

ABSTRACT

An airlift pump is a device used to lift a mixture of liquid and solid through a vertical pipe, even though it is immersed in liquid. The method used in the airlift pump is injected air into the sediment that settles then the sediment will be lifted through the vertical pipe. The advantages of the airlift pump are simple structure, lower maintenance costs and there is no limit to the depth of water when used.

Research on airlift pump has been done to find out its characteristics and performance. In this study using airlift pump with a diameter of 56 mm riser pipe with a thickness of 2 mm and the height of the pip riser is 255 cm. This research was carried out by varying the particle diameter used, namely 1.70 mm, 1.69 mm, 1.40 mm using 2 injectors. In addition, this study varies the characteristics of the air lift pump with and without MBG at a fixed submergence ratio of 0.74.

The results of this study are the speed of superficial solid and liquid will increase along with the increase in superficial velocity of the injected gas, and at the diameter of small particles the superficial solid and liquid velocity values obtained will be higher than other diameters. In the flow pattern that occurs it can be seen that bubbles and slug flow are formed, the slug flow flow pattern is very efficient to lift particles to the separator. In the results of image processing using both tools can produce higher gas hold up and solid hold up, the value of liquid hold up will be smaller because the area of the pipe has been filled by solid and gas. At the value of the pressure gradient fluctuating results obtained for the two test equipment. This is supported by visualization that shows the flow pattern that passes through the riser pipe is not only one flow pattern, and the PDF results show that it has a centralized distribution of one value, and the PSD value can be seen that the frequency of the formation of slug flow will increase with increasing particle diameter who was appointed. In addition, the flow velocity value using the MBG airlift pump is faster than the airlift pump without MBG.

Keyword: airlift pump, characteristics, flow pattern, pressure gradient, velocity.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor industri di Indonesia yang semakin maju akan menghasilkan produksi yang tinggi. Jumlah produksi yang tinggi akan berimbas pada jumlah limbah yang dihasilkan. Beberapa industri di Indonesia masih membuang limbah ke sungai dan lautan. Limbah yang dibuang berwujud cairan, dan mengandung logam-logam berat yang akan mengendap pada sungai. Tingginya limbah dan sedimen yang mengendap pada sungai dan lautan akan menyebabkan pencemaran air. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk membersihkan sedimen yang mengendap adalah dengan menggunakan *airlift pump*.

Airlift pump adalah alat yang digunakan untuk mengangkat campuran cairan dan padatan melalui pipa vertikal, meskipun terendam dalam cairan. Metode yang digunakan dalam *airlift pump* dengan cara diinjeksikan udara ke arah sedimen yang mengendap kemudian sedimen tersebut akan terangkat melewati pipa vertikal. Kelebihan dari *airlift pump* yaitu struktur yang sederhana, biaya perawatan lebih murah dan tidak ada batasan pada kedalaman air ketika penggunaannya. Oleh karena itu, diperlukan penerapan teknologi *airlift pump* untuk mengangkat sedimen di hulu sungai bahkan di kolam agar kolam dan sungai tidak dangkal.

Beberapa penelitian tentang *airlift pump* antara lain yaitu Kassab, dkk (2007) melakukan penelitian dengan *airlift pump* tanpa MBG dengan hasil debit udara, rasio *submergence*, dan panjang pipa *upriser* berpengaruh terhadap kapasitas dan efisiensi pompa. Bentuk aliran yang dapat terjadi adalah *slug* dan *slug-churn*.

Pedram, dkk (2011) melakukan penelitian tentang teknik visual untuk mendeteksi pola aliran dua fasa gas-air dalam *airlift pump*. Terdeteksi 3 pola aliran yaitu *slug*, *churn*, dan *annular*.

Sadatomi, dkk (2012) meneliti tentang *airlift pump* yang dilengkapi dengan *bubble jet* untuk membangkitkan sedimen dari dasar laut dan danau maupun *reservoir* lainnya. Penelitian ini memodifikasi *airlift pump* tanpa MBG dikombinasikan dengan *bubble jet generator* untuk mensuplai gelembung udara.

Seung, dkk (2014) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh diameter pipa dan rasio *submergence* terhadap pola aliran pada *airlift pump*. Pola aliran yang terbentuk yaitu gelembung, *slug*, *churn*, dan *annular*.

Deendarlianto, dkk (2019) melakukan penelitian pada *airlift pump* tiga fase dengan MBG dengan memvariasikan sudut kemiringan dari injektor, dengan memberikan hasil pergerakan partikel *solid* yang terangkat terjadi pada aliran *slug*.

Penelitian terkait *airlift pump* sudah dilakukan untuk mendapatkan karakteristik aliran dua maupun tiga fasa dan kapasitas, dengan memvariasikan berbagai parameter seperti: diameter pipa, rasio *submergence*, belokan pipa di atas dan di bawah injektor, metode injeksi udara, konfigurasi dan panjang pipa *upriser*, tekanan injeksi, susunan lubang injeksi pada injektor, dan ukuran partikel, serta dengan berbagai metoda yaitu metode ekperimental maupun *computational*.

