

REVIEW : FABRIKASI MEMBRAN BERBASIS NANOFIBER DENGAN METODE ELECTROSPINNING

¹⁾Aprillia Nurcahya Putri, ²⁾Munasir

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: aprillia.putri16030224001@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: munasir_physics@unesa.ac.id

Abstrak

Electrospinning adalah metode yang efektif dalam fabrikasi membran berbasis *nanofiber*. Membran *nanofiber* yang dihasilkan dengan menggunakan metode *electrospinning* lebih unggul dibandingkan dengan membran konvensional seperti inversi fasa, *sintering*, dan *track etching*. Keunggulan tersebut diantaranya memiliki sifat mekanik yang baik dan porositas tinggi ($\geq 90\%$) dibandingkan membran konvensional yang hanya memiliki porositas 10—20%. Membran *nanofiber* dapat digunakan pada proses pengolahan air untuk mengatasi masalah krisis air. Proses filtrasi membran terdapat empat tahap diantaranya ultrafiltrasi, mikrofiltrasi, nanofiltrasi, dan *reverse osmosis*. Karakteristik membran *nanofiber* dalam aplikasi purifikasi air diantaranya mampu menghalangi garam, bakteri, dan logam berat. Dari proses pengolahan air menggunakan membran *nanofiber* diharapkan memperoleh air dengan kontaminan seminimal mungkin.

Kata Kunci: *Electrospinning*, Membran, *Nanofiber*

Abstract

Electrospinning is an effective method to fabricate *nanofiber* based membrane. *Nanofiber* membrane was produced using the *electrospinning* method is superior compared to conventional membrane such as phase inversion, *sintering*, and *track etching*. The advantages include having good mechanical properties and high porosity ($\geq 90\%$) compared to conventional membrane which only have 10—20% porosity. *Nanofiber* membrane can be used in water treatment processes to overcome the water crisis problems. There are four processes of membrane filtration including ultrafiltration, microfiltration, nanofiltration, and *reverse osmosis*. The characteristics of *nanofiber* membrane that used in water purification include being able to block salts, bacteria, and heavy metals. The results of the water treatment process using *nanofiber* membrane is expected to obtain water with minimum contaminants.

Keywords: *Electrospinning*, Membrane, *Nanofiber*

PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya kegiatan industri dan populasi manusia, diprediksi baik kuantitas dan kualitas air semakin sulit diperoleh. Hal tersebut dapat menyebabkan masalah krisis air untuk masa sekarang dan masa depan. Oleh karena itu, diperlukan adanya solusi pengolahan air yang tepat, khususnya untuk air laut. Metode filtrasi membran dapat dijadikan salah satu solusi tantangan tersebut (Kulak and Liang, 2018). Membran memiliki potensi yang besar dalam aplikasi pengolahan air seperti pengurangan kadar garam (proses desalinasi) (Yalcinkaya *et al.*, 2016), logam berat (Parlayıcı *et al.*, 2019; Thamer *et al.*, 2019), dan bakteri (Park *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019).

Fabrikasi membran dapat dilakukan dengan berbagai metode diantaranya metode inversi fasa, *sintering*, dan *track etching*. Ketiga metode tersebut merupakan metode konvensional dalam fabrikasi membran. Metode inversi fasa adalah metode konvensional yang sangat sederhana dalam pembuatan membran polimer (Huang and Thomas, 2019). Namun, sifat mekanik membran lemah (Tan and Rodrigue, 2019) sehingga hasil filtrasi cenderung rentan terhadap kontaminan (Shirazi *et al.*, 2020). Hal tersebut

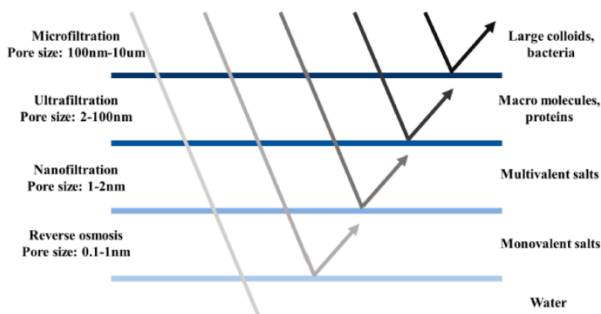
terjadi akibat larutan polimer yang sangat pekat tidak terjadi pertukaran ion dengan nonpelatut (Huang and Thomas, 2019). Metode *sintering* juga banyak digunakan untuk pembuatan membran polimer dan anorganik (Shirazi *et al.*, 2020). Metode tersebut mampu mengontrol ukuran pori dengan menyesuaikan suhu *sintering* namun memerlukan penggunaan suhu tinggi, dan biaya proses yang mahal (Tan and Rodrigue, 2019). Ukuran pori membran yang dihasilkan tidak mampu dibawah 100 nm dan porositas membran hanya sebesar 10—20% (Liao *et al.*, 2018). Sedangkan metode *track etching* merupakan metode pelapisan film polimer dengan iradiasi ion (Madauß *et al.*, 2017). Ukuran pori membran *track-etched* juga mampu dikontrol dengan menyesuaikan plasma ion (Homaeigohar and Elbahri, 2017) namun sulit memperoleh ukuran nanopori membran (Liao *et al.*, 2018), sifat mekanik membran lemah, dan biaya proses juga mahal (Tan and Rodrigue, 2019). Untuk itu, diperlukan adanya metode yang lebih efektif dibandingkan metode konvensional.

Metode *electrospinning* merupakan metode yang efektif dalam fabrikasi membran *nanofiber* (Tlili and Alkanhal, 2019). Selain prosesnya yang cepat, mudah, dan sederhana, keunggulan metode *electrospinning*

diantaranya mampu menghasilkan membran *nanofiber* dengan sifat mekanik yang baik, porositas tinggi $\geq 90\%$, dan homogen (Suja *et al.*, 2017; Shirazi *et al.*, 2020), mampu mengontrol proses fabrikasi, orientasi, dan morfologi membran *nanofiber* dengan mengatur parameter-parameter *electrospinning* (Liao *et al.*, 2018; Homocianu and Pascariu, 2019), dan memiliki kemampuan mengurangi resistensi aliran air yang menghasilkan fluks air tinggi sehingga mampu meminimalkan *antifouling* (Aruchamy *et al.*, 2018).

