

# PENGARUH ASPEK HIDROLIKA DALAM TEKNOLOGI MEMBRAN UNTUK PENYEDIAAN AIR BERSIH DI DAERAH BENCANA

Yatnanta Padma Devia<sup>\*1</sup>, Alwafi Pujiraharjo<sup>2</sup> dan Cahyo Adhi P<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dosen, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

<sup>2</sup>Dosen, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

<sup>3</sup>Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Korespondensi: yatnanta@ub.ac.id

## ABSTRAK

Kekurangan dan kualitas air bersih yang menurun menjadi dampak dari suatu daerah bencana. Penanganan yang ada selama ini dengan pengiriman truk tangki namun seringkali terkendala karena jumlah dan akses terbatas. Untuk itu perlu suatu alternatif yang lebih mudah, murah, terjangkau dan tepat guna. Salah satunya adalah teknologi membran dalam proses *forward osmosis* (FO).

Penelitian awal ini untuk mengkaji kemungkinan pemakaian teknologi *forward osmosis* di daerah bencana ditinjau dari sisi hidrolika. Penelitian ini merupakan eksperimen di laboratorium dan analisis data dikaji dengan menggunakan konsep hidrolika dan analisis kimia.

Hasilnya adalah kecepatan aliran optimum 0,25 m/detik yang menghasilkan bilangan Reynold 2039 pada air baku dan 2620 pada larutan penyeimbang dimana termasuk jenis aliran transisi atau turbulen rendah. Pada kecepatan ini fluks air yang dihasilkan lebih tinggi 30% dari kecepatan 0,17 m/detik yakni 8,4 L/m<sup>2</sup>-jam. Untuk penyisihan kontaminan tertinggi dicapai pada kecepatan 0,25 m/detik dimana penyisihan nitrit, nitrat dan kalium permanganat secara berurutan adalah 51,22%, 95,11%, 97,03%.

**Kata Kunci :** air bersih, bilangan Reynolds, fluks air, *forward osmosis*, kecepatan aliran, membran, penyisihan kontaminan

## 1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan vital bagi manusia. Kuantitas, kualitas dan kontinuitas air bersih ini menjadi persyaratan agar dapat memenuhi kebutuhan manusia. Ketiga hal ini menjadi permasalahan khusus ketika suatu daerah terkena bencana. Menurut UU no 24 tahun 2007 bencana didefinisikan sebagai peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan

lingkungan, kerugian harta benda dan dampak psikologis. Sedangkan bencana alam sendiri merupakan serangkaian peristiwa yang disebabkan oleh alam antara lain gempa bumi, tsunami, gunung meletus, banjir, kekeringan, angin topan dan tanah longsor. Salah satu dampak dari bencana ini adalah berkurangnya atau tidak tersedianya lagi air bersih. Penanganan yang ada selama ini adalah dengan pengiriman truk tangki air bersih di daerah bencana. Truk ini ada yang hanya sebagai pengangkut air bersih saja, namun ada pula truk yang dilengkapi dengan sistem pengolahan air bersih. Pengolahan

konvensional yang digunakan adalah pengendapan, penyaringan, ion exchange dan pemberian bahan kimia (Alzahrani, 2014). Truk ini sebenarnya cukup efektif mengatasi permasalahan air bersih di daerah bencana, namun seringkali terkendala karena jumlah yang terbatas dan akses menuju daerah bencana juga terbatas. Untuk itu perlu kiranya suatu alternatif penanganan penyediaan air bersih di daerah bencana yang lebih mudah, murah, terjangkau dan tepat guna.

Sampai saat ini, jenis teknologi pengolahan air bersih adalah beragam, dimulai dari metode konvensional yang menonjolkan proses fisik antara lain sedimentasi, aerasi dan filtrasi; proses kimiawi yang melibatkan proses koagulasi, flokulasi dan desinfeksi, sampai kepada teknologi lanjut yang menggunakan membran. Keuntungan menggunakan teknologi membran adalah dapat menghasilkan air dengan kualitas yang baik, energi yang dibutuhkan rendah, serta mampu menyisihkan atau memisahkan bahan kontaminan dengan rentang yang lebar. Sedangkan kekurangannya adalah masih ada kendala dalam penyumbatan membran (*fouling*) sehingga memerlukan pembersihan membran secara periodik dan seringkali memerlukan pengolahan pendahuluan. Beberapa teknologi pengolahan air bersih yang memanfaatkan membran adalah *reverse osmosis* (RO), *pressure retarded osmosis* (PRO), dan *forward osmosis* (FO). Untuk air limbah, teknologi membran menggunakan cara membran bioreaktor (MBR). Beberapa teknologi hibrida membran yakni gabungan beberapa teknologi membran perlu dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang terbaik untuk mendapatkan produksi air bersih yang optimal terutama di daerah bencana.

Keberhasilan dari teknologi membran tergantung dari 3 (tiga) faktor yakni karakteristik membran itu sendiri, larutan penyeimbang (*draw solution*) yang digunakan dan kondisi operasi. Larutan

penyeimbang ini memiliki tekanan osmotik tinggi sehingga menyebabkan terjadinya aliran air dari air terolah menuju larutan penyeimbang dan kontaminan tertahan di membran. Larutan penyeimbang yang sudah terdilusi ini akan dimurnikan kembali sehingga menghasilkan air bersih. Faktor-faktor ini harus dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi dan meminimalkan kondisi polarisasi konsentrasi (Lutchmiah dkk, 2014). Kondisi polarisasi konsentrasi ini disebabkan oleh perbedaan konsentrasi dari air yang diolah dengan larutan penyeimbang (Zhao dkk, 2012). Polarisasi konsentrasi muncul jika fluks air mempunyai arah yang berbeda dengan fluks balik larutan penyeimbang (Wei dkk, 2011). Untuk itu efek dari membran, larutan penyeimbang dan kondisi operasi serta efisiensi teknologi membran perlu diselidiki. Dalam penelitian ini difokuskan pada kondisi operasi teknologi membran terutama terkait dengan aspek hidroliknya.

