



Fouling dan Cleaning Membran Reverse Osmosis Tekanan Rendah untuk Aplikasi Daur Ulang Air Limbah Domestik

Retno Dwi Jayanti¹ dan I Nyoman Widiasta^{2 *}

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof H Soedarto Kampus UNDIP Tembalang 50275. Telepon/Fax (024)7460058/(024)76480675

E-mail: widiasta@undip.ac.id

Abstract

Separation process by reverse osmosis membrane for wastewater reuse is an advantage process because of feasible cost and able to produce high quality of product water. The used of RO membrane on wastewater reuse application is often limited by fouling phenomena, that is the accumulation of some types of foulant on the membrane surface. An understanding of the foulant types and the fouling mechanism is the key to success in RO membrane chemical cleaning. This review discusses numerous works about the fouling mechanisms and cleaning procedures.

Keywords: *Chemical cleaning, Domestic wastewater, Fouling, Reverse Osmosis membrane*

Pendahuluan

Sekarang ini dunia dihadapkan pada krisis air bersih. Sumber daya air yang tersedia tidak mampu mencukupi kebutuhan air bersih di beberapa negara (Brandão *et al.*, 2013; López-Ramírez *et al.*, 2006; Wintgens *et al.*, 2005). Selama lebih dari 10 tahun telah dikembangkan cara-cara untuk memperoleh air bersih, termasuk diantaranya desalinasi air laut, air payau, hingga daur ulang air limbah (Bixio dan Wintgens, 2008). Daur ulang air limbah banyak dilakukan di beberapa negara (Kordatau *et al.*, 2015) untuk memenuhi kebutuhan air di sektor pertanian, industri, pariwisata dan lingkungan (Bixio *et al.*, 2008). Dengan target produk akhir air bersih, teknologi membran berkembang secara signifikan pada pengolahan air limbah (Ranade dan Bhandari, 2014).

Keuntungan dari penggunaan teknologi membran pada aplikasi pengolahan air limbah adalah penggunaan energi dan biaya yang rendah. Untuk dapat mengubah air limbah domestik menjadi air bersih maka efluen perlu diolah lebih lanjut dengan instalasi tambahan yang disebut WTP (Water Treatment Plant) (Pandey *et al.*, 2012). Salah satu unit WTP yang saat ini banyak digunakan adalah sistem reverse osmosis (RO). Keberhasilan penggunaan sistem RO pada pengolahan limbah tingkat lanjut telah dilaporkan oleh beberapa peneliti (López-Ramírez *et al.*, 2006; Koo *et al.*, 2011; Ochando-Pulido *et al.*, 2015).

Sistem pengolahan limbah menggunakan membran RO diawali dengan proses pre-treatment (Pandey *et al.*, 2012; Puretec, 2011) yang meliputi multi media filter yang terbuat dari batuan antrasit, pasir, dan garnet kemudian dilanjutkan dengan pemisahan menggunakan membran MF, penambahan *antiscalant*, *water softening*, dan penambahan sodium metabisulfit (SMBS) (Puretec, 2011; Wintgens *et al.*, 2005). Proses pre-treatment pada sistem RO bertujuan untuk menghilangkan impuritas berupa padatan terlarut yang terdapat pada air umpan (CSM, 2008; Malaeb dan Ayoub, 2011). Akan tetapi, pada kenyataannya proses pre-treatment tidak mampu menghilangkan impuritas air umpan secara sempurna, sehingga menyebabkan timbulnya fouling pada membran (CSM, 2008; Lee *et al.*, 2006)

Beberapa penelitian mengenai pengendalian fouling pada membran telah dilakukan, mulai dari mengembangkan proses pre-treatment yang sesuai (Lorain *et al.*, 2007; Shon *et al.*, 2009) hingga modifikasi membran antifouling (Asatekin *et al.*, 2007; Kang dan Cao., 2012). Meskipun beberapa usaha mengenai pengendalian fouling telah dilakukan, fouling pada membran tetap terjadi (Ang *et al.*, 2011). Dengan demikian, metode yang tepat untuk menghilangkan fouling pada membran adalah melalui pencucian kimia. Jenis-jenis larutan kimia yang umum digunakan dalam pencucian membran adalah larutan asam, basa, logam *chelating agent*, detergen, dan enzim. Metode pencucian kimia membran telah dilaporkan mampu mengembalikan kondisi membran menjadi bersih, memperbaiki fluks membran, dan mampu memperpanjang umur membran (Arnal *et al.*, 2011). Paper ini menyajikan review mengenai foulant-foulant utama yang mengkontaminasi membran RO pada aplikasi daur ulang air limbah domestik dan metode pencucian yang sesuai untuk digunakan selama sistem berjalan.



