



ARTIKEL PENELITIAN

Pengaruh kondisi operasi proses pemekatan litium dari *geothermal brine* sintetis dengan metode *Direct Contact Membrane Distillation* (DCMD)

Dimas Bagus Galih Utomo¹, Vincent Sutresno Hadi Sujoto^{1,2}, Widi Astuti³, Fika Rofieq Mufakhir³, Aron Pangihutan Christian Tampubolon⁴, Syamsumin⁴, Andhika Putera Utama⁴, Himawan Tri Bayu Murti Petrus^{1,2}, Mohammad Fahrurrozi¹, Sutijan^{1,2,*}

¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55283, Indonesia

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

³Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Ir. Sutami, Serdang, Kec. Tj. Bintang, Lampung Selatan, Lampung, 35361, Indonesia

⁴PT. Geo Dipa Energi (Persero), Jl. Dieng RT 01 RW 01, Area Indsutri, Sikunang, Banjarnegara, Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah

Disubmit 30 November 2022; direvisi 07 Desember 2022; diterima 09 Desember 2022

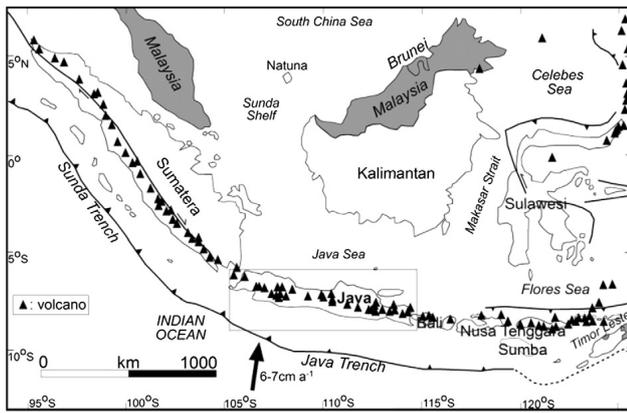


OBJECTIVES The use of lithium ion battery manufacturing has increased significantly in recent years. Due to the increasing demand for lithium, there is a need for exploitable sources of lithium. The target of this research is to concentrate the concentration of lithium before other separation processes are carried out. **METHODS** This direct contact membrane distillation (DCMD) device uses the difference in vapor pressure on both sides of the membrane as a driving force. The feed solution was varied at various temperatures and flow rates while the temperature on the permeate side was maintained at 25 °C. The feed temperature was varied at 60, 50 and 40 °C and the feed flow rate at 420, 260 and 180 ml/min. To reduce blockage in the membrane, synthetic geothermal brine is used. **RESULTS** The research that has been done shows that the operating temperature and flow rate have a significant effect on the lithium concentration process from synthetic geothermal brine. The increase in operating temperature and feed flow rate in the DCMD system indicates an increase in lithium concentration in the retentat and the resulting permeate flux. Optimum results were obtained at 60 °C. with a flow rate of 420 ml/min. **CONCLUSIONS** The highest average

flux gain was achieved at 60 °C at 7.3 L/m²/hour (LMH), followed by temperatures at 50 and 40 °C at 5.3 and 2.7 L/m²/hour (LMH). In addition to flux, a Liquid enter pressure (LEP) value of 7.3 bar was also obtained which indicated the strength of the membrane in resisting vapor pressure, so that wetting did not occur during the process.

KEYWORDS geothermal brines; lithium; membrane distillation; membrane technology; precious metal recovery

TUJUAN Penggunaan lithium dalam pembuatan baterai meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Peningkatan kebutuhan tersebut memerlukan sumber lithium lebih yang dapat dimanfaatkan. Target dari penelitian ini adalah untuk memekatkan konsentrasi dari lithium sebelum dilakukan proses pemisahan lainnya. **METODE** Perangkat *direct contact membrane distillation* (DCMD) ini menggunakan perbedaan tekanan uap di kedua sisi membran sebagai *driving force*. Larutan umpan divariasikan pada berbagai suhu dan laju alir sedangkan suhu sisi permeat dipertahankan pada 25 °C. Suhu umpan divariasikan pada 60, 50, dan 40 °C dan laju alir umpan pada 420, 260, dan 180 ml/menit. Untuk mengurangi penyumbatan pada membran, digunakan geothermal brine sintetis. **HASIL** Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa suhu operasi dan laju alir memberikan pengaruh yang signifikan pada proses pengkonsentrasian *lithium* dari *geothermal brine* sintetis. Kenaikan suhu operasi dan laju alir umpan pada sistem DCMD menunjukkan adanya kenaikan konsentrasi *lithium* pada retentat dan fluks permeat yang dihasilkan. Hasil optimum diperoleh pada suhu 60 °C dengan laju alir 420 ml/menit. **KESIMPULAN** Perolehan rerata fluks tertinggi dicapai pada 60 °C sebesar 7,3 L/m²/hour (LMH), di ikuti suhu 50 dan 40 °C sebesar 5,3 dan 2,7 L/m²/hour (LMH). Selain fluks diperoleh juga nilai *Liquid enter pressure* (LEP) 7,3 bar yang menunjukkan kekuatan membran dalam menahan tekanan uap, sehingga tidak terjadi *wetting* selama proses.



GAMBAR 1. Peta persebaran tektonik dan vulkanik di Indonesia (Purnomo dan Pichler 2014).

KATA KUNCI distilasi membran; *geothermal brine*; litium; rekovery logam berharga; teknologi membran

1. PENDAHULUAN

Lithium merupakan elemen yang dapat digunakan dalam banyak aplikasi seperti bahan paduan aluminium, keramik dan baterai. Secara umum baterai menjadi produk terbesar dari *lithium* sebesar 35%, kemudian diikuti oleh keramik sebesar 32%. Pada beberapa tahun belakangan ini, kegunaan *lithium* pada produksi baterai meningkat dalam pasar global. Sejak tahun 2000 konsumsi *lithium* meningkat sekitar 20% setiap tahunnya dan pada tahun 2015 lebih dari 30% konsumsi *lithium* secara keseluruhan digunakan untuk baterai (Natasha dkk. 2018). Saat ini konsumsi *lithium* di dunia terus meningkat yaitu lebih dari 40.000 ton per tahun dan diperkirakan pada tahun 2025 konsumsi *lithium* dapat mencapai lebih dari 90.000 ton per tahun (Li dkk. 2019).

Agar dapat memenuhi permintaan pasar global terhadap baterai *lithium* untuk kendaraan listrik, *lithium* menjadi sebuah elemen yang penting untuk dikembangkan. *Lithium* memiliki beberapa keuntungan pada baterai, karena *lithium* mempunyai potensial reduksi standar yang sangat negatif dan densitasnya rendah. Hal ini membuat baterai menjadi ringan dan dapat menyimpan energi dalam jumlah besar. Terdapat 3 jenis bahan baku yang dapat digunakan untuk ekstraksi *lithium* yaitu *brine water*, lumpur dan batuan (Natasha dkk. 2018). Disebabkan karena kebutuhannya yang terus meningkat, diperlukan sumber alternatif *lithium* lain. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah sumber *lithium* dari air limbah *geothermal* yang telah dipekatkan.

