

SIMULASI ALIRAN GAS-SOLID-LIQUID DALAM BIOREAKTOR MEMBRAN TERENDAM

Aisyah Endah Palupi

Jurusan Teknik Mesin – Fakultas Teknik

Universitas Negeri Surabaya (UNESA)

Telp. (031)8299487; Fax.(031)8292957; email: aisyahp2000@yahoo.com

Abstrak

Karakteristik hidrodinamika pada pencampuran gas-solid-liquid dalam bioreaktor membran terendam (BRMt) dan pengaruhnya terhadap transfer massa dipelajari secara komputasional pada berbagai konsentrasi solid, rate gas masuk, dan jarak bafel. Metode komputasional dilakukan dengan menggunakan software GAMBIT 2.1.6. untuk pembuatan grid yang merupakan domain perhitungan dan melakukan simulasi dengan software CFD FLUENT 6.2.16. Hasil perhitungan yang diperoleh setelah iterasi mencapai tingkat konvergensi tertentu.

Aliran multifase dalam reaktor disimulasikan dengan mixture model, sedangkan untuk memodelkan karakteristik aliran turbulen digunakan standar $k-\epsilon$ model. Sistem geometri yang dipelajari adalah bioreaktor berbentuk kotak berdasar datar, 2 buah bafel, membran hollow fiber terendam dan lubang udara di dasar reaktor. Untuk pemodelan membran digunakan dua pendekatan yaitu membran sebagai black box dan membran sebagai porous media. Liquid yang digunakan adalah air, dengan lumpur aktif sebagai solid, dan udara sebagai fase gas. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem gas-solid-liquid dengan letak bafel terdekat dari membran, menyebabkan proses dispersi liquid semakin cepat, sehingga fluida dalam tangki tercampur dengan sempurna dan dapat meningkatkan laju transfer massa gas-liquid dan fluks pada BRMt.

Peningkatan konsentrasi solid tidak berpengaruh terhadap perubahan laju transfer massa gas-liquid dan fluks, tetapi kenaikan laju udara dapat menaikkan laju transfer massa gas-liquid dan fluks. Pendekatan porous media memberikan hasil prediksi distribusi gas hold up yang lebih merata dibandingkan dengan pendekatan black box. Letak bafel 9 cm dari dinding tangki merupakan posisi terbaik ditinjau dari keseimbangan antara udara yang mengalir dengan aliran fluida yang bersirkulasi. Ditinjau dari distribusi solid, BRMt dengan double inlet lebih baik dibandingkan dengan single inlet. Fluks yang diperoleh tidak menunjukkan perbedaan secara signifikan. Dari kedua pendekatan model membran, membran sebagai porous media memberikan hasil simulasi yang lebih mendekati hasil eksperimen.

Kata kunci: BRMt, hidrodinamik, simulasi CFD, gas-solid-liquid

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 $k-\epsilon$ 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.

Keyword: MBRs, hydrodynamic, simulation CFD, gas-solid-liquid

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 (Witzig, et al., 2002).

Beberapa kelemahan pada proses pengolahan limbah yang demikian, tidak berlaku bagi proses pengolahan limbah dengan menggunakan bioreaktor membran (BRM). Yamamoto, dkk., (1989), 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 (1996), 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 Witzig dkk, (2002), 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*.

Penelitian di bidang pengolahan limbah cair menggunakan BRMt sebagian besar adalah secara eksperimental. Beberapa penelitian BRMt yang dilakukan secara simulasi (pemodelan), masih menggunakan anggapan aliran ideal, dimana pencampuran terjadi dengan sempurna (*well mixed*) dan mengabaikan hambatan perpindahan massa terhadap proses biologis yang terjadi (Lu, S.G., dkk., 2001). Padahal pada kenyataannya, aliran yang terjadi di dalam BRMt tidak seragam. Berpijak dari anggapan yang demikian, maka penelitian ini melakukan tahap estimasi terhadap ketidakseragaman aliran yang ada di dalam BRMt.