Membran

Membran merupakan selaput penghalang antara dua fasa yang bersifat selektif terhadap spesies tertentu dengan spesies non-selektif (Roy and Singha, 2017). Membran dapat digunakan dalam proses pemisahan partikel yang sangat kecil dan dikatakan baik apabila membran memiliki sifat mekanik yang baik, permeabilitas (fluks) tinggi, selektivitas baik, dan tidak mudah terjadi *fouling* pada permukaan (Arahman *et al.*, 2018). Membran *nanofiber* mampu menghalangi kontaminan ion terhidrasi seperti garam, bakteri, dan logam berat dalam air (Zheng, 2017; Lyu *et al.*, 2018; Rajapaksha P *et al.*, 2018) yang ukuran molekulnya hampir dua kali lebih besar dari molekul air (0.26 nm) (Homaeigohar and Elbahri, 2017) ketika melewati membran dan yang terlewat oleh membran hanyalah molekul air (Boretti *et al.*, 2018).

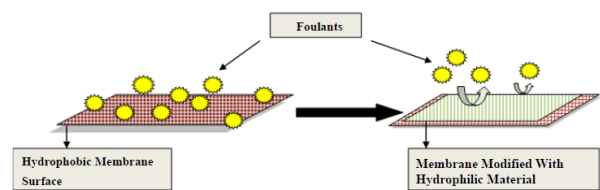


Gambar 1. Skema jenis filtrasi (Yang *et al.*, 2019)

Berdasarkan bentuk dan ukuran molekul, metode filtrasi membran terdapat empat jenis yaitu mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan *reverse osmosis* yang ditunjukkan pada Gambar 1. Mikrofiltrasi merupakan proses pemisahan partikel koloid dan mikroba patogen yang berukuran antara 100 nm dan 10 μm , ultrafiltrasi merupakan membran yang memisahkan makromolekul (protein) yang berukuran antara 2 nm dan 100 nm (Yang *et al.*, 2019), nanofiltrasi dan *reverse osmosis* merupakan membran yang mampu memisahkan berbagai garam, mineral, monovalen, multivalen, kation, anion, dan partikel nano tersuspensi lainnya (Shirazi *et al.*, 2020) yang berukuran antara 1 nm dan 2 nm pada nanofiltrasi

serta *reverse osmosis* yang berukuran antara 0,1 nm dan 1 nm (Yang *et al.*, 2019).

Karakteristik permukaan membran juga dapat memengaruhi proses filtrasi air diantaranya sifat hidrofilik dan hidrofobik. Pada Gambar 2, membran hidrofobik memiliki kelemahan yaitu mudah terjadi *fouling* pada permukaan. Sedangkan membran hidrofilik mampu mengurangi tekanan pada permukaan dan meningkatkan fluks air sehingga meminimalkan terjadi *fouling* dan proses filtrasi dapat berlangsung secara efisien. Permukaan membran hidrofilik dapat diketahui melalui pengujian sudut kontak. Sudut kontak hidrofilik kurang dari 90° dan hidrofobik lebih dari 90° (Tlili and Alkanhal, 2019).



Gambar 2. Ilustrasi karakteristik permukaan membran (Zahid *et al.*, 2018)

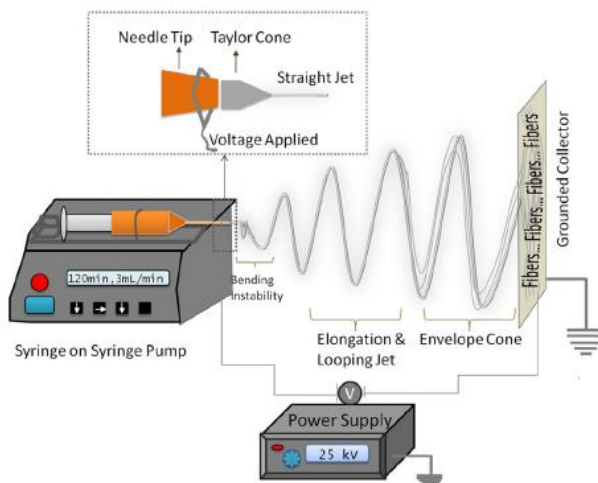
Electrospinning

Electrospinning merupakan metode pembuatan serat melalui *spinneret* dengan gaya dorong listrik. Kelebihan metode ini adalah sederhana, biaya proses rendah, dan mampu mengontrol diameter serat (Khulbe and Matsuura, 2019). Mekanisme metode *electrospinning* didasarkan pada komponen-komponen utama yaitu pompa *syringe* yang dilengkapi dengan jarum berdiameter kecil, tegangan tinggi, dan kolektor (Liao *et al.*, 2018). Dalam proses ini, untuk membuat pancaran (*jet*) larutan bermuatan listrik atau meleleh keluar jarum diperlukan tegangan listrik tinggi antara dua elektroda yang terhubung ke ujung jarum dan kolektor (Liao *et al.*, 2018). Dengan adanya medan listrik yang dikenakan pada ujung jarum, pompa *syringe* akan mendorong larutan material membran sampai terbentuk *Taylor cone* akibat besar tegangan yang semakin meningkat hingga mencapai tegangan kritis (Cui *et al.*, 2020). Pancaran larutan bergerak ke arah elektroda dengan muatan berlawanan disertai proses penguapan larutan material membran sehingga yang tertinggal pada kolektor hanya membran *nanofiber* (Liao *et al.*, 2018).

