

PERHITUNGAN *MASS BALANCE*, *HEAT BALANCE* DAN LUAS PERPINDAHAN PANAS TERHADAP BRIX PADA STASIUN PENGUAPAN PG KREBET BARU II

Fadila Nurfafrina¹, Luchis Rubianto¹, Pandu Jati Ramadhan²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²PT Rajawali Nusantara Indonesia, PG Kreet Baru II Jl. Raya Kreet No.10 Malang 65171, Indonesia
dilaverent5@gmail.com ; [luchis.rubianto@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Pabrik Gula Kreet Baru II yang terletak di Malang merupakan pabrik gula yang didirikan oleh pemerintah Hindia Belanda dengan kapasitas harian sebanyak 5800 ton/hari. Industri gula merupakan salah satu industri berbasis pertanian dengan menjadikan tebu sebagai bahan baku untuk menghasilkan gula. Pada proses pembuatan gula, proses penguapan merupakan proses yang cukup penting untuk memekatkan suatu larutan (nira encer) yang terdiri dari zat terlarut yang memiliki titik didih tinggi dan zat pelarut yang memiliki titik didih lebih rendah, sehingga dihasilkan larutan yang lebih pekat (nira kental) serta memiliki konsentrasi yang tinggi. PG Kreet Baru II mengoperasikan *evaporator* (stasiun penguapan) secara *quintuple-effect*, dimana ada 5 *evaporator* yang dioperasikan secara paralel. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan mengenai neraca massa (*mass balance*), neraca energi (*heat balance*) dan luas perpindahan panas pada setiap *evaporator*. Hasil yang didapatkan untuk neraca massa yaitu 205,23 ton/jam, untuk neraca energi yaitu 3449,90 kW/jam. Sedangkan luas perpindahan panas pada setiap *evaporator* pada tekanan 0,9 kg/cm² berturut-turut 4096,544258 m²; 5493,948288 m²; 4801,174205 m²; 4326,714024 m²; 3884,898784 m². Luas perpindahan panas pada *evaporator* dapat mempengaruhi brix yang dihasilkan dari setiap *evaporator* dan diharapkan nira kental yang keluar dari stasiun penguapan memiliki brix sebesar 65%.

Kata kunci: *brix, evaporator, nira, stasiun penguapan*

ABSTRACT

Kreet Baru II Sugar Factory, located in Malang, is a sugar factory established by the Dutch East Indies government with a daily capacity of 5800 tons. The sugar industry is one of the agriculture-based industries by using sugar cane as raw material to produce sugar. In the process of making sugar, the evaporation process is a fairly important process to concentrate a solution (dilute nira) consisting of solutes that have a high boiling point and solvents that have a lower boiling point, resulting in a more concentrated solution (thick nira) and has a high concentration. SF Kreet Baru II operates evaporators (evaporation stations) in a quintuple-effect manner, where there are 5 evaporators operated in parallel. In this study, calculations were made regarding mass balance, energy balance and heat transfer area in each evaporator. The results obtained for the mass balance are 205.23 tons/hour, for the energy balance is 3449,90 kW/hour. While the heat transfer area in each evaporator at a pressure of 0.9 kg/cm² is 4096.544258 m²; 5493.948288 m²; 4801.174205 m²; 4326.714024 m²; 3884.898784 m² respectively. The heat transfer area in the evaporator can affect the brix produced from each evaporator and it is expected that the thick juice coming out of the evaporation station has a brix of 65%.

Keywords: *brix, evaporator, nira, evaporation station*

1. PENDAHULUAN

Industri gula merupakan salah satu industri berbasis pertanian dengan menjadikan tebu sebagai bahan baku untuk menghasilkan gula, proses pengolahan tebu menjadi gula menghasilkan produk sampingan (*by-products*) berupa ampas tebu, tetes tebu dan blotong. Pengolahan gula melibatkan serangkaian proses yang kompleks, mulai dari penerimaan bahan baku, pemurnian, penguapan, kristalisasi, hingga pengemasan. Kebutuhan gula nasional Indonesia pada tahun 2023 berkisar 3 juta ton, pada tahun 2023 PG Krebet Baru II dapat menghasilkan sebanyak 1,8 juta ton dengan kapasitas harian sebanyak 5800 ton [1].