Pada teknologi membran RO, PRO dan FO, proses utamanya adalah prinsip osmosis. Pada proses osmosis, transfer massa menjadi hal yang penting pada air terolah dan larutan penyeimbang dimana polarisasi konsentrasi dapat mengurangi fluks air dan menyebabkan fouling (penyumbatan pada membran). Konsentrasi polarisasi dapat dikontrol dengan pengaturan kecepatan aliran dan hidrodinamik (McCutcheon dkk, 2006). Ketika membran asimetrik digunakan, lapisan batas terjadi di lapisan penunjang membran, yang melindungi membran dari geseran dan turbulensi (bilangan Reynolds) terkait dengan kecepatan di permukaan membran. Hal ini akan mempengaruhi fluks air. Air terolah dengan kecepatan aliran rendah akan menghasilkan polarisasi konsentrasi yang tinggi (McCutcheon dkk, 2006). Kecepatan aliran dapat meminimalkan aliran balik dari larutan penyeimbang ke air terolah, tetapi dampaknya dapat menurunkan fluks air seiring dengan meningkatnya polarisasi konsentrasi dan fouling. Beberapa studi

lain menghasilkan bahwa perbedaan aliran tidak mengubah fluks air (Qin dkk, 2010; Tan dkk, 2008). Studi ini dilakukan untuk menginvestigasi efek kecepatan aliran dikarenakan bervariasinya hasil dari teknologi membran ini. Selanjutnya, apabila telah diketahui kecepatan yang optimum beserta transfer massanya, maka dapat diaplikasikan lebih jauh untuk teknologi air bersih terutama di daerah bencana yang mengalami krisis air.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh aspek hidrolika dalam hal ini kecepatan aliran terhadap kinerja membran untuk mengolah air bersih dimana dalam jangka dapat diaplikasikan untuk penyediaan air bersih di daerah bencana. Pengaruh yang diteliti adalah terhadap produksi fluks air dan efisiensi penyisihan atau pemisahan kontaminan.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

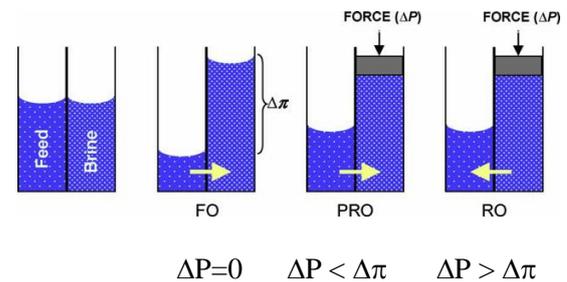
### 2.1 Perbandingan antara reverse osmosis (RO), pressure retarded osmosis (PRO) dan forward osmosis (FO)

*Reverse osmosis* menggunakan tekanan hidrolis dari larutan sumber (*feed solution*) untuk memproduksi air murni (Sourirajan in Cath dkk., 2006). Pengolahan yang lain adalah *pressure retarded osmosis* yang mengeksploitasi perbedaan tekanan osmotik dari dua larutan di antara membran untuk menghasilkan energi (Zhao dkk, 2012). Tekanan osmotik ( $\pi$ ) adalah tekanan yang bila diaplikasikan pada larutan yang lebih terkonsentrasi maka akan menghalangi aliran air melewati membran. Persamaan sederhana yang menunjukkan hubungan tekanan osmotik dan tekanan hidrolis serta flux air adalah:

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1)$$

dengan  $J_w$  is flux air,  $A$  adalah permeabilitas hidrolis dari membran,  $\Delta\pi$  adalah perbedaan tekanan osmotik di antara kedua sisi membran, dan  $\Delta P$  adalah perbedaan tekanan hidrolis (dimana nilai negatif dari  $J_w$  menunjukkan aliran balik osmosis). Arah dari flux air yang mengalir

pada proses FO, PRO, and RO digambarkan pada **Gambar 1**.



$\Delta P$  = perbedaan tekanan hidrolis;  
 $\Delta\pi$  = perbedaan tekanan osmotik

**Gambar 1.** Aliran air pada FO, PRO, and RO (Cath dkk., 2006)

Hubungan antara flux air dengan perbedaan tekanan osmotik ditunjukkan pada persamaan 2 berikut ini:

$$J_w = A \cdot \sigma \cdot \Delta\pi \quad (2)$$

dengan  $A$  adalah koefisien ( $L/(m^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{bar})$ ),  $\sigma$  adalah koefisien refleksi, dan  $\Delta\pi$  adalah perbedaan tekanan osmosis (bar). Lebih spesifik, hubungan antara tekanan osmotik dan konsentrasi dijelaskan pada persamaan Van't Hoff yang diturunkan dari persamaan Morse. Tekanan osmotik yang berbanding lurus dengan konsentrasi larutan dideskripsikan pada persamaan 3:

$$\pi = iMRT = i\left(\frac{n}{V}\right)RT \quad (3)$$

dengan  $\pi$  tekanan osmotik,  $i$  faktor Van't Hoff,  $M$  konsentrasi molar dari larutan yang sama dengan perbandingan jumlah mol larutan ( $n$ ) dengan volume larutan ( $V$ ),  $R$  konstanta gas  $8.3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ , dan  $T$  adalah suhu.

