

PENGOLAHAN LIMBAH LINDI MENGGUNAKAN MEMBRAN NANOFILTRASI NF99

Desinta Aswin Amalia^{*)}, Heru Susanto^{**)} Titik Istirokhatun^{**)}

Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

JL. Prof. H. Sudharto, SH Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

email : desinta.aswin@yahoo.com

ABSTRAK

Lindi merupakan salah satu permasalahan yang timbul dari keberadaan suatu Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Kandungan lindi yang terdiri dari banyaknya senyawa organik serta berbagai ion logam mampu mencemari tanah, air tanah, dan air permukaan sehingga perlu adanya pengolahan terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan. Penelitian ini dilakukan untuk melihat adanya kemungkinan pengolahan lindi menggunakan membran nanofiltrasi NF99. Tujuan yang ingin dicapai adalah untuk menganalisis kinerja membran nanofiltrasi NF99 dalam menyisihkan kandungan pencemar pada lindi seperti COD, Fe, TDS, dan TSS serta menentukan tekanan operasi optimum. Lindi yang digunakan sebagai umpan adalah lindi sintetik dan lindi hasil sampling yang berasal dari TPA Blondo, Kabupaten Semarang. Penelitian menggunakan alat filtrasi membran yang dioperasikan pada aliran *crossflow* dengan tekanan 4, 5, dan 6 bar. Dari hasil penelitian diperoleh tingkat rejeksi pada larutan lindi sintetik tunggal COD sebesar 95%, Fe dan TSS sebesar 100%, serta TDS sebesar 42% sedangkan untuk larutan lindi sintetik campuran tingkat rejeksi COD mencapai 97%, Fe dan TSS sebesar 100%, serta TDS sebesar 62%. Tekanan optimum yang didapatkan dalam penelitian ini adalah pada tekanan 4 bar. Selanjutnya, pada tekanan 4 bar dilakukan pengolahan menggunakan limbah lindi TPA. Besarnya tingkat rejeksi yang dihasilkan pada pengolahan limbah lindi TPA untuk parameter COD sebesar 95%, Fe dan TSS sebesar 100%, sedangkan TDS sebesar 79%.

Kata Kunci : Lindi, COD, Fe, TDS, TSS, Membran, Nanofiltrasi

ABSTRACT

[TREATMENT OF LEACHATE WITH NF99 NANOFILTRATION MEMBRANE]. Leachate is one of the problems arising from the existence of landfill site. Leachate consists of many organic compounds and various metal ions that capable of contaminating soil, groundwater, and surface water so that needing for a treatment before being discharged into the environment. This study was undertaken to examine feasibility of leachate treatment using NF99 nanofiltration membrane. The aim of this research is to determine NF99 nanofiltration membrane performance in setting aside the content of pollutants in the leachate such as COD, Fe, TDS, TSS and determine the optimum operating pressure. Leachate that used as feed is synthetic leachate and leachate sampling results from the landfill site of Blondo. Research using membrane filtration apparatus which operated in crossflow stream with a pressure of 4, 5, and 6 bar. The result showed the level of rejection in a single synthetic leachate solution of COD to 95%, Fe and TSS to 100%, and TDS to 42% while for the synthetic leachate solution mixture rejection rate of COD reached 97%, Fe and TSS to 100%, and TDS amounted to 62%. The optimum pressure obtained in this study is at a pressure of 4 bar. Furthermore, landfill leachate wastewater is processed at a pressure of 4 bar. The level of rejection produced at waste treatment landfill leachate for COD parameter amounted to 95%, Fe and TSS to 100%, while TDS amounting to 79%.

Keywords : Leachate, COD, Fe, TDS, TSS, Membrane, Nanofiltration

1. PENDAHULUAN

Lindi sering didefinisikan sebagai air limbah berbahaya dan tercemar berat (Amuda, 2006). Komposisi lindi tergantung dari berbagai parameter seperti jenis sampah, kondisi iklim, jenis operasi, dan umur TPA (Marañón dkk, 2009). Lindi terdiri dari banyak senyawa organik dan anorganik yang biasanya mengandung bahan terlarut dan tersuspensi. Lindi TPA biasanya juga mengandung 0,2-1,5% zat terlarut dimana porsi terbesar (80-95%) terdiri dari garam monovalen (Vogel dkk, 2007). Umumnya, karakteristik lindi terdiri dari tingginya konsentrasi COD dan adanya logam berat (Dandautiya, 2012). Selain itu, lindi juga mempunyai konsentrasi amoniak, N-organik, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, dan Cl yang cukup tinggi pula (Ali, 2011).

Pembuangan lindi dapat menyebabkan permasalahan lingkungan yang serius karena lindi dapat meresap melalui tanah dan menyebabkan pencemaran air tanah dan permukaan jika tidak diolah dengan baik (Tatsi dkk, 2003). Salah satu cara untuk mencegah adanya pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh lindi adalah dengan mengolah lindi untuk menghilangkan bahan berbahaya sebelum masuk ke badan air. Hal ini dikarenakan jika lindi sudah terlanjur berada dalam badan air maka pengolahannya akan lebih sulit dan lebih mahal (Ngo dkk, 2010).

Berdasarkan karakteristik lindi, pengolahan lindi dilakukan dengan proses biologi, fisika-kimia, dan menggunakan membran. Pengolahan secara biologi menggunakan metode seperti *sequencing batchreactor (SBR)*, *trickling filter*, *rotating biological contactor (RBC)*, *moving bed bio film reactor (MBBR)*, *upflow anaerobic sludge blanket (UASB)*. Pengolahan secara fisika-kimia menggunakan metode *chemical precipitation*, *amonia stripping*, adsorpsi sedangkan pengolahan pada membran menggunakan mikrofiltrasi, nanofiltrasi, *reverse osmosis*. Pengolahan secara biologi hanya efektif untuk mengolah lindi dari TPA baru. Disisi lain, pada pengolahan fisika-kimia hanya metode adsorpsi yang mampu mengolah lindi dari TPA lama.

Metode pengolahan yang baik adalah menggunakan membran nanofiltrasi dan *reverse osmosis*. Membran nanofiltrasi memiliki struktur *asymmetric micro porous* dengan ukuran pori antara 0,01–5 nm. *Driving force* diaplikasikan pada tekanan 1-55 bar dan diikuti dengan pemisahan secara *shieving mechanism*. Oleh karena itu, membran nanofiltrasi dapat menyisahkan senyawa organik dan logam berat dari lindi (Dandautiya, 2012). Karena tingginya konsentrasi senyawa organik pada lindi, terbentuklah *fouling* pada proses filtrasi membran (Schäfer dkk, 2005). Umumnya, *fouling* dapat disebabkan oleh organik, anorganik, partikulat, dan *biological fouling* (Scott dkk, 2005). Terjadinya *fouling* mengindikasikan bahwa lindi TPA memiliki karakteristik yang beragam sehingga akan memberikan pengaruh atau hasil yang beragam pula. Oleh karena itu, penggunaan lindi sintetis diperlukan untuk melihat bagaimana penyisihan limbah lindi pada tiap parameter pencemar.

