

Simulasi Kenaikan Kapasitas Produksi Gula pada Proses Karbonatasi di PT. Industri Gula Glenmore Menggunakan Perangkat Lunak Aspen Plus

Maktum Muharja^{1*}, Rizki Fitria Darmayanti², Arief Widjaja³, Arfian Alwi Firmansyah⁴, Nur Karima⁵ 

^{1,2,3,4,5} Universitas Jember, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received January 06, 2022

Revised January 10, 2022

Accepted April 15, 2022

Available online April 25, 2022

Kata Kunci:

Aspen Plus, Defekasi Remelt Karbonatasi, Gula, Neraca massa, Neraca energi

Keywords:

Aspen plus, Defecation Remelt Carbonatation, Energy Balance, Mass Balance, Sugar



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2022 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

PT Industri Gula Glenmore (PT. IGG) merupakan salah satu industri gula di Indonesia yang menggunakan metode defekasi remelt karbonatasi (DRK) pada proses pemurnian nira. Dalam beberapa tahun ke depan, PT IGG berencana menaikkan kapasitas produksi sebesar 8.000 ton/hari dari kapasitas semula sebesar 6.000 ton/hari. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk mensimulasikan peningkatan produksi gula dari 6.000 menjadi 8.000 ton/hari dengan menganalisis neraca massa dan neraca energi dan mensimulasikannya menggunakan software Aspen Plus V11. Proses yang disimulasikan dalam studi ini berfokus pada kinerja karbonator. Hasil penghitungan kapasitas 6.000 ton/hari menunjukkan massa keluar dan energi yang dibutuhkan (ΔH) pada karbonator 2 secara berturut-turut adalah 72.766,20 kg/jam dan -1.828,32 kkal/jam. Sedangkan pada kapasitas 8.000 ton/hari, massa keluar dan energi yang dibutuhkan pada karbonator 2 secara berturut-turut adalah 97.015,61 kg/jam dan -2.441,30 kkal/jam. Simulasi menggunakan aspen plus menunjukkan hasil dengan selisih perbedaan yang dapat ditoleransi dibandingkan dengan penghitungan neraca massa dan energi. Dari studi ini, simulasi peningkatan produksi gula akan berguna untuk mempermudah proses desain karbonator pada kenaikan kapasitas produksi atau penggantian metode pemurnian.

ABSTRACT

Glenmore Sugar Company (Ltd.) was one of the sugar companies in Indonesia which used the defecation-remelt-carbonatation method in purifying the sap. In the next few years, this company has a plan to increase its product's capacity from 6000 to 8000 tons per day. Hence, this study aims to simulate the increase in sugar production. In this study, the mass and energy balance was manually calculated by spreadsheet, then simulated by Aspen Plus software. The process focused on the performance of the carbonator. The calculation of the 6000-tons-per-day production shows that the mass and energy output needed for the second carbonator is 72766.20 kg/hr and -1828.32 kcal/hr, respectively. However, for the 8000-tons-per-day production, the mass and energy output needed is 97015.61 kg/hr and -2441.30 kcal/hr. The results using Aspen Plus demonstrates that the difference is tolerable compared to the calculation of the mass and energy balance. From this study, the simulation of an increase in sugar production can be beneficial to make the carbonator design process becomes easier, particularly in raising the product's capacity or substituting the purification method.

