Reaktor, Vol. 13 No. 3, Juni 2011, Hal. 194-200

PENGARUH VISKOSITAS DAN LAJU ALIR TERHADAP HIDRODINAMIKA DAN PERPINDAHAN MASSA DALAM PROSES PRODUKSI ASAM SITRAT DENGAN BIOREAKTOR AIR-LIFT DAN KAPANG *Aspergilus Niger*

Kristinah Haryani dan Widayat

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jln. Prof. Sudarto SH., Kampus Undip Tembalang, Semarang 50239,
Telp. 024-7460058, Fax. 024-76480675
*)Penulis korespondensi: krisyani_83@yahoo.co.id

Abstract

EFFECT OF VISCOSITY AND FLOW RATE ON THE HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER ON CITRIC ACID PRODUCTION USING *Aspergilus Niger* YEAST IN AN AIR-LIFT BIOREACTOR. *Citric acid is an important organic acid that has many advantages used in foods, drinks, pharmaceuticals industries. Waste of pine apple (covers and core of the fruit) still have high contents of glucose and sucrose components, that these are potentially used as basic material for making citric acid by means of fermentation using Aspergillus niger. The reactor to do so is a reactor air-lift external loop with 88 cm in height, 45.41 cm^2 in riser area, and 2.01 cm^2 in downcomer area. This research is intended to study the influence of volumetric flow and viscosity upon mass transfer in the fermentation process of citric. The variable factors are concentration of total sugar (5 to 25%) and of volumetric flow of gas 9.4 to 23.3 cc/second. A dynamic method used to measure of the constants transfer of gas-fluid mass where oxygen concentration soluted is measured every 30 second using DO meter device. Result of this research shows that the increase of viscosity causes the decrease of hold up gas and fluid circulation speed of the fluid, and the decrease of the constants of mass transfer. The increase of air speed flow will cause the increase of hold up gas and fluid circulation speed, and constants of mass transfer. Relation of the constraints of mass transfer to volumetric flow and viscosity is formulated as follow* $k_{La} = 26{,}17 \times 10^{-4} (J_G)^{0.647} (1+\frac{Ad}{Ar})^{0.853} \mu_{app}^{-1{,}844}$

Keywords: *airlift reactor; citric acid; fermentation; hydrodynamic and mass transfer*

Abstrak

Asam sitrat adalah asam organik penting yang sangat banyak kegunaannya seperti untuk industri makanan, minuman, farmasi, dan sebagainya. Limbah nanas (kulit dan bonggol) masih mengandung kadar glukosa dan sukrosa yang cukup tinggi, sehingga sangat potensial sebagai bahan baku pembuatan asam sitrat dengan cara fermentasi bantuan kapang Aspergillus niger. Reaktor yang digunakan adalah reactor air-lift external loop. Reaktor yang digunakan berdimensi tinggi 88 cm, luas daerah riser 46,41 cm^2, dan luas daerah downcomer 2,01 cm^2. Penelitian ini mempelajari pengaruh laju alir dan viskositas terhadap proses perpindahan massa dalam proses fermentasi asam sitrat. Variabel berubah adalah konsentrasi gula total (5-25%) dan laju alir gas 9,4-23,3 cc/detik. Metode untuk pengukuran konstanta perpindahan massa gas-cair dengan metode dinamik, dimana konsentrasi oksigen terlarut diukur tiap 30 detik menggunakan alat DO meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan viskositas mengakibatkan penurunan hold up gas dan laju sirkulasi cairan, juga penurunan konstanta perpindahan massa. Kenaikan laju alir udara akan mengakibatkan kenaikan hold up gas, laju sirkulasi cairan, konstanta perpindahan massa. Hubungan konstanta perpindahan massa terhadap laju alir dan viskositas diperoleh persamaan $k_{La} = 26{,}17 \times 10^{-4} (J_G)^{0.647} (1+\frac{Ad}{Ar})^{0.853} \mu_{app}^{-1{,}844}$

Kata kunci: *reaktor airlift; asam sitrat; fermentasi; hidrodinamika dan perpindahan massa*

PENDAHULUAN

Asam sitrat merupakan salah satu produk industri bioteknologi, dimana sekitar 10% dari total produksinya digunakan dalam industri farmasi yaitu sebagai sumber zat besi yaitu sebagai Fe-sitrat, 25% dimanfaatkan oleh industri kimia sebagai bahan pelunak dan anti buih dan 60% digunakan dalam industri makanan dan minuman sebagai pengasam minuman berkarbonasi, jamu, dan selai. Asam sitrat merupakan senyawa alami yang banyak terdapat pada berbagai jenis tanaman terutama buah-buahan. Umumnya pembuatan asam sitrat menggunakan bahan baku onggok, gaplek, bekatul, dan tepung aren dan dengan proses fermentasi (Darwis dan Said, 1992). Proses produksi asam sitrat dengan fermentasi mempunyai beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan proses kimia yaitu; bahan baku yang murah, suhu dan tekanan operasi yang rendah, dan hemat energi.

