



## Mekanisme *Fouling* pada Membran Mikrofiltrasi Mode Aliran Searah dan Silang

Iqbal Shalahuddin<sup>1</sup> dan Yusuf Wibisono<sup>2,3,\*</sup>

<sup>1</sup>Kurita Indonesia PT, Jalan Jababeka XIIA No. V-6, Cikarang Utara, Bekasi 17530

<sup>2</sup>MILI Water Research Institute, PO Box 301 ML, Malang 65101

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Bioproses, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Jalan Veteran 1, Malang 65145

\*Alamat korespondensi: [Y\\_Wibisono@ub.ac.id](mailto:Y_Wibisono@ub.ac.id)

(Submisi: 3 November 2019; Revisi: 31 Januari 2019; Penerimaan: 7 Februari 2019)

### ABSTRACT

*Microfiltration is a low pressure driven membrane process of about 1 bar trans-membrane pressure which is used frequently for separating dissolved particles within 0.1 to 10  $\mu\text{m}$  size. Microfiltration membranes are utilized in water and wastewater treatment processes either during pretreatment, treatment, or post-treatment steps. Moreover in bioprocessing, microfiltration is used in upstream process for substrate sterilization or in downstream process for microbial suspension separation. Fouling is one major concern of membrane filtration processes, including microfiltration. In this article, the fouling mechanism on microfiltration membrane is explained based on the blocking model refer to cake filtration due to the complexity of fouling phenomena. Fouling mechanism on dead-end and cross-flow modes microfiltration are explained, and basically distinguished into four different mechanisms, i.e. complete blocking, standard blocking, intermediate blocking and cake filtration. The proposed models are based on constant pressure operation on the uniform membrane pores, both for dead-end and cross-flow modes. Cross-flow mode, however, is restricted on the beginning of filtration until critical flux condition is reached.*

*Keywords: bioprocess; blocking model; cake filtration; fouling; microfiltration; wastewater*

### ABSTRAK

Membran mikrofiltrasi merupakan salah satu teknologi membran yang menggunakan tekanan rendah sekitar 1 bar sebagai gaya pendorong dan digunakan untuk proses pemisahan partikel terlarut yang berukuran antara 0,1 hingga 10  $\mu\text{m}$ . Membran mikrofiltrasi banyak digunakan baik dalam proses pra-pengolahan, pengolahan, maupun pasca-pengolahan air dan air limbah. Pada bioproses, mikrofiltrasi juga digunakan pada proses hulu untuk sterilisasi substrat atau pada proses hilir untuk pemisahan suspensi mikrob. Masalah yang paling utama dalam proses filtrasi membran adalah *fouling*. Dalam artikel ini, mekanisme terjadinya *fouling* pada membran mikrofiltrasi dijelaskan dengan menggunakan model pemblokiran yang mengacu pada filtrasi deposit partikel (*cake*) untuk menguraikan kerumitan fenomena *fouling* dalam mikrofiltrasi. Pada tulisan ini dijelaskan lebih rinci mengenai mekanisme *fouling* baik pada mikrofiltrasi searah (*dead-end*) maupun aliran silang (*cross-flow*). Mekanisme *fouling* pada proses mikrofiltrasi bisa dimodelkan dengan empat model yaitu pemblokiran pori, penyempitan pori, pemblokiran pori bersamaan dengan endapan permukaan dan formasi endapan permukaan. Mekanisme tersebut berlaku pada kondisi operasional bertekanan tetap dan ukuran pori yang seragam, baik pada aliran searah ataupun silang. Hanya saja, model mekanisme pada aliran silang hanya berlaku pada kondisi awal filtrasi hingga tercapai kondisi fluks kritis.

**Kata kunci:** air limbah; bioproses; filtrasi *cake*; *fouling*; mikrofiltrasi; model pemblokiran

DOI: 10.22146/jrekpros.40458

Copyright © 2019 THE AUTHOR(S). This article is distributed under a Creative Commons Distribution-ShareAlike 4.0 International license.

e-ISSN 2549-1490 p-ISSN 1978-287X

## 1. Pendahuluan

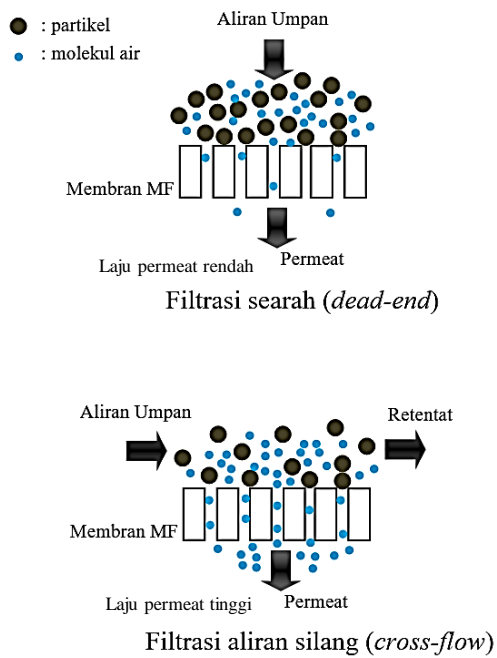
Mikrofiltrasi merupakan salah satu teknologi membran yang menggunakan gaya dorong tekanan rendah sekitar 1 bar dan dipakai untuk memisahkan partikel terlarut yang berukuran antara 0,1 hingga 10  $\mu\text{m}$  (Wibisono, 2014a). Di awal pemanfaatannya secara komersial, membran mikrofiltrasi digunakan untuk menyaring mikroorganisme yang ada di dalam air minum untuk diselidiki pertumbuhan mikroba sebagai metode cepat memonitor kontaminasi. Seiring dengan waktu, saat ini membran mikrofiltrasi telah banyak digunakan untuk sterilisasi baik di industri farmasi maupun perusahaan makanan dan minuman, juga di pengolahan air untuk menghasilkan air ultra murni di industri elektronik (Devianto dkk., 2018; Wibisono dkk., 2018a). Walau demikian, kebanyakan membran mikrofiltrasi digunakan untuk memfilter mikroorganisme, khususnya bakteri untuk dihilangkan atau dimanfaatkan.

