

ANALISIS KONSUMSI STEAM MENGGUNAKAN PINCH TECHNOLOGY PADA PROCESS HOUSE DI PABRIK GULA MODJOPANGGOONG

Erico Saputra Immanuel¹, Eko Naryono¹, Rizki Dwi Nanto²

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

²PT Sinergi Gula Nusantara Pabrik Gula Modjopanggoong Jl. Kawi, Cuwini, Sidorejo, Kec. Kauman, 66261, Kabupaten Tulungagung, Jawa Timur, Indonesia
ericosaputra05@gmail.com ; [eko.naryono@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Pemakaian *steam* (uap panas) pada industri gula relatif besar, khususnya pada unit *process house* yang terdiri dari proses pemurnian, penguapan, kristalisasi, dan puteran. Pemakaian *steam* yang berlebihan menyebabkan inefisiensi energi. Penelitian ini bertujuan menganalisis konsumsi *steam* di PG Modjopanggoong dengan metode *pinch technology* untuk meningkatkan efisiensi energi. Metode yang digunakan terdiri dari dua tahap yaitu pengumpulan data dari unit *process house*, perhitungan, dan analisis data. Pengumpulan data meliputi suhu, kapasitas aliran bahan, dan perhitungan entalpi dari aliran panas dan dingin. Data dianalisis menggunakan pendekatan *composite curve* untuk menentukan *pinch point* dan kebutuhan minimum energi (Q_{min}). Penerapan *pinch technology* efektif untuk mengidentifikasi kondisi optimum penggunaan energi panas, layak diterapkan untuk teknik evaluasi peningkatan efisiensi energi di pabrik gula. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *pinch point* berada pada suhu 115°C, dengan nilai *heat recovery* mencapai 72,714 MW dari potensi maksimum 75,211 MW. Kebutuhan utilitas pemanas eksternal sebesar 0 MW, dan kebutuhan utilitas pendingin minimum sebesar 2,497 MW. Nilai *Steam on Cane* (SOC) sebesar 43% menunjukkan bahwa konsumsi *steam* berada di bawah ambang batas efisiensi industri, yang menandakan efisiensi energi yang baik tanpa kebutuhan bahan bakar tambahan selain *bagasse*.

Kata kunci: energi, gula, optimasi, *pinch technology*, *steam*

ABSTRACT

Steam consumption in the sugar industry is relatively high, particularly in the process house unit, which includes purification, evaporation, crystallization, and centrifugation processes. Excessive steam usage leads to energy inefficiency. This study aims to analyze steam consumption at Modjopanggoong Sugar Factory using the pinch technology method to improve energy efficiency. The methodology consists of two steps: data collection from the process house unit and data calculation and analysis. Data collected includes temperature, material flow capacity, and enthalpy calculations of hot and cold streams. The data were analyzed using a composite curve approach to determine the pinch point and minimum energy requirement (Q_{min}). The application of pinch technology proves effective in identifying optimal conditions for thermal energy use and is feasible as an evaluation technique for improving energy efficiency in sugar factory. The results show that the pinch point is at 115°C, with a heat recovery value of 72.714 MW out of a maximum potential of 75.211 MW. The external heating utility requirement is 0 MW, while the minimum cooling utility requirement is 2.497 MW. A Steam on Cane (SOC) value of 43% indicates that steam consumption is below the industrial efficiency threshold, signifying good energy efficiency without the need for additional fuel beyond bagasse.

Keywords: energy, sugar, optimization, *pinch technology*, *steam*

1. PENDAHULUAN

Pada industri pengolahan gula, penggunaan energi *steam* (uap panas) di *process house* yang terdiri dari penggilingan, pemurnian, evaporasi, dan kristalisasi relatif besar [1,2]. *Steam* yang dihasilkan dari *boiler* dengan bahan bakar ampas tebu (*bagasse*) digunakan untuk menggerakkan turbin, memanaskan nira, menguapkan air, dan mendukung proses kristalisasi. Konsumsi *steam* yang berlebihan menyebabkan inefisiensi energi dan meningkatkan biaya operasional [3]. Untuk itu, diperlukan upaya optimasi guna meminimalkan pemakaian energi dan biaya produksi.