Selain bahan-bahan diatas, buangan buah-buahan juga sudah digunakan untuk pembuatan asam sitrat (Kumar dkk., 2003). Proses fermentasi asam sitrat dilakukan pada fase padat dimana dipelajari pengaruh penambahan metanol. Dalam penelitian tersebut diperoleh bahwa penambahan metanol akan meningkatkan perolehan asam sitrat.

Untuk proses fermentasi asam sitrat fase cair umumnya menggunakan bioreaktor yang berbentuk tangki berpengaduk (Brauer, 1985). Jenis reaktor ini mempunyai keuntungan seperti keseragaman waktu tinggalnya fase gas, intensitas pengaduk, perpindahan massa dan panas dapat divariasi, sedangkan kerugian adalah biaya perawatan mahal dan membutuhkan energi yang besar (Berovic dan Popovic, 2001). Bioreaktor yang lain adalah bioreaktor bergelembung, dimana salah satunya adalah bioreaktor *air lift*. Bioreaktor *air lift* mempunyai keuntungan jika dibandingkan dengan bioreaktor lainnya diantaranya; perancangan sederhana, tanpa ada bagian yang bergerak, aliran dan pengadukan mudah dikendalikan, waktu tinggal dalam reaktor seragam, kontak area lebih luas dengan energi input yang rendah, adanya peningkatan perpindahan massa dan memungkinkan tangki yang besar sehingga kapasitas dapat ditingkatkan (Williams, 2002).

Penggunaan bioreaktor *air lift* untuk produksi asam sitrat telah dilakukan oleh Berovic dan Popovic, (2001) dimana dipelajari pengaruh pencampuran, perpindahan massa oksigen di dalam reaktor bergelembung dan bioreaktor air lift dengan external loop. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pertumbuhan mikroba lebih baik pada bioreaktor air lift dengan external loop dari reaktor bergelembung, belum ditinjau dari produktifitas asam sitrat. Widayat dkk. (2003) juga telah mempelajari koefisien perpindahan massa pada reaktor air lift internal loop berbentuk rectangular dengan fluida non-newtonian (tepung pati) tanpa adanya mikroba dalam media.

Dalam perancangan suatu reaktor, informasi tentang kelakuan/hidrodinamika dan perpindahan massa yang terjadi di dalamnya sangat penting. Hal ini akan menggambarkan peristiwa yang terjadi nantinya. Hidrodinamika reaktor dalam bioreaktor *airlift* meliputi *hold up* gas dan laju sirkulasi cairan. *Hold up* gas atau fraksi kekosongan gas adalah fraksi volume fase gas pada disperse gas-cair/slurry. *Hold up* gas dapat dinyatakan secara keseluruhan dengan persamaan

$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_g + V_l} \qquad (1)$$

Kegunaan *hold up* gas untuk menentukan waktu tinggal gas dalam cairan. *Hold up* gas dan ukuran gelembung mempengaruhi luas permukaan gas cair yang diperlukan untuk perpindahan massa. *Hold up* gas tergantung pada kecepatan kenaikan gelembung, luas gelembung, dan pola aliran. Inverted manometer digunakan untuk menentukan beda tinggi cairan akibat aliran gas, selanjutnya dipakai pada perhitungan *hold up* gas (ε) pada *riser* dan *downcomer*. Besarnya *hold up* gas dapat dihitung dengan persamaan 2,

$$\varepsilon = \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g} \text{ x } \frac{\Delta h}{Z} \qquad (2)$$