Material penyusun membran mikrofiltrasi dapat berasal dari material organik atau anorganik. Polimer merupakan material organik yang banyak dipakai. Sedangkan material anorganik berupa membran keramik yang diantaranya terbuat dari material alumina, zirkonia, itrium, dan titanium. Beberapa jenis polimer yang sering dimanfaatkan untuk membran mikrofiltrasi antara lain: polisulfon (PS), polipropilen (PP), poli-viniliden florida (PVDF), polikarbonat (PC), poli-vinil klorida (PVC), dan poli-akrilo nitril (PAN). Beragam jenis polimer tersebut bisa difabrikasi menjadi dua macam filter yaitu tipe kedalaman (*depth filter*) dan tipe penyaring (*screen filter*) (Baker, 2004). Jika dibandingkan antara morfologi polimer penyusunnya, membran mikrofiltrasi dapat dibedakan menjadi membran berpori simetrik (*symmetric porous membrane*) yang umumnya berukuran sekitar 1–10  $\mu\text{m}$ , dan membran berpori asimetrik (*asymmetric porous membrane*) yang biasanya berukuran 0,1–1  $\mu\text{m}$ . Perbedaan ukuran pori-pori ini sangat penting diperhatikan dalam pemilihan membran mikrofiltrasi yang tepat untuk sebuah proses pemisahan, karena prinsip pemisahan dalam

membran mikrofiltrasi didasarkan pada ukuran partikel yang akan dipisahkan (*size exclusion*) atau berdasarkan mekanisme transport saringan (*sieving*).

Salah satu masalah yang biasa muncul pada proses membran adalah penumpukan material atau partikel di permukaan membran yang dinamakan *fouling*. *Fouling* akan menurunkan laju perpindahan massa atau volume melalui membran (*flux*) sehingga berpengaruh pada penurunan akumulasi produk (*permeate*). Walaupun terjadinya *fouling* ini akan meningkatkan tingkat pemisahan (*rejection*) pada mikrofiltrasi, namun menurunnya fluks merupakan suatu kerugian pada sebuah proses pemisahan menggunakan mikrofiltrasi ini. *Fouling* dapat dibedakan dari jenis partikel pemicu *fouling* (*foulant*) yaitu material organik, anorganik, atau biologis (Wibisono dkk., 2016). Pada mikrofiltrasi, ketiga jenis *fouling* tersebut bisa terjadi, khususnya pada rentang ukuran partikel antara 0,1 hingga 10  $\mu\text{m}$ .

*Fouling* harus dikontrol dan diatasi untuk meningkatkan efisiensi proses mikrofiltrasi, baik dengan pendekatan peningkatan sifat anti *fouling* pada material penyusun membran (Wibisono dkk. 2018b), maupun optimasi proses pada membran filtrasi (Wibisono dkk. 2014b). Khusus untuk optimasi proses, pengetahuan tentang mekanisme *fouling* pada mikrofiltrasi harus dipahami, sehingga dapat mengurangi tingkat terjadinya *fouling* atau strategi proses apa yang paling tepat untuk mengurangi dampak negatif terjadinya *fouling*. Salah satu optimasi proses yang dapat dilakukan adalah memilih mode operasi yaitu mode filtrasi aliran searah (*dead-end*) atau mode filtrasi aliran silang (*cross-flow*). Filtrasi aliran searah terjadi saat cairan umpan (*feed*) mengalir dalam satu arah tegak lurus terhadap permukaan membran (*normal flow*) sehingga partikel akan berakhir dan tertahan di atas permukaan membran. Di lain pihak, filtrasi aliran silang terjadi saat cairan umpan mengalir sejajar dengan aliran cairan produk (*tangential flow*), sehingga mengurangi potensi *fouling* pada permukaan membran. Gambar 1 menampilkan skema dari kedua mode operasi pada mikrofiltrasi.



**Gambar 1.** Proses filtrasi aliran searah dan aliran silang

Namun demikian, pemilihan mode operasi saja tidak cukup untuk memahami *fouling* pada mikrofiltrasi, sehingga diperlukan pendekatan teoritis untuk memahami *fouling*. Teori model pemblokiran merupakan salah satu pendekatan teori *fouling* yang mudah dipergunakan untuk memahami *fouling* pada mikrofiltrasi. Broeckmann dkk. (2006) melakukan simulasi dengan mempertimbangkan adanya interaksi gaya tarik antara partikel dan permukaan membran, beserta pengaruh dari distribusi ukuran partikel dan ukuran pori-pori membran terhadap fenomena *fouling* pada membran hollow fiber untuk pengolahan limbah. Grenier dkk. (2008) telah menganalisis dan menghitung secara baik menggunakan model pemblokiran untuk memahami mekanisme *fouling* pada mikrofiltrasi aliran searah berdasarkan persamaan matematis hubungan antara waktu filter dan volume filter, model ini sesuai dengan data pengujian di lapangan. Sedangkan Field dkk. (1995) mencoba mengenalkan konsep fluks kritis yang terjadi pada mikrofiltrasi aliran silang, model pemblokiran pada aliran searah dimodifikasi persamaan matematisnya untuk memahami mekanisme *fouling* yang terjadi pada aliran silang.

Tulisan ini menelaah tentang mekanisme *fouling* pada mikrofiltrasi dengan pendekatan teori model pemblokiran. Telaah akan dimulai dengan memaparkan beberapa studi terkait mekanisme *fouling* dengan model foulan, dilanjutkan dengan penjelasan mekanisme *fouling* pada mikrofiltrasi aliran searah dan aliran silang dengan pendekatan model pemblokiran.