1. PENDAHULUAN

Industri gula merupakan agroindustri penting di dunia. Tebu yang merupakan bahan baku pada industri gula menjadi tanaman penghasil uang terbesar di dunia, menyumbang sekitar 80% dari perekonomian di dunia (Dogbe, Mandegari, & Görgens, 2018; Solomon, 2016). Gula merupakan produk yang dihasilkan dari industri, yang menjadi kebutuhan pokok masyarakat Indonesia. Kebutuhannya mengalami peningkatan di setiap tahunnya. Menurut data dari BPS tahun 2019, kebutuhan konsumsi gula di Indonesia sebesar 5,1 juta ton dan mengalami kenaikan pada tahun 2020-2021 sebesar 5,25 juta ton. Total konsumsi gula masyarakat Indonesia diproyeksikan mencapai 25,6 juta ton pada tahun 2025 dan 29,1 juta ton pada tahun 2045. Perkiraan proyeksi konsumsi gula ini belum termasuk pada konsumsi gula untuk kue, minuman dan produk makanan lainnya yang menggunakan gula rafinasi dan turunannya, menurut proyeksi yang dibuat kemungkinan angkanya bisa lebih tinggi (Arifin, Azam, Martianto, & Karlina, 2018). Namun yang terjadi peningkatan konsumsi gula ini tidak diiringi peningkatan produksi gula, sehingga mengharuskan Indonesia melakukan impor gula dari beberapa negara. Pada tahun 2019, total impor gula di Indonesia sebesar 4090 ton dan pada tahun 2020 impor gula mengalami kenaikan sebesar

*Corresponding author.

E-mail addresses: maktum@unej.ac.id (Maktum Muharja)

5540 ton (Badan Pusat Statistik, 2019; Kurniasari, Darwanto, & Widodo, 2015; Nurjanah, 2015) Dengan kondisi tersebut, PT Industri Gula Glenmore (PT IGG) memproyeksikan adanya peningkatan kuantitas produksi dan kualitas produk gula yang dihasilkan. Pada proses pemurniannya, PT IGG menggunakan metode defekasi remelt karbonatasi (DRK) sejak pertama musim giling. Peningkatan kualitas dan mutu produk gula dapat dilakukan dengan proses pengolahan gula menggunakan metode DRK yang akan memberikan penurunan warna sesuai dengan standar ICUMSA 420 (Pratama & Garside, 2021). Terdapat 3 parameter mutu pada proses pemurnian yaitu warna larutan, warna kristal, dan kandungan belerang. Parameter tersebut dijelaskan pada peraturan Standar kompetensi kerja nasional Indonesia (Sundaram & Jagadeesh, 2020).

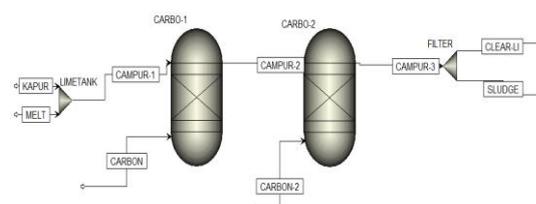
DRK adalah suatu proses pemurnian nira yang dilakukan dengan penambahan susu kapur pada pH 7,2 – 7,4 dan karbondioksida CO₂ sebagai penangkap atau pembersih (*clarifying agent*) (Hartanto, 2014). Proses yang optimal untuk karbonatasi yaitu pada keadaan pH antara 8,0 dan 9,5, dengan durasi reaksi 20 – 40 menit dan suhu minimum pada 80 °C (Hamerski, da Silva, Corazza, Ndiaye, & de Aquino, 2012). Proses pada DRK dilakukan dengan cara menambahkan susu kapur (Ca(OH)₂) dan menghasilkan endapan berupa sludge. Banyaknya endapan sebanding dengan banyaknya susu kapur (Ca(OH)₂) yang ditambahkan. Gas dari karbondioksida CO₂ berfungsi untuk menangkap dan mengendapkan susu kapur dan menjadi kalsium karbonat (CaCO₃) dan bahan pengotor selain gula juga ikut terabsorpsi oleh CaCO₃ sehingga endapan tersebut memudahkan dalam proses penyaringan dengan cara penyaringan *press* (Hugot, 2014). Reaksi dari proses DRK terlihat pada Persamaan $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (Koga & Kodani, 2018).