Dalam penelitian ini, limbah lindi sintetis dan lindi TPA diolah menggunakan membran nanofiltrasi NF99. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa membran nanofiltrasi NF99 dapat digunakan dalam pengolahan air (Al-Zoubi dkk, 2010; Bódalo dkk, 2009; Galanakis dkk, 2012; Hidalgo dkk, 2013; Madsen dan Søgaard, 2014; Teixeira dkk, 2011;) akan tetapi penelitian tentang penggunaan membran nanofiltrasi NF99 dalam mengolah limbah lindi masih sedikit dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja membran nanofiltrasi NF99 dalam menyisahkan parameter pencemar yang terkandung dalam limbah lindi sehingga nantinya diharapkan dapat menjadi pilihan alternatif dalam mengolah lindi.

2. METODE PENELITIAN

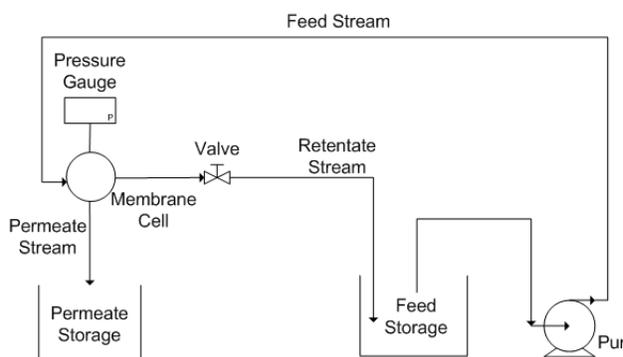
2.1 Pembuatan Lindi Sintetis

Penelitian ini dilakukan dengan membuat lindi sintetis untuk parameter COD, Fe, TDS, dan TSS. Alasan penggunaan lindi sintetis dikarenakan karakteristik lindi TPA lebih beragam sehingga dikhawatirkan akan memberikan pengaruh atau hasil

yang beragam. Pembuatan lindi sintetik menggunakan bahan kimia seperti glukosa untuk COD, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk Fe, NaCl teknis untuk TDS, dan kaolin untuk TSS.

2.2 Pengoperasian Alat Filtrasi Membran

Membran yang digunakan adalah membran nanofiltrasi NF99 yang diproduksi oleh Alfa Laval. Pada penelitian ini, membran dipotong membentuk lingkaran dengan diameter 4,2 cm. Setelah dipotong, membran kemudian direndam dalam air suling selama 30 menit. Membran yang sudah direndam selanjutnya dimasukkan ke dalam modul membran. Kemudian membran dikompaksi selama 30 menit. Kompaksi membran bertujuan untuk menstabilkan pori dan struktur membran agar nantinya diperoleh nilai fluks yang stabil. Proses filtrasi membran dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Kerja Filtrasi Membran

Pengoperasian alat dilakukan dengan mengatur tekanan. Variasi tekanan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4, 5, dan 6 bar. Pengujian membran dilakukan selama 2 jam untuk setiap tekanan dan permeat diambil setiap 15 menit selama 1-5 menit.

2.3 Pengujian Kandungan Permeat dan Morfologi Membran

Setelah limbah lindi diolah menggunakan alat filtrasi, permeat yang diambil kemudian diuji untuk dilihat besarnya konsentrasi permeat. Pengujian konsentrasi permeat untuk parameter COD, TDS, dan TSS menggunakan alat spektrofotometri, sedangkan untuk Fe menggunakan AAS atau *atomic absorption spectrophotometry*. Pengujian ini dilakukan di

laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro.

Membran yang digunakan dalam pengujian morfologi membran adalah membran NF99 baru serta membran yang telah dilakukan pengolahan menggunakan larutan lindi sintetik dan lindi TPA. Sebelum dilakukan pengujian, membran NF99 baru direndam terlebih dahulu dalam air suling selama satu hari kemudian dikeringkan sedangkan untuk membran yang telah digunakan dalam proses pengolahan menggunakan larutan lindi sintetik dan lindi TPA juga dikeringkan terlebih dahulu. Pengujian morfologi dilakukan dengan metode SEM. Pengujian menggunakan SEM dilakukan di laboratorium terpadu Universitas Diponegoro.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Lindi TPA

Uji karakteristik dilakukan untuk mengetahui parameter pencemar pada limbah lindi yang diperoleh dari TPA Blondo, Kabupaten Semarang. Hasil pengujian karakteristik limbah lindi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik lindi TPA blondo

Parameter	Satuan	Karakteristik Lindi TPA Blondo*	Baku Mutu**	Keterangan
Temperatur	°C	27	38	
TSS	mg/L	178	100	>BM
TDS	mg/L	4.305	2.000	>BM
pH		8,40	6,0 – 9,0	<BM
Besi (Fe)	mg/L	9,80	5	>BM
Tembaga (Cu)	mg/L	0,11	2	<BM
COD	mg/L	1.781,40	100	>BM

Sumber : *) Analisis Laboratorium

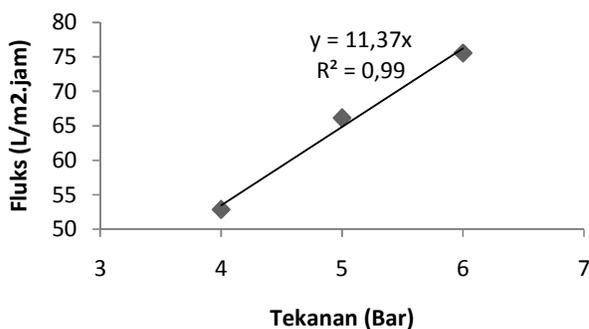
**) Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah No. 5 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah untuk Usaha dan/atau Kegiatan yang Belum Ditetapkan Baku Mutunya

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa lindi TPA mengandung nilai *total dissolved solid* (TDS), *total suspended solid* (TSS), logam besi, dan *chemical oxygen*

demand (COD) yang melebihi baku mutu. Parameter pencemar yang melebihi baku mutu berpotensi dapat merusak lingkungan. Diketuainya komposisi limbah lindi TPA dapat dijadikan sebagai dasar dalam pemilihan jenis pengolahan yang akan digunakan. Yao (2013) menjelaskan bahwa mikrofiltrasi merupakan metode efektif yang diperlukan untuk menghilangkan koloid dan bahan terlarut seperti misalnya dalam *pre-treatment* untuk pengolahan lanjutan menggunakan proses membran lain (UF, NF, atau RO). Mikrofiltrasi tidak dapat dijadikan sebagai metode pengolahan utama sehingga diperlukan adanya pengolahan lanjutan. Hal ini disebabkan tingkat rejeksi dari membran mikrofiltrasi masih belum signifikan. Teknologi nanofiltrasi merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk memenuhi baku mutu air. Nanofiltrasi dapat mengendalikan senyawa organik, anorganik, dan kontaminasi mikroba. Pada penelitian ini parameter pencemar seperti : COD, Fe, TDS, dan TSS diolah menggunakan teknologi membran.