## 2. Studi Mekanisme *Fouling* dengan Model Foulan

Secara umum membran mikrofiltrasi digunakan untuk filtrasi mikroorganisme, oleh sebab itu studi tentang mekanisme *fouling* pada mikrofiltrasi dilakukan dengan menggunakan model foulan yang berasal dari mikroorganisme atau material biologis lainnya. Jenis mikroorganisme yang paling banyak digunakan untuk mengetahui proses *fouling* pada membran mikrofiltrasi adalah sel ragi atau *Saccharomyces cerevisiae*. Sel ragi merupakan organisme sel-tunggal dan salah satu organisme eukariota paling sederhana yang setiap selnya memiliki satu inti-sel, sehingga penanganannya mudah untuk penelitian dan menjadi organisme model biologi di abad 21 (Botstein dan Fink, 2011). Selain itu, sel mikroorganisme memiliki kemampuan pemampatan (*compressibility*), sehingga *cake* yang terbentuk akibat dari akumulasi mikroorganisme yang tertahan diatas permukaan membran dipengaruhi oleh pemampatan ini, dan sel ragi dapat digunakan secara mudah untuk melihat proses pemampatan tersebut. Pemampatan *cake* untuk setiap suspensi akan berbeda-beda dan diukur berdasarkan resistansi spesifik *cake*. Beberapa faktor yang mempengaruhi resistansi spesifik *cake* pada suspensi mikrob diantaranya adalah ukuran sel, bentuk sel, tekanan operasional, sifat permukaan sel, komponen media, serta interaksi antara sel dengan sel atau sel dengan media (Foley, 1995; Shalahuddin, 2008). Banyak penelitian yang menggunakan sel ragi untuk mengamati terjadinya *fouling* di membran mikrofiltrasi.

**Tabel 1. Studi *fouling* pada mikrofiltrasi menggunakan sel ragi sebagai foulan**

Peneliti	Tahun	Hasil Penelitian
Chen dkk.	2010	Teknik uji sensor dapat digunakan untuk mengukur ketebalan layar <i>fouling</i> secara <i>in-situ</i> , analisis dinamik struktur lapisan <i>fouling</i> , dan memonitor kualitas air
Gabrus dan Szaniawska	2009	Polarisasi konsentrasi dan fenomena <i>fouling</i> pada suspensi ragi pada mikrofiltrasi dapat dikontrol dengan cara <i>backflushing</i> selama 60 detik dan frekuensi 600 detik.
Ogunbiy dkk.	2008	Siklus pencucian <i>fouling</i> ragi pada mikrofiltrasi menggunakan alkali, hipoklorit, dan asam menunjukkan peningkatan fluks seiring meningkatnya tekanan dan penurunan fluks seiring meningkatnya konsentrasi air umpan
Tung dkk.	2008	Struktur lapisan <i>fouling</i> pada mikrofiltrasi dapat dianalisis dan diprediksi dengan bantuan prototipe software FiltraDynaSim, dengan menunjukkan penurunan porositasnya disebabkan oleh pengaturan kembali partikel dan pemampatan lapisan <i>fouling</i> .
Chandler dan Zydney	2006	Pemilihan geometri pori membran yang tepat dapat meminimalkan terjadinya penurunan fluks dan mempertahankan selektivitas yang sangat tinggi.

Tabel 1 menunjukkan beberapa hasil penelitian yang mengamati karakteristik *fouling* yang menggunakan suspensi sel ragi sebagai model mikroorganisme. Selain dari sel ragi, beberapa peneliti juga menggunakan protein dan sakarida sebagai model, seperti *Bovine Serum Albumin* (BSA) (Bowen dkk., 1995), kasein,  $\beta$ -silodekstrin, asam tanik, (+)-katekin hidrat, xantan gum, pektin (Marroquin dkk., 2014) atau juga dengan produk yang diinginkan misalnya minuman anggur (Rayess dkk., 2012) dan Biotreated-POME (*Palm Oil Mill Effluent*) (Amosa dkk., 2017).

### 3. Mekanisme *Fouling* pada Filtrasi Searah

Pada filtrasi searah (*dead-end*), banyak teori model telah dikemukakan untuk memahami terjadinya *fouling*. Tulisan ini akan membahas model mekanisme pemblokiran (*blocking model*) karena memiliki kelebihan dengan teori model lainnya, yaitu sifatnya yang tidak ambigu maka kerumitan fenomena *fouling* dapat dijelaskan lebih mudah. Model mekanisme pemblokiran pertama kali diusulkan oleh Hermans dan Bredee (1936), yang kemudian ditinjau kembali oleh Hermia (1982). Model ini hanya berlaku saat kondisi pengoperasian bertekanan konstan, serta ukuran panjang dan diameter pori membran mikrofiltrasi seragam. Dikarenakan model pemblokiran mengacu pada terjadinya penurunan fluks seiring dengan waktu akibat dari penutupan pori-pori membran pada tekanan yang konstan,

sehingga persamaan matematis sederhananya dapat ditulis seperti Persamaan (1).