Pada proses pembuatan gula, proses penguapan (*evaporasi*) bertujuan untuk memekatkan nira jernih dengan cara menguapkan air yang terdapat pada nira [2]. *Evaporator* adalah suatu alat yang digunakan untuk memisahkan dua fase antara *liquid* gas dan *liquid* cair dengan menggunakan media pemanas, manfaat dari *evaporator* pada industri gula yaitu untuk mengentalkan dan menurunkan aktivitas air [3]. Prinsip kerja pada proses *evaporasi* dengan menambahkan kalor untuk memekatkan suatu larutan yang terdiri dari zat terlarut yang memiliki titik didih tinggi dan zat pelarut yang memiliki titik didih lebih rendah sehingga dihasilkan larutan yang lebih pekat serta memiliki konsentrasi yang tinggi.

Suhu tinggi pada saat proses penguapan meningkatkan jumlah gula *invert* yang dapat berdampak negatif terhadap efisiensi Pabrik gula. Fruktosa dan glukosa merupakan gula kristal yang mudah terhidrolisis. Untuk menjaga kualitas rasa dan kandungan gula kristal, proses penguapan dilakukan pada suhu dan tekanan rendah [4]. Cara yang dapat menekan inversi adalah dengan menerapkan sistem *multiple effect* pada stasiun penguapan. Sistem ini memastikan proses pemanasan dilakukan dalam sistem vakum, dengan menurunkan tekanan di dalam *evaporator*, suhu operasi dapat diturunkan seminimal mungkin [5]. Pada Pabrik Gula digunakan sistem *bleeding* agar kebutuhan uap dari *boiler* akan berkurang dan dapat dialihkan untuk kebutuhan stasiun lain. Sistem *bleeding* dapat mengurangi konsumsi energi sebanyak 23% [6].

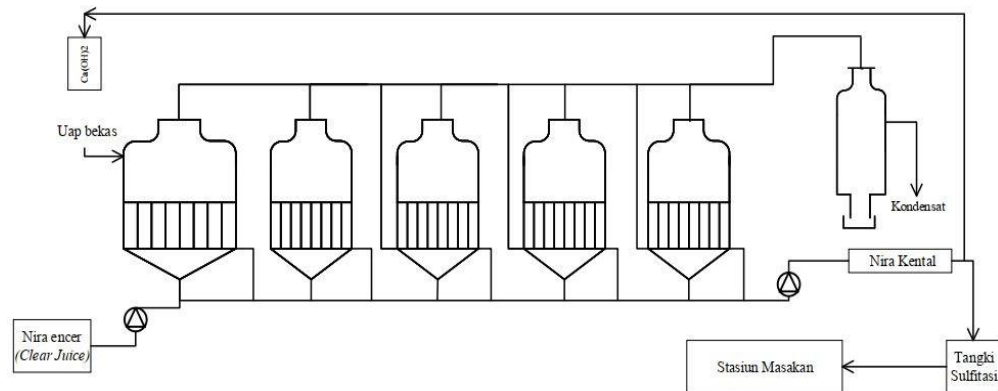
Neraca massa merupakan suatu perhitungan yang tepat dari semua bahan-bahan yang masuk, terakumulasi dan keluar dalam waktu tertentu. Sedangkan neraca panas merupakan persamaan yang menyatakan hubungan antara panas masuk dan panas keluar suatu sistem [7]. Neraca massa dan neraca energi dilakukan untuk setiap proses mengarah pada kuantifikasi panas, uap, emisi gas, dan limbah. Sehingga konsumsi energi pada pabrik gula merupakan salah satu indikator penting untuk menunjukkan efisiensi dan kinerja pada peralatan pemanasnya [8].