Penelitian sebelumnya telah menjelaskan bahwa metode DRK memiliki keunggulan dan kekurangan. Metode DRK dapat meningkatkan kualitas dan mutu produk gula yang dihasilkan (Pratama & Garside, 2021). DRK juga mampu meningkatkan mutu produk gula kristal putih (GKP) melalui teknologi (Hartanto, 2014). GKP dari teknologi DRK dikatakan lebih sehat (mampu menekan kandungan SO₂), sehingga dapat mempercepat pemberlakuan wajib SNI, teknologinya relatif mudah diakses di dalam negeri dan mudah dioperasikan (Subiyanto, 2013). Metode DRK belum efisien secara teknis karena tidak ada perbedaan dari metode konvensional Sulfitasi (Zain, Wibowo, & Ridjal, 2014). Analisis studi terdahulu telah menjelaskan tentang peningkatan mutu GKP dan kelayakan teknologi DRK. Analisis neraca massa dan neraca energi serta peningkatan kapasitas produksi gula menggunakan teknologi DRK masih belum pernah dilakukan.

Berdasarkan uraian di atas, topik peningkatan kapasitas produksi pada proses DRK menarik untuk dikaji agar dapat memberikan informasi tambahan, khususnya bagi industri gula di Indonesia jika ingin meningkatkan kapasitas produksi gula. Studi ini bertujuan untuk melakukan simulasi peningkatan kapasitas produksi gula yang berfokus pada proses DRK. Kapasitas produksi akan ditingkatkan dari 6000 ton/hari menjadi 8000 ton/hari. Simulasi akan dilakukan menggunakan perangkat lunak Aspen plus V11, serta membandingkan hasil neraca massa dan neraca energi dari perangkat lunak aspen plus dengan perhitungan spreadsheet. Simulator ini terdiri dari database penghitungan sifat termofisika dan kesetimbangan menggunakan model termodinamika, dan database unit operasi (Lambert, Laulan, Decloux, Romdhana, & Courtois, 2018). Analisis akan dilakukan pada tangki lime mixing, 2 tangki karbonatasi serta filter untuk mengetahui massa dan energi yang digunakan pada proses DRK.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data di lapangan, dianalisis menggunakan spreadsheet Ms. Excel® 365, dan disimulasikan menggunakan software aspen Plus® V11. Identifikasi aliran proses remelt karbonatasi dari awal pencampuran susu kapur hingga bereaksi dengan nira dilakukan dengan perhitungan neraca massa dan neraca energi pada karbonator 1 dan karbonator 2. Kondisi operasi proses yang digunakan yaitu dengan temperatur 75-80 °C dan tekanan atmosfer serta menggunakan aspen *physical property method* peng-robinson. Simulasi dan penghitungan dilakukan untuk kapasitas produksi 6.000 dan 8.000 ton/hari. Unit operasi disimulasikan terdiri dari reaktor gibbs, mixer, separator, dan filter seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

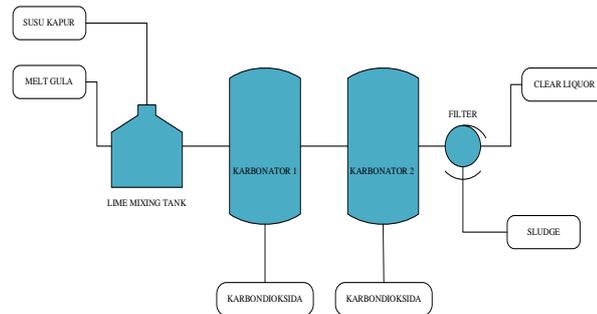


Gambar 1. Skema simulasi proses karbonatasi menggunakan Aspen Plus®

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Reaktor yang digunakan dalam simulasi yaitu reaktor gibbs karena prosesnya yang lebih simpel. Reaktor gibbs digunakan karena pada simulasi ini berfungsi untuk menganalisis neraca massa dan neraca energi dari proses karbonatasi. Reaktor gibbs umum digunakan untuk simulasi neraca energi. Komposisi dari produk dan kondisi termal dari keluaran reaktor dapat dihitung dengan minimisasi energi bebas Gibbs. Komponen yang terdapat dalam daftar simulasi semua akan diperhitungkan, kecuali jika dispesifikasikan sebagai komponen inert (Hugot, 2014). PT. IGG memiliki 2 karbonator dengan kapasitas reaktor sebesar 10.000 – 11.000 *tone cane per day* (TCD). Diagram alir proses dari karbonatasi PT. IGG dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses flow diagram (PFD) karbonatasi PT. IGG