$$J = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

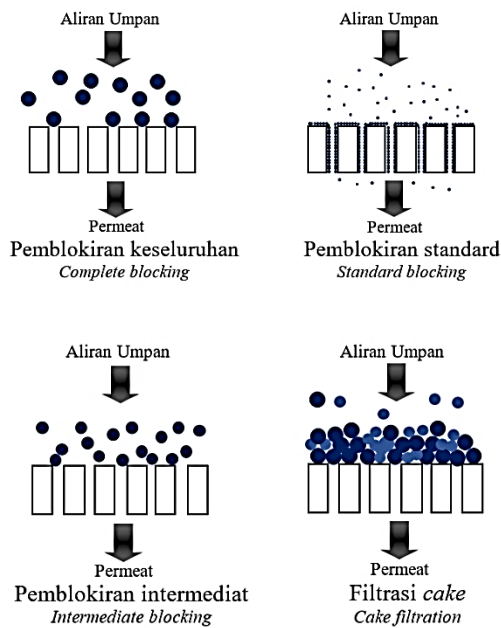
dengan  $J$  adalah fluks dengan satuan  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  atau  $\text{m/s}$ ,  $V$  adalah volume *permeate* ( $\text{m}^3$ ),  $t$  adalah waktu (s), dan  $A$  adalah luas permukaan membran ( $\text{m}^2$ ). Keempat model filtrasi mengacu pada bentuk turunan kedua-nya seperti ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$\frac{d^2t}{dV^2} = k \left( \frac{dt}{dV} \right)^n \quad (2)$$

dengan nilai  $n$  dan  $k$  adalah sifat-sifat dari model mekanisme *fouling*. Terdapat empat model mekanisme *fouling* berdasarkan nilai  $n$  nya, yaitu sebagai berikut (Bowen dkk., 1995):

1. Jika  $n = 2$ : maka terjadi pemblokiran keseluruhan (*complete blocking*)
2. Jika  $n = 1,5$ : maka terjadi pemblokiran standard (*standard blocking*)
3. Jika  $n = 1$ : maka terjadi pemblokiran *intermediate* (*intermediate blocking*)
4. Jika  $n = 0$ : maka terjadi filtrasi *cake* (*cake filtration*)

Skema keempat model mekanisme *fouling* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 dan selanjutnya keempat model akan dijelaskan secara lebih rinci.



Gambar 2. Empat model mekanisme pemblokiran pada membran mikrofiltrasi aliran searah

### 3.1 Pemblokiran Keseluruhan

Pemblokiran keseluruhan terjadi pada saat partikel yang tertahan di atas permukaan membran lebih besar dari diameter pori ( $d_{partikel} > d_{pori}$ ). Ukuran partikel yang lebih besar akan menutupi keseluruhan pori dan fluks akan menurun, sehingga terjadi mekanisme pemblokiran keseluruhan. Partikel yang telah menutupi pori tidak dapat digantikan atau digeser tempatnya oleh partikel baru yang datang ke permukaan membran, sehingga proses *fouling* ini bersifat tetap dan jumlah penurunan fluks diukur dari jumlah pori yang tidak tertutup oleh partikel. Berdasarkan kondisi tersebut, maka dapat dihitung hubungan linear laju aliran volume selama periode waktu tertentu dengan Persamaan (3).

$$Q = Q_0 \cdot e^{-k_a t} \quad (3)$$

dengan  $Q$  dan  $Q_0$  adalah laju aliran volume pada periode waktu tertentu dan awal waktu ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), sedangkan  $k_a$  yaitu konstanta dari model pemblokiran keseluruhan ( $\text{s}^{-1}$ ). Nilai  $k_a = K_A J_0$ , dengan  $K_A$  yaitu permukaan membran yang terblokir per unit volume *permeate* yang melewati membran ( $\text{m}^2/\text{m}^3$  atau  $\text{m}^{-1}$ ). Sedangkan  $J_0$  yaitu fluks saat kondisi bersih sebelum terjadi pemblokiran atau di awal filtrat ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  atau  $\text{m/s}$ ) yang dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$J_0 = \frac{Q_0}{A_0} \quad (4)$$

dengan  $A_0$  merupakan permukaan pori membran awal atau dalam kondisi bersih sebelum terjadinya pemblokiran ( $\text{m}^2$ ). Total volume *permeate*,  $V$  ( $\text{m}^3$ ) yang dihasilkan pada waktu tertentu dapat dihitung dengan Persamaan (5).

$$V = \frac{Q_0}{k_a} [1 - e^{-k_a t}] \quad (5)$$

Sementara itu, Persamaan (5) harus berhubungan antara hasil data penelitian di lapangan dengan turunan volume pertama dan kedua seperti pada Persamaan (6).

$$\frac{d^2 t}{dV^2} = k_a \left( \frac{dt}{dV} \right)^2 \quad (6)$$

dengan nilai  $k = k_a = K_A J_0$ .

### 3.2 Pemblokiran Standar

Pemblokiran standar terjadi pada saat molekul yang tertahan lebih kecil dari diameter pori ( $d_{partikel} < d_{pori}$ ). Ukuran molekul yang lebih kecil dari pori-pori membran menyebabkan beberapa molekul akan teradsorpsi di dinding pori membran. Akumulasi molekul kecil ini secara bertahap akan memperkecil diameter pori, sehingga fluks yang dihasilkan seiring waktu akan semakin kecil. Mekanisme terjadi *fouling* ini disebut juga penyempitan pori (*pore constriction*). Pada fenomena mekanisme *fouling* ini, maka laju aliran volume selama periode waktu tertentu dapat dihitung dengan Persamaan (7).

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + k_b t)^2} \quad (7)$$

Nilai  $k_b$  yaitu konstanta pemblokiran standar ( $\text{s}^{-1}$ ) yang menunjukkan terjadinya penyempitan pori akibat akumulasi partikel di dalam dinding pori, nilainya dapat dihitung berikut  $k_b = K_B J_0$ , dengan  $K_B$  merupakan penurunan luas area pori per unit volume *permeate* yang melewati membran ( $\text{m}^2/\text{m}^3$  atau  $\text{m}^{-1}$ ). Dari persamaan tersebut dapat dihitung total volume *permeate* pada waktu tertentu menggunakan Persamaan (8).

$$V = \frac{Q_0 t}{1 + k_b t} \quad (8)$$



Karakteristik turunan kedua untuk fenomena pemblokiran standar ditunjukkan pada Persamaan (9).

$$\frac{d^2t}{dV^2} = \frac{2k_b}{\sqrt{Q_0}} \left(\frac{dt}{dV}\right)^{3/2} \quad (9)$$

sehingga nilai  $k = 2k_b / Q_0^{1/2} = 2K_B J_0^{1/2} / A_0^{1/2}$ .

