

ANALISIS PENGARUH °BRIX TERHADAP PARAMETER PERPINDAHAN PANAS ALAT EVAPORATOR SISTEM QUINTUPLE-EFFECT DI PG KREBET BARU II MALANG

Estevania Dwi Kristanti¹, Sri Rulianah¹, Pandu Jati Ramadhan²

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

²PT Rajawali Nusantara Indonesia Unit PG Kribet Baru II Malang, Jl. Raya Kribet, Bululawang 65171, Kabupaten Malang, Indonesia

estevaniakristanti@gmail.com ; sri.rulianah@polinema.ac.id

ABSTRAK

Industri gula termasuk PG Kribet Baru memainkan peran strategis dalam memenuhi kebutuhan gula nasional yang terus meningkat, dengan produksi mencapai 5,05% dari total nasional pada tahun 2022. Proses penguapan di pabrik gula menggunakan evaporator sebagai peralatan kunci untuk meningkatkan konsentrasi nira dari 14% menjadi 68%. Proses penguapan di pabrik gula melibatkan bahan sensitif (sukrosa) terhadap panas tinggi, yang dapat meningkatkan gula invert dan merugikan industri. Untuk meningkatkan efisiensi energi, PG Kribet Baru II menggunakan sistem evaporator *quintuple effect*, yang terdiri dari lima unit penguapan bertingkat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi dan parameter perpindahan panas dalam sistem evaporator *quintuple effect*. Analisis evaporator *quintuple effect* dilakukan dengan menggunakan metode Dessin yang melibatkan serangkaian perhitungan yang dimulai dari penentuan mass flow nira, suhu uap jenuh, uap *bleeding*, dan jumlah air yang diuapkan. Sehingga akan diperoleh nilai °Brix, Boiling Point Elevation (BPE), laju perpindahan panas, dan overall *heat transfer coefficient* (U). Nilai °Brix keluar *vessel* yang diperoleh dari analisis data adalah 20,19; 29,70; 38,70; 47,62; 62,00. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar °Brix berhubungan dengan naiknya titik didih, namun berdampak negatif pada laju perpindahan panas dan koefisien perpindahan panas keseluruhan. Analisis perbandingan antara luas perpindahan panas teoritis dan aktual menunjukkan bahwa sistem tidak efisien, sehingga konsentrasi nira tidak mencapai target yang diinginkan.

Kata kunci: °brix, evaporator, penguapan, *quintuple effect*, koefisien perpindahan panas.

ABSTRACT

The sugar industry including PG Kribet Baru plays a strategic role in meeting the growing national sugar demand, with production reaching 5.05% of the national total by 2022. The evaporation process in sugar factories uses evaporators as key equipment to increase the concentration of sap from 14% to 68%. The evaporation process in sugar factories involves sensitive materials (sucrose) to high heat, which can increase invert sugar and harm the industry. To improve energy efficiency, PG Kribet Baru II uses a *quintuple effect* evaporator system, which consists of five multistage evaporation units. This research aims to analyze the efficiency and heat transfer characteristics in the *quintuple effect* evaporator system. The analysis of the *quintuple effect* evaporator is carried out using the Dessin method which involves a series of calculations starting from determining the mass flow of nira, saturated steam temperature, bleeding steam, and the amount of water evaporated. Thus, °Brix, Boiling Point Elevation (BPE), heat transfer rate, and overall heat transfer coefficient (U) will be obtained. The °Brix values out of the vessel obtained from data analysis are 20.19; 29.70; 38.70; 47.62; 62.00. The results showed that the increase in °Brix content was related to the increase in boiling point, but had a negative impact on the heat transfer rate and overall heat transfer

Corresponding author: Sri Rulianah

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: sri.rulianah@polinema.ac.id



coefficient. Comparative analysis between the theoretical and actual heat transfer areas shows that the system is inefficient, resulting in the concentration of sap not reaching the desired target.

Key words: °brix, evaporator, evaporation, quintuple effect, heat transfer coefficient.

1. PENDAHULUAN

Kehadiran gula sebagai salah satu dari sembilan bahan pokok masyarakat saat ini cenderung meningkat, menjadikan pabrik gula memiliki peran strategis dalam transformasi ekonomi di Indonesia. Kepentingan gula semakin meningkat karena selain dapat dikonsumsi langsung, gula juga merupakan bahan baku untuk industri makanan dan minuman. Menurut Kementerian Perindustrian (Kemenperin), kebutuhan gula nasional Indonesia pada tahun 2022 mencapai sekitar 6,84 juta ton, yang terdiri dari 3,21 juta ton gula kristal putih (GKP) dan 3,7 juta ton gula kristal rafinasi (GKR) [1].

PG Krebet Baru adalah salah satu industri yang berfokus pada produksi gula kristal dengan bahan baku tebu. Dengan produk samping yang dihasilkan antara lain blotong, ampas tebu, abu ketel, dan tetes tebu. PG Krebet Baru mengolah seluruh tebu yang diperoleh dari petani melalui sistem bagi hasil gula. PG Krebet Baru terdiri dari dua unit, yaitu PG Krebet Baru I (KB I) dengan kapasitas giling 6.500 *Ton Cane per Day* (TCD) dan PG Krebet Baru II (KB II) dengan kapasitas 5.500 *Ton Cane per Day* (TCD). Berdasarkan kapasitas tersebut, pada tahun 2022 PG Krebet Baru berhasil memproduksi 131,7 ribu ton gula kristal putih (GKP), yang menyumbang 5,05 persen dari produksi nasional. Tebu yang siap dikonversi menjadi gula kristal putih harus memenuhi kriteria MBS (Manis, Bersih, dan Segar). Tebu dengan kriteria MBS memiliki kandungan sukrosa sebesar 8-16%, serat (fiber) sekitar 11-16%, air 69-76%, dan sisanya merupakan padatan lainnya [2].