Pada penelitian ini, perhitungan neraca massa, neraca energi dan luas perpindahan panas mempengaruhi brix yang keluar dari masing-masing *evaporator* [3].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian untuk perhitungan neraca massa stasiun penguapan pada Pabrik Gula Krebet II menggunakan metode observasi dan kuantitatif, metode penelitian kuantitatif dilakukan menggunakan acuan pada buku *Basic Principles And Calculation In Chemical Engineering* [7].

Data yang diolah pada penelitian ini, merupakan data primer yang diambil dari unit kerja, data ini diambil dari data yang berisi rekapan hasil proses dari alat-alat yang beroperasi pada unit kerja pabrikasi.



Gambar 1. Skema alur proses stasiun penguapan

2.1. Menghitung *Mass Balance*

Persamaan yang digunakan dalam menghitung neraca massa input:

2.1.1 Massa Nira Mentah

$$= \text{tebu digiling} / \text{jam} = \text{kapasitas} \frac{\text{ton}}{\text{hari}} \times 1 \text{ hari} / 24 \text{ jam} \quad (1)$$

$$\text{Nira mentah netto} = \text{tebu digiling} \frac{\text{ton}}{\text{jam}} \times \text{nira mentah \%tebu} \quad (2)$$

2.1.2 Massa Nira Encer

$$= \text{tebu digiling} / \text{jam} = \text{kapasitas} \frac{\text{ton}}{\text{hari}} \times 1 \text{ hari} / 24 \text{ jam} \quad (3)$$

$$\text{Nira mentah netto} = \text{tebu digiling} \frac{\text{ton}}{\text{jam}} \times \text{nira encer \%tebu} \quad (4)$$

2.1.3 Distribusi Uap Setiap *Evaporator* [9]

a. Tekanan terdistribusi

$$= \text{rasio distribusi} \times \text{selisih tekanan} \quad (5)$$

b. Tekanan pada Setiap *Evaporator*

$$= \text{tekanan pada } \textit{evaporator} \text{ sebelumnya} - \text{tekanan } \textit{evaporator} \quad (6)$$

2.1.4 Distribusi Suhu Uap [9]

Pada bagian ini, akan dilakukan perhitungan suhu pada setiap *evaporator*, konversi panas laten pada setiap *evaporator* dan *temperatur drop* setiap *evaporator*. Perhitungan suhu dan konversi panas laten pada masing-masing *evaporator* dilakukan interpolasi dari data yang telah dikemukakan oleh Geankoplis(1993) [10].

Selanjutnya perhitungan *temperature drop* pada setiap *evaporator* dengan persamaan:

$$= \text{Suhu Uap dari } \textit{evaporator} \text{ sebelumnya} - \text{Suhu } \textit{evaporator} \quad (7)$$

2.1.5 Kebutuhan Uap Bleeding [3]

a. Kebutuhan I (*Juice Heater*)

$$\text{Kalor Jenis Larutan yang Masuk JH I} = 1 - (0,006 \times \text{brix}_{\text{Nira Mentah}}) \quad (8)$$

$$\text{Mass rate uap bleeding I} = \frac{m_{\text{Nira Mentah}} \times C_p \times (T_{\text{evaporator}} - T_{\text{nira masuk JHI}})}{\text{Panas Laten Evaporator I}} \quad (9)$$

$$\text{Uap vakum} = \frac{2}{3} \times 120 \text{ kg/ton} \times \text{kapasitas giling} \quad (10)$$

b. Kebutuhan II

$$\text{Kalor Jenis Larutan yang Masuk JH I} = 1 - (0,006 \times \text{brix}_{\text{Nira Mentah}}) \quad (11)$$

$$\text{Mass rate uap bleeding I} = \frac{m_{\text{Nira Mentah}} \times C_p \times (T_{\text{evaporator}} - T_{\text{nira masuk JHI}})}{\text{Panas Laten Evaporator I}} \quad (12)$$

