung di Kelompok Penelitian Aliran Multiphase, Laboratorium Mekanika Fluida, Universitas Gadjah Mada. Penulis menyampaikan terimakasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada atas dukungan perangkat Kamera Video Kecepatan Tinggi dari Chevron Indonesia, dan juga atas pemberian hibah penelitian tahun 2020 sehingga penelitian ini bisa terlaksana.

7. DAFTAR PUSTAKA

[1] ASTYANTO, A.H, MEDA, A.Y.M, DEENDARLIANTO, INDARTO., "Pengaruh Rasio I/D terhadap Permulaan Flooding dan Fluktuasi Voltase Sinyal Tekanan Rezim Flooding pada Geometri Kompleks", *Rekayasa Mesin*, v. 12, n. 2, pp. 447 – 457, Agustus. 2021.

[2] AKHTAR, M. S., RAJESH, M., CIJI, A., SHARMA, P., KAMALAM, B. S., PATIYAL, R. S., SINGH, A. K., SARMA, D., "Photo-thermal manipulations induce captive maturation and spawning in endangered golden mahseer (Tor putitora): A silver-lining in the strangled conservation efforts of decades", *Aquaculture*, v. 497, pp. 336–347, Desember, 2018.

[3] BASSO, A., HAMAD, F. A., GANESAN, P., "Effects of the geometrical configuration of air–water mixer on the size and distribution of microbubbles in aeration systems", *Asia-Pac J Chem Eng*, pp. 1-11, September, 2018.

[4] BODNAR, T., GALDI, G.P., NECASOVA, S., *Particles in Flows*, 1 ed., Birkhäuser, Cham, Springer, 2017.

[5] BUDHIJANTO, W., DARLIANTO, D., PRADANA, Y.S. & HARTONO, "M., Application of Micro Bubble Generator as Low Cost and Highly Efficient Aerator for Sustainable Fresh Water Fish Farming", In: *AIP Conference Proceedings*, pp. 1-8, Indonesia, November. 2016.

[6] CENGEL, YUNUS A., CIMBALA, J.M., *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*, 4 ed., New York, McGraw-Hill Education, 2017.

[7] DAHRAZMA, B., NAGHEDINIA, A., GORJI, H. G., SAGHRAVANI, S. F., "Morphological and physiological responses of Cucumis sativus L.to water with micro-nanobubbles"., *Journal of Agricultural Science and Technology*, v. 21, n. 1, pp. 181–192, Desember. 2019.

[8] G. AMINI., "Liquid flow in a simplex swirl nozzle", *International Journal of Multiphase Flow*, v. 79, pp. 225-35, Maret.2016.

[9] GORDIYCHUK, A., SVANERA, M., BENINI, S., POESIO, P., "Size Distribution and Sauter Mean Diameter of Microbubble for a Venturi Type Bubble Generator", *Experimental Thermal and Fluid Science*, v.70, pp. 51-60, Januari. 2016.

[10] I. LEVITSKY, D. TAVOR, V. GITIS., "The Generation of Coarse Bubbles and Flow Instability Control by Means of a Novel Bubble Generator", *Chemical Engineering & Technology*, v. 42, n. 1, pp. 1537-44, Maret. 2019.

[11] JUWANA .W.E., INDARTO., DEENDARLIANTO., BUDHIJANTO. W., WIDYATAMA. A., "Hydrodinamic characteristics of the microbubble dissolution in liquid using orifice type MBG", *Journal of Chemical Engineering Research and Design* , v. 41, pp. 436-448, November. 2018.

[12] KAYAALP, N., OZTURKMEN, G., "A Venturi device reduces membrane fouling in a submerged membrane bioreactor", *Water Sci Technol*, v. 74, n. 1, pp. 147–156, Maret. 2016.

[13] KAYA, Y., BACAKSIZ, A. M., BAYRAK, H., GÖNDER, Z. B., VERGILI, I., HASAR, H., YILMAZ, G. "Treatment of chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater in an ozonation-anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) system". *Chem Eng J*, v.322, pp. 293–301, Maret. 2017.

[14] M. ANSARI, H. BOKHARI, D.E. TURNEY., "Energy efficiency and performance of bubble generating systems Chemical Engineering and Processing", *Process Intensification*, v. 125, p. 44-55, Maret. 2018.

[15] MAWARNI D.I., JUWANA. W.E., INDARTO., DARLIANTO, D., ABDAT A., "Experimental Study of the Effect of the Swirl Flow on the Characteristics of MBG Orifice Type", In: *AIP Conference Proceedings*, pp. 1-8, Indonesia, Juli. 2020.

[16] MILLS, C. S. L., SCHLEGEL, J. P., "Interfacial area measurement with new algorithm for grouping bubbles by diameter", *Exp Comput Multiph Flow*, v. 1, n. 1, pp. 61–72, Desember. 2019.

[17] MITRA, S., DALTROPHE, N. C., GILRON, J., "A novel eductor-based MBR for the treatment of domestic wastewater", *Water Res*, v. 100, p. 65–79, April. 2016.

[18] REIS, A. S., BARROZO, M. A. S., "A study on bubble formation and its relation with the performance of apatite flotation". *Sep Purif Technol*, v. 161, p. 112–120, Januari. 2016.

[19] TEMESGEN, T., "Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment", *Advances in Colloid and Interface Science*, v.246, p. 40-51, Agustus. 2017.

[20] XU X., YANG Q., GE X., QIAN Y., ZHANG B., WANG H., "Effect of nozzle diameter on bubble generation with gas self-suction through swirling flow", *Chemical Engineering Research and Design*, v. 138, p. 13-20, Oktober. 2018.