Wilayah Indonesia terletak di antara tiga lempeng bumi yang aktif, yaitu lempeng Pasifik, lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Lempeng aktif artinya lempeng tersebut selalu bergerak dan saling berinteraksi. Indonesia memiliki gunung berapi dengan jumlah kurang lebih 240 buah, di mana hampir 70 di antaranya masih aktif, sehingga Indonesia masuk dalam jajaran pegunungan aktif di dunia (*ring of fire*). Selain itu, Indonesia juga berada pada jalur *The Pacific Ring of Fire* (Cincin Api Pasifik) (Baksir dkk. 2019). Peta persebaran aktivitas tektonik dan vulkanik di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1.

Dengan keuntungan letak geografis ini, Indonesia banyak memiliki sumber daya *lithium* dari *geothermal brine*. *Geothermal brine* merupakan larutan garam yang panas dan pe-

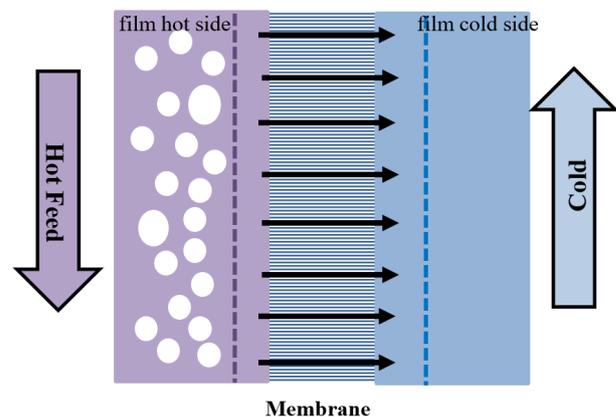
TABEL 1. Komponen *geothermal brine* sintesis.

No.	Komponen senyawa	Konsentrasi (ppm)
1.	NaCl	7500
2.	KCl	2500
3.	MgCl ₂	50
4.	CaCl ₂	400
5.	LiCl	50

kat yang mengalir di batuan kerak bumi dengan temperatur yang tinggi sehingga menjadi kaya akan zat terlarut dari batuan tersebut. Indonesia memiliki sumber *geothermal brine* di Dieng. Meskipun ada berbagai macam ion logam (seperti natrium dan kalium), dengan menggunakan berbagai teknologi diharapkan *lithium* dapat diperoleh dari sumber *geothermal brine*. Beberapa penelitian hanya dilakukan terkait pemanfaatan panas dari sistem panas bumi di Dieng, dengan menggunakan pembangkit listrik. Akan tetapi, *geothermal brine* di Dieng memiliki potensi untuk menghasilkan sumber daya *lithium* (Sujoto dkk. 2022).

Pada hasil penelitian ditunjukkan bahwa *geothermal brine* mengandung beberapa elemen berharga (Cl, B, Na, Si, Li, K, etc.) yang seharusnya dapat dimanfaatkan. Komposisi air geotermal, diketahui memiliki *brine* dengan konsentrasi *lithium* sebesar 15,7 mg/L (Siekierka dkk. 2018), sedangkan di Dieng Indonesia kandungan *lithium* pada *geothermal brine* 40 ppm dengan suhu reservoir tinggi 262 - 330 °C (Setiawan dkk. 2019a). Dengan adanya fakta-fakta tersebut, dibuktikan bahwa *geothermal brine* dapat dijadikan sumber alternatif *lithium* dimasa depan. Joko (2020) mengasumsikan bahwa produksi *brine* di PLTP Dieng sekitar 457,1 m³/jam dengan kapasitas listrik rerata sekitar 50 MW. Dengan asumsi tersebut, maka produksi litium di PLTP Dieng dapat mencapai 12,7 kg/jam atau 112,1 ton per tahun (asumsi *recovery* litium 70% dan konsentrasi litium 40 ppm). Dengan harga litium ingot sebesar US\$ 153, jika diproyeksikan ke dalam analisis ekonomi produksi litium dari *geothermal brine* ini sangat menjanjikan. Potensi yang begitu besar ini belum didukung dengan penyelidikan yang komprehensif pada beberapa lapangan panas bumi di Indonesia, dengan tatanan tektonik yang berbeda.

Beberapa metode pengkonsentrasian *lithium* dari bahan

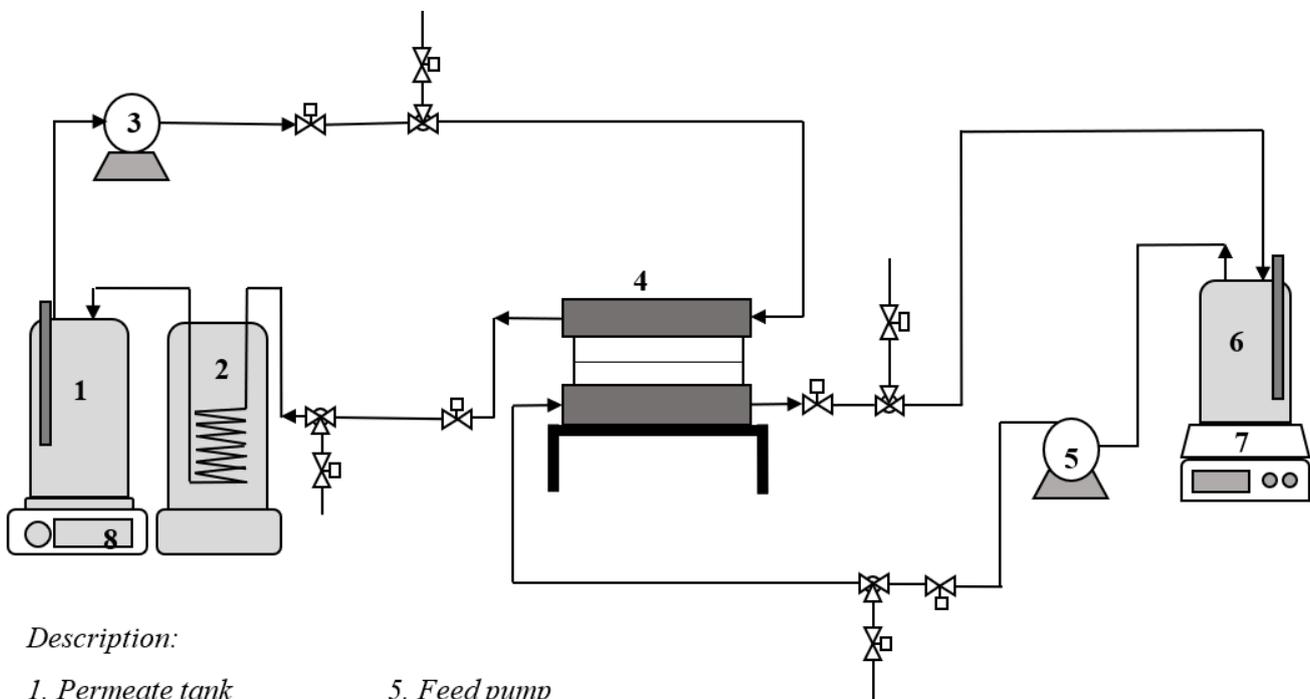


GAMBAR 2. Skema proses distilasi membran (Ahmed dkk. 2020).

