

Interaksi Bubble-Particle Pada Proses Flotasi

Harinaldi, Warjito, Manus Setyantono

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424

harinald@eng.ui.ac.id, warjito@eng.ui.ac.id, manus_setyantono@yahoo.co.id

Abstrak

Indonesia adalah negara yang kaya akan sumber alam mineral, bahkan negara dengan tambang emas dan perak nomor satu di dunia. Untuk dapat memanfaatkan sumber alam tersebut memerlukan teknologi yang dapat memisahkan mineral yang bernilai dari yang tak bernilai. Salah satu teknologi separasi atau pemisahan mineral adalah flotasi (*flotation*). Separasi dalam proses flotasi memanfaatkan gaya *buoyancy* dari *microbubble*. Faktor penting yang menentukan efisiensi separasi atau efisiensi tumbukan adalah interaksi antara bubble dengan partikel mineral, sehingga pemahaman yang baik tentang topik ini menjadi kunci dalam peningkatan efisiensi flotasi. Berbagai penelitian yang telah dipublikasikan terdahulu memberikan pemahaman yang lebih baik tentang topik ini, tetapi sebagian besar dilakukan dengan metode komputasi. Diperlukan penelitian secara eksperimental untuk meningkatkan pemahaman akan interaksi *bubble* dengan partikel dan sekaligus verifikasi serta konfirmasi metode komputasi. Pada penelitian ini akan dipelajari interaksi *bubble-particle* berfokus pada sudut kontak antara partikel dan *bubble*.

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan apparatus penelitian yang terdiri dari wadah fluida berbentuk balok terbuat dari kaca, peralatan pembangkit *bubble* (*syringe pump*), pengumpan partikel, sistem pencahayaan, *high speed camera* dan perangkat lunak pengolah image, instrumen pengukur temperatur air dan pH air. Peralatan pembangkit *bubble* dan pengumpan partikel didesain sedemikian rupa sehingga *bubble* dan partikel yang dihasilkan dapat dikontrol. Penelitian dilakukan dengan menggunakan air sebagai media untuk melihat, menganalisis aspek *microhydrodynamics* yang meliputi tabrakan (*collision*), pelekatan (*attachment*) dan pelepasan (*detachment*) dan pergerakan partikel. Hasil penelitian dapat memberikan pemahaman yang lebih baik pada interaksi antara *bubble* dengan partikel pada proses terjadinya sudut kontak saat partikel mendekati permukaan *bubble*. Data-data hasil eksperimen dapat digunakan untuk verifikasi dan konfirmasi hasil penelitian sebelumnya, dan juga sebagai input untuk penelitian dengan menggunakan metode komputasi selanjutnya.

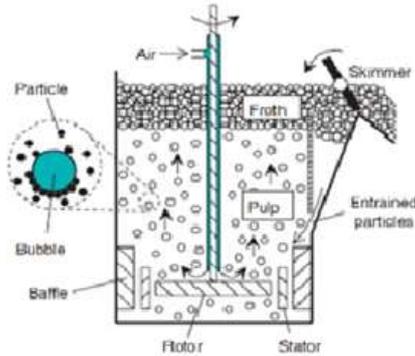
Kata kunci : *Bubble, flotation, microhydrodynamics, collision, attachment, detachment.*

Pendahuluan

Indonesia adalah negara yang kaya akan sumber alam yang melimpah. Sebagian besar provinsi di Indonesia mempunyai keragaman yang khas dari hasil tambangnya. Dari hasil laporan pendapatan negara, sumbangan dari hasil royalti maupun pajak hasil pertambangan sangat besar. Pemanfaatan hasil tambang memerlukan teknologi separasi yang digunakan untuk memisahkan logam yang berharga dari partikel-partikel yang tidak dimanfaatkan. Ada beberapa teknologi separasi hasil tambang, salah satunya adalah flotasi (*flotation*). Flotasi adalah proses pemisahan partikel berdasarkan sifat permukaannya dengan menggunakan gelembung udara. Proses flotasi memiliki sejarah yang panjang (lebih dari 100 tahun) dalam penggunaan dan pengembangannya. Salah satunya adalah pada aplikasi recovery mineral *Sphalerite* (*zinc sulphide*, ZnS) dari partikel halus dengan konsentrator