Penelitian terkait *airlift pump* perlu dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif terhadap karakteristik dari sistem ini. Beberapa parameter aliran yang dijadikan pengamatan antara lain *gas hold-up*, *solid hold-up*, *liquid hold-up*, dan gradien tekanan, dengan menggunakan teknologi *airlift pump* yang dikombinasikan dengan *micro bubble generator* (MBG) dan akan dibandingkan dengan *airlift pump* tanpa MBG atau tanpa *micro bubble generator*. Penelitian yang akan dilakukan adalah membandingkan karakteristik dari aliran dalam *airlift pump* dengan MBG dan *airlift pump* tanpa MBG dengan perbedaan diameter partikel yang terangkat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas maka masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah tentang karakteristik aliran pada aliran tiga fasa (air-udara-partikel padat) yang meliputi kecepatan *superficial*, pola aliran, *gas hold-up*, *solid hold-up*, *liquid hold-up*, dan gradien tekanan, dengan variasi diameter partikel menggunakan teknologi *airlift pump* yang dikombinasikan dengan *micro bubble generator* (MBG) dan akan dibandingkan dengan *airlift pump* tanpa MBG atau tanpa MBG.

1.3 Asumsi dan Batasan Masalah

Beberapa hal yang menjadi batasan untuk masalah penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan pada kondisi atmosfer.
2. Tidak terjadi perpindahan kalor antara sistem dengan lingkungan (adiabatis).
3. Penelitian menggunakan pipa *acrylic*, sehingga dinding dalam pipa diasumsikan *smooth*.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran dengan variasi diameter partikel pada *airlift pump* tanpa MBG dan *airlift pump* dengan MBG berdasarkan parameter aliran yang terukur (kecepatan *superficial*, pola aliran, *gas hold-up*, *solid hold-up*, *liquid hold-up*, dan gradien tekanan) .

1.5 Manfaat Penelitian

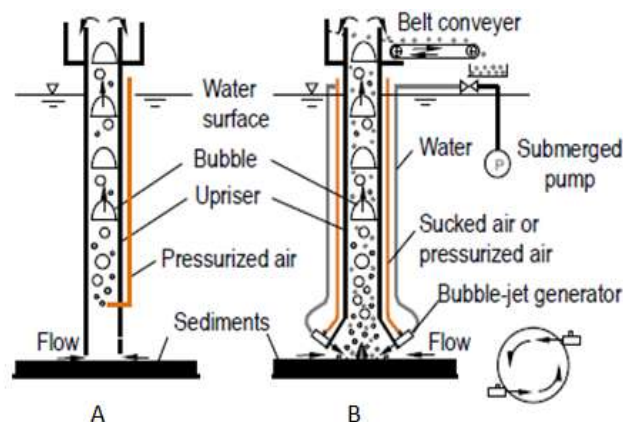
Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dengan memberikan *database* terkait karakteristik aliran tiga fase pada *airlift pump* serta mengembangkan *airlift pump* yang *low consumption energy* dengan *micro bubble generator* (MBG).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian *Airlift pump*.

Airlift pump adalah alat untuk mengangkat campuran cairan dan padatan melalui pipa vertikal. Pengaplikasian dari *airlift pump* antara lain seperti pengerukan sungai, penambangan lautan, ekplorasi bawah laut atau untuk peningkatan suspensi partikel kasar dan ekstraksi lumpur di pabrik pengolahan limbah. *Airlift pump* memiliki beberapa kelebihan dari pada jenis pompa lainnya, menurut Kassab, dkk (2007) kelebihan dari *airlift pump* antara lain adalah tidak perlu adanya pelumasan, perawatannya lebih mudah, serta dapat digunakan untuk mengangkat sedimen, zat beracun, serta zat korosif lainnya. Secara umum, *airlift pump* terbagi menjadi beberapa bagian utama seperti pada Gambar 2.1 sesuai dengan penelitian Sadatomi, dkk (2012) yaitu reservoir air dan partikel padat, injektor udara, pipa *upriser*, dan tangki pemisah air-udara-partikel padat. Reservoir air dan partikel padat digunakan untuk menampung air dan partikel padat yang akan diangkat ke tangki pemisah. Injektor udara berfungsi untuk menginjeksikan udara bertekanan untuk mengangkat air dan partikel padat ke tangki pemisah. Pipa *upriser* merupakan saluran tempat mengalirnya air dan partikel padat menuju tangki pemisah. Tangki pemisah berfungsi untuk memisahkan udara, air, dan partikel padat. Udara akan terbuang ke atmosfer, sedangkan air dan partikel padat akan dipisahkan dengan jaring-jaring/net.



Gambar 2.1 Skema pipa *upriser* (a) *airlift pump* tanpa MBG dan (b) *airlift pump* dengan *bubble jet generator*.

