

ANALISIS KEBUTUHAN LUAS PERMUKAAN PEMANAS QUADRUPLE EFFECT EVAPORATOR PADA STASIUN PENGUAPAN PABRIK GULA MODJOPANGGOONG TULUNGAGUNG

Moh Raffi Erina Mauludian¹, Arief Rahmatulloh¹, Rizki Dwi Nanto²

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

²PT Perkebunan Nusantara X PG Modjopanggoong Jl. Kawi, Cuwini, Sidorejo, Kec. Kauman,
Kab.Tulungagung, Indonesia

raffierina@gmail.com ; [arief1289polinema@gmail.com]

ABSTRAK

Proses evaporasi merupakan salah satu tahap penting dalam industri pengolahan gula, di mana efisiensi energi menjadi faktor penentu utama keberhasilan operasional. PG Modjopanggoong Tulungagung menerapkan sistem *Quadruple effect evaporator* untuk meningkatkan efisiensi termal dan menurunkan konsumsi energi. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung kebutuhan luas permukaan pemanas pada masing-masing efek evaporator dan mengevaluasi kesesuaian antara hasil perhitungan dengan data aktual di lapangan. Metode pengolahan data dilakukan dengan pendekatan neraca massa, neraca energi, serta perhitungan koefisien perpindahan panas secara teoritis. Hasil menunjukkan bahwa kebutuhan luas permukaan pemanas untuk masing-masing efek adalah A1 sebesar 629,06 m², A2 sebesar 614,20 m², A3 sebesar 672,57 m², dan A4 sebesar 572,19 m², yang seluruhnya masih berada dalam batas spesifikasi peralatan pabrik. Nilai *steam economy* sebesar 3,93 menunjukkan efisiensi yang baik. Penelitian ini dapat menjadi dasar evaluasi dan perawatan sistem evaporator secara berkala untuk menjamin performa optimal.

Kata kunci: efisiensi energi, evaporasi, luas pemanas, quadruple effect, steam economy

ABSTRACT

Evaporation is a important stage in the sugar processing industry where energy efficiency is a key factor in operational success. PG Modjopanggoong Tulungagung applies a Quadruple effect evaporator system to improve thermal efficiency and reduce energy consumption. This study aims to calculate the required heating surface area of each evaporator effect and evaluate the consistency between theoretical calculations and actual field data. Data processing methods involved mass and energy balance calculations as well as theoretical heat transfer coefficient estimations. The results show that the required heating surfaces are A1 = 629.06 m², A2 = 614.20 m², A3 = 672.57 m², and A4 = 572.19 m², all within the factory's equipment specifications. The steam economy value of 3.93 indicates a high operational efficiency. This research can be used as a basis for regular evaluation and maintenance of the evaporator system to ensure optimal performance.

Keywords: energy efficiency, evaporation, heating surface, quadruple effect, steam economy

1. PENDAHULUAN

Industri gula merupakan salah satu sektor strategis dalam perekonomian nasional yang sangat bergantung pada efisiensi energi dalam proses produksinya. Salah satu tahapan paling boros energi dalam produksi gula adalah proses penguapan, yang bertujuan untuk

memekatkan nira menjadi larutan berkadar gula tinggi. Untuk mengatasi tantangan ini, banyak pabrik modern, termasuk PG Modjopanggoong Tulungagung, telah mengadopsi sistem *multiple-effect evaporator*, khususnya konfigurasi *quadruple effect*, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi konsumsi uap secara signifikan [1]. Unit proses tersebut memerlukan pasokan energi panas dalam bentuk uap, yang sebagian besar diperoleh dari uap bekas hasil pembakaran *bagasse* di ketel uap (boiler). *Bagasse* merupakan produk samping dari proses ekstraksi nira tebu dan digunakan sebagai bahan bakar utama untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Uap ini tidak hanya digunakan untuk pemanasan proses, tetapi juga untuk menggerakkan turbin uap yang menyuplai kebutuhan listrik pabrik. Pada proses penggilingan tebu dengan performa tinggi, sering kali dibutuhkan tambahan bahan bakar untuk memenuhi lonjakan kebutuhan uap. Bahan bakar tambahan tersebut dapat berupa daun tebu kering (*dhaduk*), potongan kayu, serabut kelapa, atau bahkan residu minyak dari peralatan proses [2].

