



PENGARUH VARIASI PH LARUTAN UMPAN TERHADAP PERCENT RECOVERY LITIUUM DARI GEOTHERMAL BRINE SINTESIS DENGAN PROSES LOW PRESSURE NANOFILTRATION

EFFECT OF VARIATION IN FEED SOLUTION PH ON LITHIUM PERCENT RECOVERY FROM GEOTHERMAL BRINE SYNTHESIS WITH LOW PRESSURE NANOFILTRATION PROCESS

Sutijan^{1,2}, Christopher Mario Hananto¹, Stevanus Adi Darma¹, Vincent Sutresno Hadi Sujoto^{1,2}, Fika Rofiek Mufakhir³, Widi Astuti³, Himawan Tri Bayu Murti Petrus^{1,2*}

¹Departemen Teknik Kimia (Sustainable Mineral Processing Research Group), Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No.2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281

²Unconventional Geo-resources Research Group, Fakultas Teknik, UGM, Jl. Grafika No.2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281

³Unit Penelitian Teknologi Mineral, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Ir. Sutami Km. 15, Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung, 35361, Indonesia

Email : bayupetrus@ugm.ac.id

Abstrak

Penggunaan litium berkembang pesat secara signifikan di pasar global, terutama di Indonesia. Untuk memenuhi permintaan tersebut, ekstraksi litium yang berharga dari sumber alam lain dipertimbangkan, seperti air garam sisa panas bumi (*geothermal brine*). Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode nanofiltrasi. Selama penelitian, proses dioperasikan pada variasi tekanan (5, 7, dan 9 bar) dan variasi pH (4, 7, dan 10). Oleh karena adanya kemungkinan fouling pada membran dan fenomena yang terjadi tidak dapat diamati dengan baik, maka digunakan *geothermal brine* sintesis pada penelitian ini sehingga diasumsikan bahwa silika telah dihilangkan sebelumnya. Berdasarkan hasil analisa data penelitian, maka dapat dilihat bahwa perbedaan pH dan tekanan memainkan peran penting dalam konsentrasi litium dari *geothermal brine*. Dengan menggunakan *Response Surface Method (RSM)* diketahui bahwa *recovery* litium tertinggi diperoleh pada kondisi operasi pH 10 dan tekanan 9 bar.

Kata kunci: *Geothermal Brine*, Litium, Nanofiltrasi, Teknologi Membran

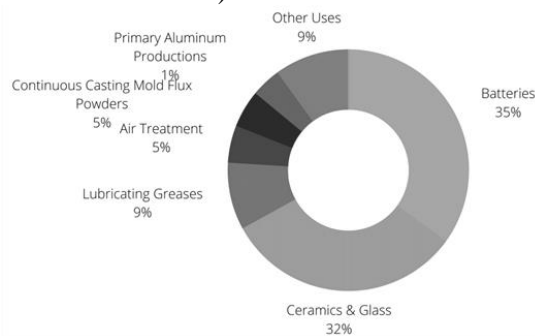
Abstract

The use of lithium is growing significantly in the global market, especially in Indonesia. To meet this demand, extraction of valuable lithium from other natural sources is considered, such as *geothermal brine*. The research was conducted using the nanofiltration method. During the study, the process was operated at various pressures (5, 7, and 9 bar) and pH variations (4, 7, and 10). Due to the possibility of fouling on the membrane and the phenomenon that occurs cannot be observed properly, synthetic *geothermal brine* is used in this study so that it is assumed that the silica has been removed previously. Based on the analysis of research data, it can be seen that the difference in pH and pressure plays an important role in the lithium concentration of *geothermal brine*. By using the *Response Surface Method (RSM)* it is known that the highest lithium recovery is obtained at operating conditions of pH 10 and pressure of 9 bar.

Keywords: *Geothermal Brine*, Lithium, Membrane Technology, Nanofiltration

PENDAHULUAN

Di era revolusi industri 4.0, litium sebagai salah satu *rare earth minerals* mengalami kenaikan tren peminatan yang tajam. Kenaikan ini disebabkan karena manfaat litium yang sangat beragam dan sangat penting bagi kehidupan masyarakat. Contoh pemanfaatan litium dalam kehidupan sehari-hari ditunjukkan dalam Gambar 1 (Swain 2017). Kebutuhan terhadap litium diprediksi akan terus meningkat seiring perkembangan industri di sektor motor dan mobil listrik. Penggunaan litium yang semakin esensial ini membuat permintaan dan harga litium yang semakin tinggi dan diprediksikan bahwa pada tahun 2025 permintaan litium dapat mencapai 500.000 ton/tahun (Calisaya-Azpilcueta, Herrera-Leon, and Cisternas 2020).



Gambar 1. Distribusi penggunaan akhir litium secara global di berbagai sektor

Litium sebagai sumber daya alam dapat ditemukan dalam beberapa jenis sumber, mulai dari air asin (*brine*) hingga batuan mineral. Hingga saat ini, *brine* adalah sumber yang paling umum digunakan karena mengandung litium yang relatif tinggi. Sumber daya produksi litium terbesar komersial saat ini adalah *continental brine* (59%), batuan keras (25%), *hectorite* (7%), dan *geothermal brine* (3%). Oleh karena itu, litium yang diperoleh dari sumber air telah menjadi tren dalam industri ekstraksi litium karena biayanya lebih rendah dan cadangan yang tersedia lebih banyak (>85% *recoverable* litium). Air laut adalah sumber daya litium yang paling kaya ($2,3 \times 10^{11}$ t), tetapi masih belum menarik secara teknologi karena konsentrasi litium yang dihasilkan rendah yaitu sebesar 0,1-0,2 ppm. Sementara konsentrasi ion litium dalam *geothermal brine* jauh lebih tinggi yaitu sebesar 10-20 ppm. Namun, di sisi lain *geothermal brine* mengandung konsentrasi yang tinggi untuk logam lainnya, seperti arsenik, merkuri, dan boron, karena adanya kontak

bawah tanah antara air panas dan batuan (Li et al. 2019).

Geothermal brine merupakan air hasil separasi dari Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) yang dikembalikan lagi ke perut bumi. Untuk memperoleh *geothermal brine*, mula-mula pada proses pembangkitan listrik diinjeksikan air ke dalam perut bumi. Kemudian air tersebut berubah menjadi uap akibat pemanasan dalam perut bumi. Air dan uap yang keluar dari sumur produksi dipisahkan menggunakan separator agar diperoleh uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin, menjalankan generator, sehingga diperoleh listrik. Sementara air yang tidak terpakai (*brine*) akan dikembalikan ke perut bumi (Kusuma, Mangindaan, and Pakiding 2018). Alih-alih *brine* dikembalikan ke perut bumi, hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *brine* dapat digunakan sebagai penghasil litium. Di Indonesia, ketersediaan litium jumlahnya masih sangat sedikit sehingga beberapa tahun ini Indonesia masih melakukan impor untuk mencukupi kebutuhan litium. Untuk mengurangi impor, Indonesia telah berupaya untuk melakukan eksplorasi terhadap sumber-sumber litium sehingga Indonesia dapat menghasilkan produk-produk berbasis litium secara mandiri. Dengan posisi Indonesia yang terletak diantara *Ring of Fire* yang membentang dari Nusa Tenggara, Bali, Jawa, Sumatera hingga Himalaya, maka sumber daya panas bumi (*geothermal*) menjadi sangat melimpah, dengan jumlah energinya sebesar 29 GW atau setara dengan 40% total potensi di seluruh dunia (Sahdarani, Ponka, and Oktaviani 2020). Salah satu sumber *geothermal* di Indonesia, yaitu Dieng mengandung komposisi litium sebanyak 40-60 ppm (Pambudi et al. 2015), sehingga hal ini membuktikan bahwa *geothermal brine* sangat berpotensi untuk dijadikan sumber alternatif litium untuk masa yang mendatang.

