

# **PEMODELAN PROSES PRODUKSI METIL KLORIDA DARI METANOL DAN ASAM KLORIDA MENGGUNAKAN ASPEN HYSYS**

***PROCESS MODELING OF METHYL CHLORIDE SYNTHESIS FROM METHANOL AND HYDROGEN CHLORIDE ASPEN HYSYS***

**Uzli Fatul Jannah, Nasrul ZA\*, Meriatna, Zulnazri, Rozanna Dewi, Wiza Ulfa Fibarzi, Leni Maulinda**  
*Universitas Malikussaleh, Aceh Utara*

[nasrulza@unimal.ac.id](mailto:nasrulza@unimal.ac.id)

## **ABSTRAK**

Metil klorida digunakan sebagai bahan kimia untuk produksi berbagai produk industri yang penting. Aplikasinya yang luas terus meningkatkan permintaan pasar globalnya. Untuk memenuhi permintaan pasar global, maka penelitian ini difokuskan untuk mendesain sebuah model simulasi proses produksi metil klorida melalui hidroklorinasi metanol dengan upaya untuk meningkatkan efisiensi dari segi jumlah peralatan dan energi untuk mendapatkan kemurnian yang standar. Metode penelitian yang digunakan adalah metode pengembangan. Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan pemodelan proses produksi metil klorida dari metanol dan asam klorida menggunakan *software* aspen hysys V.11. Dengan menggunakan kondisi operasi yang sama tetapi memodifikasi platform penelitian untuk mendapatkan kemurnian yang sama, serta mengoptimalkan jumlah peralatan, mengoptimalkan energi untuk mendesain proses produksi untuk dapat mengurangi biaya produksi dan lebih ekonomis untuk pabrik. Hasil penelitian, model simulasi proses produksi metil klorida yang sudah dimodifikasi *flowsheet* proses produksinya, simulasi proses produksi metil klorida melalui hidroklorinasi metanol menggunakan 11 peralatan, analisis energi menggunakan aspen energi analyzer, peluang penghematan utilitas total 74,98% dapat menghemat 3405 kW panas yang tidakermanfaatkan dalam proses, dan hasil kemurnian produk metil klorida 99,33%. Asumsi dari sisi perspektif ekonomi banyak alat yang terbuang sehingga peluang *cost* produksi pabrik ini untuk kapital modal dasar pasti rendah, BEP semakin cepat dan perusahaan semakin cepat mendapatkan balik modal.

**Kata Kunci :** Efisiensi, Flowsheet, Kemurnian, Metil Klorida, dan Optimasi Energi

## **ABSTRACT**

*Methyl chloride is employed as a chemical intermediate in the manufacture of various essential industrial products. Its wide range of applications continues to drive the growth of global market demand. To address this demand, the present study focuses on designing a process simulation model for methyl chloride production via methanol hydrochlorination, with the objective of improving efficiency in terms of equipment utilization and energy consumption while ensuring the required product purity. The research methodology adopted is a developmental approach. The study was carried out by simulating the process of methyl chloride production from methanol and hydrogen chloride using aspen hysys V.11 software. Under identical operating conditions, the research framework was modified to achieve comparable purity while optimizing the number of unit operations and minimizing energy requirements, thereby reducing production costs and enhancing economic feasibility for industrial-scale implementation. The results indicate that the modified process simulation flowsheet for methyl chloride production via methanol hydrochlorination requires 11 unit operations. Energy analysis conducted using aspen energy analyzer reveals a total utility saving potential of 74.98%, equivalent to 3405 kW of recoverable heat that would otherwise be wasted in the process. The final product purity of methyl chloride obtained was 99.33%. From an economic standpoint, the reduction in redundant equipment translates into lower capital investment, a shorter break-even point (BEP), and a faster return on investment (ROI) for the manufacturing facility.*