Efisiensi sistem ini tetapi sangat bergantung sangat bergantung pada perancangan dan pengoperasian parameter kritis, salah satunya adalah luas permukaan pemanas di tiap efek evaporator. Jika luas ini tidak sesuai, maka dapat terjadi ketidakseimbangan perpindahan panas, pemborosan energi, bahkan penurunan kualitas produk akhir [3]. Oleh karena itu, distribusi optimal permukaan pemanas menjadi sangat penting dalam sistem evaporator multi efek [4]. Selain itu, pengaruh desain aliran, seperti *forward-feed* dan *backward-feed*, juga terbukti berdampak besar terhadap efisiensi energi sistem kogenerasi pabrik gula [5]. Lebih lanjut, modifikasi proses evaporasi konvensional telah diteliti untuk menurunkan kehilangan sukrosa akibat inversi dan meningkatkan efisiensi energi keseluruhan, menunjukkan perlunya evaluasi teknis yang menyeluruh pada sistem yang telah berjalan [6]. Studi semacam ini namun masih sangat terbatas di Indonesia, khususnya yang memanfaatkan data aktual operasional pabrik.

Analisis eksergi dalam sistem evaporator menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan termodinamika terjadi pada efek pertama, dengan efisiensi tertinggi biasanya pada efek tengah, seperti efek ketiga. Pengukuran langsung terhadap variabel proses di lapangan, seperti suhu, tekanan, dan luas pemanas aktual, menegaskan pentingnya kestabilan kondisi operasional dan kontrol fouling untuk mendukung performa optimal. Optimalisasi distribusi luas permukaan pemanas pada sistem *quadruple effect* juga terbukti meningkatkan laju penguapan sekaligus meminimalkan konsumsi uap berdasarkan simulasi dan pendekatan numerik [7].

Dari sisi operasional dan pemeliharaan, pendekatan simultan antara perancangan ulang dan penjadwalan sistem evaporator dinilai penting untuk meminimalkan konsumsi energi serta mencegah penurunan performa akibat *fouling*, sebagaimana dibuktikan melalui model optimasi *mixed-integer nonlinear programming* (MINLP) [8]. Selain itu, pendekatan integrasi termal menggunakan *pinch analysis* juga memperlihatkan bahwa konfigurasi *quadruple effect* dapat menghemat konsumsi energi lebih dari 8% dibandingkan skema konvensional, khususnya dengan strategi *bleeding* uap ke *juice heater* tersier [9].

Tak hanya itu, inovasi dalam teknik kontrol proses seperti penerapan *fuzzy logic* dan metode *Taguchi* juga telah digunakan untuk mengoptimalkan parameter proses evaporasi pada sistem *quadruple effect*. Pendekatan ini terbukti meningkatkan efisiensi penguapan sekaligus menjaga kualitas sirup akhir, melalui pengaturan simultan terhadap suhu umpan, laju alir uap, dan laju alir nira. Dalam hal pemenuhan konsentrasi nira produk sebesar 60% *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 diumpangkan [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kebutuhan luas permukaan pemanas pada masing-masing efek dalam sistem *quadruple effect evaporator* di PG Modjopanggoong Tulungagung. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan neraca massa dan energi serta teori perpindahan panas. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam evaluasi desain sistem, program perawatan, dan pengambilan keputusan teknis lainnya demi menjamin efisiensi operasional yang optimal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kebutuhan luas permukaan pemanas pada masing-masing efek dalam sistem *quadruple effect evaporator* di Stasiun Penguapan PG Modjopanggoong, Tulungagung. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data, analisis neraca massa dan energi, serta perhitungan kebutuhan luas permukaan pemanas menggunakan prinsip perpindahan panas.