Electrospinning merupakan teknik yang sangat fleksibel karena dengan bervariasi parameter *electrospinning* dapat menghasilkan morfologi yang berbeda (Khulbe and Matsuura, 2019). Berikut parameter yang memengaruhi proses pembentukan membran *nanofiber* dengan metode *electrospinning*:

- Sifat larutan yaitu berat molekul, konsentrasi, viskositas, elastisitas, konduktivitas, dan tegangan permukaan.
- Parameter proses yaitu tekanan pompa *syringe*, tegangan listrik tinggi, dan jarak pemintalan antara jarum dan kolektor.
- Parameter kontrol yaitu suhu dan kelembaban. (Shirazi *et al.*, 2020)

Membran *nanofiber* memiliki keunggulan diantaranya memiliki ukuran pori kecil, porositas tinggi, permeabilitas yang baik, dan resistensi terhadap ion monovalen dan multivalen yang baik (Khubbe and Matsuura, 2019; Tlili and Alkanhal, 2019). Keunggulan tersebut menjadikan membran *nanofiber* yang dihasilkan dengan metode *electrospinning* sebagai kandidat membran yang ideal untuk aplikasi purifikasi air (Suja *et al.*, 2017; Tlili and Alkanhal, 2019).



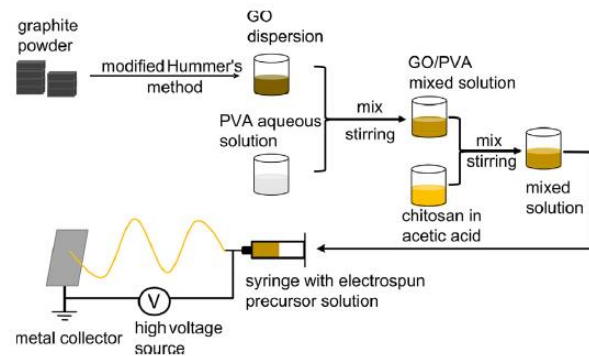
Gambar 3. Diagram proses *electrospinning* (Aruchamy *et al.*, 2018)

METODE PENELITIAN

Rangkaian proses *electrospinning* ditunjukkan pada Gambar 3. Sebelum melakukan proses *electrospinning*, terlebih dahulu menyiapkan larutan material pengisi membran *nanofiber*. Material pengisi yang digunakan adalah *graphene oxide* (GO). Untuk melakukan proses sintesis GO, bahan utama yang digunakan adalah grafit, H_2SO_4 , $NaNO_3$, $KMnO_4$, H_2O_2 , dan HCl . Sintesis nanopartikel GO menggunakan modifikasi metode *Hummer* (Khumalo *et al.*, 2017) dengan melatukan 5 g grafit pada 120 ml H_2SO_4 98% dan diaduk selama 30 menit dalam kondisi dingin sehingga suhu larutan 0–5°C. Kemudian menambahkan 2.5 g $NaNO_3$ dan diaduk. Setelah proses pengadukan, menambahkan 15 g $KMnO_4$ secara bertahap ke dalam campuran dan diaduk selama 30 menit sehingga suhu larutan 20°C. Setelah itu, larutan diaduk dalam keadaan suhu ruang dan ditambahkan 150 ml *aquades* sehingga suhu meningkat 98°C kemudian

diaduk selama 15 menit. Untuk menghilangkan sisa ion $KMnO_4$, ditambahkan 50 ml H_2O_2 dan diaduk selama 30 menit. Selanjutnya, larutan dicuci dengan HCl dan *aquades* secara berulang sampai pH netral dan berubah warna menjadi hitam kecoklatan. Setelah pH netral, dilakukan sonikasi selama 2 jam, disaring, dan dikeringkan dengan *oven* pada suhu 60°C untuk memperoleh serbuk GO.

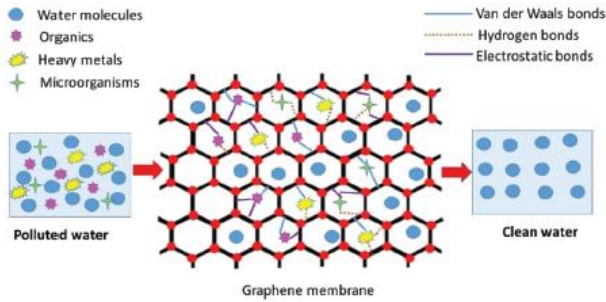
Larutan material matriks polimer yang digunakan (contoh: PVA) dilarutkan pada material pelarut (seperti DMF, DMAC, dan kloroform) dan diaduk. Kemudian menambahkan material pengisi yaitu GO ke dalam larutan polimer dan diaduk sesuai dengan alur penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 4. Setelah larutan campuran membran siap digunakan. Selanjutnya, memasukkan campuran larutan membran yang berisi larutan polimer, pelarut, dan material pengisi ke dalam pompa *syringe* dengan *power supply* (Maciel-Cerda, 2016), mengatur jarak pemintalan antara jarum dan kolektor, mengatur kecepatan alir, kelembaban, dan besar tegangan (Li *et al.*, 2019). Kemudian melakukan proses *electrospinning*. Ketika besar tegangan meningkat hingga mencapai tegangan kritis diperoleh bentuk kerucut serat (*Taylor cone*) (Cui *et al.*, 2020) pada ujung jarum yang ditampilkan pada layar kamera. Hasil membran *nanofiber* terbentuk pada kolektor yang dilapisi *aluminium foil* (Maciel-Cerda, 2016) untuk mencegah kerusakan ketika mengambil membran.



Gambar 4. Diagram proses preparasi membran *nanofiber* PVA/Kitosan/GO (Yang *et al.*, 2018)

HASIL DAN PEMBAHASAN

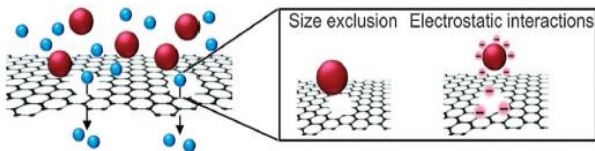
Dalam proses filtrasi membran dalam air dibutuhkan material membran yang ideal diantaranya ukuran dan volume pori yang cocok, sifat hidrofilik membran, fluks air tinggi, antibakteri, stabilitas mekanik yang baik, dan selektivitas tinggi sehingga membran *nanofiber* secara efektif mampu menghasilkan kadar kontaminan air seminimal mungkin dengan menghilangkan kontaminan air seperti logam berat, kadar garam, dan bakteri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 (Anand *et al.*, 2018).



