

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	i
<b>PENGESAHAN</b>	ii
<b>PERNYATAAN</b>	iii
<b>NASKAH SOAL TUGAS AKHIR</b>	iv
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	v
<b>KATA PENGANTAR</b>	vi
<b>DAFTAR ISI</b>	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xi
<b>DAFTAR TABEL</b>	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	xv
<b>DAFTAR NOTASI</b>	xvii
<b>INTISARI</b>	xix
<b>ABSTRACT</b>	xx
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	5
2.1 Penelitian dan Pengembangan <i>Microbubble Generator</i>	5
2.1.1 <i>Microbubble Generator</i> yang Dikembangkan oleh Lecoffre <i>et al.</i> (1985)	5
2.1.2 <i>Microbubble Generator</i> yang Dikembangkan oleh Yoon <i>et al.</i> (1991)	7
2.1.3 <i>Microbubble Generator</i> yang dikembangkan oleh Ohnari (2002)	10
2.2 Penelitian terhadap Performa <i>Microbubble Generator</i> dengan Metode <i>Gas-Liquid Dispersion</i>	11
2.2.1 <i>Microbubble Generator</i> dengan <i>Spherical Body</i> (Sadatomi <i>et al.</i> , 2005)	11
2.2.2 <i>Microbubble Generator</i> oleh <i>Simple Multi-Fluid</i> Mixer dengan <i>Orifice</i> dan <i>Porous Tube</i> (Sadatomi <i>et</i> <i>al.</i> , 2012)	16
2.2.3 <i>Microbubble Generator</i> yang Dikembangkan oleh Liu <i>et al.</i> (2013)	22
2.3 Metode Pengukuran Diameter <i>Bubble</i>	23

2.3.1 <i>Microbubble Generator</i> yang Dikembangkan oleh Brander <i>et al.</i> (2010)	23
2.3.2 Metode Pengukuran Distribusi Diameter <i>Bubble</i> oleh Lau <i>et al.</i> (2013)	25
<b>BAB III LANDASAN TEORI</b>	28
3.1 Aliran Satu Fase	28
3.1.1 Klasifikasi Aliran Fluida	28
3.1.2 Properti Aliran Fluida dalam Pipa	29
3.2 Aliran Dua Fase	33
3.3 <i>Microbubble</i>	35
3.3.1 Definisi <i>Microbubble</i>	35
3.3.2 Komponen <i>Microbubble</i>	35
3.3.3 Karakteristik <i>Microbubble</i>	36
3.4 <i>Microbubble Generator</i>	39
3.4.1 Tipe <i>Pressurized Dissolution</i>	39
3.4.2 Tipe <i>Venturi</i>	41
3.4.3 Tipe <i>Rotating Flow</i>	41
3.4.4 Tipe <i>Gas-Liquid Dispersion</i>	42
3.5 Karakteristik <i>Microbubble Generator</i> pada Sistem Aerasi Air Limbah	43
3.5.1 <i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	44
3.5.2 Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik Oksigen	45
3.5.3 Unjuk Kerja <i>Microbubble Generator</i>	46
<b>BAB IV PERANCANGAN ALAT DAN METODE PENELITIAN</b>	49
4.1 Lokasi Penelitian	49
4.2 Bahan Penelitian	49
4.3 Perancangan Skema Alat Uji Penelitian	49
4.4 <i>Head Losses</i>	51
4.4.1 Data yang Digunakan	51
4.4.2 Perhitungan <i>Head Losses</i>	51
4.5 Peralatan Penelitian	53
4.5.1 Peralatan Sirkulasi Air	53
4.5.2 Peralatan Sirkulasi Udara	56
4.5.3 Alat Uji	57
4.6 Variasi Pengambilan Data	61
4.7 Prosedur Penelitian	62
4.7.1 Distribusi Diameter <i>Microbubble</i>	62
4.7.2 Unjuk Kerja <i>Microbubble Generator</i>	63
4.7.3 Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik Oksigen	64