**Kata Kunci :** Efficiency, Flowsheet, Purity, Methyl Chloride, and Energy Optimization

## PENDAHULUAN

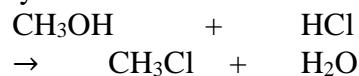
Metil klorida digunakan untuk bahan kimia produksi berbagai produk industri yang penting. Aplikasinya yang luas terus meningkatkan permintaan pasar globalnya. Untuk memenuhi permintaan pasar global, beberapa perusahaan mencoba meningkatkan kapasitas pabrik mereka yang ada dan beberapa akan membangun pabrik yang baru. Pabrik metil klorida yang ada di Indonesia masih sedikit sedangkan kebutuhan di dalam negeri sangat dibutuhkan, sehingga Indonesia banyak mengimpor metil klorida, dibandingkan eksportnya. Pendirian pabrik metil klorida diharapkan agar kebutuhan dalam negeri tercukupi dan mengurangi impor dari luar serta meningkatkan eksportnya. Pendirian pabrik ini dapat mendorong perkembangan industri kimia yang meningkatkan perekonomian, serta membuka lapangan kerja bagi masyarakat Indonesia serta bahan baku metal klorida ada di Indonesia.

Metil klorida atau nama lainnya *klorometana* adalah senyawa organik yang memiliki rumus  $\text{CH}_3\text{Cl}$ . Termasuk golongan gas yang tidak berwarna dan berbahaya dengan sifat mudah terbakar. Produksi metil klorida dapat dilakukan dengan proses klorinasi metana dan proses hidroklorinasi metanol. Metil klorida dibuat dengan cara mereaksikan metanol dengan asam klorida (Repko dan Lasley, 1979). Menurut Schmidt *et al.*, (2013), di antara kedua rute tersebut, hidroklorinasi metanol yang paling banyak digunakan di industri.

Dalam beberapa tahun terakhir, rute hidroklorinasi metanol untuk menghasilkan metil klorida menjadi

lebih penting dibandingkan dengan rute klorinasi metana karena metil klorida merupakan produk utama yang penting. Keuntungan dari proses ini adalah rendahnya biaya reaktan metanol dan kemudahan dalam penyimpanan dan transportasi. Kondisi dalam memilih metanol reaktan adalah harus memiliki kemurnian tinggi (99.9%) dan hidrogen klorida harus bersih, Pemilihan reaktan yang sangat murni akan memperpanjang umur katalis aluminium oksida. Dengan bantuan katalis, reaksi antara  $\text{CH}_3\text{OH}$  dan  $\text{HCl}$  menghasilkan metil klorida. Metanol dan uap  $\text{HCl}$  dalam jumlah yang sama direaksikan.

Reaksinya :



Untuk mengetahui suhu operasi terbaik untuk reaktor dan untuk mendapatkan hasil produk yang maksimal, maka dilakukan studi kasus. Dalam studi ini, suhu reaktor sebagai variabel bebas dan fraksi masa metil klorida ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) dalam aliran keluaran reaktor sebagai variabel terikat. Hasil terbaik menunjukkan bahwa suhu operasi ditemukan antara  $280^\circ\text{C}$  dan  $300^\circ\text{C}$ . Tren ini sesuai dengan nilai literatur (Rossberg *et al.*, 2000).

Dari penelitian Vikranth *et al.*, (2024), penulis melihat aspek ekonomi yang diperlukan cukup besar, jumlah peralatan yang berlebih, prosesnya kurang akurat. Maka penulis mencoba membuat desain ulang dengan pengurangan jumlah alat yang tidak diperlukan seperti alat-alat V-101, E-100, V-102, P-101, Mix-101, ADJ-1, ADJ-2, dan T-101.

Penelitian ini akan berfokus pada optimasi kondisi operasional seperti peralatan, penghematan energi, dan rasio bahan baku untuk mencapai hasil yang optimal dalam hal kualitas metil klorida yang dihasilkan sama dengan penelitian sebelumnya dan efisiensi proses.