Terdapat metode tradisional yang digunakan untuk mengekstrak litium dari sumber air, yaitu menggunakan *solar evaporation*, *chemical precipitation* dan *solvent extraction* (An et al. 2012). Proses tradisional tersebut umumnya terdiri dari beberapa tahap untuk mengendapkan dan mengkristalkan Li_2CO_3 sehingga proses ini memakan waktu sangat lama. Selain itu Li_2CO_3 masih perlu dicampur dengan garam lain yang tidak diinginkan, misalnya NaCl , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, dan MgCO_3 , sehingga proses ini perlu tahap pemurnian lebih lanjut (Meshram, Pandey, and

Mankhand 2014). Metode ini juga tidak tepat apabila diaplikasikan untuk *brine* dengan rasio garam pengganggu yang besar, seperti rasio Mg^{2+}/Li^{+} yang tinggi di *salt-lake brines*. Kekurangan lainnya adalah jumlah *sludge* yang dihasilkan besar akibat penggunaan bahan kimia dalam jumlah besar. Penggunaan volume pelarut organik yang tinggi juga dapat menyebabkan korosi pada peralatan proses, dan bahkan dapat menimbulkan polusi bagi lingkungan. Dengan kekurangan dari metode tradisional dan dampak yang dihasilkan bagi lingkungan, maka metode pemisahan berbasis membran dijadikan sebagai alternatif untuk proses *recovery* litium. Teknologi membran bersifat ramah lingkungan, memiliki efisiensi energi yang tinggi, dan pengoperasiannya yang mudah (Quist-Jensen et al. 2019). Apabila dibandingkan dengan metode tradisional, teknologi membran dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dan mengurangi konsumsi energi. Teknologi membran juga terdiri dari beberapa cara, diantaranya *Nanofiltration Membrane, Supported Liquid Membrane, Ion-imprinted Membrane, Ion-sieve Membrane, Membrane Distillation Crystallization, Selective Electrodialysis, Permselective Exchange Membrane Capacitive Deionization* (Li et al. 2019) sebagai membran “generasi baru” (Petersen 1993).

Membran film berbahan polimer terbagi menjadi dua jenis. Yang pertama terdiri dari polimer padat dengan rejeksi garam tinggi untuk pemrosesan *Reverse Osmosis* (RO) air laut dan air payau. Yang kedua film yang menampilkan berbagai porositas yang sesuai untuk sistem Nanofiltrasi (NF) dan Ultrafiltrasi (UF). Membran ini digunakan untuk reklamasi air limbah, pelunakan air, dan penghilangan selektif spesies molekul dan ion tertentu (“Committee Report: Membrane Desalting Technologies” 1989). Diantara metode-metode tersebut, NF sebagai teknik yang relatif baru diantara teknologi pemisahan membran yang digerakkan oleh tekanan, memberikan hasil fluks yang lebih tinggi daripada RO dan retensi yang jauh lebih baik daripada UF untuk molekul kecil seperti gula, asam amino, peptida, dan bahkan ion. Selama dua dekade terakhir, minat penggunaan NF khususnya telah muncul dalam pengolahan air, misalnya penggunaan kembali air limbah (Bart Van Der Bruggen et al. 2003), desalinasi air laut (Hilal et al. 2004) serta fraksinasi dan penghilangan zat terlarut secara selektif dari aliran proses yang kompleks (Wang et al. 2009).

NF juga memiliki keunggulan untuk mengekstrak ion monovalen tanpa menggunakan bahan kimia dengan mekanisme *Donnan exclusion, dielectric exclusion, dan steric hindrance* (Gong et al. 2018).

Meskipun jumlah aplikasi untuk NF terus meningkat, teknologi ini masih memiliki beberapa kelemahan, seperti pengotoran membran (*fouling*) dan faktor pemisahan yang tidak mencukupi (B. Van der Bruggen, Mänttari, and Nyström 2008). *Fouling* membran disebabkan oleh zat anorganik terlarut ($BaSO_4$, $CaCO_3$) atau komponen organik (*humic acid*), koloid (partikel tersuspensi), bakteri atau padatan tersuspensi (H. S. Vrouwenvelder et al. 1998)(B. Van der Bruggen, Braeken, and Vandecasteele 2002). *Fouling* dapat terjadi pada pori-pori membran dengan mengecilnya ukuran pori parsial yang disebabkan oleh adsorpsi *foulant* pada dinding pori bagian dalam, penyumbatan pori dan permukaan *fouling* seperti pembentukan lapisan *cake* dan *gel* (Schäfer, Fane, and Waite 2000). *Fouling* akan meningkatkan biaya operasi dengan permintaan energi yang lebih tinggi, peningkatan pembersihan dan pengurangan masa pakai elemen membran (J. S. Vrouwenvelder et al. 2003). Hal ini menyebabkan penurunan fluks secara *irreversible* seiring berjalannya waktu, sementara semua parameter operasi seperti suhu, tekanan, laju alir, dan konsentrasi tetap konstan. Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya *fouling* diantaranya hidrofilitas, topografi permukaan, muatan pada membran, ukuran pori, sifat fisis *solute*, suhu, laju alir dan turbulensi (Sujoto et al. 2022). Selain itu, pH memberikan dampak terhadap keberadaan ion hidroksida dalam larutan yang dapat mempengaruhi tekanan osmotik, gaya penggerak efektif, interaksi ion elektrostatik, dan permeabilitas membran (Luo and Wan 2013).

METODOLOGI

Membran Nanofiltrasi

Penelitian ini menggunakan membran flatsheet jenis NF2 dari RisingSun Membrane Technology Co., Ltd., Beijing, Cina. Membran ini terbuat dari bahan polyamide (PA) bermuatan negatif. Membran NF memiliki pori-pori yang lebih kecil dibanding Mikrofiltrasi dan Ultrafiltrasi, yang ukurannya 600 dalton. Membran NF2 mampu beroperasi pada tekanan 50 bar, dengan tekanan operasi 3-14 bar, dimana ion kecil akan lolos sedangkan ion yang lebih

besar dan sebagian besar komponen organik tidak. Membran ini digunakan untuk menyaring garam besar dengan valensi >2, sedangkan garam monovalen masuk ke dalam permeat. Membran mampu beroperasi pada suhu 45-55°C, dengan suhu operasi 2-45°C, stabilitas kimia dengan pH 2-11, dan salt rejection 97%.