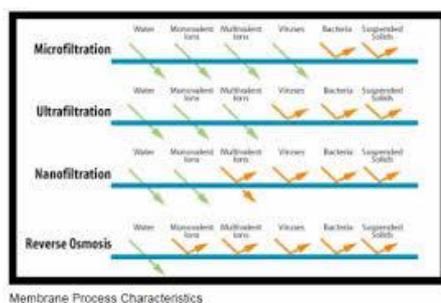
### 2.2 Jenis Membran

Membran adalah sebuah penghalang selektif antara 2 fasa. Membran berfungsi memisahkan material berdasarkan ukuran dan bentuk molekul, menahan partikel kontaminan yang mempunyai ukuran lebih besar dari pori-pori membran dan meloloskan partikel yang mempunyai ukuran lebih kecil. Membran asimetrik memiliki 2 lapisan yakni lapisan aktif (*active layer*) dan lapisan penunjang (*support layer*).

Klasifikasi membran umumnya dibedakan dari ukuran porinya dan kontaminan yang bisa disisihkan, yakni:

- a. Membran Mikrofiltrasi  
Membran ini mampu menahan partikel dengan ukuran lebih dari 0,1 µm dimana air, ion monovalen dan multivalen serta virus masih bisa lolos, sedangkan bakteri dan padatan tersuspensi dapat disisihkan.
- b. Membran Ultrafiltrasi  
Membran ultrafiltrasi ini mampu menahan partikel dengan ukuran 0,01 – 0,1 µm dimana bila dibandingkan dengan membran mikrofiltrasi, membran ini mampu menyisihkan virus.
- c. Membran Nanofiltrasi  
Kemampuan membran nanofiltrasi ini lebih tinggi dari membran nanofiltrasi dimana mampu menahan partikel dengan ukuran yang lebih kecil yakni 0,001 – 0,01 µm sehingga mampu menyisihkan ion multivalen, walaupun ada juga ion multivalen yang masih bisa lolos
- d. Membran Reverse Osmosis  
Pengembangan terakhir dari membran adalah membran reverse osmosis yang mampu menahan partikel dengan ukuran kurang dari 0,0001 – 0,01 µm sehingga mampu menyisihkan ion multivalen dan monovalen. Hanya air saja yang masih lolos atau dikenal dengan istilah fluks air.

Adapun klasifikasi ini dapat dilihat pada **Gambar 2** berikut ini



**Gambar 2.** Tingkatan filtrasi partikel dari berbagai jenis membran

## 2.4. Aspek Hidrolika

Kondisi operasi terkait aspek hidrolika sangat berhubungan erat dengan kecepatan dan debit dari suatu proses membran. Teori perpindahan massa di lapisan batas digunakan untuk memprediksi flux hidrolis teoritis pada kondisi sistem pengoperasian (Anastasio and McCutcheon, 2013). Kecepatan aliran menjabarkan lapisan batas yang disebut lapisan batas momentum. Lapisan batas ini menunjukkan area aktual dari interaksi antara permukaan dan fluida dimana titik aliran berubah dari laminar ke turbulen. Lapisan batas momentum juga dapat dideskripsikan oleh kecepatan aliran air sebagai area di atas permukaan yang berkisar antara 0% to 99% aliran utama. Dengan kata lain, hal ini adalah area dimana aliran menurun. Dalam beberapa kasus, lapisan batas dapat lebih turbulen dibandingkan laminar sehingga definisi dari lapisan batas dalam hal kecepatan lebih digunakan. Ada lapisan batas yang lain yang dijelaskan dalam istilah konsentrasi dari bahan tertentu yang disebut lapisan batas difusi. Lapisan batas difusi ini adalah area di atas permukaan yang memiliki perubahan konsentrasi dari bahan tertentu tersebut. Ketebalan dari momentum dan lapisan batas difusi tergantung dari kecepatan aliran. Pada kondisi aliran yang tinggi, aliran turbulen menyebabkan pencampuran yang lebih besar dan lapisan batas akan menjadi lebih tipis. Pada kecepatan rendah, aliran laminar akan menyebabkan pencampuran yang lebih rendah.

Membran modul didesain berbentuk persegi yang dilengkapi dengan selang untuk mengalirkan air yang diolah dan larutan penyeimbang. Kecepatan dalam selang dengan diameter tertentu dapat menentukan debit aliran dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q = A_{selang} \cdot u_{selang} = \frac{1}{4} \pi d^2 \cdot u_{selang} \quad (4)$$

Dengan  $Q$  adalah debit ( $m^3/s$ ),  $A_{selang}$  adalah luas area dari selang ( $m^2$ ),  $u_{selang}$  adalah kecepatan di selang ( $m/s$ ) dan  $d$  adalah diameter selang ( $m$ ). Kecepatan di saluran dari modul membran berdasarkan debit dan luas modul membran yang dapat dijelaskan melalui persamaan berikut ini:

$$u_{modul} = \frac{Q}{A_{module}} = \frac{Q}{b \times h} \quad (5)$$

dengan  $u_{modul}$  dan  $A_{modul}$  adalah masing-masing kecepatan ( $m/s$ ) dan luas area saluran pada modul membran ( $m^2$ ),  $b$  adalah lebar saluran persegi ( $m$ ) dan  $h$  adalah tinggi aliran di saluran persegi ( $m$ ).