Tabel 1. Hasil Perhitungan Neraca Massa pada Kapasitas Produksi 6.000 ton/hari

Reaktor	Massa masuk (kg/jam)	Massa keluar	
		Perhitungan Spreadsheet (kg/jam)	Perhitungan Aspen Plus (kg/jam)
Tangki lime mixing			
- Melt	52279,22	55259,875	55259,875
- Susu kapur (Ca(OH) ₂)	2979,92		
Karbonator 1			
- Melt + Ca(OH) ₂	55259,87	64013,039	64013,039
- CO ₂	8753,16		
Karbonator 2			
- Melt + Ca(OH) ₂	64013,04	72766,203	72766,203
- CO ₂	8753,16		
Tangki Clear Liquor			
- Melt + Ca(OH) ₂	72766,2	69786,243	69786,243
- Sludge	2979,96		

Tabel 1 menunjukkan penghitungan neraca massa proses karbonatasi pada kapasitas 6000 ton/hari menggunakan spreadsheet dan Aspen plus V11. Reaktor pertama adalah tangki lime mixing yang melibatkan proses pencampuran antara melt dan susu kapur (Ca(OH)₂). Melt merupakan nira yang telah melalui proses pemurnian dan evaporasi. Susu kapur berfungsi untuk menangkap kotoran yang mungkin tersisa agar mendapatkan hasil gula yang baik (Hartanto, 2014). Pada karbonator 1 dan 2 terjadi proses karbontasi, yakni reaksi (Ca(OH)₂) dengan gas CO₂ yang masuk menghasilkan CaCO₃ atau sludge (Pratama & Garside, 2021). Sludge yang terlalu banyak akan mempengaruhi efisiensi dari proses karbonatasi (Cole, Eggleston, & Wang, 2019). Sludge akan disaring dan hasil saringan akan ditampung pada tangki clear liquor.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Neraca Massa pada Kapasitas Produksi 8.000 ton/hari

Reaktor	Massa masuk (kg/jam)	Massa keluar	
		Perhitungan Spreadsheet (kg/jam)	Perhitungan Aspen Plus (kg/jam)
Tangki lime mixing			
- Melt	69702,255	73675,283	73675,283
- Susu kapur Ca(OH) ₂	3973,028		

Reaktor	Massa masuk (kg/jam)	Massa keluar	
		Perhitungan Spreadsheet (kg/jam)	Perhitungan Aspen Plus (kg/jam)
Karbonator 1			
- Melt + Ca(OH) ₂	73675,28	85345,448	85345,448
- CO ₂	11670,17		
Karbonator 2			
- Melt + Ca(OH) ₂	85345,45	97015,613	97015,613
- CO ₂	11670,17		
Tangki Clear Liquor			
- Melt + Ca(OH) ₂	97015,6	93042,584	93042,584
- Sludge	3973,03		

Tabel 2 menunjukkan penghitungan neraca massa proses karbonatasi pada kapasitas produksi 8.000 ton/hari menggunakan spreadsheet dan Aspen plus V11. Sama halnya dengan Tabel 1, Tabel 2 memberikan informasi massa masuk dan massa keluar pada setiap reaktor yang digunakan pada proses karbonatasi. Hasil perhitungan Tabel 2 mengalami kenaikan massa rata-rata 2.100 kg/jam dari hasil perhitungan Tabel 1. Hal ini dikarenakan kenaikan kapasitas produksi yang dilakukan sebesar 2.000 ton/hari. Tabel 2 juga memiliki hasil penghitungan yang sama antara penghitungan spreadsheet dengan perhitungan aspen plus. Simulasi dapat divalidasikan dengan data perhitungan manual dengan rentang nilai yang tidak jauh berbeda. Penelitian sebelumnya juga memvalidasikan data dengan simulasi dari Aspen dengan rentang yang tidak jauh berbeda (Kurniati & Qomariyah, 2018). Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa karbonator pada PT IGG masih dapat bekerja baik dengan adanya kenaikan kapasitas karena karbonator memiliki kapasitas 10.000 - 11.000 TCD, sedangkan massa masuk sebesar 97015,6 kg/jam. Kenaikan kapasitas produksi juga memengaruhi kenaikan bahan yang digunakan untuk proses karbonatasi. Bahan yang dimaksud adalah susu kapur (Ca(OH)₂) dan CO₂.

