

Optimalisasi *Single-Effect Evaporator* pada Proses Produksi Kalsium Klorida

Deden Eko Wiyono, Salma Auliarifkie Siregar, dan Eva Oktavia Ningrum
Departemen Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: eva-oktavia@chem-eng.its.ac.id

Abstrak—Tantangan utama dalam proses produksi CaCl_2 adalah penggunaan energi melalui konsumsi *steam* yang cukup tinggi saat proses pemekatan CaCl_2 melalui proses evaporasi. Pada suatu industri kalsium klorida, proses evaporasi dilakukan menggunakan *Single-Effect Evaporator* (SEE). Adapun *steam* dalam proses evaporasi disupply dari *utility* pada temperatur *steam* 134°C dan tekanan 1 atm dengan konsumsi *steam* mencapai 4,528 ton/jam. Oleh karena itu, efisiensi sangat diperlukan untuk mengurangi konsumsi *steam* untuk mendukung proses penghematan energi. Adapun proses efisiensi dan optimasi pada unit evaporator akan dilakukan melalui 2 skenario untuk mendapatkan hasil terbaik dalam proses efisiensi konsumsi *steam*. Skenario 1 untuk efisiensi dan optimasi unit evaporator dengan penambahan MVR dan skenario 2 untuk efisiensi dan optimasi unit evaporator melalui pre-heating bahan masuk dan penambahan MVR. Hasil paling optimal dicapai pada skenario 2 yang dapat menuruntukan beban konsumi *steam* mencapai 80% dari kondisi eksisting. Selain itu dari analisa ekonomi skenario 2 juga lebih menguntungkan perusahaan karena menurunkan nilai BEP, POT dan meningkatkan RoR yang cukup baik dibandingkan eksisting dan skenario 1. Sehingga dengan mempertimbangkan beberapa aspek analisis yang ada, skenario 2 merupakan langkah yang efisien dan optimasi unit evaporator pada proses produksi kalsium klorida (CaCl_2).

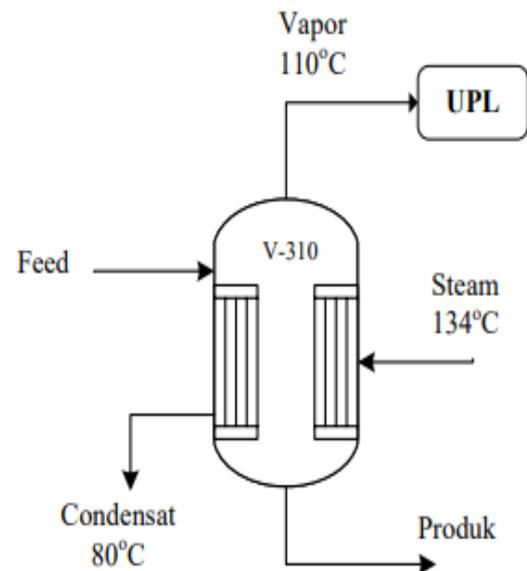
Kata Kunci—Evaporator MVR, Heater, Kalsium Klorida, Steam.

I. PENDAHULUAN

MELONJAKNYA biaya energi, tuntutan akan pemenuhan peraturan lingkungan, serta penemuan solusi yang lebih menguntungkan dan berkelanjutan dalam industri proses telah menjadi pendorong untuk menjelajahi peluang efisiensi energi dalam mengurangi biaya energi selama beberapa dekade terakhir [1]. Hal sangat penting ini terutama dalam proses yang mengkonsumsi energi dalam jumlah besar. Pasalnya industri proses masih merupakan salah satu sektor produksi paling intensif energi yang menghasilkan limbah padat, cair, dan gas dalam jumlah cukup besar (sitasi). Salah satunya dalam industri proses produksi kalsium klorida (CaCl_2).

Kalsium klorida (CaCl_2) adalah garam anorganik, yang sangat mudah larut dalam air dan berbentuk higroskopis dalam keadaan padat [2]. Salah satu penggunaan kalsium klorida yang paling umum adalah untuk mencegah pembentukan es dan menghilangkan lapisan es. Selain itu, aplikasi CaCl_2 juga sering digunakan sebagai bahan tambahan pada semen untuk mengurangi masa waktu untuk mengeras guna meningkatkan kekuatan beton yang dihasilkan.

Aplikasi dari kalsium klorida lainnya adalah penggunaannya sebagai komponen campuran molten salts pada kawat nano silikon, produksi serbuk tungsten halus dan



Gambar 1. *Single-effect evaporator* pada kondisi eksisting.