Kualitas gula yang baik dapat dievaluasi dari nira tebu yang diperas, karena nira tebu merupakan bahan dasar utama dalam proses produksi gula [3]. Standar kualitas Gula Kristal Putih (GKP) di Indonesia saat ini diatur oleh SNI 3140.3:2010. Standar ini pada dasarnya mengadopsi kriteria lama yang dikenal sebagai SHS (*Superieure Hoofd Suiker*). Cairan yang diekstrak dari tebu tidak hanya mengandung sukrosa, tetapi juga komponen-komponen lain. Komponen-komponen tersebut meliputi gula pereduksi (seperti glukosa dan fruktosa), serat, berbagai zat non-gula, serta air [4]. Suhu tinggi selama penguapan dapat meningkatkan jumlah gula invert, yang merugikan bagi pabrik gula [5]. Dalam proses pengolahan gula, sukrosa yang merupakan komponen utama gula kristal rentan terhadap hidrolisis, terutama pada kondisi suhu tinggi dan pH basa [6]. Proses ini dikenal sebagai inversi sukrosa, mengurai sukrosa menjadi gula invert (campuran glukosa dan fruktosa). Peningkatan suhu selama tahap penguapan dapat mempercepat pembentukan gula invert ini, yang berdampak negatif pada efisiensi produksi pabrik gula. Fenomena ini menunjukkan pentingnya pengendalian suhu dan pH yang tepat dalam proses pengolahan gula untuk memaksimalkan hasil produksi dan meminimalkan pembentukan gula invert yang tidak diinginkan [7]. Dalam operasi pabrik gula, kebutuhan energi termal utama terfokus pada tiga tahap penting: pemanasan sari tebu, penguapan, dan kristalisasi. Meskipun ketiga proses ini vital dalam industri gula tahap penguapan memiliki peran yang sangat krusial dalam alur produksi. Penguapan menjadi sorotan utama dalam upaya optimalisasi energi pabrik gula, mengingat tahap ini mengonsumsi energi paling besar dibandingkan tahap lainnya. Oleh karena itu, dalam konteks integrasi termal, proses penguapan mendapat perhatian khusus untuk

meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Pada dasarnya, evaporator berfungsi dengan dua prinsip utama: pertukaran energi termal dan pemisahan fase. Alat ini dirancang untuk mentransfer panas ke cairan, menyebabkan sebagian cairan berubah menjadi uap. Selanjutnya, evaporator memisahkan uap yang dihasilkan dari sisa cairan yang belum menguap. Proses ini menghasilkan pemekatan cairan asal dan uap yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut. [8]. Dalam pabrik gula evaporator memainkan peran penting sebagai alat utama untuk mengonsentrasikan larutan gula yang diekstrak dari tebu. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kadar gula dalam cairan tebu, yang dikenal sebagai nira. Namun, untuk mempertahankan mutu rasa dan mencegah kerusakan sukrosa dalam nira, pabrik gula menerapkan metode penguapan khusus. Metode ini melibatkan penggunaan suhu rendah dan tekanan yang dikurangi, yang memungkinkan proses penguapan berlangsung tanpa mempengaruhi kualitas produk akhir. Untuk meminimalkan terjadinya inversi sukrosa, industri gula mengadopsi teknik penguapan bertingkat yang dikenal sebagai sistem "*multiple effect*" [9]. Metode ini diterapkan khususnya pada bagian penguapan dalam proses produksi gula. Dengan menggunakan sistem ini, pabrik dapat mengendalikan kondisi penguapan secara lebih efektif, sehingga mengurangi risiko terjadinya inversi sukrosa yang tidak diinginkan.

Dalam industri pengolahan gula, salah satu jenis evaporator *multiple effect* yang sering diimplementasikan adalah sistem *quadruple effect*. Sistem evaporator ini terdiri dari empat unit pemrosesan yang saling terhubung secara seri, yang dikenal sebagai badan penguapan atau *vessel* [10]. Susunan ini memfasilitasi proses penguapan bertahap, di mana setiap *vessel* berperan dalam meningkatkan konsentrasi larutan gula secara progresif. Evaporator yang menggunakan sistem *quadruple effect* memiliki kemampuan secara signifikan meningkatkan kandungan gula dalam nira tebu. Proses ini mampu mengubah konsentrasi gula, yang diukur dalam satuan Brix, dari 14% menjadi 68%. Selain itu, desain *quadruple effect* ini memungkinkan adanya gradien suhu yang terkontrol antara uap pemanas dan nira yang sedang diproses [3]. Gradien suhu yang terbentuk dalam sistem yang dikenal sebagai *temperature drop* memiliki manfaat signifikan dalam proses evaporasi. Ketika nira dipanaskan uap air yang dihasilkan tidak terbuang sia-sia. Namun, uap ini dimanfaatkan kembali sebagai sumber panas untuk tahap penguapan berikutnya dalam rangkaian proses. Pemanfaatan panas berulang ini terjadi secara berurutan di sepanjang sistem evaporator yang tersusun seri [10]. Evaporator dengan sistem *quadruple effect* dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan energi melalui pemanfaatan panas laten [11]. Sistem ini dilengkapi dengan mekanisme *bleeding*, yang memungkinkan pengalihan sebagian uap untuk digunakan di berbagai stasiun produksi lainnya. Pendekatan ini tidak hanya mengoptimalkan penggunaan energi tetapi juga meminimalkan kehilangan panas yang tidak perlu. Efisiensi stasiun penguapan menjadi indikator kunci dalam proses ini. Semakin banyak air yang berhasil diuapkan, semakin tinggi tingkat kinerja stasiun tersebut. Hal ini menegaskan peran vital stasiun penguapan dalam keseluruhan proses produksi, di mana efektivitasnya berdampak langsung pada efisiensi energi dan produktivitas pabrik secara keseluruhan.