4.8 Alur Penelitian	65
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	66
5.1 Distribusi Diameter <i>Microbubble</i>	66
5.1.1 Pengaruh Debit Udara ( $Q_G$ ) terhadap Distribusi Diameter <i>Microbubble</i>	69
5.1.2 Pengaruh Debit Air ( $Q_L$ ) terhadap Distribusi Diameter <i>Microbubble</i>	72
5.2 Unjuk Kerja <i>Microbubble Generator</i>	74
5.2.1 Pengaruh Debit Udara terhadap <i>Hydraulic power</i> ( $L_w$ )	74
5.2.2 Pengaruh Debit Air terhadap <i>Hydraulic power</i> ( $L_w$ )	76
5.2.3 Pengaruh Debit Udara terhadap <i>Pressure drop</i> ( $\Delta P$ )	77
5.2.4 Pengaruh Debit Air terhadap <i>Pressure drop</i>	78
5.3 Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik	79
5.3.1 Pengaruh Debit Air terhadap Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik	81
5.3.2 Pengaruh Debit Udara terhadap Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik	84
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b>	87
6.1 Kesimpulan	87
6.2 Saran	88
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	89
<b>LAMPIRAN</b>	92

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Microbubble injector</i>	6
Gambar 2.2	<i>Porous tube microbubble generator</i>	8
Gambar 2.3	<i>High shear microbubble generator</i>	9
Gambar 2.4	<i>Inline microbubble generator</i>	9
Gambar 2.5	<i>Swirling fine microbubble generator</i>	10
Gambar 2.6	<i>Microbubble generator dengan spherical body</i>	11
Gambar 2.7	Hasil simulasi CFD terhadap laju aliran pada <i>spherical body</i>	12
Gambar 2.8	Mekanisme pengujian performa <i>microbubble generator</i> dengan <i>spherical body</i>	13
Gambar 2.9	Gambar <i>bubble</i> yang dihasilkan pada $Q_L = 25$ lpm, $Q_G = 0.98$ lpm, $d_B = 0.49$ mm	14
Gambar 2.10	Gambar <i>bubble</i> yang dihasilkan pada $Q_L = 25$ lpm, $Q_G = 0.98$ lpm, $d_B = 0.12$ mm	14
Gambar 2.11	Variasi oksigen terlarut (DO) dalam rentang waktu (t)	15
Gambar 2.12	Hubungan oksigen terlarut (DO) dengan <i>total bubble volume</i> ( $V_G$ )	16
Gambar 2.13	<i>Multi-fluid mixer</i> dengan <i>orifice</i> dan <i>porous tube</i>	17
Gambar 2.14	Mekanisme pengujian performa <i>multi-fluid mixer</i>	18
Gambar 2.15	Grafik hubungan debit air ( $Q_L$ ) dengan debit udara ( $Q_G$ ) pada berbagai variasi kedalaman penempatan <i>microbubble generator</i> (H) dan diameter <i>orifice</i>	19
Gambar 2.16	Grafik hubungan debit air ( $Q_L$ ) dengan tekanan aliran air pada bagian <i>inlet</i> ( $P_L$ ) pada berbagai variasi kedalaman penempatan <i>microbubble generator</i> (H) dan diameter <i>orifice</i>	20
Gambar 2.17	Distribusi diameter <i>bubble</i> pada <i>multi-fluid mixer</i>	21
Gambar 2.18	Variasi waktu pada kelarutan oksigen di dalam air	21
Gambar 2.19	Grafik hubungan antara koefisien perpindahan massa volumetrik ( $K_{La}$ ) dengan debit udara ( $Q_G$ )	22
Gambar 2.20	Mekanisme penelitian <i>gas-water dispersion microbubble generator</i> dengan SPG Membrane	23
Gambar 2.21	<i>Microbubble generator in a confined turbulent jet</i>	24
Gambar 2.22	Histogram frekuensi produksi <i>microbubble</i>	25
Gambar 2.23	Urutan <i>digital image analysis</i>	26
Gambar 2.24	Proses <i>image filtering</i>	26
Gambar 2.25	Perbandingan penggunaan <i>watershed</i> dan <i>non-</i>	27