gravitasi. Sebelum dimasukkan ke dalam sel flotasi terlebih dahulu bijih dihancurkan dan ditumbuk halus sampai kurang dari $200\ \mu\text{m} \approx 0.2\ \text{mm}$, lalu dijatuhkan partikel halus untuk menabrakkannya antara permukaan partikel mineral dengan permukaan gelembung. Ukuran partikel mineral yang diinginkan yaitu dengan ukuran mikro sehingga dapat mengikuti sifat gaya *microhydrodynamics*, gaya intermolecular, gaya interfacial. Dalam flotasi mineral partikel bergerak disekitar gelembung yang naik yang umumnya dianggap bergerak disekitar bola dengan simetris rotasi dalam arah gravitasi. Gelembung diasumsikan sebagai bola karena ukuran mikro, sedangkan partikel dianggap mengikuti gaya *microhydrodinamika* karena ukurannya jauh lebih kecil dari gelembung. Gambar 1 menunjukkan gelembung dan partikel dalam sel flotasi (Nugyen

and Schulze, 2004). Proses flotasi dapat berjalan dengan baik dan berhasil jika melibatkan 3 aspek penting yaitu aspek teknik (*engineering*), aspek fisika (*physical*), aspek kimia (*chemical*). Aspek engineering berkaitan dengan bubble generator, desain kolom flotasi. Aspek fisika berkaitan dengan microhydro-dynamics, interaksi antara bubble dengan partikel dan aspek kimia yang berkaitan dengan penambahan zat-zat kimia yang mampu mengubah sifat bahan yang terlibat dalam proses flotasi. Ketiga aspek tersebut menentukan efisiensi proses flotasi.



Gambar 1. Sel Flotasi

Penangkapan partikel oleh gelembung yang naik adalah proses utama dalam flotasi. Bubble bergerak naik ke permukaan air dengan pengaruh gaya gravitasi, inersia, dan gaya hidrodinamika lainnya, dan partikel bergerak ke bawah karena gaya-gaya yang sama. Pada suatu titik dan kondisi tertentu bubble bertabrakan dengan partikel dengan bilangan Reynold rendah. Partikel melekat pada bubble dan terbawa ke bagian atas kolom flotasi terpisah dari mineral lainnya dan air. Proses tabrakan antara bubble dengan partikel melalui beberapa langkah yaitu partikel melekat pada bubble dan pergerakan agregat bubble dan partikel ke atas merupakan parameter kunci penentu efisiensi separasi sistem flotasi. Proses jatuhnya partikel didalam air menuju permukaan bubble mengikuti persamaan *Basset-Boussinesq-Oseen* (BBO) yaitu (Nguyen and Schulze, 2004) :

$$m_p \frac{dv}{dt} = -6\pi\mu R_p v - \frac{m_f}{2} \frac{dv}{dt} + (m_p - m_f)g + F_{Basset} \quad (1)$$

Substitusi untuk m_p dan m_f kedalam bentuk R_p dan density partikel dan density fluida memberikan persamaan sederhana yaitu :

$$\frac{R_p^2 (2\rho_p + \rho_f)}{9\mu} \frac{dv}{dt} = -v + \frac{2R_p^2 (2\rho_p + \rho_f)}{9\mu} g \quad (2)$$

Persamaan 2 dapat disederhanakan dimana kecepatan Stokes v_s , dan parameter τ sebagai *viscous relaxation time* sehingga dapat ditulis sebagai berikut

$$\frac{2R_p^2 (\rho_p + \rho_f)}{9\mu} g = \frac{D_p^2 (\rho_p + \rho_f)}{18\mu} g \equiv v_s \quad (3)$$

$$\frac{R_p^2 (2\rho_p + \rho_f)}{9\mu} = \frac{D_p^2 (2\rho_p + \rho_f)}{36\mu} \equiv \tau \quad (4)$$

$$\tau \frac{dv}{dt} = -v + v_s \quad (5)$$

Persamaan (5) dikonversikan ke dalam bentuk koordinat polar (r, φ), dimana r adalah perpindahan pusat partikel dari titik asal, φ adalah sudut polar diukur dari ordinat vertikal.

$$\tau \frac{dv_r}{dt} = \tau \frac{v_\varphi^2}{r} - v_r - v_s \cos \varphi \quad (6a)$$

$$\tau \frac{dv_\varphi}{dt} = -\tau \frac{v_r v_\varphi}{r} - v_\varphi + v_s \sin \varphi \quad (6b)$$

