

Simulasi Monitoring Proses Flotasi Kolom Menggunakan *Electrical Capacitance Volume Tomography*

Didied Haryono¹, Hermansyah Emir Faisal², Harisma Nugraha⁴, Mahfudz Al Huda⁵,

^{1,2}Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Indonesia

^{4,5}CNDTPI C-Tech Lab. PT Edwar Teknologi, Tangerang Indonesia

^a didied_har@yahoo.com ^b herman94syah@gmail.com

ABSTRAK

Flotasi merupakan proses pemisahan mineral berharga dari pengotornya berdasarkan sifat permukaan mineral yaitu sifat hidrofob dan hidrofil. Monitoring proses flotasi umumnya mengamati gelembung flotasi secara statis dan dinamis. Selama ini monitoring hanya mampu memonitor pada sumbu x-y. Untuk memonitoring pada sumbu x, y dan z digunakan teknologi tomografi yaitu *Electrical Capacitance Volume Tomography* (ECVT). Untuk melihat kemampuan sistem ECVT dalam memonitoring proses flotasi perlu dilakukan simulasi dari kedua proses tersebut dengan software komputasi *OpenFOAM*. Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk memodelkan kelompok gelembung yang terbentuk saat proses flotasi kolom, dan menentukan volume kelompok gelembung yang berada didalam kolom untuk pengembangan monitoring proses flotasi dengan ECVT. Tahapan pertama simulasi ini adalah melakukan studi literatur tentang simulasi CFD dan Simulasi ECVT untuk menentukan batasan simulasi. Tahap kedua yaitu melakukan simulasi CFD flotasi kolom dengan variabel; ukuran gelembung dan kecepatan injeksi udara atau laju alir udara. Tahap ketiga melakukan simulasi ECVT dengan objek gelembung statis dan tahap terakhir melakukan simulasi integrasi ECVT-CFD. Pada gelembung tiga, enam dan Sembilan layers didapatkan Distribusi permitivitas dari objek yang berada didalam sensor yang ditampilkan dalam bentuk peta warna. Pada daerah warna yang lebih cerah menandakan daerah gelembung. Dengan distribusi permitivitas relatif Daerah gelembung 3, 6 dan 9 layer berturut-turut 0,2584, 0,2563, dan 0,2495. Sedangkan daerah warna yang lebih gelap (merah) menandakan daerah air dengan distribusi permitivitas relatif adalah 1. Pada simulasi gelembung dinamis untuk memodelkan proses flotasi kolom dengan *OpenFOAM*. Diperoleh volume gelembung untuk setiap laju udara yang diberikan 3 liter/menit, 4 liter/menit dan 5 liter/menit yaitu 13.319 mm³, 15.733 mm³ dan 22.337 mm³. Jumlah gelembung hasil simulasi flotasi kolom pada laju alir udara 3,4 dan 5 liter/menit adalah 14,75%, 15,63% dan 19,34%. Sedangkan hasil eksperimen 14,06%, 15,23%, dan 18,55%. Berdasarkan hasil tersebut simulasi flotasi kolom yang dilakukan mampu menghasilkan gelembung dengan kondisi yang hampir sama dengan eksperimen.

Kata Kunci Flotasi, Komputasi *OpenFOAM*, simulasi ECVT-CFD, volume gelembung, Kelompok gelembung