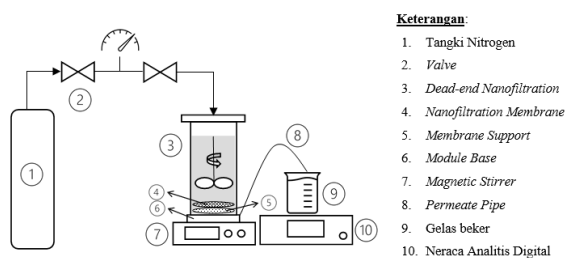
Umpan dan Sistem Nanofiltrasi

Umpan pada penelitian ini menggunakan geothermal brine sintesis yang dilakukan dengan cara melarutkan beberapa garam klorida dalam air demineralisasi. Komposisi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Geothermal Brine Sintesis

Komponen	Konsentrasi [ppm]	Konsentrasi [M]
Na ⁺	7120	0,310
K ⁺	2200	0,060
Mg ²⁺	107	0,004
Ca ²⁺	401	0,010
Li ⁺	39.3	0,006
B ³⁺	305	0,031

Komposisi geothermal brine selama penelitian mengikuti komposisi asli geothermal brine yang diambil dari Dieng, Jawa Tengah, Indonesia. Akan tetapi komposisi di atas belum termasuk beberapa komponen lain seperti silika dan beberapa komponen lainnya. Umpan diasumsikan telah mengalami penghilangan pengotor dengan menggunakan metode lain seperti presipitasi atau pengendapan.



Gambar 2. Rangkaian alat ekstraksi litium metode nanofiltrasi

Penelitian dilakukan pada skala laboratorium dengan menggunakan modul Nanofiltrasi Dead-End jenis HP4750 Stirred Cell dari Sterlitech Corporation, USA. Modul ini memiliki luas membran aktif 14,6 cm² (2,26 in²) dengan volume proses maksimum 300 mL, dengan volume operasi 100 mL. Penelitian dilakukan pada suhu ruangan 25°C. Variasi tekanan operasi adalah 5, 7, dan 9 bar,

sedangkan variasi pH adalah 4, 7, dan 10. Data penelitian berupa berat permeat dan laju fluks permeat dicatat setiap 5 menit dan berhenti saat volume permeat mencapai 75 mL. Analisis ICP-OES juga digunakan untuk menganalisis sampel sebelum dan sesudah proses nanofiltrasi (NF).

Model Teoritis

Dalam sistem NF, persamaan laju transfer atau fluks merupakan fungsi waktu, yang terdiri dari dua jenis: fluks larutan dan fluks ionik. Fluks larutan dilambangkan J_v ($\frac{L}{m^2 \cdot jam}$ atau LMH) menyatakan laju perpindahan larutan per satuan luas dan waktu, yang dinyatakan dalam Persamaan (Sujoto et al. 2022):

$$J_v = \frac{V_p}{A \cdot t} \dots \dots \dots (1)$$

Fluks ionik dilambangkan J_s ($\frac{gr}{m^2 \cdot jam}$) menyatakan laju perpindahan ion spesifik melalui membran per satuan luas dan waktu, yang dinyatakan dalam Persamaan (Pérez-González et al. 2015):

$$J_s = J_v \cdot (C_t - C_0) \dots \dots \dots (2)$$

Dengan, A adalah luas permukaan efektif membran (m²), t adalah waktu (jam), V_p adalah volume permeat (L), C₀ adalah konsentrasi awal ($\frac{gr}{L}$) dan C_t adalah konsentrasi pada berbagai waktu ($\frac{gr}{L}$). Neraca massa digunakan pada sistem NF untuk memodelkan laju aliran umpan, permeat dan retentat, yang dinyatakan dalam Persamaan (Pérez-González et al. 2015):

$$Q_F = Q_R + Q_P \dots \dots \dots (3)$$

$$C_{Fi} \cdot Q_F = C_{Ri} \cdot Q_R + C_{Pi} \cdot Q_P \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_P = J_v \cdot A \dots \dots \dots (5)$$

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \dots \dots \dots (6)$$

Dengan, Q_F adalah laju aliran umpan, Q_R adalah laju aliran retentat (larutan pada dinding membran), Q_P adalah laju aliran permeat. Sementara C_F adalah konsentrasi umpan, C_R adalah konsentrasi retentat, C_P adalah konsentrasi permeat. L_p adalah permeabilitas air murni sebesar 2,82. 10⁻⁶ m³m⁻²s⁻¹bar⁻¹ (Mohammad et al. 2007), ΔP adalah perbedaan tekanan operasi, dan Δπ adalah perbedaan tekanan osmosis. Dari

persamaan (3), persentase *recovery* untuk berbagai ion (R_i) yang merupakan jumlah ion yang diperoleh kembali dari umpan setelah melalui proses nanofiltrasi dinyatakan dalam Persamaan (Zhao et al. 2018):

$$Q_F = R_{Li} \cdot Q_F + Q_R \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_R = Q_F - R_{Li} \cdot Q_F \dots\dots\dots(8)$$

$$Q_R = (1 - R_{Li}) \cdot Q_F \dots\dots\dots(9)$$

$$R_{Li} = 1 - \frac{Q_R}{Q_F} \dots\dots\dots(10)$$

$$R_{Li}(\%) = \left(1 - \frac{Q_R}{Q_F}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(11)$$

$$R_{Li}(\%) = \left| \frac{(V_t \cdot C_t - V_0 \cdot C_0)}{V_F \cdot C_F} \right| \times 100\% \dots\dots\dots(12)$$

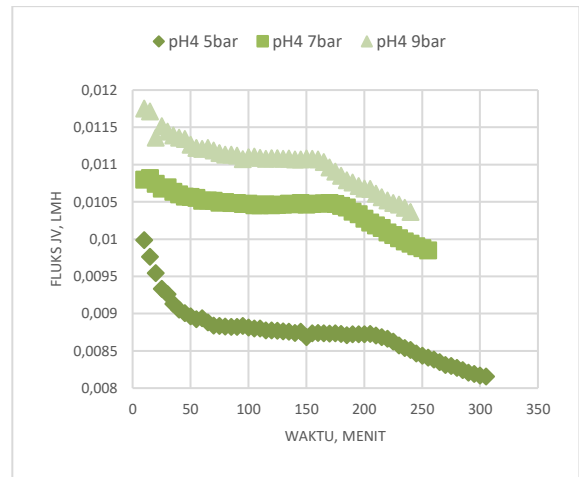
Dengan, R_{Li} adalah *recovery* ion litium, V_t adalah volume pada berbagai waktu, V_0 adalah volume mula-mula, V_F adalah volume umpan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

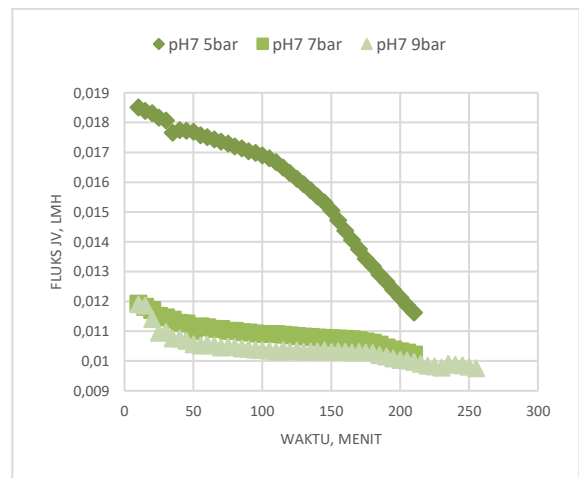
Kondisi operasi digunakan untuk menentukan target sesuai tujuan yang diinginkan, keberhasilan suatu proses akan terlihat pada setiap kondisi operasi. Dengan memvariasikan berbagai kondisi operasi, kondisi optimal dapat diperoleh. Penelitian ini menggunakan dua variabel bebas yaitu tekanan (5, 7, dan 9 bar) dan pH (4, 7, dan 10). Pada penelitian ini digunakan sistem NF yang menggunakan selektivitas membran untuk memisahkan komponen yang berbeda dalam aliran umpan berdasarkan ukuran dan bentuk partikel mikro di dalamnya.