Gambar 5. Skema filtrasi membran *nanofiber* (Rajapaksha P *et al.*, 2018)

Pengurangan Kadar Ion Logam Berat

Pemukaan membran mampu melewati molekul air dipengaruhi oleh ukuran ion dan gaya elektrostatis (Efek *Donnan Exclusion*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 (Sun *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2018). Ion yang tertahan pada membran berupa ion terhidrasi dengan ukuran diameter yang beragam. Ukuran diameter ion terhidrasi dalam air seperti Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan K^+ masing-masing sebesar 0.72 nm, 0.66 nm, 0.82 nm, 0.86 nm, dan 0.66 nm. Ukuran molekul tersebut lebih besar dibandingkan diameter molekul air yaitu sebesar 0.26 nm (Homaeigohar and Elbahri, 2017).



Gambar 6. Ilustrasi pemblokiran ion terlarut pada membran (Homaeigohar and Elbahri, 2017)

Hal tersebut menunjukkan bahwa membran *nanofiber* yang diperoleh harus mampu menahan ion-ion terlarut pada air laut yang berukuran lebih besar dari pori membran dan molekul air yang berukuran lebih kecil mampu melewati pori membran. Selain itu, gaya elektrostatis antara gugus fungsi pada material membran dan ion terlarut mampu menangkap ion-ion terlarut seperti ion logam berat (Khulbe and Matsuura, 2018).

Logam berat banyak dihasilkan oleh kegiatan industri, aktivitas manusia, dan kegiatan lain. Logam berat yang bercampur dengan air dapat merusak lingkungan. Untuk itu, dengan penggunaan membran *nanofiber* diharapkan mampu mengurangi kadar ion logam berat dalam air. Diantara ion logam berat yang mencemari lingkungan air adalah arsenat. Arsenat (As) merupakan salah satu material kontaminan berbahaya dan beracun karena dapat menyebabkan kanker kulit, kanker intemal (paru-paru, ginjal), dan kematian pada manusia (Rasool *et al.*, 2016). Untuk meminimalkan masalah kesehatan yang terkait dengan logam berat arsenat dalam air, kadar batas kandungan dalam air adalah sebesar 0.01 ppm (Engwa *et*

al., 2019). Diantara teknologi yang telah digunakan, teknologi membran *nanofiber* merupakan metode yang efektif karena sifat karakteristik membran yang dihasilkan memiliki porositas tinggi dengan menggabungkan dengan nanopartikel yang memiliki luas permukaan tinggi (Liao *et al.*, 2018). Material maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) merupakan salah satu material besi oksida (Shokrollahi, 2017) yang memiliki luas permukaan yang tinggi (Siddiqui *et al.*, 2020). Sifat superparamagnetik material maghemit (Shokrollahi, 2017) menjadikan material tersebut dapat digunakan sebagai material adsorben logam berat arsenat dalam air yang baik. Semakin besar konsentrasi maghemit, kandungan arsenat dalam air semakin menurun dari 0.1 ppm hingga mencapai 0.01 ppm (Mejia-Santillan *et al.*, 2018) sesuai dengan batas kandungan arsenat dalam air. Selain material magnetik, material karbon juga memiliki luas permukaan tinggi (Homaeigohar and Elbahri, 2017) sehingga baik material magnetik maupun material karbon dapat digunakan sebagai material pengisi membran *nanofiber*. Membran *nanofiber* PAN/ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /GO telah berhasil dibuat dengan metode *electrospinning* yang mampu meningkatkan pengurangan kandungan logam berat arsenat dalam air. Dengan metode *Langmuir*, proses adsorpsi arsenat dalam air menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum membran *nanofiber* PAN/ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /GO sebesar 36.1 mg/g (Tripathy and Hota, 2020) sehingga material tersebut dapat dijadikan material adsorben yang menjanjikan untuk pengolahan air yang mengandung arsenat dalam air menjadi air bersih.

Pengurangan kadar logam berat lainnya seperti kromium (Parlayıcı *et al.*, 2019) dan timbal (Thamer *et al.*, 2019) juga dapat dilakukan. Sebagai dampak aktivitas industri, logam berat kromium dan timbal juga akan berdampak pada kesehatan makhluk hidup. Konsentrasi maksimal kromium (Cr) dan timbal (Pb) dalam air masing-masing adalah 0.1 ppm dan 0.015 ppm (Engwa *et al.*, 2019). Nilon-6,6 merupakan material termoplastik yang memiliki stabilitas mekanik dan termal yang baik (Duan *et al.*, 2018) dan *graphene oxide* merupakan material karbon yang juga memiliki sifat mekanik, listrik, dan termal yang baik (Wei *et al.*, 2018). Penambahan material *graphene oxide* pada nilon-6,6 mampu meningkatkan kemampuan dispersi sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal dalam berbagai aplikasi (Duan *et al.*, 2018) salah satunya pengolahan air (Parlayıcı *et al.*, 2019). Material membran *nanofiber* nilon-6,6 dengan penambahan nanopartikel *graphene oxide* telah berhasil difabrikasi yang hasilnya menunjukkan bahwa membran *nanofiber* mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi logam berat kromium dari sebesar 25.39 mg/g sampai dengan 47.17 mg/g (Parlayıcı *et al.*, 2019).

Sedangkan, membran *nanofiber* dengan modifikasi permukaan material karbon dari penambahan material oksidan, melamin, dan polifenilen diamina berhasil diperoleh sebagai material adsorben logam berat timbal dalam air. Proses adsorpsi membran *nanofiber* karbon dengan adanya modifikasi permukaan terbukti mampu mengikat ion timbal dengan gaya elektrostatis dibandingkan material karbon tanpa adanya modifikasi permukaan. Membran *nanofiber* karbon dengan modifikasi permukaan menunjukkan bahwa adanya peningkatan kapasitas adsorpsi timbal dari 105 mg/g sampai dengan 354.52 mg/g. Pada penelitian ini, membran *nanofiber* karbon yang dihasilkan dengan metode *electrospinning* memiliki sifat yang lebih unggul dibandingkan dengan metode lainnya diantaranya luas permukaan, porositas, dan diameter pori. Selain itu, dengan adanya penambahan material pada permukaan membran *nanofiber* mampu meningkatkan sifat hidrofilik dan porositas sehingga menjadikan membran *nanofiber* sebagai material adsorben logam berat timbal yang bekerja secara efisien (Thamer *et al.*, 2019).