### 3.2 Pemblokiran Intermediate

Model mekanisme *fouling* ini mirip dengan pemblokiran keseluruhan, yaitu molekul yang tertahan akan menutupi diameter pori ( $d_{partikel} \geq d_{pori}$ ). Akan tetapi, molekul mampu melakukan superposisi artinya molekul yang menutupi ini ada kemungkinan digeser dan digantikan oleh molekul baru yang datang ke permukaan membran dan selanjutnya menutupi pori membran. Pada fenomena pemblokiran *intermediate*, maka perhitungan laju aliran volume terhadap waktu menggunakan Persamaan (10).

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + k_a t)} \quad (10)$$

Oleh karena pemblokiran *intermediate* menyerupai pemblokiran keseluruhan dengan perbedaan terletak pada kemampuan terjadi superposisi molekul, sehingga konstanta yang digunakan sama yaitu  $k_a$  yang menunjukkan terjadinya penutupan pori oleh molekul di atas permukaan membran. Adapun perhitungan total volume *permeate* dihitung menggunakan Persamaan (11).

$$V = \frac{Q_0}{k_a} \ln(1 + k_a t) \quad (11)$$

Sehingga persamaan model mekanisme pemblokiran *intermediate* menjadi Persamaan (12).

$$\frac{d^2t}{dV^2} = \frac{k_a}{Q_0} \left(\frac{dt}{dV}\right) \quad (12)$$

dengan nilai  $k = k_a / Q_0 = K_A / A_0$ .

### 3.2 Pemblokiran Standar

Mekanisme yang terakhir yaitu filtrasi *cake*. Model ini menggambarkan bahwa endapan partikel atau *cake* akan terbentuk di atas permukaan membran akibat banyak

mikroorganisme atau molekul yang tertahan karena ukurannya lebih besar atau hampir sama dengan diameter pori membran. Ketebalan *cake* akan meningkat seiring dengan waktu akibat dari menumpuknya molekul-molekul di atas permukaan membran. Laju alir volume dihitung dengan Persamaan (13).

$$Q = \frac{Q_0}{\sqrt{1 + k_c t}} \quad (13)$$

dengan nilai  $k_c$  menunjukkan penutupan pori akibat terbentuknya *cake* di atas permukaan membran, dan nilainya yaitu  $k_c = (2R_r) K_C J_0$ . Adapun  $K_C$  menunjukkan area *cake* per unit total volume *permeate* ( $m^{-1}$ ) dan  $R_r = R_c / R_m$ , adalah rasio perbandingan resistansi *cake* ( $R_c$ ) terhadap resistansi membran saat masih bersih ( $R_m$ ). Total volume *permeate* didapat dari Persamaan (14).

$$V = \frac{2Q_0}{k_c} [\sqrt{1 + k_c t} - 1] \quad (14)$$

Adapun persamaan karakteristik filtrasi *cake* ditunjukkan dengan Persamaan (15).

$$\frac{d^2t}{dV^2} = \frac{k_c}{2Q_0^2} \left(\frac{dt}{dV}\right)^0 \quad (15)$$

dengan nilai  $k = k_c / 2Q_0^2 = R_r K_C / J_0 A_0^2$ .

Pada filtrasi searah untuk partikel yang tidak dapat dimampatkan (*incompressible*) maka perhitungan ketebalan *cake* sebanding dengan volume yang difilter dan nilai total resistansinya dihitung dengan Persamaan (16).

$$R = R_m + \alpha m = R_m + \frac{\alpha c_f V}{A} \quad (16)$$

dengan  $\alpha$  adalah resistansi spesifik *cake* (m/kg),  $m$  adalah massa *cake* per area unit, dan  $c_f$  adalah konstanta filtrasi *cake* sebagai sifat-sifat fisika *cake* ( $kg/m^3$ ). Seiring dengan waktu maka penurunan fluks pada filtrasi *cake* dapat ditulis persamaannya yakni Persamaan (17).

$$\frac{1}{J} - \frac{1}{J_0} = \frac{\alpha c_f}{J_0 R_m} \int_0^t dt \quad (17)$$

Untuk dapat membedakan setiap model mekanisme *fouling* pada membran mikrofiltrasi aliran searah berdasarkan persamaan matematisnya, Tabel 2 meringkas karakteristiknya berdasarkan nilai  $k$  dan  $n$ .

Tabel 2. Ringkasan nilai  $n$  dan  $k$  untuk model mekanisme *fouling* mikrofiltrasi aliran searah

Mekanisme <i>Fouling</i>	$n$	$k$	Hubungan bentuk linier	Konsep mekanisme
Pemblokiran keseluruhan ( <i>complete blocking</i> )	2	$k_a = K_A J_0$	$Q = f(V)$	Pemblokiran pori
Pemblokiran standar ( <i>standard blocking</i> )	1,5	$2k_b / Q_0^{1/2} = 2K_B J_0^{1/2} / A_0^{1/2}$	$Q^{1/2} = f(V)$	Penyempitan pori
Pemblokiran <i>intermediate</i> ( <i>intermediate blocking</i> )	1	$k_a / Q_0 = K_A / A_0$	$1/Q = f(t)$	Pemblokiran pori dan endapan permukaan
Filtrasi <i>cake</i> ( <i>cake filtration</i> )	0	$k_c / 2Q_0^2 = R_r K_C / J_0 A_0^2$	$1/Q = f(V)$	Formasi endapan permukaan