2.2 Penelitian Karakteristik *Airlift pump*.

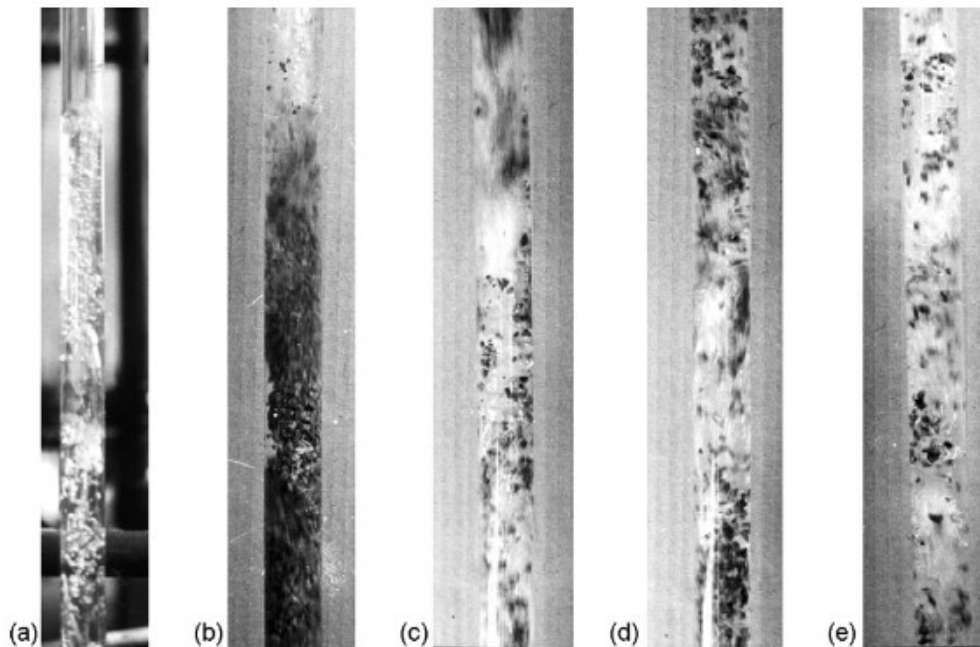
Menurut Kim, dkk (2014), sistem *airlift pump* telah diketahui sejak tahun 1700. Berdasarkan artikel Kock (2015), di tahun 1786 Carl Emanuel Loscher melaporkan penelitiannya mengenai air tambang yang naik ke permukaan setelah diinjeksikan udara dan diikuti dengan penelitian lebih lanjut mengenai fenomena tersebut. Carl Emanuel Loscher (1750-1813) melakukan suatu penelitian dengan menghembuskan udara dari tabung berukuran 6 mm ke dalam pipa yang terendam sepanjang 283 mm dan diameter pipa 120 mm. Carl mempelajari efek kenaikan air di pipa dan mengembangkan pompa *airlift pump*. Sehingga pada tahun 1787, Carl Emanuel Loscher menulis suatu artikel dengan judul *Aerostatic kunstgezeug*.

Kemudian penelitiannya mengenai efek naiknya air pada pipa terus berlanjut hingga akhirnya dikembangkan suatu teknologi *airlift pump* untuk tujuan memompa air dari sumur. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan Carl, diketahui bahwa energi pada *airlift pump* berasal dari udara yang terkompresi. Udara biasanya dikompresi dengan kompresor atau blower. Udara di injeksikan ke bagian bawah pipa. Dengan adanya gaya *buoyancy* pada udara, maka udara dapat naik dengan cepat ke permukaan. Hal tersebut menimbulkan tekanan pada air sehingga air juga bergerak ke arah yang sama dengan udara. Aliran air dan udara ini sering disebut dengan aliran dua fasa.

Yoshinaga, dkk (1996) melakukan eksperimen dengan partikel berbentuk bola seragam atau tidak seragam dengan fluida kerja berupa air dan udara. Pada eksperimennya, diameter pada pipa *upriser*, diameter partikel, dan *submergence ratio* diubah-ubah sesuai yang telah ditentukan. Diameter partikel yang digunakan adalah 6,1 mm; 9,9 mm; 6,0 mm; dan 9,5 mm. Sedangkan diameter pipa *upriser* yang digunakan adalah 40 mm dan 26 mm dengan panjang 6,74 m. *Submergence ratio* pada penelitian ini divariasikan yaitu 0,8; 0,7; 0,6. Hasil dari eksperimen tersebut mengusulkan sebuah model aliran pada *upriser* berdasarkan persamaan momentum untuk memprediksi karakteristik alirannya.

Kassab, dkk (2007) menyatakan bahwa debit udara, rasio *submergence*, dan panjang pipa *upriser* berpengaruh terhadap kapasitas dan efisiensi *airlift pump* dua fasa. Hasil penelitian ini mengusulkan model satu dimensi untuk memprediksi

kinerja pompa yang dapat diterapkan pada pola aliran yang berbeda (*bubble*, *slug*, maupun *churn*) seperti pada Gambar 2.2. Pernyataan tersebut didapat dari penelitian dengan menggunakan sembilan variasi rasio *submergence*, tiga pipa *upriser* dengan panjang yang berbeda, dan variasi tekanan udara injeksi.



Gambar 2.2 Visualisasi pola aliran yang terbentuk dari penelitian Kassab, dkk (2007) (a) *bubbly-slug* (b) *slug* (c) *slug-churn* (d) *slug-churn* (e) *annular*.

Pedram, dkk (2011) melakukan penelitian tentang teknik visual untuk mendeteksi pola aliran dua fasa gas-air dalam *airlift pump*. Diameter pipa yang digunakan 50 mm, dengan ketinggian 6 m. Kecepatan gas diukur dari data yang didapat dengan menggunakan *high speed camera*. Terdeteksi tiga pola aliran yaitu *slug*, *churn*, dan *annular*. Pola aliran *bubble* tidak bisa mengangkat air karena gaya apung yang rendah. Operasi *airlift pump* pada *regime* aliran *bubble* terbatas pada rasio *submergence* tinggi, sedangkan pola aliran yang lain dapat mengangkat air dalam berbagai rasio *submergence*. Pola aliran *slug* paling cocok untuk kinerja *airlift pump*.