Dengan

$$v_r \equiv \frac{dr}{dt} \quad (7)$$

$$v_\varphi \equiv r \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{dan} \quad (8)$$

$$v_s \equiv |v_s| \quad (9)$$

Persamaan diatas tidak termasuk dalam lintasan yang menyimpang waktu mendekati sistim boundary bubble. Untuk dapat mencapai bubble digunakan faktor koreksi kedalam sistim persamaan. Fungsi resistansi hydrodynamic untuk jarak pendek oleh Nguyen dan Schulze (2004) pada air yang diam ada dua faktor koreksi sehingga persamaan (6a) dan (6b) menjadi

$$\tau \frac{dv_r}{dt} = \tau \frac{v_\varphi^2}{r} - f_1 v_r - v_s \cos \varphi \quad (10 a)$$

$$\tau \frac{dv_\varphi}{dt} = -\tau \frac{v_r v_\varphi}{r} - f_3 v_\varphi + v_s \sin \varphi \quad (10 b)$$

Faktor koreksi radial f_1 dan factor koreksi tangensial f_3 diimplementasikan dalam bentuk pendekatan rasional oleh Nguyen dan Schulze (2004) dengan kondisi permukaan bubble yang berbeda. Untuk kondisi “*Immobile*” /tidak slip dan kondisi “*mobile*” /slip. Untuk kondisi *immobile* atau tidak slip

$$f_1 \approx \left[1 + \left(\frac{R_p}{H} \right)^{0.89} \right]^{1.124} \quad (11)$$

$$f_3 \approx \left[1 + 0.498 \left(\ln \left[1.207 \left(\frac{R_p}{H} \right)^{0.89} \right] + \right)^{1.027} \right]^{0.979} \quad (12)$$

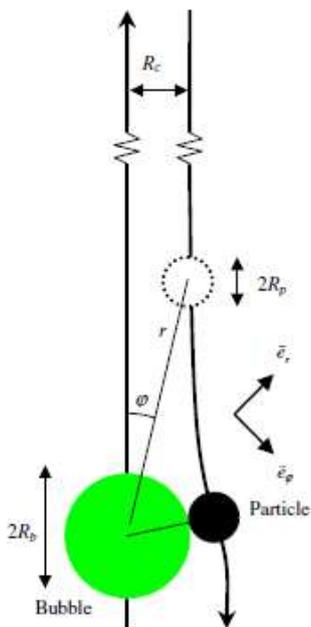
Untuk kondisi “*mobile*” atau slip/sliding

$$f_1 \approx \left[1 + \left(\frac{R_p}{4H} \right)^{0.719} \right]^{1.394} \quad (13)$$

$$f_3 \approx \frac{1.106 + \left(\frac{H}{R_p} \right)}{1.501 + \left(\frac{H}{R_p} \right)} \quad (14)$$

Dimana H merupakan celah, sebagai jarak terdekat antara partikel dan permukaan bubble.

Tabrakan partikel umumnya diukur dari probabilitas tabrakan (P_c) atau efisiensi tabrakan (E_c). Pelekatan partikel di permukaan gelembung melibatkan gaya hidrodinamika, gaya permukaan kimia fisika permukaan partikel-bubble, dan stabilitas agregat. adalah proses flotasi yang diharapkan. Gambar 2. Mengilustrasikan interaksi bubble-partikel yang terjadi sesaat akan terjadinya tabrakan. Efisiensi tabrakan atau penangkapan (E_c) didefinisikan sebagai perbandingan banyaknya partikel yang bertabrakan dengan gelembung dengan jarak terluar aliran terhadap luas daerah yang diproyeksikan gelembung.