2.1. Pengumpulan Data

Berbagai data yang dikumpulkan berupa data aktual yakni laju alir *feed* yang masuk pada evaporator 1 pada Pabrik Gula Modjopanggoong, %*brix* nira jernih, %*brix* nira kental, suhu pemanas yang berasal dari uap bekas, suhu nira masuk, suhu pada *effect* 1, suhu pada *effect* 2, suhu pada *effect* 3, suhu pada *effect* 4. Berbagai data primer tersebut didapatkan dari pengamatan langsung pada stasiun penguapan. Selain data primer, terdapat data sekunder berasal dari data operasional dan teknis pabrik, termasuk spesifikasi alat, peta alir proses, dan laporan produksi stasiun penguapan. Setelah mendapatkan data yang di butuhkan, kemudian dilakukan pengolahan data.

Tabel 1. Pengambilan data stasiun penguapan

| Keterangan | Nilai | Satuan |
|-------------------------|-----------|--------|
| Laju alir <i>feed</i> | 101756,52 | Kg/jam |
| <i>brix</i> nira jernih | 12,3 | % |
| <i>brix</i> nira kental | 59,85 | % |
| Suhu <i>steam</i> | 120 | °C |
| Suhu <i>feed</i> | 100 | °C |
| Suhu <i>effect</i> 1 | 103 | °C |
| Suhu <i>effect</i> 2 | 90 | °C |
| Suhu <i>effect</i> 3 | 88 | °C |
| Suhu <i>effect</i> 4 | 70 | °C |

2.2. Perhitungan Neraca Massa

Neraca massa total dan komponen disusun untuk menentukan aliran massa cair (nira) dan uap di tiap efek evaporator, dengan asumsi tanpa kehilangan energi ke lingkungan. Untuk neraca massa total sebagai berikut :

$$F = L_4 + (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (1)$$

Untuk mencari nilai L_4 , maka digunakan perhitungan neraca massa komponen :

$$F \cdot x_f = L_4 \cdot x_L \quad (2)$$

Untuk neraca massa masing masing efek sebagai berikut :

$$L_{n-1} = L_n + V_n \quad (3)$$

Keterangan :

F = Laju alir nira masuk/nira jernih (kg/jam)

L4 = Laju alir nira keluar/nira kental (kg/jam)

V_n = Laju uap ditiap efek (kg/jam)

L_n = Laju alir nira ditiap efek (kg/jam)

X = Fraksi *brix*

2.3. Penentuan Koefisien Perpindahan Panas (U)

Koefisien perpindahan panas total (U) dihitung menggunakan pendekatan korelasi empiris dari *Hugot* (1972) sebagai berikut :

$$U = a \times (100 - B) (T_v - 54) \quad (4)$$

Keterangan :

a = koefisien *margin of safety*

B = persen *brix* nira (%)

T_v = Temperatur uap pemanas (°C)

Nilai U dihitung terpisah untuk setiap efek berdasarkan nilai *brix* masing-masing efek dan suhu kerja yang berbeda. Nilai a sebesar 0,0008 digunakan untuk menghitung *design overall coefficient* (UD) yang mempertimbangkan formasi pembentukan pengotor.

2.4. Perhitungan Luas Permukaan Pemanas (A) dan %Error

Luas permukaan pemanas dihitung berdasarkan rumus dasar perpindahan panas sebagai berikut :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

Keterangan :

Q = Total energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air (kj/jam)

U = Koeffisien Perpindahan Panas (kj/m² jam °C)

ΔT = Perbedaan suhu (°C)

Energi Q diperoleh dari produk antara massa uap hasil perhitungan dan panas *laten* (λ) dari *steam table*. Efek 1 dihitung berdasarkan *steam* utama sedangkan efek 2–4 dihitung berdasarkan uap hasil efek sebelumnya. Untuk mengetahui %Error dari perhitungan luas permukaan yang dilakukan, maka dapat diketahui sebagai berikut :

$$\frac{|A - A_m|}{A_m} \cdot 100\% \quad (6)$$

Keterangan :