Pada penelitian ini penulis menggunakan metode penelitian pengembangan sebagai acuan. Metode penelitian pengembangan dipilih karena dengan metode ini penulis dapat mengidentifikasi masalah, menguji berbagai solusi, dan mengembangkan proses yang baru atau yang sudah ada dengan tujuan mengoptimalkan desain dan operasi pabrik produksi metil klorida dengan mempertimbangkan efisiensi proses, biaya produksi, untuk mencapai kemurnian yang optimal.

Berdasarkan latar belakang di atas, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian terkait permodelan proses produksi metil klorida dari metanol dan asam klorida menggunakan aspen hysys.

## ALAT BAHAN DAN METODE

### Alat-alat

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Satu buah laptop Lenovo Core i5.
2. *Software Aspen Hysys V.11.*
3. *Software Microsoft Word 2016 Plus.*

### Bahan-bahan

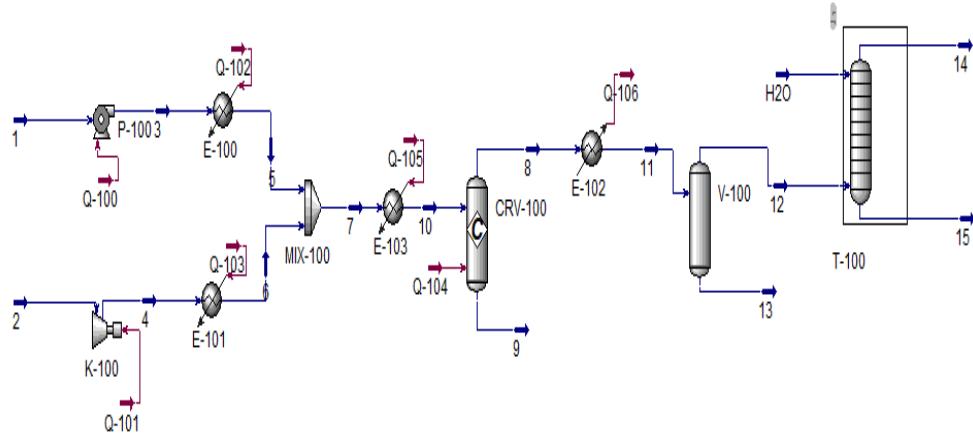
Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Metanol
2. Asam klorida

### Metode Penelitian

Adapun metode penelitian ini terdiri tiga tahapan, tahap yang pertama dalam penelitian ini adalah mereview penelitian pertama dari penelitian sebelumnya juga terjadi pemborosan penggunaan jumlah peralatan yang berlebih, prosesnya kurang akurat dan masih bias mengoptimasi energi yang dibutuhkan. Maka penulis mencoba membuat desain ulang dengan pengurangan jumlah alat yang tidak diperlukan seperti alat-alat V-101, E-100, V-102, P-101, Mix-101, ADJ-1, ADJ-2, dan T-101. Penelitian ini akan berfokus pada optimasi kondisi operasional seperti peralatan, penghematan energi, dan rasio bahan baku untuk mencapai hasil yang optimal dalam hal kualitas metil klorida yang dihasilkan sama dengan penelitian sebelumnya dan efisiensi proses. Penelitian ini dapat diimplementasikan dalam desain rekayasa proses.

Pada tahap yang kedua yaitu tahap pembuatan model simulasi proses produksi metil klorida menggunakan aspen hysys



**Gambar 1.** Model simulasi pabrik

### Proses Produksi Metil Klorida

Untuk meniru proses yang sebenarnya, pemodelan dilakukan dengan menggunakan aktivitas persamaan keadaan Peng-Robinson untuk karakteristik uap, persamaan termodinamika ini dilaporkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Untuk umpan metanol diasumsikan 110 kgmol/hr, umpan asam klorida diasumsikan 100 kgmol/hr untuk suhu dan tekanan sesuai atmosfer. Tekanan *Stream* methanol dinaikkan menjadi 500 kPa menggunakan pompa P-100. Tekanan *Stream* HCl dinaikkan menjadi 500 kPa menggunakan kompresor K-100.