3.2 Karakterisasi Membran Nanofiltrasi NF99

Karakterisasi membran dilakukan untuk menganalisis karakteristik membran NF99 pada kondisi awal. Hasil uji fluks awal (J_0) membran NF99 pada variasi tekanan operasi 4, 5, 6 kg/cm² dapat dilihat pada Gambar 2:



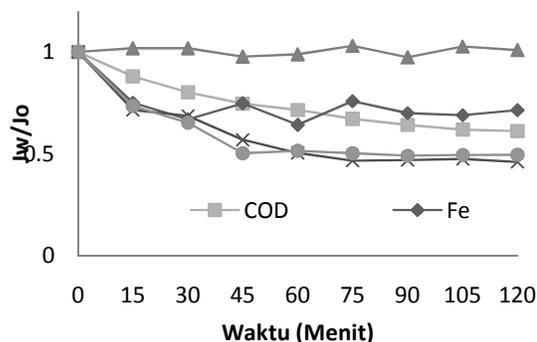
Gambar 2. Uji fluks membran NF99 pada variasi tekanan 4, 5, dan 6 bar

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa pada tekanan operasi 4,5, dan 6 bar masing-masing menghasilkan nilai fluks awal (J_0) sebesar 52,83 L/m².jam, 66,12 L/m².jam,

dan 75,57 L/m².jam dengan nilai koefisien permeabilitas sebesar 11,37 L/m².jam.bar. Hal ini tidak jauh berbeda dengan penelitian Al-Zoubi dkk (2010) yang menyatakan bahwa NF99 menghasilkan nilai koefisien permeabilitas sebesar 6,30 L/m².jam.bar pada operasi tekanan antara 5-20 bar. Ciptarahaja dan Praptowidodo (2006) menyebutkan bahwa nilai koefisien permeabilitas air murni menunjukkan kemudahan molekul air untuk melewati membran. Semakin tinggi nilai koefisien permeabilitas, maka semakin mudah air untuk melewati membran yang pada akhirnya akan memberikan fluks air yang lebih tinggi. Grafik tersebut juga menunjukkan adanya pengaruh tekanan terhadap nilai fluks. Fenomena ini sesuai dengan penelitian Tang dan Chen (2001) yang menyatakan bahwa seiring meningkatnya tekanan, nilai fluks juga meningkat. Meningkatnya tekanan akan meningkatkan *driving force* bagi membran dan memaksa aliran umpan untuk melewati membran sehingga jumlah permeat yang keluar semakin banyak.

3.3 Pengolahan Awal Lindi Menggunakan Membran Mikrofiltrasi

Tujuan dari pengolahan lindi menggunakan membran mikrofiltrasi adalah untuk menyisihkan *Total Suspended Solid* (TSS) dalam umpan. Pada pengolahan ini, parameter yang disisihkan tidak hanya TSS namun juga parameter lain seperti COD, Fe, dan TDS sehingga perlu dilakukan analisis terhadap perbedaan fluks yang dihasilkan dan tingkat rejeksi untuk masing-masing larutan tunggal dan larutan campuran. Grafik nilai fluks dan besar tingkat rejeksi dapat dilihat pada Gambar 3 dan Tabel 2.



Gambar 3. Profil fluks ternormalisasi terhadap waktu menggunakan membran mikrofiltrasi (P = 1 bar)

Gambar 3 menunjukkan profil fluks dari beberapa parameter yang cenderung turun. Pada larutan TDS, tidak

terjadi penurunan yang signifikan sehingga profil fluks cenderung stabil sedangkan untuk larutan COD, campuran, dan TSS penurunan fluks terjadi pada menit ke-15 hingga menit ke-75 kemudian fluks stabil. Penurunan fluks pada larutan Fe terjadi pada menit ke 30.

Tabel 2. Konsentrasi parameter pada membran mikrofiltrasi

Parameter	MF					
	Larutan Lindi Sintetik Tunggal			Larutan Lindi Sintetik Campuran		
	Konsentrasi (mg/L)		Tingkat Rejeksi (%)	Konsentrasi (mg/L)		Tingkat Rejeksi (%)
	Umpan	Permeat		Umpan	Permeat	
COD	1.768,94	1.539,68	13	1.899,94	1.163,04	39
Fe	10,13	9,87	3	10,13	9,87	3
TDS	4.330	4.250	2	4.410	4.290	3
TSS	178	6,58	96	178	6,59	96

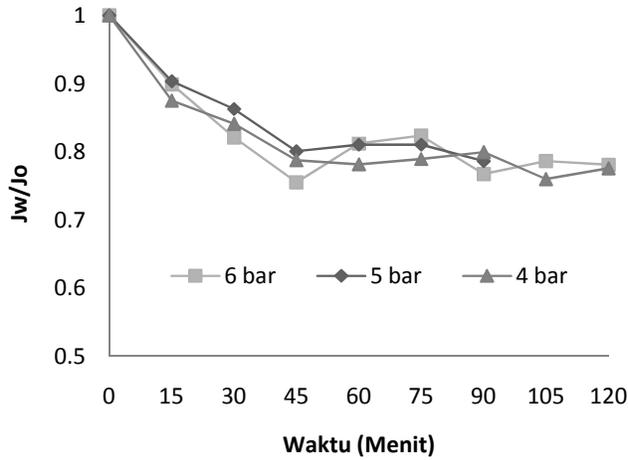
Penurunan fluks menunjukkan bahwa pada membran mikrofiltrasi terjadi *fouling* yang menyebabkan partikel-partikel yang menumpuk pada permukaan membran dan seiring dengan berjalannya waktu semakin bertambah sehingga nilai fluks yang dihasilkan semakin lama semakin kecil. Membran mikrofiltrasi memiliki struktur *microporous* dan proses pemisahan partikelnya berdasarkan ukuran pori. Oleh karena itu, proses pemisahan banyak terjadi pada permukaan luar membran (Ripperger dan Altmann, 2002). Keberadaan *fouling* yang disebabkan oleh adanya proses pemisahan berakibat pada besarnya tingkat rejeksi. Pada Tabel 2 dapat dilihat tingkat rejeksi yang dihasilkan untuk masing-masing parameter berbeda-beda. Untuk parameter TSS tingkat rejeksinya paling tinggi karena ukuran partikelnya lebih besar dari ukuran pori membran mikrofiltrasi sehingga partikel kaolin bisa tertahan. Sedangkan untuk parameter lain seperti COD, TDS, dan Fe tingkat rejeksinya masih kecil. Hal ini dikarenakan ukuran partikel dan bobot molekul untuk ketiga parameter tersebut lebih kecil dari ukuran pori membran mikrofiltrasi sehingga sebagian besar bisa lolos dari membran. Konsentrasi permeat dari mikrofiltrasi ini selanjutnya digunakan sebagai acuan pembuatan lindi sintetik untuk pengolahan lindi menggunakan membran nanofiltrasi.

