

Simulation of Gas-Solid-Liquid Flow in Membrane Bioreactor Submerged

A. E. Palupi¹, A. H. Harahap¹, A. D. Meydita, S¹. Winardi, dan A. Altway²

Abstract—Hydrodynamics characteristic for the mixing of gas-solid-liquid in membrane bioreactor submerged (MBRs) and its influence on mass transfer was studied computationally at various solid concentration, incoming gas rate, and the baffle distance. Computational method was conducted by using software GAMBIT 2.1.6. for the making of the grid which represents the calculation domain and conduct the simulation using CFD software FLUENT commercial code 6.2.16. The calculation result was recorded after the iteration reach the certain convergence level. Multiphase flow in reactor was simulated with mixture model, while to model the turbulence characteristic of the flow standard k- ϵ model was used. The geometric system studied is bioreactor in the form of box with flat bottom, 2 baffles, submerged hollow fiber membrane and air passage at the bottom of the reactor. For the membrane modeling, it is used two approaches that is membrane as black box and membrane as porous media. The liquid used is water, and the solid is activated sludge, and air acts as gas phase. The result indicates that gas-solid-liquid system with the nearest baffle location from the membrane cause, the liquid dispersion process goes faster, so that fluid in the tank can be mixed perfectly and it can increase the gas-liquid mass transfer rate and the flux at MBRs. The increase of the solid concentration does not significantly affect the change of gas-liquid mass transfer rate and flux through the membrane, but the increase of air flow rate can increase the gas-liquid mass transfer and the flux. Porous media approach give the prediction of the gas hold up distribution more over all than black box approach. The position of baffle 9 cm from tank wall is the best position viewed from the balance between the of air flow with the circulating fluid flow. Considered from the solid distribution, double inlet MBRs is better compared to that of single inlet. Flux obtained does not show significant difference. From both approaches of the membrane model, membrane model as porous media give the simulation results closer to the experimental data.

Keywords—MBRs, Hydrodynamic, Simulation CFD, Gas-solid-liquid

I. PENDAHULUAN

Pengolahan limbah cair domestik konvensional dengan menggunakan lumpur aktif membutuhkan waktu yang lama dan lahan yang luas. Kualitas efluen sangat tergantung pada kondisi hidrodinamik dalam bak sedimentasi dan karakteristik pengendapan lumpur. Untuk memperoleh pemisahan lumpur dari cairan dengan sempurna, diperlukan tangki yang besar dan waktu yang lama untuk proses sedimentasi. Konsentrasi biomassa pada lumpur aktif yang cukup tinggi dapat menyebabkan pemisahan

biomassa dari efluen semakin sulit dilakukan karena kecepatan pengendapan lumpur menjadi rendah [1].

Beberapa kelemahan pada proses pengolahan limbah yang demikian, tidak berlaku bagi proses pengolahan limbah dengan menggunakan bioreaktor membran (BRM). Yamato [2] merupakan orang pertama yang meneliti tentang pemisahan langsung padatan dan cairan dengan menggunakan bioreaktor membran terendam (BRMt) *hollow fiber*. Dalam metode ini, membran direndam dalam sebuah bioreaktor yang dilengkapi dengan difuser di bagian bawahnya yang berfungsi sebagai penghasil gelembung udara untuk aerasi selain juga untuk membersihkan membran. Permeat dihisap melalui pompa dari modul membran, sehingga sistem bekerja pada tekanan vakum. Umpan masuk ke dalam membran menghasilkan aliran *dead-end* secara intermitten pada tekanan operasi yang rendah tanpa pencucian dan dapat mengurangi *fouling*. Penelitian lain menunjukkan adanya perbedaan dari segi biologis antara proses lumpur aktif konvensional dengan BRMt. Michal Bodzek [3], juga telah melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja BRMt dan lumpur aktif dengan menggunakan membran tubular ultrafiltrasi dari bahan *polyacrylonitril* (PAN) sebagai pemisah padatan pada proses lumpur aktif. Hasilnya, memberikan persen penyisihan COD yang lebih tinggi pada pengolahan limbah dengan BRMt daripada hanya dengan lumpur aktif. Sedangkan ditinjau dari persen penyisihan suspended solidnya, pada BRMt dapat mencapai 100%. Selain itu pada penelitian di referensi [1], juga membuktikan adanya perubahan pada struktur lumpur aktif di BRMt bahkan pada kondisi influen konstan dalam jangka waktu yang panjang. Flok yang umum dijumpai pada proses lumpur aktif konvensional tidak ditemukan pada BRMt ini dan pemisahan biomassa dari efluen dapat menghasilkan kualitas efluen yang tinggi.