Air Limbah Domestik

Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 112 Tahun 2003 yang dimaksud air limbah domestik adalah air limbah yang berasal dari kegiatan usaha dan/atau kegiatan pemukiman, rumah makan, perkantoran, perniagaan, apartemen, dan asrama. Berdasarkan sumbernya, air limbah mempunyai komposisi yang sangat bervariasi. Namun, secara umum jenis-jenis kontaminan pada air limbah domestik tersaji pada tabel 1.

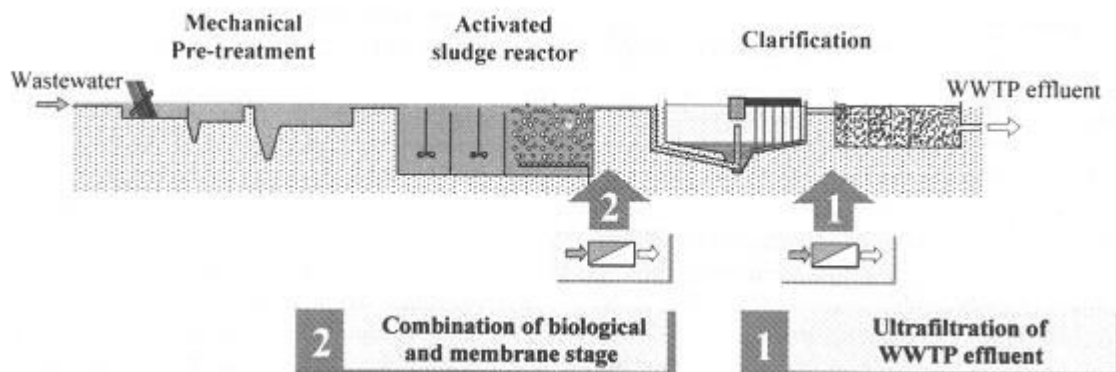
Tabel 1. Kontaminan pada Air Limbah Domestik (Metcalf dan Eddy, 2003)

Parameter	Konsentrasi	
	Kisaran	Rata - rata
Padatan:		
- Terlarut	250 – 850	500
- Tersuspensi	100 – 350	220
- BOD	110 – 400	220
- COD	250 – 1000	500
- TOC	80 – 290	160
Nitrogen:		
- Organik	8 – 35	15
- NH ₃	12 – 50	25
Fosfor:		
- Organik	1 – 5	3
- Anorganik	3 – 10	5
- Chlorida	30 – 100	50
- Minyak dan lemak	50 – 150	100
- Alkalinitas	50 – 200	100

Apabila kandungan kontaminan limbah domestik pada Tabel 1 tersebut dibandingkan dengan persyaratan air bersih (Permenkes No. 416, 1990) maupun air minum (Permenkes No. 492, 2010), sangat jelas bahwa perlunya proses pengolahan untuk dapat menjadikan air limbah domestik sebagai air bersih. Untuk dapat mengubah air limbah domestik menjadi air bersih maka efluen perlu diolah lebih lanjut dengan instalasi tambahan yang disebut WTP (Water Treatment Plant) (Pandey *et al.*, 2012).

Sistem Reverse Osmosis pada pengolahan air limbah domestik

Pengolahan limbah menyajikan solusi yang tepat untuk mengatasi berkurangnya sumber air bersih (Wintgens *et al.*, 2005). Sistem Reverse Osmosis (RO) pada aplikasi pengolahan air limbah umumnya digunakan pada proses post-treatment karena mampu menghilangkan ion-ion terlarut, padatan terlarut, dan bahan-bahan organik (Pandey *et al.*, 2012). Akan tetapi, terdapat masalah yang menjadi perhatian oleh pelaku industri mengenai penggunaan sistem RO, yaitu fouling pada membran.



Gambar 1. Aplikasi Membran pada Sistem Pengolahan Limbah (Witgens *et al.*, 2005)

Dalam pengolahan air limbah, pengendalian fouling dilakukan mulai dari proses pre-treatment air umpan untuk menghilangkan padatan terlarut (Lorain *et al.*, 2007; Shon *et al.*, 2009) dan mencegah aktivitas biologis pada mikroba (Al-Juboori dan Yusaf, 2012). Fouling pada membran umumnya disebabkan oleh kurang efektifnya proses



pre-treatment pada air umpan (Lee *et al.*, 2006). Peristiwa fouling pada membran dapat diketahui dengan penurunan fluks. Peristiwa fouling ini mengakibatkan penurunan rejeksi, penurunan *life time* membran, hingga penggantian membran (Tang *et al.*, 2007). Pentingnya pengendalian fouling dengan cara pencucian kimia perlu diperhatikan untuk menghilangkan foulan-foulan yang menempel pada permukaan membran.