PENDAHULUAN

Flotasi merupakan proses pemisahan mineral berharga dari pengotornya berdasarkan sifat permukaan mineral yaitu sifat hidrofob (tidak terbasahi) dan sifat hidrofil (terbasahi), kedua sifat ini dapat diperoleh dengan rekayasa kimia permukaan^[1]. Monitoring proses flotasi saat ini hanya mengamati gelembung flotasi pada kondisi statis dengan menggunakan *machine vision*^[2]. Monitoring dengan *machine vision* ini hanya mampu memonitor proses flotasi pada sumbu x-y (bidang horizontal) permukaan *froth*. Monitoring gelembung pada proses flotasi kolom diperlukan karena Ukuran dan distribusi gelembung pada pada proses flotasi kolom akan mempengaruhi performa metalurgi flotasi kolom. Karena Ukuran gelembung yang lebih kecil (0.5-3 mm)^[3] mampu meningkatkan efisiensi koleksi dari kolom, peningkatan efisiensi koleksi akan mengakibatkan peningkatan tumbukan dan penempelan partikel hidrofob terhadap gelembung. Untuk memonitoring proses flotasi kolom pada sumbu x, y dan z digunakan teknologi tomografi yaitu *Electrical Capacitance Volume Tomography* (ECVT). Monitoring gelembung pada proses flotasi kolom menggunakan teknik tomografi ECVT dilakukan dengan memanfaatkan sifat kapasitas listrik dari benda yang bersifat nonkonduktif. Pada ECVT terdapat pasangan sensor atau elektroda yang secara bergantian menghasilkan kapasitansi terukur yang dipengaruhi oleh distribusi permitivitas objek yang dimonitor^[4]. Untuk melihat kemampuan sistem ECVT dalam memonitor proses flotasi perlu dilakukan simulasi terlebih dahulu dengan *software* komputasi *OpenFOAM*.

Pada simulasi flotasi kolom dengan OpenFOAM terbentuknya Laju alir gelembung di dalam fluida karena adanya gelembung gas yang terlarut dialam aliran fluida dan memiliki kecepatan yang sama dengan fluida^[5]. Software OpenFOAM menyediakan komputasi FEM yang dapat menjalankan simulasi *multiphase flow* dan elektrostatis. Untuk simulasi *multiphase flow*, OpenFOAM memiliki program komputasi bernama *interFoam* yang diformulasikan dari persamaan *Navier-Stokes* dan *Newtonian Fluid*. Selain itu, *setFields* dan *mapFields utility* yang disediakan OpenFOAM sangat berguna dalam mengintegrasikan simulasi elektrostatis dari simulasi ECVT dengan simulasi CFD^[6]. Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk memodelkan kelompok gelembung yang terbentuk saat proses flotasi kolom, dan menentukan volume kelompok gelembung yang berada didalam kolom untuk pengembangan monitoring proses flotasi dengan ECVT.

METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tahapan-tahapan yang dilakukan pada proses simulasi. Tahapan pertama simulasi ini adalah melakukan studi literatur tentang simulasi CFD dan Simulasi ECVT untuk menentukan batasan simulasi. Simulasi monitoring flotasi kolom dengan ECVT menggunakan batasan simulasi yaitu dengan pendekatan simulasi dua fasa (*gas – cair*). fasa cair (*pulp*) pada simulasi ini menggunakan densitas campuran dan viskositas campuran dari partikel galena, air dan reagen yang dihitung menggunakan persamaan 2 dan 3.

$$\rho_l = \rho_a + \rho_{Ml} + \rho_p \quad (1)$$

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{C_w}{\rho_s} + \left[\frac{1 - C_w}{\rho_l} \right]} \quad (2)$$