Gambar 2 Interaksi bubble-particle

Efisiensi tabrakan atau penangkapan (E_c) didefinisikan sebagai perbandingan banyaknya partikel yang bertabrakan dengan gelembung dengan jarak terluar aliran terhadap luas daerah yang diproyeksikan gelembung.

$$E_c = \left(\frac{R_c}{R_b} \right)^2 \quad (15)$$

Selanjutnya Sutherland's (Nguyen, et.al, 2006) memberikan persamaan efisiensi tabrakan partikel-gelembung yaitu

$$E_c = 3 \left(\frac{R_p}{R_b} \right) \quad (16)$$

Nguyen and Schulze (2004) menyempurnakan persamaan tabrakan seperti pada persamaan dibawah ini

$$E_c = \left\{ \frac{R_c}{R_b + R_p} \right\}^2 \quad (17)$$

Yoon dan Luttrell (Kouachi, et.al, 2010) mendapatkan persamaan efisiensi tabrakan (E_c) dari fungsi aliran cairan yaitu

$$E_c = \left(\frac{R_p}{R_b} \right)^2 \left(\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right) \quad (18)$$

Ukuran partikel padat jauh lebih kecil dari pada gelembung sehingga lintasannya dapat dikarakteristikan sebagai fungsi aliran fluida sehingga permukaan gelembung benar benar *unretarded* atau mobile dan daerah aliran fluida pada permukaan gelembung menjadi aliran potensial dimana bilangan Reynold gelembung menjadi sangat besar $R_b \gg 1$ (Nguyen, 2004).

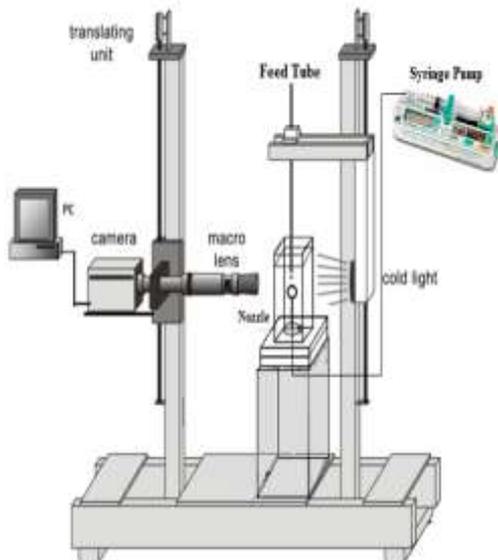
$$Re_B = \frac{\rho_L v_B d_B}{\mu_L} \quad (19)$$

Berikut adalah langkah-langkah flotasi yang berhasil dalam menyelesaikan recoveri. Setiap partikel harus mencapai atau berada dalam radius penangkapan yang akan memungkinkan untuk bergerak dan terjadinya bertabrakan pada permukaan gelembung yang naik. Partikel harus menempel dan mengelinding sepanjang permukaan gelembung sementara gelembung naik ke permukaan air. Partikel yang gelinding harus tetap menempel sampai pada sudut tertentu sehingga terlepas bergantung dengan kecepatan gelembung yang naik. Melekatnya partikel ke *bubble* dipengaruhi oleh gaya adhesi yang bekerja pada garis kontak tiga fase.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan pengetahuan flotasi mengenai fenomena interaksi bubble dengan partikel. Memahami gaya mikrohydrodynamics, gaya intermolecular, gaya *interfacial* saat partikel menghadapi gelembung. Keutamaan riset menentukan sudut kontak *bubble - particle*. Serta mengembangkan pemahaman *interaksi* antara *bubble* dengan *particle* untuk meningkatkan performa sistem flotasi di industri tambang.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan teknik visualisasi aliran kecepatan tinggi untuk mendapatkan gambaran rinci interaksi particle-bubble. Fasilitas yang digunakan meliputi adalah *High Speed Camera* untuk merekam proses tabrakan antara gelembung-partikel, *syringe pump* untuk menghasilkan gelembung, *nozzle* untuk membentuk gelembung, corong untuk memasukan partikel, komputer untuk merekam dan melihat jejak pergerakan bubble – partikel. Dalam penelitian ini, air tawar digunakan sebagai media untuk proses tabrakan antara partikel dan gelembung. Partikel yang digunakan adalah tembaga dengan ukuran 20 μm dan 250 μm . Langkah-langkah sebelum melakukan penelitian yaitu memastikan high speed camera telah terkoneksi dengan computer dan mikrolensa telah mendapatkan focus yang tepat pada ujung nozzle. Lampu halogen dengan 300 watt dinyalakan yang telah dihalangi dengan kertas kalkir untuk mendapatkan pencahayaan yang baik, syringe pump dihidupkan yang telah dihubungkan dengan selang berdiameter mikro dan terhubung ke nozzle ukuran 0.3 μm . Debit udara yang dihasilkan dari syringe pump antara 0.2 – 3 ml/h. Proses perekaman dimulai dengan terbentuknya gelembung dan penjatuhan partikel melalui corong yang ada. saat sebelum menabrak gelembung, saat menabrak, proses pelekatan antara partikel dan gelembung hingga pada saat pelepasan partikel meninggalkan gelembung. Gambar 3. Menunjukkan setup peralatan eksperimen yang digunakan dalam penelitian ini mengadaptasi sistem yang digunakan Hubicka, et.al (2013).