Tabel 3. Hasil Penghitungan Neraca Energi pada Kapasitas Produksi 6.000 ton/hari

	Neraca Panas Spreadsheet (kkal/jam)	Neraca Panas Aspen Plus (kkal/jam)
Tangki lime mixing	-1961,989952	-1441,646779
Karbonator 1	-2610,808607	-1466,196031
Karbonator 2	-2610,808607	-1545,109628

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan neraca energi proses karbonatasi pada kapasitas produksi 6.000 ton/hari. Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan energi pada setiap reaktor. Hal ini disebabkan karena adanya kenaikan massa pada setiap proses. Kenaikan energi akan sebanding dengan kenaikan massa yang terdapat dalam suatu reaksi (Amrul, Triyadi, & Gandidi, 2019; Muharja et al., 2019). Hasil perhitungan mengalami perbedaan antara spreadsheet dan Aspen plus, Hal ini disebabkan karena perhitungan evaluasi dengan proses simulasi menggunakan kondisi ideal sedangkan kondisi lapangan tidak ideal. Perbedaan yang terjadi juga bisa diakibatkan oleh proses reaksi yang terjadi pada simulasi berlangsung secara sempurna, sedangkan kondisi lapangan memiliki banyak faktor yang memengaruhi proses reaksi seperti waktu tinggal dan kondisi alat tersebut pada kondisi aktual (Novandy & Arpendo, 2020). Perbedaan hasil pada Tabel 3 masih dalam batas toleransi karena adanya beberapa faktor yang telah disebutkan. Dapat disimpulkan bahwa energi yang dibutuhkan akan meningkat sesuai dengan peningkatan massa pada reaktor.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Neraca Energi pada Kapasitas Produksi 8.000 ton/hari

	Neraca Energi Spreadsheet (kkal/jam)	Neraca Energi Aspen Plus (kkal/jam)
Tangki lime mixing	-2619,775673	-1441,646788
Karbonator 1	-3486,120146	-1466,196034
Karbonator 2	-3486,120146	-1545,109633

Tabel 4 merupakan hasil perhitungan neraca energi proses karbonatasi pada kapasitas produksi 8.000 ton/hari. Tabel 4 mengalami kenaikan hasil neraca energi pada setiap tangki.