A = Luas permukaan pemanas (m²)

A_m = Luas permukaan rata rata dari 4 efek (m²)

Dari %Error yang diperoleh maka dapat menentukan apakah luas area tersebut sudah atau belum memenuhi. Nilai %error kecil menunjukkan bahwa hasil perhitungan sangat mendekati realita dan model matematis yang digunakan akurat [11] [12].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Spesifikasi Luas Pemanas Evaporator

Tabel 2. Spesifikasi luas pemanas evaporator

| Unit <i>quadruple effect evaporator</i> | Luas pemanas aktual (m ²) | Luas pemanas perhitungan (m ²) |
|---|---------------------------------------|--|
| 1 | 2300 | 629,06 |
| 2 | 1000 | 614,20 |
| 3 | 1000 | 672,57 |
| 4 | 737 | 572,19 |

3.2 %Error Perhitungan Luas Pemanas Evaporator

Tabel 3. %Error perhitungan luas pemanas evaporator

| Unit <i>quadruple effect evaporator</i> | Error (%) |
|---|-----------|
| 1 | 0,01133 |
| 2 | 0,01254 |
| 3 | 0,08129 |
| 4 | 0,08008 |

3.3 Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan luas permukaan pemanas pada sistem *quadruple effect evaporator* menunjukkan bahwa luas aktual yang tersedia di PG Modjopangoong secara umum memadai untuk memenuhi kebutuhan perpindahan panas. Perbedaan antara hasil perhitungan dan kondisi aktual dapat dikaitkan dengan adanya faktor *fouling* dan fluktuasi kondisi operasi yang tidak terukur secara langsung. Luas pemanas pada efek 3 dan 4 menunjukkan deviasi yang lebih besar, di mana efek akhir cenderung mengalami penurunan efisiensi akibat akumulasi kerak pada permukaan pemanas [13]. *Quadruple effect evaporator* merupakan sistem penguapan empat tahap evaporasi (efek) yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi termal dalam proses penguapan. Prinsip dasarnya adalah memaksimalkan penggunaan energi uap agar konsumsi energi (bahan bakar boiler) menjadi lebih hemat sehingga mengurangi konsumsi uap baru [1]. Efisiensi termal sistem dievaluasi menggunakan parameter *steam economy*, yang didefinisikan sebagai rasio antara jumlah air yang diuapkan terhadap jumlah *steam* yang digunakan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *steam economy* sistem ini adalah 3,931, artinya satu kilogram uap mampu menguapkan sekitar 3,93 kg air. Nilai tersebut berada dalam kisaran optimal untuk sistem *quadruple effect* dan sesuai dengan hasil studi dari Bapat, dkk. (2016) yang menyatakan bahwa sistem evaporator dengan empat hingga lima efek mampu mencapai efisiensi dari 3,451 hingga 4,452 tergantung pada kondisi operasi dan pemeliharaan sistem [14]. Penelitian ini menunjukkan bahwa luas permukaan pemanas yang tersedia di pabrik secara umum telah memenuhi kebutuhan proses, namun nilai deviasi pada efek 3 dan 4 perlu mendapat perhatian khusus. Evaluasi rutin terhadap *fouling* dan efisiensi perpindahan panas menjadi hal krusial untuk menjaga performa evaporator. Adopsi teknologi baru seperti *microwave vacuum evaporation* [15] berpotensi meningkatkan efisiensi energi sistem penguapan secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan kebutuhan luas permukaan pemanas pada sistem *quadruple effect evaporator* di PG Modjopangoong Tulungagung, dapat disimpulkan bahwa sistem penguapan telah bekerja dengan efisiensi yang cukup tinggi. Luas permukaan pemanas pada masing-masing efek menunjukkan kecocokan yang baik dengan hasil perhitungan teoritis, dengan deviasi terbesar terjadi pada efek ketiga dan keempat. Nilai *steam economy* sebesar 3,931 menunjukkan bahwa sistem mampu menguapkan hampir empat kilogram air per kilogram steam, yang mengindikasikan performa termal yang efisien. Perbandingan antara hasil penelitian ini dan literatur mendukung pentingnya distribusi luas permukaan pemanas yang tepat dan pemeliharaan sistem secara berkala untuk menjaga kinerja optimum.