Gambar 3. Alat Penelitian

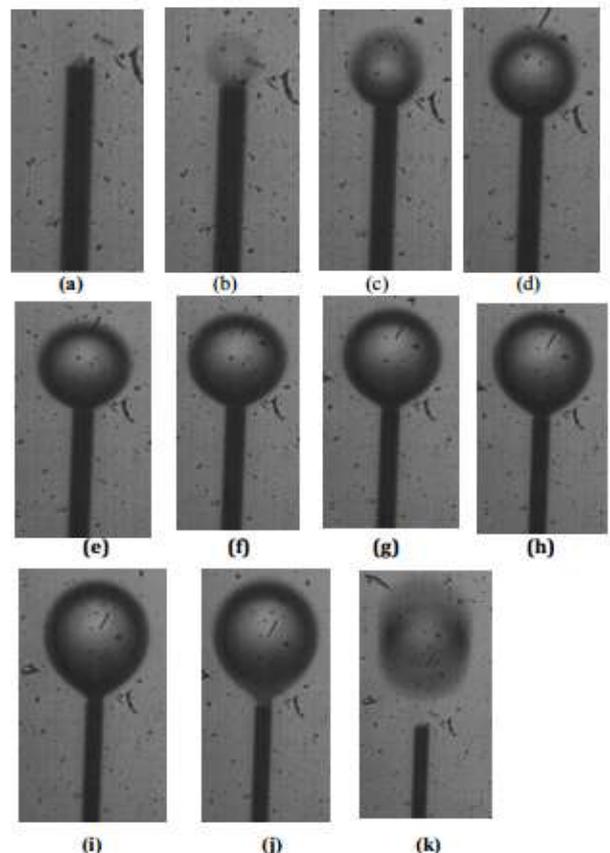
Data rekaman gerakan partikel dan gelembung direkam menggunakan kamera kecepatan tinggi. Kemudian, hasilnya akan dianalisis dengan

menggunakan *image processing (imageJ)*, *measure software*, untuk mendapatkan diameter gelembung, kecepatan terminal partikel diperoleh dengan menggunakan excel, sehingga efisiensi tabrakan dapat dihitung. Efisiensi tabrakan untuk membuat kesimpulan dari ukuran partikel dan gelembung serta pengaruhnya melalui tabrakan ini. Secara khusus, parameter yang diukur dalam penelitian ini, yaitu: ukuran partikel, density partikel, ukuran gelembung, viskositas air, diameter gelembung.

Hasil dan Pembahasan.

Pembentukan Gelembung Tanpa Proses Tumbukan.

Proses pembentukan gelembung tanpa disertai tumbukan ditunjukkan pada serangkaian foto pada Gambar 4.