Pembahasan

Berdasarkan Salah satu upaya yang dapat dilakukan oleh pemerintah guna meningkatkan mutu kualitas dan kuantitas produksi gula serta mencegah semakin tingginya angka impor gula pemerintah adalah dengan berani menerapkan metode serta inovasi terbaru. Salah satunya adalah dengan menggunakan metode DRK dalam proses pemurnian gula. DRK adalah suatu proses pemurnian nira yang dilakukan dengan penambahan susu kapur pada pH 7,2 – 7,4 dan karbondioksida CO₂ sebagai penangkap atau pembersih (*clarifying agent*) (Hartanto, 2014). Peningkatan mutu Proses karbonatasi dapat dilakukan dengan mengontakkan Ca(OH)₂ dengan CO₂. Pemurnian Karbonatasi dengan cara menambahkan susu kapur bersamaan dengan CO₂ secara terus-menerus pada tangki, diikuti dengan pemisahan pengotor yang tidak larut dan diendapkan (Galanakis, 2021). Sistem DRK pada dasarnya merupakan upaya penyempurnaan dari sistem sulfitasi karena menjanjikan output dengan mutu produk yang lebih baik. Pada penelitian ini proses karbonasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak aspen plus. Adapaun temuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Temuan pertama, dilihat dari analisis neraca panas, menunjukkan hasil yang sama antara perhitungan spreadsheet dan perhitungan aspen plus. Hal ini menunjukkan bahwa penghitungan yang telah dilakukan memiliki hasil akurat. Laporan oleh Novandy dan Arpendo (2020) juga menunjukkan beberapa hasil yang sama antara perhitungan spreadsheet dan perhitungan aspen. Santos, dkk. (2020) (Santos, Albuquerque, Meneghetti, & Soletti, 2020) memberikan data yang sama untuk perhitungan spreadsheet dan perhitungan aspen. Hasil penghitungan sesuai dengan hukum kekekalan massa yaitu pada sistem tertutup massa akan konstan meskipun terjadi reaksi didalamnya atau massa masuk sistem sama dengan massa keluar sistem (Alimny, Muharja, & Widjaja, 2019; Ramadhanti & Santosa, 2019). Dari Tabel 1 dapat disimpulkan bahwa perhitungan neraca massa menggunakan spreadsheet dan aspen plus memiliki hasil yang sama, dan telah memenuhi hukum kekekalan massa.

Temuan kedua, berdasarkan analisis neraca energi proses karbonatasi pada kapasitas produksi 6.000 ton/hari menunjukkan bahwa terjadi peningkatan energi pada setiap reaktor. Hal ini disebabkan oleh adanya kenaikan massa pada setiap proses. Kenaikan energi akan sebanding dengan kenaikan massa yang terdapat dalam suatu reaksi (Amrul, Triyadi, & Gandidi, 2019; Muharja et al., 2019). Hasil penghitungan mengalami perbedaan antara spreadsheet dan aspen plus, Hal ini disebabkan karena perhitungan evaluasi dengan proses simulasi menggunakan kondisi ideal sedangkan kondisi di lapangan tidak ideal. Perbedaan yang terjadi juga bisa diakibatkan proses reaksi yang terjadi pada simulasi berlangsung secara sempurna sedangkan kondisi lapangan memiliki banyak faktor yang mempengaruhi proses reaksi seperti waktu tinggal dan kondisi alat tersebut pada kondisi aktual (Novandy & Arpendo, 2020). Penghitungan spreadsheet hanya berfokus pada bahan, sedangkan perangkat lunak telah dikembangkan untuk menghitung zat lain yang muncul pada proses tersebut, seperti air, uap, dan udara yang menjadi hasil samping proses (Morris, Geiger, & Fine, 2012). Perbedaan hasil pada Tabel 3 masih dalam batas toleransi karena adanya beberapa faktor yang telah disebutkan. Dapat disimpulkan bahwa energi yang dibutuhkan akan meningkat sesuai dengan peningkatan massa pada reaktor.

Sedangkan neraca energi proses karbonatasi pada kapasitas produksi 8.000 ton/hari. Tabel 4 menunjukkan terjadi kenaikan hasil neraca energi pada setiap tangki. Kenaikan energi yang terjadi diakibatkan adanya kenaikan volum pada bahan (Santos et al., 2020). Perhitungan menggunakan spreadsheet mengalami kenaikan yang signifikan, sedangkan perhitungan menggunakan aspen plus hanya mengalami sedikit kenaikan. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh proses simulasi pada aspen plus berlangsung secara sempurna sedangkan pada penghitungan spreadsheet terdapat kotoran yang ikut bereaksi (Dogbe et al., 2018; Novandy & Arpendo, 2020). Perbedaan juga dapat disebabkan oleh pemodelan sistem aspen plus mengabaikan efek dari energi lainnya dalam sistem karena perubahan karakteristik dari bahan terfluidasi (Zhang, Banerjee, Zhou, & Agarwal, 2015). Dari tabel 4 dapat disimpulkan bahwa kebutuhan energi selaras dengan banyaknya massa pada reaksi tersebut. Perbedaan hasil penghitungan dapat terjadi akibat beberapa faktor, salah satunya adalah kondisi reaksi yang sempurna pada aspen plus, sedangkan penghitungan spreadsheet mengikuti kondisi lapangan. Dari studi ini, simulasi peningkatan kapasitas produksi gula akan berguna untuk mempermudah proses desain karbonator pada kenaikan kapasitas produksi atau penggantian metode pemurnian.