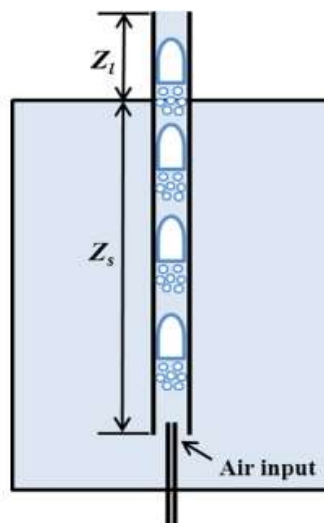
Sadatomi, dkk (2012) meneliti tentang *airlift pump* yang dilengkapi dengan *bubble jet* untuk membangkitkan sedimen dari dasar laut dan danau maupun *reservoir* lainnya. Penelitian menggunakan tiga variasi diameter partikel yang

berbentuk bola, cairan yang digunakan adalah cairan garam, dengan rasio *submergence* dari 0,76 sampai 0,84. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat simulasi baru untuk desain sistem yang lebih besar, yang diterapkan pada ke dalam air sampai 50 m. Hasil dari penelitian ini adalah debit partikel yang ke luar pada kondisi operasi optimum sebanding dengan debit udara yang ke luar dari *upriser* dan tidak tergantung dari diameter *upriser*.

Penelitian ini membuat simulasi baru untuk desain sistem yang lebih besar yang bisa diterapkan sampai kedalaman air sampai 50 m. Pada simulasi penelitian ini diperoleh debit partikel yang keluar pada kondisi operasi optimum sebanding dengan debit udara yang keluar dari *upriser* dan tidak tergantung dari diameter *upriser*.

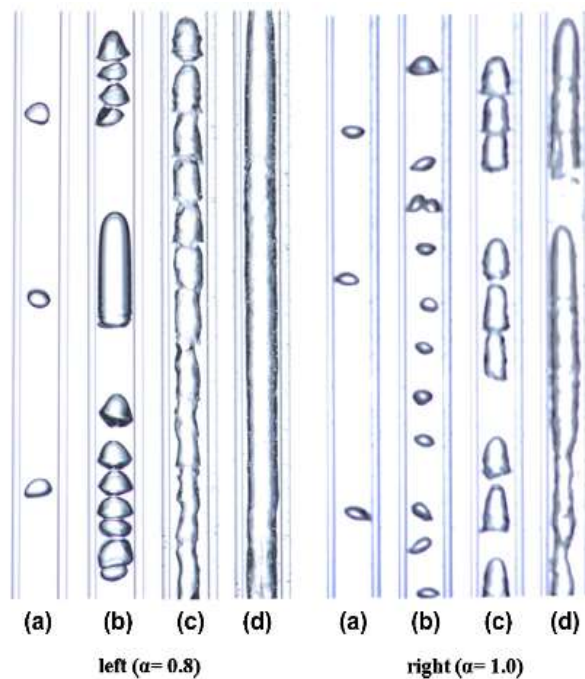
Seung, dkk (2014) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh diameter pipa dan rasio *submergence* terhadap pola aliran dan kinerja *airlift pump*. Alat ini akan diaplikasikan pada *direct carbon fuel cell* (DCFC) yang beroperasi pada rasio *submergence* mendekati 1. Rasio *submergence*, α , didefinisikan sebagai perbandingan panjang pipa yang terendam yang dituliskan dengan Z_s dan Z_l yang menunjukkan ketinggian angkat pipa yang tidak terendam dan dinyatakan oleh variabel yang ditunjukkan pada Gambar. 2.3 dalam bentuk,

$$\alpha = \frac{Z_s}{Z_s + Z_l} \quad (2.1)$$

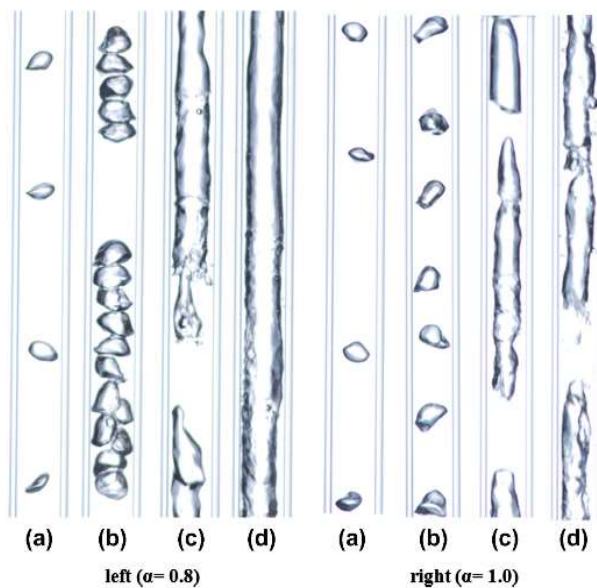


Gambar 2.3 Diagram skematis dari *airlift pump* (Seung, dkk., 2014).