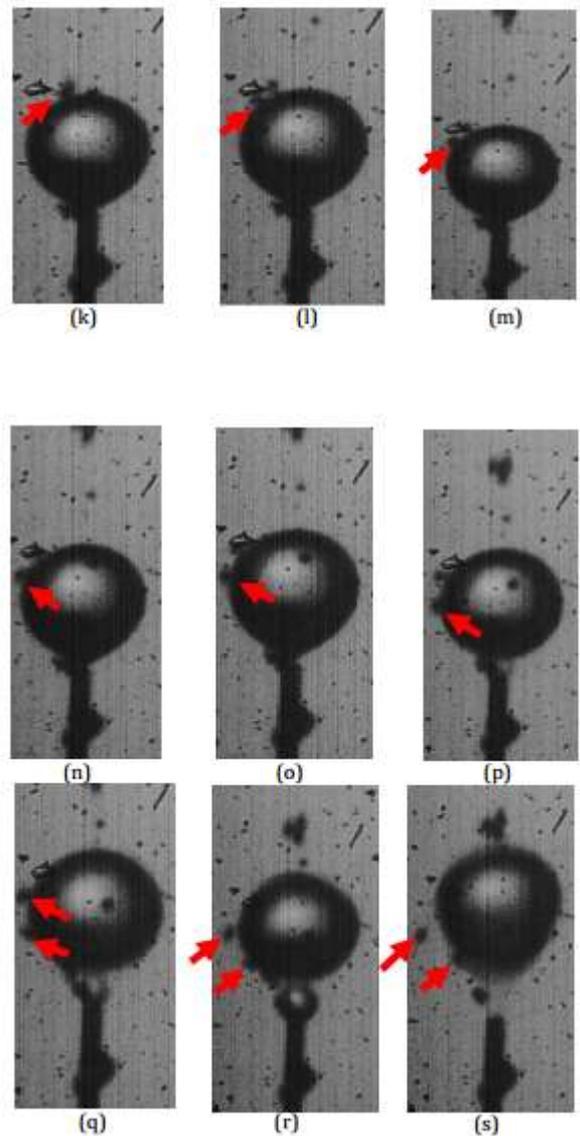
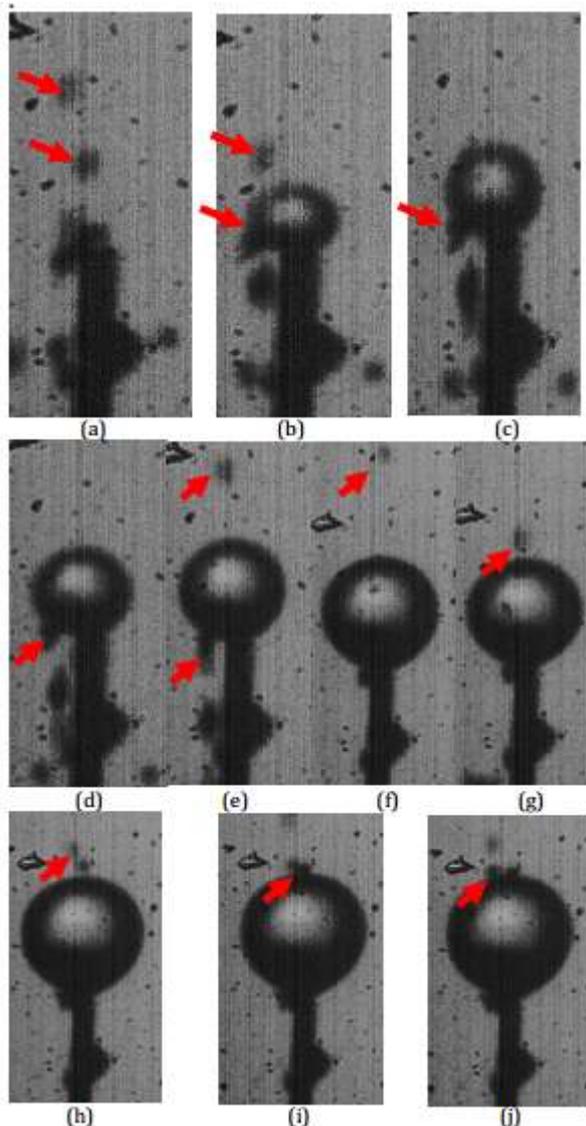
Gambar 4. Pembentukan gelembung tanpa tumbukan dengan partikel sebelum hingga terlepas dari jarum berdiameter 0.3 mm, debit udara 0.1 ml / h.

Dalam Gambar 4 gelembung yang terbentuk pada air yang diam dari frame (a) ke frame (h), menggunakan diameter nozzle 0.3 mm, didalam nozzle dialiri udara dengan menggunakan syringe pump dengan debit udara 0.0278 mm^3/s , dan pemotretan gambar menggunakan high speed camera 125 frame/second.

Mengalirnya udara secara tetap ini menyebabkan awalnya terbentuknya gelembung dengan diameter 0.4625 mm dimana gaya buoyancy yang ada pada gelembung ini berbanding lurus terhadap diameter bubble yang secara terus menerus mengembang hingga dengan diameter 1.475 mm, setelah itu gelembung terlepas karena memiliki diameter yang optimum dengan demikian tegangan permukaan antara gelembung dan ujung nozzle mengecil yang memudahkan gelembung terlepas dan naik kepermukaan.

Pembentukan Gelembung Dan Tumbukan Dengan Partikel.

