

Pengurangan Impor Sodium Klorat di Indonesia melalui Desain ClO_2 Semi-Integrated pada Modifikasi ClO_2 R8 Plant 10 Ton/Hari

Boy Jansen Roberto Manik^{a*}, Idral Amri^a, Maria Peratenta^b

^aProgram Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

^bProgram Studi S1 Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 28-11-2023

Accepted : 19-01-2024

Published : 29-03-2024

KEYWORDS

ClO_2

Electrolyzers

Non-integrated

Payback period

Semi-integrated

Sodium Chlorate

*correspondence author:

Email: boy.jansen4455@gmail.com



ABSTRACT

Pulp production always has a bleaching process that uses chlorine dioxide (ClO_2) as a bleaching pulp agent. One of the ClO_2 production units that are used in the Pulp Industry in Indonesia is a ClO_2 R8 non-integrated plant with the process of reacting sodium chlorate, sulfuric acid, and methanol. This ClO_2 production type has a weakness, especially in supplying the raw material sodium chlorate, which is needed to import, and the characteristics are easy to explode, making production costs high. This research aims to modify the ClO_2 R8 non-integrated by changing to a ClO_2 semi-integrated plant. In this research, HYSYS was used to simulation to get mass and energy balance and other component data, and the design of equipment based on the American Society of Mechanical Engineers (ASME), Kern, internal data company, and others to get the specification equipment and also drawn using Autocad. The last step is to account for the economic for getting cost of production before and after modification, fixed capital cost, benefit, payback period, and return on investment. The resulting area, the first, modification of the ClO_2 R8 plant by changing to ClO_2 semi-integrated could produce chlorate solution 510 g/l which they use electrolyzers system from Chemetics with 20 cell M25 and hypo system. Second, the cost production for the ClO_2 semi-integrated plant is 1393 USD/T, the benefit is 599.79 USD/year, the Payback period (PBP) is 6,65 years with an investment of about 3988 KUSD and RoI 15%.

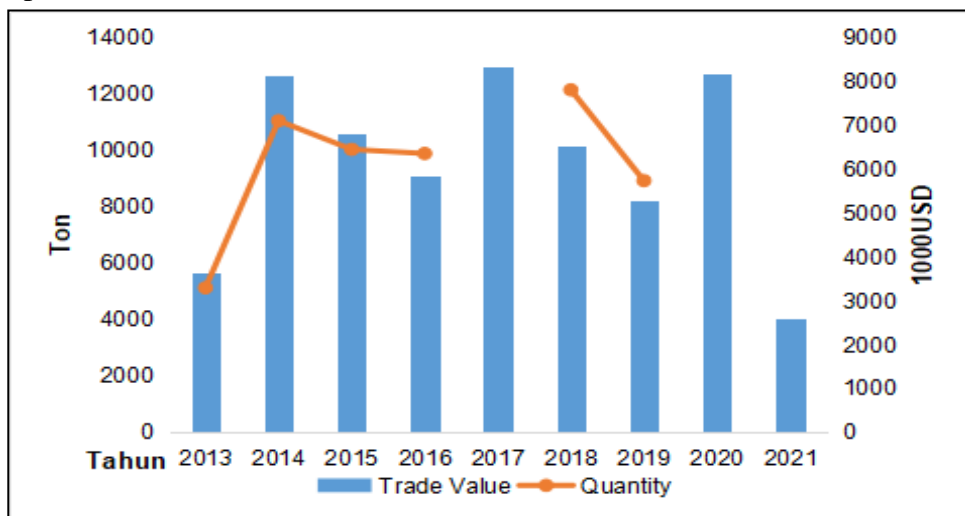
1. PENDAHULUAN

Industri pulp dan kertas adalah industri yang mengolah kayu sebagai bahan baku untuk produksi pulp, kertas, papan dan produk berbasis selulosa lainnya. Industri ini merupakan salah satu kelompok industri kimia yang menjadi andalan Indonesia (Yudha, 2019). Proses pembuatan pulp menggunakan proses kimia atau alkali *kraft* yang meliputi tahapan dari *wood preparation*, *cooking*, *washing*, *screening*, *oxygen delignification* dan *bleaching*. Badan Pusat Statistik (2022) menyatakan bahwa produk domestik bruto (PDB) industri kertas dan barang dari kertas meningkat setiap tahun dan tahun 2021 mencapai Rp113,2 triliun. Angka tersebut persentasenya mencapai 3,84% dari PDB industri pengolahan non-migas. Ekspor industri kertas terbesar di Indonesia berupa bubur kertas (pulp) sebesar 6,32 juta ton dan kertas tisu sebesar 714,68 ribu ton.

