# Efek Diameter Partikel dan Sudut Pelekatan Partikel pada Efisiensi Stabilitas Agregat dalam Flotasi Mineral

Warjito<sup>1\*</sup>, Harinaldi<sup>2</sup>, Manus Setvantono<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, Indonesia wariito@eng.ui.ac.id

#### Abstrak

Dalam proses flotasi, diameter bubble  $(d_b)$ , diameter partikel  $(d_p)$  dan sudut pelekatan partikel  $(\alpha)$ adalah faktor utama yang terlibat dalam interaksi partikel-bubble. Efisiensi Stabilitas  $(E_s)$  digunakan sebagai indikator untuk menilai seberapa besar efisiensi recovery flotasi. Parameter bilangan tak berdimensi bilangan Bond (*Bond number*) untuk menunjukkan stabilitas efisiensi agregat. Tujuan penelitian ini untuk memahami efisiensi stabilitas agregat bubble-partikel dalam flotasi mineral dengan melihat pengaruhnya dari diameter partikel dan sudut pelekatan partikel. Dalam penelitian ini menggunakan kotak kaca diisi dengan air bercampur *collector. Syringepump* digunakan untuk menghasilkan debit udara yang dikeluarkan melalui jarum berdiameter 0.23 mm untuk membentuk *smallbubble*. Hasil penelitian Efisiensi stabilitas terbaik terjadi pada partikel diameter 38µm,45µm,53µm dan 75µm. Sudut pelekatan untuk partikel berdiameter 300µm hanya terjadi pada sudut 15° sampai dengan 40° dan efisiensi stabilitas pada sudut pelekatan 30° sampai dengan 50°. Semakin besar sudut pelekatan partikel, bilangan bond semakin menurun maka gaya pelekatan lebih besar dari gaya pelepasan. Semakin besar sudut pelektan partikel maka efisiensi stabilitas semakin kuat. Kerja adhesi maksimum terjadi pada semua diameter partikel hanya pada sudut pelekatan partikel 90° dan sudut kontak TPCL 175°

Kata kunci: Diameter Partikel, Sudut Pelekatan Partikel, Efisiensi Stabilitas Agregat, Bilangan Bond, *Syringepump*, *Smallbubble*, *Collector*.

### Pendahuluan

Flotasi adalah teknik pemisahan partikel hidrofobik dan partikel hidrofilik dengan menggunakan smallbubble. Partikel hidrofobik adalah partikel yang diingini oleh indutri pertambangan untuk diolah menjadi logam. sedangkan partikel hidrofilik merupakan hasil sampingan dari proses flotasi. kemampuan untuk merubah sifat permukaan partikel (hidrofobisitas) disebabkan adanya collector yang dicampurkan dengan air sebagai media flotasi. Proses flotasi ditandai dengan tiga kejadian penting berturut-turut: tumbukan antara partikel-bubble, pelekatan partikel ke bubble dan pelepasan/agregat partikel-bubble. Pelepasan partikel dari permukaan bubble menjadikan tingkat pemulihan (recovery) yang rendah dari mineral. pilihan partikel Dua untuk meminimalkan pelepasan partikel vaitu mengurangi gaya-gaya pemisahan yang datang dari aliran turbulen oleh *floating* partikel pada lingkungan tenang (calm) dan lembut (gentle environment), kedua menaikkan atau

meningkatkan gaya pelekatan (*capiller force*) antara partikel dan bubble. kontribusi yang paling signifikan berasal dari gaya pelekatan yaitu gaya kapiler antara partikel-bubble. Penelitian efisiensi stabilitas terdahulu adalah Hub dan Sciben, 1969; Schulze, 1977, 1982, 1984, mereka meneliti pelepasan pada agregat yang dipengaruhi oleh gaya-gaya dengan menggunakan partikel bulat. Nguyen, 2003 meneliti geometri agregat bubble-partikel dan menghasilkan persamaan 3. Pengaruh diameter partikel mineral untuk recovery flotasi adalah Jameson et al 1977, Jowett 1980; Trahar 1981; Ahmed dan Jameson, 1985, Yoon dan Luttrell 1989. Schulze 1977, 1982 meneliti pengaruh aliran turbulen disekitar agregat. Schulze juga meneliti bilangan non dimensional Bond untuk agregat dengan nilai lebih dari 1 berarti partikel tidak stabil dan terlepas dari bubble. Pengaruh gaya gaya partikel pada agregat diteliti oleh Nutt 1960, Princen 1969, Schulze dan Stoeckelhuber 2005).