Tipe Fouling

Fouling dapat dibagi menjadi fouling reversibel dan irreversibel, tergantung pada kekuatan partikel yang menempel pada permukaan membran. Fouling reversibel dapat dihilangkan dengan melakukan *backwash*. Fouling irreversibel disebabkan oleh kuatnya partikel yang menempel pada permukaan membran dan dapat dihilangkan dengan pencucian fisika (Beyer *et al.*, 2010). Pembentukan matriks yang kuat pada lapisan fouling dengan zat terlarut selama proses filtrasi berlangsung dapat menyebabkan fouling reversibel berubah menjadi fouling irreversibel. Fouling membran pada proses RO umumnya ditandai dan diukur dari penurunan fluks pada kondisi operasi konstan. Fouling pada membran disebabkan oleh partikel atau koloid yang terdapat pada air umpan dan terdepositasi pada permukaan membran. Bahan organik, presipitat garam anorganik yang telah lama terdepositasi pada membran, dan pertumbuhan mikroorganisme merupakan penyebab terjadinya fouling (Porcelli dan Jud, 2010). Mekanisme utama fouling pada membran reverse osmosis adalah fouling pada permukaan. Fouling permukaan dapat berasal dari macam-macam kontaminan, termasuk partikulat anorganik, bahan organik terlarut, padatan terlarut, dan bahan biogenik (Beyer *et al.*, 2010).

Fouling organik

Fouling organik banyak ditemukan pada air umpan yang mengandung *natural organic matter* (NOM) yang relatif tinggi. NOM yang terdapat di dalam air mengandung senyawa-senyawa organik yang mempunyai sifat hidrofobik dan hidrofilik dengan kisaran berat molekul yang luas. Selain NOM, efluen limbah domestik juga mengandung *effluent organic matter* (EfOM). Berdasarkan ukurannya, EfOM diklasifikasikan ke dalam 2 kelompok, yaitu (1) *particulate organic carbon* (POC) dengan ukuran molekul di atas 0.45 μm dan (2) *dissolved organic carbon* (DOC) yang berukuran molekul lebih kecil. POC terdiri dari zooplankton, alga, bakteri, dan bahan-bahan organik dari tanah dan tanaman. POC dapat dihilangkan melalui proses pemisahan padat-cair sedangkan DOC dapat menyebabkan fouling pada membran (Pandey *et al.*, 2012; Lee dan Elimelech, 2007).

Adanya EfOM dapat mengakibatkan peningkatan proses pre-treatment dan fenomena fouling, khususnya fouling organik dan fouling mikroba (biofouling). Penelitian yang dilakukan oleh Schneider *et al.*, (2005) menyebutkan bahwa EfOM merupakan foulan utama pada membran RO dan terakumulasi pada permukaan membran sebagai lapisan yang melekat dan memerangkap partikulat. Disamping itu, EfOM juga berperan sebagai sisi nukleasi bagi garam-garam yang tidak larut sempurna sehingga menyebabkan fouling irreversibel. Hasil penelitian Zhao *et al.*, (2010) menyimpulkan bahwa fouling organik yang disebabkan oleh EfOM meningkat pesat dengan peningkatan *recovery* permeal. Perlunya kontrol fouling organik pada membran juga dikemukakan dalam penelitian tersebut.

Madaeni dan Samieirad (2011) melaporkan bahwa EfOM mengandung polisakarida, protein, gula amino, asam nukleat, asam humat dan asam fulvat, asam organik, dan komponen-komponen sel. Fouling organik pada membran RO yang disebabkan oleh EfOM dapat meluas karena ukuran EfOM yang kecil yang memungkinkan dapat melewati pori membran MF dan UF pada pre-treatment. Adanya ion Ca^{2+} pada air umpan dapat membentuk kompleks dengan EfOM dan memperparah fouling membran. Lee *et al.*, (2006) mengemukakan bahwa EfOM sebagian besar mengandung polisakarida yang terbentuk selama proses treatment limbah secara biologis. Selain itu, polisakarida juga merupakan bagian dari mikroba yang mudah larut.

Fouling Koloid

Koloid merupakan partikulat anorganik yang berukuran mikrometer hingga nanometer. Koloid yang menyebabkan fouling pada membran dibagi menjadi 3 jenis, yaitu koloid anorganik (*clays*, silika, garam-garam anorganik, dan oksida logam), organik (kumpulan bahan-bahan organik alam dan sintetis), dan biologi (bakteri dan mikroorganisme) (Pandey *et al.*, 2012). Partikel dan koloid menyebabkan fouling reversibel karena akumulasi keduanya pada permukaan membran. Untuk menghilangkan fouling reversibel cukup dengan cara pencucian hidraulik, seperti *backwash* dan *air scrubbing*. Lain halnya jika ukuran partikel dan koloid lebih kecil dari ukuran pori membran, hal ini dapat menyebabkan partikel dan koloid terperangkap di dalam matriks struktur membran sehingga tidak mampu dihilangkan dengan pencucian secara hidraulik (Reardon *et al.*, 2005).