Aliran 1 dan aliran 2 dipanaskan terlebih dahulu menggunakan preheater E-100 dan E-101, diaduk secara spektrofotometer dan dicampur di mixer MIX-100. Campuran stream-7 dipanaskan hingga 250°C menggunakan heater E-102 dan dialirkan ke CRV-100. Pada reaktor, kondisi operasi 300°C 500 kPa. Keluaran stream-9 dari reaktor diturunkan suhunya menggunakan cooler E-103. Keluaran stream-11 dikirim ke separator V-100 dimana terjadi pemisahan antara produk ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) di stream 12, selanjutnya

diturunkan kembali suhunya dan dialirkan ke Absorber T-100 untuk memindahkan kelebihan air dan methanol. Produk metil klorida dengan kemurnian di atas 99% ditampung dalam aliran  $\text{CH}_3\text{Cl}$ .

Pada tahap yang ketiga yaitu Persiapan Running Menjalankan simulasi hingga status pada aspen hysys V.11 menjadi *converged*. Dan melakukan beberapa Uji antara lain:

1. Kemurian produk metil klorida di atas 99%.
2. Pengurangan jumlah peralatan yang tidak diperlukan.
3. Dengan menggunakan perangkat lunak aspen *Energy Analyzer* dan aspen *hysys*, potensi penghematan energi di seluruh proses dapat diperiksa untuk meningkatkan sistem energi saat ini di fasilitas produksi metil klorida.

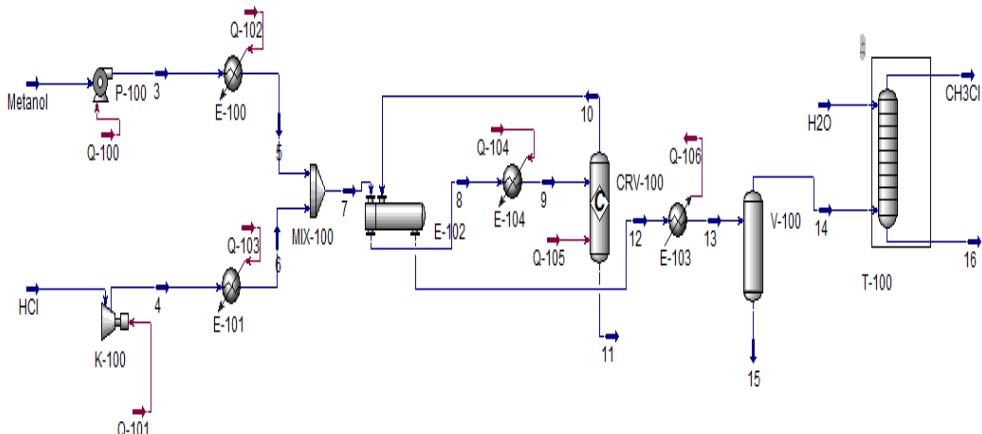
Dari hasil beberapa uji yang di atas jika hasil produk metil klorida sesuai dengan tujuan penelitian ini maka dinyatakan siap desain baru ini lebih baik dari perspektif jumlah peralatan, optimasi energi, kemurnian produk dengan produksi yang lebih ekonomis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini didesain menggunakan proses hidroklorinasi metanol untuk produksi metil klorida dengan menggunakan *software* aspen hysys V.11. Hasil penelitian ini berupa modifikasi platform penelitian sebelumnya proses produksi metil klorida dengan membuat platform yang baru proses produksi metil klorida yang lebih sederhana peralatannya dan efisien dari segi energi dengan mempertimbangkan hasil kemurnian produknya sama dengan penelitian sebelumnya.

Dengan bantuan perangkat lunak aspen hysys dan aspen *energy analyzer*, dimungkinkan untuk memeriksa potensi penghematan energi di seluruh proses dan meningkatkan sistem energi saat ini di fasilitas produksi metil klorida.

Berdasarkan hasil penelitian simulasi yang dilakukan pada pemodelan proses produksi metil klorida dari metanol dan asam klorida menggunakan aspen hysys v.11, maka gambar *flowsheet* proses produksi metil klorida dapat dilihat di bawah ini.