Pada teori dasar, koefisien transfer masa,  $k$  ( $m/s$ ), ditentukan dengan cara mengevaluasi Sherwood number,  $Sh$ .

$$k = \frac{D \cdot Sh}{d_h} = \frac{D \cdot Sh}{L} \quad (6)$$

dengan  $d_h$  adalah diameter hidrolik dari sistem ( $m$ ),  $L$  adalah panjang saluran ( $m$ ) dan  $D$  adalah konstanta difusi molekul ( $m^2/s$ ).

Pada saluran persegi, radius hidrolik,  $R$  dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot h}{2(b+h)} \quad (7)$$

dimana  $A$  adalah area aliran ( $m^2$ ) dan  $P$  adalah perimeter ( $m$ ). Untuk saluran persegi, diameter hidrolik,  $d_h$  dapat dihitung sebagai berikut (Papautsky dkk, 1999):

$$d_h = 4 \frac{A}{P} = 4 \frac{b \cdot h}{2(b+h)} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{(b+h)} \quad (8)$$

Persamaan Sherwood untuk aliran yang sesuai di saluran persegi dirumuskan dalam persamaan berikut (McCutcheon dkk, 2006, McCutcheon and Elimelech, 2006)

$$Sh = 1.85 \left( Re Sc \frac{d_h}{L} \right)^{0.33} \text{ (laminar)} \quad (9)$$

$$Sh = 0.04 Re^{0.75} Sc^{0.33} \text{ (turbulen)} \quad (10)$$

dengan  $Re$  adalah bilangan Reynolds dan  $Sc$  adalah bilangan Schmidt. Bilangan Schmidt dirumuskan dalam persamaan

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D} \quad (11)$$

dengan  $\mu$  dengan viskositas dinamik ( $mPa \cdot s$  or  $kg/(m \cdot s)$ ) dan  $\rho$  adalah densitas fluida ( $kg/m^3$ ). Untuk mengidentifikasi perbedaan

aliran dalam fluida yang sama, seperti aliran laminar atau turbulen, dapat menggunakan persamaan Reynolds sebagaimana dirumuskan di bawah ini (Papautsky dkk, 1999):

$$Re = \frac{u \cdot d_h}{\nu} = \frac{\rho \cdot u \cdot d_h}{\mu} \quad (12)$$

dengan  $u$  adalah kecepatan obyek yang berhubungan dengan fluida ( $m/s$ ),  $d_h$  adalah diameter hidrolik atau dapat digantikan dengan  $L$  yakni panjang dari perjalanan fluida ( $m$ ) dan  $\nu$  adalah viskositas kinematik ( $m^2/s$ ).

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Desain modul membran

Sebelum mengadakan eksperimen, modul membran perlu didesain dengan memperhatikan kesesuaian dan ketebalan dari stuktur material, kemudahan untuk penggantian membran dan meminimalan kebocoran.

#### 3.2 Air baku dan larutan penyeimbang

Pada saat penelitian ini dilaksanakan, tidak ada kejadian bencana alam yang dapat diambil sampel airnya. Untuk itu dilakukan pendekatan dengan jalan mengambil sampel air baku dari bak pengumpul air yang berasal dari sungai di Sidoarjo. Sidoarjo sendiri memiliki area terdampak bencana lumpur lapindo yang mana memiliki dampak langsung dan tidak langsung terhadap kualitas air permukaannya (sungai). Sampel ini diperiksa di Laboratorium. Analisis penelitian ini selanjutnya dibatasi untuk paramater nitrat, nitrit dan  $KMnO_4$  yang memiliki kadar melebihi standar baku mutu.

Untuk larutan penyeimbang dipilih larutan magnesium klorida ( $MgCl_2$ ) dimana larutan tersebut dibuat di laboratorium dengan cara melarutkan magnesium klorida hexahidrat ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) pada air yang sudah diionisasi pada konsentrasi 1 M. Konsentrasi larutan penyeimbang ini memiliki nilai viskositas yang akan

mempengaruhi nilai konstanta

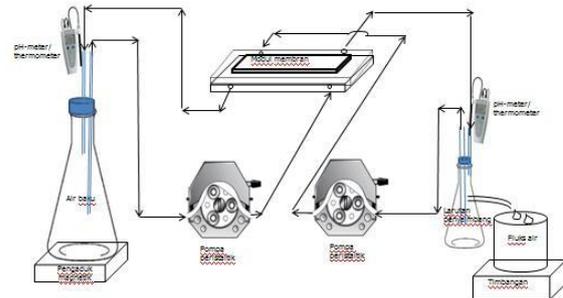
### 3.3 Membran

Seluruh percobaan menggunakan membran komersial *non-woven flat sheet* yang diperoleh dari sampel membran produksi *Hydration Technologies Inc.* (HTI). Karakteristik kimiawi dari membran merupakan hak paten dari industri, sehingga tidak banyak informasinya yang bisa didapatkan, namun dipercaya bahwa membran ini memiliki lapisan penunjang (*support layer*) yang merupakan *asymmetric cellulose triacetate* (CTA) *nonwoven* (NW). Sudut kontak dari membran HTI-NW ini adalah  $64^\circ$  (Qiu dkk, 2011) dan stabil pada pH kisaran 3-8 (Lutchmiah dkk, 2014).