alam seperti batuan, lumpur, air asin, dan *geothermal brine* telah banyak dikembangkan (H Tangkas dkk. 2021; Har-tono dkk. 2017; Setiawan dkk. 2019b; Sutijan dkk. 2022). Metode tradisional untuk pengkonsentrasian *lithium* dari sumber alam adalah presipitasi, evaporasi, dan ekstraksi dengan pelarut. Sebagai teknologi yang umum digunakan, proses evaporasi terdiri dari beberapa tahapan untuk mengendapkan dan mengkristalkan Li_2CO_3 (Flexer dkk. 2018). Namun, proses ini sangat memakan waktu dan produk Li_2CO_3 masih mengandung garam lain yang tidak diinginkan, seperti NaCl , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, dan MgCO_3 , serta pemurnian lebih lanjut. Selain itu, penggunaan pelarut dalam jumlah besar dapat merusak peralatan proses dan mencemari lingkungan (Li dkk. 2019). Oleh karena itu, pengembangan teknologi dalam ekstraksi *lithium* dari sumber alam sangatlah penting. Teknologi pemisahan berbasis membran dianggap sebagai alternatif yang menjanjikan dan ramah lingkungan untuk pengkonsentrasian *lithium*, karena keunggulannya dalam efisiensi energi yang tinggi dan pada *continuous process* yang mudah dioperasikan (Mustika dkk. 2022; Sujoto dkk. 2021, 2022). Beberapa penelitian telah dilakukan dalam upaya menemukan sumber *lithium* dari alam dengan menggunakan teknologi membran. Mustika dkk. (2022) telah melakukan penelitian menggunakan teknologi *forward osmosis* (FO) untuk mengekstraksi *lithium* dari *geothermal brine* (Mustika dkk. 2022). Sedangkan Sujoto dkk. (2022) telah mencoba melakukan ekstraksi *lithium* dari *geothermal brine* dengan menggunakan metode elektrodialisis (ED) (Sujoto dkk. 2022). Selain itu, Salah satu metode yang memiliki potensi di dalam proses ekstraksi *lithium* adalah distilasi membrane (MD). Kebanyakan penelitian yang menggunakan teknologi MD digunakan untuk meng-

ekstraksi *lithium* dari air laut. Sehingga pada penelitian ini akan difokuskan pada upaya ekstraksi *lithium* dari *geothermal brine* dengan metode MD (Blanco Gálvez dkk. 2009; Roobavannan dkk. 2020).

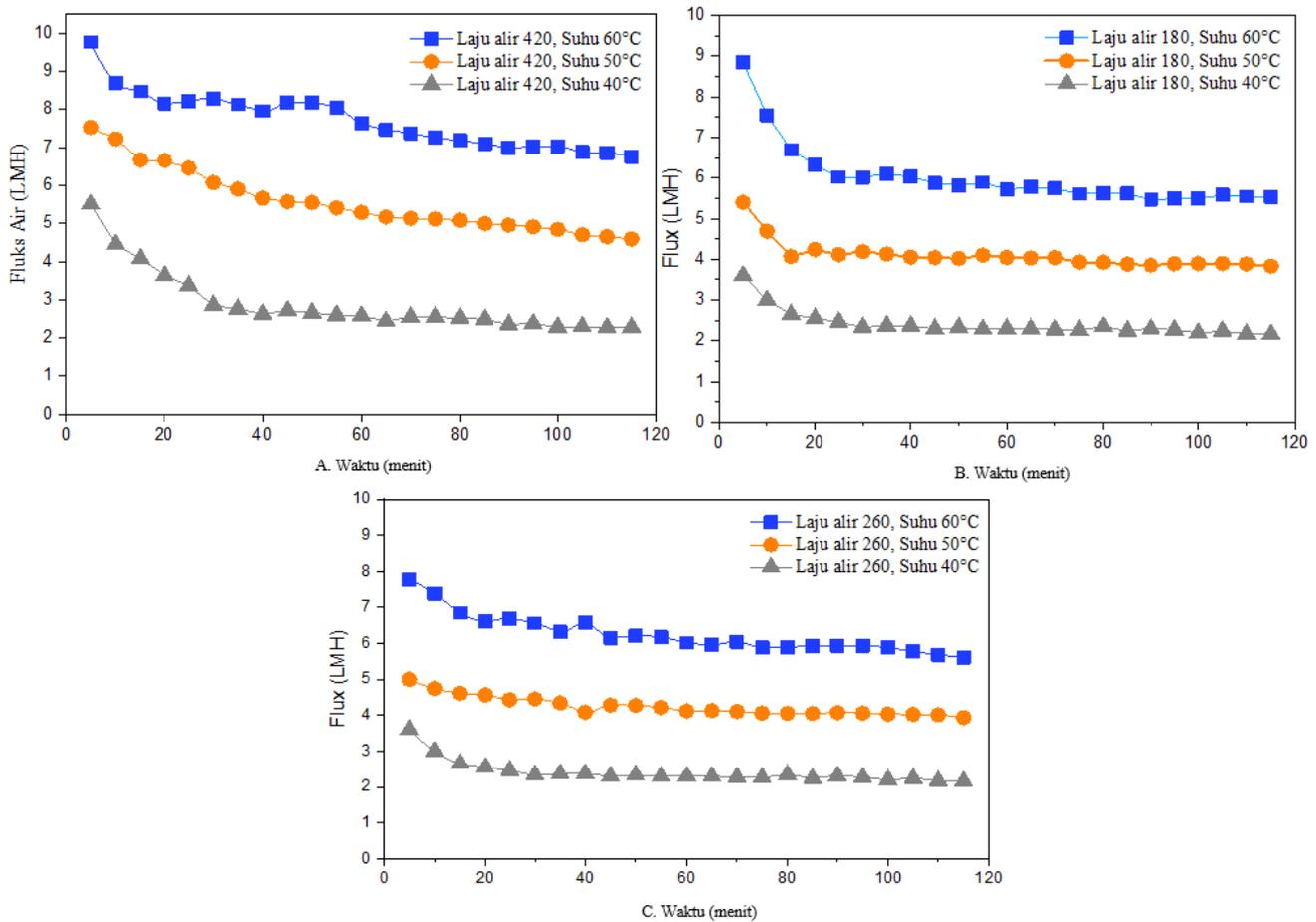
Distilasi membran adalah proses yang menjanjikan untuk desalinasi fluida dengan salinitas tinggi, untuk ekstraksi panas, dan untuk *recovery* garam berharga (Li dkk. 2020). Distilasi membran merupakan teknologi baru yang menggabungkan distilasi dan pemisahan membran, yaitu transport uap yang digerakkan secara termal melalui pori-pori membran mikro hidrofobik menggunakan perpindahan massa dan perpindahan panas secara simultan. Menurut Zhao dkk. (2013), distilasi membran menghasilkan distilat berkualitas tinggi dari air limbah atau air laut dalam kondisi tekanan atmosfer dan pada suhu 50 - 80 °C. Membran hidrofobik berpori, yang berfungsi baik sebagai isolator panas dan penghalang fisik, memungkinkan pengangkutan bebas uap air melalui pori-pori membran tetapi mencegah fasa cair melewati membran. Akibatnya, secara teoritis penolakan 100% dari larutan nonvolatil dapat dicapai, dalam hal ini hanya uap air yang akan melewati membran, dan larutan nonvolatil akan tertahan pada sisi umpan (Zhang dkk. 2015). Distilasi membran menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan desalinasi termal konvensional lainnya. Pertama, MD dapat menghilangkan garam pada suhu yang lebih rendah. Kedua, distilasi membran bergantung pada desain sistem modular yang ringkas dibandingkan dengan proses termal konvensional. Jika dibandingkan dengan desalinasi membran yang digerakkan oleh tekanan seperti RO dan nanofiltrasi (NF), Distilasi membran mampu digunakan oleh berbagai jenis ump-an, termasuk *hypersaline feed solutions* (REF) (Ahmed dkk.