Tinjauan hidrodinamika mengevaluasi proses pengolahan dengan membran yang dapat dilakukan lebih akurat dan komprehensif. Hal ini dikarenakan proses pengolahan limbah dengan menggunakan membran sangat dipengaruhi oleh fenomena perpindahan massa, dimana dengan fenomena tersebut bisa dievaluasi melalui hidrodinamika sistemnya. Fenomena yang terjadi di dalam BRMt cukup kompleks yang meliputi hidrodinamika aliran multi-fasa, turbulensi, perpindahan massa, dan proses biologis. Oleh karena itu diperlukan suatu model teoritis berbasis CFD FLUENT (*Computation Fluid Dynamic-Fluent*) yang menjelaskan secara detail dan menyeluruh fenomena yang terjadi di dalam BRMt. Dengan diaplikasikannya model ini, diharapkan dapat menganalisis pengaruh fenomena pencampuran terhadap jalannya proses biologis yang terjadi di dalam BRMt.

Penelitian ini mempelajari karakteristik hidrodinamika aliran turbulen multi-fasa (*solid-liquid-gas*) dan pengaruhnya terhadap transfer massa dalam BRMt hollow fiber dengan menggunakan pendekatan komputasi. Simulasi yang dilakukan pada tahap ini secara garis besar dilakukan dengan membandingkan membran sebagai *black box* dan sebagai porous media. Selain itu, dibandingkan pula antara *single inlet* dan *double inlet* pada BRMt.

Model-model Perpindahan

1. Model "black box"

Bentuk dasar model "black box" adalah fungsi yang tidak diketahui yang ditentukan dari data terukur. Fungsi ini dapat ditampilkan pada sisi sebelah kanan dari persamaan neraca konservasi atau persamaan konstitutif. Penetapan fungsi yang tidak diketahui secara keseluruhan merupakan permasalahan secara matematika. Cara untuk menyelesaikan permasalahan matematika tersebut adalah dengan menetapkan struktur model yang sesuai dengan struktur permasalahan dan menetapkan model yang terbaik dengan menetapkan penentuan parameter model.

Teknik yang sama juga diaplikasikan pada model "black box". Pada umumnya dipilih struktur model "black box" yang sesuai dengan permasalahan permodelan dan mudah diselesaikan. Elemen dalam

struktur model "black box" secara keseluruhan memiliki struktur yang sama, dan setiap elemen diidentifikasi sesuai dengan urutan strukturalnya. Berikut ini persyaratan untuk struktur model "black box" yang baik, yaitu: (a) *Simplicity*, pada persamaan matematikanya dihasilkan dalam perhitungan yang mudah, seperti rangkaian seri; (b) *Generality*, untuk memastikan bagian dari struktur seluruh model "black box" yang memungkinkan; (c) *Flexibility*, untuk mendapatkan penjelasan yang luas tentang struktur model tersebut. Persyaratan tersebut dibutuhkan untuk pendekatan yang serupa dengan perluasan fungsi infinit.

Model "black box" yang dipilih harus sesuai dengan karakteristik permasalahannya. Berikut adalah karakteristik yang dapat digunakan.

- (a) Tipe permasalahan model "black box". Fungsi dari tipe permasalahan model "black box" digunakan sebagai struktur model statis dimana permasalahan model biasanya menggunakan struktur model dinamis.
- (b) Bagian lain dari permasalahan yang juga diperhitungkan, antara lain: (1) *Linearity-Nonlinearity*; (2) *Simmetry*; (3) *Time invariance* (parameter konstan)

Struktur model "black box" dapat dideskripsikan sebagai berikut.

- (a) *Mathematical description*. Bentuk umum matematika dari struktur model "black box" biasanya telah diberikan. Hal ini menentukan kemampuan untuk menjelaskan dan keleluasaan dari struktur.
- (b) *Structural parameters*. Parameter model digunakan untuk memilih salah satu bagian dari struktur yang disebutkan dengan menetapkan data yang terukur.
- (c) *Mathematical properties*. Bentuk umum properti matematika sesuai dengan parameter yang digunakan dan penetapan struktur telah diberikan disini. Keduanya berhubungan sangat erat dengan bentuk matematika dari struktur.
- (d) *Parameter estimation*. Metode penetapan parameter yang memungkinkan untuk pemodelan dijelaskan secara jelas untuk menetapkan parameter, termasuk parameter secara struktural.