### 3.4 Pengaturan Aliran Lintas

Membran dipasang di modul membran. Modul ini memiliki dua permukaan persegi dengan dimensi panjang 135 mm, lebar 90 mm, kedalaman 4 mm serta luas membran efektif  $0.012 \text{ m}^2$  dimana larutan penyeimbang dan larutan air baku akan mengalir melalui membrane. Pada FO, lapisan aktif membran akan dialiri air baku dan lapisan penunjang membran dialiri larutan penyeimbang (Cath dkk, 2006). Dua buah pompa peristaltik yang dilengkapi dengan pengaturan kecepatan digunakan untuk mensirkulasi air baku dan larutan penyeimbang. Kecepatan aliran pintas diatur pada 0.17 m/det, 0.25 m/det and 0.34 m/det. Air baku yang melewati membran akan masuk ke bagian larutan penyeimbang yang berada di gelas beker yang ditempatkan di timbangan. Perubahan berat di timbangan akan dicatat untuk menghitung fluks air yang melewati membran. Gelas beker 3.5 L dan 1 L digunakan masing-masing untuk air baku dan larutan penyeimbang. Rangkaian peralatan percobaan ditunjukkan pada **Gambar 3**. Satu kali percobaan ini dilaksanakan dalam waktu 8 jam (Achilli dkk, 2009, Holloway dkk, 2007). Bak air dan pengaduk magnetik digunakan untuk

menjaga suhu. Suhu dan pH dimonitor berkala dengan with a pH-meter/thermometer. Pada akhir percobaan aliran lintas, air baku yang telah melewati membran akan dikumpulkan dan dianalisis kualitasnya di laboratorium, khususnya nilai nitrit ( $\text{NO}_2^- \text{N}$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^- \text{N}$ ) dan kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) dan dihitung persentasi penyisihan (*removal*) dengan jalan mengurangi konsentrasi awal dengan konsentrasi akhir.



**Gambar 3.** Rangkaian peralatan percobaan forward osmosis

### 3.5 Penentuan Kecepatan

Pada studi-studi terdahulu, aliran kecepatan lintas forward osmosis atau debit serta luas membran efektif cukup banyak variasinya. Holloway dkk (2007) menggunakan 1.5 L/min and  $139 \text{ cm}^2$ , sedangkan Xue dkk (2015) mengaplikasikan 8.3 cm/s and  $60 \text{ cm}^2$ . Pada studi ini, diameter pipa adalah 7.94 mm, luas efektif membran  $120 \text{ cm}^2$  and debit tertentu akan ditentukan berdasarkan kecepatan pompa peristaltik Daftar kecepatan yang digunakan dalam percobaan ini ditunjukkan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Kecepatan aliran pintas yang digunakan di percobaan

Kecepatan		Debit	
(cm/detik)	(m/detik)	(L/jam)	(L/menit)
16.8	0.168	30	0.5
25	0.25	44.5	0.75
33.7	0.337	60	1

### 3.6 Persentase Penyisihan Polutan

Berdasarkan konsentrasi akhir dari polutan di larutan penyeimbang yang sudah

terdilusi dan konsentrasi awal polutan di air baku sebelum proses forward osmosis, persentase penyisihan, R dihitung dengan persamaan:

$$R = 100 \left( 1 - \frac{C_P}{C_F} \right) \quad (13)$$

dengan  $C_P$  dan  $C_F$  secara berurutan adalah konsentrasi akhir dari polutan di larutan penyeimbang yang sudah terdilusi setelah proses forward osmosis dan konsentrasi awal polutan di air baku sebelum proses forward osmosis. Konsentrasi polutan nitrit ( $\text{NO}_2$  -N), nitrat ( $\text{NO}_3$  -N) dan kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) ditentukan berdasarkan Standard Methods (APHA, 1998) dengan menggunakan UV-Vis spectrophotometer. Seluruh sampel diencerkan untuk memudahkan perhitungan yang sesuai dengan kisaran standar kalibrasi.

### 3.7 Perhitungan Fluks Air

Osmosis menghasilkan fluks air dari air baku ke larutan penyeimbang melewati membran dimana akan ditunjukkan dengan peningkatan berat dari larutan penyeimbang. Fluks air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (14), dimana perubahan berat larutan penyeimbang akan dikonversikan ke volume dan dibagi dengan luas membran dan durasi waktu.

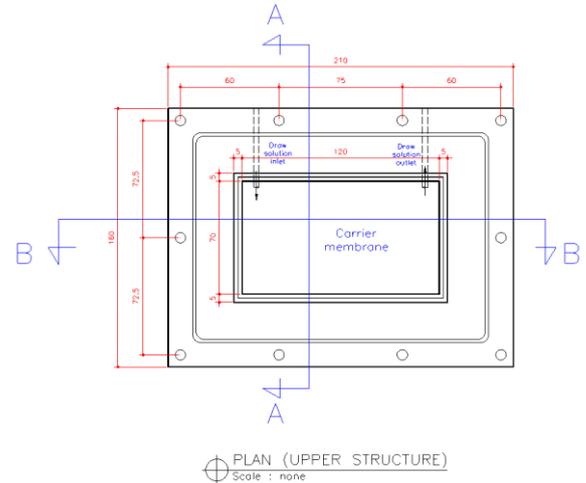
$$J_w = \frac{W_e - W_0}{\rho \cdot A_m \cdot t} \quad (14)$$

dengan  $J_w$  adalah fluks air ( $\text{L}/\text{m}^2$ -jam),  $W_e$  berat akhir larutan penyeimbang di akhir proses forward osmosis (g),  $W_0$  berat awal larutan penyeimbang (g),  $\rho$  densitas cairan ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $A_m$  luas membran ( $\text{m}^2$ ), dan  $t$  durasi waktu (jam).