Desalinasi

Sebagian besar bumi merupakan permukaan air laut. Jika air laut dikelola menjadi air bersih maka masalah krisis air di dunia dapat diatasi. Namun kadar garam air laut masih sangat tinggi sehingga tidak dapat dipergunakan secara langsung. Proses desalinasi dapat dijadikan salah satu solusi krisis air. Proses desalinasi adalah proses pengolahan air laut menjadi air bersih dengan merejeksi kontaminan seperti garam, partikel koloid, mikroorganisme, dan zat terlarut lainnya (Sulaksono, 2017). Proses desalinasi dapat dilakukan secara efektif dengan metode filtrasi membran (Yalcinkaya *et al.*, 2016) karena mampu meningkatkan kinerja desalinasi menjadi lebih baik (Sulaksono, 2017). Keunggulan lain metode filtrasi membran adalah bebas dari bahan kimia (Tlili and Alkanhal, 2019).

Mekanisme proses desalinasi berbasis membran adalah melakukan *pretreatment* yaitu mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi untuk menghalangi molekul-molekul yang berukuran besar menutup pori membran (Sulaksono, 2017) dan menghindari terjadinya *fouling* pada membran kemudian ketika molekul air memiliki jari-jari yang lebih kecil dari jari-jari pori membran maka air mampu melewati membran sedangkan ion terlarut tertahan. Ion terlarut tersebut ditolak oleh permukaan membran yang dipengaruhi oleh interaksi antara membran dan pelarut. Nanofiltrasi dan *reverse osmosis* mampu menolak ion terlarut yang disebabkan adanya efek *Donnan Exclusion*. Efek tersebut berhubungan dengan sifat elektrostatis pada membran bermuatan yang mampu menolak ion bermuatan sama akibat gaya tolak muatan. Jika penolakan ion terlarut

tidak terjadi gaya elektrostatis (efek *Donnan Exclusion*) maka proses desalinasi menjadi kurang efektif karena molekul ion terlarut dan ukurannya yang terlalu kecil seperti ion dapat melewati pori membran.

Membran *nanofiber* memiliki kemampuan fluks air yang lebih tinggi dibandingkan membran konvensional (Mokhtari *et al.*, 2016). Dengan begitu, membran *nanofiber* lebih efisien dalam proses desalinasi. Selain memiliki sifat mekanik, termal, dan listrik yang baik, material *graphene oxide* (GO) dan *reduced graphene oxide* (rGO) memiliki struktur atom yang mampu menolak ion garam dan sifat *antifouling* yang mampu meningkatkan sifat membran (Anand *et al.*, 2018). Membran *nanofiber* PVDF/GO (Woo *et al.*, 2016) dan PVDF/rGO (Chen, Soroush and Rahaman, 2018) menunjukkan fluks tinggi dan kinerja penolakan ion garam yang lebih baik dibandingkan membran *nanofiber* PVDF. Hal tersebut menunjukkan bahwa membran *nanofiber* dengan material pengisi *graphene oxide* dan *reduced graphene oxide* memiliki potensi sebagai material membran *nanofiber* untuk desalinasi.

Penghilangan Bakteri

Kandungan bakteri pada air yang dikonsumsi dalam kehidupan sehari-hari dapat menimbulkan dampak langsung pada kesehatan. Untuk itu, diperlukan adanya solusi penghilangan bakteri yang efektif. Membran *nanofiber* dapat dimanfaatkan sebagai material antibakteri dalam air. Membran *nanofiber* memiliki sifat mekanik dan kemampuan antibakteri yang baik terhadap *Escherichia coli* (*E. coli*) dan *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*). Membran *nanofiber* dapat menghilangkan bakteri secara efisien dengan pori-pori yang lebih kecil. Namun ukuran pori yang lebih kecil dapat mengurangi fluks air sehingga dibutuhkan material yang optimal untuk menghilangkan bakteri. Material seperti *graphene oxide* (GO) merupakan salah satu material antibakteri yang baik (Romero *et al.*, 2020). Penambahan material GO pada membran *nanofiber* dengan material pengisi polimer PVDF terbukti mampu mengurangi bakteri. Membran *nanofiber* PVDF/GO lebih efisien dalam proses penghilangan bakteri dibandingkan tanpa penambahan GO yang ditunjukkan dengan adanya kerusakan membran sel bakteri *E. coli* dan *S. aureus* yang semakin meningkat setelah adanya penambahan material GO pada membran *nanofiber* PVDF. Membran *nanofiber* PVDF/GO menghasilkan ukuran pori yang lebih kecil dibandingkan membran *nanofiber* PVDF sehingga mampu meningkatkan aktivitas antibakteri dengan menahan dan merusak membran sel bakteri, meningkatkan fluks air, dan aktivitas *antifouling* selama proses filtrasi. Berdasarkan ukuran ion dan gaya elektrostatis, GO dan molekul air diikat dengan gaya *Van der Waals* dan

hidrogen membentuk lapisan permukaan hidrasi sehingga bakteri tertahan pada permukaan membran sebagai ion terhidrasi (Park *et al.*, 2018).