Mengingat peran krusial proses evaporasi dalam produksi gula, diperlukan evaluasi mendalam untuk memahami dinamika perpindahan panas yang terjadi selama proses ini. Meskipun sistem "*quadruple effect*" umumnya digunakan dalam industri pengolahan

makanan, penelitian ini berfokus pada analisis sistem yang lebih kompleks, yaitu "*quintuple effect*" yang dioperasikan oleh PG Krebet Baru II. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi dan parameter perpindahan panas dalam sistem evaporator *quintuple effect* tersebut. Dalam pengoperasian evaporator *quintuple effect*, beberapa hal perlu dianalisis. Pertama, proses penguapan yang terjadi di setiap evaporator merupakan tahapan kritis yang menentukan efisiensi keseluruhan sistem. Kedua, penting untuk mengetahui besarnya laju perpindahan panas yang terjadi di masing-masing evaporator, karena hal ini mempengaruhi efisiensi energi dari proses. Ketiga, *overall heat transfer coefficient* (U). Keempat, jumlah luasan perpindahan panas pada setiap evaporator harus diketahui. Kelima, hubungan antara konsentrasi brix dengan proses termodinamika dan perpindahan panas merupakan faktor kunci yang perlu diperhatikan dalam menjaga kualitas produk dan efisien proses secara keseluruhan. Analisis termodinamika digunakan untuk memahami aliran energi dan perubahan fase dalam sistem. Sedangkan untuk menghitung perpindahan panas yang terjadi, penelitian ini mengadopsi metode Dessin, sebuah teknik yang telah terbukti efektif dan sering diaplikasikan dalam analisis evaporator *quintuple effect*. Dengan memahami elemen-elemen ini dengan baik, pengoperasian evaporator *quintuple effect* dapat dioptimalkan untuk mencapai hasil yang diinginkan secara efisien dan efektif.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Adapun tahapan metodologi penelitian sebagai berikut:

2.1. Pengumpulan Data

Data yang didapatkan adalah data operasi evaporasi yang di jelaskan pada Tabel 1 berikut ini:

Table 1. Data operasi evaporator yang diambil pada tanggal 3 September 2023

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas	5800	Ton/hari
% Nira Mentah	106,68	%
% Nira Encer	128	%
°Brix Nira Mentah	12,66	
°Brix Nira Encer	12,31	
°Brix Nira Tekanan Uap Bekas	62	
Tekanan Uap Bekas	0,8	kg/cm ²
	88,26	kPa
Tekanan Uap Bekas (abs)	1,833	kg/cm ²
	179,77	kPa
Tekanan Vakum Evaporator Akhir	0,1903	kg/cm ²
	18,664	kPa
Selisih Tekanan	1,624	kg/cm ²
	161,110	kPa
Suhu Uap Bekas	116,82	°C
Suhu Nira Masuk Evaporator	105	°C
Suhu Nira pada <i>Juice heater</i> I	75	°C
Suhu Nira pada <i>Juice heater</i> II	105	°C

2.2. Perhitungan

Dalam proses analisis evaporator, masing-masing *vessel* parameter uap jenuh (*saturated steam*) menjadi acuan penting yang digunakan di setiap tahap perhitungan. Hal ini mengacu pada sifat-sifat termodinamika uap air pada titik di mana ia berada dalam keseimbangan dengan fase cairnya [12]. Langkah-langkah untuk analisis evaporator *multiple effect* seperti di bawah ini.

1. Menghitung *mass flow nira*

Mass flow nira yang memasuki sistem evaporator dapat dikalkulasi berdasarkan kapasitas penggilingan tebu PG Krebet Baru II di Malang. Pabrik ini memiliki kemampuan untuk mengolah tebu sebanyak 5800 TCD (*Ton Cane per Day* atau ton tebu per hari). Dengan mengetahui angka kapasitas ini, kita dapat menghitung secara akurat berapa banyak massa nira tebu yang mengalir ke dalam evaporator per satuan waktu.

$$\text{Mass flowrate nira} = \text{Kapasitas giling} \times \% \text{Nira Encer} \quad (1)$$

2. Menentukan temperatur uap jenuh

Nilai tekanan yang tertera pada setiap *vessel* evaporator sudah dalam bentuk tekanan absolut. Berdasarkan data tekanan ini, kita dapat menentukan suhu uap jenuh (T_s) yang sesuai. Proses penentuan suhu ini dilakukan melalui metode interpolasi, dengan menggunakan informasi yang tersedia dalam tabel sifat uap air (*steam table*) dengan persamaan sebagai berikut [13].

$$T_s = T_a + \left[(P - P_a) \times \left(\frac{T_b - T_a}{P_b - P_a} \right) \right] \quad (2)$$

Dalam konteks ini, P yang diukur dalam satuan kg/cm^2 mewakili tekanan operasional pada masing-masing tahap evaporasi. Untuk melakukan interpolasi yang akurat, kita menggunakan dua nilai referensi dari tabel sifat uap air (*steam table*). Nilai-nilai ini ditandai dengan subskrip "a" dan "b", di mana P_a merujuk pada data tekanan terdekat di atas nilai P yang dicari, sementara P_b menunjukkan data tekanan terdekat di bawahnya [4].