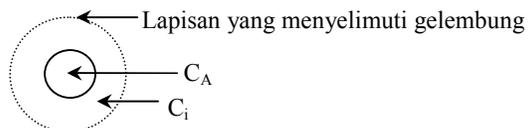
2. Model Porous Media

Membran berpori digunakan pada proses mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi. Membran ini terdiri dari matriks polimer dimana terdapat pori yang berukuran 2nm sampai 10 μm . Membran memiliki karakteristik struktur dan geometri pori yang bermacam-macam. Perbedaan geometri pori akan berimplikasi pada penggunaan model yang berbeda untuk menggambarkan proses perpindahan yang terjadi. Model perpindahan bermanfaat dalam penentuan parameter struktur dan bagaimana parameter spesifik tersebut dapat divariasikan sehingga kinerja membran dapat meningkat. Persamaan yang mewakili permodelan ini adalah persamaan Hagen-Poiseuille

yang memperlihatkan dengan jelas struktur membran terhadap proses perpindahan.

Transfer Massa Gas - Liquid

Dalam kolom gelembung, dianggap gelembung-gelembung berbentuk bola dan sistem yang ditinjau adalah suatu bola. Mekanismenya dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1. Gelembung dengan lapisan film yang mengelilinginya

Di dalam gelembung terdapat udara yang terdiri dari oksigen dan nitrogen. Gas oksigen dapat melarut ke dalam air dengan difusi melalui lapisan film yang mengelilinginya. Difusi ini dimungkinkan karena adanya perbedaan konsentrasi oksigen pada batas luar gelembung dan konsentrasi pada bulk yang mula-mula harganya masih kecil. Besarnya difusi ini dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$J_A = - \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) k_L (C_i - C_A)$$

dimana ε = gas hold up
 k_L = koefisien perpindahan massa
 C_A = konsentrasi A pada aliran bulk
 C_i = konsentrasi pada interface

Perhitungan Diameter Gelembung Gas

Diameter gelembung gas yang digunakan dalam sistem ini dianggap konstan dengan perhitungan diameter gelembung menggunakan korelasi diameter gelembung rata-rata.

$$d_{bubble} = \sqrt{\frac{18 \times Ut \times \mu}{(\rho_v - \rho_L)g}}$$

Treybal, R.E.,(1981)

dimana :
 d_{bubble} = diameter bubble rata-rata, m
 Ut = kecepatan superficial, m/s
 μ = viskositas liquid, kg/m.s
 ρ_v = densitas udara, kg/m³
 ρ_L = densitas liquida, kg/m³
 g = kecepatan gravitasi, m/s²

Porous Media Model

Porous media merupakan kondisi batas yang dapat digunakan untuk segala jenis permasalahan, termasuk aliran melalui *packed bed*, *filter paper*, *perforated plate* dan distribusi aliran. Ketika digunakan model ini, harus didefinisikan terlebih dahulu sebuah zona sebagai porous media dan *pressure loss* dalam aliran ditentukan berdasarkan nilai yang kita masukkan sebagai input. Salah satu

bentuk praktis dari porous media adalah *porous jump*, yang pada umumnya digunakan untuk pemodelan membran tipis yang telah diketahui velositas/beda tekanannya. Jika memungkinkan, dianjurkan menggunakan *porous jump*, karena selain diaplikasikan pada zona permukaan sehingga lebih mudah, porous jump juga memiliki tingkat konvergensi yang lebih baik dibandingkan dengan porous media. Pada *porous jump*, membran tipis memiliki ketebalan tertentu dimana perubahan tekanan terjadi dan didefinisikan sebagai modifikasi Hukum Darcy :

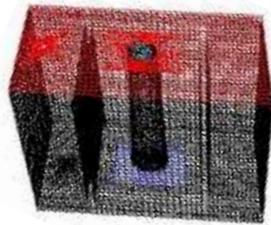
$$\Delta P = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m$$

dimana:

ΔP = pressure drop
 μ = viskositas fluida laminer
 α = permeability membran
 C_2 = koefisien pressure jump
 v = velocity normal pada permukaan poros
 Δm = ketebalan membran

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, beralas 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 ± 75.000 . Hasil grid yang diperoleh diekspor ke *software* CFD FLUENT 6.2.16., (Versteeg and Malalasekera, 1995) 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 (Fluent, 1998). Untuk pemodelan membran digunakan dua pendekatan yaitu membran sebagai *black box* dan membran sebagai *porous media*.



