JURNAL INTEGRASI PROSES

Website: http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip

Submitted : 13 March 2025 ***Revised : 2 May 2025*** ***Accepted : 26 May 2025***

PEMISAHAN ION Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} DARI BITTERN DENGAN NANOFILTRASI UNTUK PRODUKSI GARAM KONSUMSI

Putri Dwi Berliana*, Amelia Puspita Sari, Ely Kurniati
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, 60294, Indonesia
*Email: berlianaaputrii02@gmail.com

Abstrak

Produksi garam menghasilkan *bittern* sebagai produk samping yang masih mengandung mineral berharga, termasuk natrium klorida (NaCl). Kadar NaCl dalam bittern dari PT Garam Dua Musim Lamongan mencapai 456.620 ppm, sehingga masih layak untuk diolah kembali. Namun, keberadaan pengotor seperti ion kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}) membatasi pemanfaatannya secara langsung. Kurangnya pemanfaatan bittern menyebabkan potensi mineral yang terkandung di dalamnya belum termanfaatkan secara optimal. Jika bittern dibuang langsung kembali ke laut tanpa melalui proses pengolahan, hal ini berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, seperti hipersalinitas, terganggunya keseimbangan ekosistem laut, serta perubahan komposisi ionik air laut yang dapat berdampak negatif terhadap biota akuatik. Oleh karena itu, pengelolaan bittern menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak ekologis serta mendukung pemanfaatannya sebagai sumber senyawa bernilai tambah. Dalam upaya mengurangi limbah cair serta meningkatkan nilai ekonomi bittern, pemurnian menggunakan nanofiltrasi dapat diterapkan. Membran nanofiltrasi mampu memisahkan bittern dari padatan terlarut, bakteri, virus, serta ion-ion multivalen seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-}. Penelitian ini mengolah bittern menggunakan membran nanofiltrasi berukuran pori 0,001 µm untuk meningkatkan kemurnian garam. Metode ini dilakukan dengan menggunakan dua kondisi operasi yang divariasikan, yaitu tekanan nanofiltrasi 4, 5, 6, 7, dan 8 atm, dan waktu kontak 40, 60, 80, 100, dan 120 menit. Hasil menunjukkan bahwa pada tekanan 8 atm dan waktu operasi 120 menit, persentase rejeksi ion mencapai 71,77% dengan fraksi massa garam sebesar 84,35%. Nilai ini masih di bawah standar mutu SNI 4435:2017 kualitas K3 sebesar 85%, sehingga diperlukan optimasi lebih lanjut agar produk yang dihasilkan memiliki kualitas lebih baik.

Kata Kunci: Bittern; Membran nanofiltrasi; NaCl; Pemurnian garam

Abstract

Salt production produces bittern as a by-product that contains valuable minerals, including NaCl. The NaCl content in the bittern obtained from PT Garam Dua Musim Lamongan reaches 456,620 ppm, thus suitable for recovery. However, impurities such as Ca^{2+}, Mg^{2+}, and SO_4^{2-} limit its direct utilisation. The lack of utilisation of bittern causes the potential of the minerals contained in it to not be optimally utilised. Bittern, as liquid waste, if discharged directly into the sea without processing, can cause hyper salinity, disrupt marine life, and change the ion composition of seawater. To reduce the liquid waste produced and increase the economic value of bittern, a purification technique using a nanofiltration membrane can be applied. The nanofiltration membrane can separate bittern from dissolved solids, bacteria, viruses, and multivalent ions such as Ca^{2+}, Mg^{2+}, and SO_4^{2-}. This study processed bittern using a nanofiltration membrane with a pore size of 0.001 µm to increase the purity of the salt. This method uses two varied operating conditions: the pressure of the nanofiltration of 4, 5, 6, 7, and 8 atm, and contact time of 40, 60, 80, 100, and 120 minutes. The results showed that at a pressure of 8 atm and an operating time of 120 minutes, the %ion rejection reached 71.77% with a salt mass fraction of 84.35%. This value is still below the SNI 4435:2017 standard K3 grade, which is 85%, so further optimisation is needed to improve its quality.