Pengaruh kondisi operasi terhadap fluks permeat

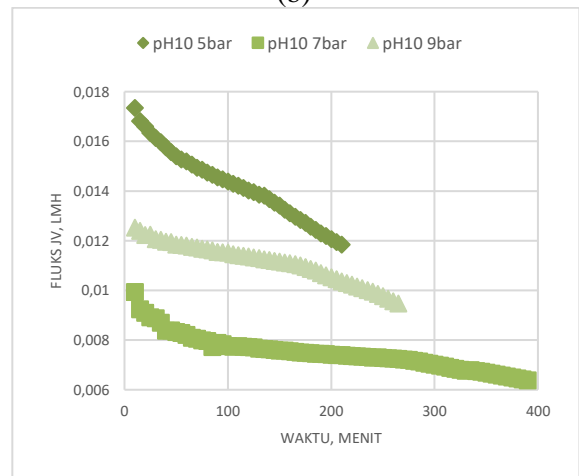
Fluks pada membran menyatakan jumlah permeat yang dapat lolos melewati membran per satuan luas dan per satuan waktu. Oleh karenanya, fluks umumnya digunakan sebagai indikator kualitas kinerja membran. Pengaruh variasi tekanan dan pH terhadap fluks pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Pengaruh variasi tekanan pada berbagai pH terhadap fluks larutan (permeat) pada proses nanofiltrasi (NF): a) pH 4, b) pH 7 dan c) pH 10

Filtrasi zat terlarut anorganik melalui membran NF poliamida bermuatan mengarah pada pembentukan endapan yang sifatnya rapat atau ronggang tergantung pada pH larutan

umpan. Endapan yang rapat diharapkan terjadi ketika larutan umpan bersifat asam, sedangkan endapan yang relatif ronggang dihasilkan dari larutan umpan pH basa. Penelitian tentang pengaruh pH terhadap potensi *fouling* larutan asam menjelaskan bahwa potensi *fouling* meningkat dengan meningkatnya keasaman larutan umpan (Nanda et al. 2010). Pada saat membran mengalami *fouling*, maka fluks akan menurun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3a, akan tetapi terdapat beberapa titik yang mengalami peningkatan fluks. Hal ini disebabkan karena lapisan poliamida bagian atas mengalami penyusutan dalam ketebalannya pada saat penyaringan larutan umpan asam, sehingga fluks larutan akan meningkat dari membran kotor. Penelitian lebih lanjut dari membran poliamida menunjukkan bahwa membran sensitif terhadap pH. Adapun pengaruh pH umpan terhadap struktur membran, permeabilitas dan retensi, tetapi perubahan tersebut hampir reversibel (Szoke, Patzay, and Weiser 2003). Sementara fluks berkaitan dengan hidrofilitas membran, retensi berkaitan dengan muatan membran NF. Pada pH tinggi, fluks biasanya meningkat dan retensi zat terlarut ionik naik karena disosiasi besar gugus fungsi karboksilat, yang melonggarkan endapan karena tolakan yang kuat sehingga akan meningkatkan fluks (Mänttari, Pihlajamäki, and Nyström 2006). Oleh karena peningkatan muatan permukaan pada pH yang lebih tinggi, maka retensi juga meningkat. Selain itu, potensi terjadinya *fouling* adalah karena adanya penumpukan ion-ion divalen pada permukaan membran sehingga seiring berjalannya waktu membran tersebut akan makin sempit dan mengakibatkan ion monovalen kesulitan untuk melewati membran, hal ini disebut sebagai polarisasi konsentrasi (Zabolotskii et al. 2013)(Mulder 1995).

Selain membran sensitif terhadap pH, membran juga dipengaruhi oleh tekanan, dimana pada sistem NF yang menjadi *driving force* adalah tekanan. Gambar 3b menunjukkan bahwa kombinasi antara pH netral dan variasi tekanan memberikan waktu rata-rata yang paling cepat untuk mencapai permeat pada batasan tertentu dibandingkan dengan kondisi operasi pH 4 dan pH 10. Waktu yang relatif cepat tersebut dapat tercapai karena pH tidak bersifat terlalu asam sehingga pori-pori membran cukup longgar dan tidak terjadi fenomena polarisasi konsentrasi yang begitu signifikan sehingga memudahkan litium sebagai

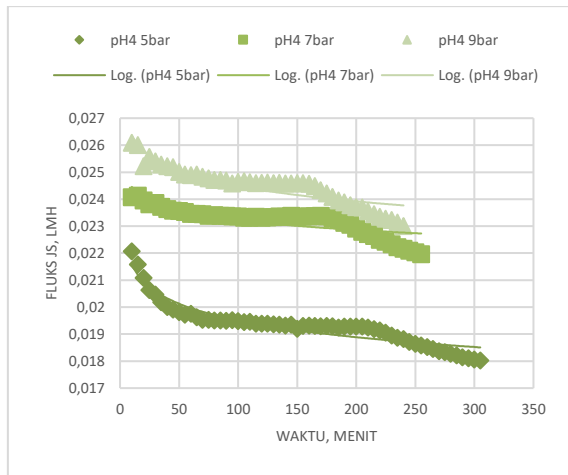
ion monovalen untuk melewati membran tersebut. Di sisi lain adanya dorongan berupa tekanan juga memperbesar penurunan fluks.

Sementara Gambar 3c menunjukkan bahwa penurunan fluks paling besar dibandingkan dengan percobaan pada pH 4 dan pH 7. Hal ini dikarenakan pH yang lebih tinggi atau basa menyebabkan membran akan lebih bermuatan negatif sehingga interaksi antara kation lebih besar sementara rejeksi terhadap anion lebih besar (Childress and Elimelech 1996). Interaksi antara kation (misalnya litium) dengan membran lebih besar dibanding kondisi operasi lainnya, hal ini ditunjukkan dengan selisih penurunan fluks yang terjadi adalah sebesar 0,00304-0,006 L/m²h.