Produksi pulp (terutama pulp putih) tidak terlepas dengan tahapan *bleaching* atau pemutihan. Di tahapan ini, senyawa klorin dioksida atau ClO_2 berperan sebagai agen pemutih pulp. Proses *bleaching* menggunakan klorin dioksida dimulai tahun 1946 di Swedia dan Kanada (Mall dan Upadhyay, 1988). ClO_2 diproduksi dengan mereaksikan *sodium chlorite* atau sodium klorat (NaClO_3) dengan *strong acid aqueous solutions*. Produksi ClO_2 terbagi menjadi dua tipe yaitu *integrated* and *non-integrated* (Sixta, 2006). Salah satu pabrik produksi ClO_2 yang digunakan di Indonesia ialah tipe *non-integrated* R8 plant dimana mereaksikan sodium klorat dengan asam sulfat dan metanol (Pohjanvesi, 2009). Proses ini mencapai konversi diatas 99% (Swindells and Fredette, 1978). Produksi *chlorine dioxide* tipe R8 proses memiliki kelemahan terutama pada supply bahan baku yaitu sodium klorat.

Sodium klorat diproduksi menggunakan proses elektrolisis garam (Vogt, 1981). Hampir 95% produksi sodium klorat di dunia digunakan untuk produksi ClO_2 . ClO_2 ini bersifat beracun dan bisa meledak karena ketidak-stabilannya (Malinen, 2019) dan NaClO_3 juga akan terdekomposisi secara perlahan menjadi natrium klorida (NaCl) dan oksigen (Nouryon, 2021).

Indonesia sama sekali tidak memproduksi sodium klorat sehingga harus diimpor dari luar negeri dengan negara produsen utama ialah Kanada ataupun China dengan perkiraan harga 642 USD/ton, total impor sebesar 8.926.030 kg tahun 2019 dan total biaya impor sebesar 2612,56 KUSD tahun 2021 berdasarkan *World Integrated Trade Solution* (2021). Total kuantitas dan biaya yang digunakan untuk impor sodium klorat di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Impor Sodium Klorat di Indonesia Selama Tahun 2013-2021

Swindells dan Fredette (1978) dari ERCO Industrial melalui PATEN US4081520 menyatakan produksi ClO_2 R8 melalui proses *solway* dapat dilakukan dengan mereaksikan sodium klorat (NaClO_3), asam sulfat (H_2SO_4) dan metanol (CH_3OH). Proses ini dilakukan di sebuah generator dengan variasi suhu (64°C , 66°C dan 74°C) dan tekanan (114 mmHg, 106 mmHg, dan 135 mmHg). Hasil terbaik pembentukan ClO_2 yaitu pada suhu 74°C dan tekanan 135 mmHg yaitu efisiensi dari chlorate diatas 99%. Nouryon (2021) menyatakan konsentrasi ClO_2 yang dihasilkan pada unit ini ialah 10 gpl dengan kebutuhan bahan baku berkisar 1,65 ton sodium klorat/ton ClO_2 , 0,85 ton asam sulfat/ton ClO_2 dan 0,18 ton metanol/ton ClO_2 . Selain itu, Fredette & Yang (1986) dari Tenneco Canada Inc melalui PATEN US4627969 melakukan modifikasi R8 *Plant* dimana menggunakan sodium klorat tidak murni, melainkan sodium klorat keluaran *electrolyzers* tetapi tetap menggunakan asam sulfat dan metanol. Sistem prosesnya sama seperti R8 tetapi ditambahkan *electrolyzers system* yang menghasilkan sodium klorat dan sisa produk natrium klorida. Reaktan yang digunakan adalah produk keluaran *electrolyzers* (586 gpl NaClO_3 , 80 gpl NaCl), 30N H_2SO_4 , 33% v/v metanol. Perbedaan pada proses ini adalah penambahan natrium dikromat pada *electrolyzers*. Efisiensi proses ini sebesar 98,1% tanpa sodium dikromat dan 95,2% dengan sodium dikromat.

Penelitian ini menggunakan simulasi HYSYS. Hajinezhad dkk (2023) menyatakan bahwa simulasi merupakan perkiraan suatu proses yang akan diimplementasi dengan

menggunakan beberapa data yang diperlukan. Simulasi HYSYS terdiri dari dua tahap utama yaitu properties data dan simulasi. Tahap pertama yang meliputi pemilihan komponen, *fluid packages* dan reaksi yang akan digunakan. Tahap kedua yaitu *simulation*. Tahap ini yaitu tahap untuk mensimulasikan suatu proses dengan menambahkan *equipment* yang tersedia dan mengkoneksinya satu sama lain sehingga memperoleh perhitungan neraca massa dan energi (Valverde dkk, 2023). Abduljabbar dkk (2024) menyatakan simulasi HYSYS dapat digunakan untuk proses yang berkaitan dengan elektrolisis dengan memilih *fluid packages* NRTL. Roy dan Ruhul (2011) menyatakan penggunaan Aspen HYSYS untuk simulasi ini memiliki kelebihan seperti meminimalisir error pada sebuah desain dengan waktu lebih cepat dan proses desainnya mudah disesuaikan atau diperbaiki. Anuththara dkk (2023) dan Shirdel dkk (2022) menyatakan penggunaan Aspen HYSYS juga dapat menghitung kondisi optimum pada suatu proses yang akan digunakan untuk proses simulasi baik dari perhitungan neraca massa, neraca energi bahkan dapat memperkirakan biaya yang akan digunakan.