2.1.6 Total *Steam* yang Masuk ke *Evaporator* (Uap Bekas)

$$H = \frac{E_1 \times \text{Panas laten evaporator I}}{\text{panas laten steam}} \quad (13)$$

H = Total *steam* yang masuk ke *evaporator* (ton/jam)

E = Total air yang diuapkan pada *evaporator* I

2.1.7 Total Air yang Diuapkan [9]

$$E = J - S = J \left(1 - \left(\frac{B_j}{B_s} \right) \right) \quad (14)$$

E = Air yang diuapkan (ton/jam)

J = *Flowrate* Nira encer (ton/jam)

S = *Flowrate* Nira keluar dari *evaporator* (ton/jam)

B_j = Brix Nira encer (%)

B_s = Brix Nira kental (%)

2.1.8 Air yang Diuapkan pada Setiap Tangki

Seperti yang dikemukakan oleh Hugot (1986) perhitungan air yang diuapkan pada setiap *evaporator* menggunakan perumpamaan huruf seperti pada tabel dibawah ini [9]:

Tabel 1. Persamaan untuk mengetahui banyaknya air yang diuapkan pada setiap tangki *evaporator* [9]

Nomor <i>Evaporator</i>	Produksi Uap
Evaporator 1	2x+2y+2z
Evaporator 2	x+y+z
Evaporator 3	y+z
Evaporator 4	z
Evaporator 5	z

Sehingga persamaan yang didapatkan = 3x+4y+6z (15)

2.1.9 Nira Kental Keluar dari Setiap *Evaporator*

= *Flowrate* nira masuk *evaporator* – air yang diuapkan (16)

2.1.10 Brix Nira yang Keluar dari Setiap *Evaporator*

$$= \left(\frac{\text{mass rate nira masuk evaporator}}{\text{mass rate keluar evaporator}} \right) \times \text{Brix} \quad (17)$$

2.1.11 Brix Rata-rata Setiap *Evaporator*

$$= \frac{\text{Brix masuk} + \text{Brix Keluar}}{2} \quad (18)$$

2.2. Menghitung *Heat Balance*

2.2.1 Kalor Jenis Setiap *Evaporator*

$$= 1 - (0,006 \times \text{Brix}) \quad (19)$$

2.3. Menghitung Luas Perpindahan Panas *Evaporator*

Luas perpindahan panas *evaporator* dihitung dengan kecepatan *evaporator* dan *real temperature drop*. Perhitungan tersebut dihitung dengan persamaan:

2.3.1 Kecepatan *Evaporator*

$$= (\text{Kebutuhan I Bleeding} + \text{Flowrate Nira keluar setiap Pan}) \times 1000 \quad (20)$$

2.3.2 *Real Temperature Drop*

$$= \text{Suhu } \textit{Evaporator} - \text{Suhu masuk } \textit{evaporator} \quad (21)$$

2.3.3 Luas Perpindahan Panas

$$S_p = \frac{q_p}{c \times \Delta T_p} \quad (22)$$

S_p = Luas Perpindahan Panas (m^2)

q_p = Kecepatan *evaporator* (kg/jam)

c = Dessin formula Koefisien Penguapan Spesifik ($\text{kg}/\text{m}^2/^\circ\text{C}/\text{jam}$)

ΔT_p = *Temperature Drop* ($^\circ\text{C}$)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Nira yang telah mengalami proses pemurnian masih mengandung air, untuk memisahkan air maka digunakan alat penguap. Penguapan adalah suatu proses menghilangkan zat pelarut dari dalam larutan dengan menggunakan panas. Zat pelarut dalam proses penguapan nira adalah air, apabila nira dipanaskan maka akan terjadi penguapan molekul air. Sumber panas yang digunakan adalah uap panas [11].