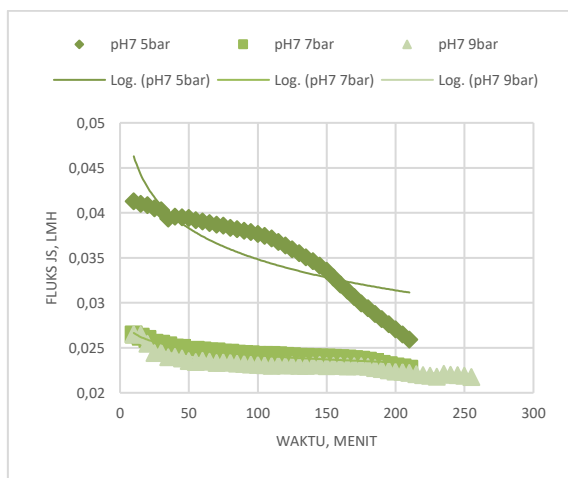
Pengaruh kondisi operasi terhadap fluks ionik

Fluks pada ion litium menyatakan jumlah ion litium yang dapat lolos melewati membran per satuan luas dan per satuan waktu. Oleh karenanya, fluks ionik umumnya digunakan sebagai indikator kualitas kinerja membran. Pengaruh variasi tekanan dan pH terhadap fluks ionik pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4 sesuai dengan data konsentrasi dari analisis ICP-AES dan menggunakan Persamaan (2).

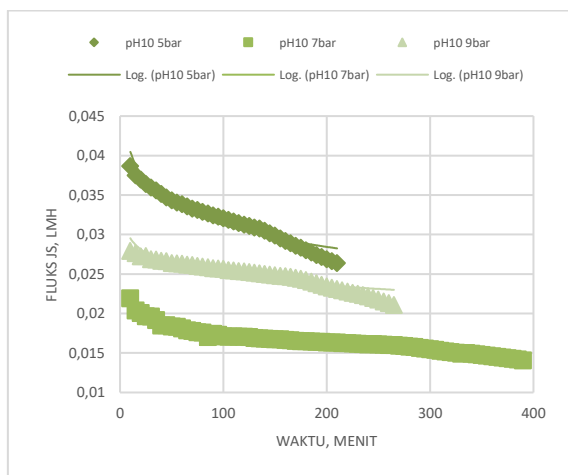
Pada berbagai kondisi operasi, adapun fluks ionik memiliki tren yang serupa dengan fluks larutan karena berdasarkan hasil pengujian diperoleh konsentrasi litium pada permeat dengan selisih yang tidak jauh berbeda untuk masing-masing kondisi operasi, sehingga tren pada Gambar 4 seolah-olah sama dengan tren pada Gambar 3. Sesuai dengan pemaparan di atas, tren tersebut dipengaruhi oleh polarisasi konsentrasi yang secara umum merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi terbentuknya kerak (*scaling*) pada permukaan membran selama proses NF. Efek ini merupakan peristiwa dimana solut dan solven dibawa ke permukaan membran dengan transpor konvektif, dimana solven dengan mudah melewati membran dan solut yang tertahan menginduksi peningkatan konsentrasi. Sementara itu, solut yang ditolak berdifusi kembali ke larutan *bulk* karena gradien konsentrasi yang dihasilkan (Luo et al. 2010).



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Pengaruh variasi tekanan pada berbagai pH terhadap fluks ion litium pada proses nanofiltrasi (NF): a) pH 4, b) pH 7 dan c) pH 10

Efek polarisasi konsentrasi inilah yang dapat menurunkan koefisien perpindahan massa

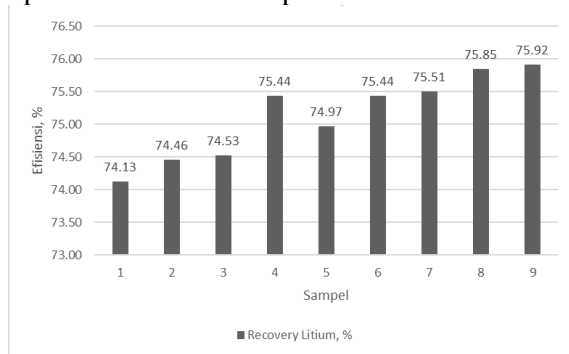
dari ion yang ditolak, dan karenanya menyebabkan adanya akumulasi dari ion-ion yang terejeksi tersebut di permukaan membran NF (Chidambaram, Oren, and Noel 2015). Jadi garam terlarut pada permukaan membran NF dengan mudah menjadi jenuh, bahkan jika konsentrasi *bulk* masih tetap tidak jenuh, sebagai akibat dari proses membran yang *driving force*-nya adalah tekanan. Dengan mempertimbangkan profil konsentrasi ion pada permukaan membran, maka teori film menganggap efek polarisasi konsentrasi yang berpotensi menimbulkan *scaling* dan presipitasi dalam sistem membran NF (Radu et al. 2014). Sementara itu adapun *recovery* permeat yang tinggi dan tingkat rejeksi yang besar memungkinkan untuk terbentuk kerak karena ion-ion sering terakumulasi pada permukaan membran (Galanakis, Fountoulis, and Gekas 2012). Oleh karena itu, meskipun dalam proses pelunakan air salinitas rendah atau sedang (1.000-10.000 ppm), *scaling* cenderung muncul pada permukaan membran NF di sisi retentat, apalagi *geothermal brine* yang memiliki karakteristik salinitas tinggi dengan konsentrasi 10.000-35.000 ppm (Water Science School 2018) karena batasan utama dalam sistem NF adalah penurunan fluks permeat karena polarisasi konsentrasi dan fouling (B. Van der Bruggen, Mänttari, and Nyström 2008), terutama untuk campuran yang sangat terkonsentrasi (Koyuncu, Topacik, and Wiesner 2004).

Pada Gambar 4 menunjukkan bahwa untuk kondisi pH 4, penurunan fluks untuk berbagai tekanan adalah benar karena untuk tekanan rendah, fluksnya akan lebih rendah dan sebaliknya. Hal ini dikarenakan tekanan sebagai *driving force* memberikan pengaruh yang tidak terlalu signifikan karena menggunakan tekanan yang rendah. Pada kondisi asam, waktu rata-rata yang diperlukan lebih lama dibanding kondisi lainnya karena pada larutan akan mengandung lebih banyak ion H^+ sehingga ion litium akan sulit melewati membran. Sementara pada pH 7, fluks tertinggi terjadi pada tekanan 5 bar, dimana hal ini tidak seharusnya terjadi karena seharusnya fluks kondisi ini adalah yang terendah. Hal ini dapat disebabkan adanya kebocoran garam yang melewati membran sehingga fluksnya tinggi. Waktu yang dibutuhkan pada pH 7 juga lebih cepat dibanding pada pH 4 sehingga hal ini terbukti benar karena semakin tinggi pH, maka ion H^+ akan berkurang dan memudahkan ion litium

untuk tertarik dengan membran yang secara alami bermuatan negatif. Kemudian pada pH 10, di tekanan 7 bar mengalami waktu yang lebih lama dan fluks paling rendah, hal ini dikarenakan adanya fenomena polarisasi konsentrasi yang terjadi sehingga terbentuk endapan yang relatif rapat dan mengakibatkan percobaan ini memerlukan waktu yang lama karena fluksnya rendah. Pada fluks rendah ini lapisan polarisasi konsentrasi akan memiliki konsentrasi yang lebih rendah dan lebih labil, dan lapisan terpolarisasi yang labil ini akan lebih cenderung mengalir secara *backward* karena adanya *shear*. Ketika fluks meningkat secara bertahap, penumpukan konvektif lapisan polarisasi konsentrasi akan lebih efektif berkurang tidak hanya dengan difusi konsentrasi tetapi juga dengan difusi *shear-enhanced* (Luo et al. 2010). Ini mungkin menjelaskan mengapa fluks untuk tekanan 7 bar lebih rendah daripada 5 dan 9 bar.