Beberapa hasil penelitian di atas, menunjukkan bahwa BRMt mempunyai banyak keuntungan untuk proses pengolahan limbah cair, didukung dengan kombinasi proses lumpur aktif. Namun demikian, sebagian besar masih dilakukan secara eksperimental sehingga belum dapat mengetahui pola aliran yang terjadi di dalam reaktor khususnya di sekitar membran. Penelitian ini mempelajari pengaruh karakteristik hidrodinamika pada berbagai konsentrasi solid, kecepatan aliran udara masuk dan jarak bafel serta pengaruhnya terhadap transfer massa gas-liquid pada sistem tiga fase gas-solid-liquid (G-S-L) untuk sistem udara, air, dan lumpur aktif dalam bioreaktor membran terendam *hollow fiber*.

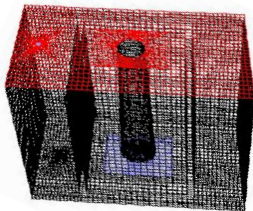
Naskah diterima 1 Desember 2006; selesai revisi pada Agustus 2007

¹ A.E. Palupi, A. H. Harahap, A. D. Meydita, S. Winardi, dan A. Altway adalah mahasiswa S-3 Jurusan Teknik Kimia, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA (email: mixing@chemeng.its.ac.id)

² A. Altway adalah dosen Jurusan Teknik Kimia, FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, INDONESIA.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat simulasi (pemodelan) hidrodinamika aliran multifasa antara lumpur aktif, air, dan udara berdasarkan pada aktivitas biomassa dalam lumpur aktif, unjuk kerja BRMt, dan permasalahannya. Sistem yang dipelajari adalah bioreaktor dengan volume 12 liter, berdasar datar dengan ukuran 30 x 17,5 x 23 cm dengan 2 buah bafel dengan tebal 0,5 cm dan tinggi 18 cm yang dipasang vertikal pada sisi antara dinding dan membran. Jenis membran yang digunakan adalah *hollow fiber*, konfigurasi *capillary type*, bahan polyacrylonitrile, diameter pori 0,1-0,01 μ , dengan ukuran dimensi ID = 0,5 mm; OD = 1 mm, dan luasnya 0,80 m². Tangki diisi dengan air dan lumpur aktif dengan konsentrasi biomassa (MLSS) 2500, 5000, 7500, dan 10.000 ppm. Udara dimasukkan dari dasar tangki melalui difuser dengan kecepatan 5, 8, 10, dan 12 l/menit. Jarak bafel adalah 7, 8, 9, dan 10 cm diukur dari dinding tangki. Langkah pertama dalam tahap penelitian ini adalah mempelajari geometri BRMt dengan membuat gridnya yang merupakan domain perhitungan dengan menggunakan software GAMBIT 2.1.6. Jumlah grid yang dibentuk adalah ± 75000 . Hasil grid yang diperoleh diekspor ke software CFD FLUENT 6.2.16., [4] untuk dilakukan simulasi dengan tingkat konvergensi 10⁻³ pada semua persamaan. Aliran multifase dalam BRMt disimulasikan dengan *mixture model*, sedangkan untuk karakteristik aliran turbulen digunakan standar *k- ϵ* model [5]. Untuk pemodelan membran digunakan dua pendekatan yaitu membran sebagai *black box* dan membran sebagai *porous media*.



Gambar 1. Grid BRMt yang digunakan untuk simulasi

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menitik beratkan pada distribusi kecepatan dan pola sirkulasi aliran fluida, transfer massa gas-liquid, serta pengaruh kecepatan laju udara, letak bafel, dan konsentrasi solid terhadap besarnya fluks dihasilkan dengan membran sebagai *black box* dan *porous media* pada tangki BRMt *double inlet*.