Hold up gas total dalam reaktor dapat dihitung dari kenaikan tinggi dispersi pada saat aliran gas masuk reaktor sudah mencapai keadaan tunak. Untuk menentukan hold up gas dapat digunakan persamaan 3,

$$\varepsilon = \frac{h_D - h_l}{h_D} \qquad (3)$$

Sirkulasi cairan dalam reaktor *air lift* disebabkan oleh perbedaan bulk densitas fluida pada *riser* dan *downcomer*. Sirkulasi fluida ini dapat dilihat kelakuan fluida, yaitu naiknya aliran fluida pada *riser* dan menurunnya aliran pada *downcomer*. Besarnya laju sirkulasi cairan (U_{Ld}) dapat diukur dengan persamaan 4,

$$U_{LD} = \frac{L_c}{t_c} \qquad (4)$$

Adapun koefisien perpindahan massa volumetrik (k_{La}) adalah kecepatan spesifik dari perpindahan massa yang dinyatakan dalam banyaknya gas terabsorbsi per unit waktu, per unit luas kontak, per unit beda konsentrasi. Koefisien perpindahan massa volumetrik (k_{La}) bergantung pada sifat fisik dari sistem dan dinamika fluida. Koefisien perpindahan massa pada kenyataannya merupakan faktor yang proposional antara fluks massa dari substrat (N_s) dan gradien konsentrasi yang dinyatakan dengan persamaan 5,

$$N_s = k_{La} (C_1 - C_2) \qquad (5)$$

Di dalam persamaan 5, notasi 1 dan 2 mengindikasikan dua titik massa yang berpindah. Dalam reaktor yang riil perbedaan yang besar dari harga gradien mungkin *coexist* secara simultan,

sehingga nilai konstanta perpindahan massa sangat berpengaruh. Kawase dkk. (1987) mempelajari pendekatan teoritis koefisien perpindahan massa volumetris dalam kolom bergelembung untuk fluida newtonian dan fluida non newtonian. Koefisien perpindahan massa dinyatakan sebagai bilangan sherwood yaitu mengikuti persamaan 6.

$$N_{sh} = 12C_4\pi^{-0,5}1,07^{0,5}Sc^{1/2}\,Re_g^{3/4}\,Fr^{7/60}Bo^{3/5} \quad (6)$$

Popovic dan Robinson (1989) memperoleh hubungan konstanta perpindahan massa volumetrik (k_{La}) dengan laju alir dan viskositas pada bioreaktor *air lift external loop* dengan larutan CMC (Carboxyl Methyl Cellulose) seperti disajikan dalam persamaan 7.

$$k_{La} = 1,911 \times 10^{-4}\,(J_G)_r^{0.525}\,(1+A_d/A_r)^{0.853}\,\mu_{app}^{-0.89} \quad (7)$$

Pada persamaan tersebut, koefisien perpindahan massa gas-cair merupakan fungsi dari laju alir udara/kecepatan superficial gas, viskositas, dan perbandingan luas area *riser* dan *downcomer*/geometrik alat.

Perpindahan massa antar fase gas-cair terjadi karena adanya beda konsentrasi antar kedua fase. Dalam penelitian ini perpindahan massa terjadi yaitu oksigen dari fase gas ke fase cair. Kecepatan perpindahan massa ini dapat ditentukan dengan koefisien perpindahan massa. Koefisien perpindahan massa oksigen dapat diukur dengan metode dinamik. Metode dinamik sesuai digunakan untuk medium fermentasi untuk skala kecil dan biayanya murah. Metode ini didasarkan pada konsentrasi oksigen terlarut dalam media cair sebagai fungsi waktu. Data konsentrasi oksigen terlarut yang terhitung dianalisa untuk menentukan koefisien transfer massa k_{La} untuk fase cair berdasar model berikut:

$$\frac{dC}{dt} = k_{La}\left(C_\infty - C\right) \quad (8)$$

Integrasi dari persamaan (8) adalah:

$$C^* = 1 - \exp^{\left(-k_{La}(t-t_0)\right)} \quad (9)$$

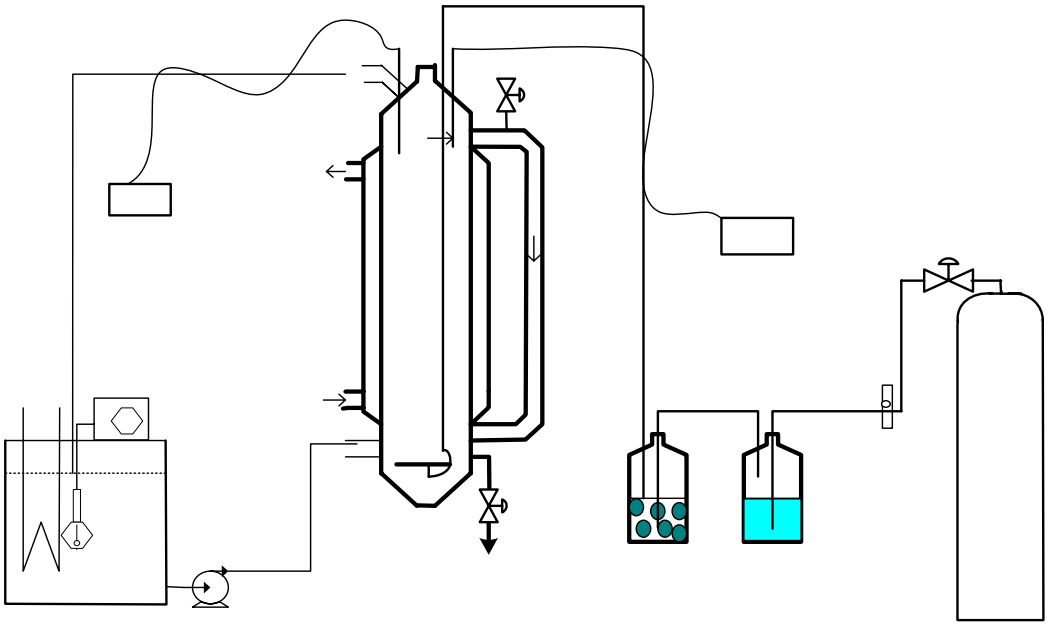
dalam hubungan ini $C^* = \dfrac{(C - C_0)}{(C_\infty - C_0)}$