Penambahan GO juga memengaruhi aktivitas antibakteri pada polimer polietersulfon (PES) dan poliakrilonitril (PAN). Dengan adanya penambahan material GO, PES/GO menghasilkan zona hambat yang menunjukkan bahwa adanya aktivitas antibakteri. Sedangkan tanpa adanya penambahan nanopartikel GO, polietersulfon tidak menunjukkan adanya zona hambat dan aktivitas antibakteri. Mekanisme antibakteri dengan material PES/GO mampu menyebabkan kematian sel. Membran *nanofiber* PES/GO juga tidak menyebabkan terjadinya *bio-fouling*. Hal tersebut menunjukkan bahwa material tersebut dapat dimanfaatkan dalam aplikasi pengolahan air (Tshangana *et al.*, 2020) untuk menghilangkan bakteri pada air. Penambahan material GO pada material polimer poliakrilonitril (PAN) mampu meningkatkan kemampuan aktivitas antibakteri dengan menghambat pertumbuhan bakteri secara efisien dan menghancurkan sel-sel bakteri. Konsentrasi GO optimal adalah sebesar 3%. Membran *nanofiber* dengan konsentrasi GO lebih dari 3% mengalami penurunan sifat diantaranya stabilitas mekanik dan aktivitas antibakteri. Hal tersebut disebabkan konsentrasi GO yang terlalu besar menyebabkan material GO tidak mampu berdispersi dengan baik sehingga terjadi aglomerasi. Membran *nanofiber* PAN/GO memiliki kemampuan antibakteri terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* masing-masing sebesar 98.5% dan 99.6% dengan konsentrasi GO optimal yaitu sebesar 3% (Li *et al.*, 2019). Berdasarkan hasil karakterisasi *Transmission Electron Microscope* (TEM) terdapat perbedaan morfologi sel bakteri pada material membran *nanofiber* PAN dan PAN/GO yaitu sel bakteri *E. coli* dan *S. aureus* yang menempel pada membran *nanofiber* PAN masing-masing berbentuk batang dan bola halus sedangkan yang menempel pada membran *nanofiber* PAN/GO sel kedua bakteri menyusut dan berubah bentuk. Hal tersebut menunjukkan bahwa material PAN/GO mampu menyebabkan kematian sel dengan merusak dinding sel membran bakteri. Membran dengan sifat hidrofilik membran dapat dimanfaatkan sebagai material antibakteri (Tlili and Alkanhal, 2019). Membran *nanofiber* PAN/GO juga mampu meningkatkan sifat mekanik dan hidrofilik permukaan membran. Sifat hidrofilik semakin meningkat pada penambahan GO pada nanokomposit PVA/kitosan (Yang *et al.*, 2018). Konsentrasi GO pada material membran *nanofiber* PVA/Kitosan juga memengaruhi aktivitas antibakteri. Konsentrasi GO kurang dari 1% tidak terdapat zona hambat dan aktivitas antibakteri pada membran *nanofiber* PVA/Kitosan/GO. Aktivitas

antibakteri terhadap bakteri *E. coli* dan *S. aureus* meningkat pada konsentrasi GO lebih dari 1%.

Material antibakteri lainnya adalah PU/Ag/GO. Material Ag juga merupakan salah satu material antibakteri yang baik (Qing *et al.*, 2018). Penambahan material GO pada nanopartikel Ag dilakukan untuk meminimalkan terjadi aglomerasi. Membran *nanofiber* PU/Ag/GO terbukti memiliki stabilitas termal yang baik dan terjadi penurunan sel bakteri dibandingkan membran *nanofiber* poliuretan (PU). Mekanisme antibakteri dengan membran *nanofiber* PU/Ag/GO terjadi akibat terlepasnya ion Ag pada permukaan sel bakteri yang menyebabkan perubahan struktur membran sel dan kematian sel yang ditunjukkan adanya pembentukan radikal bebas oleh nanopartikel Ag. Interaksi permukaan membran *nanofiber* dengan permukaan sel bakteri meningkat dengan luas permukaan membran *nanofiber* yang lebih besar dari nanopartikel Ag sehingga memberikan pengaruh antibakteri yang lebih baik (Pant *et al.*, 2017). Dengan begitu, material GO berhasil dibuat dengan memiliki kemampuan antibakteri dalam air terbukti dengan adanya penambahan material GO pada membran *nanofiber* mampu menunjukkan adanya zona hambat dan aktivitas antibakteri terhadap bakteri gram positif *Escherichia coli* dan bakteri gram negatif *Staphylococcus aureus*.

PENUTUP

Fabrikasi membran *nanofiber* menggunakan metode *electrospinning* telah menjadi penelitian yang sangat menarik dalam aplikasi purifikasi air. Metode *electrospinning* merupakan metode dengan proses cepat, mudah, dan sederhana yang mampu menghasilkan membran *nanofiber* yang lebih unggul dengan sifat mekanik yang lebih baik dan porositas yang lebih tinggi dibandingkan membran konvensional yang dihasilkan dengan metode seperti inversi fasa, *sintering*, dan *track etching*. Membran *nanofiber* terbukti mampu menghilangkan partikel-partikel kontaminan air sehingga proses filtrasi berlangsung secara efektif. Material *graphene oxide* merupakan material yang memiliki potensi dalam aplikasi purifikasi air dengan adanya penurunan kandungan kontaminan seperti logam berat, kadmium, dan bakteri dalam air.

DAFTAR PUSTAKA

- Anand, A., B. Unnikrishnan, J.Y. Mao, H.J. Lin, and C.C. Huang. 2018. "Graphene-based nanofiltration membranes for improving salt rejection, water flux and antifouling—A Review." *Desalination*. Vol. 429: pp 119—133. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.012>.

Arahman, N., Mukramah, Syawaliah, T. Ma'imun, and M.