Optimasi Hasil pada Berbagai Kondisi Operasi

Analisis beberapa kondisi operasi menunjukkan bahwa variasi pH dan tekanan dalam sistem NF menunjukkan hasil yang cukup signifikan dalam proses recovery litium. Oleh karena itu, perlu ditinjau kondisi operasi yang paling optimum dengan harapan agar dapat memberikan hasil recovery litium yang paling maksimum. Dengan menggunakan Minitab Statistical Software, dapat ditinjau hasil optimum untuk variasi pH dan tekanan.



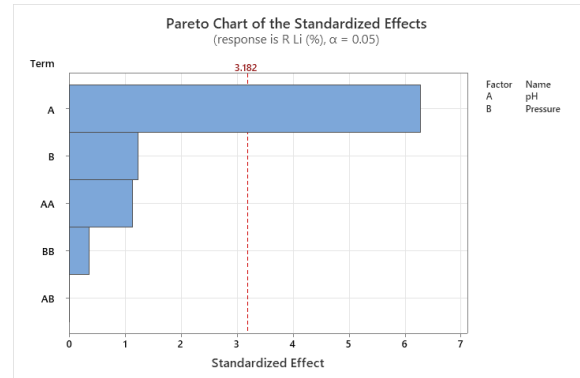
Gambar 5. Hasil recovery litium pada berbagai kondisi operasi

Keterangan:

- Sampel 1: pH 4; 5 bar
- Sampel 2: pH 4; 7 bar
- Sampel 3: pH 4; 9 bar
- Sampel 4: pH 7; 5 bar
- Sampel 5: pH 7; 7 bar
- Sampel 6: pH 7; 9 bar

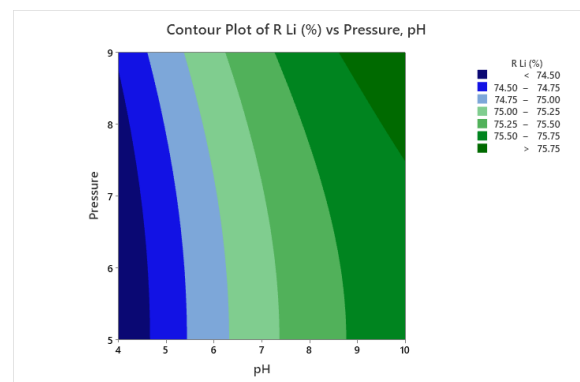
- Sampel 7: pH 10; 5 bar
- Sampel 8: pH 10; 7 bar
- Sampel 9: pH 10; 9 bar

Penelitian ini menunjukkan bahwa pada kondisi pH tinggi atau kondisi basa dengan tekanan yang tinggi, maka recovery litium yang diperoleh akan semakin besar nilainya, dengan recovery tertinggi sebesar 75,92% pada pH 10 dan tekanan 9 bar seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



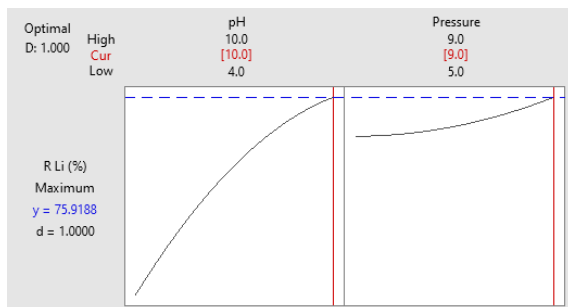
Gambar 6. Diagram Pareto antara pH dan tekanan

Diagram Pareto pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui faktor atau kondisi apa yang lebih mempengaruhi tinggi rendahnya recovery litium, dimana pada Gambar 6 faktor yang paling mempengaruhi adalah pH dengan *standardized effect* di atas 6.



Gambar 7. Garis kontur antara pH dan tekanan terhadap recovery litium

Gambar 7 memberikan ilustrasi lebih jelas yang menggabungkan penjelasan dari Gambar 5 dan Gambar 6, dimana semakin tinggi pH dan tekanan, maka recovery litium akan semakin tinggi dan dapat dilihat bahwa pH yang memberi peranan lebih besar terhadap tujuan dari penelitian ini.



Gambar 8. Kondisi operasi optimum untuk memperoleh recovery litium maksimum

Apabila dianalisis menggunakan *software* Minitab, untuk memperoleh *recovery* litium maksimum, kondisi optimal yang diperoleh adalah pH 10 dan tekanan 9 bar dengan *recovery* sebesar 75,9188% dimana hal ini sesuai dengan hasil pada penelitian.

Oleh karena itu, penjelasan lebih lanjut Gambar 5 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan *recovery* litium seiring dengan meningkatnya kenaikan pH atau pada kondisi semakin basa. Hal ini sesuai dengan teori dimana membran NF yang bersifat *negatively charge* akan menunjukkan efek yang berbeda pada berbagai variasi pH. Sifat endapan pada membran yang diperoleh setelah penyaringan berbeda dalam setiap kasus. Pada kasus larutan umpan asam, endapan akan relatif rapat dan pada kasus larutan umpan basa, endapan akan relatif ronggang. Hal ini disebabkan oleh perubahan kerapatan muatan tetap dari membran dengan berbagai pH larutan umpan. Dengan penurunan pH, *fixed-charged density* pada membran akan menurun, dan akibatnya lebih banyak garam mencapai permukaan membrane. Garam ini dikompresi dengan mudah karena gaya tolak berkurang, membentuk endapan yang lengket. Hal inilah yang menjelaskan mengapa kelengketan endapan meningkat secara bertahap ketika pH larutan umpan menurun dari 9 menjadi 4. Dengan begitu, pada kondisi asam akan lebih banyak endapan sehingga ion monovalen akan terhambat saat hendak lolos dari membran, sehingga pada Gambar 5 pun *recovery* litium yang dihasilkan pada pH rendah lebih sedikit dibandingkan dengan pH tinggi. Sebab, semakin tinggi pH dan tekanan, maka akan semakin tinggi fluks dan *recovery*.