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari hidrodinamika dan perpindahan massa gas-cair pada proses pembuatan asam sitrat dengan proses fermentasi dengan mikroba *Aspergilus niger* dalam bioreaktor *air lift*.

METODOLOGI

Penelitian pembuatan asam sitrat dari limbah buah nanas dalam bioreaktor *air lift* dengan kapang *Aspergilus niger* ditekankan pada studi perpindahan massa gas-cair Bahan baku yang digunakan adalah limbah buah nanas (kulit dan bonggol nanas) diperoleh dari pasar yang ada di kota Semarang, diperas untuk mengambil cairannya. Bahan kimia sebagai nutrien N, P, dan K yaitu kalium fosfat dan amonium nitrat mempunyai spesifik pro analisis yang dibuat oleh MERCK. Strain *Aspergillus niger* dan potato dextrose diperoleh dari Lab. Mikrobiologi Jurusan Teknik Kimia UNDIP Semarang. Rangkaian peralatan utama untuk proses fermentasi seperti disajikan dalam Gambar 1.

Untuk studi hidrodinamika reaktor dan perpindahan massa, variabel berubah adalah konsentrasi gula total (5-25%) dan laju alir gas 9,4-23,3 cc/detik. Metode untuk pengukuran konstanta perpindahan massa gas-cair dengan metode dinamik, dimana konsentrasi oksigen terlarut diukur tiap 30 detik menggunakan alat DO meter.

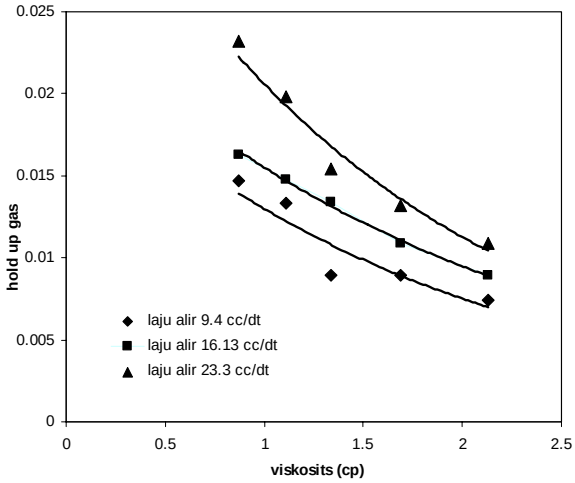


Gambar 1. Rangkaian alat percobaan untuk proses fermentasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