A. Distribusi kecepatan aliran fluida

Distribusi kecepatan aliran fluida pada BRMt antara membran sebagai *black box* dan *porous media* ditunjukkan oleh Gambar 2. Sistem dengan membran sebagai *black box*, membran berada tepat di tengah tangki dengan diameter atas 3,5 cm dan diameter bawah 5 cm, sedangkan sebagai *porous media*, diameter membran atas dan bawah dianggap sama (3,5 cm).

Aliran fluida masuk langsung terdissipasi dengan fluida dalam tangki, hal ini ditunjukkan dengan kecepatan fluida turun drastis di sekitar aliran masuk. Pada tangki dengan membran sebagai *black box* banyak dijumpai stagnansi di

sekitar pipa masuk, bafel, dan bagian bawah tangki dibandingkan dengan membran sebagai *porous media*. Hal ini disebabkan aliran fluida yang masuk lebih cepat terdispersi.

B. Pola Sirkulasi Aliran Fluida

Vektor kecepatan aliran fluida ditunjukkan pada Gambar 3 dimana aliran fluida masuk melalui pipa menuju ke bawah dan berbelok melalui bagian bawah bafel menuju ke daerah di sekitar membran, ke atas dan sebaliknya arah melalui atas bafel. Medan aliran yang terjadi adalah aliran axial, sesuai dengan letak bafel yang melintang.

Aliran fluida senantiasa bersirkulasi memutar bafel selama ada laju udara, sesuai fungsi bafel yaitu untuk menciptakan sirkulasi antara dinding reaktor dan membran. Aliran fluida ke atas di sekitar membran, memberikan tegangan geser (*shear rate*) pada permukaan membran, dimana hal ini merupakan faktor penting yang sangat mempengaruhi fluks dan *fouling*. Kecepatan geser (*shear rate*) yang tinggi pada permukaan membran cenderung melepaskan tumpukan material dan menurunkan tahanan hidrolis dari lapisan *fouling*. Metoda yang umum untuk membangkitkan kecepatan geser maupun turbulensi yang tinggi diperlukan untuk memperkecil lapisan *fouling* adalah dengan menaikkan kecepatan fluida, kecepatan resirkulasi maupun memperkecil ukuran saluran dari aliran fluida. Vektor aliran fluida yang terjadi pada BRMt dengan membran sebagai *black box* dan *porous media* menunjukkan hal sama. Namun pada BRMt dengan membran sebagai *black box* terjadi aliran balik di sekitar pipa masuk. Hal ini karena daerah di sekitar membran sangat kecil yang menyebabkan aliran fluida tidak bebas mengalir ke sekitar membran dan menyebabkan arus balik di dinding bafel bagian luar, dan juga disebabkan oleh pengaruh aliran fluida masuk dari sisi yang lain.

C. Dispersi Gas

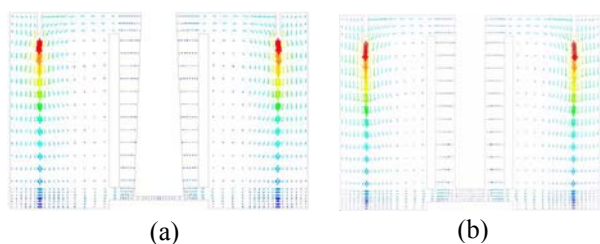
Pengaruh kecepatan laju alir udara terhadap dispersi gas di dalam tangki ditunjukkan oleh Gambar 4. Dispersi gas terjadi di antara membran dan bafel karena udara mengalir dari difuser dan cenderung menuju ke permukaan. Semakin besar laju udara, semakin besar pula dispersi gas yang terjadi terutama di daerah dinding tangki karena tidak terpengaruh oleh laju alir fluida masuk. Terdapat gelembung udara yang ikut berbalik melalui atas bafel, tetapi jumlahnya sangat sedikit sehingga tidak terlihat pada kontur ini.

Daerah pertemuan antara arus fluida dengan udara yang terjadi di sekitar membran sebagai *black box* sangat sempit sehingga terjadi tumbukan di bagian bawah bafel. Pada membran sebagai *porous media* tidak terjadi demikian, melainkan udara mengalir di sepanjang dinding bafel. Laju alir fluida masuk berpengaruh pada konsentrasi udara di kedua dinding bafel. Dispersi gas pada membran sebagai *porous media* hanya terjadi di antara membran dan bafel karena udara dari sparger cenderung mengalir ke permukaan. Semakin besar laju udara, semakin besar pula dispersi gas yang terjadi di dalam tangki.