3. Menghitung Uap *Bleeding*

Banyaknya uap yang di *bleed* tergantung dari kebutuhan uap pada alat tersebut. Sebelum menghitung uap *bleeding* maka diperlukan data c_p nira dengan persamaan berikut:

$$C_p = 1 - (0,006 \times \% \text{brix}_{\text{nira mentah}}) \quad (3)$$

Untuk menghitung kebutuhan uap *bleed* digunakan persamaan sebagai berikut [14]:

$$X = \frac{\dot{m} \times C_p \times (\Delta T)}{r} \quad (4)$$

Keterangan:

X = Kebutuhan uap (ton/jam)

\dot{m} = laju alir nira (ton/jam)

c_p = kapasitas panas (kcal/kg.K)

ΔT = perbedaan temperatur (K)

r = kalor laten pada suhu uap *bleed* (kcal/kg)

4. Menghitung banyaknya air yang diuapkan

Dengan tersedianya informasi mengenai volume nira encer yang memasuki sistem evaporator, serta data konsentrasi gula (dalam satuan °Brix) pada keluaran vessel ke-5, kita dapat menghitung jumlah air yang berhasil diuapkan selama proses evaporasi berlangsung menggunakan persamaan seperti berikut [13].

$$E = J - S = J \left(1 - \left(\frac{B_j}{B_s} \right) \right) \quad (5)$$

Keterangan:

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

5. Menghitung banyaknya air yang diuapkan masing – masing *vessel*

Karena adanya uap yang di *bleed* untuk memenuhi kebutuhan panas pada stasiun pemanasan maka nilai y dapat dihitung menggunakan *mass balance* dari jumlah air yang diuapkan (E) [12].

Table 2. Persamaan produksi uap tiap Evaporator

Nomor Evaporator	Produksi Uap
Evaporator 1	$2x+2y+2z$
Evaporator 2	$x+y+z$
Evaporator 3	$y+z$
Evaporator 4	z
Evaporator 5	z
E	$3x+4y+6z$

6. Menghitung laju alir nira tiap *vesse*l

Setelah mengetahui jumlah air yang berhasil diuapkan selama proses evaporasi, maka dapat menentukan laju aliran nira kental yang keluar dari sistem evaporator. Perhitungan ini didasarkan pada prinsip kesetimbangan massa (*mass balance*) yaitu [12]:

$$\dot{m}_{\text{nira kental}} = \dot{m}_{\text{nira jernih}} - E \quad (6)$$

Keterangan:

$\dot{m}_{\text{nira kental}}$ = laju alir nira kental (ton/jam)

$\dot{m}_{\text{nira jernih}}$ = laju alir nira jernih (ton/jam)

E = total air yang diuapkan (ton/jam)

7. Menghitung °brix nira keluar evaporator

°Brix evaporator dapat diketahui dengan persamaan [12]:

$$B_o = \left(\frac{\dot{m}_{in}}{\dot{m}_{out}} \right) \times B_i \quad (7)$$

Keterangan:

B_o = °brix keluar vessel

B_i = °brix masuk vessel

\dot{m}_{in} = jumlah nira masuk vessel (ton/jam)

\dot{m}_{out} = jumlah nira keluar vessel (ton/jam)

8. Menghitung BPE [14]

$$\Delta T_b = \frac{2B}{100 - B} \quad (8)$$

Keterangan:

ΔT_b = Boiling Point Elevation (°C)

B = °brix keluar evaporator (°brix)

9. Menghitung laju perpindahan panas masing

Dengan menggunakan *heat balance* maka akan diketahui Q setiap vessel [12]

a. Input

• *Steam* (uap nira yang masuk) = *Steam* dari setiap evaporator × total heat (9)

• Nira yang masuk = Massa nira yang masuk × kalor jenis setiap evaporator × ($T_{pada\ evaporator} - T_{larutan\ masuk}$) (10)

b. Output

• Kondensat = Uap yang masuk × panas sensible (11)

• Uap Nira = *Flowrate* nira yang masuk × total *Heat*

• Nira Kental = Massa nira yang masuk × kalor jenis setiap evaporator × ($T_{larutan\ masuk} - T_{larutan\ keluar}$) (12)

• $Q_{loss} = (Q_{kondensat} + Q_{Uap\ Nira} + Q_{Nira\ Kental}) - \text{total input}$ (13)

10. Menghitung *Overall heat transfer coefficient*

Overall heat transfer coefficient dapat dihitung menggunakan metode Dessin dengan persamaan [15]:

$$U = L \frac{(100 - B)(t_v - 54)}{1000} \quad (14)$$

Keterangan:

U = overall heat transfer coefficient (kcal/m².h.°C)

L = panas laten dari uap nira pada suhu vessel (kcal/kg)

B = °brix rata-rata nira dalam vessel (°brix)

t_v = suhu uap pemanas (°C)

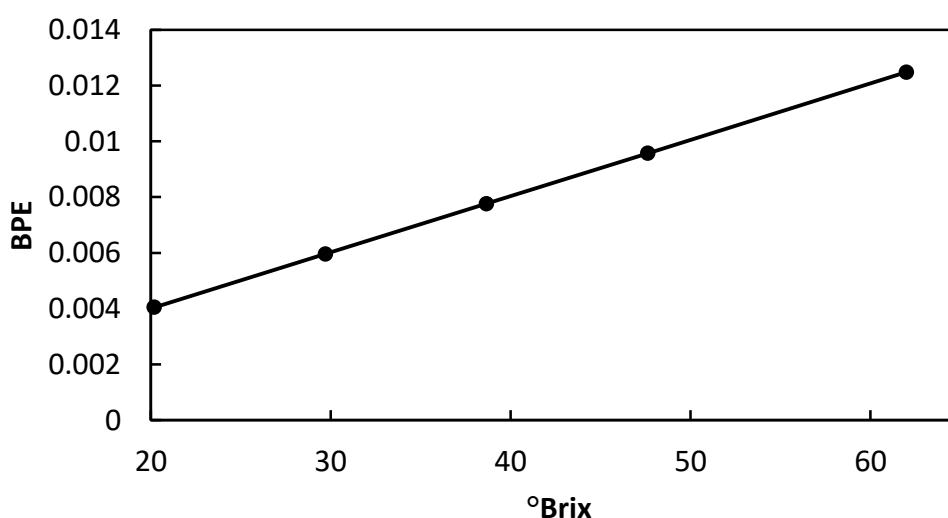
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Table 3. Hasil analisis perpindahan panas Evaporator *Quintuple-Effect* di PG Krebet Baru II Malang