Gaya kapiler bergantung pada tingkat hidrofobik partikel yang terefleksikan oleh sudut kontak. Dengan sifat hidrofobik lebih tinggi, partikel mineral lebih mudah melekat pada bubble, gaya kapiler ditentukan oleh tiga parameter: tegangan permukaan fluida, perimeter garis tiga kontak dan sudut kontak. ketiga parameter ini merupakan tolok ukur untuk stabilitas agregat bubble-partikel yang merupakan tujuan dari penelitian ini, dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$F_{cap} = 2\pi\sigma R_p \sin\theta \sin(\theta - \alpha)$$
(1)

$$F_{cap} = \pi \sigma R_p (1 - \cos \theta)$$
  
untuk capilar maximum,  $\alpha = \frac{1}{2} \theta$   
(2)

dimana  $R_p$  adalah jari-jari partikel,  $\theta$  adalah sudut kontak,  $\alpha$  adalah sudut pusat kontak tiga fase pada permukaan partikel,  $\sigma$  adalah tegangan permukaan seperti ditunjukkan pada gambar 1 [1].



Gambar 1. Axisymmetric geometry of the particle attached to bottom a bubble (Nguyen, 2003).



Gambar 2. Berbagai sudut pelekatan ( $\alpha$ ) partikel pada bagian bawah permukaan bubble.

Model persamaan 1 digunakan untuk menghitung gaya kapiler dengan asumsi bahwa sudut kontak konstan sepanjang garis kontak tiga fase. Meskipun demikian medan aliran di lingkungan mineral flotasi adalah daerah turbulen dan sudut kontak terdistribusi sepanjang garis kontak tiga fase secara signifikan bervariasi.

Teknik pengukuran sudut kontak diawali oleh Chan, 2009. pengukuran sudut kontak dikategorikan kedalam dua kelompok: pangukuran pada *flat plates* dan pengukuran pada permukaan non ideal. Mikroskop gaya atom (AFM) telah digunakan untuk mengukur sudut kontak dari partikel kecil [1]; [2].

Sudut kontak partikel padat dapat dipengaruhi oleh faktor fisika dan kimia [3]. Sel mikroflotasi bubble tunggal Hallimond digunakan untuk menentukan sudut kontak [4]; [5] ukuran partikel floatable maksimum dan keseimbangan gaya digunakan untuk sudut kontak lanjutan.

Persamaan 1 digunakan untuk dapat pemahaman bahwa sudut kontak dinamis sebagai fungsi sistim hidrodinamika secara akurat untuk memprediksi stabilitas agregat bubble-partikel.

Dalam sistim tanpa gerak bubble pada kesetimbangan gaya resultan  $F_r$  terdiri dari gaya buoyancy, kapiler, tekanan, dan gaya gravitasi adalah nol.

$$\vec{F}_r = \sum \vec{F} = \vec{F}_{bou} + \vec{F}_g + \vec{F}_{cap} + \vec{F}_p$$
 (3)

$$B_o^* = \frac{\frac{3.75d_p^2 \rho_p \varepsilon^{2/3}}{d_b^{1/3}}}{6\sigma \sin^2(\frac{\theta}{2})} = \frac{F_{detachment}}{F_{attachment}}$$
(4)

$$Re_{b} = \frac{\rho_{l}v_{b}d_{b}}{\mu_{l}}$$
(5)

$$P_{det} = \exp\left(1 - \frac{6\sigma \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}{3.75 \, d_p^2 \, \frac{\rho_p \varepsilon^{2/3}}{d_b^{1/3}}}\right) \tag{6}$$

$$E_{stabilitas} = 1 - P_{det} \tag{7}$$

Kerja adhesi pada sudut kontak TPCL

$$W_{SA} = \sigma_{WA} (1 - \cos \theta) \tag{8}$$

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memahami efisiensi stabilitas agregat bubblepartikel dalam flotasi mineral dengan melihat pengaruhnya dari diameter partikel dan sudut pelekatan partikel.