Tingginya konsentrasi ion-ion yang terejeksi pada permukaan membran dapat menyebabkan peningkatan agregasi bahan-bahan terlarut menjadi partikel koloid. Hal ini mempengaruhi retensi garam dan konsentrasi polarisasi pada permukaan membran melalui interaksi elektrostatis antara partikel-membran dan partikel-partikel yang menyebabkan fouling pada membran. Fouling ini dapat merusak kinerja elemen RO berupa penurunan produktivitas dan kemampuan rejeksi (Pandey *et al.*, 2012). Foulan koloid jenis lain yang ditemukan pada air limbah



yang diolah secara biologi adalah ion kalsium melalui pembentukan kompleks dengan makromolekul alginat (Lee *et al.*, 2006).

Fouling Mikroba / Biofouling

Biofouling disebabkan oleh bakteri, jamur, dan mikroorganisme sel tunggal lain yang aktif secara biologi (Cornelissen *et al.*, 2007). Biofouling merupakan proses dinamis akibat kolonisasi dan pertumbuhan mikroba, yang pada akhirnya membentuk biofilm. Apabila kolonisasi mikroba terjadi pada membran selulosa asetat dapat menyebabkan kerusakan yang irreversibel, sebaliknya apabila terjadi pada membran poliamida dapat menyebabkan fouling (López-Ramírez *et al.*, 2006). Hal ini merupakan masalah yang paling besar dalam filtrasi membran. Meskipun proses filtrasi dengan membran mampu menghilangkan sebanyak 99.9% mikroorganisme (Pandey *et al.*, 2012), akan tetapi masih terdapat sel-sel mikroba yang tinggal dan membentuk biofilm yang menyebabkan penurunan fluks dan fouling irreversibel.

Pembentukan biofilm oleh mikroba di dalam permukaan membran diawali dengan pelekatan bakteri pada permukaan membran dan produksi *extracellular polymeric substances* (EPS) yang berbentuk gel dan berlendir (Matin *et al.*, 2011). EPS terdiri dari hetero-polisakarida dan bermuatan negatif. Struktur gel ini melindungi sel-sel bakteri dari tekanan hidraulik dan serangan kimia pada biosida, seperti klorin. Biofilm berperan dalam teknologi pengolahan air limbah untuk menguraikan kontaminan organik secara biologi dan mengkonversi kontaminan-kontaminan anorganik menjadi bahan yang tidak berbahaya. Pertumbuhan biofilm yang tidak terkendali dapat menyebabkan biofouling yang dapat menyumbat membran, menginaktivasi permukaan, dan merusak sistem. Biofouling juga dapat menyebabkan peningkatan pressure drop (Creber *et al.*, 2010).

Perlunya kontrol biofouling tidak hanya dilakukan pada saat sistem berjalan, tetapi juga pada saat sistem tidak beroperasi karena sedang modifikasi dan perbaikan sistem. Bahkan kontrol biofouling juga harus dilakukan pada saat pengemasan modul membran baru dan akan disimpan pada waktu yang lama sebelum instalasi (Matin *et al.*, 2011).

Fouling anorganik/ Scaling

Scaling didefinisikan sebagai proses terbentuknya lapisan oleh komponen-komponen anorganik pada permukaan membran. *Scaling* yang terjadi pada permukaan membran RO dapat mengurangi efisiensi proses yaitu mengurangi fluks pada permeat (produk) dan mengurangi rejeksi garam-garam yang terkandung pada umpan. Selain itu, *scaling* juga dapat menyebabkan kerusakan membran dan akhirnya mengurangi ketahanan serta memperpendek umur membran (Mustofa, 2007; Oh *et al.*, 2009). Pembentukan *scaling* pada membran RO diawali dengan polarisasi konsentrasi akibat rejeksi garam-garam terlarut oleh membran pada saat proses. Pada keadaan tertentu, garam-garam tersebut akan mengalami supersaturasi yang diikuti oleh pembentukan inti kristal dan pertumbuhan kristal (Antony *et al.*, 2011). Metode yang digunakan untuk memperkirakan potensi *scaling* pada umpan antara lain *Langelier Saturation Index* (LSI), *Stiff Davis Stability Index* dan *Ryznar Stability Index*. Selain itu, terdapat juga metode rasio supersaturasi, yaitu perbandingan antara *ion activity product* dan K_{sp} (Tzotzi *et al.*, 2007).

Proses pembentukan *scale* merupakan proses yang sangat rumit dan melibatkan mekanisme kristalisasi dan transportasi hidrodinamik. Terdapat dua mekanisme kristalisasi yang sampai saat ini bisa terdeteksi dari fenomena *scaling*, yaitu kristalisasi permukaan (heterogen) dan kristalisasi *bulk* (homogen). Pada kristalisasi permukaan, penurunan fluks terjadi akibat adanya pertumbuhan deposit kerak secara lateral yang memblokir permukaan membran, sedangkan pada kristalisasi *bulk*, kristal terbentuk pada sedimen larutan *bulk* di permukaan membran yang menyebabkan terjadinya penurunan fluks (Oh *et al.*, 2009). Mekanisme pembentukan *scale* pada permukaan membran RO yang telah dikemukakan oleh Cohen *et al.* (2002) adalah (1) *Induction time* untuk proses inisiasi kristal; (2) transportasi kristal; (3) Pengikatan kristal; (4) *Removal*; (5) *Ageing*.

