

ANALISIS PENGARUH TEKANAN UAP BEKAS TERHADAP KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS SISTEM EVAPORATOR 5 EFEK PADA PG KEDAWOENG, PASURUAN

Moch. Ichsan Ardiansyah¹, Agung Suwandi Wijaya¹, Dyah Ratna Wulan¹, Agus Suwito²

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

²PTPN XI PG Kedawoeng, Jl. Kedawoeng kulon No. KM, RW.1, Kec. Grati, Pasuruan, Indonesia

moch.ichsan.ardiansyah@gmail.com ; [ratnawln@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Pabrik Gula Kedawoeng memiliki kapasitas produksi 2.400 TCD. Kristal gula diperoleh dari evaporasi nira bertingkat 5 efek (*quintuple-effect evaporator*) bersuplai pemanas berupa uap bekas ketel. Parameter keberhasilan unit evaporator adalah konsentrasi nira produk 64% brix. Namun, pada kondisi tertentu ditemukan nira 58% brix yang diakibatkan perubahan tekanan uap bekas dari 0,6 kg/cm² menjadi 0,4 kg/cm². Tujuan penelitian ini menganalisis karakteristik perpindahan panas akibat perubahan tekanan uap bekas terhadap konsentrasi nira tiap efek. Penelitian dilakukan dengan perhitungan neraca panas dengan data eksperimental: brix nira, temperatur uap, laju uap, dan titik didih nira. Didapatkan panas total sistem pada tekanan 0,6 kg/cm² dan 0,4 kg/cm² berturut-turut 470.823,06 kJ/kg dan 453.088,55 kJ/kg. Tren nilai U semakin turun tiap efek, dengan tekanan uap bekas lebih yang lebih rendah. Hal yang sama ditemui pada laju perpindahan panas, dengan beda nilai yang insignifikan. Area pemanas tiap efek dihitung pada tekanan 0,4 kg/cm² berturut-turut sebesar 1806,095 m²; 900,37 m²; 943,45 m²; 941,33 m²; 438,68 m², sedangkan tekanan 0,6 kg/cm² area pemanas sebesar 1650,63 m²; 816,08 m²; 806,7 m²; 757,78 m²; 679,37 m². Area pemanas pada tekanan 0,4 kg/cm² bernilai lebih tinggi dari keadaan aktual sebesar 1800 m² untuk efek 1 dan 900 m² untuk efek 2 – 5, berdampak pada transfer panas yang tidak maksimal. Area pemanas dan panas total sistem pada tekanan 0,6 kg/cm² diharapkan dapat menjadi parameter kontrol proses tambahan untuk mencapai konsentrasi nira produk 64% brix.

Kata kunci: Area pemanas, brix, evaporator, koefisien perpindahan panas, uap bekas

ABSTRACT

Kedawoeng sugar factory has a capacity of 2,400 TCD. Sugar crystal is produced via a 5-effect evaporator with boiler steam as the heating supply. The evaporation process works well only if the juice reached 64% brix. However, its concentration dropped to 58% due to changes in the steam pressure from 0.6 kg/cm² to 0.4 kg/cm². Therefore, it is necessary to analyze the characteristics of heat transfer due to changes in the steam pressure on the juice concentration for each effect. The research was carried out using heat balance involving experimental data: brix juice, steam temperature, vapor rate, and boiling point of juice. Calculation obtains the total heat of the system at 0.6 kg/cm² and 0.4 kg/cm² is 470.823.06 kJ/kg and 453.088.55 kJ/kg, respectively. It is also shows that U value is decreasing for each effect, with a lower steam pressure giving a lower U value. The same thing also happened in the heat transfer rate, with an insignificant difference in value. The heating area of each effect was calculated at 0.4 kg/cm² giving 1806.095 m²; 900.37 m²; 943.45 m²; 941.33 m²; 438.68 m² respectively, while at 0.6 kg/cm² it is 1650.63 m²; 816.08 m²; 806.7 m²; 757.78 m²; 679.37 m². The heating area at 0.4 kg/cm² is higher than the actual condition of 1800 m² (1st effect) and 900 m² for the rest, resulting in improper heat transfer. Heat area calculated at 0.6 kg/cm² are expected to be an additional control parameter, to meet 64 % brix.

Keywords: Brix, evaporator, heating surface area, heat transfer coefficient, steam

1. PENDAHULUAN

Salah satu komoditas yang strategis dan memegang peranan penting dalam sektor pertanian khususnya sub sektor perkebunan dalam perekonomian nasional adalah komoditas gula. Hasil rilis Kementerian Pertanian dalam *Sugarcane Outlook*[1] menyebutkan bahwa kebutuhan konsumsi domestik di tahun 2020 mencapai 7.200.000 MT, sementara produksi dalam negeri baru mencapai 2.050.000 MT, sehingga untuk memenuhi kebutuhan konsumsi gula dalam negeri, negara masih melakukan impor gula.