Tahap terakhir dalam sebuah proses desain adalah *cost estimation* yang meliputi *fixed cost* yang terdiri dari *direct* dan *indirect cost*, biaya produksi, *return on investment* bahkan sampai *payback period* (Peters & Timmerhaus, 1991). *Fixed cost* adalah perhitungan modal awal untuk pendirian suatu pabrik yang melingkupi pembelian dan penginstallan equipment proses termasuk juga lahan atau area tanah yang digunakan. *Fixed capital cost* dihitung berdasarkan asumsi range pada Table 4 Halaman 167 pada Peters & Timmerhaus (1991) dan juga telah disesuaikan dengan *chemical engineering cost index* pada Vatauvuk (2002). Rathore dan Mathur (2020) menyatakan bahwa biaya produksi ialah biaya bahan baku ataupun material yang digunakan pada setiap proses produksi. Arifin dan Izran (2023) menyatakan *return on investment* (ROI) merupakan ukuran kinerja keuangan yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi dan profitabilitas proyek investasi yang dinyatakan dalam persentase. *Payback time* atau *payback period* merupakan waktu yang diperlukan untuk balik modal/invest. *Payback period* (PBP) dihitung dengan cara membagikan biaya investment terhadap benefit per tahunnya (Smith, 2005)

Pada penelitian ini, penulis memodifikasi unit ClO_2 R8 *non-integrated* plant menjadi semi-integrated. Tipe ini yaitu menggunakan reaksi di R7 *Plant* yaitu sodium klorat dan sodium klorit direaksikan dengan asam sulfat. R7 *Plant* tersebut dimodifikasi lagi dimana umpan NaClO_3 dan NaCl tidak dibeli dari luar tetapi diproduksi langsung dari alat elektrolyzer dengan paramater sama seperti proses produksi strong *chlorate* pada ClO_2 integrated plant oleh chemetic ($\text{NaClO}_3 \pm 510$ gpl, $\text{NaCl} \pm 110$ gpl, dan sodium *chromate*). Selanjutnya ditambah scrubber untuk kontrol emisi dari hasil sampling produksi ClO_2 .

2. METODE

2.1. Sumber Data dan Lokasi Penelitian

Basic data yang meliputi kondisi proses, chemical and physical properties, sampai data ekonomi yang digunakan bersumber dari beberapa PATEN, jurnal, handbook, maupun market place yang tersebar secara global dan legal untuk digunakan. Penelitian ini dilakukan di salah satu pabrik pulp dan kertas di Riau, Indonesia.

2.2. Prosedur Penelitian

2.2.1. Simulasi HYSYS ClO₂ Semi-Integrated Plant

Pada penelitian ini, penulis menggunakan acuan PATEN dari Fredette & Yang (1986), Swindells dan Fredette (1978), Chemetics (2012) dan ERCO Worldwide. ClO₂ *semi-integrated plant* ini merupakan sistem proses dimana di *install elektrolyzer* untuk produksi sodium klorat pada R8 plant dimana reaktan yang digunakan adalah sodium klorat (1,64 kg/kg ClO₂), natrium klorida (0,34 kg/kg ClO₂), asam sulfat (0,5 kg/kg ClO₂). Proses ini juga ditambahkan *scrubber* untuk kontrol emisi dari hasil sampling produksi. Parameter proses produksi larutan sodium klorat menggunakan *elektrolyzer* pada ClO₂ *integrated plant* oleh Chemetic (NaClO₃ 510±10 gpl, NaCl 110±10 gpl, dan sodium kromat) (McKetta, 1995). Pada desain ini, penulis akan observasi dan pengumpulan data dari Chemetic (2012), Schumacer (1950), McKetta (1955) maupun sumber lainnya. Perhitungan neraca massa dan energi menggunakan simulasi Aspen HYSYS (Aspen, 2005) dan (Haydary, 2019). Simulasi HYSYS dilakukan dengan 2 tahap yaitu tahap pemilihan komponen, *fluid packages* dan reaksi yang akan digunakan dan tahap simulasi. Tahap pertama yaitu pengisian components list, selanjutnya pemilihan *fluid packages* yaitu NRTL dan terakhir ialah tahap *reaction*. Tahap kedua yaitu simulation. Tahap ini dimulai dengan memasukkan equipment atau alat yang akan digunakan. Data yang harus diisi yaitu *connections* yang merupakan aliran inlet, outlet dan energi yang dibutuhkan pada *equipment* tersebut. Selanjutnya klik alirannya dan isi terutama laju alir massa, suhu dan tekanan. Lakukan hal serupa sampai terbentuk *process flow diagram*.