Evaporator merupakan suatu alat yang digunakan untuk proses evaporasi. Pada industri gula manfaat dari alat ini yaitu untuk mengentalkan nira sebelum diolah lebih lanjut dan untuk menurunkan aktivitas air. Pada PG Kribet Baru II menggunakan jenis *evaporator* kalandria, sehingga tinggi *liquid* pada tube hamper sama dengan tinggi tube [2]. Pemanasan pada stasiun penguapan menggunakan uap bekas untuk *evaporator* I, selanjutnya uap nira dari badan I ini dialirkan ke badan II untuk menjadi bahan pemanasnya. Uap nira dari badan II sebagai pemanas untuk badan III dan air kondensat untuk mengisi ketel. Uap nira dari badan III digunakan sebagai pemanas pada badan IV dan air kondensatnya apabila mengandung gula dipergunakan sebagai air proses, apabila tidak mengandung gula tetap sebagai air pengisi ketel. Nira dipanaskan pada badan IV digunakan sebagai pemanas pada badan V [5].

Mengikuti langkah-langkah pada bab 2 maka didapatkan nilai mass balance, heat balance, dan luas perpindahan panas.

Tabel 2. Mass balance total 5 evaporator

Komponen	Input (ton/jam)	Output (ton/jam)
Steam	1,19	0
Nira Encer	204,04	0
Kondensat	0	1,19
Total Uap Nira	0	166,40
Nira Kental	0	37,64
Total	205,23	205,23

Laju alir nira encer yang masuk dan nira kental yang keluar dari stasiun penguapan dapat menghitung brix (%) yang keluar pada setiap *evaporator*. *Steam* yang masuk pada stasiun penguapan berupa uap panas (uap bekas) yang berasal dari *boiler* yang menggunakan ampas tebu (*bagasse*), produk samping dari proses pemerahan nira kemudian dijadikan bahan bakar utama untuk memproduksi uap panas bertekanan tinggi dan sebagai penggerak turbin uap untuk memenuhi kebutuhan listrik [12].

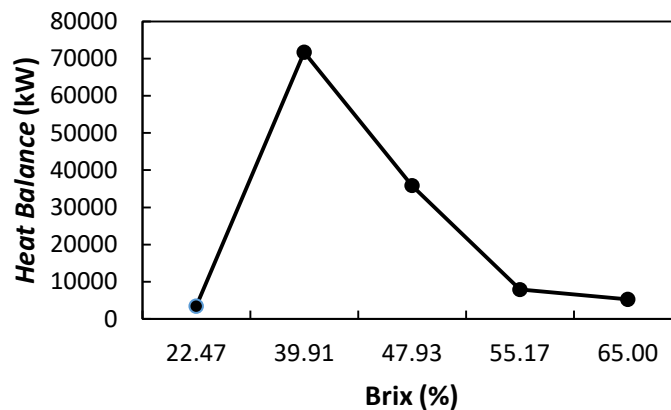
Dalam teori perpindahan panas yang dipengaruhi oleh perbedaan suhu antara dua atau lebih cairan yang berbeda, panas berpindah dari cairan yang lebih panas ke cairan yang lebih dingin [13]. Kebutuhan uap pemanas dalam stasiun penguapan diukur berdasarkan tekanan uap yang mengalir sepanjang pipa uap bekas.

Tabel 3. Kebutuhan daya pada stasiun penguapan

Komponen	Input (kW/jam)	Output (kW/jam)
<i>Steam</i>	893,46	0
Nira Encer	2556,44	0
Kondensat	0	5010,82
Total Uap Nira	0	4982,78
Nira Kental	0	213,19
loss	0	6756,89
Total	3449,90	3449,90

Nilai *heat balance* pada tekanan $0,9 \text{ kg/cm}^2$ sebesar 2968928,85 kkal/jam atau 3449,90 kW/jam seperti pada Tabel 3, hal ini disebabkan semakin besar konsentrasi nira maka kenaikan titik didih semakin bertambah [14]. Sehingga titik didih nira menjadi lebih besar dibandingkan dengan titik didih air.