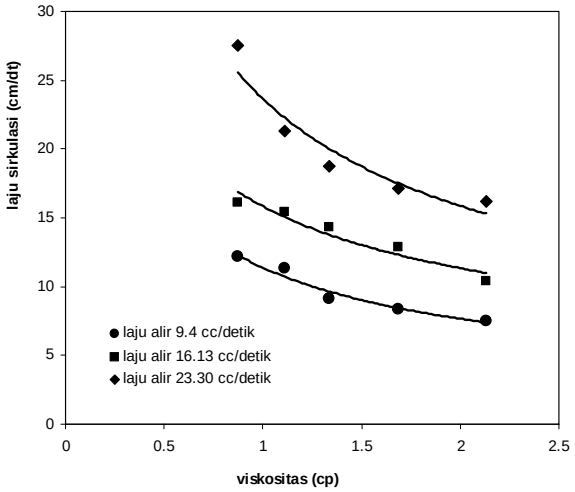
Hidrodinamika Reaktor

Gambar 2 menunjukkan bahwa kenaikan viskositas cairan akan menyebabkan menurunnya *hold up* gas. Semakin *viscous* suatu zat cair akan mengakibatkan zat tersebut sulit ditembus oleh udara, karena daya yang akan mengakibatkan zat tersebut sulit ditembus oleh udara, karena daya yang akan diperlukan untuk menembus cairan semakin besar sebagai akibat dari semakin kuatnya gaya gesek antara lapisan gas dan cairannya. Jadi daya yang ada pada gas juga harus digunakan untuk melawan gaya gesek antara lapisan gas dan cairannya. Hal ini menyebabkan fraksi udara dalam cairan berkurang dengan demikian *hold up* gas menurun.



Gambar 2. Hubungan viskositas terhadap hold up gas pada berbagai laju alir udara

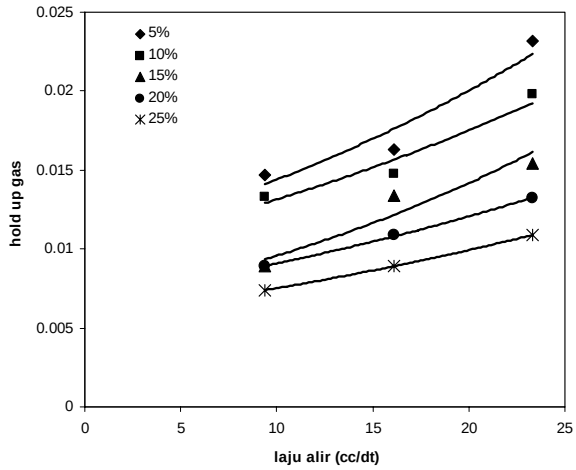
Gambar 3 menunjukkan bahwa kenaikan viskositas akan menyebabkan menurunnya laju sirkulasi cairan dan penurunannya merupakan penurunan yang linier. Hal ini bisa dijelaskan dengan naiknya viskositas akan menaikkan hambatan terhadap aliran fluida. Gaya gesek antara lapisan gas dan cairan yang semakin besar menyebabkan penurunan laju sirkulasi cairan.



Gambar 3. Hubungan viskositas terhadap laju sirkulasi cairan pada berbagai laju alir udara

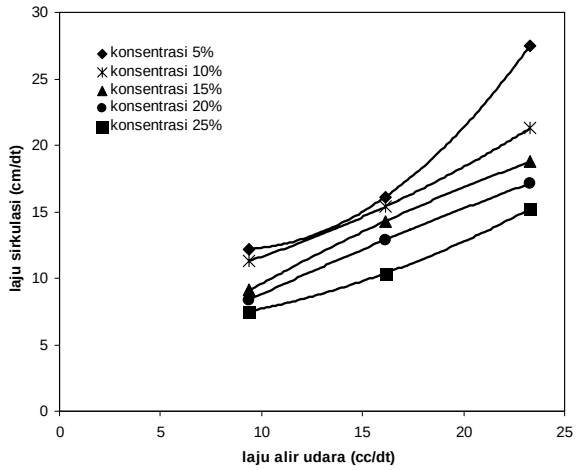
Pada penelitian Widayat dkk., (2004) dengan menggunakan reaktor *air-lift internal loop rectangular* serta menggunakan larutan tepung pati didapatkan bahwa semakin tinggi viskositas larutan tepung pati semakin rendah *hold up* gas dan laju sirkulasi cairan. Dalam penelitian ini dengan menggunakan reaktor *air-lift external loop* dan fluiad larutan nanas didapatkan kecenderungan hasil yang sama, tetapi bila dilihat dari nilainya ada perbedaan karena larutan yang digunakan berbeda dan rentang konsentrasinya berbeda

Gambar 4 menunjukkan bahwa bertambahnya laju alir udara akan menyebabkan bertambahnya *hold up* gas. Hal ini bisa dipahami bahwa dengan semakin bertambahnya laju alir udara maka akan bertambah pula fraksi volume udara dalam larutan. Bertambahnya fraksi volume udara akan meningkatkan nilai *hold up* gas.



Gambar 4. Hubungan laju alir udara terhadp hold up gas pada berbagai kosentrasi larutan

Gambar 5 menunjukkan bahwa bertambahnya laju alir udara akan menyebabkan meningkatnya laju sirkulasi cairan.