Description:

- | | |
|------------------|----------------------|
| 1. Permeate tank | 5. Feed pump |
| 2. Cooler | 6. Feed tank |
| 3. Permeate pump | 7. Hotplate |
| 4. DCMD Module | 8. Analytical scales |

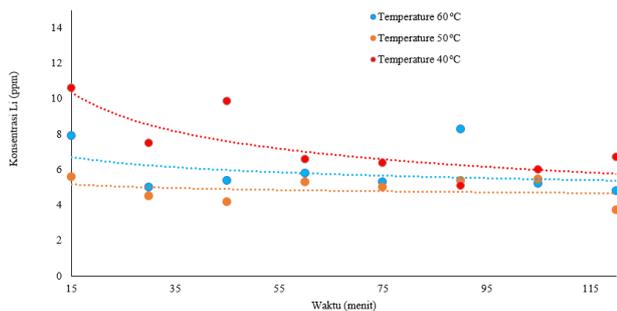
GAMBAR 3. Skema alat penelitian.



GAMBAR 4. Fluks air dengan variasi suhu di berbagai laju alir.

2020). Karena air bersifat polar dengan tegangan permukaannya tinggi, maka energi permukaan membran yang rendah mencegah terjadinya pembasahan pada membran hidrofobik (Ahmed dkk. 2020).

Pada penelitian ini akan digunakan metode distilasi membran untuk memekatkan *lithium* dari *geothermal brine*. Distilasi membran adalah teknologi baru yang menggabungkan distilasi dan pemisahan dengan membran, yaitu perpindahan uap yang digerakkan secara termal melalui pori-pori membran mikro hidrofobik menggunakan perpindahan massa dan perpindahan panas. Dibandingkan dengan proses pemisahan normal, distilasi membran adalah teknologi pemisahan efisien yang memiliki sedikit batasan operasi, kekuatan mekanik membran yang baik serta ramah lingkungan (Zhang dkk. 2015).



GAMBAR 5. Konsentrasi *lithium* di permeat pada berbagai suhu dengan laju alir 420 ml/menit.

2. BAHAN DAN METODE PENELITIAN

2.1 Bahan penelitian

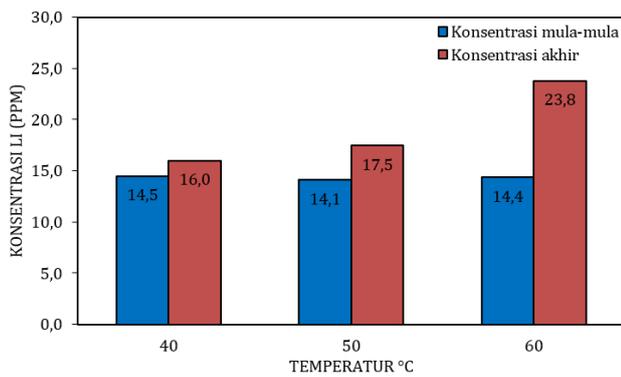
Geothermal Brine sintesis yang mengandung *lithium* dibuat dengan melarutkan litium klorida (LiCl) dari Chengdu Hua-rui Industrial Co., Ltd., natrium klorida (NaCl) dari Wuhan Y & Industry and Trade Co., Ltd., magnesium klorida (MgCl₂) dari Shanxi Solid Industrial Co., Ltd., kalium klorida (KCl) dari Jiao-zuo Minli Industrial Co., Ltd., kalsium klorida (CaCl₂) dari Shanxi Solid Industrial Co., Ltd., dilarutkan dalam aquades. Dalam penelitian ini menggunakan membran berpori hidrofobik (PTFE) dari Sterlitech Corporation, dengan ketebalan 152 μm dan pore size 0,1 μm.

2.2 Metode penelitian

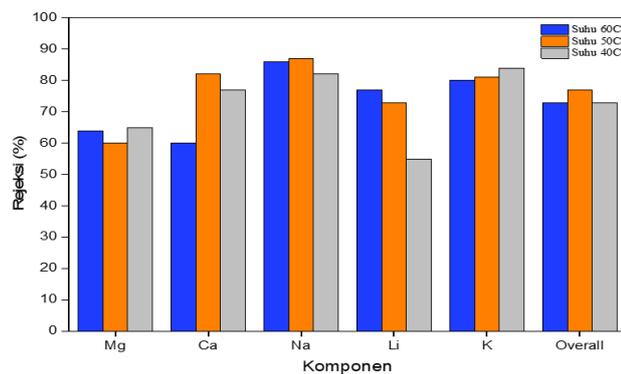
2.2.1 Pembuatan *geothermal brine* sintesis

Pada penelitian ini digunakan *geothermal brine synthetic* yang mengandung litium. *Geothermal brine synthetic* dibuat dengan melarutkan litium klorida (LiCl), natrium klorida (NaCl), magnesium klorida (MgCl₂), kalsium klorida (CaCl₂), dan kalium klorida (KCl) dilarutkan dalam aquades dengan komposisi seperti tabel 1.

Adapun komposisi ini mengacu pada pendekatan data komposisi *geothermal brine* dari Dieng, Jawa Tengah, Indonesia (Setiawan dkk. 2019a)



GAMBAR 6. Konsentrasi *lithium* di retentat pada berbagai suhu dengan laju alir 420 ml/menit.