$$\mu = 1 \times 10^{-6} (1 + 2.5(C)) \quad (3)$$

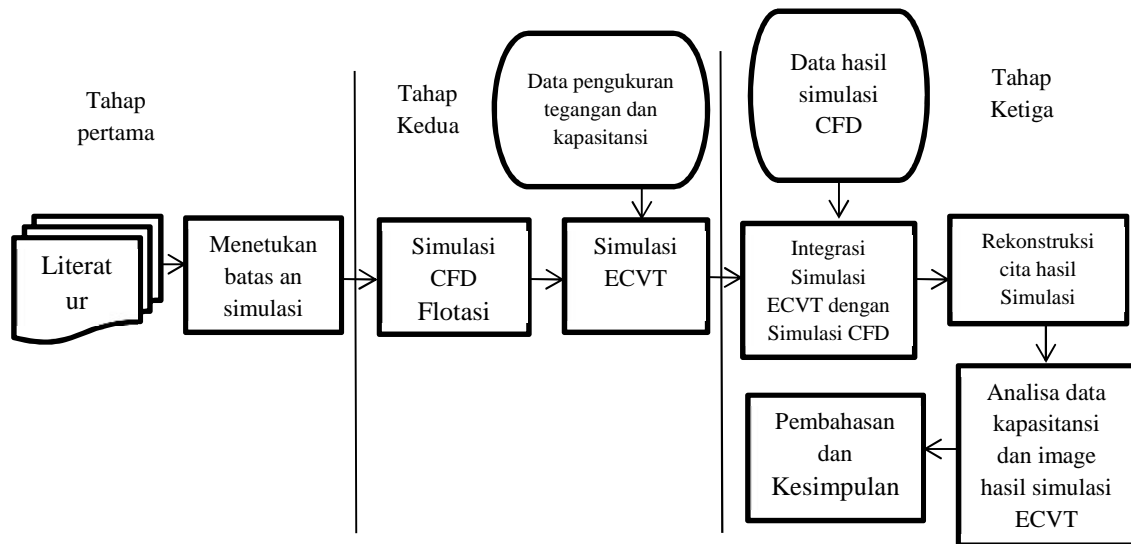
Keterangan ρ = densitas (Kg/m³), C_w = konsentrasi solid berdasarkan persen berat (%), μ = viskositas (Ns/m²), l = liquid, s = solid.

Tahap kedua yaitu melakukan simulasi CFD flotasi kolom dengan variabel ukuran gelembung dan kecepatan injeksi udara. Tahap ketiga melakukan simulasi ECVT dengan objek gelembung statis, pada tahapan ini diperlukan pengukuran tegangan bahan untuk mengetahui nilai permitivitas dari bahan yang digunakan seperti *pulp* dan udara. Untuk mengukur tengan bahan digunakan osiloskop 4 channel tipe TBS1066. Hasil pengukuran tegangan bahan digunakan untuk menghitung permitivitas relatif dengan menggunakan rumus

$$\varepsilon = \frac{v_b \ n_{uu}}{v_u} \quad (4)$$

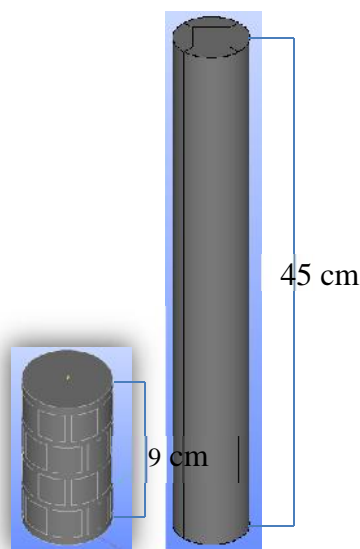
Keterangan v = tegangan (mV)

Tahapan-tahapan penelitian simulasi monitoring proses flotasi kolom dengan ECVT disajikan dalam bentuk diagram alir penelitian pada **gambar 1**. Proses simulasi monitoring flotasi kolom dengan ECVT menggunakan komputer sebagai perangkat utama dengan spesifikasi yaitu RAM 32 GB, *Graptic Card GTX*, *procesor Intel i7* generasi ke 2 dual processor, kapasitas hardisk internal 1.8 terabyte, OS windows 7 64 bit rangkaian tersebut standar simulasi yang mumpuni untuk simulasi menggunakan OpenFOAM serta dibutuhkan kabel RJ 45, kabel USB, dan Hardiks eksternal masing-masing digunakan untuk transfer data secara *online* maupun *offline* dan penyimpanan data secara eksternal.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Simulasi monitoring proses flotasi kolom dengan ECVT dilakukan dengan cara memodelkan kelompok gelembung pada kondisi statis dan kondisi dinamis. Dimensi sensor yang digunakan untuk memonitor proses flotasi memiliki diameter 5.4 cm dan tinggi 9 cm, sedangkan untuk ukuran elektroda tembaga berukuran 17 mm x 17 mm sebanyak 32 buah yang tersusun atas 4 layer, setiap layer memiliki 8 buah elektroda. *Boundary* simulasi sensor pada Bagian bawah, atas dan dinding diatur sebagai *zeroharge* serta *boundary* elektroda simulasi diatur sebagai *electrode*, tegangan yang diberikan pada masing-masing *boundary electrode* adalah 5 volt. Desain Kolom untuk simulasi flotasi kolom memiliki tinggi 45 cm jari-jari 2.7 cm. Kolom simulasi yang disimulasikan merupakan daerah *collection Zone* saja, tinggi *collection zone* kolom eksperimen ± 90 cm. Namun pada simulasi ini, tinggi kolom dibuat lebih kecil yaitu 45 cm atau dengan perbandingan skala 1:2 dari tinggi *collection Zone*.