Adapun anomali yang terdapat pada pH 7 dimana pada tekanan 5 dan 9 bar memberikan hasil *recovery* litium yang sama, dimana hal ini bertentangan dengan teori yang ada. Pada pH

netral, larutan garam memiliki lebih banyak ion-ion multivalen dengan jari-jari yang lebih besar sehingga hal ini menyebabkan terjadinya peristiwa polarisasi konsentrasi, sehingga *recovery* akan menurun. Akan tetapi pada kondisi pH 7 dan 5 bar, dihasilkan nilai *recovery* yang lebih tinggi daripada seharusnya, hal ini dikarenakan adanya garam yang bocor saat menembus membran NF sehingga konsentrasi yang tercatat lebih tinggi dari seharusnya. Namun, dengan membran dengan rejeksi tinggi, seperti NF2, kebocoran garam dari larutan harus minimal, bahkan untuk larutan garam dengan konsentrasi lebih tinggi. Kebocoran garam harus dikurangi lebih lanjut dengan fluks permeat itu sendiri, yang berlawanan dengan arah fluks garam. Sebaliknya, pada kondisi pH 7 dan 9 bar nilai *recovery* tidak lebih tinggi dari pH 7 dan 5 bar karena adanya hidrofobisitas lapisan pendukung membran yang secara signifikan menghambat aliran permeat dalam proses membran yang digerakkan secara osmotik. Kurangnya pembasahan *membrane support* pada Gambar 2 yang cukup tidak hanya memperburuk fenomena polarisasi konsentrasi internal, tetapi juga mengganggu kontinuitas permeat di dalam membran, sehingga mengurangi jalur transportasi permeat.

Dari Gambar 5 hal ini dikuatkan dengan bukti bahwa pada Gambar 6, pH lebih dominan dan lebih berpengaruh pada penelitian ini. Walaupun sistem NF menggunakan tekanan sebagai *driving force*, akan tetapi karena penelitian ini menggunakan kondisi *low pressure* dengan rentang tekanan dari 5 hingga 9 bar, maka pengaruhnya tidak terlalu signifikan, namun dengan penggunaan tekanan yang lebih tinggi dapat dilihat bahwa waktu percobaan lebih cepat. Kemudian dengan adanya pH, hal ini lebih mempengaruhi membran yang muatannya bersifat negatif sehingga ion-ion pada larutan mengalami tarik-menarik atau penolakan. Litium sebagai kation yang bermuatan positif akan cenderung lebih tertarik dengan membran pada kondisi basa karena adanya gugus hidroksida sehingga anion akan tertolak. Sementara pada kondisi asam, ion H^+ akan lebih banyak sehingga litium lebih susah tertarik untuk lolos dari membran. Oleh karena itu, Gambar 7 sesuai dengan teori dan grafik sebelumnya dimana semakin tinggi pH dan tekanan, maka semakin tinggi *recovery* litium. Di sisi lain, fluks ion litium yang terbentuk sangat mempengaruhi persentase perolehan litium. Semakin tinggi fluks ion litium, semakin

tinggi *recovery*. Berdasarkan Gambar 5, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kondisi operasi, semakin besar tingkat pengembalian lithium. Hal ini pun membuktikan bahwa penjelasan mengenai fluks benar, serta dibuktikan pada Gambar 8 bahwa kondisi optimum dari penelitian ini untuk mendapatkan nilai *recovery* yang paling maksimal adalah pada pH 10 dan 9 bar, dengan hasil sebesar 75,92% yang nilainya sesuai dengan hasil penelitian.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan antara lain:

1. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa pH dan tekanan merupakan parameter penting dalam memisahkan litium dari *brine*, seperti *geothermal brine* sintesis yang digunakan selama penelitian ini. Semakin tinggi pH dan tekanan dalam sistem NF, maka semakin tinggi *recovery* litium yang diperoleh dan fluks permeal yang dihasilkan. Namun, berdasarkan hasil yang diperoleh, variasi pH memainkan peran yang lebih penting daripada variasi tekanan.
2. Seiring berjalannya waktu, fluks permeal dan ionik akan menurun dan mencapai kondisi stagnan, penurunan fluks tersebut terjadi karena adanya polarisasi konsentrasi dan *fouling* pada membrane. Dengan adanya peningkatan tekanan, maka peristiwa *fouling* dapat dicegah namun dapat menyebabkan kebocoran garam pada membran.
3. Pada peningkatan pH, maka membran akan bermuatan semakin negatif sehingga meningkatkan rejeksi yang besar bagi anion. Sementara pada peningkatan tekanan, maka fluks permeal, fluks ion, dan *recovery* litium akan semakin tinggi, dengan kondisi operasi terbaik berada pada pH 10 dan tekanan 9 bar, yang menghasilkan *recovery* litium sebesar 75,92%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan Universitas Gadjah Mada dan kerjasama Divisi Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Lampung atas fasilitas laboratorium yang digunakan dalam penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- An, Jeon Woong, Dong Jun Kang, Khuyen Thi Tran, Myong Jun Kim, Tuti Lim, and Tam Tran. 2012. "Recovery of Lithium from Uyuni Salar Brine." *Hydrometallurgy* 117–118: 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.008>.
- Bruggen, B. Van der, L. Braeken, and C. Vandecasteele. 2002. "Evaluation of Parameters Describing Flux Decline in Nanofiltration of Aqueous Solutions Containing Organic Compounds." *Desalination* 147 (1–3): 281–88. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00553-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00553-2).
- Bruggen, B. Van der, M. Mänttari, and M. Nyström. 2008. "Drawbacks of Applying Nanofiltration and How to Avoid Them: A Review." *Separation and Purification Technology* 63 (2): 251–63. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.05.010>.
- Bruggen, Bart Van Der, Carlo Vandecasteele, Tim Van Gestel, Wim Doyen, and Roger Leysen. 2003. "A Review of Pressure-Driven Membrane Processes in Wastewater Treatment and Drinking Water Production." *Environmental Progress* 22 (1): 46–56. <https://doi.org/10.1002/ep.670220116>.
- Calisaya-Azpilcueta, Daniel, Sebastián Herrera-Leon, and Luis A. Cisternas. 2020. "Current and Future Global Lithium Production Till 2025." *The Open Chemical Engineering Journal* 14 (1): 36–51. <https://doi.org/10.2174/1874123102014010036>.
- Chidambaram, T., Yoram Oren, and M. Noel. 2015. "Fouling of Nanofiltration Membranes by Dyes during Brine Recovery from Textile Dye Bath Wastewater." *Chemical Engineering Journal* 262: 156–68. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.062>.
- Childress, Amy E., and Menachem Elimelech. 1996. "Effect of Solution Chemistry on the Surface Charge of Polymeric Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes." *Journal of Membrane Science* 119 (2): 253–68. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00127-5](https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00127-5).
- "Committee Report: Membrane Desalting Technologies." 1989. *Journal - American Water Works Association* 81 (11): 30–37. <https://doi.org/10.1002/j.1551->