3.4 Pengolahan Lindi Menggunakan Membran Nanofiltrasi

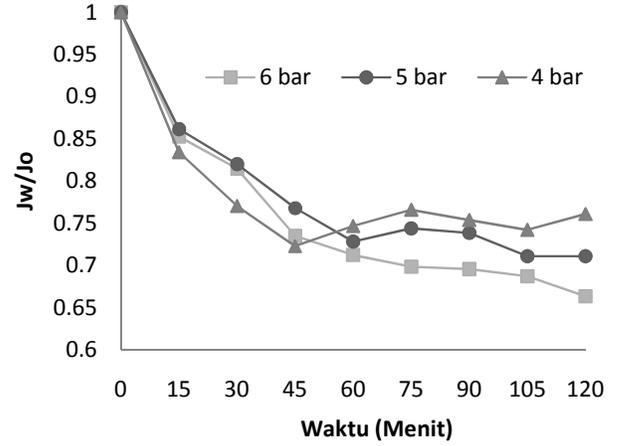
Setelah pengolahan awal menggunakan membran mikrofiltrasi, lindi kemudian diolah menggunakan membran nanofiltrasi NF99. Hal ini bertujuan untuk mengurangi kandungan parameter pencemar yang masih melebihi baku mutu.

3.4.1 Pengaruh Tekanan Operasi Terhadap Kinerja Membran Nanofiltrasi NF99

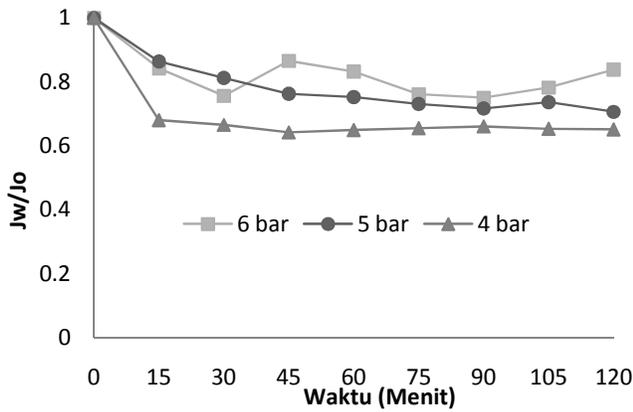
Salah satu faktor yang mempengaruhi proses pemisahan dalam membran nanofiltrasi NF99 adalah pengaruh tekanan. Tujuan dalam pembahasan ini adalah menganalisis pengaruh tekanan terhadap kinerja membran yang dapat terlihat pada grafik nilai fluks yang ditampilkan pada Gambar 4 – 8 dan tingkat rejeksi pada Tabel 3.



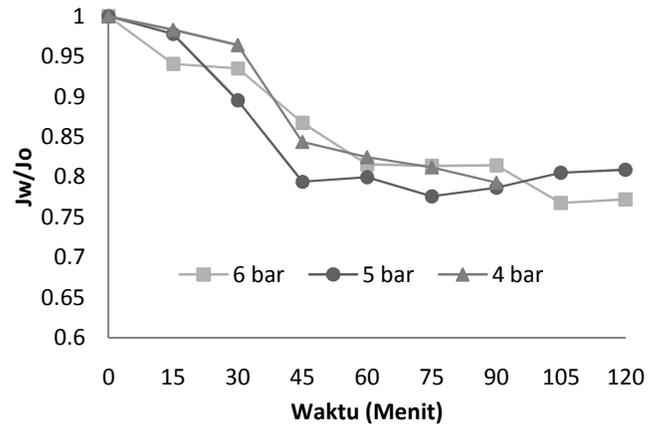
Gambar 4. Profil fluks ternormalisasi terhadap waktu larutan Fe



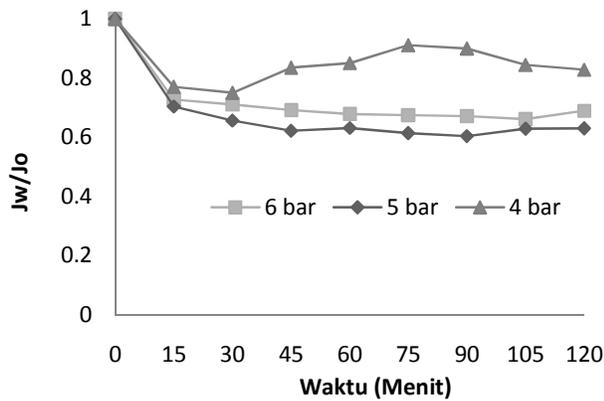
Gambar 5. Profil fluks ternormalisasi terhadap waktu larutan COD



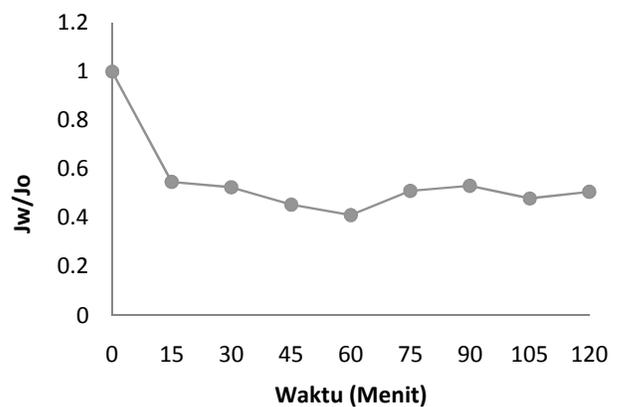
Gambar 6. Profil fluks ternormalisasi terhadap waktu larutan TDS



Gambar 7. Profil fluks ternormalisasi terhadap waktu larutan TSS



Gambar 8. Profil fluks ternormalisasi terhadap waktu larutan campuran



Gambar 9. Profil fluks ternormalisasi membran NF99 terhadap waktu pada umpam limbah lindi TPA

Tabel 3. Konsentrasi permeat dan tingkat rejeksi larutan lindi sintetik pada membran NF99