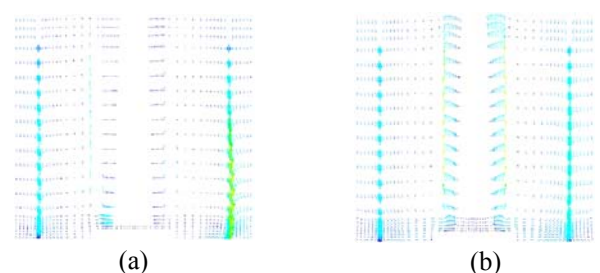
Posisi bafel sangat berpengaruh terhadap dispersi gas dalam tangki. Semakin jauh letak bafel dari membran semakin menurun dispersi gas dalam tangki. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 5, dimana aliran udara yang keluar dari sparger langsung terdorong oleh aliran fluida dari sisi pipa masuk. Aliran fluida masuk mempunyai kecepatan alir yang lebih tinggi pada posisi bafel dekat dengan dinding tangki, karena luas daerah di sekitar pipa masuk lebih kecil dibandingkan posisi bafel yang lain.

Posisi bafel sangat berpengaruh terhadap dispersi gas dalam tangki. Semakin jauh letak bafel dari membran semakin menurun dispersi gas dalam tangki. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 5, dimana aliran udara yang keluar dari sparger langsung terdorong oleh aliran fluida dari sisi pipa masuk. Aliran fluida masuk mempunyai kecepatan alir yang lebih tinggi pada posisi bafel dekat dengan dinding tangki, karena luas daerah di sekitar pipa masuk lebih kecil dibandingkan posisi bafel yang lain.

Fluida yang masuk di sekitar sparger dan membran, mendorong aliran udara yang keluar dari sparger sehingga terjadi akumulasi di daerah tersebut. Namun hal tersebut tidak berarti bahwa udara tidak keluar menuju permukaan tangki, melainkan terdissipasi ke seluruh tangki dan tetap keluar menuju permukaan. Dispersi gas yang paling baik menurut hasil simulasi ditunjukkan pada posisi bafel 9 cm dari dinding tangki. Hal ini ditunjukkan oleh jumlah udara yang mengalir seimbang dengan aliran fluida yang bersirkulasi di daerah sekitar membran.



Gambar 2. Distribusi kecepatan aliran fluida masuk (a) membran sebagai *black box*, dan (b) membran sebagai *porous media*.

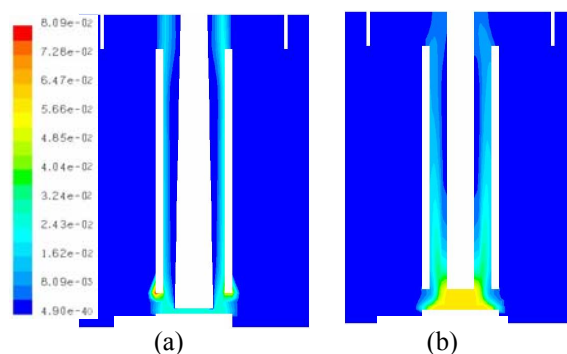


Gambar 3. Pola sirkulasi aliran fluida masuk (a) membran sebagai *black box* (b) membran sebagai *porous media*.

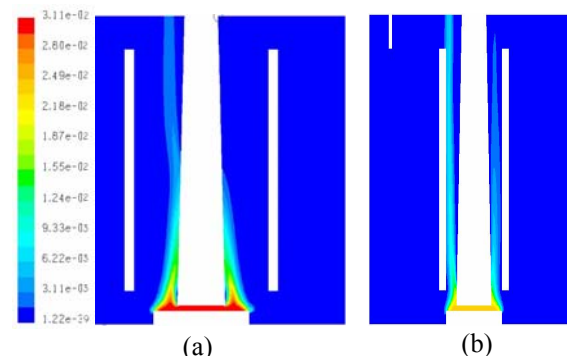
D. Distribusi solid

Pada tangki BRMt *single inlet* distribusi solid cenderung berada di dasar tangki dan sisi tangki yang tidak terdapat aliran fluida masuk. Penumpukan konsentrasi solid juga terbentuk. Hal ini karena pada aliran fluida masuk tidak cukup kuat untuk menyapu seluruh solid, sehingga masih ada pengendapan di dasar tangki. Sirkulasi aliran tidak cukup besar untuk membawa solid di lokasi antara baffle dan dinding tangki sebelah kanan, sehingga solid cenderung menempel di sekitar bafel.