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Modul membrane

Berikut **Gambar 4** menunjukkan bagian atas modul membrane.

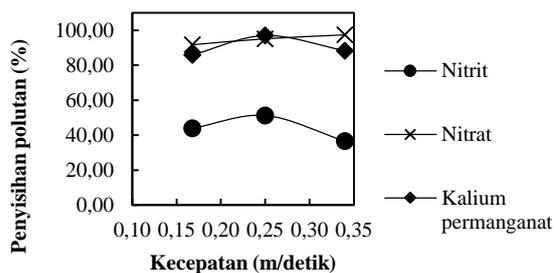


**Gambar 4.** Bagian atas dari modul membran

### 4.2 EFEK KECEPATAN PADA PENYISIHAN POLUTAN

Untuk mengetahui efek kecepatan aliran lintas forward osmosis, rangkaian proses forward osmosis untuk menginvestigasi penyisihan polutan dilakukan dengan variasi kecepatan 0,17; 0,25; and 0,34 m/detik. Konsentrasi awal dari larutan penyeimbang dibuat sama pada setiap kondisi percobaan yakni 1 M.

Sebagaimana yang ditunjukkan pada **Gambar 5**, penyisihan polutan polutan nitrit ( $\text{NO}_2$  -N), nitrat ( $\text{NO}_3$  -N) dan kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) selama forward osmosis berbeda pada berbagai kecepatan. Polutan nitrit ( $\text{NO}_2$  -N), nitrat ( $\text{NO}_3$  -N) dan kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) disisihkan secara berurutan mencapai 43,90%, 91,76%, dan 85,88%, pada kecepatan 0,17 m/detik. Sedangkan kecepatan 0,25 m/detik, penyisihan meningkat secara berurutan sampai 51,22%, 95,11%, 97,03%. Ketika kecepatan meningkat menjadi 0,34 m/s, penyisihan meningkat sedikit untuk  $\text{NO}_3$ -N menjadi 97.35%, tetapi turun untuk  $\text{NO}_2$ -N and  $\text{KMnO}_4$  menjadi 36,59% and 88,36%. Berdasarkan hasil di atas, kecepatan 0,25 m/detik dipertimbangkan sebagai kondisi pembatas untuk pencampuran dan transfer massa pada aliran pipa dengan luas membran  $0,012 \text{ m}^2$ .



**Gambar 5.** Penyisihan polutan dengan membran HTI-NW dengan larutan penyeimbang  $MgCl_2$  1 M pada berbagai kecepatan 0,17 m/detik, 0,25 m/detik and 0,34 m/detik.

Penyisihan  $NO_2-N$  rendah ketika proses forward osmosis dengan kecepatan rendah karena efek berat molekul yang rendah dan diameter ion hidrasi yang kecil yang membuat transfer mudah melewati membran pada kondisi mixing rendah. Berat molekul nitrit adalah 46,01 g/mol dan diameter ion hidrasi 0,3 nm. Sebaliknya, semakin besar berat molekul dan diameter ion hidrasi  $NO_3$  (62.01 g/mol and 0,3 nm) akan menghasilkan penyisihan yang tinggi akibat transfer yang lebih besar. Peningkatan kecepatan pada 0,25 m/detik akan meningkatkan pencampuran dan mengurangi efek transfer polutan, yang mana selanjutnya akan meningkatkan penyisihan. Kecepatan tertinggi yakni 0,34 m/detik menurunkan penyisihan polutan sehingga menjadi pembatas dalam percobaan ini dengan ukuran membran seperti pada percobaan ini. Peningkatan kecepatan dapat merusak membran. Untuk itu kecepatan 0,25 m/detik dapat disarankan sebagai kecepatan yang dapat digunakan untuk percobaan-percobaan forward osmosis. Hasil ini mendukung studi sebelumnya untuk kecepatan terpilih dalam metodologi forward osmosis (Cath dkk, 2013).

Transfer massa pada filtrasi aliran lintas adalah parameter yang tidak diketahui berdasarkan hasil yang bervariasi tergantung dari kondisi percobaan itu

sendiri. Untuk mencapai koefisien transfer masa yang terkait langsung dengan data percobaan, salah satu metode berdasarkan retensi suatu zat dengan variasi kecepatan diterapkan (Berg dkk, 1989). Koefisien transfer massa dapat diestimasi dari berbagai persamaan teoritis, korelasi dan analogi yang merupakan fungsi bahan material, karakteristik dan model alirannya (aliran laminar atau turbulen). Pada studi ini, untuk mengetahui efek kecepatan aliran lintas pada proses forward osmosis, pada percobaan pendahuluan, air baku dan larutan penyeimbang 1 M  $MgCl_2$  diukur viskositas dinamik ( $\mu$  dalam mPa.s) yakni air baku  $0,9 \text{ mPa.s} = 0,9 \times 10^{-3} \text{ kg/m.detik}$ . dan larutan penyeimbang  $1,1 \text{ mPa.s} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ kg/m.detik}$ . Untuk mengkonversikan viskositas dinamik ke viskositas kinematik, viskositas dinamik dibagi dengan densitas air baku dan  $MgCl_2$  yang masing-masing nilainya adalah  $1000 \text{ kg/m}^3$  dan  $1569 \text{ kg/m}^3$ , sehingga menghasilkan secara berturut-turut  $9,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik}$ . and  $7,01 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{detik}$ . Diameter hidrolis pada kedua sisi air baku dan larutan penyeimbang  $7,34 \times 10^{-3} \text{ m}$ , diturunkan dari dimensi modul membran yang berbentuk persegi dengan asumsi lebar saluran 90 mm tinggi aliran adalah 4 mm. Untuk menentukan jenis aliran, apakah laminar atau turbulen, *Reynold number* akan dihitung menggunakan nilai viskositas dinamik. Hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 2**.