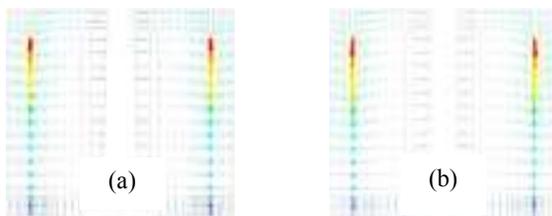
Gambar 2. Grid BRMt yang digunakan untuk simulasi

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*.

1. Distribusi kecepatan aliran fluida

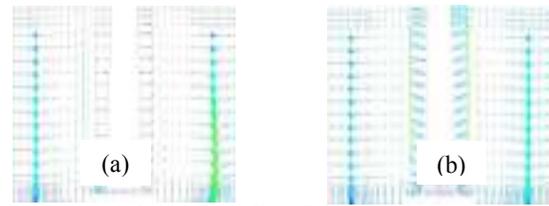
Distribusi kecepatan aliran fluida pada BRMt antara membran sebagai *black box* dan porous media ditunjukkan oleh Gambar 3. Sistem dengan membran sebagai *black box*, membran berada tepat di tengah tangki dengan diameter atas 3,5 cm dan diameter bawah 5 cm, sedangkan membran sebagai *porous media*, diameter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



Gambar 3. Distribusi kecepatan aliran fluida masuk (a) membran sebagai *black box*, dan (b) membran sebagai *porous media*.

2. Pola Sirkulasi Aliran Fluida

Vektor kecepatan aliran fluida ditunjukkan pada Gambar 4 dimana aliran fluida masuk melalui pipa menuju ke bawah dan berbelok melalui bagian bawah bafel menuju ke daerah di sekitar membran, ke atas dan berbalik arah melalui atas bafel. Medan aliran yang terjadi adalah aliran axial, sesuai dengan letak bafel yang melintang.

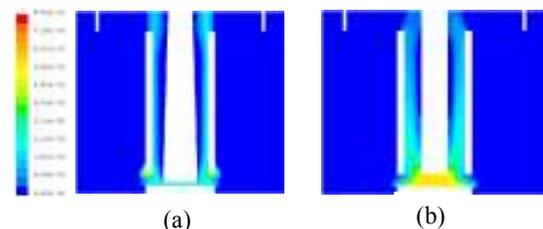


Gambar 4. Pola sirkulasi aliran fluida masuk (a) membran sebagai *black box*, dan (b) membran sebagai *porous media*

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 disebabkan 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.

3. Dispersi gas

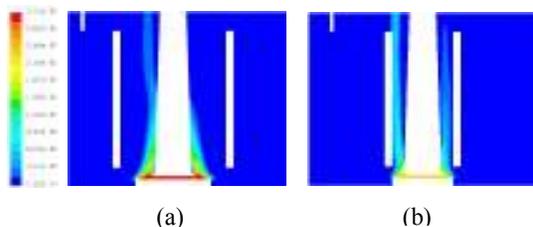
Pengaruh kecepatan laju alir udara terhadap dispersi gas di dalam tangki ditunjukkan oleh Gambar 5. Dispersi gas terjadi di antara membran dan bafel karena udara mengalir dari difuser dan cenderung menuju ke permukaan. Semakin besar laju udara, semakin besar pula dispersi gas yang terjadi terutama di 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.



Gambar 5. Dispersi gas pada BRMt *double inlet*, kecepatan laju udara 12 l/mnt (a) membran sebagai *black box*, dan (b) membran sebagai *porous media*.

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.

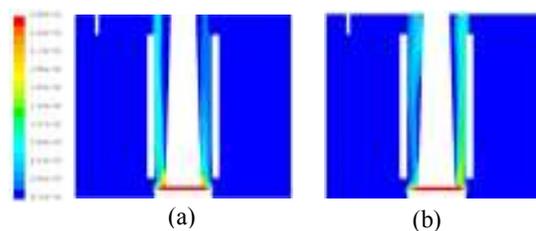
Posisi bafel sangat berpengaruh terhadap dispersi gas dalam tangki. Semakin jauh letak bafel dari membran semakin menurun dispersi gas dalam tangki. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 6, dimana aliran udara yang keluar dari sparger langsung terdorong oleh aliran fluida dari sisi pipa masuk. Aliran fluida 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.