Pada tangki *double inlet* konsentrasi solid cenderung merata di seluruh tangki. Perbedaan yang paling mendasar terletak pada konsentrasi solid di sekitar membran, yaitu tidak sebanyak pada tangki *single inlet*. Hal ini disebabkan pada tangki *double inlet*, aliran fluida masuk dari dua sisi sehingga sirkulasi yang terjadi merata dan solid yang menempel pada membran pun dapat berkurang akibat aliran fluida tersebut. Semakin sedikit kecenderungan solid yang menempel di membran, mengidentifikasi besarnya fluks yang dihasilkan, karena fluida yang melewati membran tidak terhalang oleh solid yang menempel.



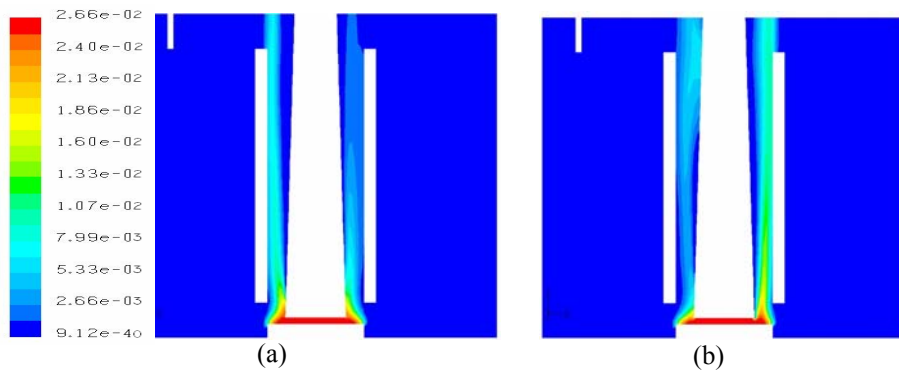
Gambar 4. Dispersi gas pada BRMt *double inlet*, kecepatan laju udara 12 l/mnt (a) membran sebagai *black box*, dan (b) membran sebagai *porous media*



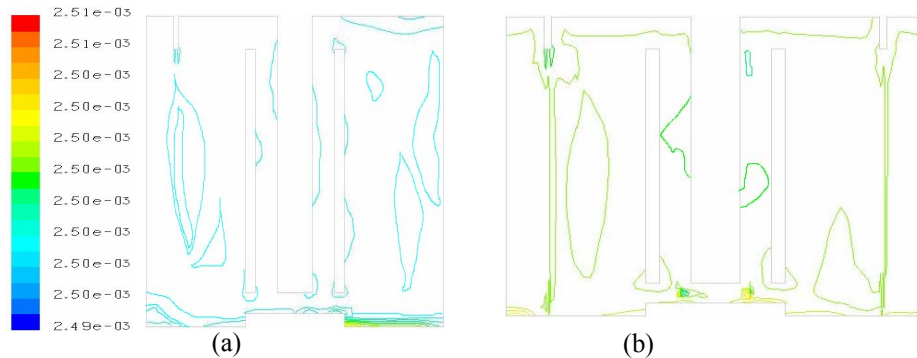
Gambar 5. Dispersi gas BRMt *single inlet* dengan membran sebagai *porous media*, (a) posisi bafel 7 cm, dan (b) posisi bafel 10 cm dari dinding tangki

Hasil analisa secara eksperimen, menunjukkan bahwa solid yang berada di dalam tangki yang berupa lumpur aktif yang berperan untuk mendegradasi limbah (fluida) yang dimasukkan di dalam tangki, mampu menurunkan nilai COD dari limbah tersebut. Sehingga dapat dikatakan terjadi perpindahan massa antara limbah dengan lumpur aktif (solid). Sedangkan pada analisis secara simulasi, solid ditetapkan sebagai inert, dimana tidak terjadi reaksi antara solid dengan fluida maupun gas, karena tujuan dari tahap analisa secara simulasi ini hanya mengetahui pola aliran fluida dalam tangki dan distribusi solid serta pengaruhnya terhadap pola aliran fluida tersebut.