2.2.2. Perhitungan Ekonomi dari ClO₂ Semi-Integrated

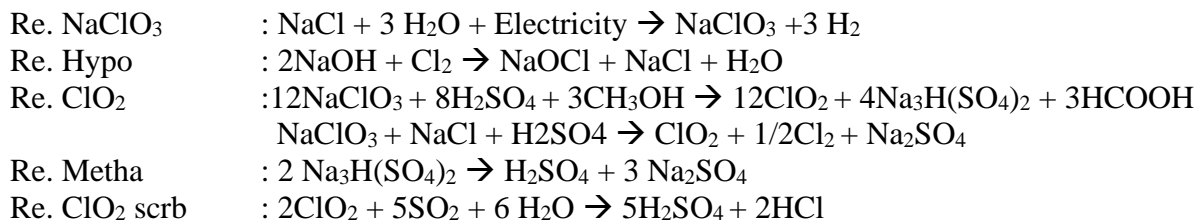
Pada segi ekonomi, penulis akan mencari total invest yang akan digunakan, biaya produksi ClO₂ (USD/T ClO₂), biaya manufaktur, *payback period* dan *return on investment* berdasarkan Loh dan Lyons (2002), Smith (2005), Couper dkk (2012), Peters dan Timmerhaus (1991), Towler dan Sinnott (2013), Perry dan Green (2008). *Fixed capital cost* dihitung berdasarkan biaya pembelian alat yang digunakan selanjutnya dihitung biaya *direct and indirect cost* berdasarkan persentase pada Table 4 Halaman 167 pada Peters & Timmerhaus (1991) yang disesuaikan dengan *chemical engineering cost index* pada Vatauvuk (2002). Biaya produksi dihitung berdasarkan bahan baku dan utilitas yang digunakan selama proses produksi. *Benefit* dihitung melalui pengurangan biaya produksi R8 dengan biaya produksi setelah dimodifikasi. *Payback period* (PBP) dihitung dengan cara membagikan biaya invesment terhadap benefit per tahunnya. *Return on investment* (RoI) dihitung melalui pembagian dari benefit per *investment* atau *fixed capital cost*nya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Neraca Massa dan Energi dari Simulasi HYSYS

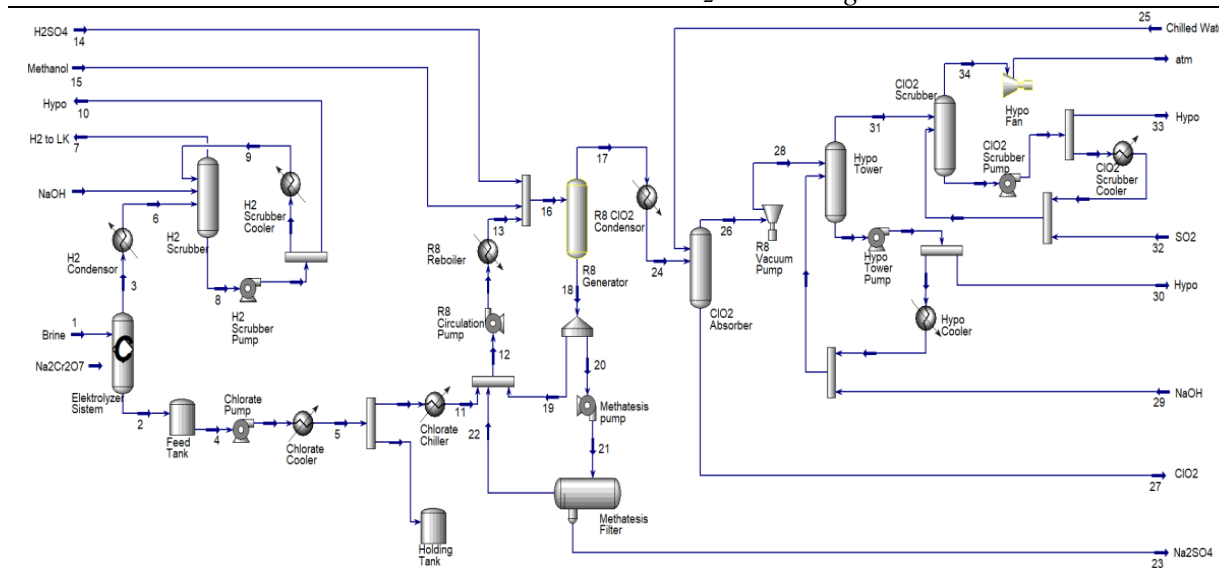
Neraca massa dan energi pada ClO₂ *semi-integrated* dihitung menggunakan simulasi HYSYS. Reaksi pembentukan *chlorate* dengan elektrolisis garam berdasarkan Chemetics (2012). Reaksi pembentukan *hypo* yaitu reaksi yang bertujuan untuk menghilangkan chlorine sisa yang terjadi baik pada proses pembentukan *chlorate* maupun pembentukan ClO₂ yang berdasarkan berdasarkan Chemetics (2012) dan Veisi (2007). Reaksi pembentukan ClO₂

berdasarkan Fredette & Yang (1986) dan Deshwal dan Hyung (2005). Reaksi yang terjadi pada methatesis filter berdasarkan Nouryon (2021). Reaksi yang terjadi pada ClO₂ scrubber untuk menghilangkan ClO₂ sisa yang tidak teradsorpsi (*double protection*) berdasarkan Jin dkk (2004). Reaksi-reaksi yang digunakan dapat di bawah ini.