CaCl_2 - larutan formik untuk pembuatan serat sutra pinal kering [3-5].

Dalam proses produksi CaCl_2 , terdapat beberapa bahan yang dapat digunakan seperti bahan baku alami berupa batu kapur (CaCO_3). Dalam proses produksi kalsium klorida dengan bahan baku batu kapur (CaCO_3) pada umumnya akan digunakan proses *limestone-hydrochloric acid* atau netralisasi [2].

Adapun proses produksi kalsium klorida meliputi beberapa proses meliputi tahap reaksi pembentukan CaCl_2 melalui reaktor asam dan netralisasi. Setelah itu produk dari proses netralisasi akan dipekatkan melalui proses evaporasi. Produk dari proses evaporasi kemudian akan dikristalisasi melalui unit *crystallizer* dan dikeringkan untuk mendapat produk akhir berupa padatan CaCl_2 90-95% .

Tantangan utama dalam proses produksi CaCl_2 adalah penggunaan energi melalui konsumsi *steam* yang cukup tinggi pada proses evaporasi tahap pemekatan CaCl_2 [6]. Oleh karena itu, efisiensi sangat diperlukan untuk mengurangi konsumsi *steam* untuk mendukung proses penghematan energi [7]. Pada suatu industri kalsium klorida, proses evaporasi dilakukan menggunakan *Single-Effect Evaporator* (SEE). Adapun *steam* dalam proses evaporasi disupply dari *utility* pada temperatur *steam* 134°C dan tekanan 1 atm dengan konsumsi *steam* mencapai 4,528 ton/jam.

Beberapa metode untuk mengurangi konsumsi energi dalam proses penguapan telah dipertimbangan seperti sistem *Multiple-Effect Evaporation* (MEE), sistem rekompresi uap, *Flashing of Condensates* (FC), dan pemanasan awal aliran

Tabel 1.
Komposisi Bahan Masuk Evaporator

Komponen	XF (%)	Input (Kg/jam)
CaCO ₃	0,17	11.254
MgCO ₃	0,0001	0.006
Impurities	0.001	0.046
H ₂ O	60.97%	4150.157
CaCl ₂	38.28%	2605.835
Ca(OH) ₂	0.58%	39.538
Mg(OH) ₂	0.0001%	0.008
Total	100%	6806.84

Tabel 2.
Perbandingan Tingkat Error Simulasi RKE dan Aspen

Parameter	Redlich-Kwong Equation	Simulasi Aspen Hysys	Tingkat Error (%)
Entalpi Bahan Masuk (H1) (x10 ⁶ KJ)	-45,791	-46,241	0.9815
Entalpi Bahan Keluar (H2) (x10 ⁶ KJ)	-45,242	-45,650	0.9015
Temperature Outlet (K)	460.0	472.95	2.7480

umpan dengan uap dan/atau kondensat [8-9].

Dalam sistem MEE, konsumsi *steam* ditekan melalui penggunaan kembali vapor hasil penguapan air dari evaporator efek 1 sebagai media pemanas untuk evaporator efek berikutnya. Hasilnya, konsumsi energi secara keseluruhan dapat dikurangi secara signifikan dan penghematan *steam* dapat ditingkatkan. Namun, biaya investasi akan meningkat ketika menambahkan efek evaporasi [10].

Di lain sisi, penggunaan *Single-Effect Evaporator* (SEE) dapat diintegrasikan dengan *Thermal Vapour Recompression* (TVR) yang kurang lebih sama hemat energinya dengan evaporator dua efek, namun dengan biaya yang jauh lebih rendah.

Selain itu, Sistem SEE dapat dikombinasikan pula dengan *Mechanical Vapour Recompression* (MVR) untuk meningkatkan *Heat Integration* (HI) dari sistem evaporator. Kebutuhan energi per kilogram air yang diuapkan dalam sistem SEE dengan MVR lebih kecil daripada sistem SEE dengan TVR. Namun, MVR membutuhkan investasi yang lebih besar untuk kompressor mekanik [11].

Dalam efisiensi dan optimasi proses ini akan dilakukan analisis dan studi lebih lanjut terkait efisiensi energi melalui optimasi penggunaan steam pada *Single-Effect Evaporator* (SEE) dengan menggunakan MVR. Analisis efisiensi energi akan dianalisa lebih lanjut melalui penggunaan *steam*, biaya energi, dan aspek ekonomi.

II. METODE OPTIMASI DAN EFISIENSI

Dalam optimasi dan efisiensi dalam proses produksi CaCl₂ terutama pada unit evaporasi, diawali dengan observasi dan studi literatur yang mengacu pada industri kalsium klorida. Studi literatur dilakukan untuk mengetahui permasalahan yang terjadi pada proses produksi kalsium klorida.

