

ANALYSIS OF ENCAPSULATED YEAST IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS APPROACH

Riani Ayu Lestari^{1)*}, Rianti Indah Lestari²⁾

¹⁾Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Lambung Mangkurat
Jalan A. Yani Km 35, Banjarbaru, Kalimantan Selatan, 70614, Indonesia

²⁾Industrial Engineering Department, Faculty of Science and Technology
University of Sari Mulia, Kalimantan Selatan, Indonesia

* E-mail corresponding author: ra.lestari@ulm.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<i>Article history:</i> Received: 04-06-2019 Received in revised form: 20-06-2019 Accepted: 28-07-2019 Published: 18-10-2019 <i>Keywords:</i> Computational fluid dynamics Encapsulated yeast system Glucose mass transfer	<i>Computational fluid dynamics of encapsulated yeast has been developed to determine characterization of encapsulated yeast applied for ethanol production from lignocellulose waste. Encapsulated yeast as biologically activate materials enclosed in a semipermeable membrane to protect cell from inhibitor attack. Encapsulated yeast system relates to mass transfer of substrate (glucose) into capsule and out of capsule and fermentation reaction. Modelling of mass transfer was developed to understand capsule performance consisting of 3 parts, cell aggregate, liquid space and thin membrane. Finite element method has been applied to solve partial differential equation of glucose concentration profile against x, y position and t -time in Comsol multiphysics 3.5a. Capsule geometry was showed in half part capsule, 2D and axis symmetries. Trend line of glucose distribution was effected by thickness membrane that 0.1 mm controlling in mass transfer and cell aggregate of 50%-v of membrane.</i>

ANALISIS YEAST TERENKAPSULASI DENGAN PENDEKATAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Abstrak- Computational fluid dynamics yeast terenkapsulasi telah dikembangkan untuk menentukan karakteristik yeast terenkapsulasi dalam aplikasi produksi etanol berbahan baku limbah lignoselulosa. Yeast terenkapsulasi berperan sebagai biokatalis yang terbungkus dalam suatu selaput membran untuk melindungi sel dari inhibitor. Sistem yeast terenkapsulasi melibatkan proses perpindahan massa substrat (glukosa) ke dalam kapsul, produk ke luar kapsul dan reaksi fermentasi. Pemodelan perpindahan massa glukosa dikembangkan untuk mengetahui kinerja kapsul yang terdiri dari 3 bagian, yaitu padatan sel, cairan, dan selaput membran. Teknik metode elemen hingga telah digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial parsial perubahan konsentrasi glukosa terhadap fungsi posisi x, y dan waktu t dalam Comsol Multiphysic 3.5a. Geometri kapsul disajikan dalam bentuk setengah bagian kapsul, 2D dan aksialsimetris. Profil distribusi glukosa dipengaruhi oleh ketebalan membran pelapis dan volum padatan sel. Simulasi menunjukkan ketebalan terbaik membran >0,1 mm yang dikontrol oleh perpindahan massa dan volum padatan sel 50% volum total membran.

Kata kunci : Computational fluid dynamics, sistem yeast terenkapsulasi, perpindahan massa glukosa

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi bahan bakar organik (*biofuel*) sebagai pengganti bahan bakar fosil penyumbang emisi terbesar mengarah pada teknologi pengkonversian bahan alami menjadi

bahan bakar yang ramah lingkungan. Pengembangan teknologi *biofuel* mampu mengatasi dua permasalahan lingkungan sekaligus, pertama pada penggunaan bahan bakar fosil penyumbang emisi tinggi berupa gas-gas beracun hasil pembakaran dan permasalahan sampah hasil

hutan, pertanian, sayur dan buah-buahan. Bioetanol generasi pertama dikonversi dari proses fermentasi berbahan baku pati-patian. Peran utama bahan pati sebagai bahan pangan melemahkan kontribusinya untuk meningkatkan produksi bioethanol. Oleh karena itu alternatif bahan baku berpindah pada biomassa lignoselulosa yang sebagian besar dibuang sehingga hanya menjadi sampah dan dibakar (Ahorsu, 2018).

Bioethanol dapat dihasilkan dari glukosa dalam proses fermentasi menggunakan yeast (*Saccaromyces cerevisae*). Glukosa dari bahan pati-patian dan selulosa memerlukan proses hidrolisis untuk mengubah struktur pati dan selulosa menjadi glukosa sebagai substrat yeast untuk tumbuh dan memproduksi etanol. Dengan berlimpahnya sumber lignoselulosa maka etanol yang dihasilkan meningkat, namun penurunan *yield* etanol lebih signifikan dibanding yang bersumber pati-patian. Secara umum, lignoselulosa merupakan komponen utama penyusun dinding sel tumbuhan yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2017). Lignin bersifat inhibitor yeast sehingga mengganggu reaksi fermentasi karena yeast lebih cepat mencapai fase kematian (*death phase*).