Proses ini dimulai dari pembentukan *chlorate* pada *elektrolyzer system* lalu langsung ke generator. Inlet generator R8 adalah *chlorate* yang masih mengandung komponen lain seperti NaCl dan lainnya. Target produksi ClO₂ ialah 10 ton/hari konsentrasri 10g/l. Kelemahan pada ClO₂ *semi-integrated* ini adalah menghasilkan gas Cl₂ sisa akibat dari reduksi NaCl. Pencegahan gas Cl₂ ini lepas kelingkungan dilakukan dengan menambahkan alat *hypo tower* dan ClO₂ *scrubber*. Scrubber ini berfungsi mencegah gas klorin dan ClO₂ yang tidak bisa teradsorpsi dengan menggunakan NaOH dan SO₂. Walaupun ClO₂ *semi-integrated* menghasilkan gas klorin, tetapi tetap tidak sebanyak ClO₂ *integrated* (Mall & Upadhyay, 1988). Simulasi HYSYS ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Simulasi HYSYS ClO₂ *Semi-Integrated*



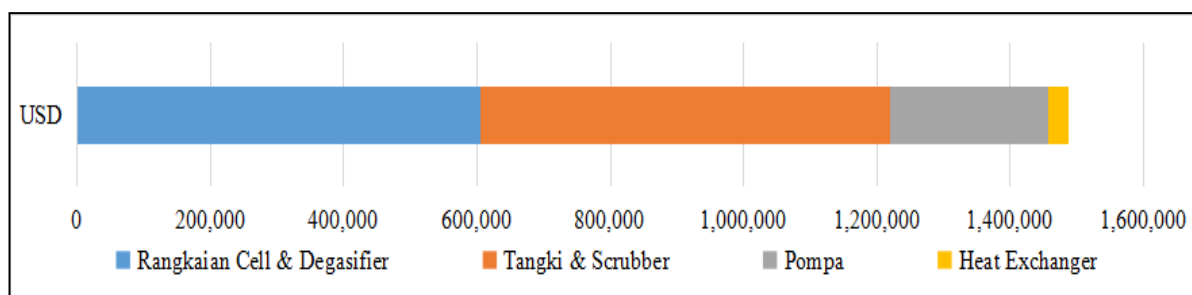
| Bahan Baku | | Produk | |
|---------------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|
| Brine | 49.8 Ton/hari | ClO ₂ | 10 Ton/hari |
| H ₂ SO ₄ 98-99% | 11.5 Ton/hari | H ₂ | 1.2 Ton/hari |
| CH ₃ OH 100% | 1.8 Ton/hari | Na ₂ SO ₄ | 13.8 Ton/hari |
| NaOH 32% | 0.63 Ton/hari | NaOCl + H ₂ O | 6.2 Ton/hari |
| SO ₂ 7 gpl | 6.8 Ton/hari | Outlet ClO ₂ Scrubber | 6.83 Ton/hari |

Equipment yang dibutuhkan pada desain ini adalah *elektrolizer (Cell, reaktor, feed tank* dan sistem H_2), *hypo tower* dan ClO_2 *scrubber*. Desain *elektrolizers* disesuaikan dengan Chemetic (2012) dan Mcketta (1995) yaitu 20 *cells*, 2 *elektrolizers*, dan 2 *degasifier*. Desain tangki baik steel maupun plastik berdasarkan API 650, Brownell dan Young (1959), ASME BPVC.VIII.2-2019 dan ASME-RTP-1-2019 dimana tinggi feed tank dan brine tank ialah 4 meter dengan diameter 2 meter dan ketebalan 6 meter material titanium, tinggi *holding tank* sebesar 6 meter dan diameter 3 meter dengan material CPVC. *Scrubber* didesain berdasarkan Treybal (1981), Onda dkk (1968), Ludwig (1997) dan Strigle dan Rukovena (1979) yaitu tipe packed column dimana H_2 *scrubber* bermaterial titanium dengan tinggi *packing* yaitu 2,6 meter dengan tipe super intalox PVDF. Hypo tower & ClO_2 *scrubber* juga menggunakan tipe *packed coloumn* dengan material CPVC, tinggi packing yaitu 2,7 meter dengan tipe *pall ring* 25mm PVDF.