Beberapa senyawa anorganik penyebab *scaling* yang terdapat pada air limbah domestik yaitu CaCO_3 (Yang *et al.*, 2008), CaSO_4 (Antony *et al.*, 2011), dan SrSO_4 (Chesters, 2009). Singh (2006) mengurutkan garam/mineral penyebab *scaling* berdasarkan kecepatan pengendapan sebagai berikut: $\text{CaCO}_3 > \text{CaSO}_4 > \text{Silika} > \text{SrCO}_3 > \text{BaSO}_4 > \text{SrSO}_4 > \text{CaF}_2 > \text{CaSiO}_4 > \text{MgSiO}_3 > \text{MgSiO}_3 > \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 > \text{Fe}(\text{OH})_2$.

Pencucian Membran

Pencucian membran merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi fouling pada membran (Greenlee *et al.*, 2009). Dibandingkan dengan metode lain seperti pre-treatment dan modifikasi membran, pencucian membran merupakan metode yang mampu mengembalikan permeabilitas membran secara langsung dan lebih cepat (Huajuan, 2009). Larutan-larutan kimia yang umum digunakan dalam pencucian membran dikategorikan ke dalam 5 jenis, yaitu asam (asam sitrat, HCl), alkali (NaOH), *chelating agent* (EDTA, poliakrilat), surfaktan (SDS), dan enzim (protease, amilase) (Ang *et al.*, 2006; Huajuan, 2009; Ang *et al.*, 2011; Madaeni dan Samieirad, 2011).

Larutan alkali dapat menghilangkan foulant organik pada membran melalui hidrolisis dan solubilisasi, serta dengan menggeneralisasikan interaksi elektrostatis antara foulant yang bermuatan negatif dan membran ketika pH larutan ditingkatkan. *Chelating agent* memecah integritas struktur pada lapisan fouling melalui penghilangan kation

divalen di dalam lapisan fouling yang bertindak sebagai agen pengikat bagi molekul-molekul organik. Surfaktan merupakan senyawa yang memiliki gugus hidofilik dan hidrofobik, larut sebagian di dalam pelarut air dan organik. Surfaktan dapat melarutkan makromolekul melalui pembentukan *micell* dan dapat membantu menghilangkan foulant pada permukaan membran (Ang *et al.*, 2011). Jenis-jenis larutan kimia pencuci dan kemampuannya untuk menghilangkan jenis foulant tertentu disajikan pada Tabel 2.

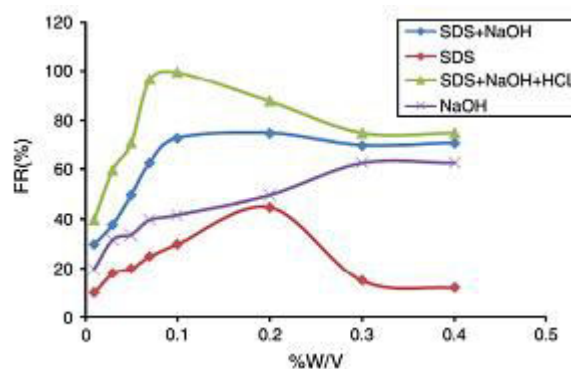
Tabel 2. Jenis-jenis Larutan Kimia Pencuci (Fritzmann, 2007)

Jenis Foulant	Larutan Kimia Pencuci
Koloid	Larutan NaOH, chelating agent, dan surfaktan
Organik	Larutan NaOH, chelating agent, dan surfaktan
Oksida Logam	Asam sitrat (pH rendah)
Silika	NaOH (pH tinggi)
Scale Karbonat (CaCO_3)	Asam sitrat atau HCl (pH rendah)
Scale Sulfat (CaSO_4 , BaSO_4)	Larutan HCl atau chelating agent (EDTA)
Biofilm	Larutan NaOH, chelating agent, surfaktan, dan disinfektan

Kondisi operasi yang harus diperhatikan ketika pencucian membran antara lain jenis larutan pencuci, pH larutan pencuci, dosis larutan, waktu pencucian, *crossflow velocity*, dan suhu larutan pencuci (Ang *et al.*, 2006; Ang *et al.*, 2011). Tahap pencucian membran seharusnya disesuaikan dengan sistem membran-foulant dan umumnya dilakukan metode *trial and error*. Tahap pencucian membran secara umum meliputi penghilangan foulant, pembilasan menggunakan air de-ion, pencucian satu tahap atau dua tahap, dan pembilasan menggunakan air (Ang *et al.*, 2006). Prosedur pencucian yang dikemukakan oleh Fritzmann (2007) adalah