Yeast terenkapsulasi dibuat guna menurunkan pengaruh inhibitor yang menyebabkan yeast mati dan menurunkan *yield* bioetanol. *Immobilized yeast* telah dikembangkan dalam rangka menurunkan pengaruh inhibitor, namun *yield* yang dihasilkan belum cukup maksimal. Enkapsulasi yeast merupakan pengkondisian yeast agar tidak berkontak dengan inhibitor. Praktisnya, yeast dikemas dalam suatu lapisan tipis yang nyaman bagi yeast untuk menjalankan tugasnya (Talebnia, 2006).

Yeast terenkapsulasi tergolong sistem yang kompleks karena menyangkut viabilitas makhluk hidup yang terbungkus dalam kapsul sehingga dalam perkembangan sistem diperlukan pendekatan melalui pengembangan model matematis dan simulasi proses sistem yeast terenkapsulasi. Selain itu, proses enkapsulasi sukar dan mahal karena menggunakan bahan yang *viable cell-friendly* dan bersifat semipermeabel. Yeast terenkapsulasi berukuran relatif kecil dan memerlukan kondisi lingkungan yang tepat sehingga dalam analisis semakin sukar dilakukan baik secara pembelahan langsung maupun penembakan sinar sebuah gelombang (Talebnia, 2008).

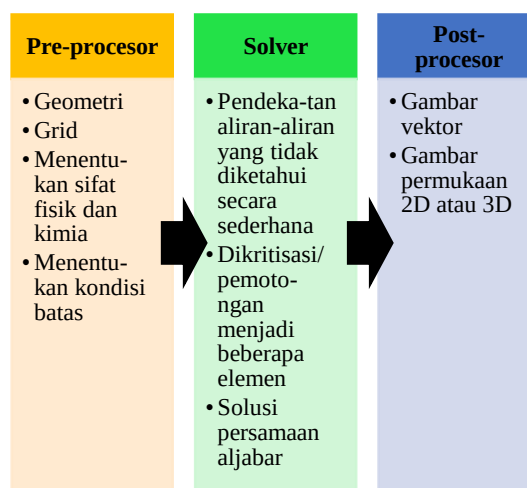
Computational fluid dynamics (CFD) dapat digunakan sebagai pendekatan sistem yeast terenkapsulasi baik secara internal maupun eksternal. Dengan CFD dapat dibuat prototype virtual dan analisisnya untuk menambah pemahaman tentang yeast terenkapsulasi. CFD dapat digunakan untuk memprediksi kinerja yeast

terenkapsulasi berbasis konsep perpindahan massa glukosa sebagai substrat yeast (Anderson, 2008). CFD mampu menjawab pertanyaan “*how if*” dengan hanya mengubah parameter, geometri dan kondisi batas sehingga dapat diperoleh desain optimum. Dengan bantuan CFD diharapkan dapat menghemat biaya dan waktu riset. Tujuan penelitian ini adalah memprediksi batasan transfer massa glukosa internal dan memvisualisasikan kondisi internal yeast terenkapsulasi dalam aplikasi peningkatan produksi bioethanol berbahan baku biomassa lignoselulosa yang mengandung inhibitor terhadap aktivitas yeast dalam reaksi fermentasi menjadi etanol.

METODE PENELITIAN

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational fluid dynamics (CFD) memberikan prediksi kualitatif aliran fluida melalui pemodelan matematis yang diselesaikan dengan metode numeris menggunakan perangkat lunak. Pemodelan matematis yang diselesaikan dengan CFD tentunya pemodelan yang kompleks yaitu berupa persamaan diferensial parsial (PDP). PDP selanjutnya diselesaikan dengan metode numeris berupa metode *finite different*, *finite element* atau metode spektral. CFD memungkinkan ilmuwan dan insinyur melakukan percobaan numeris (simulasi komputer) dalam laboratorium virtual. Penggunaan CFD dalam lingkup teknik kimia meliputi polimerisasi, aliran multifasa reaktor, pemodelan reaksi, mixing dan proses-proses bioteknologi. CFD mengandung 3 elemen penting yaitu *pre-procesor*, *solver* dan *post-procesor* yang masing-masing tugasnya dijelaskan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Algoritma tahap operasional CFD

Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah Comsol Multiphysics 3.5. Comsol multiphysics adalah perangkat lunak yang

dapat menganalisis dan menyelesaikan berbagai aplikasi fisika dan teknik terutama dengan fenomena ganda (*multiphysics*). Comsol dapat dijalankan dalam berbagai system operasi (Windows, Mac, Linux). Adapun alasan penggunaan Comsol dalam penelitian ini, yaitu: program bersifat *user friendly* sehingga pengguna mudah memasukkan model, parameter, dan kondisi batas sesuai fenomena; program dapat dikombinasikan dengan Matlab.