Gambar 2 menunjukkan pada *evaporator* 2 laju daya kenaikan signifikan, hal tersebut dikarenakan laju massa uap bekas bernilai lebih rendah dibandingkan dengan laju massa uap bekas pada *evaporator* 1. Kemudian pada *evaporator* 3-5 terdapat penurunan daya, hal itu disebabkan oleh semakin tinggi suhu nira dan nira semakin mengental. *Steam* pada badan penguapan pertama sangat menentukan keseimbangan energi secara keseluruhan di stasiun penguapan. Sementara banyaknya uap yang dihasilkan pada setiap *evaporator* bergantung pada tingkat kebersihan *evaporator* dari kerak maupun korosi [15].

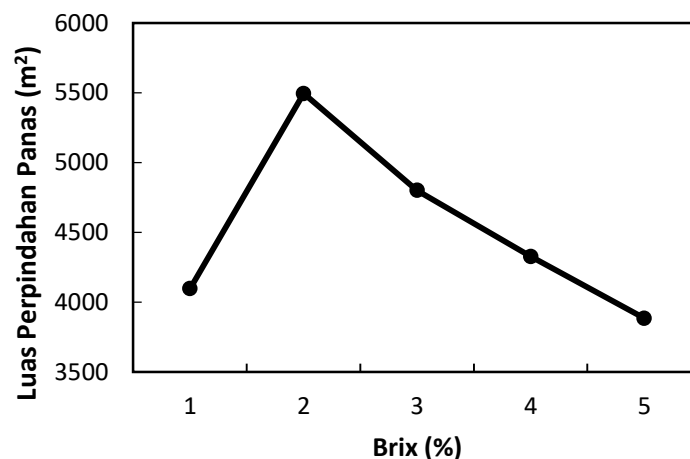


Gambar 2. Hubungan daya yang dibutuhkan setiap *Evaporator* terhadap brix

Tabel 4. Nilai luas perpindahan panas pada setiap *evaporator*

Nomor <i>Evaporator</i>	Luas Perpindahan Panas Tiap Pan <i>Evaporator</i> (m ²)
<i>Evaporator</i> 1	4096,544258
<i>Evaporator</i> 2	5493,948288
<i>Evaporator</i> 3	4801,174205
<i>Evaporator</i> 4	4326,714024
<i>Evaporator</i> 5	3884,898784

luas perpindahan panas pada *evaporator* 2 memiliki angka lebih besar, jika dibandingkan dengan daya yang dibutuhkan pada *evaporator* 2 maka besarnya luas perpindahan panas relevan.



Gambar 3. Pengaruh luas perpindahan panas terhadap brix

Gambar 3 menunjukkan bahwa luas perpindahan panas pada *evaporator* 2 lebih besar. Hal ini disebabkan oleh laju massa yang besar pada *evaporator* 2. Pada *evaporator* 3-5 terdapat penurunan luas perpindahan panas, karena konsentrasi nira yang semakin tinggi. Sehingga kontak antara uap panas dengan nira menjadi berkurang, dan menyebabkan penurunan laju penguapan [16].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada artikel ini didapatkan bahwa PG Krebet Baru II dengan kapasitas giling harian sebesar 5800 ton. Stasiun penguapan merupakan stasiun penting dimana terjadi proses penguapan nira cari menjadi nira kental dengan menguapkan air pada nira cair, sehingga konsentrasi nira menjadi lebih tinggi. Mass balance pada perhitungan ini didapatkan sebesar 205,23 ton/jam dengan kebutuhan daya sebesar 3449,90 kW/jam. Luas perpindahan panas pada masing-masing evaporator mempengaruhi brix yang keluar, sehingga didapatkan luas perpindahan panas pada stasiun penguapan secara berturut-turut 4096,544258 m²; 5493,948288 m²; 4801,174205 m²; 4326,714024 m²; 3884,898784 m².

Penelitian lebih lanjut dapat mendalami mengenai pengaruh banyaknya daya yang digunakan pada tiap *evaporator* terhadap pengaruh hasil brix yang keluar dari tiap tabung *evaporator*. Penelitian juga dapat diperluas pada efisiensi pemanasan pada stasiun penguapan PG Krebet Baru II.