Parameter	Larutan Sinetetik Tunggal						Larutan Sintetik Campuran					
	4 bar		5 bar		6 bar		4 bar		5 bar		6 bar	
	C (mg/L)	R (%)	C (mg/L)	R (%)	C (mg/L)	R (%)	C (mg/L)	R (%)	C (mg/L)	R (%)	C (mg/L)	R (%)
COD	78,63	94	71,94	95	69,36	95	34,69	97	41,74	96	42,46	96
Fe	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
TDS	2.880	32	2.480	42	2.490	41	1.680	61	1.650	62	1.840	57
TSS	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100

Pada Gambar 4 – 8 dapat terlihat bahwa penurunan profil fluks terjadi pada menit ke 15. Selanjutnya profil fluks mulai stabil pada menit ke 75 untuk larutan Fe, COD, TSS dan pada menit ke 45 untuk TDS dan campuran. Adanya penurunan profil fluks ini disebabkan oleh adanya fouling. Fouling terbentuk dari hasil penambahan, akumulasi, atau adsorpsi foulan pada permukaan membran dan/atau dalam pori membran yang mengakibatkan menurunnya profil fluks (Turan, 2004). Pada Tabel 3 menunjukkan nilai konsentrasi permeat dan tingkat rejeksi untuk tiga variasi tekanan. Besarnya tingkat rejeksi disebabkan oleh adanya proses pemisahan. Menurut Galanakis, dkk (2012) *charge exclusion* dan *sievieng effect* adalah dua faktor utama yang mengakibatkan terjadinya proses pemisahan pada membran nanofiltrasi. *Charge exclusion* tergantung pada tiga parameter yaitu : muatan membran, kekuatan ionik, dan valensi ion. Sedangkan untuk muatan membran sendiri tergantung pada pH larutan umpan.

Pada Tabel 3 menunjukkan bahwa tingkat rejeksi larutan COD sintetik pada semua variasi tekanan untuk larutan sintetik tunggal memiliki tingkat rejeksi yang berkisar antara 94–95 % sedangkan untuk larutan sintetik campuran tingkat rejeksinya mencapai ± 96%. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Madaeni dan Mansourpanah (2006) dimana COD yang disisihkan bisa mencapai 85-98% untuk membran nanofiltrasi. Tingginya tingkat rejeksi disebabkan karena proses pemisahan larutan COD sitentik berdasarkan *sievieng effect*. Menurut Mohammad, dkk (2015) proses pemisahan larutan umpan yang bersifat netral adalah

dengan cara pemisahan berdasarkan ukuran pori. Larutan COD sintetik terbuat dari bahan glukosa dimana glukosa sendiri tidak bermuatan. Sehingga, muatan membran tidak mempengaruhi proses pemisahan. Pada pemisahan ini, ukuran partikel yang lebih besar dari ukuran pori membran akan tertahan pada permukaan membran sedangkan ukuran partikel yang lebih kecil dari ukuran pori membran akan lolos menuju ke permeat. Ukuran partikel glukosa adalah 0,36 nm. Sedangkan ukuran pori membran NF99 adalah 0,88 nm (Madsen dan Søgaard, 2014).

Setelah proses filtrasi, nilai konsentrasi larutan Fe dan TSS semakin rendah sehingga menghasilkan tingkat rejeksi yang tinggi yaitu 100% untuk semua variasi tekanan. Proses pemisahan Fe dan TSS terjadi karena interaksi antara ion dan permukaan membran. Larutan Fe dibuat dari FeCl₃ sehingga saat dikontakkan dengan membran, ion Fe³⁺ teradsorpsi pada permukaan membran. Menurut Tu (2013), ketika membran dikontakkan dengan FeCl₃, densitas muatan permukaan membran menjadi positif. Hal ini bisa dipengaruhi oleh pH larutan yaitu 4 dimana nilai titik isoelektrik membran NF99 adalah mendekati 4 (Galanakis dkk, 2012) sehingga memungkinkan membuat membran bermuatan positif, negatif, atau netral. Pada kasus ini, selain adanya interaksi elektrostatis, pemisahan berdasarkan ukuran pori juga berperan dalam pemisahan Fe. Seperti yang disampaikan Baker (2004), pemisahan garam oleh membran nanofiltrasi lebih rumit dan bisa terjadi secara kombinasi berdasarkan ukuran molekul dan efek *Donnan Exclusion* (interaksi elektrostatis). Untuk larutan

TSS sintetik yang memiliki pH 5 berakibat pada berubahnya muatan membran NF99 menjadi muatan negatif. Hal ini dikarenakan pH 5 berada diatas nilai titik isoelektrik membran NF99. Larutan TSS sintetik dibuat dari kaolin yang bernuatan negatif sehingga saat dikontakkan dengan membran NF99 yang juga bermuatan negatif akan terjadi tolak-menolak antar keduanya yang mengakibatkan partikel tidak bisa melewati membran.

Tingkat rejeksi pada larutan TDS sintetik tunggal maupun campuran mengalami penurunan pada tekanan 6 bar. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada tekanan 6 bar, *driving force* yang diberikan semakin besar sehingga membuat foulan dapat lolos melewati membran dan menurunkan nilai konsentrasi permeat. Mekanisme pemisahan larutan TDS sama halnya dengan pemisahan larutan TSS. Larutan TDS sintetik yang memiliki pH 5 dibuat dari NaCl teknis yang terdiri dari ion Na^+ dan Cl^- . Cl^- bersifat negatif dan membran NF99 juga bersifat negatif maka terjadi tolak menolak. Menurut Tu (2013), proses pemisahan garam pada membran terjadi karena membran yang bermuatan menolak *co-ion* (ion yang memiliki muatan sama dengan permukaan membran). Sedangkan untuk kebutuhan elektronetralitas pada larutan, *counter-ion* (ion yang muatannya berbeda dengan permukaan membran) yaitu Na^+ juga ditolak oleh membran sehingga terjadilah retensi garam.

Konsentrasi permeat pada Tabel 3 kemudian dibandingkan dengan baku mutu Perda Jateng No. 5 Tahun 2012. Dari semua parameter yang diuji pada tiga tekanan operasi, baik umpan tunggal maupun campuran, dihasilkan kualitas permeat yang memenuhi baku mutu untuk parameter COD, Fe, dan TSS. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kinerja membran nanofiltrasi NF99 dalam menurunkan konsentrasi pencemar COD, TSS, TDS, dan Fe sudah cukup baik pada tekanan optimum 4 bar. Tekanan 4 bar ini selanjutnya digunakan untuk membandingkan fenomena fluks yang terjadi dan tingkat rejeksi yang dihasilkan pada larutan umpan lindi TPA.