#### Metodologi

Penelitian dilakukan ini dengan eksperimen, Untuk mengetahui kontur dan komposisi mineral dari permukaan partikel maka dilakukan dengan menggunakan SEM dan foto komposisi mineral partikel. Partikel dengan diameter terkecil 38µm dimasukan dengan menggunakan pipet ke corong kaca sehingga partikel akan turun menuju jarum yang telah terbentuk smallbubble dengan kondisi air diam. Pertemuan antara bubble dan partikel, baik sebelum, saat dan sesudah direkam dengan menggunakan high speed kamera pada 1500 frame/second. Selanjutnya hasil perekaman diproses menggunakan programmable vitcam, meazure, excel dan sigmaplot. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa kali untuk setiap diameter partikel sampai diameter terbesar 300µm. Pengukuran sudut pelekatan dan sudut kontak partikel pada permukaan bubble menggunakan softwere vitcam dan meazure, Alat dan bahan penelitian yang digunakan seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. Partikel mineral berdiameter, 38µm, 45µm, 53µm, 75µm, 106µm, 150µm, 212µm, 300µm.

Gambar 3 menunjukkan kontur permukaan partikel dengan diameter partikel beragam, dengan pembesaran 2000 x. Komposisi mineral untuk setiap bijihya telah dilakukan pengujian di laboratorium dengan mineral chalcopyrite mendominasi partikel.



- 1. High Speed Camera.
- 2. Microlens
- Glass box; Nozzle
  Feed Tube; Filter Kalkir.
- 4. *Feed Tube*; Filter Ka 5. *Funnel*
- 6. Cold light
- 7. Laptop
- 8. Syringepump
- 9. Syringe (Terumo)

Gambar 4. Alat eksperimen / Penelitian

#### Hasil dan Diskusi

Setelah data perekaman diperoleh maka selanjutnya diolah dengan menggunakan pemprograman dan diperoleh hasil seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. Program Meazure mengukur sudut TPCL ( $\theta$ ) partikel-bubble-air.

Gambar 5 menunjukkan partikel melekat pada bagian bawah bubble dan terukur dengan sudut 90°, ini adalah aggregate bubble-partikel.



Gambar 6. Grafik sudut pelekatan partikel  $\alpha$  versus bilangan Bond, efisiensi stabilitas.

Gambar 6 menunjukkan partikel berdiameter 212 um semakin besar sudut pelekatan maka efisiensi stabilitas semakin stabil ini ditunjukkan pada titik titik warna merah, kecuali pada sudut 35° efisiensi stabilitas bernilai 80%. Bila sudut pelekatan 0° maka partikel akan mudah terlepas, sebab efisiensi stabilitas 0%, dan bilangan Bond bernilai 1,01. Semakin naik sudut pelekatan partikel, bilangan Bond semakin menurun berarti gaya pelekatan lebih besar dari gaya pelepasan, ini ditunjukkan dengan titik titik warna hitam.



Gambar 7. Grafik sudut pelekatan partikel versus bilangan Bond, efisiensi Stabilitas.

Gambar 7 menunjukkan semakin besar sudut pelekatan partikel maka efisiensi stabilitas semakin kuat seperti ditunjukkan titik titik warna putih pada grafik demikian juga untuk bilangan Bond semakin menurun karena gaya pelekatan lebih besar dari gaya pelepasan, seperti titik titik warna hitam. Untuk partikel dengan diameter terbesar, sudut pelekatan sangat mempengaruhi pelekatan pada permukaan bubble. bila sudut pelekatan 0° maka partikel tersebut sangat mudah untuk terlepas (*detachment*) pada permukaan bubble karena sudut pelekatannya sangat kecil.



Gambar 8. Grafik posisi sudut partikel pada permukaan bubble.

Gambar 8 menunjukkan posisi partikel di bawah permukaan bubble berarti posisi partikel pada sudut 180°, partikel berdiameter 38µm–212µm dengan bilangan Bond dibawah 1 menunjukkan partikel melekat pada bubble, ini menunjukkan bahwa gaya pelekatan lebih besar dari gaya pelepasan. Sedangkan partikel diameter 300µm terlepas dari permukaan bubble, menunjukkan gaya pelekatan lebih kecil dari gaya pelepasan.

Gambar 9 menunjukkan gaya kapiler yang bekerja pada partikel berdiameter  $38\mu$ m naik turun dari sudut pelekatan partikel. grafik regresi warna merah menunjukkan bahwa rata rata gaya kapiler maksimum terjadi pada sudut  $80^{\circ} - 90^{\circ}$  sedangkan sudut minimum rata rata terjadi pada sudut  $40^{\circ}$ 



Gambar 9 Sudut pelekatan partikel diameter 38µm versus gaya kapiler maksimum.



Gambar 10. Grafik sudut pelekatan partikel  $\alpha$  versus gaya kapiler.