Nomor Evaporator	Overall Heat Transfer Coefficient		°Brix	Suhu Pemanas	BPE	Laju Perpindahan Panas	
	(kJ/h.m ² .°C)	(kW/m ² .K)				Kcal/jam	kW
Evaporator 1	24374,320	6,766	20,192	110,205	0,004	80.280.289,281	93365,980
Evaporator 2	22822,617	6,335	29,700	102,349	0,006	79.514.677,100	92475,570
Evaporator 3	20901,298	5,802	38,657	92,822	0,007	40.242.788,316	46802,360
Evaporator 4	18271,252	5,071	47,622	80,131	0,009	2.066.689,471	24035,360
Evaporator 5	13591,025	3,772	62,000	58,474	0,012	1.362.968,077	15192,230

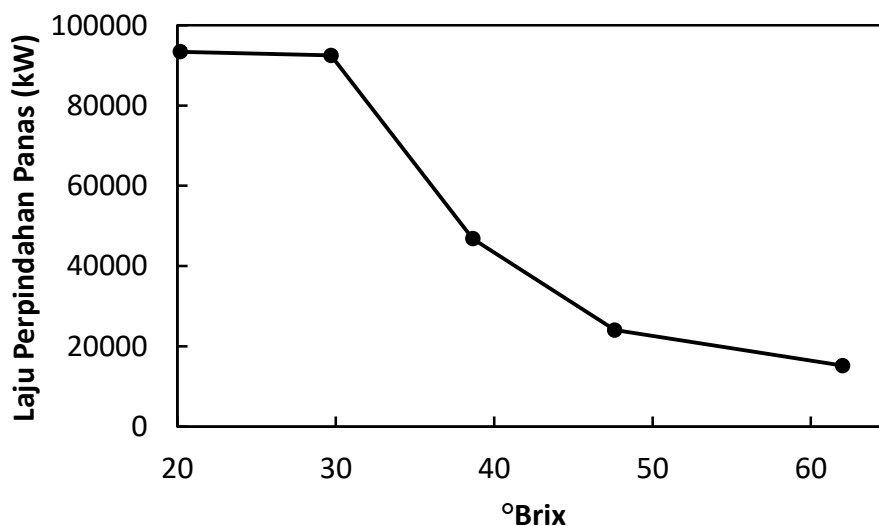
Pada PG Krebet Baru II Malang unit evaporasi memainkan peran penting dalam proses produksi gula. Fungsi utamanya adalah mengurangi kadar air dari nira tebu yang telah melalui

tahap pemurnian awal. Nira ini sudah bebas dari berbagai jenis kontaminan dan pengotor sebelum memasuki tahap evaporasi. Proses pengurangan kadar air dilakukan menggunakan metode penguapan bertingkat. Sistem ini terdiri dari beberapa tahap penguapan yang berurutan, memungkinkan pemekatan nira secara bertahap dan efisien. Unit ini menggunakan penguapan *multiple effect* dengan konfigurasi *quintuple-effect* atau 5 penguapan. Dalam sistem penguapan *single-effect*, efisiensinya relatif terbatas di mana 1 kg uap hanya mampu menguapkan sekitar 1 kg air dari produk. Namun, sistem penguapan *multiple-effect (N-effect)* menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan. Pada sistem N-multiple effect, 1 kg uap yang dimasukkan ke efek pertama dapat menguapkan hingga N kg air secara total. Proses ini berlangsung secara berantai yaitu 1 kg uap yang masuk ke efek pertama akan menguapkan 1 kg air dari nira, menghasilkan sekitar 1 kg uap baru. Uap baru ini kemudian digunakan untuk efek berikutnya, dan proses ini berulang sepanjang N efek dalam sistem. Dengan demikian, sistem *multiple-effect* memungkinkan penggunaan energi yang jauh lebih efisien dibandingkan dengan sistem *single-effect*, karena uap dapat dimanfaatkan berulang kali di sepanjang rangkaian efek [16]. Suplai uap yang disediakan oleh uap panas boiler (uap bekas) dan uap panas nira (*bleeding vapor*). Uap bekas akan masuk pada efek pertama dan uap (*bleed*) yang dikeluarkan dari efek pertama akan masuk ke efek kedua sebagai suplai pemanas, dan begitu seterusnya hingga efek kelima. Dalam proses penguapan nira tebu, energi termal yang dimanfaatkan untuk mengubah air menjadi uap disebut panas laten penguapan (*latent heat of vaporization*). Panas laten ini diukur dalam satuan kilojoule per kilogram (kJ/kg). Konsep ini menggambarkan jumlah energi spesifik yang diperlukan untuk mengubah fase 1 kilogram air dari cair menjadi uap, tanpa mengubah suhunya. Dengan kata lain, sejumlah energi tertentu dalam kilojoule dibutuhkan untuk menguapkan setiap kilogram air yang terkandung dalam nira tebu [17]. Secara spesifik, satu kilogram uap memiliki kapasitas untuk menguapkan satu kilogram air, asalkan keduanya berada pada suhu yang sama jika tidak ada massa yang hilang.