Selanjutnya, dilakukan identifikasi dan perumusan masalah pada evaporator dalam proses produksi kalsium klorida.

Tabel 3.
Perbandingan Efisiensi dan Optimasi Evaporator

Evaporator Eksisting	Skenario 1	Skenario 2
Konsumsi Steam Dari Utilitas Ton steam/Tahun		
35.860,639	11.175,120	72.211,41
Biaya Steam Per Tahun (Miliar)		
Rp9,653	Rp3,008	Rp1,943

Tabel 4.
Perbandingan Analisis Parameter BEP dan POT

Parameter	Eksisting	Skenario 1	Skenario 2
BEP (%)	42.94%	41.76%	36.92%
POT (Tahun)	2.34	2.13	1.81
RoR (%)	28%	32%	40%

Perhitungan neraca masa dan neraca energi dilakukan pada unit evaporasi kondisi eksisting. Selanjutnya, akan dilakukan evaluasi melalui beberapa tinjauan porses yang meliputi:

A. Aliran Umpan

Aliran umpan pada sistem evaporasi memiliki temperatur lebih rendah dibandingkan dengan temperatur pada sistem evaporasi. Hal ini menyebabkan konsumsi steam yang lebih untuk menaikkan temperature umpan sesuai kondisi operasi evaporator. Sehingga proses pre-heating aliran umpan perlu dilakukan sebelum memasuki proses evaporasi.

B. MVR

MVR mewakili peluang pemanfaatan kembali panas yang digunakan dalam sistem penguapan untuk menghilangkan atau mengurangi konsumsi uap melalui pemanfaatan kembali *vapor* sebagai produk samping dalam proses evaporasi.

Berdasarkan tinjauan tersebut, maka diusulkan dua skenario yang digunakan untuk efisiensi energi melalui pengurangan konsumsi *steam* pada unit evaporator. Adapun skenario yang diusulkann adalah sebagai berikut:

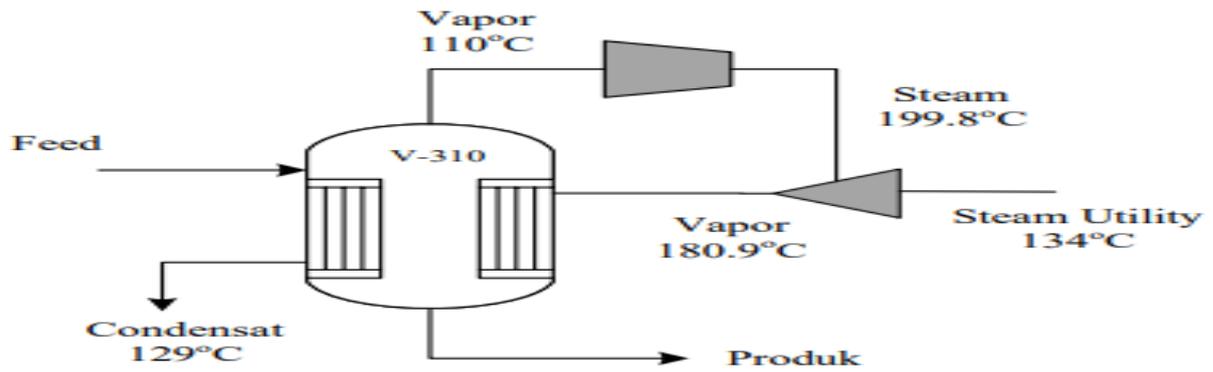
1) Skenario 1 untuk Efisiensi dan Optimasi Unit Evaporator dengan Penambahan MVR.

Pada skenario ini evaporator eksisting (V-310) akan ditambahkan unit MVR untuk memanfaatkan *vapor* sebagai suplai *steam* pada unit evaporator (V-310). Dalam proses analisis akan dilakukan perhitungan kompresi *vapor* melalui perhitungan dengan menggunakan *Redlich-Kwong Equation* dan pemodelan menggunakan Aspen Hysys