REFERENSI

- [1] A. F. Faputri, "Desain Evaporator dan Pengujian Kondisi Operasi Optimal pada Desain Peralatan," *Jurnal Teknik Patra Akademika* 7, vol.2, hal. 17-23, 2016.
- [2] E. A. Storia and Prabowo, "Pengaruh Brix Terhadap Karakteristik Perpindahan Panas pada Evaporator Robert Sistem Quintuple Effect di PG. Gempolkrep," *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 5, No. 1, hal. B7-B12, 2016.
- [3] T. Natalia, "Kondisi Gula RI Ngeri-Ngeri Sedap, Begini Fakta Pahitnya," CNBC Indonesia, 15 Maret 2024. [Online]. Available: <https://www.cnbcindonesia.com/research/20240315114941-128-522244/kondisi-gula-ri-nger-nger-sedap-begini-fakta-pahitnya#:~:text=Dia%20memaparkan%2C%20stok%20gula%20nasional,untuk%20kebutuhan%20industri%20dan%20lainnya..>
- [4] S. Chantasiriwan, "Optimum Surface Area Distribution in Co-Current Multiple-Effect Evaporator," *Journal of Food Engineering*, vol. 161, hal. 48-54, 2015.
- [5] R. Wulandari and L. H. Saputri, "Performance Evaluation of Evaporation Station Based on Steam Efficiency Used at PT. PG Rajawali II, PG. Sindang Laut, Cirebon," *Jurnal Pengelolaan Perkebunan*, vol. 2, No.2, hal. 73-80, 2021.
- [6] M. I. Ardiansyah, A. S. Wijaya, D. R. Wulan and A. Suwito, "Analisis Pengaruh Tekanan Uap Bekas Terhadap Karakteristik Perpindahan Panas Sistem Evaporator 5 Efek pada PG. Kedawoeng, Pasuruan," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8 (1), hal. 185-195, 2022.
- [7] H. Chalim, Ariani and M. Mufid, "Koefisien Perpindahan Kalor Total (U) Sistem Air Etilen Glikol menggunakan Alat Penukar Kalor Shell and Tube 1-1," *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Proses Industri Kimia*, Daring, 2017.
- [8] D. Wardhana, E. D. Jannati and H. Budiman, "Analisis Kerja Mesin Cane Unigrator Dengan Penggerak Steam Turbine Di PT. Pabrik Gula Rajawali li Jatitujuh," *Seminar Teknologi Majalengka 4.0*, Fakultas Teknik Universitas Majalengka, 2019.
- [9] Soerjadi, Peranan Komponen Batang Tebu dalam Pabrikasi Gula, Yogyakarta: LPP, 1977.

- [10] Geankoplis, Transport Process and Unit Operations, 3rd Edition, 1993.
- [11] Hugot, Handbook of Cane Sugar Engineering Second Edition, Australia: Elsevier, 1986.
- [12] D. Nursafuan and D. Supriyatdi, "Pembuatan Gula Aren Cair dengan Pengaturan Kapur dan Suhu Evaporasi (Development of Liquid Palm Sugar with Lime and Evaporation Temperature Settings)," *Jurnal Argo Industri Perkebunan*, vol. 4, no.2, hal. 79-87, 2016.
- [13] S. Chantasiriwan, "Increased Energy Efficiency of a Backward-Feed Multiple-Effect Evaporator Compared with a Forward-Feed Multiple-Effect Evaporator in the Cogeneration System of a Sugar Factory," *Chemical Engineering Communications*, vol. 204, no.5, hal. 599-606, 2020.
- [14] Deshmukh, "Design & Analysis of Robert Type Multi-effect Evaporator for Sugar Industry," *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 6, no. 4, hal. 96-103, 2019.
- [15] D. M. Himmelblau, Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, Chicago: Pearson Education, 1976.
- [16] C. Phoosodsoong and S. Thongsan, "The Exergetic Performance Evaluation of the Quintuple Effect Evaporator in Raw Sugar Production Process," *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, vol. 15, No. 02, hal. 39-48, 2020.