	<i>watershed analysis terhadap probability density function (a), number of bubbles (b)</i>	
Gambar 3.1	Diagram Moody	31
Gambar 3.2	Komponen dari <i>microbubble</i>	35
Gambar 3.3	Hubungan kecepatan naik <i>bubble</i> terhadap radius <i>bubble</i> pada air jernih dan air terkontaminasi	37
Gambar 3.4	<i>Microbubble generator</i> dengan metode <i>pressurized dissolution</i>	40
Gambar 3.5	<i>Microbubble generator</i> dengan metode <i>venturi</i>	41
Gambar 3.6	<i>Microbubble generator</i> dengan metode <i>rotating flow</i>	42
Gambar 3.7	<i>Multi-fluid mixture</i>	43
Gambar 3.8	<i>Microbubble generator</i>	47
Gambar 4.1	Skema Alat Uji Penelitian	50
Gambar 4.2	Pipa PVC	54
Gambar 4.3	Inverter	54
Gambar 4.4	Kolam Uji	55
Gambar 4.5	<i>Water Flow Meter</i>	55
Gambar 4.6	<i>Ball valve</i>	56
Gambar 4.7	<i>Air Flow Meter</i>	57
Gambar 4.8	<i>Microbubble Generator</i> (a) Gambar potongan penampang <i>microbubble generator</i> (b) Gambar 3 dimensi	57
Gambar 4.9	<i>Porous Tube</i> dari <i>Stainless Steel Wire Mesh 300</i>	58
Gambar 4.10	<i>Dissolved Oxygen Meter</i>	59
Gambar 4.11	<i>Pressure Transducer</i>	59
Gambar 4.12	<i>Data Logger</i>	60
Gambar 4.13	<i>Phantom Miro M310 High Speed Video Camera</i>	60
Gambar 4.14	Kalibrator <i>High Speed Video Camera</i>	61
Gambar 4.15	Skema Pengambilan Gambar <i>Microbubble</i>	62
Gambar 4.16	Skema Pengambilan Data Penurunan Tekanan	63
Gambar 4.17	Skema Pengambilan Data Konsentrasi DO	64
Gambar 4.18	Diagram Alur Penelitian	65
Gambar 5.1	Langkah metode <i>image processing</i> , <i>Raw Image</i> (A), <i>Binary Image</i> (B), <i>Solitary Image</i> (C), <i>Overlapping Image</i> (D), <i>Watershed</i> dari <i>Overlapping Image</i> (E), Validasi Hasil <i>Image Processing</i> (F)	67
Gambar 5.2	Grafik distribusi diameter <i>microbubble</i> pada variasi $Q_L = 70$ lpm dan $Q_G = 0,2$ lpm	68
Gambar 5.3	Grafik pengaruh debit udara terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_L = 40$ lpm	69

Gambar 5.4	Grafik pengaruh debit udara terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_L = 80$ lpm	69
Gambar 5.5	Aliran <i>microbubble</i> pada $Q_L = 70$ lpm, $Q_G = 0,1$ lpm	70
Gambar 5.6	Aliran <i>microbubble</i> pada $Q_L = 70$ lpm, $Q_G = 1,0$ lpm	71
Gambar 5.7	Grafik pengaruh debit air terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_G = 0,1$ lpm	72
Gambar 5.8	Aliran <i>microbubble</i> pada $Q_L = 40$ lpm, $Q_G = 0,1$ lpm	73
Gambar 5.9	Aliran <i>microbubble</i> pada $Q_L = 80$ lpm, $Q_G = 0,1$ lpm	73
Gambar 5.10	Pengaruh debit udara terhadap <i>hydraulic power</i> pada variasi debit air 40 lpm	74
Gambar 5.11	Pengaruh debit udara terhadap <i>hydraulic power</i> pada variasi debit air 40 lpm-80 lpm	75
Gambar 5.12	Pengaruh debit air terhadap <i>hydraulic power</i> pada $Q_G = 0,1$ lpm	76
Gambar 5.13	Pengaruh $Q_L$ terhadap $L_w$ pada $Q_G = 1,0$ lpm	76
Gambar 5.14	Pengaruh debit udara terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada berbagai variasi $Q_L$	77
Gambar 5.15	Pengaruh debit udara terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_L = 80$ lpm	78
Gambar 5.16	Pengaruh debit air terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_G = 0,1$ lpm	78
Gambar 5.17	Variasi konsentrasi DO terhadap waktu pada $Q_L = 80$ lpm, $Q_G = 0,1$ lpm, jarak 60 cm dari <i>microbubble generator</i>	79
Gambar 5.18	Variasi konsentrasi DO terhadap waktu pada $Q_L = 80$ lpm, $Q_G = 0,1$ lpm, jarak 120 cm dari <i>microbubble generator</i>	80
Gambar 5.19	Variasi konsentrasi DO terhadap waktu pada $Q_L = 80$ lpm, $Q_G = 0,1$ lpm, jarak 180 cm dari <i>microbubble generator</i>	80
Gambar 5.20	Pembagian zona peningkatan konsentrasi <i>dissolved oxygen</i>	81
Gambar 5.21	Pengaruh debit air terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_G = 0,1$ lpm	82
Gambar 5.22	Pengaruh debit air terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_G = 1,0$ lpm	83
Gambar 5.23	Pengaruh debit udara terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_L = 40$ lpm	84
Gambar 5.24	Pengaruh debit udara terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_L = 80$ lpm	85