3.4.2 Pengolahan Limbah Lindi TPA Blondo

Pengolahan limbah lindi TPA diawali dengan *pre-treatment* menggunakan membran mikrofiltrasi dan selanjutnya diolah menggunakan membran nanofiltrasi NF99 pada tekanan operasi 4 bar. Pengolahan ini bertujuan untuk menganalisis profil fluks yang dihasilkan dengan tingkat rejeksi limbah lindi TPA. Pemilihan penggunaan tekanan operasi 4 bar ini didasarkan pada hasil uji permeat larutan umpan lindi sintetik campuran yang pada saat pengolahan di tekanan operasi 4, 5, dan 6 bar didapatkan bahwa pada tekanan 4 bar hasil uji permeat pada beberapa parameter sudah memenuhi baku mutu. Selain itu, penggunaan energi yang lebih rendah juga menjadi salah satu dasar pemilihan penggunaan tekanan operasi 4 bar. Membran nanofiltrasi dapat mengurangi konsumsi energi karena dioperasikan dalam tekanan rendah (Azaïs dkk, 2014). Menurut Mohammad, dkk (2015) penggunaan nanofiltrasi sebagai pengolahan akhir dapat lebih menguntungkan dalam hal efisiensi proses dan pemakaian energi. Semakin tinggi energi yang digunakan maka semakin meningkat pula biaya pemakaiannya.

Gambar 9 menunjukkan bahwa penurunan fluks terjadi pada menit ke 15 dengan nilai fluks ternormalisasi sebesar $0,55 \text{ L/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{bar}$. Penurunan fluks yang signifikan pada 15 menit pertama kemungkinan terjadi karena adanya deposisi awal/adsorpsi foulan pada permukaan membran. Proses *fouling* melibatkan interaksi fisika dan kimia antara foulan dan permukaan polimer yang dipengaruhi oleh temperatur dan larutan umpan. Penurunan fluks yang terjadi tentu berbeda dengan yang terjadi pada umpan lindi maupun campuran. Hal ini bisa disebabkan karena pada lindi TPA terlalu banyak pengotor dari parameter lain selain parameter uji sehingga *fouling* terjadi lebih cepat dari biasanya baik pada membran mikrofiltrasi maupun nanofiltrasi. Selain itu juga terjadi karena perbedaan konsentrasi antara umpan sintetik dan umpan lindi TPA. Semakin banyak solut yang teradsorpsi pada permukaan membran dapat

menyebabkan penurunan fluks dan mempengaruhi tingkat rejeksi.

Tabel 4. Perbedaan tingkat rejeksi lindi TPA dan lindi sintetik

Parameter	MF	NF99 (4 bar)	
	%R	Lindi TPA %R	Lindi Sintetik %R
COD	64	95	97
Fe	70	100	100
TDS	31	79	61
TSS	76	100	100

Tabel 4 menggambarkan bahwa pada larutan lindi sintetik, tingkat rejeksi COD lebih besar daripada lindi TPA. Sedangkan untuk tingkat rejeksi TDS, limbah lindi TPA lebih besar daripada lindi sintetik. Untuk parameter Fe dan TSS, tingkat rejeksi lindi TPA dan lindi sintetik memiliki nilai yang sama yaitu 100%. Membran NF99 memiliki ukuran pori sebesar 200 Da sehingga memiliki kemampuan yang baik untuk melakukan proses pemisahan. Dalam penelitian ini pengaruh ukuran pori dan interaksi muatan menjadi hal yang menentukan besar kecilnya tingkat rejeksi pada penggunaan membran NF99. Dengan kata lain selama pengolahan umpan lindi dengan membran terdapat 2 proses yang terlibat yaitu *shieving mechanism* dan gaya tarik menarik antar muatan membran dengan larutan. Pada jenis membran nanofiltrasi (membran bermuatan), besar kecilnya rejeksi tersebut lebih ditentukan oleh adanya interaksi antar muatan dibandingkan dengan ukuran *molecular weight cut off*. Ditinjau dari proses *shieving mechanism*, proses filtrasi membran disebabkan oleh sifat selektif membran yang dapat menahan koloid yang ukurannya lebih besar dibandingkan ukuran pori membran dan dapat melewati partikel lain yang ukurannya lebih kecil dari pori membran. Sedangkan apabila ditinjau dari adanya interaksi muatan antara muatan membran dengan muatan pada larutan yang sebelumnya telah dibuktikan oleh Al Rashdi (2013) dimana interaksi antara muatan membran dan muatan larutan yang sejenis mengakibatkan tingkat rejeksi membran terhadap larutan semakin meningkat.

Untuk Fe sendiri, pada proses filtrasi terjadi interaksi antara muatan positif pada *iron hydroxides* dengan muatan negatif yang ada pada membran NF99. Hal inilah yang mengakibatkan rejeksi membran NF99 terhadap Fe besar.

3.4.3 Karakterisasi Fouling Pada Permukaan Membran

Pengujian karakterisasi fouling pada membran nanofiltrasi NF99 menggunakan SEM. SEM digunakan untuk mengetahui morfologi membran pada lapisan teratas membran nanofiltrasi NF99. Pengujian dilakukan pada membran baru, membran setelah pengolahan menggunakan lindi TPA, dan larutan lindi campuran sintetik. Hasil SEM dengan perbesaran 2.000x dapat dilihat pada Gambar 10.

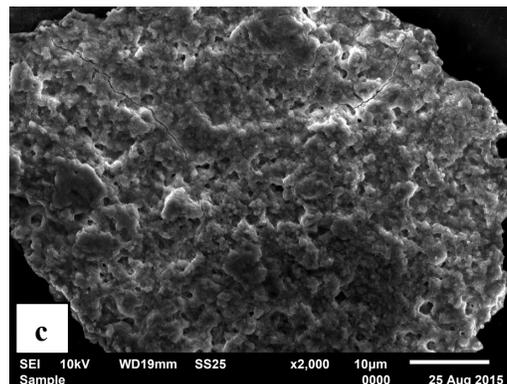
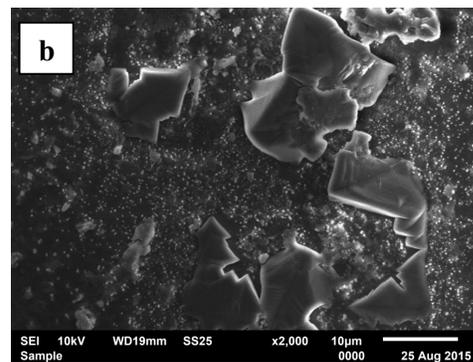
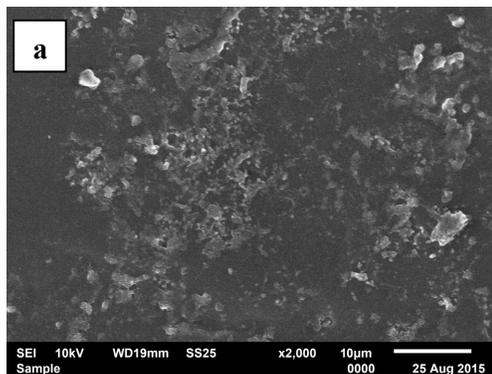
Terlihat pada Gambar 10, membran NF99 baru (a) memiliki morfologi permukaan membran yang halus. Hal ini disebabkan karena membran masih bersih dan tidak ada pengotor pada permukaan membran. Setelah dilakukan pengolahan menggunakan larutan lindi sintetik (b) dan lindi TPA (c) terdapat agregat yang menyebar menutupi permukaan membran. Keberadaan agregat mengindikasikan terjadinya *fouling* pada membran. Mekanisme *fouling* yang terjadi adalah *cake layer formation*. Mekanisme ini disebabkan oleh interaksi antara membran dengan larutan umpan.