Proses interaksi partikel dan bubble ditunjukkan pada serangkaian foto pada Gambar 5 yang menunjukkan mekanisme pembentukan gelembung dan tumbukan dengan partikel.

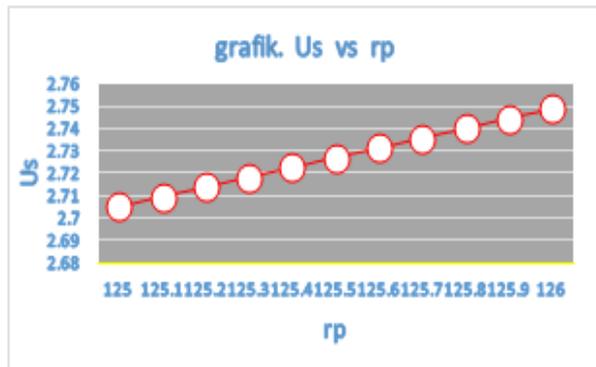


Gambar 5. *Collision bubble–particle* sebelum hingga terlepas dari jarum berdiameter 0.3 mm, debit udara 2 ml / h

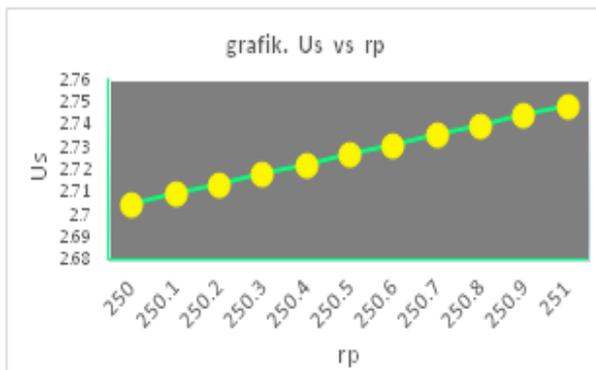
Pada gambar 5 frame (a) hingga frame (s) menunjukkan jatuhnya partikel dari atas ke permukaan gelembung pada air yang diam, dari gambar dapat terlihat bahwa partikel pada saat mendekati permukaan gelembung mempunyai kecepatan terminal akibat dari gaya gravitasi dan gaya drag partikel, gaya permukaan gelembung, gaya buoyancy partikel. *Microhydrodynamics* dari partikel ini sesaat melakukan collision terhadap permukaan gelembung dimulai dengan tabrakan dan diikuti subproses pada permukaan gelembung yaitu pelekatan dan partikel menggelinding sepanjang permukaan gelembung sampai 90° terhadap sumbu vertikal dari axisymmetric gelembung. Saat partikel menggelinding diatas permukaan gelembung dipengaruhi juga oleh kecepatan gelembung naik.

Terminal Velocity Dan Efisiensi Tabrakan.

Gambar 6-7 Menunjukkan kisaran velocity dari partikel sesaat sebelum collision terjadi.

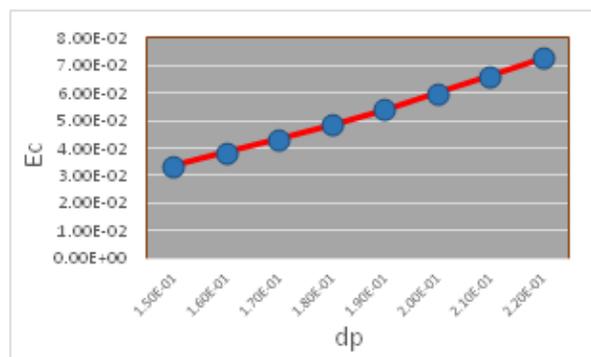


Gambar 6. Grafik kecepatan terminal partikel (Us) terhadap ukuran partikel 125 μm.



Gambar 7. Grafik kecepatan terminal partikel (Us) terhadap ukuran partikel 250 μm

Kecepatan terminal dari partikel bergantung pada diameter, semakin besar diameter maka semakin besar kecepatan terminalnya.



Gambar 8. Grafik efisiensi tabrakan (Ec) terhadap ukuran partikel 250 μm.

Gambar 8 menunjukkan efisiensi tabrakan (*collision efficiency*) naik dengan ukuran diameter gelembung tetap dan perbedaan ukuran diameter partikel yang bertambah. Jadi efisiensi penangkapan yang baik

bilamana diameter bubble tetap dengan bertambahnya ukuran partikel.