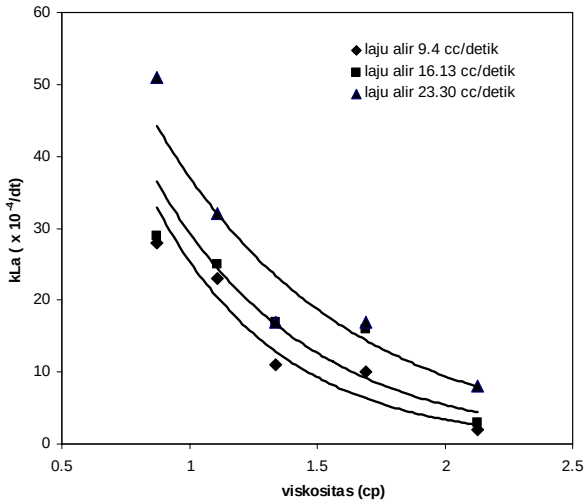
Gambar 5. Hubungan laju alir udara terhadap laju sirkulasi cairan pada berbagai kosentrasi

Hal ini bisa dipahami dengan bertambahnya laju alir udara berarti daya dorong akan semakin

besar. Apabila konsentrasi larutan tetap, maka laju sirkulasi akan semakin cepat. Karena dengan daya dorong yang lebih besar untuk mensirkulasikan sejumlah massa yang sama (konsentrasi tetap) dibutuhkan waktu yang lebih sedikit. Pada penelitian Widayat dkk. (2004), semakin tinggi laju alir udara semakin besar hold up gas dan laju sikulasi cairan yang didapat. Penelitian kali ini yang menggunakan larutan nanas juga memiliki kecenderungan hasil yang sama dengan hasil penelitian Widayat dkk. (2004), tetapi dilihat dari nilainya berbeda, hal ini disebabkan karena larutan yang digunakan berbeda dan rentang konsentrasinya berbeda.

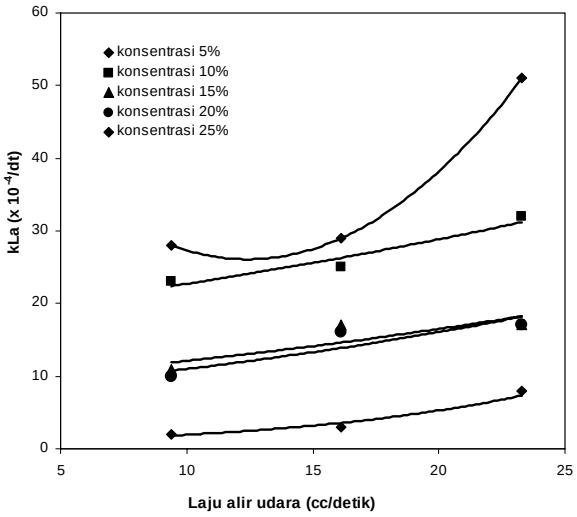
Perpindahan Massa dalam Bioreaktor

Gambar 6 menunjukkan bahwa bertambahnya viskositas larutan nanas akan menyebabkan penurunan koefisien perpindahan massa gas-cair. Penurunan nilai koefisien perpindahan massa karena dengan bertambahnya viskositas larutan tepung nanas, maka larutan akan semakin jenuh sehingga laju perpindahan oksigen akan semakin kecil. Hal ini mengakibatkan koefisien perpindahan massa semakin berkurang juga.



Gambar 6. Hubungan viskositas terhadap koefisien perpindahan massa (k_{La}) pada berbagai laju alir udara

Gambar 7 menunjukkan bahwa bertambahnya laju alir udara (dengan konsentrasi larutan nanas yang sama) akan mengakibatkan peningkatan koefisien perpindahan massa. Kecenderungan yang diperoleh hampir sama untuk semua konsentrasi (hubungan linier atau eksponensial) kecuali pada konsentrasi 5% kecenderungannya adalah polinomial. Laju alir udara semakin besar maka udara yang dapat dipindahkan ke dalam larutan nanas akan semakin besar pula dan mengakibatkan laju perpindahan oksigen semakin besar. Dengan demikian koefisien perpindahan massa juga akan bertambah besar. Fenomena ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan untuk reaktor tangki maupun reaktor bergelembung.



Gambar 7. Hubungan laju alir udara terhadap koefisien perpindahan massa (k_{La})

Pada penelitian Widayat (2004) dengan menggunakan reaktor *air-lift internal loop rectangular* dan fluida tepung pati diperoleh semakin besar laju alir udara semakin tinggi koefisien transfer massa (k_{La}) yang didapat. Pada penelitian ini dengan menggunakan larutan nanas diperoleh kecenderungan yang sama. Kecenderungan yang diperoleh juga sama dengan yang diperoleh oleh Stang dkk. (2001).