**Gambar 2.** *Flowsheet* Proses

Produksi Desain Metil Klorida Hasil dari penelitian pada jurnal sebelumnya penulis melihat aspek ekonomi yang diperlukan cukup besar, jumlah peralatan yang berlebih. Maka penulis mencoba membuat desain ulang dengan pengurangan jumlah alat yang tidak diperlukan pada pemurnian keduanya seperti alat-alat V-101, E-100, V-102, P-101, Mix-101, ADJ-1, ADJ-2, dan T-101. Asumsi dari sisi perspektif ekonomi banyak alat yang terbuang sehingga peluang *cost* produksi pabrik ini

untuk kapital modal dasar pasti rendah, BEP semakin cepat dan perusahaan semakin cepat mendapatkan balik modal. Kemungkinan juga depresiasi alat semakin tinggi karena tekanan dan temperatur operasi yang rendah sehingga peralatan dapat digunakan dalam jangka waktu yang lebih lama.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dan dimodifikasi, maka data pengamatan hasil kemurnian metil klorida dari methanol dan asam klorida dapat dilihat pada Tabel di bawah:

**Tabel 1.** Hasil Kemurnian Produk Metil Klorida Yang Telah Dimodifikasi  
*Flowsheet* Proses Produksinya

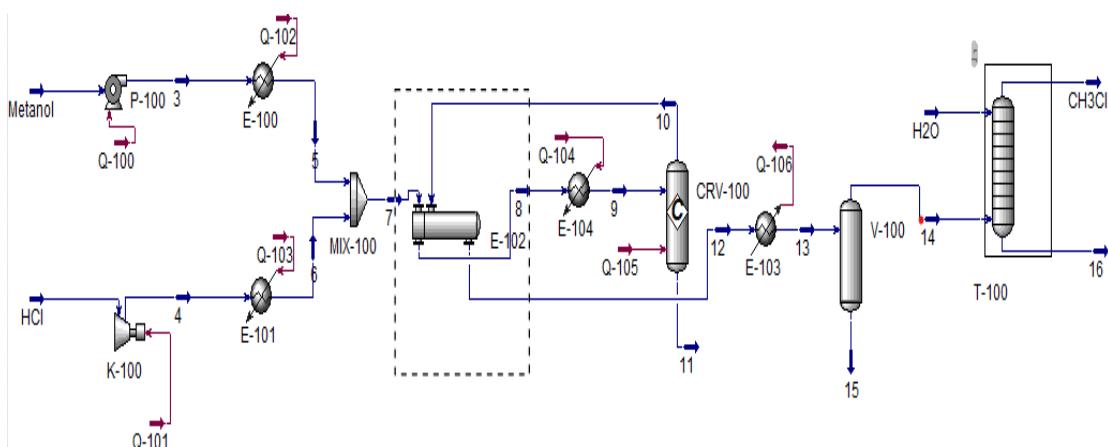
	<i>Mole Fractions</i>	<i>Vapor Phase</i>
Metanol	0.0000	0.0000
HCl	0.0000	0.0000
Metil Klorida	0.9933	0.9933
H <sub>2</sub> O	0.0067	0.0067

Hasil kemurnian metil klorida dari metanol dan asam klorida menggunakan proses hidroklorinasi metanol mendapatkan produk murni 99,33%. Menurut literatur, mendapatkan produk murni 99,9% adalah persyaratan industri (Yandrapu *et al.*, 2022). Menurut Qu Zhoi Ruitong minimal kemurnian metil klorida 99,5%.