***Keywords**: Bittern; NaCl; Nanofiltration membrane; Salt purification*

1. PENDAHULUAN

Industri garam memiliki potensi besar untuk berkembang, namun produksinya masih dipengaruhi faktor musim. Hal ini menyebabkan kebutuhan garam nasional belum terpenuhi secara optimal, dengan impor mencapai 2,8 juta ton pada tahun 2023 (BPS, 2023). Dalam proses produksi garam, dihasilkan limbah cair bernama bittern, yaitu sisa larutan yang tidak mengkristal setelah penguapan air laut. Bittern merupakan cairan kental dengan komposisi sekitar 35% NaCl dan tingkat kepekatan ±30°Be. Kandungan mineral utamanya meliputi Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-} (Mahatmanti et al., 2021).

Sebagian besar limbah bittern yang dihasilkan dari proses produksi garam masih dibuang langsung ke perairan laut tanpa pengolahan yang memadai. Hal ini berpotensi menyebabkan peningkatan salinitas (hipersalinitas) serta mengganggu keseimbangan ionik dan kimiawi di lingkungan laut, yang dapat berdampak negatif terhadap ekosistem dan organisme akuatik (Darwis et al., 2022). Padahal, bittern masih bisa dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan garam rekristalisasi. Untuk menghasilkan garam dengan kualitas tinggi, pengotor dalam bittern perlu dipisahkan karena dapat mempengaruhi rasa, warna, dan tekstur produk. Pemurnian bertujuan meningkatkan kadar NaCl agar sesuai standar garam konsumsi beryodium kualitas K1 berdasarkan SNI 4435:2017, yaitu minimal 94% NaCl. Oleh karena itu, pengolahan bittern menjadi garam murni menjadi langkah strategis dalam mengurangi limbah dan memenuhi kebutuhan garam nasional.

Nanofiltrasi merupakan teknologi pemisahan yang unggul karena memiliki konsumsi energi rendah, proses yang lebih ringkas, dan efisiensi tinggi dalam memisahkan ion-ion pengotor seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-}, sehingga dapat meningkatkan kualitas produk akhir (Kedang, 2019). Membran tipe NF-270 berbahan poliamida juga memiliki keunggulan operasional, yakni tahan terhadap berbagai rentang pH dan suhu, serta bersifat hidrofilik yang membantu mencegah *fouling* (Christy et al., 2015). Dibandingkan metode lain seperti *ion exchange*, elektrodialisis, distilasi fraksinasi, dan elektroforesis, nanofiltrasi lebih sederhana dan ramah energi. Tujuan utama dari proses pemisahan ini adalah untuk memperoleh garam murni dengan kadar NaCl tinggi. Pengotor dalam bittern dapat menurunkan mutu garam karena mempengaruhi warna, rasa, dan tekstur, sehingga penghilangannya penting untuk menghasilkan produk sesuai standar konsumsi.

Penelitian sebelumnya telah mengkaji berbagai metode pemisahan ion dalam bittern, namun masing-masing memiliki fokus yang berbeda. Ji et al. (2017) menitikberatkan pada pemisahan magnesium dan lithium dari brine dengan rasio Mg/Li tinggi untuk keperluan ekstraksi logam, bukan untuk produksi garam. Morgante et al. (2024) mengevaluasi nanofiltrasi dalam skema pemulihan magnesium dengan pendekatan teknis dan ekonomi, bukan pada kualitas hasil NaCl. Sementara itu, Hapsari (2012) menggunakan elektrodialisis untuk memisahkan ion Na^+ dan Mg^{2+} dari bittern, tetapi tidak berfokus pada pemanfaatan hasilnya untuk produksi garam berkualitas. Keterbaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan bittern sebagai bahan baku utama untuk menghasilkan garam berkualitas tinggi dengan memanfaatkan teknologi nanofiltrasi yang dioptimalkan secara operasional (tekanan dan waktu), untuk mengurangi ion pengotor seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-}. Selain itu, penelitian ini mengacu langsung pada pencapaian standar mutu garam konsumsi menurut SNI 4435:2017, menjadikannya lebih aplikatif dan spesifik dibanding penelitian-penelitian sebelumnya.