PT Perkebunan Nusantara XI (PTPN XI) merupakan salah satu BUMN yang bergerak di bidang pengolahan hasil pertanian yang mengusahakan komoditas gula dengan kontribusi berkisar 16 – 18% terhadap produksi nasional[2]. PG Kedawoeng telah berdiri sejak tahun 1913 dan menjadi pusat suplai gula untuk daerah Pasuruan. Tebu bahan baku berasal dari para petani di beberapa kecamatan di Kabupaten Pasuruan, seperti Rejoso, Nguling, Grati, Pohjentrek, Rembang, dan lainnya. Serta dari wilayah yang masih cukup dekat dari Pasuruan, yakni Probolinggo, Malang, Gresik, Lumajang, dan Mojokerto. PG Kedawoeng memiliki kapasitas produksi sebesar 2.400 TCD (*tonne-Cane-Day*), yang berdasarkan kapasitas tebu tersebut setiap harinya PG Kedawoeng dapat memproduksi sekitar 15 ton GKP (Gula Kristal Putih) yang telah memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI). Spesifikasi tebu yang siap untuk dikonversi menjadi gula kristal putih adalah vital dalam menghasilkan gula dengan kadar sukrosa yang tinggi. Tebu yang bernilai MBS (Matang, Bersih, Segar) memiliki kandungan sukrosa berkisar 8–16%, serat (fiber) berkisar 11–16%, air 69–76% dan sisanya merupakan padatan lain[3]. Ketentuan lain yang disyaratkan oleh PG Kedawoeng adalah konsentrasi (brix) pucuk tebu dengan rentang 17 – 18 % dan memiliki pH antara 5 – 5,5.

Pada industri gula, proses substansial yang memerlukan adanya perpindahan panas adalah: komponen pemanas pendahuluan nira (*juice pre-heating*), komponen evaporator multi-efek, dan komponen kristalisasi multi-efek. Pemanas pendahuluan akan menaikkan temperatur nira hingga titik saturasi, evaporator multi-efek menguapkan sebagian besar air dalam nira jenuh, dan terakhir kristalizer multi-efek menghilangkan kandungan air yang tersisa hingga melewati titik jenuh dan membentuk inti kristal (*granulated juice*)[4].

Ketiga komponen tersebut membutuhkan suplai panas berupa uap panas (uap bekas) yang berasal dari ketel (*boiler*) yang menggunakan ampas tebu (*bagasse*), produk samping dari proses pemerahan nira, sebagai bahan bakar utama untuk memproduksi uap panas bertekanan tinggi, dan juga sebagai penggerak turbin uap untuk memenuhi kebutuhan listrik. Pada penggilingan tebu performa tinggi, bahan bakar tambahan juga dapat ditambahkan untuk meningkatkan kebutuhan uap secara cepat. Bahan bakar tersebut meliputi potongan daun tebu kering (*dhaduk*), potongan kayu, serabut kelapa, dan bahkan dapat ditambahkan minyak/oil residu dari alat proses[5]. Uap panas dari ketel ini digunakan untuk menyuplai kebutuhan panas untuk sistem evaporator 5 efek (*quintuple-effect evaporator*). Sedangkan sistem *juice heater* dan *crystallizer* menggunakan uap panas *bleeding* dari efek pertama evaporator karena lebih menguntungkan dari segi *heat economy*[6].

Dalam hal pemenuhan konsentrasi nira produk sebesar 64% brix, digunakan evaporator multi-efek untuk menguapkan kandungan air pada nira menggunakan uap ketel (uap bekas) sebagai medium pemanas. Proses penguapan kandungan air ini melibatkan perpindahan panas antara uap bekas dengan nira yang diumpankan. Terdapat beberapa

studi yang menghubungkan antara konsentrasi nira dengan karakteristik perpindahan panas, antara lain studi oleh Storia [7] yang meneliti pengaruh nilai U terhadap titik didih nira dengan metode Dessin dan koefisien konveksi. Studi oleh Ahmad, dkk. [8] menjelaskan pengaruh variabel proses (laju umpan, rasio resirkulasi, tekanan uap, dan suhu umpan) terhadap nilai U menggunakan ANOVA (*Analysis of Variance*) pada *climbing film evaporator*. Chantasiriwan [9] mengajukan model evaporator 4 efek dengan *juice heater* yang memvariasikan area pemanas terhadap tekanan nira, laju alir uap *bleeding*, dan konsentrasi nira yang dikaitkan dengan *steam economy*.

Dalam penelitian ini, karakteristik perpindahan panas akibat penurunan tekanan uap bekas terhadap konsentrasi nira tiap efek dianalisis. Adanya perbedaan nilai konsentrasi nira kental dari nilai normalnya sebesar 64% brix menjadi 58% brix diakibatkan oleh penurunan tekanan uap bekas dari 0,6 kg/cm² sesaat menjadi 0,4 kg/cm². Untuk itu, diperlukan analisis terkait dampak dari perbedaan tekanan uap bekas dari segi karakteristik perpindahan panas meliputi laju perpindahan panas, koefisien perpindahan panas (U), dan area perpindahan panas teoritis terhadap nilai eksisting di PG Kedawoeng. Juga dianalisis parameter-parameter yang mempengaruhi % brix. Hasil analisis diharapkan dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem evaporator 5 efek akibat perbedaan tekanan uap bekas guna mencapai parameter nira produk sebesar 64% brix.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Teknik Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dilakukan dengan observasi lapangan pada Stasiun Penguapan serta beberapa alat penunjang seperti *juice heater* dan kondensor untuk mengumpulkan data proses operasi. Setelahnya dikumpulkan literatur terkait topik bahasan yang dipilih untuk dilakukan rekalkulasi keadaan eksisting dengan perhitungan menggunakan persamaan-persamaan dari beberapa literatur. Data keadaan eksisting merupakan data yang diambil dari lapangan ketika alat beroperasi dalam kurun beberapa waktu[10].