#### 4. Mekanisme Fouling pada Filtrasi Aliran Silang

Pada mikrofiltrasi aliran silang (*cross-flow*), fenomena *fouling* jauh lebih rumit dijelaskan dibandingkan pada aliran searah. Hal ini sama dengan model *Brownian back diffusion* yang dapat menggambarkan fluks yang teramati di aliran searah tetapi tidak untuk aliran silang karena hasil data penelitian di lapangan selalu lebih besar sehingga seringkali terjadi paradoks fluks. Mengacu pada model mekanisme pemblokiran di aliran searah, Field dkk. (1995) telah mengadaptasi perhitungan dari Hermia (1982) untuk digunakan pada aliran silang. Pendekatan ini cukup berhasil diterapkan pada mikrofiltrasi aliran silang. Fenomena *fouling* di awal filtrasi akan cenderung menyerupai aliran searah hingga tercapai fluks kritis dalam kondisi stabil (*steady-state*) saat tekanan yang diberikan konstan. Tulisan ini akan mengulas perhitungan model pemblokiran yang diadaptasikan pada filtrasi aliran silang. Untuk menghitung model persamaan yang umum untuk aliran silang, pertama akan ditulis ulang Persamaan (2) dengan memasukkan persamaan (1) sehingga didapat Persamaan (18).

$$-\frac{1}{A^2 J^3} \frac{dJ}{dt} = k \left( \frac{1}{AJ} \right)^n \quad (18)$$

Selanjutnya mengacu konsep Persamaan (18), akan didapat model persamaan yang berlaku untuk keempat model fenomena *fouling* pada mikrofiltrasi aliran silang seperti Persamaan (19).

$$-\frac{dJ}{dt} J^{n-2} = k(J_0 - J^*) \quad (19)$$

dengan nilai  $n$  dan  $k$  sebagai sifat fenomena *fouling* tiap model dengan nilai sama seperti pada aliran searah dengan  $n = 2$ : pemblokiran keseluruhan,  $n = 1,5$ : pemblokiran standar,  $n = 1$ : pemblokiran *intermediate*, dan  $n = 0$ : filtrasi *cake*. Untuk setiap kasus fenomena *fouling*, nilai  $J^*$  diartikan sebagai fluks kritis.

##### 4.1 Pemblokiran Keseluruhan

Diketahui bahwa pada filtrasi searah, untuk pemblokiran keseluruhan memiliki nilai  $n = 2$ , sehingga didapat  $-dJ/dt = kJ$ . Laju penghilangan partikel dari tempat masuk pori pada aliran silang akan ditambahkan. Kecepatan melalui pori yang tidak terblokir tidaklah berpengaruh, sehingga penurunan fraksi pada fluks akan sama dengan penurunan fraksi pada area terbuka. Maka persamaannya dapat ditulis seperti pada Persamaan (20).

$$\frac{dJ/dt}{J_0} = \frac{da/dt}{A_0} \quad (20)$$

Dengan  $a$  menunjukkan area yang terbuka ( $m^2$ ) atau pori yang tidak tertutupi oleh partikel, sedangkan  $A_0 = \varepsilon_0 A$ , sebagai area yang terbuka saat membran bersih dan  $\varepsilon_0$  diartikan porositas permukaan membran bersih. Adapun nilai  $a$  dapat dihitung dengan Persamaan (21).

$$a = A_0 - K_A V \quad (21)$$

Dengan menggabungkan Persamaan (20) dan (21), maka akan didapat nilai fluks seiring dengan waktu seperti ditunjukkan pada Persamaan (22).

$$\frac{dJ}{dt} = - \left( \frac{K_A A J}{A_0} \right) J_0 = - \left( \frac{K_A J_0}{\varepsilon_0} \right) J \quad (22)$$

Jika aliran silang mengarah pada laju penghilangan partikel secara konstan di tempat masuk pori, maka persamaan saat terjadi penurunan fluks di area yang terbuka dapat dimodifikasi menjadi Persamaan (23):

$$-\frac{da}{dt} = K_A A J - k_a A_0 \quad (23)$$

Dengan  $k_a$  merupakan sifat model pemblokiran keseluruhan berupa konstanta yang berhubungan dengan porositas membran dan laju penghilangan partikel per unit area ( $s^{-1}$ ), seperti halnya pada aliran searah. Oleh karena itu, Persamaan (23) dapat ditulis menjadi Persamaan (24).

$$\frac{dJ}{dt} = -\left(\frac{K_A J_0}{\varepsilon_0}\right)J + k_a J_0 \quad (24)$$

#### 4.2 Pemblokiran Standar

Untuk mendapatkan persamaan pada filtrasi aliran silang, maka penurunan rumus berasumsi bahwa volume pori menurun akibat dari pengendapan partikel di dalam pori untuk model mekanisme pemblokiran standar. Maka hubungan linier antara  $t$  dan  $t/V$  terjadi pada filtrasi aliran searah. Jika dibuat persamaan pada filtrasi aliran silang, didapat persamaan penurunan fluks seperti Persamaan (25).

$$\frac{1}{J^0} = \frac{1}{J_0^{0.5}} + \left(\frac{K_B}{2}\right)A^{0.5}t \quad (25)$$

Berdasarkan persamaan (18), nilai  $n = 3/2$  agar berlaku seperti yang didefinisikan oleh Hermia (1982) menjadi Persamaan (26).

$$-\frac{1}{A^2 J^3} \frac{dJ}{dt} = k \left(\frac{1}{AJ}\right)^{3/2} \quad (26)$$

Diasumsikan model mekanisme ini tidak akan berubah banyak pada aliran silang, disebabkan partikel yang mengendap di dalam internal pori tidak terpengaruh banyak oleh laju alir umpan.