- R. Bilal. 2018. "Fabrication of polyethersulfone membranes using nanocarbon as additive." *International Journal of GEOMATE*. Vol. 15(50): pp 51—57. <https://doi.org/10.21660/2018.50.95424>.
- Aruchamy, K., A. Mahto, and S.K. Nataraj. 2018. "Electrospun nanofibers, nanocomposites and characterization of art: Insight on establishing fibers as product." *Nano-Structures and Nano-Objects*. Vol. 16: pp 45—58. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2018.03.013>.
- Boretti, A., S. Al-Zubaidy, M. Vaclavikova, M. Al-Abri, S. Castelletto, and S. Mikhalovsky. 2018. "Outlook for graphene-based desalination membranes." *npj Clean Water*. Vol. 5 (1): pp 1—11. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0004-z>.
- Chen, T., A. Soroush, and M. Rahaman. 2018. "Highly hydrophobic electrospun reduced graphene oxide/poly (vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) membranes for use in membrane distillation." *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 57 (43): pp 14535—14543. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03584>.
- Cui, J., F. Li, Y. Wang, Q. Zhang, W. Ma, and C. Huang. 2020. "Electrospun nanofiber membranes for wastewater treatment applications." *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117116>.
- Duan, X., B. Yu, T. Yang, Y. Wu, H. Yu, and T. Huang. 2018. "In situ polymerization of nylon 66/reduced graphene oxide nanocomposites." *Journal of Nanomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2018/1047985>.
- Engwa, G.A., P.U. Ferdinand, F.N. Nwabo, and M.N. Unachukwu. 2019. "Mechanism and health effects of heavy metal toxicity in humans." *Poisoning in the Modern World - New Tricks for an Old Dog?* <https://doi.org/10.5772/intechopen.82511>.
- Homaeigohar, S., and M. Elbahri. 2017. "Graphene membranes for water desalination." *NPG Asia Materials*. Vol. 9(8): pp 427—427. <https://doi.org/10.1038/am.2017.135>.
- Homocianu, M., and P. Pascariu. 2019. "Electrospun polymer-inorganic nanostructured materials and their applications." *Polymer Reviews*. pp 1—49. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1676776>.
- Huang, C., and N.L. Thomas. 2019. "Fabrication of porous fibers via electrospinning strategies and applications." *Polymer Reviews*. pp 1—53. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1688830>.
- Khube, K.C., and T. Matsuura. 2018. "Removal of heavy metals and pollutants by membrane adsorption techniques." *Applied Water Science*. Vol. 8 (19): pp 1—30. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0661-6>.
- Khube, K.C., and T. Matsuura. 2019. "Art to use electrospun nanofibers/nanofiber based membrane in waste water treatment, chiral separation and desalination." *Journal of Membrane Science and Research*. Vol. 5 (2): pp 100—125. <https://doi.org/10.22079/JMSR.2018.87918.1197>.
- Khumalo, N.P., S.D. Mhlanga, A.T. Kuvarega, G.D. Vilakati, B.B. Mamba, and D.S. Dlamini. 2017. "Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solution by graphene oxide modified membranes." *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Vol. 8 (4): pp 1184—1194.
- Kulak, M.R., and R.L. Liang. 2018. "Electrospun nanofibrous membranes for water treatment."
- Li, J.H., H. Zhang, W. Zhang, and W. Liu. 2019. "Nanofiber membrane of graphene oxide/polyacrylonitrile with highly efficient antibacterial activity." *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. Vol. 30 (17): pp 1620—1635. <https://doi.org/10.1080/09205063.2019.1652793>.
- Liao, Y., C.H. Loh, M. Tian, R. Wang, and A.G. Fane. 2018. "Progress in electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment: fabrication, modification and applications." *Progress in Polymer Science*. Vol. 77: pp 69—94. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.10.003>.
- Lyu, J., X. Wen, U. Kumar, Y. You, V. Chen, and R.K. Joshi. 2018. "Separation and purification using GO and r-GO membranes." *RSC Advances*. Vol. 8 (41): pp 23130—23151. <https://doi.org/10.1039/C8RA03156H>.
- Maciel-Cerda, A.. 2016. "Membranes: Materials, simulations, and applications." *Membranes: Materials, Simulations, and Applications*. pp 1—154. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45315-6>.
- Madauß, L., J. Schumacher, M. Ghosh, O. Ochedowski, J. Meyer, H. Lebius, B. Ban-D'Etat, M.E. Toimil-Molares, C. Trautman, R.G.H Lammertink, M. Ulbricht, M. Schleberger. 2017. "Fabrication of nanoporous graphene/polymer composite membranes." *Nanoscale*. Vol. 9 (29): pp 10487—10493. <https://doi.org/10.1039/c7nr02755a>.
- Mejia-Santillan, M.E., N. Pariona, J. Bravo-C., M. Herrera-Trejo, F. Montejo-Alvaro, A. Zarate, D.L. Perry, and A.I. Mtz-Enriquez. 2018. "Physical and arsenic adsorption properties of maghemite and magnetite sub-microparticles." *Journal of Magnetism*