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	<i>Equivalent roughness</i>	31
Tabel 3.2	Klasifikasi aliran dua fase	34
Tabel 3.3	Konsentrasi <i>Dissolved Oxygen</i> (DO) pada berbagai tingkatan temperatur	44
Tabel 4.1	Variasi debit air dan udara penelitian	61
Tabel 5.1	<i>Hydraulic power</i> ( $L_w$ ) pada berbagai variasi $Q_L$ dan $Q_G$ dalam satuan <i>watt</i>	75
Tabel 5.2	Tekanan pada <i>inlet microbubble generator</i> pada berbagai variasi $Q_L$ dan $Q_G$ dalam satuan KPa	75

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Pengaruh debit udara terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_L = 50$ lpm	92
Lampiran 2.	Pengaruh debit udara terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_L = 60$ lpm	92
Lampiran 3.	Pengaruh debit udara terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_L = 70$ lpm	93
Lampiran 4.	Pengaruh debit air terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_G = 0,2$ lpm	93
Lampiran 5.	Pengaruh debit air terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_G = 0,4$ lpm	94
Lampiran 6.	Pengaruh debit air terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_G = 0,6$ lpm	94
Lampiran 7.	Pengaruh debit air terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_G = 0,8$ lpm	95
Lampiran 8.	Pengaruh debit air terhadap distribusi diameter <i>microbubble</i> pada $Q_G = 1,0$ lpm	95
Lampiran 9.	Pengaruh debit air terhadap <i>hydraulic power</i> pada $Q_G = 0,2$ lpm	96
Lampiran 10.	Pengaruh debit air terhadap <i>hydraulic power</i> pada $Q_G = 0,4$ lpm	96
Lampiran 11.	Pengaruh debit air terhadap <i>hydraulic power</i> pada $Q_G = 0,6$ lpm	97
Lampiran 12.	Pengaruh debit air terhadap <i>hydraulic power</i> pada $Q_G = 0,8$ lpm	97
Lampiran 13.	Pengaruh debit udara terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_L = 40$ lpm	98
Lampiran 14.	Pengaruh debit udara terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_L = 50$ lpm	98
Lampiran 15.	Pengaruh debit udara terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_L = 60$ lpm	99
Lampiran 16.	Pengaruh debit udara terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_L = 70$ lpm	99
Lampiran 17.	Pengaruh debit air terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_G = 0,2$ lpm	100
Lampiran 18.	Pengaruh debit air terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_G = 0,4$ lpm	100