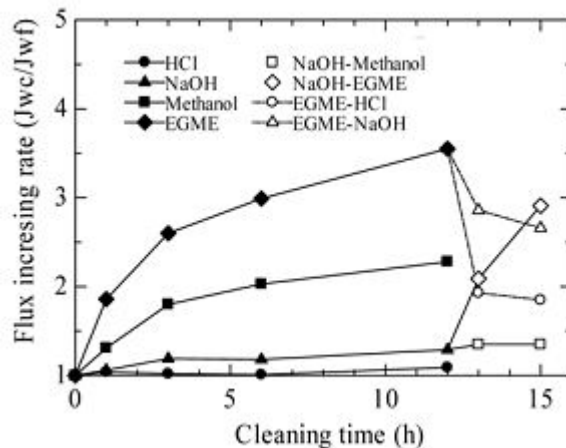
- Sirkulasi larutan pencuci sebelum dipanaskan dengan laju lair yang rendah
- melakukan recycle larutan pencuci hingga tercapai suhu yang stabil. Dapat juga dilakukan pencapaian pH pada tahap ini jika diperlukan
- Rendam membran RO dengan larutan pencuci selama 1-15 jam, tergantung jenis dan tingkatan foulant.
- Pengoperasian sistem pada tekanan tinggi untuk membuang foulant dan larutan pencuci dari sistem

Tiga foulant utama yang mengotori membran RO pada aplikasi daur ulang air limbah domestik adalah foulant organik, foulant mikroba, dan foulant mineral anorganik. Pencucian membran diawali dengan menggunakan larutan basa dan dilanjutkan dengan pencucian asam. Madaeni dan Samieirad (2010) melaporkan bahwa pencucian membran RO aplikasi daur ulang air limbah yang menggunakan pencucian basa (NaOH-SDS) pada tahap pertama dan dilanjutkan dengan pencucian asam (HCl) dapat menghilangkan foulant yang menempel pada permukaan membran secara sempurna. Peningkatan fluks pada penelitian tersebut tersaji pada Gambar 2. Prosedur pencucian pada penelitian ini sesuai dengan aturan dari DOW (2011)



Gambar 2. Efek Perbedaan Konsentrasi SDS, NaOH, HCl, dan Kombinasi Larutan Pencuci (Madaeni dan Samieirad, 2010)

Jung *et al.* (2006) melakukan pencucian membran hasil proses pengolahan baja. Jenis foulant yang terdapat pada limbah tersebut adalah CaSO_4 dan sedikit kandungan kontaminan organik. Pencucian membran yang dilakukan oleh Jung dkk terdiri dari beberapa metode, (1) menggunakan asam, basa, dan diikuti EDTA (2) metanol 50% (3) etilen glikol monobutirat 10%. Karena tingginya kandungan kalsium pada limbah, sehingga peningkatan fluks secara signifikan ditunjukkan oleh pencucian metanol 50% dan larutan etilen glikol monobutirat 10% (Gambar 3).



Gambar 3. Peningkatan Fluks terhadap Prosedur Cleaning dan Waktu Perendaman (Jung *et al.*, 2006)

Ochando – Pulido *et al.* (2015) telah melaporkan bahwa pencucian asam menggunakan asam sitrat kemudian dilanjutkan dengan pencucian basa menggunakan NaOH + SDS menunjukkan efektifitas pencucian yang tinggi. Penggunaan prosedur pencucian 2 tahap tersebut terbukti dapat menghilangkan foulan organik oleh larutan basa sama halnya dengan solubilisasi dan penghilangan presipitat dan koloid besi. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa metode pencucian kimia membran dinyatakan layak secara ekonomi dan dapat mengurangi dampak negatif pada lingkungan.

Kesimpulan

Penggunaan reverse osmosis (RO) sebagai sistem pengolahan limbah tingkat lanjut seringkali dibatasi oleh fenomena fouling pada membran. Jenis-jenis foulan yang mengkontaminasi membran RO pada aplikasi pengolahan limbah adalah foulan organik, foulan koloid, foulan mikroba/biofouling, dan foulan anorganik/scaling. Keempat jenis foulan ini terdapat sebagai foulan tunggal maupun kombinasi. Pencucian kimia digunakan untuk menghilangkan keempat jenis foulan pada permukaan membran. Beberapa peneliti terdahulu telah melaporkan penggunaan beberapa larutan kimia pencuci untuk menghilangkan keempat jenis foulan tersebut. Kajian mengenai pencucian kimia membran juga telah sampai pada efek terhadap lingkungan dan biaya operasi. Diperlukan pengetahuan mendalam mengenai fouling dan pencucian kimia membran ini untuk mengkaji metode pencucian membran dengan sistem *periodic cleaning*.