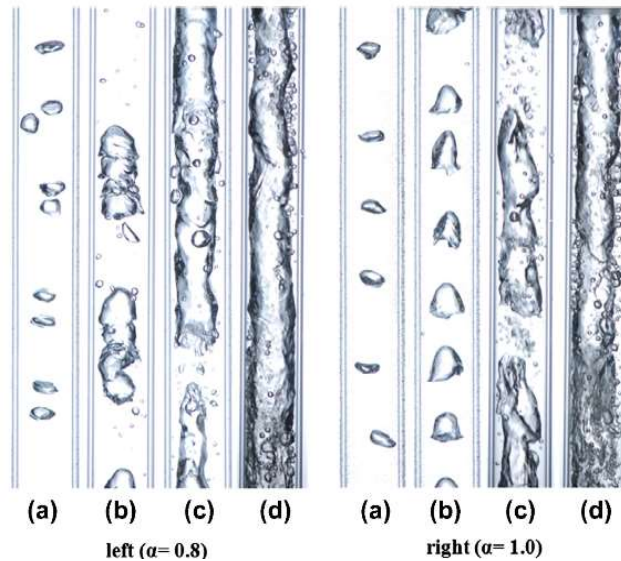
Pola aliran yang terbentuk dari penelitian Seung, dkk yaitu *bubble*, *slug*, *churn*, dan *annular* seperti pada Gambar 2.4, Gambar 2.5 dan Gambar 2.6. Pola ini terbentuk sesuai dengan debit udara injeksi. Model ini *valid* untuk aliran *slug*. Gambar 2.4 menunjukkan hasil visualisasi dari *airlift pump* dengan aliran *bubble*, menggunakan pipa diameter 8 mm dengan *submergence ratio* 0,8 (a),(b),(c), dan (d) sisi kiri dan 1 (a),(b),(c), dan (d) sisi kanan, dengan variasi debit udara yang sama yaitu (a) 0,0059 (b) 0,142 (c) 1,184 (d) 2,94 m/h³, dari Gambar 2.4 dapat dilihat perbedaan yang diakibatkan dari perbedaan *submergence ratio* yang digunakan. Gambar 2.5 menunjukkan hasil visualisasi dari *airlift pump* dengan aliran *bubble*, menggunakan pipa diameter 11 mm dengan *submergence ratio* 0,8 (a),(b),(c), dan (d) sisi kiri dan 1 (a),(b),(c), dan (d) sisi kanan, dengan variasi debit udara yang sama yaitu (a) 0,0106 (b) 0,16 (c) 1,33 (d) 3,2 m/h³, hasilnya dapat dilihat bahwa perbedaan *submergence ratio* akan memiliki pengaruh dari pola aliran yang terbentuk. Gambar 2.6 menunjukkan hasil visualisasi dari *airlift pump* dengan aliran *bubble*, menggunakan pipa diameter 18 mm dengan *submergence ratio* 0,8 (a),(b),(c), dan (d) sisi kiri dan 1 (a),(b),(c), dan (d) sisi kanan, dengan variasi debit udara yang sama yaitu (a) 0,0234 (b) 0,234 (c) 1,403 (d) 3,12 m/h³ dengan *submergence ratio* 0,8 dan 1.



Gambar 2.4 Visualiasi pola aliran *bubble* Seung, dkk (2014), dengan diameter pipa 8 mm, dengan Q_G (a) 0,0059 (b) 0,142 (c) 1,184 (d) 2,94 dengan $\alpha = 0,8$ pada sisi kiri dan $\alpha = 1,0$ pada sisi kanan

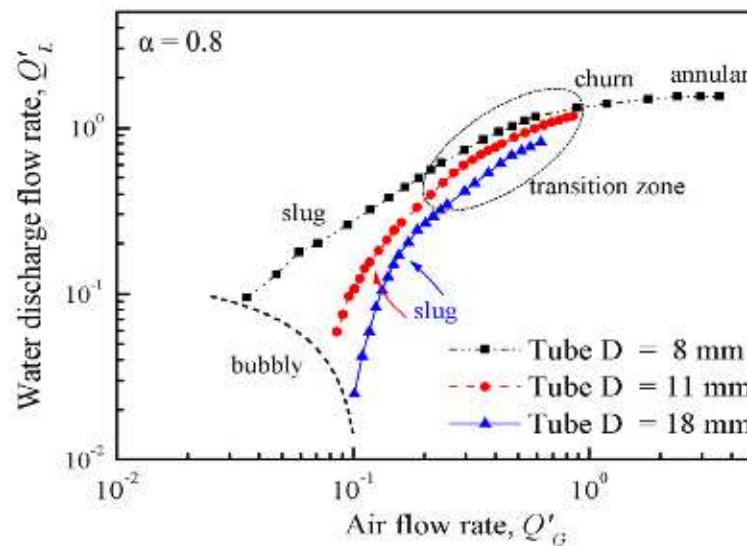


Gambar 2.5 Visualiasi pola aliran *bubble* Seung, dkk (2014), dengan diameter pipa 11 mm, dengan Q_G (a) 0,0106 (b) 0,16 (c) 1,33 (d) 3,2 dengan $\alpha = 0,8$ pada sisi kiri dan $\alpha = 1,0$ pada sisi kanan



Gambar 2.6 Visualiasi pola aliran *bubble* Seung, dkk (2014), dengan diameter pipa 18 mm, dengan Q_G (a) 0,0234 (b) 0,234 (c) 1,403 (d) 3,12 dengan $\alpha = 0,8$ pada sisi kiri dan $\alpha = 1,0$ pada sisi kanan.