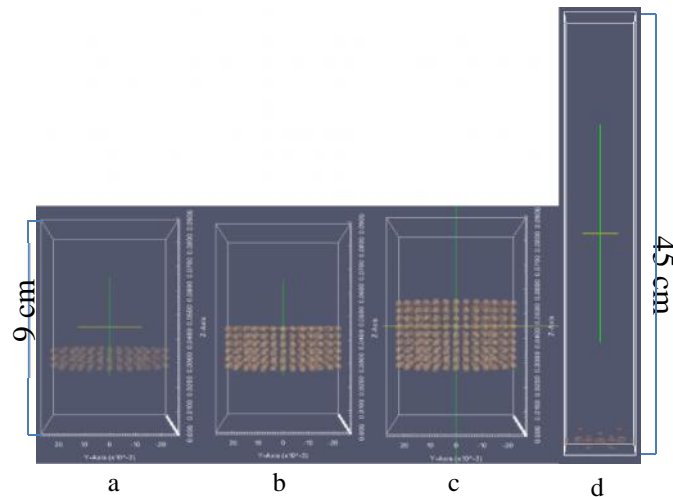


Gambar 3. Desain Sensor ECVT (Kiri) dan Kolom simulasi (kanan)

tinggi objek gelembung pada simulasi gelembung statis diatur pada ketinggian 2,7 cm dari bagian bawah *boundary* sensor. Jarak antara gelembung di dalam *boundary* sensor 0,35 milimeter. Sedangkan pada kondisi dinamis, gelembung awal ($t = 0$) diatur sebanyak satu layer saja. Untuk menjalankan proses CFD flotasi kolom dengan OpenFOAM, struktur *mesh* geometri perlu diperhatikan. Umumnya, struktur *mesh tetrahedral* lebih sering digunakan karena algoritma pembentukannya yang mudah dijalankan. Untuk *multiphase flow*, *mesh generation* yang sangat disarankan untuk digunakan adalah *hexahedral*. Struktur

hexahedral dapat menghasilkan struktur air yang terlihat lebih bagus dibandingkan struktur *mesh* yang lain walaupun jumlah mesh *hexahedral*-nya rendah. Struktur *mesh* ini memiliki keunggulan untuk membantu komputasi pergerakan fluida saat melewati permukaan tiap *mesh*-nya dan meningkatkan kecepatan kalkulasi^[7]