#### 4.2 Pemblokiran Intermediate

Pada model mekanisme pemblokiran *intermediate*, bahwa setiap partikel ada kemungkinan terjadi superposisi sehingga hal ini diperhitungkan, maka persamaannya dapat ditulis seperti Persamaan (27).

$$\frac{1}{J} - \frac{1}{J_0} = K_A t \quad (27)$$

Dengan demikian dari Persamaan (27), dapat ditambahkan fluks aliran silang dengan faktor  $k_a$ , sehingga persamaannya menjadi seperti Persamaan (28).

$$-\frac{1}{J} \frac{dJ}{dt} = K_A J - k_a \quad (28)$$

#### 4.2 Filtrasi Cake

Model mekanisme filtrasi *cake* pada mikrofiltrasi aliran silang untuk partikel yang tidak bisa dimampatkan mengacu pada Persamaan (17). *Cake* dapat mengalami erosi sehingga Persamaan (16) dapat ditulis ulang menjadi Persamaan (29).

$$R = R_m + \alpha \left( \frac{c_f V}{A} - \int_0^t S dt \right) \quad (29)$$

dengan  $S$  adalah laju erosi dari *cake* per area unit ( $kg/m^2.s$ ). Diasumsikan  $S$  tidak berubah seiring dengan waktu, sehingga Persamaan (29) dapat ditulis menjadi Persamaan (30).

$$\frac{1}{J} - \frac{1}{J_0} = \frac{\alpha c_f}{J_0 R_m} \int_0^t J dt - \frac{\alpha S t}{J_0 R_m} \quad (30)$$

Denfan demikian, didapat Persamaan (31).

$$-\frac{1}{J^2} \frac{dJ}{dt} = \frac{\alpha c_f J}{J_0 R_m} - \frac{\alpha S}{J_0 R_m} \quad (31)$$

Jika dituliskan bahwa  $G = \alpha c_f / (J_0 R_m)$  dan  $J^* = S/c_f$ , maka Persamaan (31) dapat ditulis menjadi Persamaan (32).

$$-\frac{1}{J^2} \frac{dJ}{dt} = G(J - J^*) \quad (32)$$

dengan  $J^*$  sebagai fluks kritis.

Pada realitas di lapangan, biasanya terjadi lebih dari satu mekanisme *fouling* sehingga keempat model pemblokiran baik pada filtrasi searah maupun filtrasi aliran silang belum tentu sesuai jika hanya satu model yang digunakan.

### 5. Kesimpulan

Pada proses filtrasi menggunakan membran mikrofiltrasi, terdapat kemungkinan beberapa model mekanisme *fouling* yang dapat terjadi. Hal ini dipengaruhi oleh banyak faktor. Adapun model



pemblokiran dapat digunakan untuk menerangkan mekanisme *fouling* membran mikrofiltrasi saat kondisi operasional bertekanan tetap dan ukuran pori yang seragam baik panjang maupun diameternya. Secara garis besar, persamaan umum untuk model mekanisme *fouling* pada filtrasi aliran searah menggunakan membran mikrofiltrasi sebagai berikut:

$$\frac{d^2t}{dV^2} = k \left( \frac{dt}{dV} \right)^n$$

Persamaan umum untuk filtrasi aliran silang yang didasarkan pada kondisi awal filtrasi hingga tercapai fluks kritis dalam kondisi stabil dapat mengadopsi model pemblokiran pada filtrasi searah yaitu

$$-\frac{dJ}{dt} J^{n-2} = k(J_0 - J^*)$$

dengan nilai  $n$  dan  $k$  sebagai sifat fenomena *fouling* tiap model. Pada saat  $n = 2$  terjadi pemblokiran keseluruhan,  $n = 1,5$  terjadi pemblokiran standar,  $n = 1$  terjadi pemblokiran *intermediate*, dan  $n = 0$  terjadi filtrasi *cake*. Serta saat aliran silang  $J^*$  diartikan sebagai fluks kritis.

### Daftar Notasi

- $J$  : fluks *permeate* ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  atau  $\text{m/s}$ )  
 $J_0$  : fluks *permeate* di awal waktu ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  atau  $\text{m/s}$ )  
 $J^*$  : fluks kritis *permeate* pada aliran silang ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  atau  $\text{m/s}$ )  
 $V$  : volume *permeate* ( $\text{m}^3$ )  
 $A$  : luas permukaan membran ( $\text{m}^2$ )  
 $A_0$  : luas permukaan membran saat membran bersih ( $\text{m}^2$ )  
 $a$  : luas area permukaan membran yang tidak tertutupi partikel pada pemblokiran keseluruhan ( $\text{m}^2$ )  
 $n$  : derajat sifat *fouling* tiap model  
 $t$  : waktu (s)  
 $Q$  : laju aliran volume saat filtrasi ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $Q_0$  : laju aliran volume di awal waktu ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $k$  : sifat dari *fouling* tiap model  
 $k_a$  : konstanta dari model pemblokiran keseluruhan atau *intermediate* ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $k_b$  : konstanta dari model pemblokiran standar ( $\text{s}^{-1}$ )

- $k_c$  : konstanta dari model filtrasi *cake* ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $K_A$  : permukaan membran yang terblokir per unit volume *permeate* di pemblokiran keseluruhan atau *intermediate* ( $\text{m}^2/\text{m}^3$  atau  $\text{m}^{-1}$ )  
 $K_B$  : penurunan luas area pori per unit volume *permeate* ( $\text{m}^2/\text{m}^3$  atau  $\text{m}^{-1}$ )  
 $K_C$  : luas area *cake* per unit volume *permeate* ( $\text{m}^2/\text{m}^3$  atau  $\text{m}^{-1}$ )  
 $R$  : total resistansi saat filtrasi atau hidraulik resistansi ( $\text{m}^{-1}$ )  
 $R_r$  : rasio resistansi *cake* terhadap resistansi membran  
 $R_m$  : resistansi membran saat bersih ( $\text{m}^{-1}$ )  
 $R_c$  : resistansi *cake* saat terjadi filtrasi *cake* ( $\text{m}^{-1}$ )  
 $\epsilon_0$  : porositas permukaan membran  
 $c_f$  : konstanta filtrasi *cake* ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\alpha$  : resistansi spesifik *cake* ( $\text{m}/\text{kg}$ )