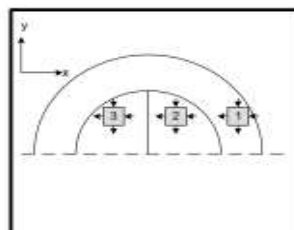
Comsol multiphysics menggunakan metode elemen hingga sebagai dasar perhitungannya. Metode Elemen Hingga (MEH) adalah suatu teknik numeris yang mampu menyelesaikan persamaan diferensial parsial (PDP) dan integral. Secara garis besar, MEH mengubah PDP menjadi persamaan ordiner (PDO) yang selanjutnya diintegrasikan numeris dengan metode Euler, Runge Kutta, dan lainnya.

Keakuratan CFD sangat bergantung pada jumlah sel pada grid suatu geometri. Semakin banyak jumlah sel yang dibuat maka semakin akurat perhitungan CFD. Namun tingginya sel mempengaruhi kemampuan perangkat keras computer. Penggunaan CFD yang tepat adalah ketika user mengerti fenomena fisik dan kimia yang terjadi pada model tersebut. Teknik *modelling* yang baik diperlukan dalam menentukan asumsi-asumsi sehingga kompleksitas masalah menjadi sederhana sehingga dapat dipecahkan. Kesuksesan suatu simulasi dan pemodelan sangat dipengaruhi oleh algoritma pemrograman yang dibangun terhadap aspek konvergensi, konsistensi dan stabilitas. Hasil

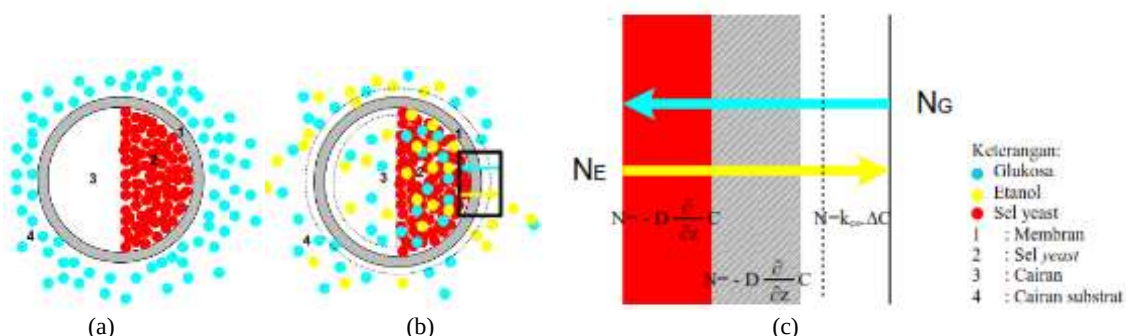
proses CFD yang konvergen menunjukkan nilai-nilai proses yang dibangun. Hasil CFD tidak langsung dapat disajikan melainkan perlu mempertimbangkan aspek-aspek nyata proses (Anderson, 2008).

Mekanisme Distribusi Glukosa Sistem Yeast Terenkapsulasi

Yeast terenkapsulasi tergolong sebagai biokatalis karena zat aktifnya berupa sel hidup untuk reaksi fermentasi glukosa menjadi etanol. Sistem yeast terenkapsulasi melibatkan proses perpindahan massa substrat (glukosa) ke dalam kapsul (Nielsen, 2002). Yeast terenkapsulasi berukuran sekitar $3,5 \cdot 10^{-3}$ m, berbentuk bulat dan terdapat dua bagian pada internal kapsul ditandai dengan warna bening dan putih keruh sebagaimana terlihat pada Gambar 2(a). Yeast terenkapsulasi merupakan sistem kompleks yang terdiri dari 3 bagian, yaitu membran pelapis, air dan padatan sel. Padatan sel tidak terdistribusi merata ke seluruh bagian kapsul melainkan menempel pada satu bagian dinding kapsul dan sisanya berisi air sebagai ruang ketika kepadatan sel meningkat karena pertumbuhannya. Sel dalam kapsul diasumsikan pseudo-homogen (membentuk sel aggregate) dan isentropic (memiliki sifat fisik yang sama di segala koordinat). Gambar 3(a) merupakan visualisasi yeast terenkapsulasi yang telah dimasukkan dalam lautan glukosa. Mekanisme transfer massa sistem yeast terenkapsulasi ditampilkan dalam Gambar 3.