Gambar 6. Dispersi gas BRMt *single inlet* dengan membran sebagai *porous media*, (a) posisi bafel 7 cm, dan (b) posisi bafel 10 cm dari dinding tangki

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.

Perubahan konsentrasi solid tidak terlalu berpengaruh pada dispersi gas. Simulasi pada bagian ini dilakukan pada BRMt dengan membran sebagai *black box*, seperti pada Gambar 7. 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.



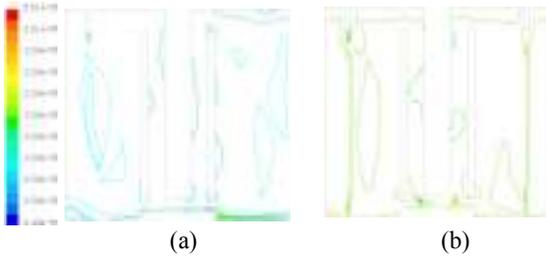
Gambar 7. Dispersi gas BRMt *single inlet* dengan membran sebagai *black box*, (a) konsentrasi solid 2500 mg/l, (b) konsentrasi solid 10000 mg/l

4. Distribusi solid

Pada tangki BRMt *single inlet* distribusi solid cenderung berada di dasar tangki dan sisi tangki dimana 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.

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 analisa 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.



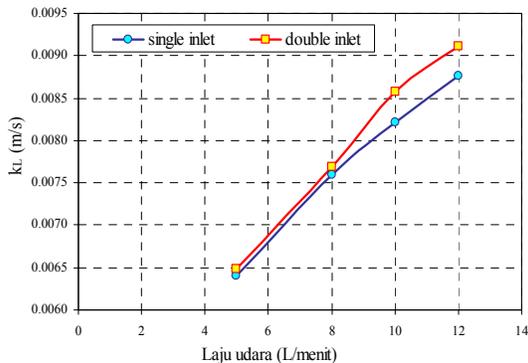
Gambar 8. Distribusi solid pada BRMt konsentrasi solid 2500 mg/l, (a) *single inlet*; (b) *double inlet*

5. 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*.

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

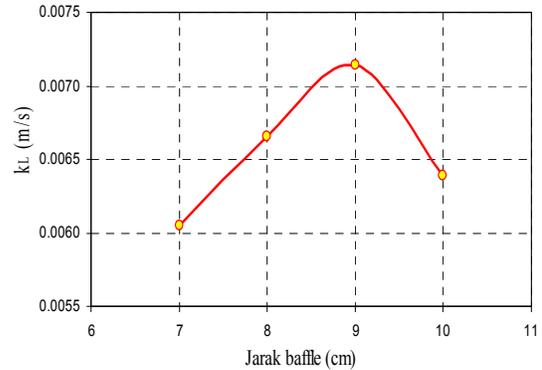
Persamaan di atas menunjukkan bahwa *bubble rise velocity* berbanding lurus dengan diameter gelembung yang berarti bahwa dengan bertambahnya laju udara, maka diameter gelembung yang dihasilkan juga bertambah besar. Semakin besar laju udara yang diberikan, semakin besar pula harga k_L (Gambar 9), baik pada *single inlet* maupun *double inlet*.



Gambar 9. Hubungan laju transfer massa gas-liquid (k_L) dengan perubahan laju udara pada BRMt dengan membran sebagai *porous media*

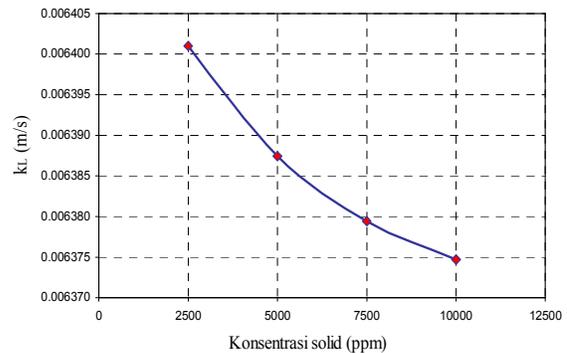
Hasil simulasi pada tangki dengan membran sebagai *black box* (Gambar 10) menunjukkan letak bafel mempengaruhi harga k_L . Untuk jarak bafel hingga 9 cm dari dinding tangki harga k_L semakin tinggi, namun demikian harga k_L menjadi turun saat letak bafel 10 cm dari dinding tangki atau jarak bafel yang 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.