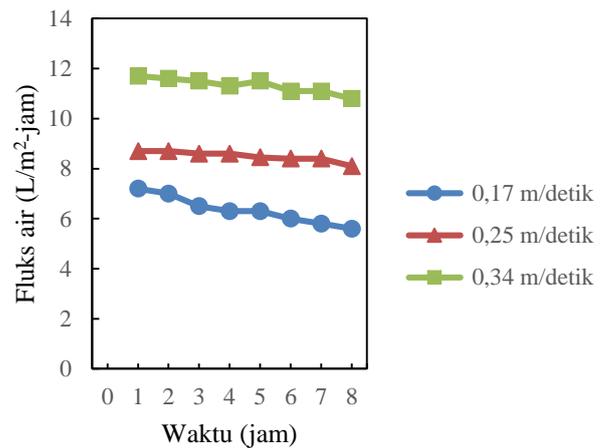
**Tabel 2.** Perhitungan Reynold number dan aliran

Kecepatan (m/detik)	<i>Reynold number</i> pada air baku	<i>Reynold number</i> pada larutan penyeimbang	Jenis aliran
0,17	1370	1760	Laminar tinggi
0,25	2039	2620	Transisi – Turb.rendah
0,34	2773	3560	Turbulen tinggi

Aliran laminar bila Reynold number,  $Re < 1800$ , transisi  $1800 < Re < 2100$  dan

turbulent  $Re > 2100$ . Aliran turbulen akan dapat menghalangi polutan berpindah ke sisi larutan penyeimbang sehingga disini dapat dikatakan terjadi peningkatan penyisihan polutan. Namun semakin turbulen aliran dan larutan penyeimbang semakin tinggi konsentrasinya maka akan mengurangi ketebalan dari lapisan pembatas (*boundary layer*), mengurangi efek internal polarisasi konsentrasi dan meningkatkan fluks air (Anastasio and McCutcheon, 2013). Keterbatasan kekuatan mekanis dari membran harus dipertimbangkan pada saat aliran turbulen yang tinggi dimana akan dapat mempengaruhi tingkat penyisihan polutan. Sebaliknya, pada studi yang dilakukan oleh Park dkk (2011) menyimpulkan bahwa perkembangan kinerja membran dapat menjadi cara yang efektif dalam memaksimalkan kinerja forward osmosis daripada mengoptimalkan kondisi operasi antara lain kecepatan aliran di air baku dan larutan penyeimbang.

Dalam percobaan forward osmosis ini, pada setiap variasi kecepatan 0,17 m/detik, 0,25 m/detik dan 0,34 m/detik, akan diukur fluks air yang dihasilkan melalui membran. Pengaruh kecepatan pada fluks air ditunjukkan pada **Gambar 6**. Pada kecepatan 0,17 m/detik dihasilkan fluks air 6,3 L/m<sup>2</sup>-jam sedangkan pada kecepatan 0,25 m/detik fluks air yang dihasilkan lebih tinggi sekitar 30% (yakni 8,4 L/m<sup>2</sup>-jam). Untuk kecepatan 0,34 m/detik, fluks air meningkat lagi 30% menjadi sebesar 11,3 L/m<sup>2</sup> jam). Ketebalan dari lapisan pembatas akan lebih besar pada saat kecepatan rendah (Zou dkk, 2011). Hal ini akan membuat polarisasi konsentrasi pada kondisi tersebut, dimana polarisasi konsentrasi ini berpengaruh terhadap fluks air (Cutcheon dkk, 2006). Selama proses forward osmosis, konsentrasi polarisasi internal akan mengurangi tenaga penggerak (*driving force*) melalui membrane dan akan menurunkan fluks air (Loeb dkk, 1997).



**Gambar 6.** Fluks air dengan membran HTI-NW dengan larutan penyeimbang MgCl<sub>2</sub> 1 M pada berbagai kecepatan 0,17 m/detik, 0,25 m/detik and 0,34 m/detik.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 KESIMPULAN

Penelitian ini merupakan penelitian awal untuk mengetahui pengaruh perhitungan hidrolika dalam membran yang kedepannya akan dipakai untuk mengolah air di daerah bencana dengan jalan menginvestigasi kecepatan terhadap bilangan Reynold yang dihasilkan serta pengaruh kecepatan terhadap produksi fluks air dan pemisahan kontaminan. Adapun hasil selengkapnya adalah:

1. Kecepatan aliran dalam membran sebesar 0,17 m/detik menghasilkan bilangan Reynold pada air baku sebesar 1370 dan pada larutan penyeimbang sebesar 1760, dimana angka Reynold ini termasuk laminar tinggi. Untuk kecepatan 0,25 m/detik menghasilkan bilangan Reynold 2039 pada air baku dan 2620 pada larutan penyeimbang dimana termasuk jenis aliran transisi atau masuk ke turbulen rendah. Sedangkan kecepatan 0,34 m/detik menghasilkan bilangan Reynold 2773 pada air baku dan 3560 pada larutan penyeimbang dimana termasuk jenis aliran turbulen tinggi.