Adanya proses pengolahan kembali bittern di Indonesia bisa menjadi solusi untuk mengatasi kebutuhan garam yang terus meningkat dengan memanfaatkan bittern untuk diolah menjadi garam berkualitas tinggi, mengurangi limbah, dan meningkatkan nilai ekonomi.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan adalah larutan *bittern* 32°Be dari PT Garam Dua Musim di Dusun Wedung, Desa Sedayulawas, Kecamatan Brondong, Kabupaten Lamongan. Bahan lain yang dipakai adalah akuades yang dibeli di toko bahan kimia di Surabaya, Jawa Timur.

Membran yang digunakan adalah membran nanofiltrasi NF 1812-150 yang diproduksi oleh PT Indotara Persada.

Tabel 1. Karakteristik membran NF 1812-150

No.	Karakteristik	NF 1812-150
1	Material	*Polyamide* (PA)
2	Tipe membran	*Thin-film Composite*
3	Ukuran pori	0,001 μm
4	Luas permukaan	0,36 m^2
5	Laju alir	7,57 L/menit
6	Toleransi pH	3-10
7	Tekanan maks.	21 atm
8	Temperatur maks.	45°C

2.2 Prosedur kerja

Penelitian dilakukan di Laboratorium Limbah Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Sains, UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya. Tahapan penelitian dibagi menjadi tiga, yaitu tahap persiapan bahan baku, filtrasi, dan kristalisasi.

2.2.1 Tahap persiapan bahan baku

Pada tahap persiapan bahan baku, larutan bittern terlebih dahulu dianalisis kandungan *total dissolved solids* (TDS) menggunakan metode gravimetri. Selanjutnya, dilakukan analisis komposisi ionik secara kuantitatif, meliputi ion Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-}, dengan menggunakan metode *atomic absorption spectroscopy* (AAS), titrimetri, dan turbidimetri. Setelah proses analisis, larutan bittern disimpan dalam tangki penampung umpan untuk tahap pemrosesan berikutnya.

2.2.2 Tahap filtrasi

Pada tahap filtrasi, dilakukan proses pemisahan ion Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-}. Sebanyak 5 Liter larutan bittern (pH 5,5; 32 °C) difiltrasi awal menggunakan membran mikrofiltrasi 1 µm untuk menghilangkan partikel tersuspensi. Filtrat dialirkan dengan laju 5,2 L/menit ke unit nanofiltrasi berkapasitas 150 galon (pori 0,001 µm). Proses dijalankan pada tekanan 4–8 atm selama 40–120 menit sesuai variasi. Permeat ditampung selama 5 menit dan konsentrat disirkulasi ulang selama 20 detik. Analisis dilakukan terhadap permeat dan konsentrat menggunakan TDS, titrimetri, dan turbidimetri.

2.2.3 Tahap kristalisasi

Tahap terakhir yaitu proses kristalisasi dari *permeat* hasil filtrasi membran nanofiltrasi yang memiliki nilai TDS dan ion Ca^{2+}, Mg^{2+} dan SO_4^{2-} terendah. Bittern dimasukkan ke gelas beaker dan diaduk 200 rpm selama ±1 jam menggunakan *hotplate stirrer*. Kristal disaring sehingga didapatkan filtrat (*mother liquor)* dan residu (kristal basah). Residu dikeringkan di oven pada suhu 100°C selama 1 jam. Kadar NaCl kristal kering diuji sesuai SNI 4435:2017 dengan metode ADBK (atas dasar basis kering).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Kandungan Bittern

Tabel 1 menunjukkan hasil uji laboratorium kandungan ion Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Na^+, dan Cl^- yang terdapat pada larutan *bittern*. Konsentrasi ion yang tinggi dalam larutan bittern menyebabkan peningkatan tekanan osmotik. Oleh karena itu, semakin tinggi konsentrasi ion dalam umpan, semakin besar tekanan osmotik yang harus diatasi. Hal ini berdampak langsung pada kebutuhan tekanan operasi sistem, yang harus jauh lebih tinggi untuk mendorong larutan bittern melewati membran secara efektif.