Daftar Pustaka

- Al-Juboori RA dan Yusaf T. Biofouling in RO system: Mechanisms, monitoring and controlling. *Desalination* 2012; 302: 1-23
- Ang, WS, Lee S, Elimelech M. Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* 2006; 272: 198–210.
- Ang WS, Tiraferri A, Chen KL, Elimelech M. Fouling and cleaning of RO membranes fouled by mixtures of organic foulants: Simulating wastewater effluent. *Journal of Membrane Science* 2011; 376: 196–206.
- Antony A, Low JH, Gray S, Childress AE, Clech PL, Leslie G. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment system: A review. *Journal of membrane science* 2011; 383:1-16
- Arnal JM, García-Fayos B, Sancho M.. Membrane Cleaning, Expanding Issues in *Desalination*, Prof. Robert Y. Ning (Ed.), 2011, ISBN: 978-953-307-624-9
- Asatekin, A, Kang S, Elimelech M, Mayes A. Anti-fouling ultra filtration membranes containing polyacrylonitrile-graft-poly (ethylene oxide) comb copolymer additives. *Journal Of Membrane Science* 2007; 29:136–146.
- Beyer M, Lohrengel B, Nghiem LD. Membrane fouling and chemical cleaning in water recycling applications. *Desalination* 2010; 250: 977–981
- Bixio D, Thoele C, Wintgens T, Ravazzini A, Miska V, Muston M, Chikurel H, Aharoni A, Joksimovic D, Melin T. Water reclamation and reuse: implementation and management issues. *Desalination* 2008; 218: 13-23.
- Bixio D dan Wintgens T. Water Reuse System Management d Manual AQUAREC. Directorate-General for Research, European Commission Brussels, Belgium, 2006.
- Brandão DN, Scherrenberg SM, van Lier JB.. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes: A review of treatment technologies. *Journal of Environmental Management* 2013; 122 : 85-98
- Chesters, SP. Innovations in the inhibition and cleaning of reverse osmosis membrane scaling and fouling. *Desalination* 2009; 238:22-29



- Cornelissen ER, Vrouwenvelder, JS, Heijman SGJ, Viallefont XD, van der Kooij D, Wessels LP. Air/water cleaning for biofouling control in spiral wound membrane elements. *Desalination* 2007; 204:145-147
- Creber SA, Vrouwenvelder JS, van Loosdrecht MC, Johns ML. Chemical cleaning of biofouling in reverse osmosis membranes evaluated using magnetic resonance imaging. *Journal of Membrane Science* 2010; 362: 202-210.
- Creber SA, Pintelon TRR, Graf von der Schulenburg DAW, Vrouwenvelder JS, van Loosdrecht MCM, Johns ML. Magnetic resonance imaging and 3D simulation studies of biofilm accumulation and cleaning on reverse osmosis membranes. *Food and bioproducts processing* 2010; 88: 401–408
- CSM. CSM reverse osmosis membrane technical manual. Saehan Industries Inc., 2008.
- DOW. FILMTEC reverse osmosis membranes technical manual. DOW water & process solutions, 2008 p 1-7
- Fritzmann C, Lowenberg J, Wintgens T, Melin T. State-of-the-art reverse osmosis desalination. *Desalination* 2007; 216:1-76
- Greenlee LF, Lawler DF, Freeman BD, Marrot B, Moulin P. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Research* 2009; 43:2317-2348
- Huajuan M. A study on organic fouling of reverse osmosis membrane, Dissertation, Department Of Civil Engineering, National University Of Singapore, 2009.
- Jung YJ, Kiso Y, Yamada, T., Shibata, T., Lee, T.G.. Chemical cleaning of reverse osmosis membranes used for treating wastewater from a rolling mill process. *Desalination* 2006; 190: 181–188
- Kang, G. dan Cao, Y.. Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: a review. *Water research* 2012; 46:584-600
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 112 Tahun 2003 Tentang: Baku Mutu Air Limbah
- Koo, C.H., Mohammad, A.W., Suja, F.. Recycling of oleochemical wastewater for boiler feed water using reverse osmosis membranes — A case study. *Desalination* 2011; 271: 178–186
- Kordatou, I.M., Michael, C., Duan, X., He, X., Dionysiou, D.D., Mills, M.A., Fatta-Kassinos D.. Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications. *Water research* 2015; 77: 213 -248
- Lee, S., Ang, W.S., Elimelech, M.. Fouling of reverse osmosis membranes by hydrophilic organic matter: implications for water reuse. *Desalination* 2006; 187: 313–321
- Lee, S. dan Elimelech, M. Salt cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes. *Water research* 2007; 41: 1134-1142.
- López-Ramírez, J.A., Oviedo, M.D.C., Alonso, J.M.Q.. Comparative studies of reverse osmosis membranes for wastewater reclamation. *Desalination* 2006; 191: 137–147
- Lorain, O., Hersant, B., Persin, F., Grasmick, A., Brunard, N., Espenan, J.M.. Ultrafiltration membrane pre-treatment benefits for reverse osmosis process in seawater desalting. Quantification in terms of capital investment cost and operating cost reduction. *Desalination* 2007; 203: 277–285
- Madaeni, S.S. dan Samieirad, S. Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by wastewater. *Desalination* 2010; 257:80-86
- Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., Boyce, M.C.. Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention. *Desalination* 2011; 281:1-16
- Metcalf dan Eddy. Wastewater Engineering Treatment, Disposa, and Reuse (4thEdition). New York ; McGraw-Hill Book Company, Inc, 2003.
- Mustofa, G.M. *The Study of Pretreatment Options for Composite Fouling of Reverse osmosis Membrane Used in Water Treatment and Production*. School of Chemical Science and Engineering. University of South Wales, 2007.
- Ochando-Pulido, J.M., Victor-Ortega, M.D., Martínez-Ferez, A.. On the cleaning procedure of a hydrophilic reverse osmosis membrane fouled by secondary-treated olive mill wastewater. *Chemical Engineering Journal* 2015; 260: 142–151.
- Oh, H.J., Choung, Y.K., Lee, S., Choi, J.S., Hwang, T.M., Kim, J.H.. Scale Formation in Reverse osmosis Desalination: Model Development. *Desalination* 2009; 238: 333-346.
- Pandey, S.R., Jegatheesan, V., Baskaran, K., Shu, L. Fouling in reverse osmosis (RO) membrane in water recovery from secondary effluent: a review. *Environ Sci Biotechnol.* 2012; 11:125-145
- Peraturan Menteri Kesehatan No. 416 Tahun 1990 Tentang : Syarat-syarat Dan Pengawasan Kualitas Air, 1990
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 492 Tahun 2010 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, 2010
- Porcelli N. dan Judd S.. Chemical cleaning of potable water membranes: A review. *Separation and Purification Technology* 2010; 71: 137–143
- www.puretecwater.com/resources/basic-of-reverse-osmosis.pdf diakses pada 2 September 2015 10.52 a.m.
- Ranade V.V. dan Bhandari V.M.. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling, and Reuse: An Overview*. Elsevier Ltd, 2014.