2. Pada kecepatan 0,17 m/detik dihasilkan fluks air 6.3 L/m<sup>2</sup>-jam sedangkan pada kecepatan 0,25 m/detik fluks air yang dihasilkan lebih tinggi sekitar 30% (yakni 8,4 L/m<sup>2</sup>-jam). Untuk kecepatan 0.34 m/detik, fluks air meningkat lagi 30% menjadi sebesar 11,3 L/m<sup>2</sup> jam). Semakin tinggi produksi fluks air semakin banyak air bersih yang dihasilkan.
3. Pada kesimpulan ketiga ini akan dapat diperoleh kecepatan optimum dari ketiga kecepatan yang dicoba dimana akan menghasilkan penyisihan kontaminan terbesar. Pada kecepatan 0,25 m/detik, penyisihan tertinggi nitrit, nitrat dan kalium permanganat secara berurutan adalah 51,22%, 95,11%, 97,03%. Kecepatan 0,25 m/detik akan meningkatkan pencampuran dan mengurangi efek transfer polutan (bilangan Reynold dengan aliran transisi), yang mana selanjutnya akan meningkatkan penyisihan kontaminan.

## 5.2 SARAN

Penelitian ini perlu dikembangkan dengan memperhatikan pengaruh dari faktor-faktor lain yakni kondisi membran, penggunaan alternatif larutan penyeimbang, pemurnian air olahan yang tercampur dengan larutan penyeimbang, serta teknologi-teknologi lain yang bisa digabung (*hybrid*) dengan teknologi *forward osmosis* ini.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- Alzaharani, S. Mohammad, A.W. 2014. Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering* 4 (2014), pp 107-133
- Achilli, A., Cath, T.Y., Marchand, E.A., Childress, A.E. 2009. The forward osmosis membrane bioreactor: a low fouling alternative to MBR processes. *Desalination* 238(1-3), pp 10-21
- Anastasio, D., McCutcheon, J.R. 2013. Using forward osmosis to teach mass transfer fundamentals to undergraduate chemical engineering students. *Desalination* 312 (2013), pp 10-18
- APHA-AWWA-WEF. 1998. Standard Methods for examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> edition. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, New York, USA.
- Berg., G.B.V.D., Racz, I.G., Smolders, C.A. 1989. Mass transfer coefficients in cross flow ultrafiltration. *J. Membr. Sci.* 47 (1989), pp 25-51
- Cath, T.Y., et al. 2013. Standard methodology for evaluating membrane performance in osmotically driven membrane processes. *Desalination* 312, pp 31-38
- Cath, T.Y., Childress, A.E., Elimelech, M. 2006. Forward osmosis: principles, applications, and recent developments. *J. Membr. Sci.* 281 (2006), pp 70-87
- Holloway, R.W., Childress, A.E., Dennett, K.E., Cath, T.Y. 2007. Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate. *Water Res.* 41(17), pp 4005-4014
- Loeb, S., Titelman, L., Korngold, E., Freiman, J. 1997. Effect of porous support fabric on osmotic through a Loe-Sourirajantype asymmetric membrane. *J. Membr. Sci.* 129 (1997), pp 243-249
- Lutchmiah, K., A.R.D. Verliefe, K. Roest, L.C. Rietveld, E.R Cornelissen. 2014. Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review. *Water Res.* 58, pp 179-197
- McCutcheon, J.R., Elimelech, M. 2006. Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis. *J. Membr. Sci.* 284 (2006), pp 237-247
- McCutcheon, J.R., McGinnis, R.L., Elimelech, M. 2006. Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *J. Membr. Sci.* 278 (1-2), pp 114-123
- Papautsky, I. Brazzle, J., Ameel, T., Frazier A.B. 1999. Laminar fluid behavior in microchannels using micropolar fluid theory. *Sensors and Actuator A: Physical* 73 (1-2), pp 101-108
- Park, M., Lee, J.J., Lee, S., Kim, J.H. 2011. Determination of a constant membrane structure parameter in forward osmosis processes. *J. Membr. Sci.* 284 (2011), pp 241-248
- Qin, J.J., S. Chen, M.H. Oo, K.A. Kekre, E.R. Cornelissen, C.J. Ruiken. 2010. Experimental studies and modelling on concentration polarization in forward osmosis. *Wat. Sci. Technol.* 61(11), pp

- 2897-2904
- Qiu, C., Qi, S., Tang, C.Y. 2011. Synthesis of high flux forward osmosis membranes by chemically crosslinked layer-by-layer polyelectrolites. *J. Membr. Sci.* 381 (2011), pp 74-80
- Tan, C.H., H.Y. Ng. 2008. Modeling of external and internal concentration polarization effect on flux behavior of forward osmosis. *J. Membr. Sci.* pp 533-539.
- Wei, J.,C. Qiu, C.Y. Tang, R. Wang, A.G. Fane. 2011 Synthesis and characterization of flat-sheet thin film composite forward osmosis membranes. *J. Membr. Sci.* 372 (2011), pp 292-302.
- Xue, W., Tobino, T., Nakajima, F., Yamamoto, K. 2015. Seawater-driven forward osmosis for enriching nitrogen and phosphorus in treated municipal wastewater: effect of membrane properties and feed solution chemistry. *Wat. Res.* 69 (2015), pp 120-130
- Zhao, S., L. Zou, C.Y Tang, D. Mulcahy. 2012. Recent development in forward osmosis: opportunities and challenges. *J. Membr. Sci.* 396 (2012), pp 1-21.
- Zou, S., Gu, Y., Xiao, D., Tang, C.Y. 2011. The role of physical and chemical parameters on forward osmosis membrane fouling during algae separation. *J. Membr. Sci.* 366 (2011), pp 356-362.