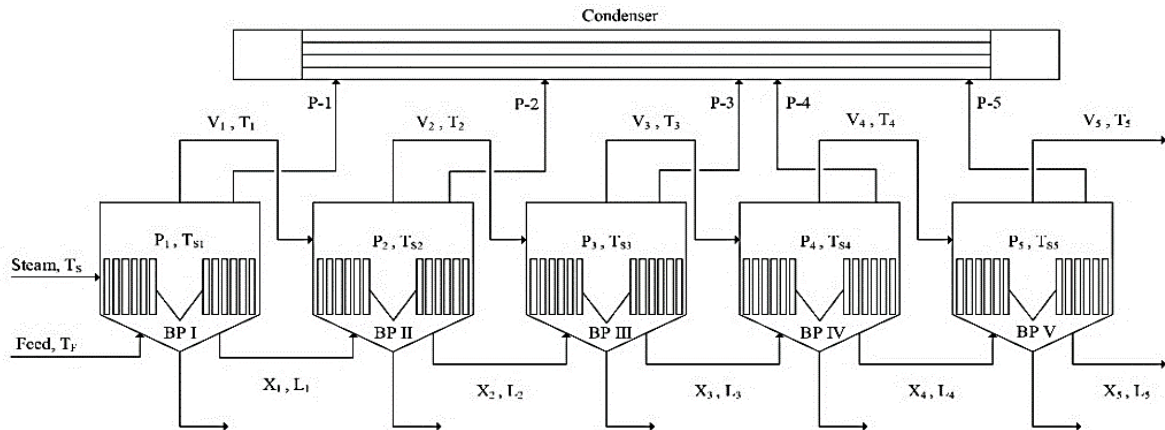
Observasi lapangan dilakukan pada kurun waktu Juli – Agustus 2021 dengan pengamatan langsung tekanan dan temperatur tiap efek pada barometer dan termometer yang terpasang. Dilakukan juga pengamatan terhadap kondisi pipa uap bekas dan tekanan yang dihasilkan saat terjadinya penurunan tekanan. Data tekanan uap bekas yang tercatat pada Juni 2021 sebesar 0,6 kg/cm², sedang pada Juli 2021 sesaat menurun menjadi 0,4 kg/cm². Setelahnya, data observasi lapangan dibandingkan dengan data teknis pada periode waktu sebelumnya untuk dianalisis parameter-parameter yang berbeda nilai.

2.2. Kondisi Proses

Kondisi proses yang diperoleh dari pengumpulan data meliputi data suhu dan tekanan tiap efek, konsentrasi nira keluar tiap efek, area perpindahan panas, dan parameter keberhasilan proses yaitu kadar nira produk sebesar 64% brix. Kondisi peralatan dan hal yang berkaitan dengan penelitian adalah area pemanas tiap efek sebesar 900 m², kecuali untuk efek pertama dengan luasan 1800 m². Data yang berbeda nilai akibat perbedaan tekanan uap bekas juga dikumpulkan meliputi laju massa uap

bekas dan nira, tekanan proses, temperatur proses, titik didih dan temperatur nira keluar tiap efek, serta konsentrasi nira tiap efek dalam % brix.

Unit evaporator PG Kedawoeng mengoperasikan sistem evaporator 5 efek dengan konfigurasi *forward-feed*. Skema sistem evaporator 5 efek ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Skema sistem evaporator 5 efek pada PG Kedawoeng

2.3. Perhitungan Karakteristik Perpindahan Panas

Perhitungan karakteristik panas pada evaporator 5 efek diperoleh dari beberapa literatur. Model yang diberikan oleh Geankoplis [11] menggambarkan dengan baik persamaan neraca panas pada multi efek evaporator, sebagai berikut:

$$F \cdot H_F + S \cdot H_S = L_1 \cdot H_{L_1} + V_1 \cdot H_{V_1} \quad (1)$$

$$L_n \cdot H_{L_n} + V_n \cdot H_{V_n} = L_{n+1} \cdot H_{L_{n+1}} + V_{n+1} \cdot H_{V_{n+1}} \quad (2)$$

Dengan n merupakan efek ke-n yang dimulai pada efek ke-2. F, S, L, dan V merupakan laju massa dalam ton/jam, sedang H merupakan entalpi dalam kJ/(kg).(jam).

Persamaan yang diberikan oleh Rein [12] dalam Chantasiriwan [13] memuat persamaan untuk menentukan nilai entalpi uap jenuh (H_S) dan panas laten penguapan (H_V), sebagai berikut:

$$H_S(T) = 2502,04 + 1,8125T + 2,585 \times 10^{-4}T^2 - 9,8 \times 10^{-6}T^3 \quad (3)$$

$$H_{V_n}(T_S) = 2492,9 - 2,0523T_S - 3,0752 \times 10^{-3}T_S^2 \quad (4)$$

Dengan T (°C) merupakan temperatur uap bekas yang memasuki evaporator, sedangkan T_S merupakan temperatur air jenuh yang diperoleh dengan interpolasi data *steam table*[14] dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_S = T_a + \left[(P - P_a) \times \left(\frac{T_b - T_a}{P_b - P_a} \right) \right] \quad (5)$$

Dengan P (kg/cm²) merupakan tekanan kerja tiap efek, sedangkan tika bawah (*subscript*) "a" dan "b" berturut-turut adalah data atas dan data bawah dari nilai P yang tersedia pada *steam table*.