Efisiensi penggunaan energi di *process house* sangat berpengaruh terhadap konsumsi energi pabrik gula. Pengukuran menggunakan parameter *Steam on Cane* (SOC) merupakan salah satu teknik evaluasi untuk perhitungan efisiensi energi. SOC adalah rasio dalam satuan persen berat *steam* terhadap berat tebu yang digiling [4]. Pabrik gula dengan efisiensi tinggi umumnya memiliki nilai SOC di bawah 50%. Pada SOC yang lebih rendah dari 40% memungkinkan pabrik untuk melakukan kogenerasi dan menghasilkan listrik untuk dijual [5]. Penurunan nilai SOC menunjukkan menurunnya konsumsi *bagasse*, sehingga efisiensi energi pabrik meningkat tanpa memerlukan tambahan bahan bakar.

Pinch technology merupakan metode sistematis yang digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan energi melalui integrasi panas dalam suatu proses industri. Prinsip utamanya adalah memanfaatkan kembali panas dari aliran fluida panas (*hot streams*) untuk memanaskan aliran fluida dingin (*cold streams*) untuk mengurangi kebutuhan energi eksternal seperti *steam* dan pendingin. Titik kritis dalam analisis ini dikenal sebagai *pinch point*, yaitu titik temperatur tercapainya efisiensi maksimum pertukaran panas tanpa utilitas tambahan. Melalui analisis *composite curve* dan *grand composite curve*, dapat ditentukan kebutuhan minimum energi panas (Q_{hmin}) dan dingin (Q_{cmin}) di dalam sistem [6].

Daniyanto dan Rifai (2013) telah menerapkan *pinch analysis* untuk dasar menurunkan konsumsi *steam* di *process house* pabrik gula dan mencatat penurunan nilai SOC sebesar 8,8% dari kondisi awal yang menunjukkan pentingnya optimasi konfigurasi proses dan pemanfaatan kembali uap dari evaporator demi meningkatkan efisiensi energi [7]. Pada penelitian lain, Riadi dan Utomo (2022) mengevaluasi kondisi operasi *steam* bertekanan rendah (*Low Pressure Steam* - LPS) dengan metode *pinch analysis* [4]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengaturan tekanan LPS kisaran 0,9–1,1 kg/cm².G dapat mengurangi konsumsi energi sekitar 30% dan menurunkan nilai SOC menjadi 43,5% [4]. Kondisi ini menunjukkan dampak signifikan optimasi sistem utilitas terhadap efisiensi pabrik gula.

Studi lain oleh Umar, dkk. (2017) juga menggunakan *pinch analysis* untuk mengintegrasikan energi pada pabrik Savannah Sugar Company [8]. Hasil studi menunjukkan kebutuhan utilitas panas dengan pendekatan tradisional dan *pinch analysis* masing-masing sebesar 3.258 kW dan 2.120 kW (penghematan energi sebesar 34,9%), sedangkan kebutuhan utilitas dingin masing-masing sebesar 102.393 kW dan 45.500 kW (penghematan sebesar 55,56%) [8]. Medina, dkk. (2024) juga menerapkan integrasi termal menggunakan *pinch analysis* dalam proses produksi gula [9]. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi potensi penghematan energi sebesar 30% pada utilitas pemanasan dan 7% pada utilitas pendinginan, dengan estimasi penghematan biaya tahunan sekitar USD 464.850 [9]. Hal ini menunjukkan besarnya potensi keuntungan ekonomi dari integrasi panas yang optimal. Data dari hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa integrasi panas memberikan manfaat teknis dan finansial yang signifikan bagi industri gula.