3.2. Analisis Ekonomi

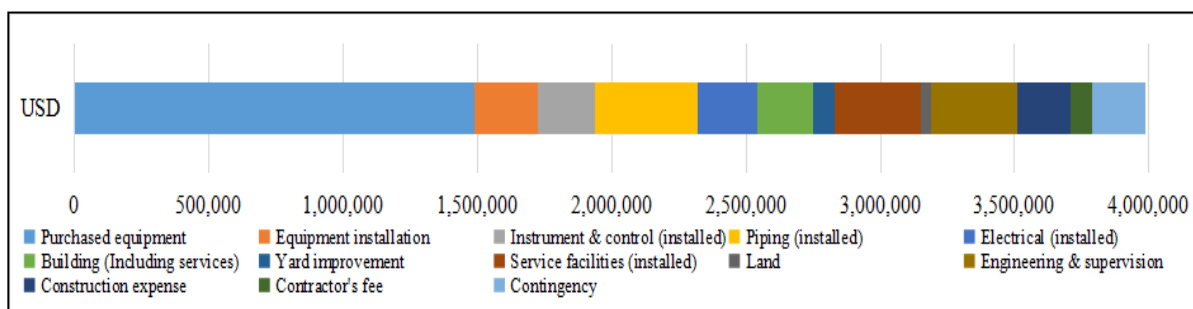
Perhitungan ekonomi ClO_2 *semi-integrated plant* terbagi menjadi 4 tahap yaitu perhitungan *fixed capital cost*, *operational cost*, *payback period* dan *return on investment*. *Fixed capital cost* adalah perhitungan ekonomi yang berfokus pada biaya yang akan dikeluarkan atau diinvestasikan pada pembelian *equipment*, *building*, pekerja kontraktor sampai tahap selesai. Biaya produksi atau *operational cost* berkaitan dengan biaya yang dibutuhkan suatu plant memproduksi suatu produk. *Payback period* ialah berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk balik modal. *Return on investment* adalah persentase pengembalian investasi atau benefit per investasi (Peters dan Timmerhaus, 1991).

Perhitungan *fixed cost* ini dimulai dengan perhitungan alat. Pembelian alat dapat dilihat pada Gambar 2. Biaya paling besar ialah pembelian *cell* dan tangki. Material tangki dan *cell* ialah titanium sehingga *cost equipment* jauh lebih mahal. Rangkaian *equipment cell* dan tangki sodium klorat *plant* merupakan teknologi dari Chemetic (2012) dan pembelian dilakukan dari tersebut. *Heat exchanger* baik *gasketed-plate* (Alfa Laval, 2022) ataupun *shell and tube* dibeli di Alfa Laval atau Hisaka (2012 & 2022). Pompa sentrifugal dapat dibeli di Shinko Japan (2017), Goulds Pumps dari Jerman (2021) dan Ebara Japan (2017, 2018). Fan dapat dibeli di Ziehl-abegg (2022). *Scrubber (packing + tower)* dapat dibeli di Trimer (2013), Pall Ring *company* (2006), Koch-Glitsch (2010, 2019, dan 2020), Pall chem dan Matsui Machine Ltd. Perhitungan *cost cell* berasal dari internal data. *Equipment* lain dihitung berdasarkan perhitungan pada <https://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>. Harga *equipment* yang diperoleh dari situs tersebut juga disesuaikan dengan perkiraan harga yang tersedia dibeberapa supplier.



Gambar 2. *Equipment Cost* dari ClO_2 *Semi-Integrated*

Fixed capital cost pada ClO_2 *semi-integrated* dapat dilihat pada Gambar 3. Biaya terbesar yang harus dikeluarkan adalah pembelian alat (*purchased equipment*) yaitu sebesar 1488 KUSD atau setara hampir 22,3 miliar rupiah dengan kurs 15000 rupiah per dollar. Persentase pembelian alat ini sekitar 37,3% dari total *fixed capital cost*. Perhitungan cost lain seperti perpipaan, instrumentasi dan sebagainya dihitung berdasarkan range-nya masing masing. Range ini didasarkan pada Peter & Timmerhaus (1991) dan Vataavuk (2002). Total *budget* yang akan dikeluarkan untuk ClO_2 *semi-integrated plant* ini sekitar 3988 KUSD atau setara 59,8 miliar rupiah.



Gambar 3. *Fixed Capital Cost* dari ClO_2 *Semi-Integrated*

Tahap terakhir ialah perhitungan *return on investment* (RoI) dan *payback period* (PPB). Tahapan ini dimulai dengan menghitung biaya produksi sebelum dan sesudah dimodifikasi. Biaya produksi ClO_2 R8 *non-integrated* ialah 1565 USD/T ClO_2 . Biaya produksi ClO_2 *semi-integrated* sekitar 1393 USD/T ClO_2 . Benefit dari modifikasi ini yaitu hampir 600 ribu US dollar atau hampir 9 miliar rupiah setiap tahunnya. Benefit ini diperoleh dari pengurangan sesudah dan sebelum dimodifikasi dan dikali berdasarkan kemampuan produksinya yaitu 350 hari dengan produksi 10 ton/hari. Benefit inilah yang digunakan untuk memperoleh jumlah waktu yang dibutuhkan agar balik modal atau PBP dan RoI. *Payback period* (PBP) dari ClO_2 *semi-integrated plant* ialah 6,65 tahun dan *return on investment* (RoI) beserkisar 15%.