Gambar 1. Hubungan antara °Brix dengan *boiling point elevation* (BPE) pada Evaporator *Quintuple-Effect* di PG Krebbe Baru II Malang

Fenomena kenaikan titik didih (*boiling point elevation*) merujuk pada situasi di mana suatu larutan memiliki titik didih yang lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut murninya. Dalam konteks ini, ketika zat terlarut ditambahkan ke dalam pelarut, terjadi perubahan sifat koligatif larutan yang mengakibatkan peningkatan suhu di mana larutan tersebut mulai mendidih. Suatu larutan memiliki titik didih yang lebih tinggi dari pelarut murninya karena disebabkan oleh adanya partikel zat terlarut dalam larutan yang mencegah terjadinya peristiwa penguapan partikel pelarut [18]. Nira sebagai larutan yang terdiri dari air dan gula, memiliki parameter termal yang berbeda dari air murni. Titik didihnya lebih tinggi dibandingkan dengan air, peristiwa tersebut yang dikenal sebagai kenaikan titik didih atau *Boiling Point Elevation* (BPE). Besarnya BPE berkorelasi langsung dengan konsentrasi gula dalam nira, yang diukur dalam satuan °Brix. Semakin tinggi nilai °Brix pada nira yang keluar dari evaporator, semakin besar pula nilai BPE-nya. Dengan kata lain, terdapat hubungan yang berbanding lurus antara jumlah zat terlarut (dalam hal ini gula) dalam nira dengan peningkatan titik didihnya. Hal tersebut dapat diketahui pada °Brix 62, BPE dapat mencapai 0,0124.



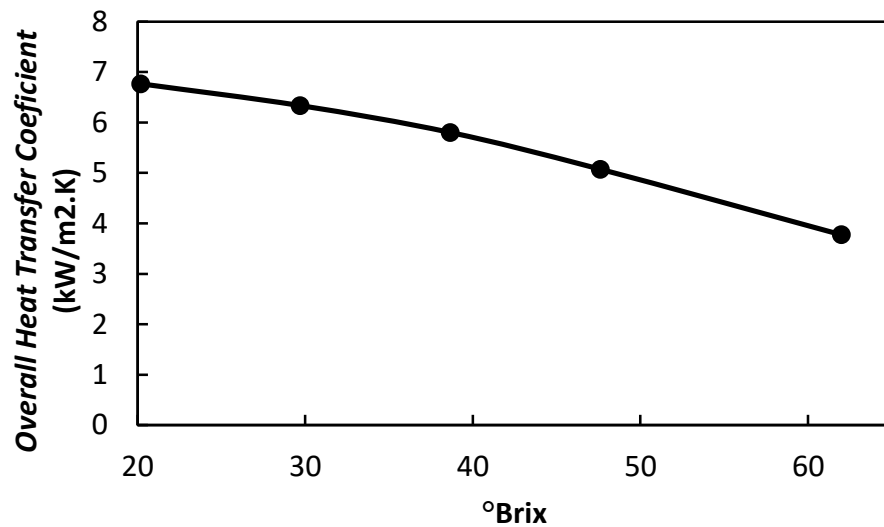
Gambar 2. Hubungan antara °Brix terhadap laju perpindahan panas pada Evaporator *Quintuple-Effect* di PG Kribet Baru II Malang

Laju perpindahan panas dalam sebuah sistem dapat diketahui dari analisis *heat balance* atau neraca panas. Berdasarkan informasi pada Gambar 2, terlihat adanya hubungan terbalik antara tingkat °Brix dan laju perpindahan panas. Ketika °Brix meningkat, laju perpindahan panas justru menurun. Konsentrasi °Brix yang meningkat mengakibatkan berkurangnya aliran uap (*bleed*) antara *vessel*. Akibatnya, terjadi penurunan laju perpindahan panas di dalam sistem. Dengan kata lain, tingginya kadar °Brix berbanding terbalik dengan jumlah uap yang berpindah dan kecepatan transfer panas dalam proses tersebut. Dua faktor utama yang mempengaruhi peningkatan laju perpindahan panas adalah tekanan operasional *vessel* yang tinggi dan konsentrasi gula dalam nira yang rendah [12]. Penurunan laju massa penguapan nira yang terjadi secara bertahap di setiap *vessel* mengakibatkan berkurangnya kebutuhan *bleeding* dalam sistem. Dalam hal ini, *vessel* berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pertukaran panas yang efisien antara *steam* (uap

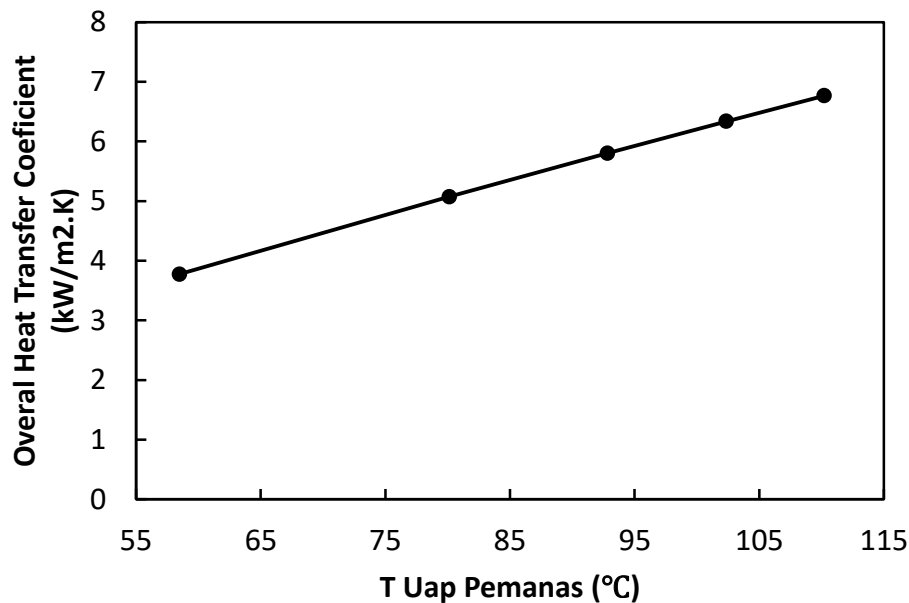
panas) dan nira yang sedang mengalami proses penguapan. Prinsip kekekalan energi menegaskan bahwa jumlah total energi dalam sistem tertutup tetap konstan, meskipun dapat bertransformasi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Pada kasus ini, energi panas yang dilepaskan oleh *steam* akan diserap sepenuhnya oleh nira, menyebabkan terjadinya proses penguapan. Dengan demikian, terjadi keseimbangan energi di mana besarnya energi panas yang dilepaskan oleh *steam* setara dengan energi panas yang diterima dan digunakan oleh nira untuk berubah fase menjadi uap. Saat laju penguapan nira menurun di setiap tahapan vessel, jumlah energi yang diperlukan untuk proses tersebut juga berkurang. Konsekuensinya, kebutuhan *bleeding* untuk memanaskan vessel berikutnya menjadi lebih sedikit. Hal ini mencerminkan efisiensi sistem dalam memanfaatkan energi panas secara optimal sesuai dengan kebutuhan aktual proses evaporasi pada setiap tahapnya.