Penelitian ini menerapkan metode *pinch technology* secara spesifik pada PG Modjopanggoong, yang merupakan salah satu pabrik gula tradisional yang menghadapi tantangan konsumsi energi tinggi. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang dilakukan pada pabrik modern atau skala besar, kebaruan penelitian ini adalah optimasi energi dilakukan pada pabrik skala menengah dengan karakteristik proses yang masih konvensional. Pada penelitian ini dilakukan analisis konsumsi *steam* terperinci pada tiap tahapan *process house*, sehingga diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang lebih aplikatif dan realistis untuk pabrik sejenis.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsumsi *steam* secara menyeluruh pada setiap tahapan *process house*, seperti pemurnian, evaporasi, dan kristalisasi dengan menerapkan *pinch technology*. Berdasarkan hasil analisis ini, diharapkan dapat diketahui pola distribusi energi panas yang lebih efisien, sehingga kebutuhan *steam* dapat diminimalisasi tanpa menurunkan kualitas produksi. Pada penelitian ini juga dilakukan evaluasi efisiensi konsumsi *steam* di PG Modjopanggoong berdasarkan indikator *Steam on Cane* (SOC), dan estimasi potensi penghematan energi yang masih dapat dicapai melalui integrasi panas yang optimal.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk menganalisis konsumsi *steam* pada *process house* di PG Modjopanggoong dengan menerapkan prinsip *pinch technology*. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai distribusi energi panas dalam suatu sistem proses serta mengidentifikasi peluang optimasi energi secara sistematis.

2.1. Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui beberapa teknik pengumpulan data. Metode kepustakaan dilakukan untuk memahami konsep dasar *heat exchanger network*, *pinch technology*, dan indikator efisiensi energi seperti *Steam on Cane* (SOC). Observasi langsung dilakukan di lapangan untuk mengamati dan mencatat parameter operasional seperti suhu masuk dan keluar, jenis aliran (*hot stream* dan *cold stream*), dan karakteristik proses yang menggunakan *steam* sebagai pemanas. Wawancara dengan pembimbing lapangan dan operator pabrik juga dilakukan untuk memperoleh informasi teknis dan operasional yang relevan. Selain itu, juga dilakukan konsultasi akademik dengan dosen pembimbing untuk diskusi ilmiah yang mendukung penelitian ini.

2.2. Teknik Evaluasi

Teknik evaluasi menggunakan pendekatan *pinch analysis* yang terdiri dari beberapa tahapan utama. Tahap pertama adalah identifikasi aliran panas (*hot stream*) dan aliran dingin (*cold stream*) yang terdapat di *process house*. Data suhu dan kapasitas panas spesifik dikumpulkan untuk masing-masing aliran, kemudian dihitung perubahan entalpi (ΔH). Setelah itu, ditentukan beda suhu minimum (ΔT_{min}) antara aliran panas dan dingin, yang dalam penelitian ini digunakan nilai 10°C sebagai nilai pendekatan. Berdasarkan data tersebut, kemudian dibuat kurva komposit (*composite curve*) yaitu grafik hubungan antara suhu dan entalpi aliran panas dan dingin. Kurva ini selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi titik *pinch*, yaitu titik batas optimal dalam pemanfaatan energi panas [10,11].

2.3. Definisi Operasional Variabel

Untuk perhitungan dan analisis, didefinisikan beberapa variabel operasional sebagai berikut:

- *Steam on Cane* (SOC): Rasio antara jumlah *steam* yang digunakan terhadap berat tebu yang digiling, dinyatakan dalam satuan persen (%). Semakin rendah nilai SOC, maka semakin efisien prosesnya [7].

$$\text{Steam on Cane} = \left(\frac{\text{Steam yang dibutuhkan}}{\text{Tebu yang digiling}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

- ΔH (Perubahan entalpi): Besarnya energi panas yang ditransfer [12], dihitung berdasarkan rumus:

$$\Delta H = m \times C_p \times (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (2)$$

Keterangan:

- m = massa (kg)
- C_p = kalor jenis (kcal/kg °C)
- T_{out} = suhu akhir (°C)
- T_{in} = suhu awal (°C)

- Q_{hmin} dan Q_{cmin}: Kebutuhan energi pemanas dan pendingin minimum setelah integrasi panas [13].
- Kurva komposit: Grafik hubungan antara suhu (T) dan entalpi (H) yang menunjukkan kebutuhan dan ketersediaan panas dalam sistem [13].
- *Pinch Point*: Titik minimum perbedaan suhu antara *hot stream* dan *cold stream* (ΔT_{min}), sebagai acuan dalam perancangan jaringan *heat exchanger* [13].