### Daftar Pustaka

- Amosa, M.K., Alkhatib M., Jami M.S., and Majozzi T., 2017, Cake compressibility analysis of BPOME from a hybrid adsorption-microfiltration process, Water Environ. Res., 292-300.  
Baker, R.W., 2004, Membrane Technology and Applications, John Willey & Sons, Ltd, second ed, Sussex, England.  
Botstein, D., and Fink, G.R., 2011, Yeast: an experimental organism for 21st century biology, Genetics, 189, 695-704.  
Bowen, W.R., Calvo, J.I., and Hernández, A., 1995, Steps of membrane blocking in flux decline during protein microfiltration, J. Membr. Sci., 101, 153-165.  
Broeckmann, A., Busch, J., Wintgens, T., and Marquardt, W., 2006, Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment, Desalination, 189, 97-109.  
Chandler, M., and Zydny, A., 2006, Effects of membrane pore geometry on fouling behavior during yeast cell microfiltration, J. Membr. Sci., 285, 334-342.  
Chen, W.H., Hsieh, Y.H., Tung, K.L., Li, Y.L., Lai, S.C., and Lin, S.J., 2010, An integrated

- fouling monitoring technique for a water treatment microfiltration process, *Chem. Eng. Technol.*, 33 (8), 1269-1275.
- Devianto, L.A., Aprilia, D.N., Indriani D.W., Sukarni, S., Sumarlan, S.H., Wibisono, Y. (2018) Marine microalga *Nannochloropsis oculata* biomass harvesting using ultrafiltration in cross-flow mode, *IOP Conf Ser Earth Environ*, 131 (1), 012042.
- Field, R.W., Wu, D., Howell, J.A., and Gupta, B.B., 1995, Critical flux concept for microfiltration fouling, *J.Membr. Sci.*, 100, 259-272.
- Foley G, 2006, A review of factors affecting filter cake properties in dead-end microfiltration of microbial suspensions, *J. Membr. Sci.*, 274, 38-46.
- Gabrus, E., and Szaniawska, D., 2009, Application of backflushing for fouling reduction during microfiltration of yeast suspensions, *Desalination*, 240, 46-53.
- Grenier A, Meireles M, Aimar P, Carvin P. 2008. Analysing flux decline in dead-end filtration. *Chem. Eng. Res. Des.*, 86, 1281-1293.
- Hermans, P.H., and Bredee, H.L., 1936, Principles of the mathematical treatment of constant pressure filtration, *J.Soc. Chem. Indust.*, 55(1), 1-11.
- Hermia, J., 1982, Constant pressure blocking filtration laws – Application to power-law non-Newtonian fluids, *Trans.Inst. Chem. Eng.*, 60, 183-187.
- Marroquin, M., Vu, A., Bruce, T., Wickramasinghe, S.R., Zhau, L., and Husson, S.M., 2014, Evaluation of fouling mechanisms in asymmetric microfiltration membranes using advanced imaging, *J. Membr. Sci.*, 465, 1 – 13.
- Ogunbiyi, O.O., Miles, N.J., and Hilal, N., 2008, The effects of performance and cleaning cycles of new tubular ceramic microfiltration membrane fouled with a model yeast suspension, *Desalination*, 220, 273-289.
- Rayess, Y.E., Albasi, C., Bacchin, P., Tailandier, P., Peuchot, M.M., and Devatine, A., 2012, Analysis of membrane fouling during cross-flow microfiltration of wine, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 16, 398-408.
- Shalahuddin, I., 2008, Dead end microfiltration of crosslinked *Saccharomyces cerevisiae* suspensions, Master Thesis, Chung Yuan Christian University, Taiwan.
- Tung, K.L., Li, Y.L., Hwang, K.J., and Lu, W.M., 2008, Analysis and prediction of fouling layer structure in microfiltration, *Desalination*, 234, 99-106.
- Wibisono, Y., 2014a, Two-phase flow for fouling control in membranes, PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- Wibisono, Y., Cornelissen, E.R., Kemperman, A.J.B., Van der Meer, W.G.J., and Nijmeijer, K., 2014b, Two-phase flow in membrane processes: a technology with a future, *J. Membr. Sci.*, 453, 566-602.
- Wibisono, Y., Ahmad, F., Cornelissen, E.R., Kemperman, A.J.B., Nijmeijer, D.C., 2016, Dominant factors controlling the efficiency of two-phase flow cleaning in spiral-wound membrane elements, *Desalin. and Water Treat.*, 57 (38), 17625-17636.
- Wibisono, Y., Sucipto, S., Perdani, C.G., Astuti, R., Dahlan, M., 2018a, Halal compliance on drinking water industries: a future perspective, dalam: Muhammad Hashim N., Md Shariff N., Mahamood S., Fathullah Harun H., Shahrudin M., Bhari A. (eds.) *Proceeding of the 3rd International Halal Conference (INHAC2016)*, Springer, Singapore.
- Wibisono, Y., Faradilla, A., Utoro, P.A., Sukoyo, A., Izza, N., Dewi, S.R., 2018b, Anti-biofouling Alami Moringa oleifera Sebagai Bahan Pengisi Membran Mixed Matrix Selulosa Asetat untuk Klarifikasi Jus Buah, *J. Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 13 (2), 100-109.