Terbentuknya *cake layer formation* pada Gambar 10(b) disebabkan karena adanya glukosa dalam lindi sintetik. Pada larutan lindi sintetik campuran, terdapat COD yang dibuat dari glukosa yang bermuatan netral. Selain itu, lindi sintetik juga mengandung garam NaCl, FeCl₃, dan kaolin yang masing-masing senyawa memiliki muatan yang dapat mempengaruhi proses terjadinya fouling. Menurut Yukselen & Kaya (2002), keberadaan kation monovalen dapat menyebabkan zeta potensial lebih negatif karena terjadi pertukaran kation dengan H⁺ dari sistem. Ketika terjadi pertukaran ion ini lah, ketebalan EDL meningkat karena meningkat. Sedangkan zeta potensial kaolin akibat kation divalen (dalam hal ini Fe³⁺) lebih kecil dari kation monovalen. Semakin tinggi konsentrasi ion atau semakin bertambahnya valensi ion,

ketebalan EDL semakin kecil dan menyebabkan zeta potensial semakin rendah. Secara umum, keberadaan kation dalam NaCl dan FeCl₃ menyebabkan kestabilan koloid terganggu sehingga akhirnya terbentuklah agregat dari masing-masing koloid. Terdapatnya reaksi antara koloid dan kation ini mempengaruhi fouling dan tingkat rejeksi. Semakin banyak kation yang teradsorpsi pada kaolin semakin tinggi tingkat rejeksi garam.

Adanya *cake layer formation* meningkatkan pengaruh pemisahan sehingga menghasilkan tingkat rejeksi yang besar (Vogel, 2000). Pada Gambar 10(c) terbentuknya *cake layer formation* ini bisa diakibatkan karena berbagai hal. Salah satunya karena masih adanya padatan tersuspensi yang belum tersisihkan dari membran mikrofiltrasi. Menurut Van der Bruggen dkk (2008) berdasar pada ukuran partikel koloid dan pori membran, *colloidal fouling* mungkin terjadi karena adanya akumulasi partikel pada permukaan membran dan membentuk *cake* atau penetrasi dalam pori membran. Untuk larutan yang mengandung senyawa organik dimana hanya terdapat sedikit *suspended solids* dapat

menyebabkan adsorpsi senyawa organik pada permukaan membran (Hilal dkk, 2004). Pada senyawa organik yang bermuatan, *electrostatic attraction* atau *electrostatic repulsion* antara senyawa dan membran mempengaruhi tingkat fouling (Van der Bruggen dkk, 2008). Selain itu, adanya senyawa organik dan anorganik lainnya yang terkandung dalam lindi TPA juga berperan penting dalam pembentukan *fouling* karena memungkinkan terjadinya interaksi antar komponen yang ada. Interaksi yang mungkin terjadi adalah senyawa organik dengan koloid, senyawa organik dengan logam, dan logam dengan koloid. Berbeda dengan lindi sintetik yang hanya menggunakan glukosa yang bermuatan netral, pada lindi TPA terdapat lebih banyak jenis senyawa organik yang muatannya berbeda-beda. Menurut Schafer *et al* (2004), *fouling* organik adalah penurunan fluks *irreversible* yang diakibatkan adsorpsi atau deposisi senyawa organik koloid atau terlarut. Senyawa organik mungkin teradsorpsi atau terdeposisi pada permukaan membran atau pada koloid.



Gambar 10. Hasil SEM pada permukaan atas (a) membran baru, membran setelah pengolahan menggunakan (b) larutan lindi campuran sintetik, dan (c) lindi TPA.

4. KESIMPULAN

Kinerja membran nanofiltrasi NF99 pada pengolahan limbah lindi dapat terlihat pada profil fluks dan tingkat rejeksi. Terlihat adanya penurunan profil fluks pada saat penyisihan parameter COD, Fe, TDS, dan TSS. Profil fluks yang mengalami penurunan mengindikasikan bahwa terjadi fouling pada permukaan membran sehingga meningkatkan tingkat rejeksi. Pada larutan lindi sintetik tunggal tingkat rejeksi COD dapat mencapai 95%, Fe dan TSS sebesar 100%, serta TDS sebesar 42% sedangkan untuk larutan lindi sintetik campuran tingkat rejeksi COD mencapai 97%, Fe dan TSS sebesar 100%, serta TDS sebesar 62%.

Tekanan operasi yang bertindak sebagai *driving force* mempengaruhi kinerja membran nanofiltrasi NF99. Dari ketiga jenis variasi tekanan yang diteliti (4, 5, dan 6 bar) didapatkan tekanan operasi optimum untuk menyisihkan parameter COD, Fe, TDS, dan TSS yaitu pada tekanan operasi 4 bar. Pemilihan tekanan operasi optimum 4 bar disebabkan karena parameter COD, Fe, TDS, dan TSS pada limbah lindi sudah memenuhi baku mutu. Selain itu, penggunaan tekanan operasi 4 bar juga mampu menghemat pemakaian energi dibandingkan dengan penggunaan tekanan operasi 5 dan 6 bar.

Terdapat dua proses pemisahan yang terlibat pada pengolahan limbah lindi TPA menggunakan membran nanofiltrasi NF99. Dua proses pemisahan tersebut adalah *shieving mechanism* dan gaya tarik menarik antar muatan membran dengan larutan. Adanya dua proses pemisahan ini menyebabkan terjadinya fouling dan menurunkan profil fluks sehingga tingkat rejeksi yang dihasilkan untuk parameter COD sebesar 95%, Fe dan TSS sebesar 100%, sedangkan TDS sebesar 79%.

Acknowledgements: Penulis mengucapkan terima kasih kepada laboratorium *Membrane Reseach Center* yang telah membiayai penelitian ini.