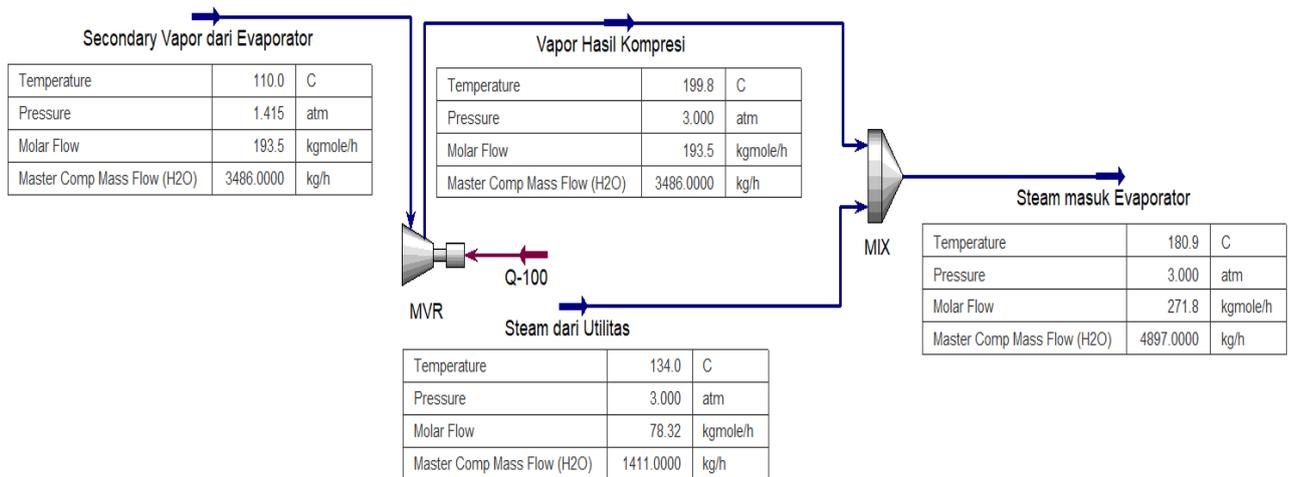
2) Skenario 2 untuk Efisiensi dan Optimasi Unit Evaporator Melalui Pre-Heating Bahan Masuk dan Penambahan MVR.

Pada skenario ini merupakan pendekatan lanjutan dari skenario 1. Dalam skenario 2 akan dilakukan perhitungan lanjutan terkait analisis pengurangan penggunaan *steam* dari utilitas setelah dilakukan proses *pre-heater* pada bahan masuk dengan menggunakan *steam condentas* dari evaporator. Dalam pemodelan proses *pre-heater* dilakukan melalui pemodelan aspen hysys.

Selanjutnya akan dilakukan analisis perhitungan neraca massa dan neraca energi untuk mengetahui tingkat konsumsi steam unit evaporator pasca efisiensi dan optimasi.



Gambar 2. Skema *single-effect evaporator* dengan MVR.



Gambar 3. Simulasi asnen hvsvs evaporator MVR.

Kemudian analisis pendukung akan dilakukan melalui analisis ekonomi dengan parameter *Break Event Point*, *Pay Out Periode*, dan biaya yang bisa pasca efisiensi dan optimasi proses pada unit evaporator.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Eksisting Unit Evaporasi pada Proses Produksi $CaCl_2$

Dalam industri proses kalsium klorida, penguapan merupakan langkah awal sebelum proses pembentukan kristal. Aliran umpan dari proses penguapan adalah suspensi $CaCl_2$ dengan komposisi *feed* ditunjukkan pada Tabel 1.

Pada kondisi eksisting umpan masuk memiliki temperatur $40^\circ C$. Dalam proses evaporasi sendiri umpan masuk akan dipekatkan hingga 70-80% sebelum memasuki proses kristalisasi.

Adapun evaporator eksisting dalam industri proses kalsium klorida merupakan jenis SEE yang memiliki temperatur operasi pada suhu $110^\circ C$ dengan tekanan 1,4 atm. Dalam proses evaporasi digunakan *steam* dari utilitas dengan suhu $134^\circ C$ pada tekanan 3 atm. Adapun skema pada unit evaporator ditunjukkan pada Gambar 1.

Berdasarkan data pada Gambar 1, tingkat konsumsi *steam* dari utilitas untuk proses evaporasi 6,8 ton *feed* mencapai 4,528 ton/jam. Produk samping dari proses evaporasi pada kondisi eksisting berupa *vapor* dengan temperatur $110^\circ C$ yang dialirkan ke unit pengolahan lanjut. Dalam 1 tahun produksi tingkat konsumsi *steam* unit evaporator mencapai

35.861 Ton *steam* dengan biaya produksi mencapai Rp 9,653 miliar dengan biaya per 1 kg *steam* adalah Rp269,19/Kg.

Sehingga proses efisiensi dan optimasi perlu dilakukan untuk mengurangi konsumsi *steam*.