Tabel 1. Hasil analisis kadar ion Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Na^+, dan Cl^- pada larutan *bittern*

No.	Parameter	Hasil (mg/L)
1	Natrium (Na^+)	12.067,5
2	Klorida (Cl^-)	235.000
3	Kalsium (Ca^{2+})	3.619,2
4	Magnesium (Mg^{2+})	101.170,8
5	Sulfat (SO_4^{2-})	99.500
6	Zat Padat Terlarut (TDS)	456.620

3.2 Analisis Persentase Rejeksi Bittern

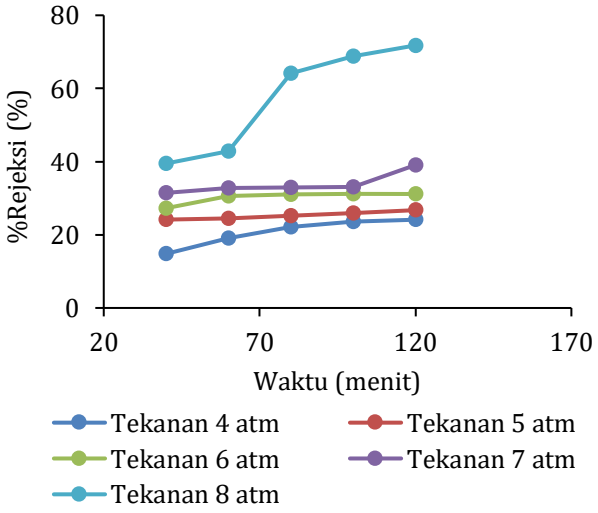
Dari Tabel 2 dapat diketahui waktu dan tekanan mempengaruhi nilai TDS *permeat*, di mana semakin semakin lama waktu operasi dan tinggi tekanan nilai TDS *permeat* semakin rendah. Hal ini dapat mempengaruhi nilai persentase rejeksi membran nanofiltrasi. TDS *permeat* yang semakin rendah mengakibatkan nilai persentase rejeksi meningkat. Pada tekanan 8 atm dan waktu 120 menit diperoleh kadar garam tertinggi (84,35%) dibandingkan dengan kondisi lainnya, maka ini menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut memainkan peran utama dalam mencapai hasil yang optimal. Meskipun meningkatkan tekanan dan waktu dapat meningkatkan persentase rejeksi dan kemurnian garam, peningkatan tekanan juga akan mempengaruhi biaya operasional, seperti konsumsi energi dan kebutuhan perawatan membran yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pengoptimalan tekanan dan waktu operasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara hasil yang diperoleh dan biaya yang dikeluarkan untuk menjaga efisiensi ekonomis dari proses nanofiltrasi.

Tabel 2. Pengaruh waktu (menit) dan tekanan (atm) terhadap nilai persentase rejeksi membran nanofiltrasi

Tekanan (P)	Waktu (t)	Persentase Rejeksi (%)
4	40	14,8001
	60	19,0706
	80	22,0928
	100	23,6696
	120	24,1251
5	40	24,1514
	60	24,5149
	80	25,2595
	100	25,8727
	120	26,7421
6	40	27,2699
	60	30,6469
	80	31,0105
	100	31,1462
	120	31,1550
7	40	31,4572
	60	32,7537
	80	33,0034
	100	33,0954
	120	39,0697
8	40	39,4858
	60	42,7971
	80	64,1365
	100	68,8056
	120	71,7708

Perhitungan nilai persentase rejeksi membran menggunakan data TDS sebelum dan sesudah proses filtrasi dengan membran nanofiltrasi. Gambar 1 menunjukkan hasil persentase rejeksi tertinggi diperoleh pada kondisi tekanan 8 atm dan waktu operasi membran nanofiltrasi 120 menit yaitu sebesar 71,7708 %, sedangkan persentase rejeksi terendah diperoleh pada kondisi tekanan 4 atm dan waktu operasi membran nanofiltrasi 40 menit yaitu sebesar 14,8001%. Berdasarkan Gambar 1 diketahui hubungan antara waktu dan tekanan terhadap persentase rejeksi adalah berbanding lurus. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu operasi dan tinggi tekanan, nilai TDS *permeat* semakin rendah. TDS *permeat* yang semakin rendah mengakibatkan nilai persentase rejeksi meningkat. Pada tekanan yang lebih tinggi, lebih banyak larutan bittern yang akan dipaksa melewati membran, tetapi molekul terlarut atau ion besar akan lebih sulit menembus pori-pori kecil membran,