Perubahan konsentrasi solid tidak terlalu berpengaruh pada dispersi gas. Simulasi pada bagian ini dilakukan pada BRMt dengan membran sebagai *black box*, seperti pada Gambar 6. Pada tiap titik di dalam tangki memiliki nilai yang tidak terlalu jauh, karena pada kecepatan laju alir udara yang rendah dan tinggi, distribusi solid dan gas merata hampir di seluruh bagian tangki.



Gambar 6. Dispersi gas BRMt *single inlet* dengan membran sebagai *black box*, (a) konsentrasi solid 2500 mg/l, (b) konsentrasi solid 10000 mg/l



Gambar 7. Distribusi solid pada BRMt konsentrasi solid 2500 mg/l, (a) *single inlet*; dan (b) *double inlet*

E. Laju transfer massa Gas-Liquid

Kenaikan kecepatan laju udara, menyebabkan terjadi kenaikan energi dissipasi dan transfer massa gas-liquid di setiap titik pada BRMt. Selain itu, kenaikan laju udara juga menyebabkan perubahan diameter gelembung udara menjadi lebih besar dari rata-rata. Hal ini dapat dilihat dari penjabaran *Stoke's Law* pada persamaan berikut, dimana *bubble rise velocity* disamakan dengan *superficial velocity*.

$$U_i = \frac{d_b^2 (\rho - \rho_b) g}{18 \mu} \quad (1)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa *bubble rise velocity* berbanding lurus dengan diameter gelembung yang berarti bahwa dengan bertambahnya laju udara, maka diameter gelembung yang dihasilkan juga bertambah besar. Semakin besar laju udara yang diberikan, semakin besar pula harga k_L (Gambar 8), baik pada *single inlet* maupun *double inlet*.

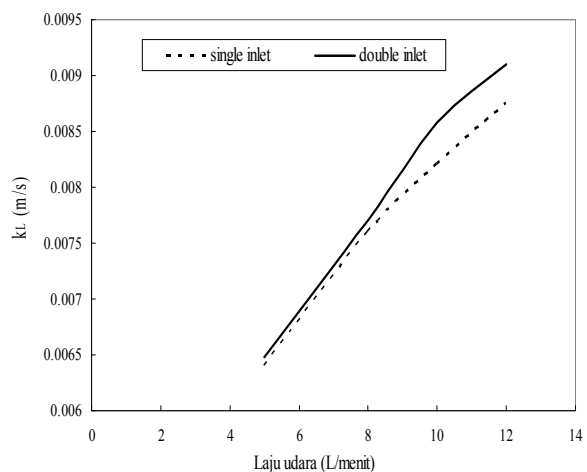
Hasil simulasi pada tangki dengan membran sebagai *black box* (Gambar 9) menunjukkan letak bafel mempengaruhi harga k_L . Untuk jarak bafel hingga 9 cm dari dinding tangki harga k_L semakin tinggi, namun demikian harga k_L menjadi turun saat letak bafel 10 cm dari dinding tangki atau jarak bafel yang paling dekat dengan membran. Hal ini menunjukkan bahwa semakin sempitnya ruangan di sekitar membran karena dibatasi oleh bafel dan adanya pengaruh laju udara di lokasi tersebut, maka laju transfer massa gas-liquid (k_L) menjadi semakin kecil.

Ditinjau dari pengaruh kenaikan konsentrasi solid (MLSS) yang dianggap sebagai solid inert (Gambar 10), hasil simulasi pada membran sebagai *black box*, menunjukkan bahwa terjadi penurunan laju transfer

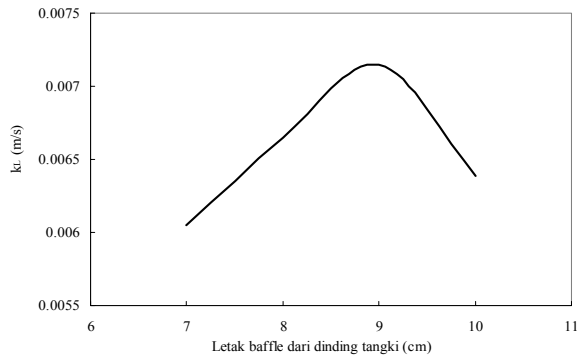
massa gas-liquid. Hal ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa kenaikan konsentrasi solid inert dapat menurunkan koefisien laju transfer massa gas-liquid (k_L).