Untuk penelitian selanjutnya guna meningkatkan efisiensi sistem evaporator, disarankan agar PG Modjopangoong melakukan evaluasi dan pembersihan permukaan pemanas secara berkala, terutama pada efek ketiga dan keempat yang cenderung mengalami *fouling* lebih cepat. Selain itu, sistem monitoring parameter operasi seperti suhu, tekanan, dan *brix* perlu ditingkatkan agar penyimpangan proses dapat dideteksi dan ditangani lebih cepat.

REFERENSI

- [1] S. Chantasiriwan, "Simulation of Quadruple-Effect Evaporator with Vapor Bleeding Used for Juice Heating," *ETP International Journal of Food Engineering*, no. January 2016.
- [2] O. A. Rosyid, W. H. Pudjo, dan F. Diding, "Studi Penghematan Energi Pada Unit Ketel Uap Di Pabrik Gula," *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia.*, vol. 10, no. 3, hal. 171–176, 2008.
- [3] J. Sarkar dan S. Bhattacharyya, "Application of graphene and graphene-based materials in clean energy-related devices Minghui," *Archives of Thermodynamics*, vol. 33, no. 4, hal. 23–40, 2012.
- [4] S. Chantasiriwan, "Distribution of juice heater surface for optimum performance of evaporation process in raw sugar manufacturing," *Journal of Food Engineering*, vol. 195, no. 24, 2017.
- [5] 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" *Processes Journal*, vol. 8, no. 342, 2020.
- [6] S. Chantasiriwan, "Modification of conventional sugar juice evaporation process for increasing energy efficiency and decreasing sucrose inversion loss," *Processes*, vol. 8, no. 7, 2020.
- [7] S. Chantasiriwan, "Optimum surface area distribution of multiple-effect evaporator for minimizing steam use in raw sugar manufacturing," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 61, no. 2004, hal. 805–810, 2017.
- [8] H. Heluane, A. M. Blanco, M. R. Hernández, dan J. A. Bandoni, "Simultaneous re-design and scheduling of multiple effect evaporator systems," *Computers and Operations Research*, vol. 39, no. 5, hal. 1173–1186, 2012.
- [9] I. Riadi, Z. A. Putra, dan H. Cahyono, "Thermal integration analysis and improved configuration for multiple effect evaporator system based on pinch analysis," *Reaktor*, vol. 21, no. 2, hal. 74–93, 2021.
- [10] S. George dan D. N. Kyatanavar, "Optimization of multiple effect evaporator using

- fuzzy logic integrated with Taguchi technique,” *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, hal. 1415–1419, 2016.
- [11] E. Hugot, “Handbook of Pane Sugar Engineeing,” hal. 1186, 1986.
- [12] “C. J. Geankoplis, 1993 - Transport Processes and Separation Process Principles.pdf.”
- [13] J. Hanuranto dan A. Mustafa, “Pengukuran Variabel Proses pada Quadruple *Effect* Evaporation di Pabrik Gula,” *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, vol. 7, no. 1, hal. 19–26, 2023.
- [14] S. M. Bapat, V. S. Majali, dan G. Ravindranath, “Exergy and sustainability analysis of quintuple effect evaporation unit in a sugar industry - a case study,” *International Journal of Renewable Energy Technology*, vol. 7, no. 1, hal. 46, 2016.
- [15] Y. Tao, B. Yan, N. Zhang, M. Wang, J. Zhao, H. Zhang, W. Chen, D. Fan, “Microwave vacuum evaporation as a potential technology to concentrate sugar solutions: A study based on dielectric spectroscopy,” *Journal of Food Engineering*, vol. 294, no. August 2020, hal. 110414, 2021.