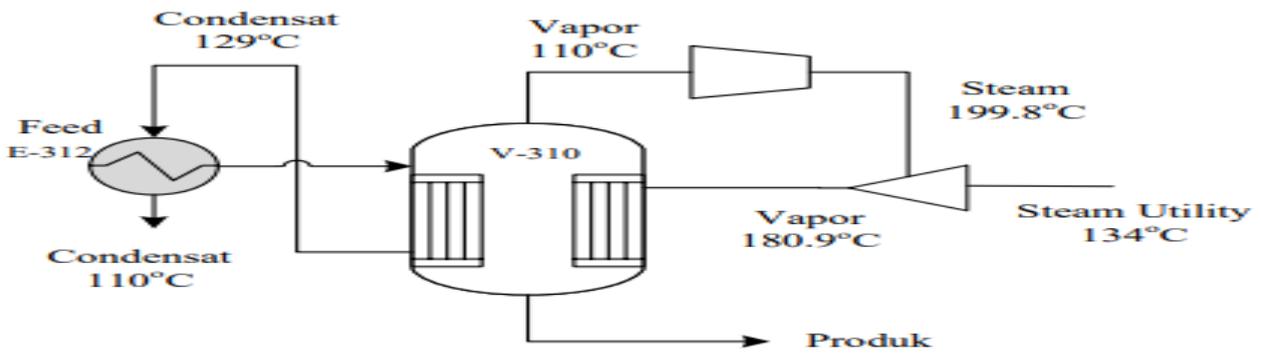
B. Efisiensi dan Optimasi Proses

Dalam proses efisiensi dan optimasi pada unit evaporator dilakukan melalui 2 skenario yang akan dianalisis untuk memberikan dampak yang optimal dalam proses efisiensi konsumsi *steam*. Adapun 2 skenario tersebut akan dijabarkan lebih lanjut sebagai berikut:

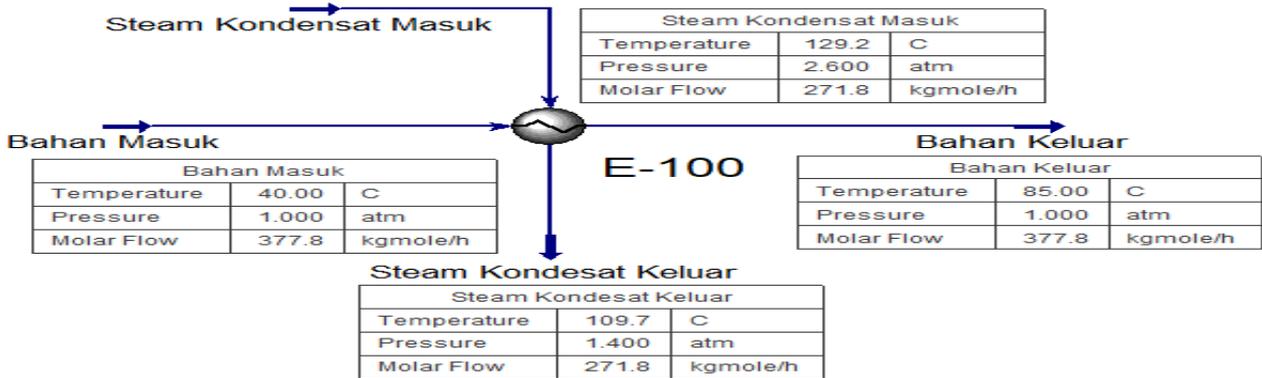
1) Skenario 1 : Efisiensi dan Optimasi Proses Unit Evaporasi dengan penambahan MVR

Pada skenario pertama, penggunaan MVR ditawarkan sebagai salah satu strategi dalam proses efisiensi dan optimasi konsumsi *steam* pada unit evaporator. MVR mewakili potensi pemanasan ulang yang umumnya digunakan dalam sistem penguapan untuk menghilangkan atau mengurangi konsumsi *steam* [6]. Gambar 2 menunjukkan proses MVR efek tunggal.

Berdasarkan Gambar 1 *vapor* yang dihasilkan dalam sistem evaporasi, tidak memiliki potensi energi yang cukup untuk digunakan kembali sebagai media pemanas dalam proses evaporasi. Berdasarkan hal tersebut, *vapor* sebagai produk samping dari proses evaporasi akan dikirim ke kompresor mekanis dan dikompresi ke tekanan dan suhu yang lebih tinggi (Gambar 2). Dalam proses ini, energi eksternal (biasanya listrik) diperlukan untuk kerja mekanis kompresor. Jumlah energi yang digunakan dalam proses



Gambar 4. Single-effect evaporator dengan pre-herater dan MVR.