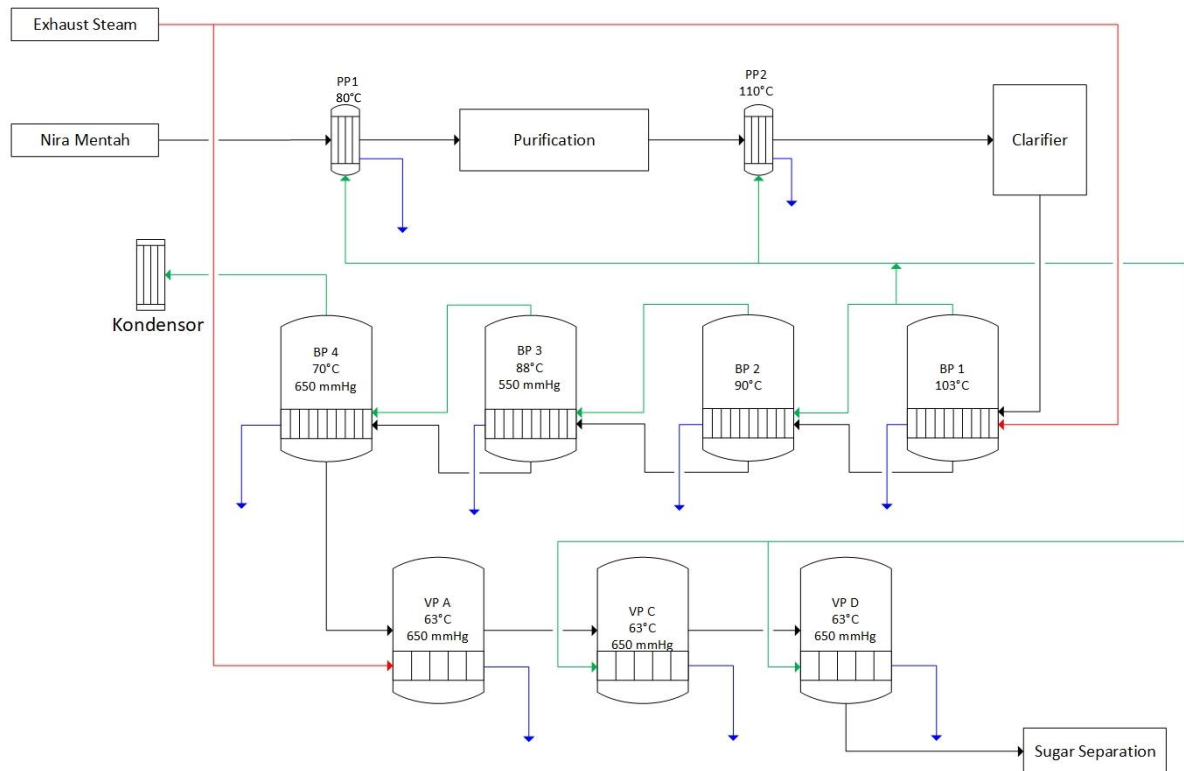
2.4. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menghitung energi panas (Q) berdasarkan perbedaan suhu dan kapasitas panas dari setiap aliran. Data tersebut digunakan untuk menyusun kurva komposit dan menentukan titik *pinch* serta target energi minimum. Hasil dari analisis ini digunakan untuk identifikasi potensi penghematan energi melalui integrasi panas dan evaluasi efektivitas struktur jaringan penukar panas. Evaluasi akhir dilakukan dengan membandingkan nilai SOC yang diperoleh dengan standar efisiensi industri, untuk menentukan kinerja energi pabrik gula secara keseluruhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Perhitungan Analisis *Pinch*