Model simulasi diuji keakuratannya dalam mempresentasikan perilaku proses secara *real-time*. Untuk memenuhi persyaratan ini, analisis sensivitas dilakukan dengan menguji parameter

kinerja utama proses dan trennya dengan nilai literatur. Dalam analisis sensivitas, sensivitas antara satu set variabel independen dan dependen diuji. Studi ini berguna untuk memprediksi kondisi operasi yang lebih baik untuk menjalankan proses dengan aman dan efektif (Yandrapu, *et al.*, 2022).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya dan yang sudah dimodifikasi, maka data pengamatan *flowsheet* proses produksi metil klorida yang sudah dioptimasi energinya dapat dilihat pada Gambar 3



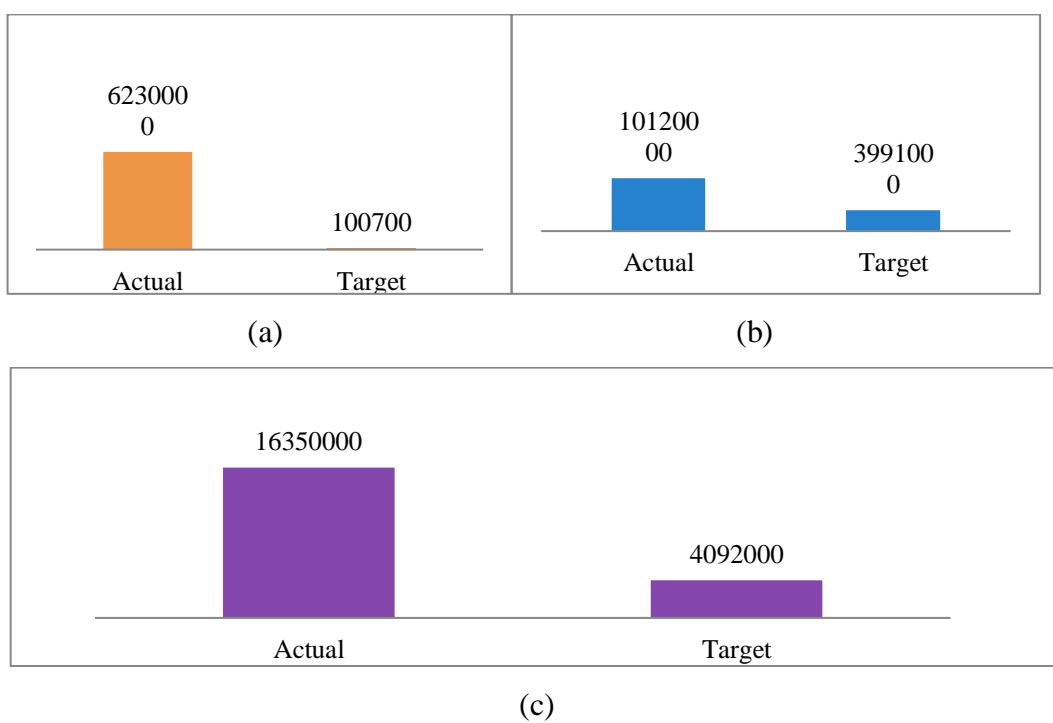
**Gambar 3.** Pemodelan Proses Produksi Metil Klorida yang Sudah Dioptimasi Energinya Menggunakan Hysys V.11, 2023

Dari gambar di atas modifikasi proses yang disarankan untuk penggunaan energi yang efektif. sebuah penukar panas baru ditambahkan ke jaringan penukar panas kasus dasar dan desain retrofit di atas. Penukar panas *shell and tube* baru E-102 ditambahkan antara mixer (MIX-100) dan *heater* (E-104). Aliran *outlet* campuran 7 dari mixer (MIX-100) dihubungkan sebagai aliran masuk ke *tube out*, aliran *outlet* reaktor (CRV-100) masuk ke sisi *shell inlet*, aliran 8 keluaran dari tube inlekt dipanaskan kembali menggunakan *heater* dan masuk ke reaktor, dan aliran 12 dari *shell outlet* telah terjadi pertukaran panas sehingga mengurangi beban kerja *heater* e-102 dan *coller* e-103. Dan dengan menambahkan alat penukar panas pada proses produksi metil klorida tersebut, maka dapat meningkatkan potensi penghematan utilitas total hingga 74,98% dan dapat

menghemat 3405 kW panas yang tidak termanfaatkan dalam proses.