- and Magnetic Materials*. Vol. 451: pp 594—601. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.111>.
- Mokhtari, F., M. Salehi, F. Zamani, F. Hajiani, F. Zeighami, and M. Latifi. 2016. “Advances in electrospinning: The production and application of nanofibres and nanofibrous structures.” *Textile Progress*. Vol. 48 (3): pp 119—219. <https://doi.org/10.1080/00405167.2016.1201934>.
- Pant, B., M. Park, R.S. Jang, W.C. Choi, H.Y. Kim, and S.J. Park. 2017. “Synthesis, characterization, and antibacterial performance of Ag-modified graphene oxide reinforced electrospun polyurethane nanofibers.” *Carbon Letters*. Vol. 23 (3): pp 17—21. <https://doi.org/10.5714/CL.2017.23.017>.
- Park, J.A., A. Nam, J.H. Kim, S.T. Yun, J.W. Choi, and S.H. Lee. 2018. “Blend-electrospun graphene oxide/poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membranes with high flux, tetracycline removal and anti-fouling properties.” *Chemosphere*. Vol. 207: pp 347—356. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.096>.
- Parlayıcı, Ş., A. Avcı, and E. Pehlivan. 2019. “Electrospinning of polymeric nanofiber (nylon 6,6/graphene oxide) for removal of Cr (VI): Synthesis and adsorption studies.” *Journal of Analytical Science and Technology*. Vol. 10 (13). <https://doi.org/10.1186/s40543-019-0173-5>.
- Qing, Y., L. Cheng, R. Li, G. Liu, Y. Zhang, X. Tang, J. Wang, H. Liu, and Y. Qin. 2018. “Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles and the optimization of orthopedic implants by advanced modification technologies.” *International Journal of Nanomedicine*. Vol. 13: pp 3311—3327. <https://doi.org/10.2147/IJN.S165125>.
- Rajapaksha P., P., A. Power, S. Chandra, and J. Chapman. 2018. “Graphene, electrospun membranes and granular activated carbon for eliminating heavy metals, pesticides and bacteria in water and wastewater treatment processes.” *Analyst*. Vol. 143 (23): pp 5629—5645. <https://doi.org/10.1039/c8an00922h>.
- Rasool, A., T. Xiao, A. Farooqi, M. Shafeeque, S. Masood, S. Ali, S. Fahad, and W. Nasim. 2016. “Arsenic and heavy metal contaminations in the tube well water of punjab, pakistan and risk assessment: A case study.” *Ecological Engineering*. Vol. 95: pp 90—100. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.034>.
- Romero, M.P., V.S. Marangoni, C.G. de Faria, I.S. Leite, Cecília de Carvalho Castro e. Silva, C.M. Maroneze, M.A. Pereira-da-Silva, V.S. Bagnato, and N.M. Inada. 2020. “Graphene oxide mediated broad-spectrum antibacterial based on bimodal action of photodynamic and photothermal effects.” *Frontiers in Microbiology*. Vol. 10: pp 1—15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02995>.
- Roy, S., and N.R. Singha. 2017. “Polymeric nanocomposite membranes for next generation pervaporation process: Strategies, challenges and future prospects.” *Membranes*. Vol. 7 (3). <https://doi.org/10.3390/membranes7030053>.
- Shirazi, M.M.A., S. Bazgir, and F. Meshkani. 2020. “Electrospun nanofibrous membranes for water treatment.” In *Advances in Membrane Technologies*. Vol. 57 (3): pp 467—504. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87948>.
- Shokrollahi, H. 2017. “A review of the magnetic properties, synthesis methods and applications of maghemite.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 426: pp 74—81. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.033>.
- Siddiqui, S.I., P.N. Singh, N. Tara, S. Pal, S.A. Chaudhry, and I. Sinha. 2020. “Arsenic removal from water by starch functionalized maghemite nano-adsorbents: Thermodynamics and kinetics investigations.” *Colloids and Interface Science Communications*. Vol. 36. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2020.100263>.
- Suja, P.S., C.R. Reshmi, P. Sagitha, and A. Sujith. 2017. “Electrospun nanofibrous membranes for water purification.” *Polymer Reviews*. Vol. 57 (3): pp 467—504. <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1309664>.
- Sukaksono, I.I.. 2017. “Sistem membran terintegrasi untuk pengolahan air dan desalinasi,” <https://doi.org/10.5281/zenodo.1134215>.
- Sun, P., R. Ma, H. Deng, Z. Song, Z. Zhen, K. Wang, T. Sasaki, Z. Xu, and H. Zhu. 2016. “Intrinsic high water/ion selectivity of graphene oxide lamellar membranes in concentration gradient-driven diffusion.” *Chemical Science*. Vol. 7 (12): pp 6988—6994. <https://doi.org/10.1039/C6SC02865A>.
- Tan, X.M., and D. Rodrigue. 2019. “A review on porous polymeric membrane preparation. part ii: production techniques with polyethylene, polydimethylsiloxane, polypropylene, polyimide, and polytetrafluoroethylene.” *Polymers*. Vol. 11 (8). <https://doi.org/10.3390/polym11081310>.
- Thamer, B.M., A. Aldalbahi, M. Moydeen A., A.M. Al-Enizi, H. El-Hamshary, and M.H. El-Newehy. 2019. “Fabrication of functionalized electrospun carbon nanofibers for enhancing lead-ion adsorption from aqueous solutions.” *Scientific Reports*. Vol. 9 (1): pp 1—15. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55679-6>.

- Tlili, I., and T.A. Alkanhal. 2019. "Nanotechnology for water purification: Electrospun nanofibrous membrane in water and wastewater treatment." *Journal of Water Reuse and Desalination*. Vol. 9 (3): pp 232—247. <https://doi.org/10.2166/wrd.2019.057>.
- Tripathy, M., and G. Hota. 2020. "Maghemite and graphene oxide embedded polyacrylonitrile electrospun nanofiber matrix for remediation of arsenate ions." *ACS Applied Polymer Materials*. Vol. 2 (2): pp 604—617. <https://doi.org/10.1021/acsapm.9b00982>.
- Tshangana, C.S., A.A. Muleja, E.N. Nxumalo, and S.D. Mhlanga. 2020. "Poly (ether) sulfone electrospun nanofibrous membranes embedded with graphene oxide quantum dots with antimicrobial activity." *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09080-w>.
- Wei, Y., Y. Zhang, X. Gao, Z. Ma, X. Wang, and C. Gao. 2018. "Multilayered graphene oxide membrane for water treatment: A review." *Carbon*. Vol. 139 (238): pp 964—981. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.07.040>.
- Woo, Y.C., L.D. Tijing, W.G. Shim, J.S. Choi, S.H. Kim, T. He, E. Drioli, and H.K. Shon. 2016. "Water desalination using graphene-enhanced electrospun nanofiber membrane via air gap membrane distillation." *Journal of Membrane Science*. Vol. 520: pp99-110. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.07.049>.
- Yalcinkaya, B., F. Yalcinkaya, and J. Chaloupek. 2016. "Thin film nanofibrous composite membrane for dead-end seawater desalination." *Journal of Nanomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2016/2694373>.
- Yang, S., P. Lei, Y. Shan, and D. Zhang. 2018. "Preparation and characterization of antibacterial electrospun chitosan/poly (vinyl alcohol)/graphene oxide composite nanofibrous membrane." *Applied Surface Science*. Vol. 435: pp 832—840. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.191>.
- Yang, Z., Y. Zhou, Z. Feng, X. Rui, T. Zhang, and Z. Zhang. 2019. "A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification." *Polymers*. Vol. 11 (8): pp 1—22. <https://doi.org/10.3390/polym11081252>.
- Zahid, M., A. Rashid, S. Akram, Z. A. Rehan, and W. Razzaq. 2018. "A comprehensive review on polymeric nano-composite membranes for water treatment." *Journal of Membrane Science & Technology*. Vol. 8 (1): pp 1—20. <https://doi.org/10.4172/2155-9589.1000179>.
- Zheng, H.. 2017. "General problems in seawater desalination." *Solar Energy Desalination Technology*. pp 1—46. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805411-6.00001-4>.