Persamaan untuk mendapatkan entalpi nira keluar tiap efek (H_L) dan panas laten kondensasi (λ_c) diberikan oleh Hugot [14] sebagai berikut:

$$H_L = (1 - 0,006B) \times 4.2T_j \quad (6)$$

$$\lambda_c = H_V - H_L \quad (7)$$

Dengan B merupakan konsentrasi nira dalam % brix, dan T_j merupakan temperatur nira keluar tiap efek. Untuk menghitung daya (Q) dalam kW yang dibutuhkan tiap efek digunakan persamaan yang melibatkan laju massa uap bekas (S) sebagai berikut:

$$Q_1 = \frac{1}{3600} S \times \lambda_{s1} \quad (8)$$

$$Q_n = \frac{1}{3600} V_{n-1} \times \lambda_{c_n} \quad (9)$$

Koefisien perpindahan panas *overall* (U) dapat dievaluasi dari estimasi arus uap [15] yang dalam hal ini dinyatakan dalam temperatur uap pemanas pada tiap efek (T_v). Nilai koefisien perpindahan panas *overall* untuk evaporator dengan sirkulasi natural diberikan oleh Dessin dalam Hugot [14] sebagai berikut:

$$U = a \times (100 - \underline{B})(T_v - 54) \quad (10)$$

Dengan U dalam $\text{kW}/(\text{m}^2) \cdot (^\circ\text{C})$, \underline{B} adalah brix rata-rata nira yang merupakan perbandingan antara brix keluar dan masuk tiap efek, sedangkan a merupakan koefisien *margin of safety*. Nilai a sebesar 0,001 digunakan untuk evaporator dengan performa normal tanpa adanya pengotor (*scale*), dengan kata lain digunakan untuk menghitung *clean overall coefficient* (U_c). Nilai a sebesar 0,0008 digunakan untuk menghitung *design overall coefficient* (U_d) yang mempertimbangkan formasi pembentukan pengotor. Nilai a sebesar 0,0007 digunakan saat performa evaporator turun dan terdapat deposit pengotor dalam jumlah besar [14]. Dalam hal ini digunakan nilai a sebesar 0,0008 untuk persamaan (10).

Selanjutnya, penentuan kapasitas panas spesifik nira, dalam $\text{kkal}/(\text{kg}) \cdot (^\circ\text{C})$, dapat menggunakan persamaan Hugot [14] sebagai berikut:

$$C_{P_{nira}} = 4,1868 - B(0,0297 - 4,6 \times 10^{-5} S) + 7,5 \times 10^{-5} B T_j \quad (11)$$

Pada akhirnya, dapat ditentukan area pemanas teoritis yang dibutuhkan sebagai berikut:

$$A = \frac{V \times 1000}{C_{P_{nira}} \times (T_v - T_d)} \quad (12)$$

Dengan A dalam m^2 , T_d adalah titik didih nira pada tiap efek.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

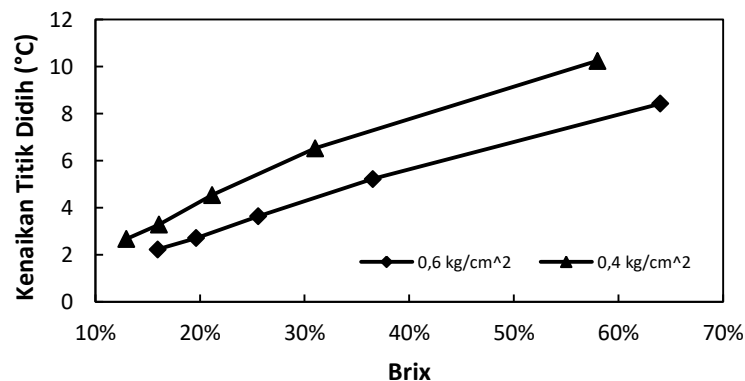
Unit evaporasi pada PG Kedawoeng berfungsi sebagai tempat penghilangan kandungan air pada nira umpan yang telah bebas pengotor dengan jalan penguapan bertingkat. Unit ini mengoperasikan evaporator dengan konfigurasi *quintuple-effect* atau 5 efek yang disusun seri. Suplai panas yang diberikan berasal dari uap panas *boiler* (uap bekas) dan uap panas nira (*bleeding vapor*). Uap bekas akan memasuki efek pertama dan uap (*bleed*) keluaran efek pertama akan menjadi suplai pemanas untuk efek kedua, dan begitupun seterusnya hingga efek kelima.

Dalam teori perpindahan panas yang mana dipengaruhi oleh perbedaan suhu antara dua atau lebih fluida yang berbeda, dimana panas akan berpindah dari fluida yang bersuhu tinggi ke fluida yang bersuhu rendah[16]. Kebutuhan uap pemanas dalam stasiun penguapan ini diukur berdasarkan tekanan uap yang mengalir sepanjang pipa uap bekas. Pada periode observasi Juni s.d. Juli 2021, ditemui besar tekanan uap bekas yang berbeda berturut-turut sebesar $0,6 \text{ kg/cm}^2$ dan $0,4 \text{ kg/cm}^2$. Tekanan uap bekas yang menurun berakibat pada tidak tercapainya konsentrasi yang dikehendaki untuk nira produk hasil unit ini yaitu sebesar 64% brix.