Optimasi konsumen energi dari proses dapat dievaluasi dengan menggunakan *anasis energi* menggunakan *aspen hysys analyzer*. *Aspen hysys analyzer* merupakan perangkat lunak manajemen energi untuk mendapatkan desain jaringan penukar panas yang optimal dan meminimalkan kebutuhan energi proses (Aspentech, 2021).

Berikut Gambar diagram hasil menganalisis potensi penghematan energi pada keseluruhan proses dengan bantuan perangkat lunak *aspen hysys* dan *aspen energy analyzer*. Pada diagram batang berwarna orange ditunjukkan bagian utilitas pemanas, pada diagram batang berwarna biru utilitas pendingin, dan pada diagram batang berwarna ungu total keseluruhan utilitas.



**Gambar 4.** Diagram Batang Hasil Optimasi Energi Pada Utilitas Menggunakan *Aspen Energy Analyzer* 2023

**Tabel 2.** Ringkasan Gambar Diagram Batang Hasil Optimasi Energi Pada Utilitas Menggunakan Aspen *Energy Analyzer*

<b>Property</b>	<b>Actual (kW)</b>	<b>Target (kW)</b>	<b>Available saving(kW)</b>	<b>Actual (%)</b>
<i>Total Utilities</i>	4.541	1.137	3.404	74,98
<i>Heating Utilities</i>	1.730	28	1.702	98,38
<i>Cooling Utilities</i>	2.811	1.108	1.702	60,57

Dari tabel di atas dapat disimpulkan, potensi penghematan energi, terlihat bahwa total beban utilitas *actual* yang dibutuhkan adalah 4.541 kW dan 1.137 kW adalah beban utilitas target. Selisih beban adalah 3.404 kW. Selisih beban menunjukkan kemungkinan penghematan energi dari total utilitas, ini menafsirkan 74,98% dari total utilitas yang sebenarnya. Total potensi penghematan aktual pada utilitas pemanas adalah 98,38%, potensi penghematan aktual pada utilitas pendingin adalah 60,57%.

Menurut literatur penghematan utilitas dapat mempengaruhi efisiensi produksi pada pabrik dengan cara mengurangi konsumsi energi, biaya operasional, dan sumber daya yang tidak penting atau dengan mengoptimalkan proses produksi dan penggunaan teknologi yang sesuai penghematan utilitas dapat dicapai dengan mengoptimalkan aliran bahan baku dan produk, menggunakan teknologi yang sesuai, serta mempertimbangkan faktor ekonomi dalam menempatkan alat-alat proses pada pabrik. Dengan demikian, penghematan utilitas dapat membantu meningkatkan efisiensi produksi pada pabrik dengan mengurangi biaya operasional dan meningkatkan penggunaan sumber daya yang efisien dan efektif.

## KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini dilakukan perbandingan simulasi pemodelan proses produksi metil klorida menggunakan aspen hysys dengan memodifikasi platform *flowsheet* dari penelitian sebelumnya, dengan menyederhanakan jumlah peralatan, mengoptimasi jumlah energi yang dibutuhkan, dan mencapai kemurnian yang sama dengan penelitian sebelumnya. Dengan menambahkan alat penukar panas pada proses produksi metil klorida tersebut, maka dapat meningkatkan potensi penghematan utilitas total hingga 74,98% dan dapat menghemat 3405 kW panas yang tidak termanfaatkan dalam proses. Hasil kemurnian produk metil klorida adalah 99,33%. Dengan pengurangan jumlah alat yang tidak diperlukan pada jurnal sebelumnya. Asumsi dari sisi perspektif ekonomi banyak alat yang terbuang sehingga peluang *cost* produksi pabrik ini untuk kapital modal dasar pasti rendah, BEP semakin cepat dan perusahaan semakin cepat mendapatkan balik modal. Kemungkinan juga depresiasi alat semakin tinggi karena tekanan dan temperatur operasi yang rendah sehingga peralatan dapat digunakan dalam jangka waktu yang lebih lama.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aspentech, 2021. *Aspen Energy Analyzer, Aspen Technology Inch.*, (accesed 15.11.23).
- Dasril, A. R. (2020). Strategi Implementasi & Optimalisasi Manajemen Energi Di Pt Semen Padang Sebagai Upaya Keunggulan Bersaing Di Industri Persemenan Nasional. *COMPETITIVE Jurnal Akuntansi Dan Keuangan*, 4(2), 166.  
<https://doi.org/10.31000/c.v4i2.2322>.
- Kirk, R.E., and Othmer, D.F., 1997, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4 th ed., The Interscience Encyclopedia Inc, New York.
- Kirk,,R.E. and Othmer, D.F., 1979, *Encyclopedia of Chemical Technology*, vol 5, The Inter Science Encyclopedia, Inc., New York.
- Mc Ketta, JJ.,1990, “*Encyclopedia of Chemical Processing and Design* ”,VOL 4, Marcell Decker. Inc, New York.
- McInroy, A. R., Winfield, J. M., Dudman, C. C., Jones, P., & Lennon, D. (2016). The development of a new generation of methyl chloride synthesis catalyst. *Faraday Discussions*, 188(0), 467–479.  
<https://doi.org/10.1039/c5fd00202h>.
- Montastruc, L., Belletante, S., Pagot, A., Negny, S., Raynal, L., 2019. From conceptual design to process design optimization: a review on flowsheet synthesis. *Oil Gas Sci. Technol.* 74, 80.
- doi:10.2516/ogst/2019048,  
Rev. d'IFP Energies Nouvelles.
- Perry, Robert H., and Don W. Green. 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook 7<sup>th</sup> Edition*. McGraw Hill: New York.
- Putra Yudi dkk., 2014. Pengaruh Pencampuran Premium Dan Metanol Terhadap Emisi Gas Buang Sepeda Motor Vario Techno PGM-FI. Jurusan Teknik Otomotif FT-UNP.
- Rossberg, M., Lendle, W., Pfleiderer, G., Togel, A., Torkelson, T.R., Beutel, K.K., 2000. Chloromethanes. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley, New York, pp. 15–42.  
[https://doi:10.1002/14356007.a06\\_233.pub4](https://doi:10.1002/14356007.a06_233.pub4).
- Schmidt, S.A., Kumar, N., Reinsdorf, A., Eranen, K., Warna, J., Murzin, D., Salmi, T., 2013. Methyl chloride synthesis over Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst coated microstructured reactor-thermodynamics, kinetics and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 95, 232–245.  
<https://doi:10.1016/j.ces.2013.03.040>.
- Spevak L, Nadj V & Felle D (1976). Methyl chloride poisoning in four members of a family. *Br. J. Industr. Med*
- Yandrapu, V. P., & Kanidarpur, N. R. (2021). Process design for energy efficient, economically feasible, environmentally safe methyl chloride production process plant: Chlorination of methane route. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 154).

- [https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.027.](https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.027)
- Yandrapu, V. P., & Kanidarapu, N. R. (2022a). Conceptual Design of Methyl Chloride Production Processes: A Review. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(3), 341–353.  
<https://doi.org/10.3311/PPch.19556>.
- Yandrapu, V. P., & Kanidarapu, N. R. (2022b). Energy, economic, environment assessment and process safety of methylchloride plant using Aspen HYSYS simulation model. *Digital Chemical Engineering*, 3(February), 100019.  
<https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100019>
- Yaws, Carls., 1999 “*Chemical Properties Handbook*”, McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Zhang., Zhihao., Zhe Wu., David Rincon., Carlos Garcia., and Panagiotis D., Christofides.,2019. Operational safety of chemical processes via Safeness- Index based MPC: Two large-scale case studies. *Computers & Chemical Engineering*,125,204-215.  
<https://doi.org/10.1016/j.chompchemeng.2019.03.003>