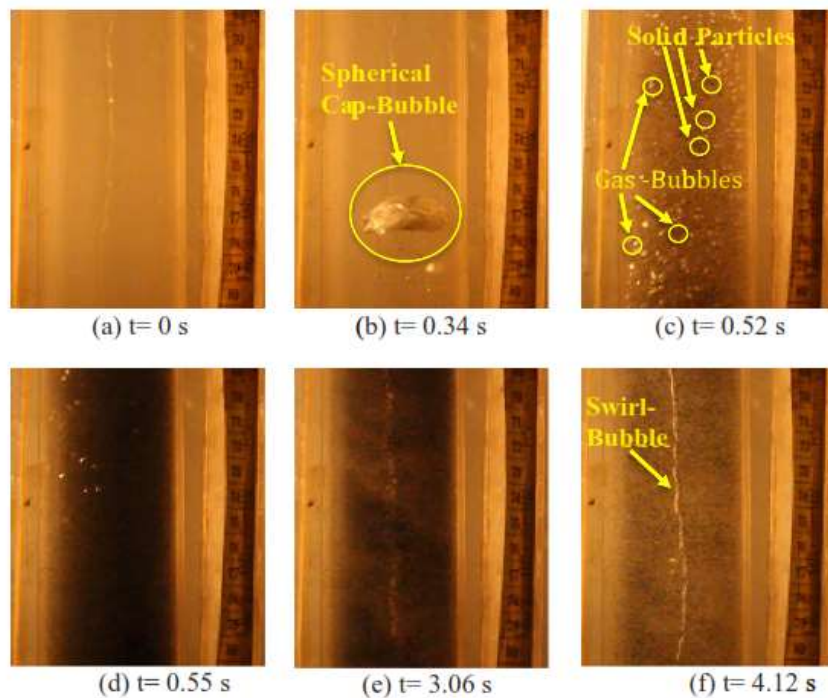
Kemudian Seung, dkk (2014) memetakan pola aliran yang terbentuk dari penelitiannya berdasarkan diameter pipa yang digunakan seperti pada Gambar 2.7. Pola aliran yang terbentuk adalah *bubbly*, *slug*, *churn*, dan *annular*.



Gambar 2.7 Peta pola aliran Seung, dkk (2014) pada *airlift pump* dengan diameter pipa 8 mm, 11 mm, 18 mm, dengan submergence ratio 0,8.

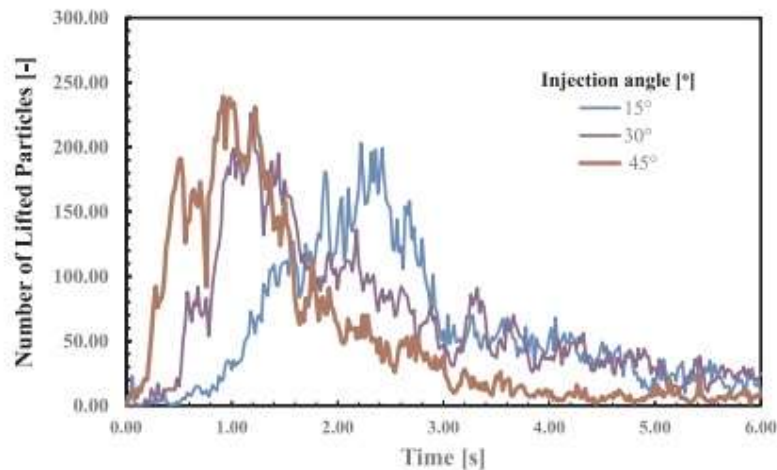
Deendarlianto, dkk (2019) melakukan penelitian pada *airlift pump* tiga fase dengan MBG dan memberikan variasi sudut kemiringan dari injektor udara 15°, 30°, dan 45° dari horizontal. Diameter pipa *upriser* yang digunakan adalah 50 mm. Hasil dari penelitian ini adalah pergerakan partikel diketahui dan pola aliran *slug* adalah pola aliran yang paling baik terjadi, selain itu pada penelitian ini dapat diketahui pergerakan partikel pada pipa *upriser* dalam perbedaan waktu seperti pada Gambar 2.8. Kinerja optimal pengangkatan partikel padat ditemukan di bawah pola aliran *slug*. Parameter sudut kemiringan injektor, laju aliran *liquid* dan *gas*, diameter partikel, dan densitas partikel yang diangkat mempengaruhi kemampuan *airlift pump* MBG, serta penggunaan MBG pada sistem *airlift pump*, akan meningkatkan kemampuannya membawa partikel padat ke atas setidaknya 17% dibandingkan dengan sistem *airlift pump* tanpa MBG.

Pada Gambar 2.8 dapat diketahui pergerakan partikel dari beberapa waktu, pada $t=0,52$ detik dapat diketahui bahwa partikel solid terangkat oleh gelembung udara dari pola aliran *bubble*.