GAMBAR 7. Rejeksi garam pada berbagai suhu dengan laju alir 420 ml/menit.

2.2.2 Proses distilasi membran kontak langsung

Proses *Direct Contact Membrane Distillation* (DCMD) dilakukan dengan mengalirkan larutan panas berupa umpan *geothermal brine synthetic* yang mengandung *lithium* supaya berkontak langsung dengan permukaan sisi membran panas. Kemudian penguapan terjadi pada permukaan umpan membran. Uap digerakkan oleh perbedaan tekanan uap air yang meningkat seiring meningkatnya perbedaan suhu antara umpan dan permeat, hingga uap air dapat melintasi membran ke sisi permeat dan mengembun di dalam modul membran, lalu bercampur dengan destilat. Karena sifat membran yang hidrofobik, umpan berupa larutan nonvolatil tidak dapat menembus membran karena hanya fasa gas yang dapat melewati pori-pori membran, sehingga hanya uap air yang dapat lolos melewati sisi membran dan mengembun bersama destilat. Pada penelitian ini dilakukan berbagai variasi suhu untuk mendapatkan hasil optimal, di mana suhu umpan divariasikan pada 40, 50 dan 60 °C pada laju alir 180, 260, dan 420 ml/menit sedangkan suhu permeat dibuat tetap pada 25°C dengan laju alir 180 ml/menit.

Rejeksi merupakan fenomena penolakan ion-ion non volatil yang tidak dapat berpenetrasi pada membran selama proses DCMD. Perolehan rejeksi dengan variasi suhu pada laju alir 420 ml/menit tersaji pada Gambar 7.

2.2.3 Uji kadar

Uji komposisi dilakukan untuk mengetahui konsentrasi retentat dan kemurnian permeat hasil proses DCMD menggunakan uji ICP-AES. ICP-AES berfungsi sebagai pemilah dan

pencacah atom yang diekstrak dari plasma argon. Atom-atom yang telah dipilih massanya masuk ke dalam detektor, biasanya digunakan detektor pelipatganda elektron (electron multiplier). Sumber plasma akan merangsang atom dalam sampel, memancarkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu. Intensitas cahaya yang dipancarkan diukur oleh detektor, yang mana berhubungan dengan konsentrasi. Untuk mengetahui unsur-unsur logam yang ada pada permeat hasil proses DCMD berdasarkan pada penyerapan absorpsi radiasi oleh atom bebas. Karena ICP-AES termasuk metode analisis komparatif yang memerlukan standar unsur pembanding, maka sebelum digunakan ICP, diperlukan kalibrasi terlebih dahulu untuk mendapatkan hasil yang akurat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Variasi suhu operasi

Pada penelitian ini dilakukan berbagai variasi suhu untuk mendapatkan hasil optimal, di mana suhu umpan divariasikan pada 40, 50 dan 60°C pada laju alir 180, 260, dan 420 ml/menit sedangkan suhu permeat dibuat tetap pada 25°C dengan laju alir 180 ml/menit. Fluks pada membran menyatakan jumlah debit permeat yang dapat dilewatkan oleh membran dalam satuan luas dan satuan waktu, dengan satuan LMH. Adapun dalam penelitian ini fluks air tertinggi dari beberapa variasi diperoleh pada suhu operasi 60°C, sebagaimana yang tersaji pada Gambar 4.

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu proses semakin tinggi juga fluks air yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena *driving force* pada proses DCMD adalah perbedaan tekanan uap antara sisi permeat dan sisi umpan, yang dihasilkan karena adanya gradien suhu di antara keduanya. Sehingga untuk mendapatkan fluks air yang tinggi maka gradien suhu antara kedua sisi harus dipertahankan secara konstan. Pernyataan tersebut seiring dengan penelitian [Ahmed dkk. \(2020\)](#) yang menyatakan bahwa perbedaan suhu melintasi membran menginduksi gradien tekanan uap yang merupakan *driving force* dari setiap sistem membran distilasi. Akibatnya, peningkatan suhu umpan, atau penurunan suhu permeat, meningkatkan perbedaan suhu melintasi membran dan menyebabkan peningkatan fluks uap melalui membran.

Gambar 4 menunjukkan bahwa fluks tertinggi pada variasi suhu 60 °C diberbagai laju alir sebesar 9,8 LMH untuk laju alir 420 ml/menit, 7,8 LMH untuk laju alir 260 ml/menit dan 8,8 LMH untuk laju alir 180 ml/menit. Namun setelah 40 menit proses berlangsung, fluks mengalami penurunan secara signifikan dan seiring berjalannya waktu, fluks yang dihasilkan terus mengalami penurunan secara konstan. Hal ini terjadi karena adanya efek pengkonsentrasian ion-ion pada permukaan membran, sehingga pori-pori membran tersumbat dan fluks mengalami penurunan secara signifikan. Fluks terendah didapatkan pada variasi suhu 40 °C diberbagai laju alir porses, pada penelitian ini fluks terendah diperoleh pada kisaran 2,2 – 2,3 LMH di mana pada kondisi tersebut perolehan fluks air sudah sangat lambat.

Jika dibandingkan dengan rerata fluks sebagai fungsi suhu pada berbagai laju alir dapat diamati bahwa kenaikan suhu pada 40-60 °C menghasilkan gradien peningkatan fluks yang linier, yang berarti semakin tinggi suhu operasi maka

semakin tinggi pula fluks air yang diperoleh selama proses. Hal ini dapat diamati pada Gambar 4, di mana pada suhu 60°C memiliki rerata fluks air tertinggi dengan kisaran 6-7 LMH, kemudian diikuti oleh suhu 50 °C dengan rerata fluks air sebesar 4-5 LMH, dan pada suhu 40 °C dengan perolehan rerata fluks air sebesar 2-3 LMH selama proses berlangsung.

Indikator kinerja pada sistem DCMD adalah kebocoran dan pembasahan pada membran. Di mana fase cair dari sisi umpan tidak diperbolehkan untuk membus pori-pori membran. Berdasarkan data konsentrasi hasil analisis ICP-AES maka dapat dibuat grafik sebuah grafik yang menunjukkan konsentrasi ion *lithium* sebagai fungsi waktu pada sisi permeat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan kandungan konsentrasi ion *lithium* sebagai fungsi waktu di sisi permeat pada laju alir 420 ml/menit. Pada temperatur 40, 50 dan 60 °C ditunjukkan bahwa adanya tren menurun selama proses berjalan. Hal ini terjadi karena membran mampu menahan zat-zat non volatil untuk tidak menembus ke sisi permeat, sehingga tidak terjadi peningkatan konsentrasi ion *lithium* pada sisi permeat.