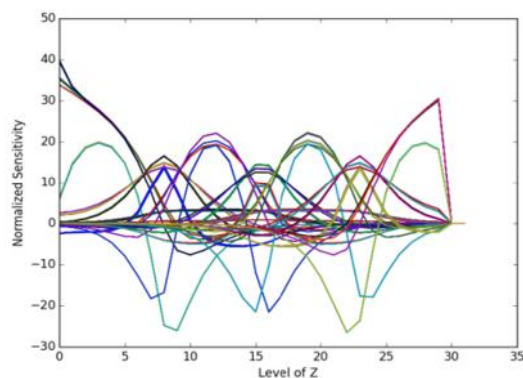
gelembung dinamis sistem dua fasa. Pada simulasi ini sifat fisik fluida dari masing-masing zat yang terlibat seperti densitas *pulp* 1280 Kg/m³, densitas udara 1 Kg/m³, viskositas *pulp* 1,083e-06 Pascal/m² dan viskositas udara 1e-06 digunakan untuk mendapatkan *transport Model* fluida yang menyerupai kondisi eksperimen. Sifat fisik fluida yang digunakan seperti densitas dan viskositas pada simulasi ini merupakan hasil perhitungan dari Reagen seperti *Metil Isobutil Carbino* (MBIC) 15 ppm, *Pottasium Amyl Xanthate* 0,25 kg/ton dan *soda ash* (*sodium carbonat*) 0,87 Kg/ton serta bijih dengan persen padatan 5%. Selain itu digunakan variasi laju alir udara 3, 4 dan 5 liter/menit, serta tegangan antara *liquid-gas* (*Sigma*) yang digunakan 0,7.



Gambar 4. Pengaturan objek gelembung statis didalam *boundary* sensor ECVT dengan variasi jumlah *layer* atau lapisan gelembung (a) tiga layer, (b) enam layer, (c) sembilan layer untuk simulasi sensor ECVT pertama, kedua dan ketiga. (d) Pengaturan gelembung dinamis.

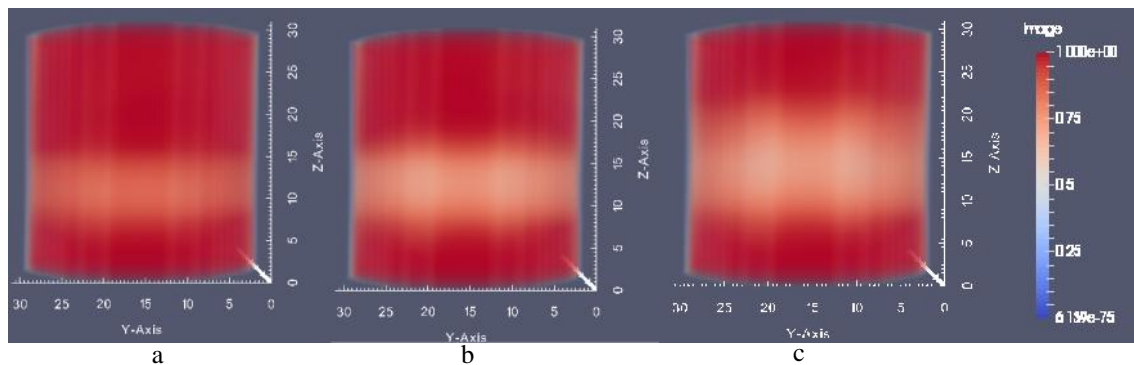
HASIL DAN PEMBAHASAN

.Hasil simulasi ECVT dengan objek gelembung statis diperoleh kurva sensitivitas dari sensor yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik matriks sensitivitas 32 *channel* hubungan antara *Normalized sensitivity* dengan posisinya terhadap sumbu axial z, grafik ini digunakan untuk menentukan daerah sensor yang paling sensitif.

Rekonstruksi objek secara tiga dimensi menggunakan ECVT membutuhkan matrik sensitivitas dengan variasi tiga dimensi, khususnya pada arah axial (sumbu $-z$) untuk membedakan kedalaman dari panjang sensor. Variasi sensitivitas yang diambil dari pasangan elektroda yang tersusun sepanjang dinding sensor menghasilkan matriks sensitivitas ternormalisasi 32 voksel pada sumbu z . Oleh karena itu, sumbu z pada **Gambar 5** digunakan untuk menentukan daerah yang paling sensitif pada sensor dan daerah yang tidak sensitive pada sensor (*dead zone*). Pada simulasi ini panjang sensor pada sumbu x dan y adalah 54 cm dan sumbu z adalah 90 cm dengan resolusi yang digunakan adalah $32 \times 32 \times 32$. Daerah yang sensitif pada sensor berdasarkan Gambar 5 adalah pada sumbu z ke 8 hingga 22 karena memiliki garis sensitivitas ternormalisasi lebih bervariasi. Jika dikonversikan ke satuan panjang yaitu dengan membagi tinggi sensor dengan resolusi 32 maka ketinggian dari daerah sensor yang paling sensitif yaitu pada 2.28 cm hingga 6.26 cm.