Gambar 5. Simulasi aspen hysys evaporator MVR dan heater.

kompresi sangat kecil jika dibandingkan dengan potensi energi steam hasil kompresi.

Dalam skenario 1 perhitungan kompresi *secondary vapor* dilakukan menggunakan *Redlich-Kwong Equation* dan setelah itu dilakukan pemodelan menggunakan *Aspen Hysys*. Adapun *vapor* yang akan dikompresi memiliki massa 3,486 ton/jam dengan tekanan 1.4 atm pada suhu 110°C. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan *Redlich-Kwong Equation*, *secondary vapor* hasil kompresi memiliki suhu 186.8°C dengan tekanan 3 atm. Adapun berdasarkan pemodelan aspen hysys ditunjukkan pada Gambar 3, menunjukkan hasil kompresi *secondary vapor* memiliki suhu 199.8°C pada tekanan 3 atm.

Tingkat eror antara perhitungan *Redlich-Kwong Equation* dan pemodelan mencapai 0.9-2.7%. Adapun perbandingan data hasil simulasi dan perhitungan menggunakan *Redlich-Kwong Equation* ditunjukkan pada Tabel 2.

Dengan substitusi *vapor* hasil kompresi kedalam unit evaporator konsumsi steam dari utilitas dapat ditekan hingga 69% dari total kebutuhan steam unit evaporator eksisting atau sekitar 3,486 ton/jam. Dengan demikian terjadi proses penghematan biaya produksi steam mencapai Rp3,008 miliar/tahun.

2) Skenario 2 : Efisiensi dan Optimasi Proses Unit Evaporasi dengan Pre-heating dan penambahan MVR

Aliran umpan yang dimasukkan ke sistem evaporasi biasanya memiliki suhu yang lebih rendah jika dibandingkan dengan suhu sistem evaporasi. Guna mengurangi konsumsi energi dalam sistem evaporasi, aliran umpan dari proses sebelumnya harus dipanaskan terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam sistem evaporasi (Gambar 4) [6].

Pada skenario 2 untuk proses efisiensi dan dilakukan melalui pemanasan (*pre-heater*) bahan masuk sebelum

diproses pada unit evaporator. Dalam *pre-heating* pada skenario 2 akan mempertimbangkan *steam condensate* dari proses evaporasi sebaagi sumber panas pada proses *pre-heating*.

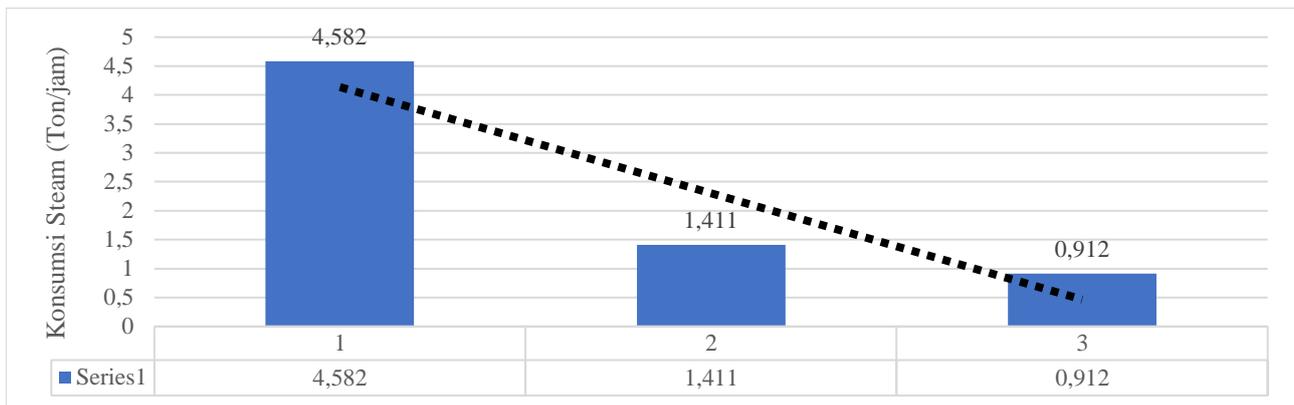
Proses *pre-heating* bahan masuk disimulasikan dengan menggunakan aspen hysys dengan desain sistem ditunjukkan pada Gambar 5, untuk mengetahui suhu outlet dari *steam condensate* yang digunakan guna menganalisis beban steam yang dibutuhkan. Dalam proses *pre-heating* akan dilakukan dengan *steam condensate* pada proses evaporasi yang memiliki temperatur 129°C dengan tekanan 3 atm. Adapun temperatur target *pre-heating* bahan masuk akan dinaik dari 40°C menjadi 85°C.