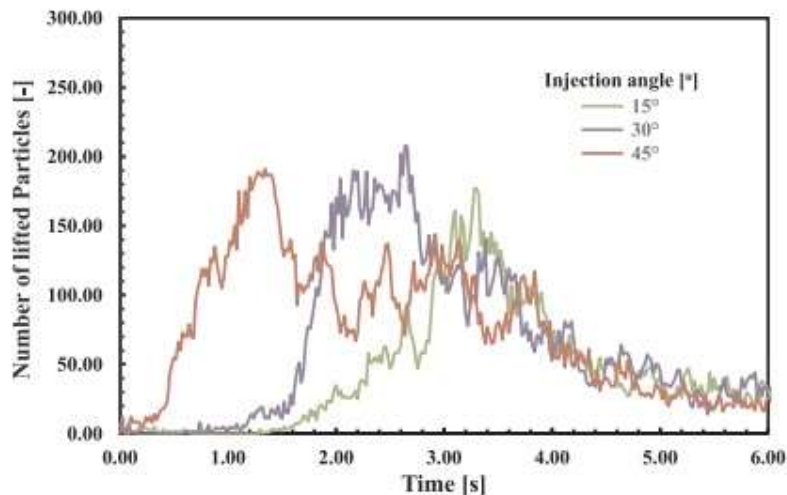


Gambar 2.8 Pergerakan partikel pada pipa *upriser* dengan $Q_L = 8 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_G = 0,81 \text{ l/min}$, diameter partikel 0,63-1,0 mm pada penelitian Deendarlianto, dkk (2019).

Partikel padat yang di uji dalam penelitian Deendarlianto, dkk (2019) adalah batu bara dengan diameter partikel yang divariasikan adalah 0,33 mm, 0,52 mm, dan 0,81 mm. Kisaran laju aliran yang disediakan untuk cairan dan udara, Q_L dan Q_G , masing-masing adalah $7,0 \text{ m}^3/\text{jam}$ – $9,0 \text{ m}^3/\text{jam}$., 0,31/ menit–0,81/menit. Sudut injeksi yang paling baik diinjeksikan pada variasi waktu jumlah partikel yang terangkat ialah sudut 45° seperti pada Gambar 2.9.



(a) Coal volume = 0.083 l



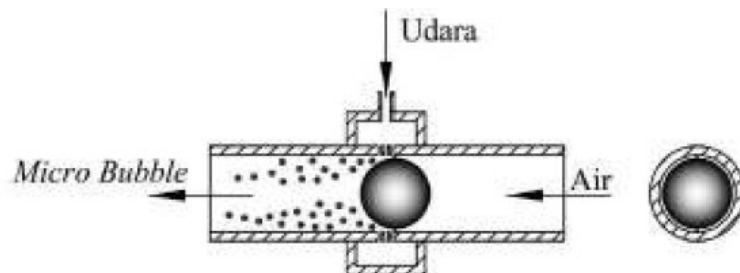
(b) Coal volume = 0.04 l

Gambar 2.9 Pengaruh sudut *micro bubble generator* diinjeksikan pada variasi waktu jumlah partikel batubara terangkat ($Q_L = 7,0 \text{ m}^3/\text{jam}$., $Q_G = 0,3 \text{ l}/\text{min}$.) (Deendarlianto, dkk., 2019)

Hasil dari penelitian ini diperoleh kinerja pengangkatan padat optimal ditemukan di bawah pola aliran *slug* karena gaya apung. Sudut kemiringan injeksi *micro bubble generator* mempengaruhi kinerja *airlift pump*. Semakin tinggi laju aliran volumetrik udara maka semakin tinggi volumetrik partikel padat yang terangkat. Penelitian ini juga menemukan perbandingan kinerja *airlift pump* dengan dan tanpa *micro bubble generator*, sistem *airlift pump* yang menggunakan *micro bubble generator* meningkatkan laju aliran partikel padat yang terangkat sekitar 17%.

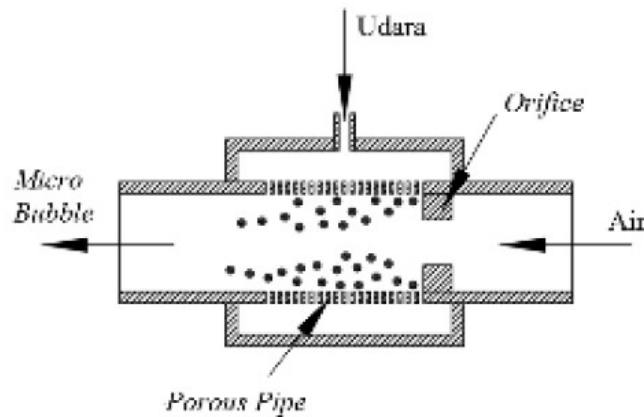
2.3 Bubble Generator.