sehingga persentase rejeksi membran nanofiltrasi meningkat. Menurut penelitian Hao et al. (2020) dalam membran nanofiltrasi, penurunan TDS menunjukkan kemampuan membran untuk menolak lebih banyak zat terlarut terutama garam sehingga dapat meningkatkan persentase rejeksi membran. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Amalia et al. (2016), yang menggunakan membran nanofiltrasi tipe NF99 dengan mekanisme pemisahan melalui mekanisme penyaringan serta interaksi elektrostatik antara muatan membran dan larutan, diperoleh nilai persentase rejeksi berdasarkan TDS sebesar 79%. Nilai tersebut sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan hasil penelitian ini. Perbedaan tersebut dapat dikaitkan dengan jenis larutan umpan yang digunakan. Amalia et al. (2016) menggunakan limbah lindi sebagai umpan, sedangkan penelitian ini menggunakan bittern yang memiliki konsentrasi ion yang jauh lebih tinggi. Bittern, dengan kandungan ion multivalen yang lebih tinggi, dapat menyebabkan interaksi ion yang lebih kompleks antara membran dan larutan, yang dapat mempengaruhi proses pemisahan. Tekanan osmotik yang lebih tinggi pada bittern juga memerlukan tekanan yang lebih besar untuk mengatasi hambatan osmosis, yang dapat mempengaruhi laju permeasi dan persentase rejeksi. Selain itu, konsentrasi padatan terlarut (TDS) yang lebih tinggi pada bittern dibandingkan limbah lindi juga bisa memengaruhi kinerja membran nanofiltrasi, karena meningkatkan beban membran dalam memisahkan ion-ion yang lebih padat.



Gambar 1. Pengaruh waktu (menit) dan tekanan (atm) terhadap nilai persentase rejeksi membran nanofiltrasi.

3.3 Analisis Persentase Rejeksi Ion Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} dan SO_4^{2-} Pada Membran Nanofiltrasi

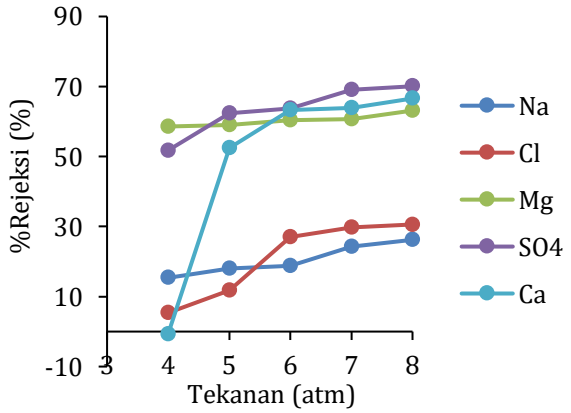
Tabel 3 menunjukkan persentase rejeksi ion Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} dan SO_4^{2-} di mana nilai persentase rejeksi ion monovalen lebih rendah dibandingkan divalen. Hal ini dikarenakan ion monovalen seperti natrium (Na^+) atau klorida (Cl^-) memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan dengan ion divalen kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}). Ukuran pori membran nanofiltrasi biasanya berada dalam rentang 0,001–0,01 µm sehingga ion yang lebih besar cenderung ditolak lebih efektif dan ion monovalen yang lebih kecil lebih mudah melewati pori-pori membran. Menurut Sari et al. (2022), membran nanofiltrasi pada dasarnya bermuatan negatif, muatan membran yang negatif menyebabkan ion positif (seperti Na^+) lebih mudah melewati membran, sementara ion multivalen dengan muatan lebih besar (seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}) akan lebih terhambat karena interaksi elektrostatik yang lebih kuat dengan membran.

Tabel 3. Analisis persentase rejeksi ion Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} dan SO_4^{2-} pada membran nanofiltrasi

Parameter	Tekanan (P)	Persentase Rejeksi (%)
Ca^{2+}	4	-0,6576
	5	52,5033
	6	63,3400
	7	63,8732
	8	66,5810
Mg^{2+}	4	58,5711
	5	58,9585
	6	60,4400
	7	60,6438
	8	63,1334
SO_4^{2-}	4	51,7608
	5	62,2864
	6	63,7980
	7	69,0141
	8	70,0613
Na^+	4	15,3511
	5	17,9739
	6	18,8216
	7	24,3132
	8	26,2084
Cl^-	4	5,3506
	5	11,8277
	6	27,0803
	7	29,6920
	8	30,5872