Gambar 2. (a) Yeast Terenkapsulasi; (b) Geometri setengah penampang melintang yeast terenkapsulasi



Gambar 3. (a) Aplikasi yeast terenkapsulasi dalam wadah berisi glukosa; (b) visualisasi masuknya glukosa ke dalam kapsul ; (c) mekanisme perpindahan massa glukosa

Mekanisme glukosa untuk bisa sampai ke dalam padatan sel dan mekanisme etanol keluar kapsul ditunjukkan dalam Gambar 3. Mekanisme perpindahan massa glukosa meliputi:

- Perpindahan massa glukosa dari fase 4 ke fase 1 yaitu perpindahan massa glukosa dari badan utama cairan substrat ke permukaan luar kapsul
- Difusi glukosa melalui membran (fase 1) yaitu glukosa mendifusi melalui membran setebal t_c .
- Perpindahan massa di fase 2, yaitu glukosa berdifusi serta bereaksi secara simultan dalam padatan sel

Geometri dan Mesh



Gambar 4. Geometri setengah lingkaran sistem yeast terenkapsulasi (AB, 2008)

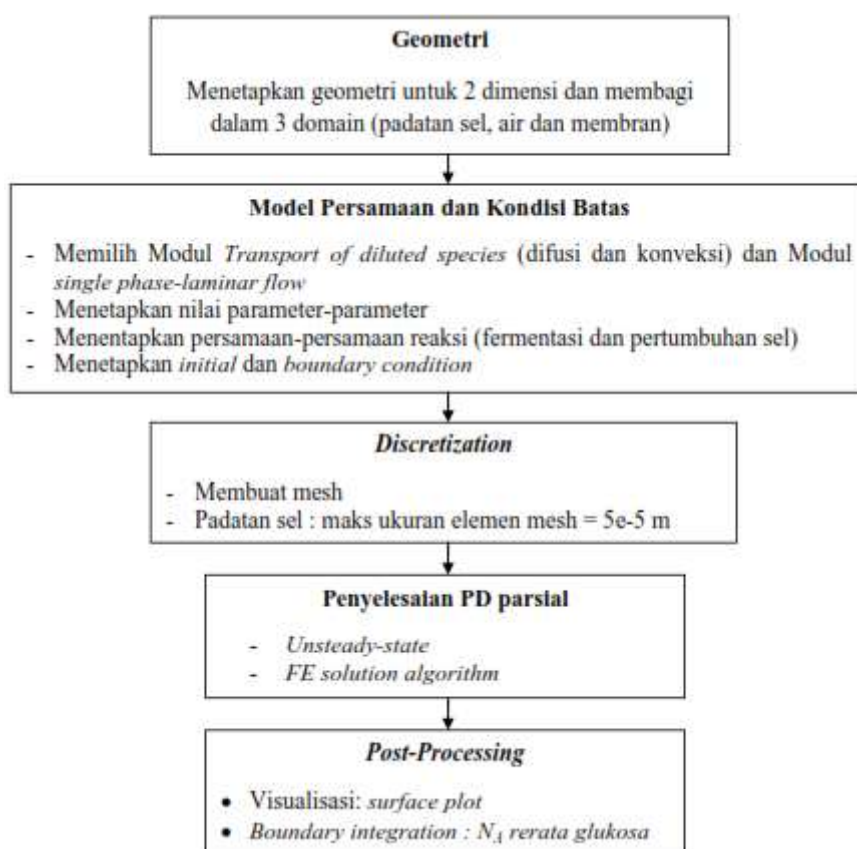
Yeast terenkapsulasi digambarkan dalam bentuk 2 dimensi yang terdiri dari 3 bagian (domain) yaitu padatan sel, air dan membran. Geometri kapsul digambarkan setengah bagian saja karena asumsi setengah bagian lainnya memiliki sistem yang sama. Geometri setengah lingkaran kapsul diletakkan pada posisi *axis symmetry*.

Kapsul berdiameter 3,5 mm dan tebal membran pelapis 0,17 mm. Mesh dibuat dalam masing-masing bagian dalam ukuran yang berbeda. Semakin kecil mesh maka semakin akurat hasil perhitungan numerisnya. Memperkecil mesh dihentikan ketika telah tercapai grid independent atau perubahan mesh tidak akan mempengaruhi perhitungan. Kelemahannya adalah kemampuan memperkecil mesh sangat dipengaruhi oleh kapasitas komputer.

Ukuran mesh maksimum ditentukan sebesar $5 \cdot 10^{-5}$ m. Geometri dalam yeast terenkapsulasi ditunjukkan dalam Gambar 4.