Tabel 1. Neraca panas total sistem evaporator 5 efek

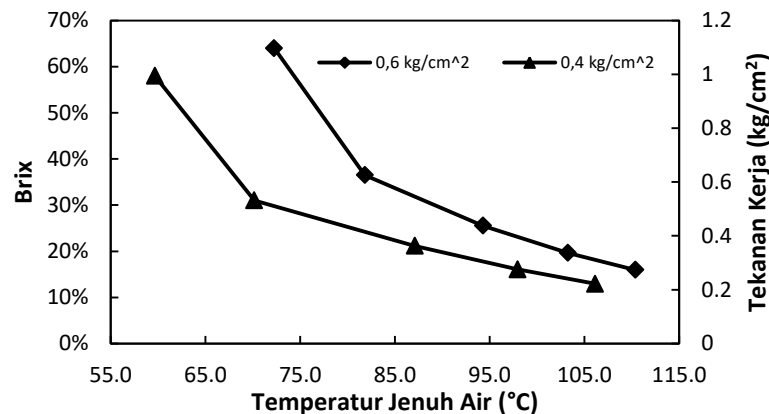
Evaporator	Kalor/Panas (kJ/kg)			
	Tek. $0,6 \text{ kg/cm}^2$		Tek. $0,4 \text{ kg/cm}^2$	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Efek 1	66.575,06	143.028,36	63.957,16	138.451,25
efek 2	143.028,36	99.045,40	138.451,25	95.511,32
Efek 3	99.045,40	86.778,52	95.511,32	83.321,22
Efek 4	86.778,52	75.395,72	83.321,22	71.847,59
Efek 5	75.395,72	66.575,06	71.847,59	63.957,16
TOTAL	470.823,06	470.823,06	453.088,55	453.088,55

Neraca panas yang tersaji pada tabel 1 menunjukkan bahwa baik pada tekanan $0,6 \text{ kg/cm}^2$ dan $0,4 \text{ kg/cm}^2$ menunjukkan *heat balance* pada sistem. Hal tersebut menunjukkan bahwa tidak adanya panas yang hilang pada sistem. Walaupun demikian, terjadi penurunan kalor pada kondisi tekanan $0,4 \text{ kg/cm}^2$ akibat penurunan laju massa uap bekas karena penurunan tekanan.



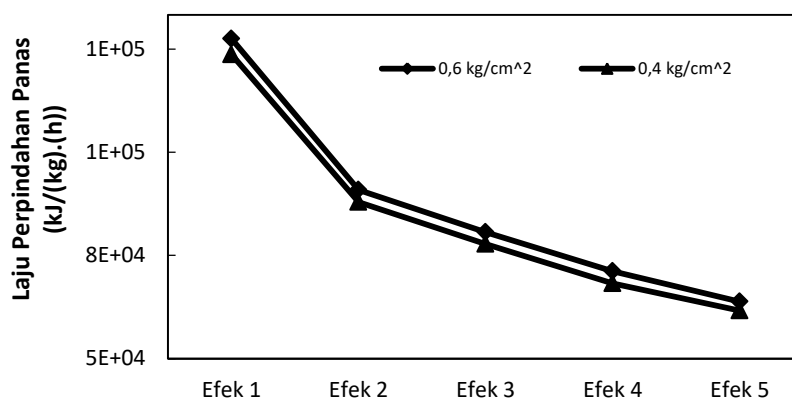
Gambar 2. Hubungan konsentrasi nira (brix) terhadap kenaikan titik didih

Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi nira maka kenaikan titik didih nira akan semakin bertambah, dengan kata lain semakin banyak kandungan gula dalam nira maka titik didih nira akan naik dan menjadi lebih besar dibandingkan titik didih air[7]. Dapat diamati pula bahwa kenaikan titik didih nira pada tekanan 0,4 kg/cm² menunjukkan nilai yang lebih rendah dari keadaan normal. Hal tersebut dipengaruhi oleh pasokan laju massa uap bekas yang lebih rendah dari keadaan normal, sehingga menurunkan kemampuan penguapan tiap efek pada evaporator dan pada akhirnya membuat konsentrasi nira produk turun menjadi 58% brix.