Gambar 10. Hubungan laju transfer massa gas-liquid (k_L) dengan perubahan letak bafel dari dinding tangki pada BRMt dengan membran sebagai *black box*.

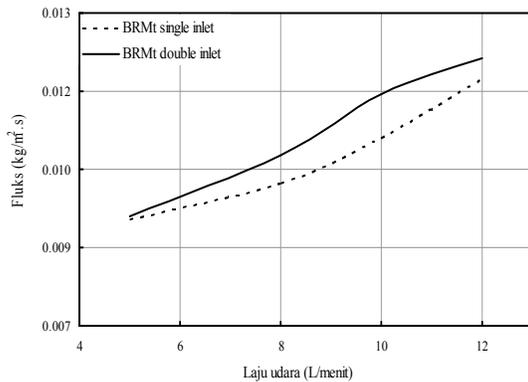
Ditinjau dari pengaruh kenaikan konsentrasi solid (MLSS) yang dianggap sebagai solid inert (Gambar 11), hasil simulasi pada membran sebagai *black box*, menunjukkan bahwa terjadi penurunan laju transfer massa gas-liquid. Hal ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa kenaikan konsentrasi solid inert dapat menurunkan koefisien laju transfer massa gas-liquid (k_L).



Gambar 11. Hubungan laju transfer massa gas-liquid (k_L) dengan perubahan konsentrasi solid dengan membran sebagai *black box*

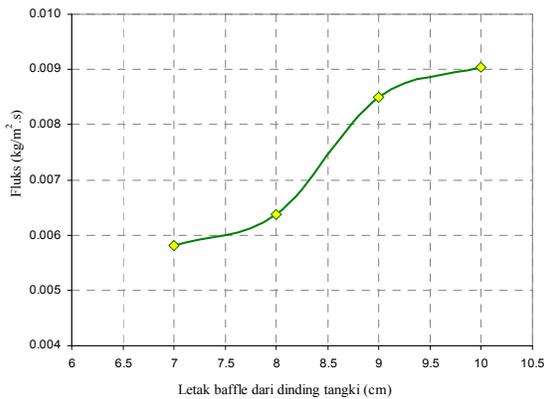
6. Fluks yang dihasilkan

Kenaikan laju udara secara signifikan dapat meningkatkan fluks melalui membran. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 12, 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 12. Hubungan fluks dengan perubahan laju udara pada BRMt, membran sebagai *porous media*

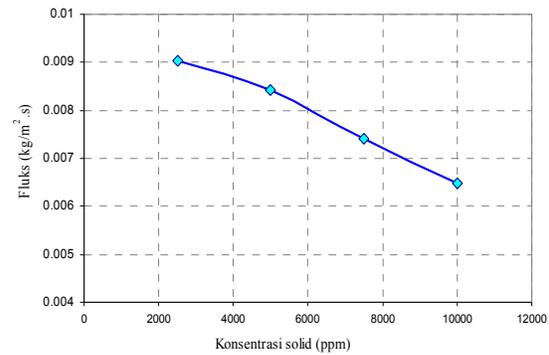
Semakin dekat jarak bafel dengan membran, berarti semakin sempit daerah yang dilewati oleh udara ke atas, menyebabkan kecepatan laju fluida ke atas semakin besar (Gambar 13). Hal ini menyebabkan *shear rate* pada membran semakin besar, dan menyapu flok-flok yang menutupi membran, sehingga *fouling* dapat diminimalkan. Fouling pada membran yang kecil, menyebabkan fluks yang dihasilkan besar.



Gambar 13. Hubungan fluks dengan letak bafel dari dinding BRMt, membran sebagai *black box*

Perbedaan konsentrasi solid (MLSS) terhadap besarnya fluks juga ditemukan dalam simulasi ini. Semakin besar konsentrasi solid, fluks yang dihasilkan semakin kecil (Gambar 14). 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.



Gambar 14. Hubungan fluks dengan perbedaan konsentrasi solid pada BRMt, membran sebagai *black box*

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.