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara tekanan terhadap hasil persentase rejeksi. Perhitungan nilai persentase rejeksi menggunakan data konsentrasi sebelum dan sesudah proses filtrasi. Nilai persentase rejeksi ion monovalen lebih rendah dibandingkan nilai persentase rejeksi divalen. Pada parameter Na^+, diperoleh persentase rejeksi tertinggi sebesar 26,2084%. Pada parameter Cl^-, diperoleh persentase rejeksi tertinggi sebesar 30,5872 %. Ion monovalen seperti Na^+ dan Cl^- memiliki persentase rejeksi yang lebih rendah dibandingkan dengan ion divalen. Menurut penelitian yang dilakukan Baker (2012) membran nanofiltrasi memiliki persentase rejeksi NaCl sebesar 20-80%. Pada parameter Ca^{2+}, diperoleh persentase rejeksi tertinggi sebesar 63,1334%. Namun pada tekanan 4 atm, Ca^{2+} mengalami kenaikan konsentrasi sehingga mengakibatkan nilai persentase rejeksi minus. Peningkatan konsentrasi ini diakibatkan pada proses pencucian membran, di mana air kran

mengandung kalsium dan mineral lain, sehingga sebagian kalsium dapat terserap atau menempel di membran dan kemudian terlepas selama proses filtrasi dan meningkatkan konsentrasi Ca^{2+} pada *permeat*. Peningkatan konsentrasi ini berkaitan dengan keberadaan sisa ion kalsium yang sebelumnya teradsorpsi pada permukaan membran selama proses pencucian menggunakan air kran. Menurut PDAM Surya Sembada, air keran di Surabaya memiliki nilai total padatan terlarut (TDS) sekitar 288 mg/L, yang menunjukkan kandungan mineral, termasuk kalsium, dalam jumlah yang cukup signifikan. Ketika proses filtrasi dimulai kembali, ion Ca^{2+} yang menempel pada permukaan membran kemungkinan mengalami desorpsi dan terbawa aliran permeat. Hal ini menyebabkan peningkatan konsentrasi kalsium pada sisi permeat.



Gambar 2. Pengaruh tekanan (atm) pada setiap parameter terhadap nilai persentase rejeksi membran nanofiltrasi

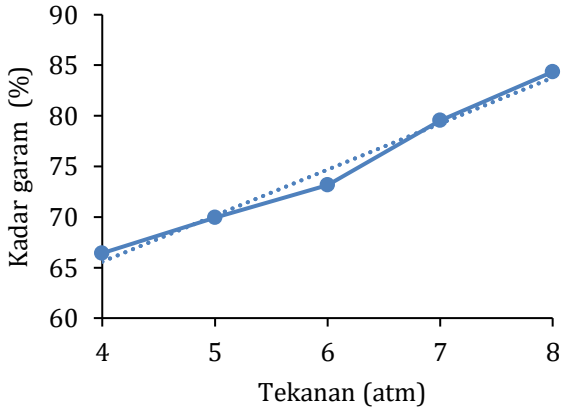
Pada parameter Mg^{2+}, diperoleh persentase rejeksi tertinggi sebesar 63,1334 %. Pada parameter SO_4^{2-}, diperoleh persentase rejeksi tertinggi sebesar 70,0613%. persentase rejeksi membran nanofiltrasi untuk memisahkan Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-} sudah cukup tinggi, tetapi mungkin perlu ditingkatkan untuk mencapai persentase rejeksi yang lebih baik dalam proses pemisahan. persentase rejeksi membran nanofiltrasi dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kapasitas membran serta ukuran permukaan membran (Suhalim et al., 2022). Jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Hao et al. (2020), membran nanofiltrasi tersebut dimodifikasi dengan pembentukan lapisan *interlayer in situ* menunjukkan peningkatan permeabilitas dan selektivitas ion secara signifikan. Membran tersebut mampu menahan ion-ion pengotor seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-} dengan efisiensi hingga 99%, hasil ini jauh lebih tinggi dibandingkan penelitian ini.