Dalam perhitungan ini, °Brix yang dijadikan acuan adalah nilai yang diukur pada keluaran calandria. Gambar 3 menunjukkan hubungan terbalik antara nilai *U* (*overall heat transfer coefficient*) dan °Brix. Ketika °Brix meningkat, nilai *U* mengalami penurunan. Peristiwa yang terjadi dapat diartikan bahwa peningkatan konsentrasi nira berbanding terbalik dengan efisiensi perpindahan panas antara uap panas dan nira. Dengan kata lain, semakin pekat larutan nira (ditunjukkan oleh °Brix yang lebih tinggi) semakin rendah kemampuan sistem untuk mentransfer panas dari uap ke nira tersebut. Hubungan ini mengindikasikan bahwa konsentrasi nira memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika perpindahan panas dalam proses evaporasi, di mana nira dengan konsentrasi tinggi cenderung menghambat proses transfer panas yang efisien dari uap panas ke larutan nira. Ketika kontak antara uap pemanas dan nira berkurang, proses penguapan menjadi kurang efisien sehingga mengakibatkan penurunan laju penguapan keseluruhan dalam sistem tersebut [13]. Ketika konsentrasi nira meningkat pada tiap *vessel*-nya akan menyebabkan pertumbuhan komponen penggerak yang dapat menimbulkan penurunan efisiensi perpindahan panas, sehingga menurunkan nilai *overall heat transfer* [19]. Pada 2 *vessel* terakhir didapatkan nilai laju perpindahan panas yang hampir sama, hal ini dikarenakan *vessel* terakhir tidak di-*bleed* sehingga *mass flow rate* uap sama hanya saja *laten heat of vaporization*-nya semakin besar.

Selain konsentrasi nira (°Brix), temperatur pemanas juga berperan penting dalam mempengaruhi nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan (*U*). Umumnya, peningkatan perbedaan temperatur berbanding lurus dengan peningkatan nilai *U*. Dalam sistem *multi-vessel*, tekanan pada setiap *vessel* secara bertahap diturunkan. Hal ini memungkinkan penguapan air terjadi pada temperatur yang lebih rendah di setiap tahapan berikutnya. Gambar 4 menunjukkan hubungan antara nilai *overall heat transfer* dan temperatur uap pemanas. Terlihat bahwa pada *vessel* 1, temperatur mencapai 110,205 °C, sementara pada *vessel* ke-5 temperatur turun menjadi 58,474 °C. Sejalan dengan penurunan temperatur ini, nilai *overall heat transfer* juga mengalami penurunan secara konsisten.



Gambar 3. Hubungan antara *Overall Heat Transfer Coefficient* dengan °Brix pada Evaporator *Quintuple-Effect* di PG Kerebet Baru II Malang



Gambar 4. Hubungan antara T Uap Pemanas Masuk badan Evaporator dengan Laju *Overall Heat Transfer Coefficient*

Luas perpindahan panas yang diperoleh untuk *quintuple effect* pada PG Kerebet Baru II berturut-turut yaitu 4296,766 m²; 3088,921 m²; 2071,148 m²; 1331,453 m²; 649,473 m². Jika dibandingkan dengan luas pemanas yang ada saat ini (eksisting) yaitu 4000 m², 2200 m², 2200 m², 1190 m², 1190 m². Terlihat bahwa hasil perhitungan teoritis umumnya lebih besar daripada kondisi aktual kecuali vessel 5. Ketika luas area pemanas teoritis melebihi kondisi aktual, hal ini dapat mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas tidak berlangsung secara optimal. Kelebihan luas area ini dapat menyebabkan efisiensi perpindahan panas yang kurang maksimal dalam sistem tersebut [3]. Akibat dari perbedaan antara luas

perpindahan panas teoritis dan aktual, konsentrasi nira yang dihasilkan tidak mampu mencapai tingkat °Brix yang diinginkan oleh PG Kribet Baru II. Hal ini dapat menjadi indikator perlunya optimasi atau penyesuaian pada sistem evaporasi untuk mencapai target konsentrasi nira yang diinginkan oleh PG Kribet Baru II.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian pada sistem evaporator *quintuple-effect* di PG Kribet Baru II Malang, dapat disimpulkan bahwa tingkat °Brix memiliki pengaruh signifikan terhadap parameter perpindahan panas. Peningkatan °Brix dari 20,19 hingga 62,00 berkorelasi positif dengan kenaikan titik didih (*boiling point elevation*) dari 0,004 hingga 0,012. Namun, peningkatan °Brix berdampak negatif terhadap laju perpindahan panas, yang menurun dari 93.365,98 kW hingga 15.192,23 kW. Nilai *overall heat transfer coefficient* (U) juga mengalami penurunan seiring peningkatan °Brix, dari 6,766 kW/m².K menjadi 3,772 kW/m².K.