Algoritma simulasi dalam Cmsol Multiphysic

Algoritma pemrograman dan simulasi sistem yeast terenkapsulasi menggunakan perangkat lunak Cmsol Multiphysics 3 ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Algoritma pemodelan dan simulasi dengan perangkat lunak Cmsol Multiphysic 3.5a

Penyusunan Model Matematis

Model perpindahan massa glukosa didiferensiasikan dari neraca massa glukosa berdasarkan model umum proses kecepatan (*rate process*) dan model difusi Fick yang berturut-turut dijabarkan dalam persamaan (1) dan (2)

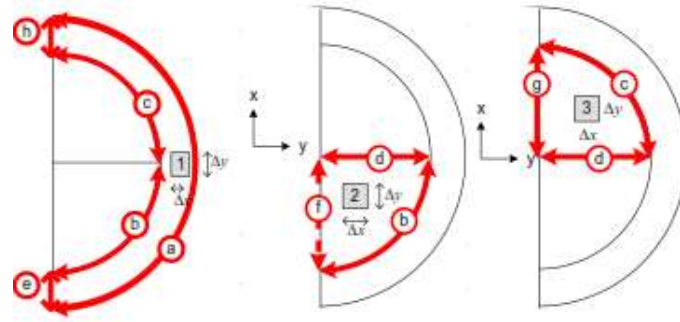
$$N_G = k_{co} \Delta(\text{konsentrasi}) \quad (1)$$

$$N_G = -D_{AB} (\nabla C_G) \quad (2)$$

dengan N_G = fluks massa glukosa ($\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$); (∇C_G) = gradien konsentrasi (terhadap arah x dan y ($\text{g/L} \cdot \text{m}$);

D_{AB} = koefisien difusivitas A di dalam B (m^2/s); k_{co} = koefisien perpindahan massa glukosa dari cairan luar kapsul ke permukaan membran (m/s).

Geometri yeast terenkapsulasi untuk pemodelan akan disederhanakan dari bentuk nyata kapsul Gambar 2(a) menjadi bentuk dua dimensi aksialsimetris yang terdiri dari elemen-elemen volum cairan, padatan dan yeast terenkapsulasi.



Gambar 6. Elemen volum bagian-bagian kapsul, (a) Membran pelapis; (b) Padatan sel; (c) Cairan

Asumsi pemodelan meliputi:

1. Substrat mendifusi ke dalam kapsul dan bereaksi dengan sel yeast
2. Ukuran kapsul tetap selama fermentasi
3. Padatan sel memiliki volume tetap dan menempel pada satu bagian dinding dalam kapsul
4. Pertumbuhan sel pada kondisi arob berjalan cepat sehingga meningkatkan volum aggregate sementara kondisi anaerob sel berfungsi utama memproduksi etanol
5. Sel di dalam kapsul bersifat homogen dan isentropic. Immobilisasi sel menyebabkan sel membentuk aggregate

Neraca massa glukosa pada elemen volume membran:

$$\left(\text{Rate of input} \right) - \left(\text{Rate of output} \right) \pm \left(\text{Rate of generation} \right) = \left(\text{Rate of accumulation} \right)$$

$$(N_{G1}|_x - N_{G1}|_{x+\Delta x})\Delta y \cdot z - (N_{G1}|_y - N_{G1}|_{y+\Delta y})\Delta x \cdot z =$$

$$= \Delta x \cdot \Delta y \cdot z \frac{\partial C_{G1}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{G1}}{\partial t} + \nabla \cdot (D_{Gm} \nabla C_{G1}) = 0 \quad (4)$$

Tabel 1. Kondisi Batas sistem elemen volum membran

Lokasi	Neraca Massa
a	$N_1 = k_{co}(c_{Gb} - c_{Gso})$
b	$N_1 = N_2$
c	$N_1 = N_3$
e & h	$(-D_{Gm} \nabla C_{G1}) = 0$

Neraca massa glukosa pada elemen volume padatan sel:

$$(N_{G2}|_x - N_{G2}|_{x+\Delta x})\Delta y \cdot z - (N_{G2}|_y - N_{G2}|_{y+\Delta y})\Delta x \cdot z - r_G \Delta x \cdot \Delta y \cdot z$$

$$= \Delta x \cdot \Delta y \cdot z \frac{\partial C_{G2}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{G2}}{\partial t} + \nabla \cdot (D_{Gc} \nabla C_{G2}) = -r_G \quad (6)$$

Tabel 2. Kondisi Batas sistem elemen volum padatan sel

Lokasi	Neraca Massa Glukosa	Neraca Massa Sel
b	$N_1 = N_2$	
d	$N_2 = N_3$	$(\nabla C_{G2}) = 0$
f	$(-D_{Gm} \nabla C_{G2}) = 0$	