F. Fluks yang dihasilkan

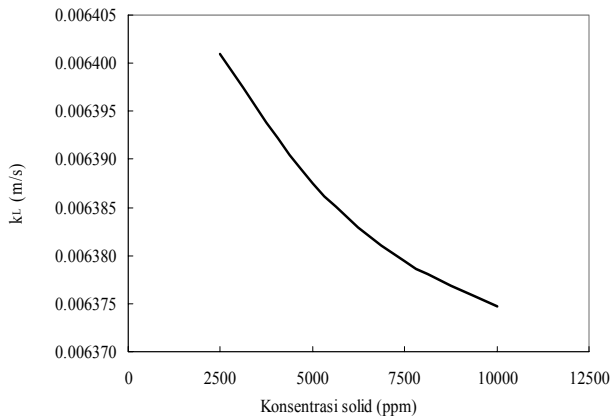
Kenaikan laju udara secara signifikan dapat meningkatkan fluks melalui membran. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 11, dimana pada BRMt *single inlet* dan *double inlet* tidak jauh berbeda, pada membran sebagai *porous media*. Begitu pula dengan hasil yang diperoleh pada membran sebagai *black box* tidak jauh berbeda dengan membran sebagai *porous media*.



Gambar 8. Hubungan laju transfer massa gas-liquid (k_L) dengan perubahan laju udara pada BRMt dengan membran sebagai *porous media*



Gambar 9. Hubungan laju transfer massa gas-liquid (k_L) dengan perubahan letak bafel dari dinding tangki pada BRMt dengan membran sebagai *black box*.



Gambar 10. Hubungan laju transfer massa gas-liquid (k_L) dengan perubahan konsentrasi solid dengan membran sebagai *black box*

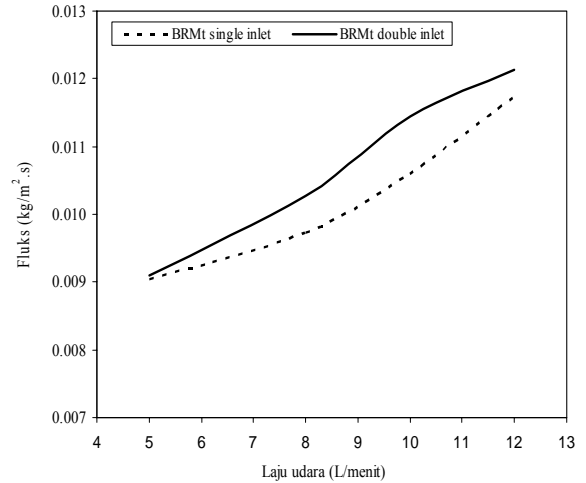
Semakin dekat jarak bafel dengan membran, berarti semakin sempit daerah yang dilewati oleh udara ke atas, menyebabkan kecepatan laju fluida ke atas semakin besar (Gambar 12). Hal ini menyebabkan *shear rate* pada membran semakin besar, dan menyapu flok-flok yang menutupi membran, sehingga *fouling* dapat diminimalkan. Fouling pada membran yang kecil, menyebabkan fluks yang dihasilkan besar.

Perbedaan konsentrasi solid (MLSS) terhadap besarnya fluks juga ditemukan dalam simulasi ini. Semakin besar konsentrasi solid, fluks yang dihasilkan semakin kecil (Gambar 13). Hal ini disebabkan oleh asumsi yang menyatakan bahwa fluks berbanding lurus dengan laju transfer massa, sehingga grafik yang diperoleh pun menunjukkan pola yang serupa. Bertambah besarnya konsentrasi solid di BRMt, menyebabkan fluida semakin sulit melewati membran, sehingga fluks yang dihasilkan menjadi semakin kecil.