Pada percobaan Popovic dan Robinson (1989) dengan menggunakan larutan CMC (Carboxyl Methyl Cellulose) pada reaktor *air-lift external loop* didapatkan hubungan antara koefisien transfer massa gas-cair dengan laju alir udara, viskositas, dan luas penampang *riser* dan *downcomer*, persamaan :

$$k_{La} = 1{,}911\text{x}10^{-4}\left(J_G\right)^{0{,}525}\left(1+\frac{A_d}{A_r}\right)^{0{,}853}\mu_{app}^{-0{,}89} \quad (10)$$

Sedang pada penelitian Widayat, (2004) dengan menganggap luas riser dan downcomer konstan dan harga $(1 + Ad/Ar)^{0.853}$ didapat persamaan berikut;

$$k_{La} = 4{,}561\text{x}10^{-4}\left(J_G\right)^{0{,}206}\left(1+\frac{A_d}{A_r}\right)^{0{,}853}\mu_{app}^{-0{,}425} \quad (11)$$

Pada penelitian ini digunakan larutan nanas dengan konsentrasi 5-25% dan rentang laju alir 1-3 liter/menit pada reaktor *air-lift external loop* didapatkan hubungan persamaan sebagai berikut:

$$k_{La} = 26{,}17\text{x}10^{-4}\left(J_G\right)^{0{,}647}\left(1+\frac{A_d}{A_r}\right)^{0{,}853}\mu_{app}^{-1{,}844} \quad (12)$$

Hubungan diatas diperoleh dengan mengasumsi harga $(1+Ad/Ar)^{0.853}$ dan dianggap sama dengan persamaan yang didapat Popovic dan Robinson (1989), karena selama penelitian luas riser dan downcomer konstan. Adanya perbedaan pada hubungan koefisien perpindahan massa dengan laju alir dan virkositas

dikarenakan metode dan fluida yang digunakan berbeda-beda.

Pada penelitian Popovic dan Robinson menggunakan reaktor *air-lift external loop* dan fluida CMC (Carboxymethyl cellulose), sedang pada penelitian Widayat (2004) menggunakan reaktor *air-lift internal loop rectangular* dan fluida larutan pati. Pada penelitian ini, menggunakan reaktor *air lift external loop* dan fluida larutan nanas. Jika ditinjau dari fluida yang digunakan yaitu fluida non Newtonian, namun mempunyai sifat fisis yang berbeda. Metode pengukuran perpindahan massa dalam penelitian ini adalah dengan metode dinamik, sedangkan untuk Widayat (2004) dan Popovic dan Robinson (1989) dengan metode reaksi kimia.

Penelitian tentang perpindahan massa sistem cair-cair dalam media etanol-oleum dan media fermentasi etanol telah dilakukan oleh Stang dkk. (2001), dengan hasil yang diperoleh pada laju alir gas 9,4 cc/dt koefisien perpindahan massa 8.10^{-6} detik^{-1}. Pada penelitian ini menggunakan laju alir udara 9,4 cc/detik dan konsentrasi gula 10-20% diperoleh hasil kLa terkecil $1{,}74.10^{-6}$/s dan yang terbesar $1{,}50.10^{-3}$/s. Pada penelitian ini menggunakan jamur untuk proses fermentasi, dimana oksigen yang terlarut dikonsumsi jamur untuk pertumbuhan jamur dalam proses fermentasi. Keberadaan kapang akan menyebabkan beda konsentrasi oksigen kecil, sehingga koefisien perpindahan massa gas-cair juga lebih kecil.

KESIMPULAN

Penelitian tentang proses perpindahan massa gas-cair dilakukan pada rentang konsentrasi 5-25% berat dan laju alir udara 1-3 liter/menit. Hasil penelitian dapat menunjukkan bahwa kenaikan viskositas larutan akan mengakibatkan penurunan koefisien transfer massa dan kenaikan laju alir udara akan mengakibatkan kenaikan koefisien transfer massa. Hubungan antara koefisien transfer massa gas-cair dengan viskositas dan laju alir udara yang diperoleh adalah

$$k_{La} = 26{,}17x10^{-4}\left(J_G\right)^{0,647}\left(1+\frac{A_d}{A_r}\right)^{0,853}\mu_{app}^{-1,844}$$