Neraca massa glukosa elemen volume air:

$$\left\{ v_x A_x C_{G3}|_x + v_y A_y C_{G3}|_y + (N_{G3}|_x A_x + N_{G3}|_y A_y) \right\} - \left\{ v_x A_x C_{G3}|_{x+\Delta x} + v_y A_y C_{G3}|_{y+\Delta y} + (N_{G3}|_{x+\Delta x} A_x + N_{G3}|_{y+\Delta y} A_y) \right\} : \quad (7)$$

$$\frac{\partial c_{G3}}{\partial t} + v \cdot \nabla C_{G3} = \nabla \cdot (D_{G3} \nabla C_{G3}) \quad (8)$$

Tabel 3. Kondisi Batas sistem elemen volum cairan

Lokasi Neraca massa glukosa		Neraca momentum glukosa
c	$N_1 = N_3$	
d	$N_2 = N_3$	$\nabla \cdot (\rho v) = 0$
g	$(-D_{Gm} \nabla C_{G3}) = 0$	

Menentukan Parameter yang Diketahui

Dalam simulasi model perpindahan massa sistem yeast terenkapsulasi, dibutuhkan beberapa parameter simulasi. Parameter yang diperlukan terdapat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Pemodelan

Parameter	Simbol	Nilai
Diameter kapsul	dc	$3,5 \cdot 10^{-3}$ [m]
Tebal kapsul	tc	$1,7 \cdot 10^{-4}$ [m]
Koefisien perpindahan massa glukosa	k_{co}	$7,738 \cdot 10^{-7}$ [m/s]
% alginat		0,5%; 1%
Diffusivitas glukosa dalam membran	D_{Gm}	$6,63 \cdot 10^{-10}$ [m/s]; $6,58 \cdot 10^{-10}$ [m/s]
Diffusivitas glukosa dalam cairan	D_{Gw}	$6,9 \cdot 10^{-10}$ [m/s]

Tabel 4. Lanjutan

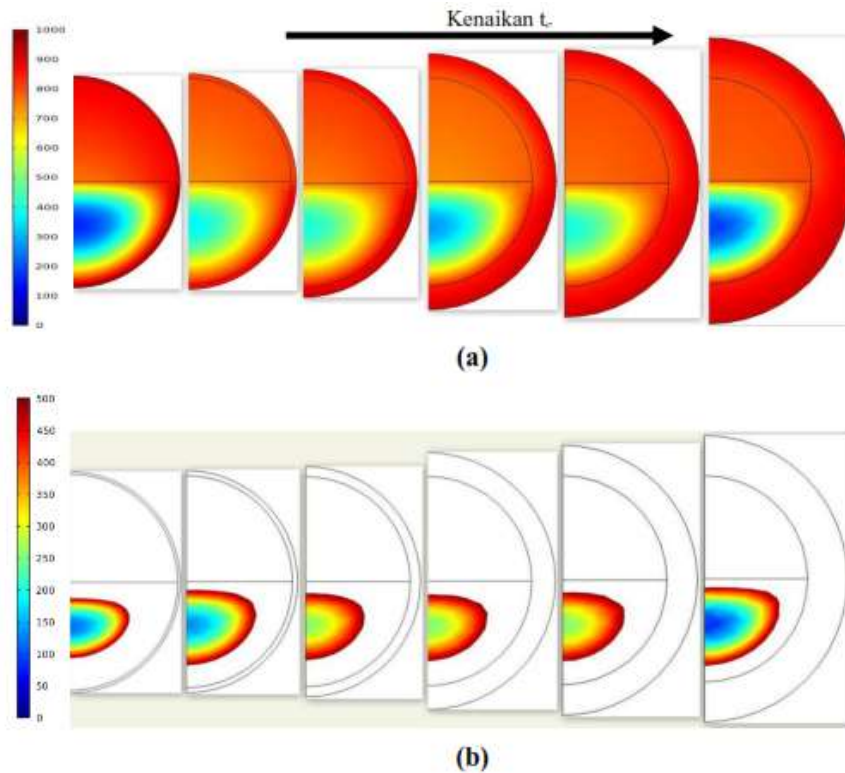
Diffusivitas glukosa dalam sel (<i>aggregate</i>)	D_{Gx}	$1,1 \cdot 10^{-10}$ [m/s]
Laju maksimum konsumsi glukosa	V_{maks}	$1,80556 \cdot 10^{-6}$ [mol/m ³ .s]
Konstanta Michaelis-Menten	K_m	1 [mol/m ³]
Kecepatan reaksi pertumbuhan spesifik maksimum	μ_{maks}	$5,167 \cdot 10^{-5}$ [s ⁻¹]; $7,417 \cdot 10^{-5}$ [s ⁻¹]; $3,5 \cdot 10^{-5}$ [s ⁻¹]
Konstanta Monod	K_s	$2,167 \cdot 10^{-3}$ [mol/L]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dan pemrograman menunjukkan pengaruh variasi tebal membran (Gambar 7) dan volum padatan sel (*aggregate* sel) di dalam kapsul. (Gambar 8). Optimasi sistem yeast terenkapsulasi adalah ukuran ketebalan membran kapsul. Pada dasarnya, besarnya fluks massa glukosa adalah berbanding terbalik dengan tebal membran. Gambar 7 menunjukkan adanya gradien konsentrasi glukosa pada domain padatan sel yang berarti bahwa terdapat pengaruh reaksi di dalamnya. Hal ini dapat dilihat dari profil konsentrasi glukosa di domain padatan sel dan domain cairan. Pada zona membran di bagian yang ditempeli sel memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dari bagian cairan.