Massa steam yang dibutuhkan untuk proses *pre-heating* mencapai 406,3 kg/jam. Dengan *steam condensate* yang dihasilkan mencapai 3,486 ton/jam maka kebutuhan steam untuk proses *pre-heating* dapat disuplai dari *steam condensate*.

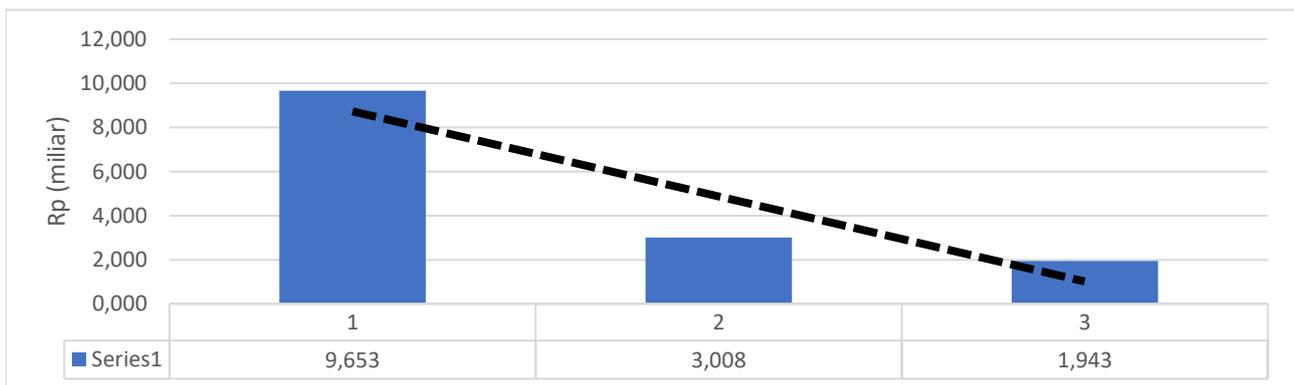
Proses *pre-heating* pada bahan masuk dengan cara menaikkan temperatur dari 40°C menjadi 85°C mampu mereduksi kebutuhan steam dari utilitas pada skenario 1 dari 1411 kg/jam menjadi 912 kg/jam (0.912 Ton/jam) atau 64.6% dari total kebutuhan steam pada skenario 1. Adapun biaya produksi steam pada skenario 2 mencapai Rp 1,943 miliar/tahun.

Adapun trend konsumsi steam pada kondisi eksisting, skenario 1, dan skenario 2 ditunjukkan pada Gambar 6.

Berdasarkan pada Gambar 6, proses efisiensi dan optimasi melalui skenario yang ditawarkan menunjukkan trend penurunan konsumsi steam yang signifikan. Hal ini terlihat dari beban konsumsi steam kondisi eksisting mencapai 4,528 ton/jam yang mampu direduksi cukup signifikan menjadi 1,411 ton/jam dengan skenario 1 dan 0,912 ton/jam melalui



Gambar 6. Trend konsumsi steam setelah efisiensi dan optimasi.



Gambar 7. Trend penurunan biaya produksi steam/tahun.

skenario 2. Dari data tersebut, menunjukkan bahwa skenario 2 merupakan yang paling menguntungkan dalam proses efisiensi dan optimasi konsumsi steam pada unit evaporator.

3) Perbandingan Aspek Ekonomi Kondisi Eksisting, Skenario 1, dan Skenario 2

Penghematan utilitas dari skenario yang telah ditawarkan, kemudian dianalisa menjadi keuntungan secara ekonomi yang dapat dicapai sebagai hasil efisiensi dan optimasi proses pada unit evaporator. Harga utilitas panas (steam) diterima sebesar Rp. 269.19/kg, dengan nilai *Gross Calorific Value* (GCV) mencapai 20083.8 Kj/kg dan efisiensi ketel uap sebesar 81%. Adapun hasil perhitungan biaya steam ditunjukkan pada Tabel 3 dan di tampilkan pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7 menunjukkan bahwa biaya produksi steam pada kondisi eksisting dapat ditekan cukup signifikan dari masing masing skenario. Pada skenario 1 mampu menekan biaya produksi steam hingga menjadi Rp 3,008 miliar/tahun dan skenario 2 mampu menekan biaya produksi steam hingga menjadi Rp 1,943 miliar/tahun.

Selain itu analisis ekonomi juga ditinjau dari parameter *Break Event Point* (BEP) dan *Pay Out Periode* (POT) dari masing masing kondisi baik eksisting, skenario 1, skenario 2. Adapun perbandingan analisis parameter BEP dan POT pada masing masing kondisi ditunjukkan pada Tabel 4 [11].