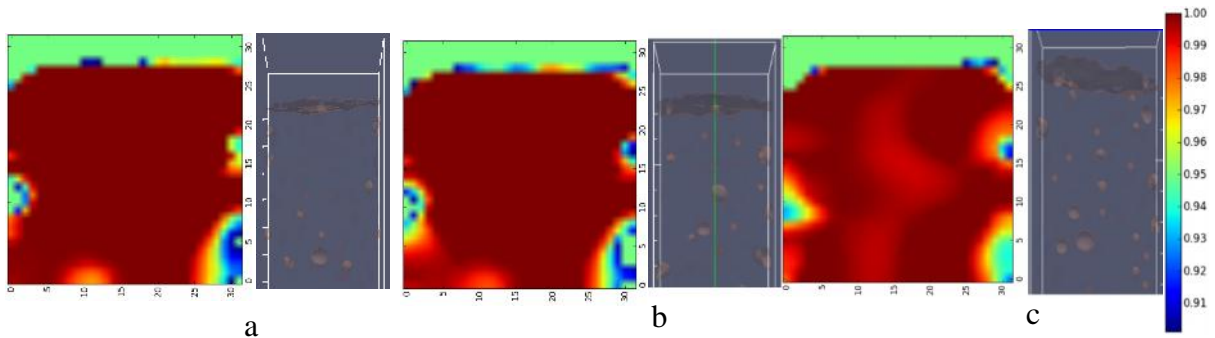


Gambar 6. Hasil rekonstruksi citra monitoring gelembung statis (a) gelembung tiga layer (b) gelembung enam layer (c) gelembung Sembilan layer

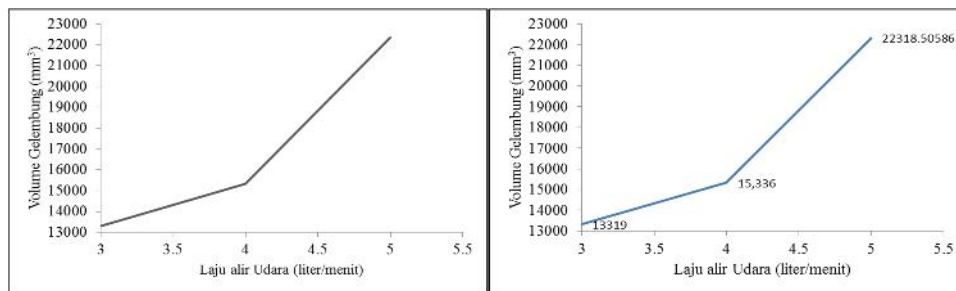
Gambar 6 merupakan hasil rekonstruksi tiga dimensi dengan metode *Iterative linier Back Projection (ILBP)*, metode rekonstruksi citra dengan ILBP menghasilkan gambar rekosntruksi yang *blurred*^[9], Namun objek gelembung statis yang dimonitor dapat dibedakan berdasarkan perbedaan nilai permitivitas yang ditampilkan dalam bentuk peta warna. Pada daerah warna yang lebih cerah menandakan daerah objek gelembung, sedangkan daerah warna yang lebih gelap (merah) menandakan daerah *pulp*. Nilai permitivitas rata-rata untuk gelembung 3, 6 dan 9 layer berturut-turut 0,2584, 0,2563, dan 0,2495. Pada Gambar 7 gelembung hasil simulasi flotasi kolom bergerak dari bawah kolom menuju ke permukaan kolom karena adanya perbedaan densitas antara fasa *gas* (gelembung udara) dengan fasa *liquid (pulp)* gerakan gelembung di dalam *pulp* mengikuti persamaan *Newtonian fluid* dan *Navier-stokes*^[10]. Gerakan gelembung di dalam kolom eksperimen dipengaruhi oleh kecepatan naik gelembung saat ditiupkan udara dari kompresor^{[11][12]}, semakin besar laju udara yang diberikan maka kecepatan naik gelembung semakin besar, dan gerakan gelembung menjadi *spirall*. Sedangkan bentuk gelembung yang naik ke permukaan dipengaruhi oleh penggunaan frother di dalam proses flotasi kolom^{[13][14]} seperti ditunjukkan pada Gambar 7 (kanan). Simulasi Monitoring gelembung hasil flotasi kolom dengan ECVT dihasilkan citra dua dimensi dari daerah gelembung yang berada di dalam *pulp*. Daerah yang lebih cerah merupakan daerah gelembung sedangkan daerah yang berwarna merah gelap adalah *pulp*.