Gambar 10 menunjukkan partikel diameter 212µm bila sudut pelekatannya pada permukaan bubble membesar maka gaya naik kapiler turun berdasarkan sudut pelekatan. Garis merah menunjukkan nilai gaya kapiler rata-rata yang bekerja pada sudut pelekatan partikel. nilai terbesar terjadi pada sudut 80°-85° dan nilai terkecil terjadi pada sudut 30°. gava kapiler yang besar membuat partikel kuat tetap menempel pada permukaan bubble. sedangkan gaya kapiler yang kecil pelengketan partikel pada permukaan bubble menjadi tidak kuat, sehingga dengan mudah untuk terlepas.

Gambar 11 menunjukkan partikel berdiameter 300µm bila sudut pelekatannya pada permukaan bubble membesar maka gaya kapiler naik turun berdasarkan sudut pelekatan. Garis merah menunjukkan nilai gaya kapiler rata-rata yang bekerja pada sudut pelekatan partikel. nilai terbesar terjadi pada sudut 80°-85° dan nilai terkecil terjadi pada sudut 25°. gaya kapiler yang besar membuat partikel kuat tetap menempel pada permukaan bubble. sedangkan gaya kapiler yang kecil pelengketan partikel pada permukaan bubble menjadi tidak kuat, sehingga dengan mudah untuk terlepas.



Gambar 11. Grafik sudut pelekatan partikel  $\alpha$  versus gaya kapiler.



Gambar 12. Grafik sudut pelekata partikel versus efisiensi stabilitas.

Gambar 12 menunjukkan grafik dari gabungan diameter partikel yang dipergunakan dalam penelitian ini. Rata-rata dari garis berwarna hitam sebagai garis linier regresi menunjukkan bahwa nilai maksimum untuk efisiensi stabilitas dengan nilai 100% terjadi pada sudut 90°. sedangkan untuk tiap partikel efisiensi yang paling stabil dan baik terjadi pada partikel berdiameter 38µm seperti ditunjukkan warna abu-abu. Partikel berdiameter 108µm. 150um. 212um mengalami stabilan pada ketidak sudut pelekatan 50°-85°, sedangan partikel berdiameter 212µm dan 300µm mempunyai

efisiensi kestabilan yang rendah dari semua partikel yang digunakan. Selain partikel berdiameter  $38\mu$ m, partikel yang mempunyai efisiensi kestabilan yang baik adalah partikel berdiameter  $45\mu$ m,  $53\mu$ m dan  $75\mu$ m semua ini dapat ditunjukkan dengan titik warna biru muda, ungu dan biru. oleh karenanya pada industri tambang senang menggunakan partikel dengan berdiameter kecil, mudah untuk terjadinya flotasi mineral.



Gambar 13. Grafik sudut pelekatan partikel versus gaya kapiler untuk semua diameter.

Gambar 13 menunjukkan bahwa partikel dengan diameter 300µm seperti pada garis warna coklat mempunyai gaya kapiler yang terbesar dari semua diameter partikel dan dengan beberapa sudut pelekatan. sedangkan partikel dengan diameter 38µm mempunyai gaya kapiler yang rendah, akan tetapi partikel ini mempunyai gya kapiler yang baik disemua sudut pelekatan. Diameter partikel selain 38µm mempunyai gaya kapiler yang tidak stabil dibeberapa sudut pelekatan.

Gambar 14 menunjukkan semakin naik sudut kontak TPCL gaya adhesi semakin naik, ini ditunjukkan dengan titik warna merah Warna hitam menunjukkan gaya kapiler pada partikel 38µm yang selalu stabil disetiap sudut kontak TPCL.



Gambar 14 Grafik sudut kontak TPCL versus gaya kapiler dan kerja adhesi, diameter 38µm.



Gambar 15. Grafik diameter partikel versus gaya gravitasi, gaya Bouyancy.

Gambar 15 menunjukkan beberapa ukuran diameter partikel yang beraksi pada flotasi dengan melihat gaya gravitasi dan gaya buoyancy yang bekerja padanya. Semakin besar diameter partikel maka semakin naik gaya gravitasi ini dapat terlihat pada garis warna hitam. Sedangkan gaya bouyancy semakin menurun ditunjukkan dengan garis warna merah. Untuk partikel ukuran 38µm gaya bouyancy sama dengan gaya gravitasi ini dapat terlihat kedua saling merapat dan menjadi satu ditunjukkan pada garis warna merah dan hitam. Ini disebabkan karena ukuran diameter partikel yang sangat kecil.