Berdasarkan pada Tabel 4, menunjukkan bahwa pada parameter BEP skenario 2 memiliki nilai BEP lebih rendah dibandingkan dengan skenario 1 dan eksisting dengan nilai 36.92%. Pada parameter POT skenario 2 juga memiliki nilai POT lebih rendah yang menunjukkan bahwa laju pengembalian *Fixed Capital Investment* (FCI) lebih cepat dari kondisi eksisting dan skenario 1 yakni pada angka 1.81 tahun. Parameter terakhir yakni *Rate of Return* (RoR)

skenario 2 memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan pada kondisi eksisting dan skenario 1 sebesar 40% yang menunjukkan bahwa tingkat pengembalian skenario 2 lebih cepat dari kondisi eksisting dan skenario 1.

IV. KESIMPULAN

Implementasi *Mechanical Vapor Recompressor* (MVR) dalam *Single-Effect Evaporator* (SEE) adalah untuk mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan secara signifikan. Vapor yang dihasilkan dalam proses evaporasi akan digunakan kembali sebagai *Mechanical Vapor Recompressor* (MVR) potensi energi untuk media pemanas dalam proses penguapan. Dalam optimasi proses efisiensi konsumsi steam, dilakukan 2 skenario yang akan dianalisis dengan hasil paling optimal pada skenario 2, dengan penggunaan *pre-heater* dan penambahan MVR dapat menghemat 80% dari konsumsi steam. Selain itu dari analisa ekonomi skenario 2 juga lebih menguntungkan perusahaan karena menurunkan nilai BEP, POT dan meningkatkan RoR yang cukup baik dibandingkan eksisting dan skenario 1. Sehingga dengan mempertimbangkan beberapa aspek analisis yang ada, skenario 2 merupakan langkah yang efisien dan optimasi unit evaporator pada proses produksi kalsium klorida (CaCl₂).

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Bogataj, J. J. Klemeš, and Z. Kravanja, "Fifty Years of Heat Integration: Pinch Analysis and Mathematical Programming," in *Handbook of Process Integration (PI) (Second Edition)*, 2nd ed., Czech Republic: Woodhead Publishing, 2023, pp. 73–99. doi: 10.1016/B978-0-12-823850-9.00020-7.

[2] W. M. Haynes, D. R. Lide, and T. J. Bruno, *CRC Handbook of*

- Chemistry and Physics*, 95th ed. New York: CRC Press, 2016. doi: 10.1201/9781315380476.
- [3] Y. Dong *et al.*, "Low-temperature molten-salt production of silicon nanowires by the electrochemical reduction of CaSiO₃," *Angew. Chemie*, vol. 129, no. 46, pp. 14645–14649, Nov. 2017, doi: 10.1002/ange.201707064.
- [4] D. Tang, W. Xiao, H. Yin, L. Tian, and D. Wang, "Production of fine tungsten powder by electrolytic reduction of solid CaWO₄ in molten salt," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 159, no. 6, pp. E139–E143, Jan. 2012, doi: 10.1149/2.113206jes.
- [5] X. Yue, F. Zhang, H. Wu, J. Ming, Z. Fan, and B. Zuo, "A novel route to prepare dry-spun silk fibers from CaCl₂-formic acid solution," *Mater. Lett.*, vol. 128, pp. 175–178, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.matlet.2014.04.116.
- [6] E. Ahmetović *et al.*, "Simultaneous optimisation and heat integration of evaporation systems including mechanical vapour recompression and background process," *Energy*, vol. 158, pp. 1160–1191, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.046.
- [7] P. E. Minton, "Evaporation technology," *Br. J. Psychiatry*, vol. 111, no. 479, pp. 1009–1010, 1965.
- [8] T. G. Walmsley, "A total site heat integration design method for integrated evaporation systems including vapour recompression," *J. Clean. Prod.*, vol. 136, pp. 111–118, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.044.
- [9] V. C. Onishi *et al.*, "Shale gas flowback water desalination: Single vs multiple-effect evaporation with vapor recompression cycle and thermal integration," *Desalination*, vol. 404, pp. 230–248, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.desal.2016.11.003.
- [10] Y. Jiang, L. Kang, and Y. Liu, "Simultaneous synthesis of a multiple-effect evaporation system with background process," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 133, pp. 79–89, May 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.02.037.
- [11] C. Ramirez, M. Patel, and K. Blok, "From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry," *Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1984–2004, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.energy.2005.10.014.