Kesimpulan

Dari hasil visualisasi aliran yang dilakukan dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut Interaksi bubble-particle terdiri dari tiga subproces yang terjadi yaitu collision (tabrakan), attachment (pelekatan), detachment (pelepasan).

Partikel yang jatuh tepat diatas permukaan gelembung akan mendapatkan gaya inerti, sedangkan jika partikel jatuh tidak tepat diatas permukaan gelembung cenderung akan mengelinding pada permukaan gelembung.

Partikel akan mendapat gaya mikrohydrodynamics bila berada dibawah gelembung yang naik. Effisiensi tabrakan dapat ditentukan dari kecepatan partikel ke permukaan bubble dengan jarak yang sangat dekat ini disebabkan oleh aliran cairan disekitar gelembung yang bergerak pada bagian depan dan belakang asimetris (fore and aft-asymmetric), begitupula partikel yang bergerak pada bagian depan dan belakang asimetris (fore and aft-asymmetric) gelembung, tergantung mobilitas permukaan gelembung dan inerti partikel. Sudut singgung (tangency) partikel pada permukaan gelembung sepenuhnya mobile menggelinding sampai dengan sudut 90° di khatulistiwa gelembung. Partikel kasar yang bergerak ke permukaan gelembung dikontrol oleh mikrohidro-dinamika, gravitasi dan inerti, sedangkan untuk partikel yang lebih kecil pelekatan partikel dipengaruhi oleh difusi Brown (Brownian diffusion), gaya double layer listrik dan gaya permukaan hidrofobik. Semakin besar diameter partikel maka semakin besar terminal kecepatan partikel tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat terlaksana karena mendapat bantuan Hibah Riset Utama dari DRPM UI oleh karenanya kami ucapkan terimakasih.

Nomenklatur

- g gravitational constant (ms⁻²)
- Re Reynolds number
- m_p massa partikel (kg)
- m_f massa fluida (kg)
- R_p jari jari partikel (mm)
- R_c jari jari collision (mm)
- R_b jari jari bubble (mm)
- v_s kecepatan terminal partikel (mm/s)
- r koordinat polar
- f_i faktor koreksi radial.

f_3 faktor koreksi tangensial.
 E_c efisien collision
 F_{Basset} gaya Basset-Boussinesq-Oseen.
 t waktu

Greek letters

ρ density (kg/m³)
 μ viscosity fluida (Pas)
 τ viscous relaxation time.
 ϕ sudut polar.
 σ tegangan permukaan pada tiga fase.

Subsripts

B bubble
 C collision
 l liquid.
 p particle.

Referensi

Hubicka,M.Basarova,P,. Vejrazka,J,. Collision of a small rising bubble with a large falling particle, International Journal of Mineral Processing 121 (2013) 21-30.

Kouachi,S,. Bouhenguel,M,. Amirech,A,. Bouchemma,A,. Yoon-Luttrell collision and attachment models analysis in flotation and their application on general flotation kinetic model,. Desalination 264(2010) 228-235.

Nguyen, Phong T,. Nguyen, Anh V., Validation of the generalized Sutherland equation for bubble-particle encounter efficiency in flotation:Effect of particle density,.Minerals engineering 22(2009)176-181.

Parkinson,L,. Ralston,J,. Dynamic aspects of small bubble and Hydrophilik solid encounters,. Advances in colloid and interface Science 168(2011)198-209

Nguyen, Cuong M,. Nguyen, Anh V,. Miller, Jan D,. Computational Validation of the Generalized Sutherland Equation for bubble-particle encounter efficiency in flotation,. International Journal of Mineral Processing 81(2006)141-148.

Nguyen,Anh V,. Jameson, Graeme,J,. Sliding of fine particles on the slip surface of rising gas bubbles : Resistance of liquid shear flows,. International Journal of Multiphase 31 (2005)492-513.

Nguyen, A,V,. Evans, G,M,. Attachment Interaction between air bubbles and particles in froth flotation,. Experimental Thermal and Fluid Science 28 (2004) 381-385.

Nguyen, Anh,V,. Evans, G,M,. Movement of fine particles on an air bubble surface studied using high-speed video microscopy,. Journal of colloid and interface Science 273(2004)271-277.