3.4 Analisis Kadar Garam dari *Bittern*

Salah satu hasil persentase rejeksi terbaik dari setiap tekanan dilakukan uji kadar garam konsumsi beryodium atas dasar berat keringnya. Hasil tersebut menunjukkan adanya peningkatan kadar NaCl seiring dengan peningkatan tekanan. Tekanan yang digunakan dalam percobaan adalah 4, 5, 6, 7, dan 8 atm, dan kadar fraksi massa NaCl (%) yang dihasilkan berturut-turut adalah 69,42%, 69,93%, 73,13%, 79,56%, dan 84,35%. Pada tekanan 8 atm, fraksi massa NaCl meningkat hingga 84,35%.

Tabel 4. Analisis kadar garam bittern

No.	Tekanan (atm)	Kadar ADBK (%)
1.	4	66,42
2.	5	69,93
3.	6	73,13
4.	7	79,56
5.	8	84,35



Gambar 3. Pengaruh tekanan (atm) pada kadar garam

Dari Gambar 3 dapat diketahui hubungan antara tekanan dengan kadar garam adalah berbanding lurus. Tingginya nilai kadar yang diperoleh sama dengan tingginya persentase rejeksi. Semakin tinggi persentase rejeksi yang diperoleh maka kadar garam yang didapat juga akan semakin tinggi. Kadar garam tertinggi sebesar 84,35 % yaitu pada variasi tekanan 8 atm. Peningkatan tekanan berpengaruh terhadap peningkatan kadar garam, sehingga untuk meningkatkan kadar garam dapat mengubah tekanan operasi yang lebih tinggi. Namun, perlu diperhatikan bahwa terdapat batas aman tekanan operasi yang tidak boleh dilampaui untuk menjaga integritas sistem dan kinerja membran. Untuk mengoptimalkan kualitas garam mencapai standar SNI tanpa melampaui batas tekanan operasi aman, pada membran nanofiltrasi dapat dilakukan modifikasi perlakuan awal dengan penambahan bioflokulan Zeoturb. Selain itu, untuk meningkatkan kualitas garam dan mencapai standar SNI 4435:2017 tanpa meningkatkan tekanan berlebihan, beberapa strategi optimasi yang bisa diterapkan adalah dengan mengatur waktu operasi membran, menyesuaikan pH larutan, serta menggunakan perlakuan awal seperti sedimentasi atau ultrafiltrasi untuk mengurangi *fouling* dan meningkatkan efisiensi pemisahan.

Hasil kadar garam yang diperoleh mendekati kualitas kelas 3 menurut SNI 4435:2017 yang di mana kadar garam kualitas K3 minimal 85%. Jika dibandingkan dengan penelitian Gemati et al. (2013), pemurnian garam natrium klorida menggunakan metode rekristalisasi yang dimodifikasi melalui

penambahan flokulan seperti Na_2CO_3, NaOH, dan polialuminium klorida berhasil menghilangkan pengotor seperti ion Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan SO_4^{2-}. Hasil pemurnian tersebut menghasilkan kadar NaCl sebesar 98,53%, yang jauh lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian ini. Secara keekonomian, penggunaan nanofiltrasi memerlukan biaya operasional yang relatif tinggi, terutama pada tekanan >6 atm, karena konsumsi energi meningkat. Namun, peningkatan efisiensi rejeksi dan potensi ekstraksi ion bernilai ekonomi seperti Mg^{2+} dan SO_4^{2-} dapat memberikan nilai tambah yang menutupi biaya tersebut.

Secara keekonomian, teknologi membran nanofiltrasi memerlukan biaya operasional yang relatif tidak terlalu tinggi dibandingkan dengan membran *reverse osmosis* dikarenakan tekanan operasi membran nanofiltrasi yang lebih rendah, namun dapat menghasilkan garam berkualitas tinggi, sehingga proses nanofiltrasi masih layak secara ekonomi.