- Reardon, R., DiGiano, F., Aitken, M., Paranjabe, S., Kim, J.H., Chang, S.Y.. Membrane treatment of secondary effluent for subsequent reuse, Water Environment Research Foundation Report, IWA Publishing, 2005.
- Schneider, R.P., Ferreira, L.M., Binder, P., Ramos, J.R.. Analysis of foulant layer in all elements of an RO train. *Journal Of Membrane Science* 2005; 261:152–162
- Shon, H.K., Kim, S.H., Vigneswarana, S., Aim, B.R., Lee, S., Cho, J.. Physicochemical pretreatment of seawater: fouling reduction and membrane characterization. *Desalination* 2009; 238: 10–21
- Singh, R.. *Hybrid Membrane Systems for Water Purification: Technology Systems Design and Operations*. Elsevier Science & Technology Books, 2006, 1-3: 87-88.
- Tang, F., Hu, H.Y., Sun, L.J., Wu, Q.Y., MeiJiang, Y., Guan, Y.T., Huang, J.J. Fouling of reverse osmosis membrane for municipal wastewater reclamation: Autopsy results from a full-scale plant. *Desalination* 2014; 349: 73–79
- Tay, K.G. dan Song, L.. A more effective method for fouling characterization in a full-scale reverse osmosis process. *Desalination* 2005; 177: 95-107
- Tzotzi, C., Pahiadaki, T., Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J., Andritsos, N.. A Study of CaCO₃ Scale Formation and Inhibition in RO and NF Membrane Processes. *Desalination* 2007; Vol 296: 171-184.
- Wintgens, T., Melin, T., Schiller, A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D., Thoeye, C. The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse. *Desalination* 2005; 178: 1-11
- Yang, H.L., Huang, C., Pan, J.R. . Characteristic of RO foulant in a brackish water desalination plant. *Desalination* 2008; 220: 353–358
- Zhao, Y., Song, L., Ong, S.L.. Fouling of RO membranes by effluent organic matter (EfOM): relating major components of EfOM to their characteristic fouling behaviors. *Journal Of Membrane Science* 2010; 349:75–82.





Lembar Tanya Jawab
Moderator : Ratna Frida Susanti (Universitas Parahyangan)
Notulen : Retno Ringgani (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Irsyad (UPN)
Pertanyaan : Efisiensi pencucian terhadap life time pencucian?
Jawaban : 1. Dapat diukur dari debit Aliran Effisiensinya dapat sampai 80%
2. Dapat digunakan sekitar 6 bulan untuk penelitian selanjutnya.

2. Penanya : Ninik Lintang (Politeknik Negeri Bandung)
Pertanyaan : 1. Bentuk membran?
2. Arah aliran pencucian membran?
Jawaban : 1. Spiral wound C lembaran.
2. Mengikuti aliran /bukan back flush.