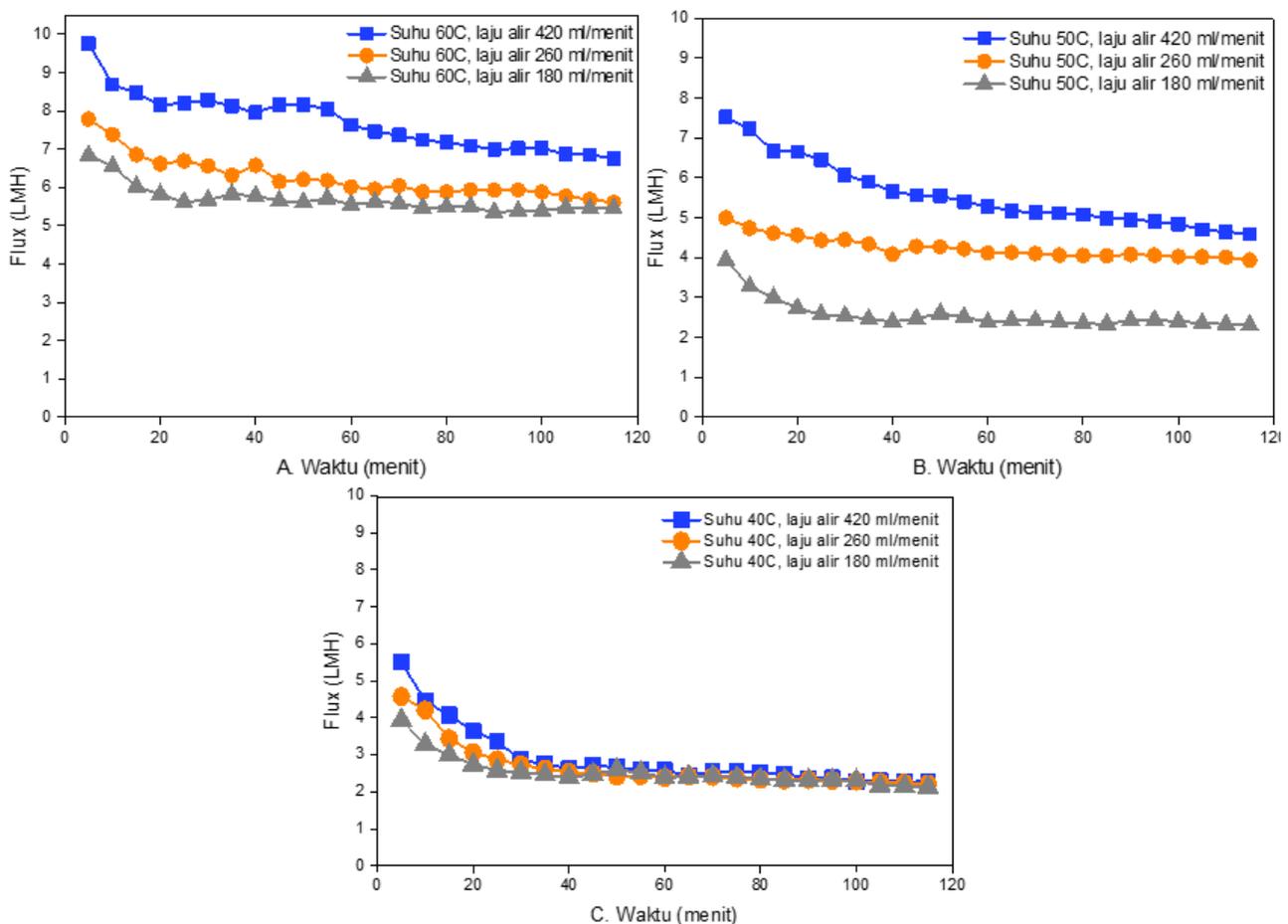
Nilai fluks air yang dapat dihasilkan selama proses akan berpengaruh pada seberapa besar laju pengkonsentrasian larutan *geothermal brine* di retentat pada sistem DCMD. Untuk mengetahui seberapa besar ion *lithium* yang dapat dipisahkan, hasil analisis data ICP-AES dapat dibuat diagram yang menyatakan perbandingan konsentrasi umpan dengan konsentrasi retentat setelah proses dijalankan dalam berbagai variasi suhu operasi dengan laju alir 420 ml/menit, seperti yang tersaji pada Gambar 6.

Secara teoritis, kenaikan temperatur operasi berpengaruh pada meningkatnya nilai rejeksi garam. Akan tetapi hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya litium yang terjadi sesuai teori. Hal ini terjadi akibat adanya polarisasi konsentrasi yang membatasi kondisi operasi dari penelitian dengan menggunakan teknologi membran. Pada temperatur 60 °C terjadi polarisasi konsentrasi yang menyebabkan terjadinya kebocoran garam sehingga hasil dari garam tiap temperatur menjadi tidak stabil (Sujoto dkk. 2022). Selain itu, berdasarkan persamaan Antoine, pada temperatur yang lebih tinggi, maka ada peningkatan tekanan uap, sehingga terjadi pembasahan sebagian pada membran, dan menyebabkan beberapa ion dapat berpenetrasi melalui membran ke sisi permeat (Alkhudhiri dkk. 2012).

Dalam DCMD, lapisan batas termal terbentuk di permukaan membran sehingga gradien suhu permukaan membran selalu lebih kecil dari suhu *bulk fluida*. Fenomena ini dikenal sebagai polarisasi suhu, dan diukur menggunakan koefisien polarisasi suhu (TPC). Peningkatan suhu umpan menyebabkan koefisien polarisasi suhu meningkat, karena pada suhu *bulk feed* yang lebih tinggi, lebih banyak energi panas yang digunakan untuk menguapkan molekul air, sehingga menyebabkan penurunan suhu di permukaan membran. Dengan kata lain, efek polarisasi suhu menjadi lebih jelas pada suhu yang lebih tinggi (Ahmed dkk. 2020).

3.2 Variasi laju alir operasi

Pada penelitian sebelumnya, laju alir memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam perolehan fluks air, pengonsen-



GAMBAR 8. Fluks air dengan variasi laju alir diberbagai suhu operasi.

trasi ion *lithium* di retentate dan perolehan efisiensi kinerja sistem DCMD. Oleh sebab itu, pada penelitian ini perlu dipelajari efek pengaruh laju alir terhadap sistem DCMD. Penelitian ini dilakukan pada berbagai variasi laju alir umpan untuk mendapatkan hasil optimal, di mana laju alir umpan divariasikan pada 180, 260 dan 420 ml/menit dengan temperatur umpan 40, 50 dan 60 °C, sedangkan suhu permeat dijaga tetap konstan pada 25 °C dengan laju alir 180 ml/menit. Pada penelitian sebelumnya diketahui bahwa laju alir operasi memiliki pengaruh terhadap perolehan fluks air. Grafik pengaruh variasi laju alir pada berbagai suhu ditunjukkan pada Gambar 8.