Luas perpindahan panas teoritis yang diperoleh (4296,766 m² hingga 649,473 m²) lebih besar dari kondisi aktual, menyebabkan perpindahan panas tidak maksimal dan konsentrasi nira tidak mencapai °Brix sesuai target. Saran yang dapat ditempuh industri dalam hal ini adalah mengoptimalkan desain dan operasi sistem evaporasi agar luas perpindahan panas aktual mendekati nilai teoritis. Selain itu, pengujian variasi parameter °Brix dan pengaruhnya terhadap kinerja sistem evaporasi dapat dilakukan untuk menentukan kondisi operasi yang paling efisien dalam mencapai target konsentrasi nira.

REFERENSI

- [1] Z. Hasan, "Produksi Minim, 2023 Pemerintah Akan Impor Gula 4,6 Juta Ton," 2023.
- [2] L. Qomariyah dan C. Sindhuwati, "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, 2023.
- [3] M. I. Ardiansyah, A. S. Wijaya, D. R. Wulan, dan A. Suwito, "Analisis Pengaruh Tekanan Uap Bekas Terhadap Parameter Perpindahan Panas Sistem Evaporator 5 Efek Pada Pg Kedawoeng Pasuruan," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 1, hal. 185–195, 2023.
- [4] A. S. Wijaya, M. I. Ardiansyah, D. R. Wulan, dan A. Suwito, "Analisis Variabel Proses yang Dipengaruhi Oleh Tekanan Uap Bekas Quintuple Effect System Evaporator di PG Kedawoeng Pasuruan," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 1, hal. 213–223, 2023.
- [5] A. Sukoyo, B. D. Argo, dan R. Yulianingsih, "Analisis Pengaruh Suhu Pengolahan dan Derajat Brix terhadap Parameter Fisikokimia dan Sensoris Gula Kelapa Cair dengan Metode Pengolahan Vakum," *Jurnal Bioproses Komododitas Tropis*, vol. 2, no. 2, hal. 170–180, 2014.
- [6] D. Nursafuan, Ersan, dan D. Supriyatdi, "Pembuatan Gula Aren Cair dengan Pengaturan Kapur dan Suhu Evaporasi (Development of Liquid Palm Sugar with Lime and Evaporation Temperature Settings)," *Jurnal AIP*, vol. 4, no. 2, hal. 79–87, 2016.
- [7] S. Dewi, "The Effect of Temperature Cooking of Sugar Juice and Stirring Speed on The Quality of Brown Sugar Cane," *Jurnal Teknologi Pertanian*, vol. 15, no. 3, hal. 149–158,

- 2014.
- [8] F.U.D. Pratiwi, A. Kartikasari, dan A. Chumaidi, "Analisa Efisiensi Kinerja *Tripple Effect* Evaporator Pada Produksi Pupuk Ammonium Sulfat II (Za II) di Industri Pupuk," *Distilat Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 5, no. 1, hal. 19–23, 2023.
 - [9] 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," *Process Journal*, vol. 8, no. 342, 2020.
 - [10] R. Wulandari, dan L. H. Saputri, "Evaluasi Kinerja Stasiun Penguapan Ditinjau dari Efisiensi Penggunaan Uap di PT. PG Rajawali II, Unit PG. Sindang Laut Cirebon," *Jurnal Pengelolaan Perkebebanan*, vol. 2, no. 2, hal. 73–80, 2021.
 - [11] Q. Ruan, H. Jiang, M. Nian, dan Z. Yan, "Mathematical Modeling And Simulation of Countercurrent Multiple Effect Evaporation for Fruit Juice Concentration," *Journal of Food Engineering*, vol. 146, hal. 243–251, 2015.
 - [12] E. Hugot, "Handbook of cane sugar engineering," Elsevier, vol. 161, no. 3, hal. 1186, 1986,
 - [13] Geankopolis, *Transport Process and Unit Operations*, hal. 538, 1993.
 - [14] P. Rein, *Cane Sugar Engineering*, Berlin, 2007.
 - [15] G.H. Singh, *Evaporator Single Effect*. 2013.
 - [16] T. D. Bharat bhai, J. Nikhil, D. Kantariya, J. Makhija, Y. Shah, and Y. Mishra, "To Increase the Efficiency of Evaporator using Various Techniques," *Journal Research Publication and Reviewes*, vol. 3, no. 2, hal 293–297, 2021.
 - [17] E. A. Storia dan Prabowo "Pengaruh °Brix Terhadap Parameter Perpindahan Panas Pada Evaporator Robert Sistem Quintuple Effect di PG. Gempolkrep," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 1, hal. 1–6, 2016.
 - [18] E. Anggraeni, F. D. Alya, G. Z. Anwar, I. N. Y. Yanti, K. S. Nitya, N. L. Nisa, dan N. A. Hastari, "Analisis Pengaruh Jenis Larutan terhadap Kenaikan Titik Didih Larutan di Dalam Laboratorium Kimia Universitas Negeri Semarang," *Jurnal Analis*, vol. 3, no. 1, hal. 095–101, 2024.
 - [19] J. Hanuranto dan A. Mustafa, "Pengukuran Variabel Proses Pada *Quadruple Effect Evaporation* di Pabrik Gula," hal. 19–26, 2013.