Gambar 3. Hubungan konsentrasi nira (brix) dan tekanan kerja terhadap titik jenuh air

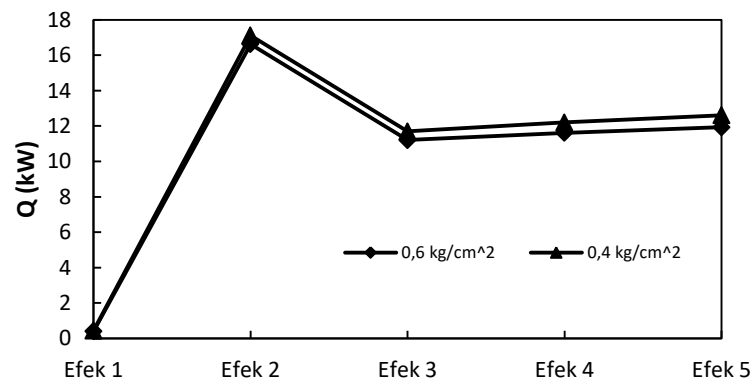
Titik jenuh air semakin menurun sejalan dengan kenaikan konsentrasi nira pada tiap efek seperti ditunjukkan pada gambar 3. Hal tersebut dipengaruhi oleh tekanan kerja tiap efek yang semakin menurun. Titik jenuh air pada tekanan uap bekas 0,6 kg/cm² lebih besar daripada saat tekanan 0,4 kg/cm² dikarenakan tekanan kerja pada tiap efek yang berbeda. Karena penurunan tekanan uap bekas, tekanan kerja tiap efek menjadi turun sehingga mempengaruhi titik jenuh air pada tiap efek. Imbas dari hal ini adalah konsentrasi nira produk menjadi lebih rendah dari keadaan normal, yaitu menjadi 58% brix.



Gambar 4. Hubungan konsentrasi nira (brix) terhadap laju perpindahan panas

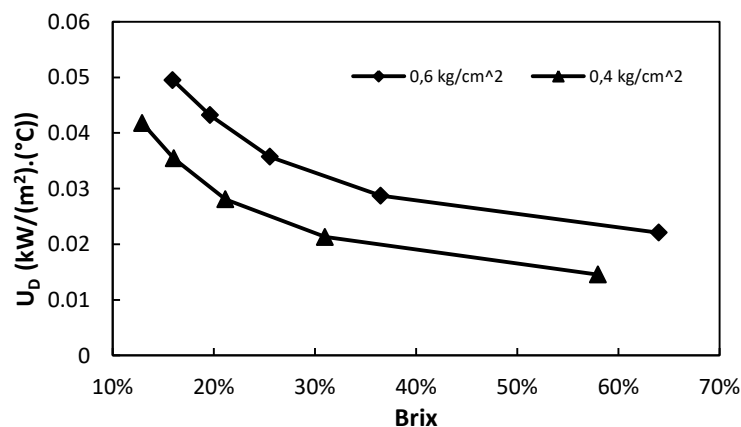
Pada gambar 4, terlihat bahwa semakin besar konsentrasi nira maka laju perpindahan panasnya akan semakin rendah. Hal ini disebabkan karena laju massa *bleeding* dari efek pertama ke efek berikutnya semakin rendah, karena temperatur jenuh air yang mengalami

penurunan pada tiap efek yang tercantum pada gambar 3. Laju perpindahan panas akan semakin besar tergantung dari dua faktor: 1) Besarnya tekanan kerja pada efek ; 2) rendahnya konsentrasi gula dalam nira[14]. Karena laju massa penguapan nira semakin rendah tiap efeknya, maka kebutuhan *bleeding* akan semakin berkurang. Hal tersebut sejalan dengan prinsip kekekalan energi, dimana Panas yang dihasilkan *vessel* adalah pertukaran panas antara *steam* dengan penguapan nira, sehingga energi panas yang dilepas *steam* bernilai sama dengan energi panas yang diterima oleh nira[7]. Dalam hal ini, tekanan uap bekas 0,4 kg/cm², walaupun tidak signifikan, berdampak pada menurunnya laju perpindahan panas. Hal ini disebabkan karena tekanan yang lebih rendah menyebabkan laju massa uap masuk ke efek 1 juga lebih rendah dari laju massa pada tekanan 0,6 kg/cm².



Gambar 5. Daya yang dibutuhkan tiap efek

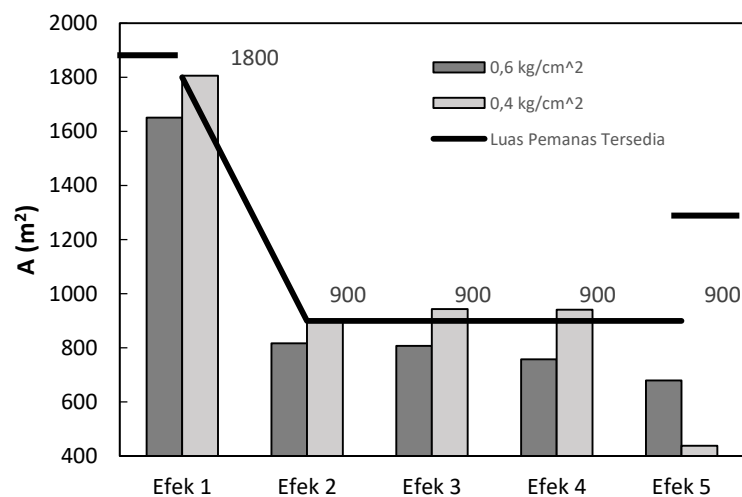
Dapat diamati pada gambar 5 bahwa laju daya untuk efek pertama bernilai lebih kecil dari efek kedua dan seterusnya. Hal tersebut karena laju massa uap bekas bernilai lebih rendah dibandingkan *vapor bleeding* efek 1 yang digunakan untuk memanaskan efek 2 hingga efek 5. Sehingga, pada efek 1 hanya dibutuhkan daya sebesar 0,4 kW sedangkan untuk efek 2 membutuhkan daya 16,62 kW. Sedangkan untuk efek 3 hingga 5 kebutuhan daya cenderung stabil di rentang 11 – 12 kW karena laju penguapan yang cenderung stabil pada ketiga efek. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa daya yang digunakan pada tiap efek cenderung konstan dan tidak terlalu terpengaruh oleh adanya perbedaan tekanan uap bekas.