4. KESIMPULAN

ClO_2 R8 *non-integrated* dapat dimodifikasi ke ClO_2 *semi-integrated* dengan produksi larutan sodium klorat 510 g/l dimana menggunakan *electrolyzer system* dari *chemetics* dengan 20 cell M25 dan *hypo system*. Analisis ekonomi dari desain ini ialah biaya produksi 1389 USD/T, keuntungan sekitar 599.796 USD/tahun, *return on investment* sebesar 15% dan *payback period* selama 6,5 tahun dengan investasi sebesar 3988 KUSD. Desain ClO_2 *semi-integrated* ini juga dapat ditrial/disimulasi dilapangan sebelum dimodifikasi dengan syarat tersedia *electrolyzer system* dari ClO_2 *integrated plant*. Target akhir penelitian ini ialah diterapkannya desain ini di industri pulp Indonesia yang masih menggunakan ClO_2 R8 *non-integrated plant* untuk mengurangi ketergantungan impor sodium klorat di Indonesia dan mendukung perkembangan ekonomi Indonesia di masa mendatang menuju Indonesia Emas.

DAFTAR PUSTAKA

Abduljabbar, M.I.H.G, Taleghani, & E.P, Afrakoti. (2024). Simulation and Optimization of Gas Sweetening Plant of Iraq Majnoon Refinery. *Iranica Journal of Energy and*

- Environment*, 15(1), 21-37.
- Alfa Laval. (2004). The Theory Behind Heat Transfer: Plate Heat Exchangers. *Catalogue*. Sweden.
- Alfa Laval. (2022). *Gasketed Plate Heat Exchanger T-Series*. *Catalogue*. Sweden.
- Alfa Laval. *Shell and Tube Heat Exchangers*. Brochure. Sweden.
- American Petroleum Institute 650. (2012). *Welded Steel Tanks for Oil Storage*. United States of America.
- Anuththara, M., Lars, E.Ø., Shahin, H.K., Mostafa, M., Soudeh, S., & Sumudu, K. (2023). Process Simulation and Cost Optimization of CO₂ Capture Configurations in Aspen HYSYS. 64th *International Conference of Scandinavian Simulation Society*.
- Arifin, S.S., & Izran, S.M. (2023). Anticipated ROI Methods for Quantification of Servicescape Upgrading based on Intangible Values: A Literature Analysis. (2023). *International Journal of Business and Technology Management*, 5(2), 171-187.
- Aspen. (2005). *Simulation Basis*. United States of America: Aspen Technology Inc
- Badan Pusat Statistik. (2022). *Industri Kertas RI Catat Kontraksi 2.89% pada 2021*. Indonesia
- Brownell, L.E., & Young, E.H. (1959). *Equipment Design*. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- Chemetic. (2012). Integrated Chlorine Dioxide Technology. *Brochure*. Chemetic Inc. Canada.
- Chemetic. (2012). Sodium Chlorate Technology. *Brochure*. Chemetic Inc. Canada.
- Couper, J.R., Penney, W.R, Fair J.R., W.M, Walas, W.M. (2012). *Chemical Process Equipment Selection and Design*. Third Edition. United Kingdom: Elsevier Sciercer Ltd.
- Deshwal, B.R., & Hyung, K.L. (2005). Manufacture of Chlorine Dioxide from Sodium Chlorate: State of The Art. *Journal of Indian Engineering Chemical*, 11(3), 330-346.
- Ebara. (2017). Ebara Industrial Pumps for Harmony of The Environment and Technology. *Industial Pumps General Catalogue*. Japan
- Ebara. (2018). UK Price List 2018. *Catalogue*. Japan
- ERCO Worldwide. Chlorine Dioxide Process R7. *Brochure*. Canada
- Fredette, M.C.J., & Yang, C.S. (1986). *Production of Chlorine Dioxide*. United State Patent 4627969.
- Goulds Pumps. (2021). Centrifugal Pump Selection Guide. *Catalogue*. Germany.
- Hajinezhad, A., Ali, M., & Seyed, F.M. (2023). Simulation Model of Carbon Capture with MEA and The Effect of Temperature and Duty on Efficiency. *Future Energy*, 3(2), 37-47.
- Haydary, J. (2019). *Chemical Process Design and Simulation*. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- Hisaka. Plate Heat Exchanger. *Catalogue*. Japan.
- Hisaka. (2012). Hisaka Plate Heat Exchanger Maintenance Guide. *Brochure*. Japan.
- Hisaka. (2022). *Plate Heat Exchanger Design Calculation & Simulator*. <https://hisakaasia.com/web-simulator>. Diakses 27 July 2023.
- Jin, D.D.B.R., Par, H.D, Cho, W.K., Choi. B.R., Deshwal, Y.S., Park, & Lee, H.K. (2004). Reaction Mechanism in The Sulfur Dioxide and Nitric Oxide Removal Using Euchlorine Gas. *Theories and Applications of Chemical Engineering*, 10(2), 1732-1735.
- Koch-Glitsch. (2010). Intalox Packed Tower Systems: Packed Tower Internals. *Catalogue*. United States of America.
- Koch-Glitsch. (2010). Intalox Packed Tower Systems: Plastic Random Pack. *Catalogue*. United States of America.