DAFTAR NOTASI

Δh	=	perbedaan tinggi pada pembacaan inverted manometer U, [cm]
ρ_L	=	densitas cairan, [gr/cc]
ρ_G	=	densitas gas, [gr/cc]
ε	=	hold up gas, [ ]
μ_{app}	=	Viskositas cairan, [cP]
A_r	=	Luas penampang riser, [cm^2]
A_d	=	Luas penampang downcomer, [cm^2]
C^*	=	Kosentrasi oksigen terlarut normal pada waktu t, [gr/l]
C	=	Kosentrasi oksigen terlarut pada waktu t, [gr/l]
C_∞	=	Kosentrasi oksigen terlarut pada waktu t_0, [gr/l]
h_L	=	tinggi cairan mula-mula di dalam reaktor, [cm]
h_D	=	tinggi campuran cairan-gas setelah mencapai keadaan tunak, [cm]
J_G	=	Laju alir udara masuk, [cc/detik]
k_{La}	=	Konstanta perpindahan massa gas-cair volumetrik, [1/detik]
L_C	=	panjang lintasan dalam reaktor, [cm]
t_C	=	waktu yang dibutuhkan untuk menempuh lintasan, [s]
V_G	=	volume gas pada reaktor, [cc]
V_L	=	volume cairan atau slurry dalam reaktor, [cc]
V_{Lr}	=	kecepatan interstitial cairan riser, [cm/s]
V_{Ld}	=	kecepatan interstitial cairan downcomer, [cm/s]
U_{Lr}	=	laju sirkulasi cairan riser, [cm/s]
U_{Ld}	=	laju sirkulasi cairan downcomer, [cm/s]
Z	=	perbedaan antara taps tekanan, [cm]

DAFTAR PUSTAKA

Berovic, M. and Popovic, M., (2001), Characterization of Gas Mixed Bioreactors in Submerged Citric Acid Fermentation, *Chem. Biochem. Eng*., pp. 65-69.

Brauer, H., (1985), Stirred Vessel reactors, in *Biotechnology*, editor Rehm H. J. and Reed, G., VCH, Weinheim, 2, pp. 397-444

Darwis, A.Z. dan Said, E.G., (1992), *Teknologi Fermentasi*, PAU Bioteknologi IPB, Rajawali Press, Jakarta

Kawase, Y., Halard, B., and Moo-Young, M., (1987), Theoretical Prediction of Volumetric Mass Transfer Coefficients in Bubble Column for Newtonian and Non Newtonian Fluids, *Chem. Eng. Sci*., pp. 1609-1617

Kumar, D., Jain, V.K., Shanker, G., and Srivastava, A., (2003), Utilization of Fruits Waste for Citric Acid Production by Solid State Fermentation, *Process Biochemistry*, pp. 1725-1729

Merchuk, J.C. and Asenjo, J.A., (1995), *Fundamental of Bioreactor Design*, New York, Marcell Dekker Inc.

Milsom, P.E. and Meers, J.L., *Citric Acid; Comphrehensive Biotechnology : The Principles, Application and Regulation of Biotechnology in Industry, Agriculture and Medicine*, edited by M Moo-Young, Pergamon Pres. Ltd., 3, pp. 665-680

Popovic, M.K. and Robinson, C.W., (1989), Mass Transfer Stuy of External Loop airlift and a Buble Column, *AIChe*J., 35(3), pp. 393-405.

Stang, D., Macdonald, G., and Hill A., (2001), Mass Transfer and Bioethanol Production in an External Loop Liquid Lift Bioreactor, *Ind. Eng. Chem. Res.*

Widayat, Susilo, D., dan Sigit Pranoto, S., (2003), Koefisien Perpindahan Massa Gas-Cair pada Fluida Non Newtonian dalam Reaktor Airlift, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia*, Yogyakarta ISBN. 979-97893-0-3, 2, hal. SO-5.1-SO-5.6

Widayat, Susilo, D., dan Sigit Pranoto, S., (2004) Pengaruh Viskositas dan Laju Alir Udara terhadap Hold Up Gas dan Laju Sirkulasi Fluida Non Newtonian dalam Bioreaktor Airlift, *Prosiding Seminar Nasional II Teknik Kimia Teknologi Tepat Guna Berbasis SDA Indonesia*, Jurusan Teknik Kimia, FTI, Universitas Katolik Parahyangan Bandung, hal.C.02.1- C.02.7

Widayat, (2004), Pengaruh Laju Alir dan Viskositas terhadap Perpindahan Massa Gas-Cair Fluida Non Newtonian dalam Reaktor Air Lift Rectangular, *Prosiding Semnas Rekayasa Kimia dan Proses*, Jurusan Teknik Kimia Fak Teknik UNDIP Semarang, hal. I.9.1- I.9.4

Williams, J.A., (2002), Keys To Bioreactor Selections, *Chem. Eng. Prog*., pp. 34-41.