4. SIMPULAN

Kenaikan kapasitas produksi gula pada PT IGG mengakibatkan kenaikan kebutuhan susu kapur dan gas karbondioksida (CO₂) untuk bereaksi pada proses karbonatasi. Kebutuhan susu kapur dapat

dilihat pada hasil neraca massa tangki lime mixing dengan kenaikan kebutuhan sebesar 26,39% dari massa awal. Penghitungan neraca massa menggunakan spreadsheet dan aspen plus memiliki hasil yang sama dan telah memenuhi hukum kekekalan massa. Kenaikan kapasitas produksi masih dapat dioperasikan secara maksimal pada PT IGG dengan kapasitas karbonator yang dimiliki. Kebutuhan energi akan meningkat sesuai dengan peningkatan massa yang terjadi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Alimny, A. N., Muharja, M., & Widjaja, A. (2019). Kinetics of Reducing Sugar Formation from Coconut Husk by Subcritical Water Hydrolysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1373(1), 12006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1373/1/012006>.
- Amrul, A., Triyadi, D., & Gandidi, I. M. (2019). Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan Software Aspen Plus. *Jurnal Mechanical*, 10(1), 19. <https://doi.org/10.23960/mech.v10.i1.201904>.
- Arifin, B., Azam, N., Martianto, D., & Karlina, L. (2018). Modeling The Future of Indonesian Food Consumption. *National Development Planning Agency (Bappenas), World Food Programme (WFP) and Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO)*, 1–69.
- Badan Pusat Statistik. (2019). *Statistik Tebu Indonesia*. (S. S. T. Perkebunan, Ed.). Jakarta: BPS RI.
- Cole, M., Eggleston, G., & Wang, Y. J. (2019). Understanding The Causes of Calcium Carbonate Crystal Growth and Inhibition During The Carbonation Refining of Raw Sugars. *Food Chemistry*, 275(September 2018), 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.076>.
- Dogbe, E. S., Mandegari, M. A., & Görgens, J. F. (2018). Exergetic Diagnosis and Performance Analysis of A Typical Sugar Mill Based on Aspen Plus® Simulation of the Process. *Energy*, 145, 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.134>.
- Galanakis, C. M. (2021). *Nutraceutical and Functional Food Components: Effects of Innovative Processing Techniques*. Academic Press.
- Hamerski, F., da Silva, V. R., Corazza, M. L., Ndiaye, P. M., & de Aquino, A. D. (2012). Assessment of Variables Affects on Sugar Cane Juice Clarification by Carbonation Process. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(2), 422–428. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02857.x>.
- Hartanto, E. S. (2014). Peningkatan Mutu Produk Gula Kristal Putih melalui Teknologi Defekasi Remelt Karbonatasi. *Jurnal Standardisasi*, 16(3), 215–222. <https://doi.org/10.31153/js.v16i3.197>.
- Hugot, E. (2014). Carbonation. In E. B. T.-H. of C. S. E. HUGOT (Ed.), *Handbook of Cane Sugar Engineering* (pp. 284–292). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3190-7.50036-2>.
- Koga, N., & Kodani, S. (2018). Thermally Induced Carbonation of Ca(OH)₂ in A CO₂ Atmosphere: Kinetic Simulation of Overlapping Mass-Loss and Mass-Gain Processes in A Solid-Gas System. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(41), 26173–26189. <https://doi.org/10.1039/c8cp05701j>.
- Kurniasari, I., Darwanto, D. H., & Widodo, S. (2015). Permintaan Gula Kristal Mentah Indonesia. *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, 18(1), 24. <https://doi.org/10.22146/ipas.6173>.
- Kurniati, Y., & Qomariyah, L. (2018). Prediksi Solubilitas (Absorpsi) Gas CO₂ dalam Larutan Potassium Karbonat (K₂CO₃) dan MDEA Menggunakan Simulasi ASPEN. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v2i1.19>.
- Lambert, C., Laulan, B., Decloux, M., Romdhana, H., & Courtois, F. (2018). Simulation of a sugar beet factory using a chemical engineering software (ProSimPlus®) to perform Pinch and exergy analysis. *Journal of Food Engineering*, 225, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.004>.
- Morris, A. E., Geiger, G., & Fine, H. A. (2012). *Handbook on material and energy balance calculations in material processing*. John Wiley & Sons.
- Muharja, M., Umam, D. K., Pertiwi, D., Zuhdan, J., Nurtono, T., & Widjaja, A. (2019). Enhancement of sugar production from coconut husk based on the impact of the combination of surfactant-assisted subcritical water and enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology*, 274(November 2018), 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.074>.
- Novandy, A., & Arpendo, D. (2020). Optimasi Penggunaan Benfield / Pottasium Carbonate (K₂CO₃) pada Menara Absorber E-101 CO₂ Removal di Departemen Produksi IA PT Petrokimia Gresik. *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom*, 2(1), 06–18. <https://doi.org/10.37525/mz/2020-1/246>.
- Nurjanah, S. (2015). Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Impor Gula di Indonesia. *Economics Development Analysis Journal*, 4(2), 182–191. <https://doi.org/10.15294/edaj.v4i2.14822>.
- Pratama, H. S., & Garside, A. K. (2021). Peningkatan Mutu Gula dengan Metode DRK (Defekasi-Remelt-Karbonatasi) pada Proyek Revitalisasi Pabrik Gula Asembagus di Situbondo. In *Seminar Keinsinyuran* (Vol. 2797–1775, pp. 33–39).
- Ramadhanti, A. R., & Santosa, S. (2019). Persen Yield (%Yield) sebagai Parameter Evaluasi Proses Kinerja