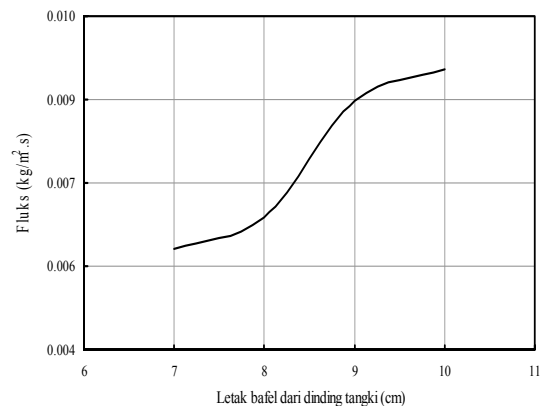
V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah dapat menunjukkan pengaruh berbagai faktor operasi dan geometri tangki terhadap sistem yang terjadi pada BRMt secara simulasi. Dapat disimpulkan bahwa kenaikan laju udara dapat menaikkan pula laju transfer massa gas-liquid dan fluks pada BRMt dengan membran baik sebagai *black box* maupun *porous media*. Semakin dekat letak bafel dengan membran, menyebabkan laju transfer massa gas-liquid menjadi kecil, sedangkan fluks pada BRMt dengan membran sebagai *black box* dan *porous media* semakin meningkat. Bertambah besarnya

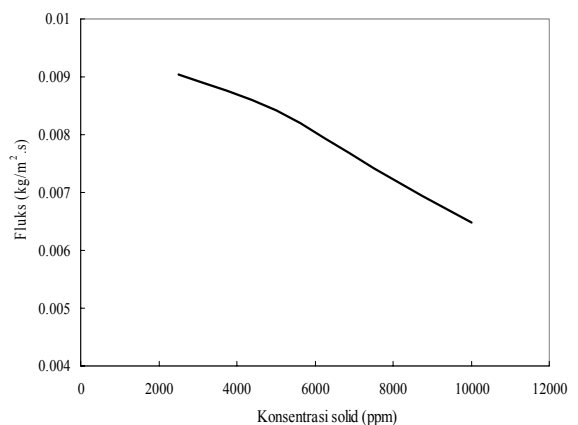
konsentrasi solid (MLSS) dari 2500 hingga 10000 ppm tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan laju transfer massa gas-liquid. Fluks yang dihasilkan pada tangki *double inlet* menunjukkan kecenderungan lebih besar dibandingkan dengan tangki *single inlet*. Jarak bafel dari membran yang semakin dekat, dapat juga menyebabkan dispersi liquid lebih cepat. Akhirnya, penelitian ini menunjukkan bahwa asumsi membran sebagai *porous media* merupakan bentuk simulasi membran yang paling mendekati aslinya.



Gambar 11. Hubungan fluks dengan perubahan laju udara pada BRMt, membran sebagai *porous media*



Gambar 12. Hubungan fluks dengan letak bafel dari dinding BRMt, membran sebagai *black box*



Gambar 13. Hubungan fluks dengan perbedaan konsentrasi solid pada BRMt, membran sebagai *black box*

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Witzig, Z., W. Manz, S. Rosenberg, U. Kruger, M. Kraume, U. Szewzyk., "Microbial Aspect of a Bioreactor with Submerged Membranes for Aerobic Treatment of Municipal Wastewater", *Water Research*, 36, p.394-402. Pergamon. 2002.
- [2] Yamamoto, K., M. Hiasa, T. Mahmood, and T. Matsuo., "Direct Solid-Liquid Separation Using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank", *Water Science Tech.*, 21, p.43-54. 1989.
- [3] Bodzek, Michael, Z. Debkowska, E. Lobos, and K. Konieczny, "Bio-membrane Wastewater Treatment by Activated Sludge Method", *Desalination Journal*, Elsevier Science, 107, p.83-95. 1996.
- [4] Versteeg, H. G. and Malalaskera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamic", Longman Group Ltd. 1995.
- [5] Fluent Inc, "Fluent 6.2 User Guide", Vol.3, *Fluent Inc*, Lebanon. 1998.

VII. NOMENKLATUR

Daftar Notasi

Dma	diameter membran atas	[cm]
Dmb	diameter membran bawah	[cm]
μ	viskositas liquid	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
d_{bubble}	diameter bubble rata-rata	[m]
g	percepatan gravitasi	[m.s ⁻²]
ρ	densitas liquid	[kg.m ⁻³]
ρ_b	densitas bubble	[kg.m ⁻³]
k_L	koefisien perpindahan massa	[m.s ⁻¹]
ΔP	beda tekanan	[N.m ⁻²]
r	jari-jari pori	[m]
U_t	kecepatan superficial	[m.s ⁻¹]