Gambar 6. Hubungan konsentrasi nira (brix) terhadap koefisien perpindahan panas desain

Gambar 6 menggambarkan hubungan konsentrasi nira dengan koefisien perpindahan panas desain. Terlihat bahwa semakin besar konsentrasi nira maka nilai U_D semakin turun. Hal ini berarti bahwa semakin tinggi konsentrasi nira, maka kemampuan perpindahan panas antara uap panas ke nira akan semakin berkurang. Hal itu disebabkan karena semakin tinggi temperatur nira, maka viskositas nira akan semakin besar, karena hilangnya kandungan pelarut dalam nira. Nira yang semakin kental menyebabkan sirkulasi yang terjadi pada tiap efek akan semakin insubstansial. Sehingga kontak antara uap panas dengan nira menjadi berkurang, dan menyebabkan penurunan laju penguapan[11]. Hal lain yang menyebabkan nilai U semakin menurun adalah kehadiran komponen penggerak yang menyebabkan *fouling*. Ketika *fouling* meningkat, maka koefisien U akan menurun[15]. Konsentrasi nira yang semakin tinggi pada tiap efeknya akan meningkatkan pertumbuhan komponen penggerak, menimbulkan penurunan efisiensi perpindahan panas, sehingga menurunkan nilai U .

Selain brix, faktor lain yang mempengaruhi nilai U_D adalah temperatur pemanas dan laju perpindahan panas tiap efek. Karena U_D bernilai proporsional terhadap nilai Q [17]. Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan nilai U_D antara keadaan tekanan $0,6 \text{ kg/cm}^2$ dan keadaan tekanan $0,4 \text{ kg/cm}^2$. Hal tersebut berlaku sama dengan gambar 3 dimana perbedaan tekanan kerja akan mempengaruhi besarnya temperatur pemanas sehingga menyebabkan nilai U_D pada keadaan tekanan uap bekas $0,4 \text{ kg/cm}^2$ menjadi lebih rendah. Koefisien perpindahan panas pada tekanan $0,4 \text{ kg/cm}^2$ yang bernilai lebih rendah menggambarkan bahwa tidak terjadinya perpindahan panas efektif antara nira dengan uap bekas sejak awal uap memasuki efek pertama, sehingga berimplikasi pada nilai U pada efek selanjutnya yang lebih rendah dibanding tekanan $0,6 \text{ kg/cm}^2$.



Gambar 7. Area pemanas teoritis terhadap area pemanas eksisting

Gambar 7 menggambarkan area pemanas teoritis yang dibutuhkan pada kondisi tekanan uap bekas $0,6 \text{ kg/cm}^2$ dan $0,4 \text{ kg/cm}^2$ kemudian nilainya dibandingkan dengan area pemanas eksisting di PG Kedawoeng. Dapat diamati bahwa pada tekanan uap bekas $0,4 \text{ kg/cm}^2$ memberikan area pemanas yang lebih besar dibandingkan kondisi eksisting pada efek 1, 2, dan 4. area pemanas teoritis yang melampaui kondisi aktual menyebabkan perpindahan panas yang terjadi dalam ketiga efek tersebut menjadi tidak maksimal, sehingga konsentrasi nira produk menjadi kurang dari target unit (64% brix).

Pada tekanan 0,6 kg/cm², area pemanas teoritis tiap efek bernilai lebih kecil dari kondisi eksisting pada PG Kedawoeng yang memungkinkan adanya perpindahan panas efektif antara uap pemanas dengan nira sehingga konsentrasi nira produk dapat mencapai 64% brix sesuai target PG Kedawoeng.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penurunan tekanan uap bekas dari 0,6 kg/cm² ke 0,4 kg/cm² mempengaruhi karakteristik perpindahan panas pada evaporator 5 efek dan berpengaruh pada konsentrasi nira produk yang keluar. Penurunan tekanan uap bekas menurunkan panas total pada unit evaporator dari 470.823,06 kJ/kg menjadi 453.088,55 kJ/kg. Penurunan tekanan uap bekas juga berpengaruh pada turunnya kenaikan titik didih nira, yang menyebabkan penurunan temperatur jenuh air dan titik didih nira. Koefisien perpindahan panas juga mengalami penurunan dengan nilai lebih rendah pada tekanan 0,4 kg/cm² dibanding 0,6 kg/cm² yang menunjukkan bahwa efisiensi perpindahan panas yang lebih buruk pada tekanan lebih rendah. Laju perpindahan panas dan daya tiap efek tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat penurunan tekanan uap bekas. Penurunan tekanan juga berimbas kepada kebutuhan area pemanas pada tiap efek yang lebih besar dari kondisi eksisting. Pada tekanan 0,4 kg/cm² dibutuhkan area pemanas teoritis tiap efek berturut-turut sebesar 1806,095 m²; 900,37 m²; 943,45 m²; 941,33 m²; 438,68 m² yang memiliki nilai diatas kondisi eksisting, yaitu 1800 m² untuk efek pertama dan 900 m² untuk efek 2 – 5. Sedangkan pada tekanan 0,6 kg/cm² sebesar 1650,63 m²; 816,08 m²; 806,7 m²; 757,78 m²; 679,37 m² yang mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas dapat berjalan dengan baik karena memiliki nilai dibawah kondisi eksisting. Area pemanas pada tekanan uap bekas 0,4 kg/cm² menyebabkan laju uap *bleeding* ke efek-efek selanjutnya menjadi lebih rendah sehingga laju penguapan menjadi tidak maksimal.