Teknik pembentukan gelembung (*bubble generator*) telah banyak dikembangkan oleh para peneliti. Prinsip kerja dari *bubble generator* adalah aliran udara yang disuplai akan dipotong menjadi gelembung-gelembung kecil oleh aliran air dan udara bertekanan. Gambar 2.10 merupakan beberapa teknik pembentukan gelembung yang diusulkan oleh Sadatomi, dkk (2012) yang disebut sebagai *bubble jet generator* (BJG). BJG terdiri dari sebuah bola yang ditempatkan di tengah-tengah pipa, sehingga terbentuk celah antara permukaan bola dengan permukaan dalam pipa. Air bertekanan dialirkan dari *upstream* bola melewati celah antara bola dan dinding pipa. Di sisi yang lain, udara diinjeksikan dari bagian atas bola melewati lubang-lubang kecil yang dibuat sedemikain rupa sehingga udara mengalir ke dalam pipa melewati lubang tersebut. Aliran air bertekanan akan memotong udara yang masuk ke dalam pipa sehingga terbentuk gelembung-gelembung kecil yang mengalir di daerah *downstream* dari bola.



Gambar 2.10 Spherical bubble generator

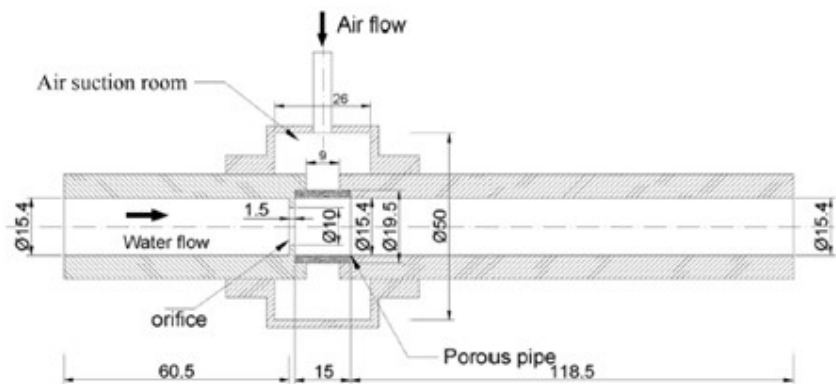
Dalam penelitian ini akan digunakan teknologi yang lebih sederhana yaitu teknologi *bubble generator* dengan menggunakan *orifice* seperti terlihat pada Gambar 2.11. Udara yang masuk ke dalam *orifice bubble generator* (OBG) mengalir secara alami karena pengecilan penampang saluran yang menyebabkan tekanan air yang mengalir dalam OBG jauh lebih rendah dari tekanan udara atmosfer, sehingga udara atmosfer akan terisap menuju ke OBG. Udara yang terisap, selanjutnya bercampur dengan air, kemudian membentuk gelembung udara yang mengalir bersama air menuju sisi *outlet*. OBG merupakan salah satu metode untuk membentuk *micro bubble* atau MBG (*micro bubble generator*).



Gambar 2.11 *Orifice bubble generator* (Deendarlianto, dkk., 2015)

Pada penelitian yang dilakukan Deendarlianto, dkk (2015) dilakukan uji pada *micro bubble generator* dengan tipe *porous orifice*, *orifice* dan *drilled holes* yang ditempatkan di kedalaman 40 cm dari permukaan air. Tiga transduser tekanan dipasang di sekitar MBG pada tempat berbeda untuk menganalisis tekanan air pada *inlet*, tekanan *air-suction*, dan tekanan pada *outlet*. Diameter gelembung yang dihasilkan menggunakan kamera digital dan dianalisis menggunakan *image processing*. Dari penelitian tersebut, dihasilkan kesimpulan bahwa *micro bubble generator* dengan tipe *orifice* menghasilkan *micro bubble* terbaik dan stabil dibandingkan dengan tipe lainnya, walaupun diperlukan *hydraulic pressure* yang lebih.

Deendarlianto, dkk (2019) melakukan penelitian lanjut mengenai *micro bubble*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki karakteristik *oxygen dissolution* menggunakan *micro bubble generator* (MBG) tipe *orifice* pada Gambar 2.12. Karakteristik *micro bubble* yang dihasilkan MBG dipengaruhi oleh kombinasi laju aliran udara dan air yang melewati MBG. Pada penelitian ini, rentang laju aliran udara dan air ditetapkan masing masing yaitu 0,1 – 1,0 l/m dan 30,0 – 80,0 l/m. Gelembung gelembung di *capture* dengan *high-speed camera* untuk mendapatkan distribusi ukuran gelembung serta diameter rata-rata gelembung. Hasilnya membuktikan bahwa ukuran *micro bubble* tergantung pada laju aliran udara dan air. Peningkatan laju aliran gas dapat meningkatkan diameter rata-rata gelembung. Namun, peningkatan laju aliran air akan menurunkan diameter rata-rata gelembung.



Gambar 2.12 *Micro bubble generator* tipe *orifice* Deendarlianto, dkk (2019).

Penelitian aliran tiga fasa yang mengamati pola aliran yang terjadi dan pergerakan partikel dalam saluran telah dilakukan Fujimoto, dkk (2005). Dari Gambar 2.14 berikut dapat diketahui bahwa *critical flux* merupakan parameter penting dalam mendesain *airlift pump* untuk mengangkat partikel padat. Partikel akan terangkat, jika *flux* cairan lebih besar dari *critical flux*. Untuk mengetahui pergerakan partikel secara detail perlu dilakukan *tracking* posisi partikel setiap waktu tertentu, proses ini dapat diamati dengan menggunakan *high speed camera* seperti pada Gambar 2.13.