Lampiran 19.	Pengaruh debit air terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_G = 0,6$ lpm	101
Lampiran 20.	Pengaruh debit air terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_G = 0,8$ lpm	101
Lampiran 21.	Pengaruh debit air terhadap <i>pressure drop</i> aliran pada $Q_G = 1,0$ lpm	102
Lampiran 22.	<i>Pressure drop</i> antara sisi <i>inlet</i> dan <i>outlet microbubble generator</i> pada berbagai variasi $Q_L$ dan $Q_G$ dalam satuan mka	102
Lampiran 23.	Pengaruh debit air terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_G = 0,2$ lpm	103
Lampiran 24.	Pengaruh debit air terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_G = 0,4$ lpm	103
Lampiran 25.	Pengaruh debit air terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_G = 0,6$ lpm	104
Lampiran 26.	Pengaruh debit air terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_G = 0,8$ lpm	104
Lampiran 27.	Pengaruh debit udara terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_L = 50$ lpm	105
Lampiran 28.	Pengaruh debit udara terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_L = 60$ lpm	105
Lampiran 29.	Pengaruh debit udara terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik pada $Q_L = 70$ lpm	106
Lampiran 30.	Koefisien perpindahan massa volumetrik ( $K_{La}$ ) dalam satuan (1/s) pada berbagai variasi debit air ( $Q_L$ ) dan debit udara ( $Q_G$ ) pada jarak 60 cm	106
Lampiran 31.	Koefisien perpindahan massa volumetrik ( $K_{La}$ ) dalam satuan (1/s) pada berbagai variasi debit air ( $Q_L$ ) dan debit udara ( $Q_G$ ) pada jarak 120 cm	107
Lampiran 32.	Koefisien perpindahan massa volumetrik ( $K_{La}$ ) dalam satuan (1/s) pada berbagai variasi debit air ( $Q_L$ ) dan debit udara ( $Q_G$ ) pada jarak 180 cm	107
Lampiran 33.	Kalibrasi <i>pressure transducer</i>	107
Lampiran 34.	<i>Fitting coefficient</i> (K)	108

## DAFTAR NOTASI

$A$	= luas penampang pipa ( $m^2$ )
$a$	= <i>specific interfacial area</i> ( $m^{-1}$ )
$C_s$	= konsentrasi saturasi oksigen dalam cairan (mg/l)
$C_t$	= konsentrasi oksigen dalam cairan pada waktu tertentu (mg/l)
$C_o$	= konsentrasi awal oksigen dalam cairan (mg/l)
$d$	= diameter <i>bubble</i> ( $\mu m$ )
$d_o$	= diameter <i>orifice</i> (mm)
$D$	= diameter dalam pipa (m)
$D_h$	= diameter hidrolis pipa (m)
$DO$	= konsentrasi <i>dissolved oxygen</i> (mg/l)
$f$	= koefisien gesekkan pipa
$g$	= percepatan gravitasi ( $m^2/s$ )
$h$	= head (m)
$h_L$	= head <i>losses</i> minor (m)
$h_f$	= head <i>losses</i> major (m)
$H$	= kedalaman <i>microbubble Generator</i> (m)
$k_h$	= <i>henry's constant</i>
$K_{La}$	= koefisien perpindahan massa volumetrik (1/s)
$K_L$	= koefisien <i>losses fitting</i>
$L$	= panjang pipa (m)
$L_w$	= hydraulic power (watt)
$P$	= daya yang dibutuhkan pompa (watt)
$p$	= keliling basah penampang pipa (m)
$P_L$	= tekanan aliran air pada bagian <i>inlet</i> (kPa)
$Q_G$	= debit udara (lpm)
$Q_L$	= debit air (lpm)
$Q$	= debit air ( $m^3/s$ )
$Ro$	= <i>roundness factor</i>
$Re$	= <i>reynold number</i>
$t$	= waktu (s)
$U_b$	= rising velocity <i>bubble</i> (m/s)
$V_G$	= total <i>bubble volume</i> (l)
$\nu_G$	= viskositas kinematik udara ( $m^2/s$ )
$\nu_L$	= viskositas kinematik air ( $m^2/s$ )
$v$	= debit air dalam pipa (m/s)
$\rho$	= massa jenis fluida ( $kg/m^3$ )
$\mu$	= viskositas dinamik fluida ( $Ns/m^2$ )

$\sigma$	= tegangan permukaan cairan (N/m)
$\rho_L$	= massa jenis air (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu_L$	= viskositas dinamik air (Ns/m <sup>2</sup> )
$\rho_G$	= massa jenis udara (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu_G$	= viskositas dinamik udara (Ns/m <sup>2</sup> )
$\varepsilon_G$	= gas <i>holdup</i>
$\varepsilon$	= <i>equivalent roughness</i> (mm)
$\Delta P$	= <i>pressure drop</i> (mka)