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 liquida	[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]

DAFTAR PUSTAKA

- Bocquet, S., A. Torres, J. Sanches dan G.M. Rios, (2005), "Modelling The Mass Transfer in Solvent-Extraction Processes with Hollow-Fiber Membranes", *AIChE Journal*, American Institute of Chemical Engineers, Vol.51, No. 4.
- Bodzek, Michael, Z. Debkowska, E. Lobos, and K. Konieczny, (1996), 'Bio-membrane Wastewater Treatment by Activated Sludge Method', *Desalination Journal*, Elsevier Science, 107, p.83-95.
- Côté, P., H. Buisson, C. Pound dan G. Arakaki, (1997), "Immersed Membrane Activated Sludge For The Reuse Of Municipal Wastewater", *Desalination Journal*, Elsevier Science, 113, p.189-196.
- Fane, A. dan S. Chang, (2002), "Membrane Bioreactors: Design & Operational Options", *Filtration and Separation*.
- Fluent Inc, (1998), "Fluent 6.2 User Guide", Vol.3, *Fluent Inc*, Lebanon.
- Geankoplis, C.J., (1997), *Transport Processes and Units Operations*, Prentice Hall of India, 3rd edition, New Delhi,
- Hangos, K. dan I. Cameron, (2001), *Process Modelling and Model Analysis*, Vol.4, Bookcraft Ltd, Midsomer Norton.
- Harahap, A. dan Meydita, A. (2006), "Simulasi Aliran Non Ideal Gas-Solid-Liquid Dalam Biorektor Membran Terendam", *Skripsi*, Jurusan Teknik Kimia, ITS-Surabaya.
- Lu, S.G., T. Imai, M. Ukita, M. Sekine, T. Higuchi dan M. Fukagawa, (2001), "A Model For Membrane Bioreactor Process based on The Concept of Formation and Degradation of Soluble Microbial Product", *Water Res.*, Elsevier Science, Vol. 35, No. 8, p.2038-2048.
- Mallevalle, J., (1996), *Water Treatment Membrane Processes*, McGraw-Hill, New York.
- Rischell, S., E. Casey, B. Glennon, G. Hamer, (2003), "Mass Transfer Analysis of a Membrane Aerated Reactor", *Biochemical Eng. Journal*, Elsevier Science.
- Shim, J.K., I.K. Yoo, Y.M. Lee, (2002), "Design and Operation Consideration For Wastewater Treatment Using a Flat Submerged Membrane Bioreactor", *Process Biochemistry Journal*, Elsevier Science, 38, p.279-285.
- Sukmanto, H. dan S.D. Prasetyo, (2004), "Simulasi Transfer Massa Pada Pencampuran Gas-Liquid-Solid Dalam Tangki Berpengaduk", *Skripsi*, Jurusan Teknik Kimia, ITS-Surabaya.
- Treybal, R. E., (1981), *Mass-Transfer Operations*, 3rd edition, McGraw Hill Inc., Singapore.
- Van Dijk, L., G.C.G. Roncken, (1997), "Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment: The State of The Art and New Developments", *Water Science and Technology*, 35, p.35-41.
- Veenstra, (1995), *Wastewater Treatment*, IHE Delf.
- Versteeg, H. G. dan W. Malalasekera, (1995), *An Introduction to Computational Fluid Dynamic*, Longman Group Ltd.
- Visvanathan, C.R., B. Aim, K. Parameshwaran, (2000), "Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment", *Critical Review in Environmental Science and Technology*, 30 (1): 1-48.
- Wenten, I G., (1996), *Teknologi Membran Industrial*, ITB – Bandung.
- Wijaya, D., (2000), "Klasifikasi Limbah/Pencemaran & Penanganannya Di Jawa Timur", *Makalah Pada Dialog Interaktif*, Forum Peduli Lingkungan Hidup Indonesia.
- Witzig, Z., W. Manz, S. Rosenberg, U. Kruger, M. Kraume, U. Szewzyk, (2002), "Microbial Aspect of a Bioreactor with Submerged Membranes for Aerobic Treatment of Municipal Wastewater", *Water Research*, 36, p.394-402.
- Yamamoto, K., M. Hiasa, T. Mahmood, dan T. Matsuo, (1989), "Direct Solid-Liquid Separation Using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank" *Water Science Tech.*, 21, p.43-54.