5. REFERENSI

- Al-Rashdi, B.A.M., Johnson, D.J., Hilal N. 2013. *Removal of Heavy Metal Ions by Nanofiltration*. Journal of Desalination 315 (2-17).
- Al-Zoubi, H, Rieger, A., Steinberger, P., Pelz, W., Haseneder, R., Härtel, G. 2010. *Optimization Study for Treatment of Acid Mine Drainage Using Membrane Technology*. Separation Science and Technology 45: 14.
- Ali, M. 2011. "Rembesan Air Lindi (Leachate) Dampak Pada Tanaman Pangan dan Kesehatan". Surabaya : Upn Press.
- Almazán, J. E., Romero-Dondiz, E. M., Rajal, V.B., Castro-Vidaurre, E. F. 2015. *Nanofiltration of Glucose : Analysis of Parameters and Membrane Characterization*. Journal of Chemical Engineering Research and Design 94 (485-493).
- Amuda, O. S. 2006. *Removal of COD and Colour from Sanitary Landfill Leachate by Using Coagulation – Feton's Process*. J. Appl. Sci. Environ. Mgt. Vol. 10 (2) 49-53.
- Anonim. Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah No.5 tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah.
- Azaïs, A, Mendret, J., Gassara, S., Petit, E., André, D., Brosillon, S. 2014. *Nanofiltration dor Wastewater Reuse : Counteractive Effects of Fouling and Matrice on The Rejection of Pharmaceutical Active Coumpounds*. Separation and Purification Technology 133 (313-327).
- Baker, W.R. 2004. *Membrane Technology and Applications.*, 2nd edition., California : Jon Willey & Sons.
- Bódalo, A., Gómez, E., Hidalgo, A. M., Gómez, M., Murcia, M. D., López, I. 2009. *Nanofiltration Membranes to Reduce Phenol Concentration in*

- Wastewater*. Journal of Desalination 246 (307-313).
- Ciptaraharja, I., Praptowidodo, V. S. 2006. "Membran Nanofiltrasi Untuk Penghilangan Ion Valensi Tinggi dan Senyawa Organik dari Sumber Air Salinitas Tinggi". Jurnal Teknik Kimia Indonesia Vol. 5 No. 3 Desember 2006 : 478-489.
- Dandautiya, R. 2012. *Comparative Study of Existing Leachate Treatment Methods*. International Conference on Recent Trends in Engineering and Technology 192-202.
- Galanakis, C., Fountoulis, G., Gekas, V. 2012. *Nanofiltration of Brackish Groundwater by using a Polypiperazine Membrane*. Journal of Desalination 286 (77-284).
- Hidalgo, A. M., León, G., Gómez, M., Murcia, M. D., Gómez, E., Gómez, J. L. 2013. *Application of the Spiegler-Kedem-Kachalsky Model to the Removal of 4-Chlorophenol by Different Nanofiltration Membranes*. Journal of Desalination 315 (70-75).
- Madaeni, S dan Mansourpanah Y. 2006. *Screening membranes for COD Removal From Dilute Wastewater*. Journal of Desalination 197 (23-32)
- Madsen, H dan Søgaard, E. 2014. *Applicability and Modelling of Nanofiltration and Reverse Osmosis for Remediation of Groundwater Polluted with Pesticides and Pesticide Transformation Products*. Journal of Separation and Purification Technology 125 (111-119).
- Mänttari, M., Pihlajamäki, A., Kaipainen, E., Nyström, M. *Effect of Temperature and Membrane Pre-Treatment by Pressure on the Filtration Properties of Nanofiltration Membranes*. 2002. Journal of Desalination 145 (81-86).
- Marañón, E., Castrillón, L., Nava, Y.f., Méndez, A. F., Sánchez, A. F. 2009. *Tertiary Treatment of Landfill Leachates by Adsorption*. Waste Management & Research : 27 : 527-533.
- Mohammad, A., Teow, Y., Ang, W., Chung, Y., Oatley-Radcliffe, D., Hilal N. 2015. *Nanofiltration Membranes Review : Recent Advantages and Future Prospects*. Journal of Desalination 356 (226-254).
- Ngo, H.H., Guo, W. S., Xing, W. 2010. *Applied Technologies in Municipal Solid Waste Landfill Leachate Treatment*. Water and Wastewater Treatment Technologies, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Vigneswaran, S. (Ed.). Developed under the Auspices of UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK. Vol. 2, 199-257.
- Ripperger, S dan Altmann, J. 2002. *Crossflow Microfiltration – State of The Art*. Separation and Purification Technology 26 (19-31).
- Schäfer, A.I., Fane A.G., Waite, T.D. 2005. *Nanofiltration – Principles and Applications*. Oxford : Elsevier, pp.169–240.
- Scott, J., Beydoun, D., Amal, R., Low, G., Cattle, J. 2005. *Landfill management, leachate generation, and leach testing of solid wastes in Australia and overseas*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology Vol. 35, No. 3, pp.239 – 332.
- Stuart, B. 2004. *Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications*. California : Jon Willey & Sons.
- Tang, C., Chen, V. 2002. *Nanofiltration of Textile Wastewater for Water Reuse*. Journal of Desalination 143 (11-20).
- Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A., Samaras, P. 2003. *Coagulation-Flocculation Pretreatment of Sanitary Landfill Leachates*. Chemosphere 53,737-744.
- Teixeira, M. R., Rosa, S. M., Sousa, V. 2011. *Natural Organic Matter and Disinfection by-Products Formation Potential in Water Treatment*. Water Resour Manage 25 (3005-3015).

- Tu, N. P. 2013. *Role of Charge Effect During Membrane Filtration*. Ghent. Master in Environmental Sanitation – Universiteit Gent.
- Turan, M. 2004. *Influence of Filtration Conditions on the Performance of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes in Dairy Wastewater Treatment*. Journal of Desalination 170 (83-90).
- Van der Bruggen, B., Mänttari, M., Nyström, M. 2008. *Drawback of Applying Nanofiltration and How to Avoid Them : A Review*. Separation and Purification Technology 63 (251-263).
- Vogel, D., Bilitewski, B., Nghiem, L. D. 2007. *Membrane Fouling in the Nanofiltration of Landfill Leachate and Its Impact on Trace Contaminant Removal*. International Journal of Environmental and Waste Management Vol. 1, No. 4, pp.338-350
- Yao, P. 2013. *Prespective on Technology for Landfill Leachate Treatment*. Arabian Journal of Chemistry.
- Yukselen, Y. dan Kaya, A. 2002. *Zeta Potential of Kaolinite in The Presence of Alkali, Alkaline Earth and Hydrolyzable Metal Ions*. Water, Air, and Soil Pollution 145 : 155-168.