4. KESIMPULAN

Membran nanofiltrasi berpotensi mengurangi kandungan pengotor bittern. Hal ini ditunjukkan dari hasil *permeat* yang mengalami penurunan signifikan dalam kandungan mineral, seperti, kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}) yaitu pada kondisi tekanan 8 atm dan waktu kontak selama 120 menit, didapat konsentrasi akhir *permeat* kalsium (Ca^{2+}) 1.209,5 mg/L; magnesium (Mg^{2+}) 37.298,2 mg/L; dan Sulfat (SO_4^{2-}) 29.789 mg/L. Penurunan TDS menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan dan lama waktu pada proses pemisahannya maka semakin tinggi pula persentase rejeksinya. Nilai fraksi massa garam yang terbentuk paling tinggi diperoleh sebesar 84,35%, di mana nilai ini belum memenuhi dari standar mutu garam bahan baku untuk garam konsumsi beriodium kualitas K3 menurut SNI 4435:2017 yaitu minimal 85%. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan jenis membran lain dan ukuran yang berbeda serta adanya penambahan flokulan basa untuk memurnikan larutan bittern yang mengandung impuritas Ca^{2+}, Mg^{2+} dan SO_4^{2-} agar proses pemisahan ionnya mendapatkan hasil yang lebih baik.

5. DAFTAR PUSTAKA

Amalia, D. A., Susanto, H., & Istirokhatun, T. (2016). Pengolahan limbah lindi menggunakan membran nanofiltrasi NF99. Jurnal Teknik Lingkungan, 5(2), 1–13.

Badan Pusat Statistika. (2023). Statistik sumber data perdagangan dan distribusi komoditi. Badan Pusat Statistika.

Badan Standarisasi Nasional. (2017). SNI garam industri aneka pangan. Badan Standarisasi Nasional.

Baker, R. W. (2012). Membrane technology and applications (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Christy, F. T., Susanto, H., & Sudarno, S. (2015). Pengolahan limbah lindi menggunakan membran nanofiltrasi NF270. Jurnal Teknik Lingkungan, 4(4), 8–14.

Darwis, A., Sembada, P. H., Taufany, F., & Altway, A. (2022). Pra desain pabrik magnesium hidroksida dari limbah tambak garam (bittern). Journal of Fundamentals and Applications of Chemical Engineering, 3(2), 44-49.

Gemati, A., Gunawan, G., & Khabibi, K. (2013). Pemurnian garam NaCl melalui metode rekristalisasi garam krosok dengan penambahan Na_2CO_3, NaOH, dan polialuminium klorida untuk penghilangan pengotor Ca2+ dan Mg2+. Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi, 16(2), 50–54.

Hao, Y., Li, Q., He, B., Liao, B., Li, X., Hu, M., … Li, J. (2020). An ultrahighly permeable-selective nanofiltration membrane mediated by an in situ formed interlayer. Journal of Materials Chemistry A, 8(10), 5275–5283.

Hapsari, N. (2012). Proses pemisahan ion natrium (Na) dan magnesium (Mg) dalam bittern (buangan) industri garam dengan membran elektrodialisis. Jurnal Teknik Kimia, 3(1), 192–198.

Ji, Z., Chen, Q., & Yuan, J. (2017). Separation of magnesium and lithium from high Mg/Li ratio brine by nanofiltration. Separation and Purification Technology, 172, 168–177.

Kedang, Y. I. (2019). Membran nanofiltrasi untuk aplikasi pemisah zat. Jurnal Saintek Lahan Kering, 2(1), 27-29.

Mahatmanti, F. W., Rahayu, E. F., Qoyyima, D., & Ningrum, A. N. K. (2021, June). Recovery of high purity sodium chloride from seawater bittern by precipitation-evaporation method. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1918, No. 3, p. 032023). IOP Publishing.

Morgante, C., Moghadamfar, T., Lopez, J., Cortina, J. L., & Tamburini, A. (2024). Evaluation of enhanced nanofiltration membranes for improving magnesium recovery schemes from seawater/brine: Integrating experimental performing data with a techno-economic assessment. Journal of Environmental Management, 360, 121192.

PT Garam Persero. (2022). Hilirisasi memperkuat pondasi bisnis. Laporan Tahunan.

Sari, S. A. P., Lesta, L., Syarmila, S., Hanum, Y., Mawaddah, Z., Jurian, J., & Nurhadini, N. (2022). A review of nanofiltration membrane technology to treat water problems. Stannum: Jurnal Sains dan Terapan Kimia, 4(2), 74-80.

Suhalim, N. S., Kasim, N., Mahmoudi, E., Shamsudin, I. J., Mohammad, A. W., Mohamed Zuki, F., & Jamari, N. L. A. (2022). Rejection mechanism of ionic solute removal by nanofiltration membranes: an overview. Nanomaterials, 12(3), 437.