- Koch-Glitsch. (2019). Plastic Packing and Colum Internals. *Catalogue*. United States of America.
- Koch-Glitsch. (2020). Packed Tower Internals. *Catalogue*. United States of America.
- Lembaga Pengembangan Bisnis dan Inkubasi. 2018. *Analisa Rantai Pasok (Supply Chain) Komoditas Unggulan Ekspor Indonesia: Pulp & Kertas*. Indonesia Eximbank Institute.
- Loh, H.P., & Lyons, J. (2002). Process Equipment Estimation. *National Energy Technology Center*. United States of America.
- Ludwig, E.E. (1997). *Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants*. Volume 2. United Kingdom: Elsevier Sciencer Ltd.
- Malinen, K. (2019). *Energy Management Software for Sodium Chlorate and Chlor-Alkali Processes*. (Thesis, LUT University).
- Mall, I.D., & Upadhyay, S.N. (1988). Chlorine Dioxide. *IPPTA*, 25(4), 72-87.
- Matsui Machine Ltd. Tower Packing Tower Internals & Towers. *Catalogue*. Japan.
- McKetta, J.J. (1995). *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. Volume 51. United States of America: Marcel Dekker Inc.
- Nouryon. (2021). Eka Chlorine Dioxide Generation Systems. *Brochure*. Sweden.
- Nouryon. (2021). Chlorine Dioxide Technologies-Best Available Techniques (BAT) for ClO₂ Production. *Brochure*. Sweden.
- Nouryon. (2021). Sodium Chlorate Product Information Manual. *Brochure*. Sweden.
- Onda, K., Hiroshi, T., & Yoshio, O. (1968). Mass Transfer Coefficients Between Gas and Liquid Phases in Packed Columns. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1(1), 56-62.
- Perry, R.H., & Green, D.W. (2008). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. Eighth edition. United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- Peters, M.S., & Timmerhaus, K.D. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Fourth Edition. United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- Peter, M.S., Timmerhaus, K.D., & West, R.E. Equipment Costs: Plant Design and Economics for Chemical Engineers-5th Edition.
<https://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/>. Diakses 1 September 2023.
- Pohjanvesi. (2009). Process for The Production of Chlorine Dioxide. *Canadian Patent Application CA2779397A1*.
- Rathore, R., & Mathur, A. (2020). An Economic Analysis of Production of Isabgol and Constraints Faced by Farmers in Rajasthan. *Economic Affairs*, 65(4), 491-497.
- Roy, P.S., & Ruhul, A.M. (2011). Aspen-HYSYS Simulation of Natural Gas Processing Plant. *Journal of Chemical Engineering*, 1, 62-79.
- Schumacher, J.C. (1950). Process for Making Sodium Chlorate. *United States Patent*. 2511516.
- Shinko. (2017). Standard Centrifugal Pumps. *Catalogue*. Japan.
- Shirdel, S., Valand, S., Fazli, F., Winther-Sørensen, B., Aromada, S. A., Karunarathne, S., & Øi, L. E. (2022). Sensitivity analysis and cost estimation of a CO₂ capture plant in Aspen HYSYS. *ChemEngineering*, 6(2), 28.
- Sixta, H. (2006). *Handbook of Paper and Board*. Volume 1. Austria: Wiley-VCH.
- Smith, R. (2005). *Chemical Process Design and Integration*. United States of America: John Wiley & Sons Ltd.
- Strigle, R.E., & E, Rukovena. (1979). Packed Distillation Column Design. *Chemical Engineering*, 75, 86.
- Swindells, R., & Fredette, M.C.J. (1978). High Efficiency Production of Chlorine Dioxide by Solvay Process. *United States Patent* 4081520.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2019). *ASME Boiler & Pressure Vessel Code*. Section VIII. Division 2. United States of America.

- The American Society of Mechanical Engineers. (2019). *Reinforced Thermoset Plastic Corrosion-Resistant Equipment*. United States of America.
- The Pall Ring Company. (2006). Tower Packings and Internals. *Catalogue*. United Kingdom.
- Towler, G., Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design*. Second Edition. United States of America: Elsevier Ltd.
- Treybal, R.E. (1981). *Mass Transfer Operations*. Third Edition. United States of America: The McGraw-Hill Companies.
- Valverde, J.L., Victor, R.F., & Anner, G. (2023). Automation in The Simulation of Processes with Aspen HYSYS: An Academic Approach. *Computer Application Engineering Education*, 31, 376-388
- Vatavuk, W.M. (2002). Updating the CE Plant Cost Index. *Chemical Engineering Practise*, 62-70.
- Veisi, H. (2007). Sodium Hypochlorite (NaOCl). *Synlett Spotlight*, 16, 2607-2608.
- Vogt, H. (1981). Electrosynthesis of Chlorate in The Nineteenth Century. *Journal of The Electrochemical Society*, 128(2), 29C-32C.
- World Integrated Trade Solution. *Indonesia Chlorates: of Sodium Imports by Country 2013-2021*. <https://wits.worldbank.org/>. Diakses 27 Agustus 2023.
- Yudha, A.P. (2019). *Produktifitas Industri Pulp dan Kertas*. *Warta Ekspor-Edisi Maret 2019*. Kementerian Perdagangan Republik Indonesia.
- Ziehl-Abegg. (2022). Centrifugal Fans. *Main Catalogue with IEC standard Motor*. Germany.