- Raw Mill pada Industri Semen. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 5(1), 24–28. <https://doi.org/10.33795/distilat.v5i1.11>.
- Santos, M. C., Albuquerque, A. A., Meneghetti, S. M. P., & Soletti, J. I. (2020). Property Modeling, Energy Balance and Process Simulation Applied to Bioethanol Purification. *Sugar Tech*, 22(5), 870–884. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00841-y>.
- Solomon, S. (2016). Sugarcane Production and Development of Sugar Industry in India. *Sugar Tech*, 18(6), 588–602. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0494-2>.
- Subiyanto, S. (2013). Kelayakan Tekno-Ekonomi Migrasi Teknologi Proses Produksi Gula Kristal Putih dari Sulfitasi ke Defekasi Remelt Karbonatasi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Indonesia*, 14(1), 56–61. <https://doi.org/10.29122/jsti.v14i1.906>.
- Sundaram, M. S., & Jagadeesh, K. (2020). Sugar Quality: Process Options to Address Sustainability of Sugar Industry. In *Sugar and Sugar Derivatives: Changing Consumer Preferences* (pp. 77–91). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6663-9_5.
- Zain, A., Wibowo, R., & Ridjal, J. A. (2014). Impact of Carbonatation Remelt Milling System on Performance of Semboro Sugar Factory Jember Regency. *Jurnal Berkala Ilmiah Pertanian*, 1(1), 1–12.
- Zhang, X., Banerjee, S., Zhou, L., & Agarwal, R. (2015). Process Simulation and Maximization of Energy Output in Chemical-Looping Combustion Using ASPEN Plus. *International Journal of Energy and Environment*, 6(2), 201.