Gelembung yang berada di dalam sensor dapat dihitung volume dan jumlahnya. Grafik perhitungan volume gelembung hasil simulasi flotasi kolom dan hasil monitoring gelembung pada simulasi flotasi kolom dengan ECVT ditunjukkan pada Gambar 8. Volume gelembung pada laju alir udara 3, 4 dan 5 liter/menit yaitu 13.319, 15.7337 dan 22.337 mm³. Pada Gambar 8 volume gelembung meningkat seiring meningkatnya laju udara yang diberikan kepada kolom. Peningkatan volume gelembung terjadi karena meningkatnya produksi gelembung di dalam kolom. Semakin besar volume dan fraksi gelembung di dalam kolom maka efisiensi pemisahan mineral akan semakin baik, pada simulasi ini volume dan fraksi gelembung paling tinggi terjadi pada laju alir udara 5 liter/menit. Besar fraksi gelembung (jumlah gelembung) di dalam kolom ditunjukkan pada Gambar 9. Dengan jumlah gelembung pada laju alir udara 3,4 dan 5 liter/menit yaitu 14,75%, 15,63% dan 19,34%. Sedangkan hasil eksperimen 14,06%, 15,23%, dan 18,55%. Pada Gambar 9 pada laju alir udara 5

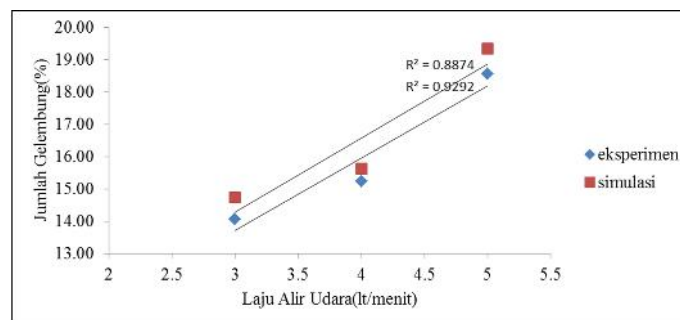
liter/menit diperoleh fraksi gelembung terbesar diperoleh pada laju alir udara 5 liter/menit. Berdasarkan hasil tersebut pada laju alir udara 5 liter/menit gelembung yang dihasilkan akan meningkatkan efisiensi proses flotasi kolom.



Gambar 7. Gelembung hasil simulasi flotasi kolom (kanan) yang diambil pada bagian atas kolom dan Hasil rekonstruksi citra tiga dimensi gelembung pada simulasi monitoring flotasi kolom dengan ECVT pada laju alir udara 3 liter/menit (a), 4 liter/menit (b) dan 5 liter/menit (c).



Gambar 8. Grafik perhitungan volume gelembung hasil simulasi flotasi kolom (kiri) dan hasil monitoring gelembung pada simulasi flotasi kolom dengan ECVT (kanan).



Gambar 9. Perbandingan jumlah gelembung hasil simulasi flotasi kolom dengan eksperimen flotasi kolom.