- 8833.1989.tb03303.x.
- Galanakis, Charis M., Georgios Fountoulis, and Vassilis Gekas. 2012. "Nanofiltration of Brackish Groundwater by Using a Polypiperazine Membrane." *Desalination* 286: 277–84. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.035>.
- Gong, Lingyan, Wei Ouyang, Zirui Li, and Jongyoon Han. 2018. "Direct Numerical Simulation of Continuous Lithium Extraction from High Mg²⁺/Li⁺ Ratio Brines Using Microfluidic Channels with Ion Concentration Polarization." *Journal of Membrane Science* 556 (January): 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.078>.
- Hilal, Nidal, H. Al-Zoubi, N. A. Darwish, A. W. Mohammad, and M. Abu Arabi. 2004. "A Comprehensive Review of Nanofiltration Membranes: Treatment, Pretreatment, Modelling, and Atomic Force Microscopy." *Desalination* 170 (3): 281–308. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.01.007>.
- Koyuncu, Ismail, Dincer Topacik, and Mark R. Wiesner. 2004. "Factors Influencing Flux Decline during Nanofiltration of Solutions Containing Dyes and Salts." *Water Research* 38 (2): 432–40. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.10.001>.
- Kusuma, Gerry A, Glanny Mangindaan, and Marthinus Pakiding. 2018. "Analisa Efisiensi Thermal Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong Unit 5 Dan 6 Di Tompaso." *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer* 7 (2): 123–34.
- Li, Xianhui, Yinghui Mo, Weihua Qing, Senlin Shao, Chuyang Y. Tang, and Jianxin Li. 2019. "Membrane-Based Technologies for Lithium Recovery from Water Lithium Resources: A Review." *Journal of Membrane Science* 591 (January): 117317. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.11.7317>.
- Luo, Jianquan, Luhui Ding, Yi Su, Wei Shaoping, and Yinhua Wan. 2010. "Concentration Polarization in Concentrated Saline Solution during Desalination of Iron Dextran by Nanofiltration." *Journal of Membrane Science* 363 (1–2): 170–79. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.033>.
- Luo, Jianquan, and Yinhua Wan. 2013. "Effects of PH and Salt on Nanofiltration-a Critical Review." *Journal of Membrane Science* 438: 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.029>.
- Mänttäre, Mika, Arto Pihlajamäki, and Marianne Nyström. 2006. "Effect of PH on Hydrophilicity and Charge and Their Effect on the Filtration Efficiency of NF Membranes at Different PH." *Journal of Membrane Science* 280 (1–2): 311–20. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.01.034>.
- Meshram, Pratima, B. D. Pandey, and T. R. Mankhand. 2014. "Extraction of Lithium from Primary and Secondary Sources by Pre-Treatment, Leaching and Separation: A Comprehensive Review." *Hydrometallurgy* 150: 192–208. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>.
- Mohammad, A. W., N. Hilal, H. Al-Zoubi, and N. A. Darwish. 2007. "Prediction of Permeate Fluxes and Rejections of Highly Concentrated Salts in Nanofiltration Membranes." *Journal of Membrane Science* 289 (1–2): 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.11.035>.
- Mulder, H.V.M. 1995. "Membrane Separations Technology. Principles and Applications." *Elsevier*.
- Nanda, Dipankar, Kuo Lun Tung, Yu Ling Li, Nien Jung Lin, and Ching Jung Chuang. 2010. "Effect of PH on Membrane Morphology, Fouling Potential, and Filtration Performance of Nanofiltration Membrane for Water Softening." *Journal of Membrane Science* 349 (1–2): 411–20. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.12.004>.
- Pambudi, Nugroho Agung, Ryuichi Itoi, Rie Yamashiro, Boy Yoseph CSS Syah Alam, Loren Tusara, Saeid Jalilinasrabad, and Jaelani Khasani. 2015. "The Behavior of Silica in Geothermal Brine from Dieng Geothermal Power Plant, Indonesia." *Geothermics* 54 (March): 109–14. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.12.003>.
- Pérez-González, A., R. Ibáñez, P. Gómez, A. M. Urtiaga, I. Ortiz, and J. A. Irabien. 2015.

- “Nanofiltration Separation of Polyvalent and Monovalent Anions in Desalination Brines.” *Journal of Membrane Science* 473: 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.08.045>.
- Petersen, Robert J. 1993. “Composite Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes.” *Journal of Membrane Science* 83 (1): 81–150. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(93\)80014-O](https://doi.org/10.1016/0376-7388(93)80014-O).
- Quist-Jensen, Cejna Anna, Aamer Ali, Enrico Drioli, and Francesca Macedonio. 2019. “Perspectives on Mining from Sea and Other Alternative Strategies for Minerals and Water Recovery – The Development of Novel Membrane Operations.” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 94: 129–34. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.02.002>.
- Radu, A. I., L. Bergwerff, M. C.M. van Loosdrecht, and C. Picioreanu. 2014. “A Two-Dimensional Mechanistic Model for Scaling in Spiral Wound Membrane Systems.” *Chemical Engineering Journal* 241: 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.021>.
- Sahdarani, D N, M A Ponka, and A D Oktaviani. 2020. “Geothermal Energy As An Alternative Source For Indonesia’s Energy Security: The Prospect And Challenges.” *Journal of Strategic and Global Studies* 3 (1). <https://doi.org/10.7454/jsgs.v3i1.1024>.
- Schäfer, A. J., A. G. Fane, and T. D. Waite. 2000. “Fouling Effects on Rejection in the Membrane Filtration of Natural Waters.” *Desalination* 131 (1–3): 215–24. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)90020-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)90020-1).
- Sujoto, Vincent Sutresno Hadi, Sutijan, Widi Astuti, Slamet Sumardi, Isana Supiah Yosephine Louis, and Himawan Tri Bayu Murti Petrus. 2022. “Effect of Operating Conditions on Lithium Recovery from Synthetic Geothermal Brine Using Electrodialysis Method.” *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00488-3>.
- Swain, Basudev. 2017. “Recovery and Recycling of Lithium: A Review.” *Separation and Purification Technology* 172: 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.031>.
- Szoke, Szabolcs, Gyorgy Patzay, and Laszlo Weiser. 2003. “Characteristics of Thin-Film Nanofiltration Membranes at Various PH-Values.” *Desalination* 151 (2): 123–29. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00990-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00990-6).
- Vrouwenvelder, H. S., J. A.M. Van Paassen, H. C. Folmer, Jan A.M.H. Hofman, M. M. Nederlof, and D. Van Der Kooij. 1998. “Biofouling of Membranes for Drinking Water Production.” *Desalination* 118 (1–3): 157–66. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00116-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00116-7).
- Vrouwenvelder, J. S., J. W.N.M. Kappelhof, S. G.J. Heijman, J. C. Schippers, and D. van der Kooij. 2003. “Tools for Fouling Diagnosis of NF and RO Membranes and Assessment of the Fouling Potential of Feed Water.” *Desalination* 157 (1–3): 361–65. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00417-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00417-X).
- Wang, Xiao Lin, Wei Juan Shang, Da Xin Wang, Ling Wu, and Cong Hui Tu. 2009. “Characterization and Applications of Nanofiltration Membranes: State of the Art.” *Desalination* 236 (1–3): 316–26. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.082>.
- Water Science School. 2018. “Saline Water and Salinity.” 2018.
- Zabolotskii, V. I., V. F. Pis’Menskii, O. A. Demina, and L. Novak. 2013. “Effect of Concentration Polarization on Electrodialytic Concentrating of Dilute NaCl and NH₄NO₃ Solutions.” *Russian Journal of Electrochemistry* 49 (6): 563–70. <https://doi.org/10.1134/S1023193513060153>.
- Zhao, Li Ming, Qing Bai Chen, Zhi Yong Ji, Jie Liu, Ying Ying Zhao, Xiao Fu Guo, and Jun Sheng Yuan. 2018. “Separating and Recovering Lithium from Brines Using Selective-Electrodialysis: Sensitivity to Temperature.” *Chemical Engineering Research and Design* 140 (8): 116–27. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.009>.