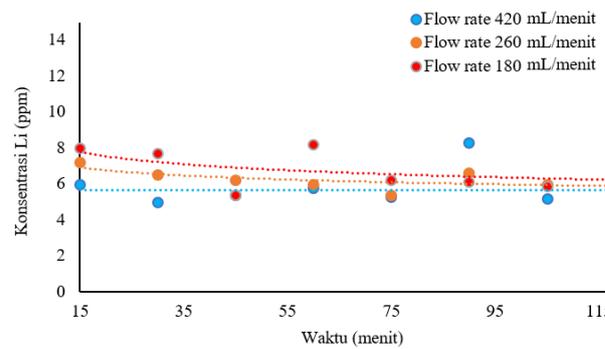
Fluks uap meningkat karena laju aliran baik larutan umpan panas dan pendingin meningkat, sedangkan laju aliran di sisi panas memiliki dampak yang lebih kuat daripada sisi dingin. Hal inilah yang menyebabkan peningkatan *driving force* dan perolehan fluks air pada system DCMD (Zhang dkk. 2015).

Pernyataan tersebut sesuai dengan Gambar 7 yang menunjukkan perolehan fluks air yang lebih tinggi pada laju alir 420 ml/menit pada berbagai suhu operasi, sebesar 9,8 LMH pada suhu operasi 60 °C, 7,8 LMH pada suhu operasi 50 °C dan 5,5 LMH pada suhu operasi 40 °C. Kemudian fenomena ini diperkuat oleh perhitungan nilai bilangan Reynold, di mana pada laju alir 420 ml/menit memiliki bilangan Reynold yang lebih tinggi sebesar, 1.853 kemudian diikuti dengan laju alir 260 dan 180 ml/menit yang memiliki bilangan Reynold sebesar 1.147 dan 794. Di mana semakin tinggi nilai bilangan Reynold maka aliran fluida akan semakin cepat dan menurunkan efek lapisan batas yang terbentuk pada permukaan membran selama proses berlangsung. Pada temperatur operasi 40 °C, tidak terlihat perubahan yang signifikan. Hal ini disebabkan karena pada temperatur tersebut, *driving force* pada system MD, yaitu perbedaan suhu antara sisi dingin dan sisi panas dari sistem, semakin kecil sehingga fluks yang dihasilkan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

Seiring dengan berjalannya waktu, perolehan fluks air pada berbagai laju alir menurun secara signifikan, namun pada waktu 40 menit perolehan fluks air mulai konstan. Hal ini disebabkan karena sebelum 40 menit, belum terbentuk polarisasi konsentrasi disekitar permukaan membran, akan tetapi polarisasi konsentrasi terbentuk seiring berjalannya waktu proses, sehingga terjadi pengonsentrasian ion di permukaan membran dan menyebabkan pori-pori pada membran tersumbat.

Untuk mengetahui apakah kebocoran atau pembasahan membran tidak terjadi pada penelitian ini, dilakukan analisis pada kandungan konsentrasi ion-ion pada sisi permeat. Berdasarkan data konsentrasi hasil analisis ICP-AES maka dapat dibuat grafik yang menunjukkan konsentrasi ion *lithium* sebagai fungsi waktu pada sisi permeat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Pada Gambar 9 menunjukkan kandungan konsentrasi ion *lithium* sebagai fungsi waktu pada sisi permeat pada temperature 60 °C. Pada laju alir 420, 260 dan 180 ml/menit menunjukkan bahwa adanya tren menurun selama proses, hal ini terjadi karena membran mampu menahan zat-zat non volatil untuk tidak berpenetrasi ke sisi permeat, sehingga tidak terjadi peningkatan konsentrasi ion *lithium* pada sisi permeat. Selain itu parameter penting untuk mempelajari kebocoran membran, salah satunya dengan dengan mengetahui

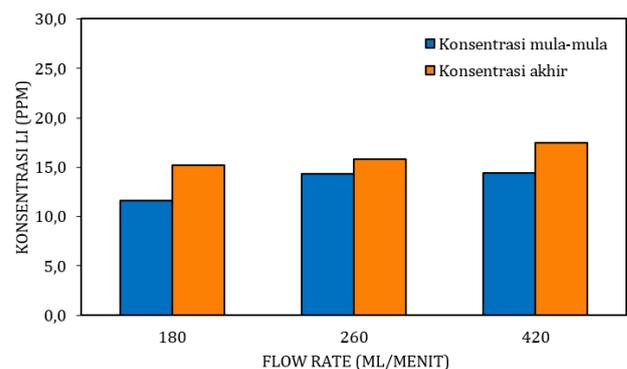


GAMBAR 9. Konsentrasi *Lithium* di permeat pada berbagai laju alir dengan suhu 60 °C.

nilai *liquid entry pressure* (LEP) yang dimiliki membran. LEP didefinisikan sebagai suatu nilai perbedaan tekanan di mana membran hidrofobik masih dapat mempertahankan sifatnya sebelum tekanan yang lebih besar akan merusak dan menyebabkan basahannya membran (Prawira 2017). Dari spesifikasi membran yang digunakan, membran pada penelitian ini memiliki nilai LEP sebesar 4,2 bar, dan secara teoritis dengan persamaan 2.22 didapatkan nilai LEP sebesar 7,3 bar, sedangkan pada penelitian ini hanya menggunakan tekanan uap tertinggi sebesar 0,2 bar. Sehingga dapat dikatakan pada penelitian ini tidak terjadi kebocoran pada membran.

Pada penelitian ini pengkonsentrasian garam terjadi pada sisi retentat, untuk mengetahui seberapa besar ion *lithium* yang dapat dipekatkan, dari hasil analisis data ICP-AES maka dapat dibuat diagram yang menyatakan perbandingan konsentrasi umpan dengan konsentrasi retentat setelah proses dijalankan dalam berbagai variasi laju alir operasi dengan suhu operasi 60 °C, seperti yang tersaji pada Gambar 10.

Secara umum, karakteristik membran hidrofobik mampu menahan zat-zat non volatil untuk tidak menembus pori-pori membran, sehingga dimungkinkan terjadinya penolakan garam 100% selama proses. Akan tetapi hasil penelitian yang tersaji pada Gambar 10 masih belum menunjukkan fenomena tersebut. Secara keseluruhan, hasil rejeksi garam berkisar 66-72% pada berbagai variasi laju alir dengan suhu operasi 60 °C. Secara lebih spesifik, kalium memiliki nilai rejeksi tertinggi sebesar 80-86%, sedangkan nilai rejeksi terendah ditempati oleh magnesium dengan nilai 49-64%. Meskipun laju aliran yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi



GAMBAR 10. Rejeksi garam pada berbagai laju alir dengan suhu 60 °C.

ensi panas dan meningkatkan tekanan operasi, kondisi ini dapat mengakibatkan pembasahan membran pada sistem aliran *counter current*. Oleh karena itu, dalam desain sistem DCMD, laju resirkulasi harus cukup tinggi untuk mengurangi efek polarisasi tetapi cukup rendah untuk mempertahankan antarmuka uap-cair (Zhang dkk. 2015). Secara keseluruhan, proses pengkonsentrasian litium dari *geothermal brine* dengan menggunakan teknologi MD telah berhasil dilakukan. Akan tetapi, masih banyak ruang pengembangan yang dapat dilakukan terkait topik ini. Adapun beberapa saran dan masukan seperti menambahkan variabel lain seperti pH dan jenis aliran sistem untuk mengetahui pengaruh berbagai parameter lebih menyeluruh terhadap pergerakan sistem.