Gambar 16 semakin besar sudut pelekatan partikel  $\alpha$  dan sudut kontak  $\theta$ , kerja adhesi semakin besar, bila sudut pelekatan partikel  $\alpha$ dan sudut kontak  $\theta$  adalah 0 maka tidak ada kerja adhesi yang bekerja pada partikel. Kerja adhesi maksimum terjadi pada semua diameter partikel pada sudut pelekatan partikel 90° dan sudut kontak TPCL 175°



Gambar 16. Grafik sudut pelekatan partikel  $\alpha$ , sudut kontak  $\theta$  versus kerja adhesi.

## Kesimpulan

Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa bilangan Bond menentukan pelekatan dari diameter partikel. Diameter 38um-212um nilai bilangan Bond kurang dari 1 berarti partikel stabil melekat pada permukaan bubble, sedangkan partikel berdiameter 300 nilai bilangan Bond lebih dari 1 ini menunjukkan partikel tidak stabil. Efisiensi stabilitas terbaik terjadi pada partikel diameter 38µm,45µm,53µm dan 75µm. Sudut pelekatan untuk partikel berdiameter 300µm hnya terjadi pada sudut 15° sampai dengan 40° dan efisiensi stabilitas pada sudut pelekatan 30° sampai denga 50°. Semakin besar sudut pelekatan partikel, bilangan bond semakin menurun berarti gaya pelekatan lebih besar dari gaya pelepasan. Semakin besar sudut pelektan partikel maka efisiensi stabilitas semakin kuat.

## Referensi

[1] Nguyen, A.V., New method and equation for determining attachment tenacity and particle size limit in flotation international journal mineral. 68 (2003) 167-182.

[2] Preus,M,Butt, H.J, Measuring the contact angle the contact angle of individual colloidal particles, J.Coloid interface sci 208(1998) 468-477.

[3] Chau TT. AReview of Techiques for Measurement of contact angles and their applicability on mineral surfaces miner engineering 22(2009) 213-219. [4] Drzymala J, Characterization of materials by Hallimon tube flotation Part 2: Maximum size of floating particles and contact angle International Journal Mineral Processing 42(1994) 6234-6237.

[5] Kowalczuk, P.B, Drzymala, J Contact angle of bubble with an immersed-in-water particle of different materials, Inter.Eng. Chem Res 50(2011) 4207-4211.

[6] Nutt, C.W.,. Froth flotation: the adhesion of solid particles to flat interfaces and bubbles. Chemical Engineering Science 12, 1960, 138–141.

[7] Schulze, H.J.,. New theoretical and experimental investigations on stability of bubble–particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of flotability. International Journal of Mineral Processing 4, 1977, 241–259.

[8] Schulze, H.J., Dimensionless number and approximate calculation of the upper particle size of floatbility in flotation machines. International Journal of

Mineral Processing 9, 1982, 321–328.

[9] Schulze, H.J.,. Physicochemical Elementary Processes in Flotation. Elsevier, Amsterdam. 1984.

[10] Schulze, H.J., Stoeckelhuber, W., Flotation as a heterocoagulation process. In:

Dobias, B., Stechemesser, H.-J. (Eds.), Coagulation and Flocculation. CRC Press. 2005.

[11] Trahar, W.J., A rational interpretation of the role of particle size in flotation. International Journal of Mineral Processing 8, 1981, 289–327.

[12] Ahmed, N., Jameson, G.J., The effect of bubble size on the rate of flotation of

fine particles. International Journal of Mineral Processing 14, 1985, 195–215.

[13] Jameson, G.J., Nam, S., Moo Young, M., Physical factors affecting recovery rates in flotation. Minerals Science and Engineering 9 (3), 1977, 103–118.

[14] Jameson, G.J., New directions in flotation machine design. Minerals

Engineering 23, 2010, 835–841.

[15] Jowett, A., Formation and disruption of particle–bubble aggregates in

flotation. In: Fine Particles Processing. American Institute of Minerals and.

Metallurgy Engineering, New York, 1980, pp. 720–754.

[16] Yoon, R.H., Luttrell, G.H., The effect of bubble size on fine particle flotation. In: Laskowski, J. (Ed.), Frothing and Flotation. Gordon & Breach, New York, 1989, pp. 101–122.

[17] Princen, H.M., Equilibrium shape of interfaces, drops, and bubbles. Rigid and

deformable particles at interfaces. Surface and Colloid Science 2, 1969, 1–84.

[18] Nguyen, A.V., New method and equations for determining attachment tenacity

and particle size limit in flotation. International Journal of Mineral Processing 68 (1–4), 2003, 167–182.

[19] Nguyen, A.V., Colloidal Science of Flotation. Marcel Dekker, New York. 2004.