Pertimbangan pemilihan ukuran tebal optimum kapsul dapat didasarkan pada aspek ketahanan membran dan viabilitas sel. Dalam perkembangan metode imobilisasi, dijumpai kelemahan-kelemahan terhadap ketahanan membran pelapis terhadap kebocoran dan daya tembus sel di dalam membran (Chang, 1964).

Simulasi variasi volum sel *aggregate* dalam kapsul diharapkan dapat menjadi tolak ukur pengembangan pengukuran performansi yeast terenkapsulasi lebih lanjut. Gambar 8 menunjukkan distribusi glukosa tampak lebih stabil pada 50% volum sel *aggregate* dengan laju transfer massa $4.5 \cdot 10^{-5}$.



Gambar 7. Pengaruh variasi tebal membran (t_c) terhadap distribusi glukosa (a) internal sistem terenkapsulasi (b) bagian padatan sel (*aggregate* sel) (Hamdi, 1995)

Difusivitas	25%-sel <i>aggregate</i>	50%- sel <i>aggregate</i>	75%- sel <i>aggregate</i>	100%- sel <i>aggregate</i>	Skala
$D_m = 1\%$ D_w $D_c = 10\%$ D_w					Max: 1000 0 Min: 0
	$t = 1667 \text{ min}$ $-r_s = 2.00.10^{-5}$	$t = 8150 \text{ min}$ $-r_s = 4.43.10^{-5}$	$t = 8167 \text{ min}$ $-r_s = 7.50.10^{-5}$	$t = 5000 \text{ min}$ $-r_s = 8.88.10^{-5}$	
$D_m = 10\%$ D_w $D_c = 1\%$ D_w					Max: 1000 0 Min: 0
	$t = 1663 \text{ min}$ $-r_s = 1.39.10^{-5}$	$t = 1370 \text{ min}$ $-r_s = 4.50.10^{-5}$	$t = 7667 \text{ min}$ $-r_s = 7.07.10^{-5}$	$t = 4933 \text{ min}$ $-r_s = 8.88.10^{-5}$	

Gambar 8. Pengaruh penambahan voume *aggregate* sel terhadap distribusi glukosa internal sistem yeast terenkapsulasi

KESIMPULAN

- Pemodelan perpindahan massa glukosa dapat merepresentasikan kondisi sistem yeast terenkapsulasi
- Batasan perpindahan massa glukosa dipengaruhi oleh kondisi kesetimbangan glukosa dan etanol dalam sistem batch

DAFTAR SIMBOL

- N_G = fluks molar glukosa dalam yeast terenkapsulasi ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 D = koefisien difusivitas (m^2/s)
 ∇ = operator diferensial vektor
 ∇C_G = gradien konsentrasi glukosa terhadap arah x dan arah y ($\text{mol/m}^3.\text{m}$)
 A = luas permukaan total luar kapsul (m^2)
 V_{Gb} = volum glukosa di larutan/ di luar kapsul (mL)
 c_{Gso} = konsentrasi glukosa di permukaan luar kapsul (mol/m^3)
 c_{Gsi} = konsentrasi glukosa di permukaan dalam kapsul (mol/m^3)
 c_{Gb} = konsentrasi glukosa di cairan luar kapsul (mol/m^3)
 c_{G3} = konsentrasi glukosa di cairan (mol/m^3)
 c_{G2} = konsentrasi glukosa dalam padatan sel (mol/m^3)
 D_{Gm} = difusivitas glukosa dalam membrane (m^2/detik)
 D_{Gx} = difusivitas glukosa dalam padatan sel (m^2/detik)
 D_{Gw} = difusivitas glukosa dalam air (m^2/detik)
 N_{G1} = fluks molar glukosa pada elemen volum membran ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 N_{G2} = fluks molar glukosa pada elemen volum padatan sel ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 N_{G3} = fluks molar glukosa pada elemen volum cairan ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 $\frac{\partial c_{G1}}{\partial t}$ = perubahan konsentrasi glukosa dalam membran terhadap waktu ($\text{mol/m}^3.\text{detik}$)
 $\frac{\partial c_{G2}}{\partial t}$ = perubahan konsentrasi glukosa dalam padatan sel terhadap waktu ($\text{mol/m}^3.\text{detik}$)
 $\frac{\partial c_{G3}}{\partial t}$ = perubahan konsentrasi glukosa dalam cairan terhadap waktu ($\text{mol/m}^3.\text{detik}$)
 ∇c_{G1} = perubahan konsentrasi glukosa arah x dan y dalam membran (mol/m^4)
 ∇c_{G2} = perubahan konsentrasi glukosa arah x dan y dalam padatan sel (mol/m^4)
 ∇c_{G3} = perubahan konsentrasi glukosa arah x dan y dalam cairan (mol/m^4)
 N_1 = fluks normal total glukosa dalam membran ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 N_2 = fluks normal total glukosa di padatan sel ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 N_3 = fluks normal total glukosa di cairan

- ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 k_{co} = koefisien perpindahan massa glukosa dari cairan luar kapsul ke permukaan membran (m^2/s)
 n_x = fluks glukosa arah x dalam membran ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 n_y = fluks glukosa arah y dalam membran ($\text{mol/m}^2.\text{s}$)
 $(-r_G)$ = laju berkurangnya substrat glukosa ($\text{mol/m}^3.\text{s}$)
 V_{maks} = laju maksimum konsumsi glukosa ($\text{mol/m}^3.\text{s}$)
 K_m = konstanta Michaelis-Menten (mol/m^3)
 r_g = kecepatan pertumbuhan sel ($\text{mol/m}^3.\text{s}$)
 μ = kecepatan pertumbuhan spesifik sel (s^{-1})
 c_x = konsentrasi sel (mol-sel/m^3)
 K_s = konstanta Monod (mol/m^3)
 μ_m = kecepatan pertumbuhan spesifik maksimum sel (s^{-1})
 $(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y})v$ = gradien kecepatan arah x dan arah y (m/s.m)
 $(\frac{\partial}{\partial x}\tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y}\tau_{yx})$ = gradien fluks momentum xx terhadap arah x dan gradient fluks momentum yx terhadap arah y (kg.m/s.m)
 ρ = densitas (kg/m^3)
 $v_x ; v_y$ = kecepatan aliran (m/s)
 P = tekanan (atm)
 g_x = gaya gravitasi ke arah x; ke arah y (m/s^2)
 τ_{xx} = fluks momentum (shear stress) karena adanya gradien kecepatan x ke arah x (kg.m/s)
 $\frac{\partial P}{\partial x} ; \frac{\partial P}{\partial y}$ = perubahan tekanan terhadap arah x; arah y (atm)
 $\frac{Dv}{Dt}$ = perubahan substansial kecepatan terhadap waktu (m/s^2)

DAFTAR PUSTAKA

- AB, C. 2008. *Comsol Multiphysics 3.5a Documentation*.
 AHORSU, R., MEDINA, F., DAN CONSTANTIN, M 2018. Significance and Challenges of Biomass as a Suitable Feedstock for Bioenergy and Biochemical Production: A Review. *Energies*, 11, 3366.
 ANDERSON, B., RONNIE ANDRESSON, LOVE HÅKANSSON, MIKAEL MORTENSEN, RAHMAN SUDIYO, BEREND VAN WACHEM 2008. *Computational Fluid Dynamics for Chemical Engineers*, Gotheburg: u. n.
 CHANG, T., M.S 1964. Semipermeable Microcapsules. *Science*, 146, 524.

- HAMDI, M. 1995. Biofilm thickness effect on the diffusion limitation in the bioprocess reaction: Biofloc critical diameter significance. *Bioprocess engineering*, 193.
- LEMBAGA ILMU PENGETAHUAN INDONESIA (LIPI), P. P. B. 2017. Tidak Hanya dari Kayu, Sumber Lignoselulosa Juga Bisa dari Limbah.
- NIELSEN, J. 2002. *Bioreaction engineering principles*.—2nd ed/ Jens Nielsen, John Villadsen and Gunnar Liden.
- TALEBNIA, F. A. M. J. T. 2006. In situ detoxification and continuous cultivation of dilute-acid hydrolyzate to ethanol by encapsulated *S. cerevisiae*. *J Biotechnol* 125, 377-384.
- TALEBNIA, F. A. M. J. T. 2008. Ethanol Production from Cellulosic Biomass by Encapsulated *Saccharomyces cerevisiae*. *Chalmers University of Technology, Dep. of Chemical and Biological Engineering*.