4. KESIMPULAN

Penelitian yang telah dilakukan dengan berbagai variasi kondisi operasi menunjukkan peningkatan suhu operasi mampu meningkatkan perolehan fluks air serta laju pengkonsentrasian selama proses DCMD dijalankan, pada suhu operasi 60 °C memiliki trend perolehan fluks yang lebih baik, dibandingkan suhu operasi 50 dan 40 °C. Selain itu, Pengaruh peningkatan laju alir operasi berakibat pada penurunan efek polarisasi suhu, sehingga meningkatkan perolehan fluks air, laju pengkonsentrasian dan rejeksi garam. Pada laju alir operasi 420 ml/menit memiliki trend perolehan fluks yang lebih baik, dibandingkan laju alir operasi 260 dan 180 ml/menit.

5. 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 dan PT. Geo Dipa Energi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed FE, Lalia BS, Hashaikhe R, Hilal N. 2020. Alternative heating techniques in membrane distillation: A review. *Desalination*. 496(September):114713. doi:10.1016/j.desal.2020.114713.
- Alkhdhiri A, Darwish N, Hilal N. 2012. Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*. 287(January):2–18. doi:10.1016/j.desal.2011.08.027.
- Baksir A, Daud K, Wibowo ES, Akbar N, Haji I. 2019. Halmaheara, North Maluku Province. 22.
- Blanco Gálvez J, García-Rodríguez L, Martín-Mateos I. 2009. Seawater desalination by an innovative solar-powered membrane distillation system: the MEDESOL project. *Desalination*. 246(1-3):567–576. doi:10.1016/j.desal.2008.12.005.
- Flexer V, Baspineiro CF, Galli CI. 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment*. 639:1188–1204. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.223.
- H Tangkas IWCW, Astuti W, Sutijan, Sumardi S, Petrus HTBM. 2021. Lithium titanium oxide synthesis by solid-state reaction for lithium adsorption from artificial brine source. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 882(1):012005. doi:10.1088/1755-1315/882/1/012005.
- Hartono M, Astrayudha MA, Petrus HT, Budhijanto W, Sulisty H. 2017. Lithium recovery of spent lithium-ion battery using bioleaching from local sources microorganism. *Raysan Journal of Chemistry*. 10(3):897–903. doi:10.7324/RJC.2017.1031767.
- Joko S. 2020. Makalah ilmiah. 15:89–100.
- Li Q, Omar A, Cha-Umpong W, Liu Q, Li X, Wen J, Wang Y, Razmjou A, Guan J, Taylor RA. 2020. The potential of hollow fiber vacuum multi-effect membrane distillation for brine treatment. *Applied Energy*. 276(June):115437. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115437.
- Li X, Mo Y, Qing W, Shao S, Tang CY, Li J. 2019. Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: A review. *Journal of Membrane Science*. 591(January):117317. doi:10.1016/j.memsci.2019.117317.
- Mustika PCBW, Astuti W, Sumardi S, Petrus HTBM, Sutijan. 2022. Separation Characteristic and Selectivity of Lithium from Geothermal Brine Using Forward Osmosis. *Journal of Sustainable Metallurgy*. doi:10.1007/s40831-022-00602-z.
- Natasha NC, Lalasari LH, Miftakhur R, Sudarsono JW. 2018. Ekstraksi Litium dari β - Spodumen Hasil Dekomposisi Batuan Sekismika Indonesia Menggunakan Aditif Natrium Sulfat.
- Prawira J. 2017. Karakteristik Membran dan Pengaruhnya Terhadap Kinerja Proses Distilasi Membran. *Delft University of Technology*. 3(1):0–11. doi:10.5281/zenodo.1134034.
- Purnomo BJ, Pichler T. 2014. Geothermal systems on the island of Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 285:47–59. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.08.004.
- Roobavannan S, Vigneswaran S, Naidu G. 2020. Enhancing the performance of membrane distillation and ion-exchange manganese oxide for recovery of water and lithium from seawater. *Chemical Engineering Journal*. 396(May):125386. doi:10.1016/j.cej.2020.125386.
- Setiawan FA, Rahayuningsih E, Petrus HTBM, Nurpratama MI, Perdana I. 2019a. Kinetics of silica precipitation in geothermal brine with seeds addition: minimizing silica scaling in a cold re-injection system. *Geothermal Energy*. 7(1). doi:10.1186/s40517-019-0138-3.
- Setiawan H, Petrus HTBM, Perdana I. 2019b. Reaction kinetics modeling for lithium and cobalt recovery from spent lithium-ion batteries using acetic acid. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 26(1):98–107. doi:10.1007/s12613-019-1713-0.
- Siekierka A, Tomaszewska B, Bryjak M. 2018. Lithium capturing from geothermal water by hybrid capacitive deionization. *Desalination*. 436(February 2018):8–14. doi:10.1016/j.desal.2018.02.003.
- Sujoto VSH, Sutijan, Astuti W, Mufakhir FR, Petrus HTBM. 2021. Lithium recovery from synthetic geothermal brine using electrodialysis method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 882(1):012003. doi:10.1088/1755-1315/882/1/012003.
- Sujoto VSH, Sutijan, Astuti W, Sumardi S, Louis ISY, Petrus HTBM. 2022. Effect of Operating Conditions on Lithium Recovery from Synthetic Geothermal Brine Using Electrodialysis Method. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 8(1):274–287. doi:10.1007/s40831-021-00488-3.
- Sutijan S, Wahyudi S, Ismail MF, Mustika PCB, Astuti W, Praseptya A, Petrus HTBM. 2022. Forward osmosis to concentrate lithium from brine: the effect of operating conditions

- (pH and temperature). *International Journal of Technology*. 13(1):136. doi:[10.14716/ijtech.v13i1.4371](https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i1.4371).
- Zhang Y, Peng Y, Ji S, Li Z, Chen P. 2015. Review of thermal efficiency and heat recycling in membrane distillation processes. *Desalination*. 367:223–239. doi:[10.1016/j.desal.2015.04.013](https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.04.013).
- Zhao K, Heinzl W, Wenzel M, Büttner S, Bollen F, Lange G, Heinzl S, Sarda N. 2013. Experimental study of the memsys vacuum-multi-effect-membrane-distillation (V-MEMD) module. *Desalination*. 323:150–160. doi:[10.1016/j.desal.2012.12.003](https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.12.003).