Perbedaan jumlah gelembung hasil simulasi dengan eksperimen disebabkan karena perbedaan kondisi simulasi yang dihasilkan. Meskipun variabel operasi yang digunakan sama dengan eksperimen namun ada beberapa kondisi berbeda yang dihasilkan seperti tekanan kolom, sifat fisik fluida di dalam kolom. tekanan kolom simulasi cenderung stabil sedangkan tekanan kolom eksperimen sangat dipengaruhi oleh tekanan dari kompresor sehingga cenderung tidak stabil. Sifat fisik fluida di dalam kolom simulasi dengan eksperimen diperlukan pengukuran dengan alat tertentu agar diperoleh sifat fisik fluida yang sama.

KESIMPULAN

Hasil Simulasi monitoring gelembung kondisi statis yang telah dilakukan menunjukkan bahwa sistem ECVT yang digunakan mampu memonitor objek gelembung yang disusun menjadi 3,6 dan 9 layer dengan ukuran

gelembung 1,5 milimeter. Sedangkan pada simulasi flotasi kolom dengan pendekatan variabel operasi flotasi kolom yaitu laju udara, sifat fisik, dan tekanan diperoleh kondisi gelembung yang hampir sama dengan kondisi eksperimen hal ini dibuktikan dengan jumlah gelembung yang hampir sama antara simulasi dengan eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yianatos, IB. *Column Flotation Modelling And Technology*. Chemical Engineering Department University Of Santa Maria Valpara.So, Chile
- [2] Aldrich C., Marais C., Shean B.J., Cilliers J.J. *Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision : A review*. International Journal of Mineral Processing 96 (2010) 1–13
- [3] Sastri, K.V.S. and Fuerstenau, D.W., 1970. *Theoretical Analysis of a Countercurrent Flotation Column*, *Trans. SME-AIME*, 247,46-52.
- [4] Warsito Warsito, *Member IEEE.*, Marashdeh Qussai, *Member, IEEE.*, Liang-Shih Fan., 200. *Electrical Capacitance Volumetric Tomography*. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 7, NO. 4, APRIL 2007
- [5] Banasiak, Robert etall“Study on two-phase flow regime visualization and identification using 3D electrical capacitance tomography and fuzzy-logic classification”.International Journal of Multiphase Flow 58 (2014) 1–14.
- [6] Yusuf Fakhri M., Nursetia Panji., Handoko Dwi. *Komputasi Integrasi CFD-ECVT dengan OpenFOAM untuk Pengujian RekonstruksiCitra Large Scale ECVT dan Komputasi Velocimetry*. Center for High Performance Computing, CTECH Labs EDWAR Technology
- [7] Morgan G., 2013 “InterFoam VoF Code to Coastal Wave or Structure Interaction” PhD Thesis, University of Bath, United Kingdom.
- [8] Nugraha, Harisma.2012.”aplikasi ECVT pada penentuan Laju dan Koefisien Proses Leaching Tembaga dengan Asam Sulfat sebagai Leaching AGENT”.Skripsi.UNTIRTA
- [9] Justin M Weber., Ky J. Layfield., Dirk T Van Essendedeflt., Joseph S Mei., “Fluid bed characterization using Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT), compared to CFPD Software's Barracuda” *Powder Technology* 250 138–146, 2013
- [10] Herreras N. & Izzara J., 2013 “Two-Phase pipeflow simulations with OpenFoam” Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [11] Kulkarni, A.A., Joshi, J.B., 2005. “Bubble formation and bubble rise velocity in gas–liquid systems: a review. *Industrial and Chemical Engineering Research* 44”, 5873–5931.
- [12] W. Kracht, J.A. Finch,” Effect of frother on initial bubble shape and velocity”, *International Journal of Mineral Processing* 94 (2010) 115–120
- [13] Dobby, G.S. and Finch, J. A., 1990. *Coloumn Flotation*. Pegamon Press Pages 27-35 dan 50-51
- [14] Frumkin, A., Levich, V.G., 1947. “On surfactants and interfacial motion. *Zh. Fizicheskoi Khimii* 21”, 1183–1204