Saran yang dapat ditempuh industri dalam mengatasi hal ini adalah melakukan pengecekan berkala tekanan uap bekas dengan berpedoman tidak hanya menggunakan parameter kontrol proses konsentrasi nira produk 64% brix, namun juga nilai karakteristik perhitungan panas yang telah dipaparkan demi menjaga kestabilan proses dan mencapai parameter keberhasilan. Adapun untuk penelitian selanjutnya perlu untuk melakukan analisis lebih mendalam mengenai aspek metalurgi dari pipa uap bekas, analisis laju pembentukan kerak pada tiap efek, sekaligus menganalisis dampak penurunan tekanan terhadap *overall steam economy* pada unit yang menggunakan uap bekas sebagai medium pemanas untuk dapat mengevaluasi perkiraan umur penggunaan pipa.

REFERENSI

- [1] S. Meylinah, *Sugar Annual Report: Indonesia*, ID2020-000 ed. USDA, 2020.
- [2] "PT Perkebunan Nusantara XI." <https://ptpn11.co.id/page/riwayat-singkat-perusahaan> (diakses Okt, 22, 2021).
- [3] C. S. Qomariyah, Laili, "Pengaruh Penambahan NPK Dan Urea Pada Pembuatan Etanol Dari Air Tebu Melalui Proses Fermentasi," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 2, hal. 82–88, 2021, doi: 10.33795/distilat.v7i2.186.

- [4] S. M. Bondar dan P. M. Khanwalkar, "Analysis of Heat Exchanger as Juice Heater in Cane Sugar Industry," 2012.
- [5] D. F. O. A. Rosyid, Pudjo W. H, "Studi Penghematan Energi pada Unit Ketel Uap di Pabrik Gula," *Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi; Balai Besar Teknologi Energi (B2TE-BPPT)*, hal. 171–176.
- [6] S. Chantasiriwan, "Distribution of Juice Heater Surface for Optimum Performance of Evaporation Process in Raw Sugar Manufacturing," *Journal of Food Engineering*, vol. 195, hal. 21–30, 2017, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.09.014.
- [7] E. A. Storia, "Effect on Heat Transfer Characteristic of Robert Evaporator Quintuple-Effect System in Gempolkrep Sugar Factory," hal. 1–92, 2016.
- [8] M. I. Ahmad dkk., "Concentration of Cane-Sugar Syrup in a Pilot Scale Climbing Film Evaporator," *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 24, no. 1, hal. 43–50, 2018, doi: 10.2298/CICEQ160613017A.
- [9] S. Chantasiriwan, "Simulation of Quadruple-Effect Evaporator with Vapor Bleeding Used for Juice Heating," *ETP International Journal of Food Engineering*, vol. 2, no. 1, hal. 36–41, 2016, doi: 10.18178/ijfe.2.1.36-41.
- [10] H. D. Septiaji, Imam Aldi, "Evaluasi Kinerja Rotary Dryer pada Industri Pupuk NPK dengan Kapasitas 800 Ton/Hari," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 6, no. 2, hal. 82–88, 2020, doi: 10.33795/distilat.v6i2.82.
- [11] D. H. Geankoplis, C.J., Hersel, A.A. dan Lepek, "Transport Processes and Unit Operations," *The Chemical Engineering Journal*, vol. 20, no. 1. p. 82, 1980. doi: 10.1016/0300-9467(80)85013-1.
- [12] P. Rein, "Cane Sugar Engineering Ed. 2." Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Germany, p. 746, 2016. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173154754>
- [13] S. Chantasiriwan, "Optimum Surface Area Distribution in Co-Current Multiple-Effect Evaporator," *Journal of Food Engineering*, vol. 161, hal. 48–54, 2015, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.03.030.
- [14] E. Hugot, "Handbook of Cane Sugar Engineering," *Elsevier*, vol. 3, no. 7, p. 1186, 1986.
- [15] J. Hanuranto, A. Mustafa, "Pengukuran Variabel Proses pada Quadruple Effect Evaporation di Pabrik Gula," hal. 19–26.
- [16] H. Chalim, A., Ariani, A., Mufid, M., "Koefisien Perpindahan Kalor Total (U) Sistim Air-Etilen Glikol menggunakan Alat Penukar Kalor Shell and Tube 1-1," *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Proses Industri Kimia*, vol. 1, hal. 69–76, 2017, [Daring]. Tersedia pada: <https://prosiding.polinema.ac.id/sngbr/index.php/snrpik/article/view/100>
- [17] B. A. Smith and L. A. W. Taylor, "Some Data on Heat Transfer in Multiple Effect Evaporators," *Sugar Technology Reviews*, no. Juni, hal. 1–5, 1981.