Kapasitas giling PG Modjopangoong rata-rata sebesar 2.800 ton tebu per hari, dengan sistem operasi kontinu selama 24 jam. Kebutuhan uap (*steam*) dipengaruhi kapasitas giling dan juga memengaruhi nilai *Steam on Cane* (SOC). Energi panas utama yang digunakan berasal dari pembakaran ampas tebu (*bagasse*) di dalam *boiler*, yang menghasilkan uap panas untuk memenuhi kebutuhan proses dan utilitas pabrik. Uap yang dihasilkan dari *boiler* digunakan untuk menggerakkan turbin uap dan sebagai media pemanas pada berbagai unit proses, seperti *juice heater*, *evaporator*, dan *vacuum pan*. Secara garis besar, alur proses pengolahan yang berlangsung di *process house* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi *process house* Pabrik Gula Modjopangoong

Tabel 1. Jenis aliran

No	Heat Exchanger	Aliran Panas	Aliran Dingin
1	Juice Heater 1	Uap Nira BP 1	Nira Mentah
2	Juice Heater 2	Uap Nira BP 1	Nira Mentah Sulfitasi
3	Evaporator 1	Exhaust Steam	Nira Jernih
4	Evaporator 2	Uap Nira BP 1	Nira Kental BP 1
5	Evaporator 3	Uap Nira BP 2	Nira Kental BP 2
6	Evaporator 4	Uap Nira BP 3	Nira Kental BP 3
7	Vacuum Pan A	Exhaust Steam	Bibit Gula VP A
8	Vacuum Pan C	Uap Nira BP 1	Bibit Gula VP C
9	Vacuum Pan D	Uap Nira BP 1	Bibit Gula VP D

PG Modjopangoong memiliki sembilan unit penukar panas utama yang digunakan untuk proses pemanasan dan penguapan nira, seperti *juice heater*, *evaporator*, dan *vacuum pan*. Aliran panas terdiri dari uap *exhaust steam* dan uap nira Badan Pemanas (BP), dan aliran dingin berasal berbagai jenis nira dan bibit gula dari berbagai stasiun (Tabel 1). Berdasarkan data aliran proses tersebut, kemudian dicari data nilai mCP pada variasi temperatur aliran masuk dan keluar untuk menghitung neraca panas yang data entalpi ΔH tertera pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 dan Tabel 3 menyajikan data hasil perhitungan antara massa (m) dengan kapasitas panas spesifik (Cp), variasi suhu masuk dan keluar, serta hasil perhitungan perubahan entalpi (ΔH) pada aliran dingin dan aliran panas. Nilai ΔH dihitung berdasarkan nilai mCp dan selisih suhu masuk-keluar, menggunakan persamaan (2). Data ini kemudian digunakan untuk membuat data *balanced composite* dari aliran panas dan dingin, yang selanjutnya menjadi dasar dalam pembuatan kurva komposit untuk analisis integrasi energi.

Tabel 2. Perhitungan ΔH (MW) aliran dingin

Nama Aliran	T in (°C)	T out (°C)	mCp (MW/°C)	ΔH (MW)
Nira Mentah	30	80	0,135	6,739
Nira Mentah Sulfitasi	80	110	0,137	4,107
Nira Jernih	100	103	7,571	22,714
Nira Kental BP 1	74,5	90	0,669	10,366
Nira Kental BP 2	70	88	0,578	10,405
Nira Kental BP 3	52	70	0,575	10,347
Bibit Gula VP A	58	63	1,249	6,247
Bibit Gula VP C	58	63	0,150	0,751
Bibit Gula VP D	58	63	0,208	1,038

Tabel 3. Perhitungan ΔH (MW) aliran panas

Nama Aliran	T in (°C)	T out (°C)	ΔH (MW)
Exhaust Steam	120	120	29,112
Uap Nira BP 1	103	103	24,223
Uap Nira BP 2	88	88	11,000
Uap Nira BP 3	70	70	10,877

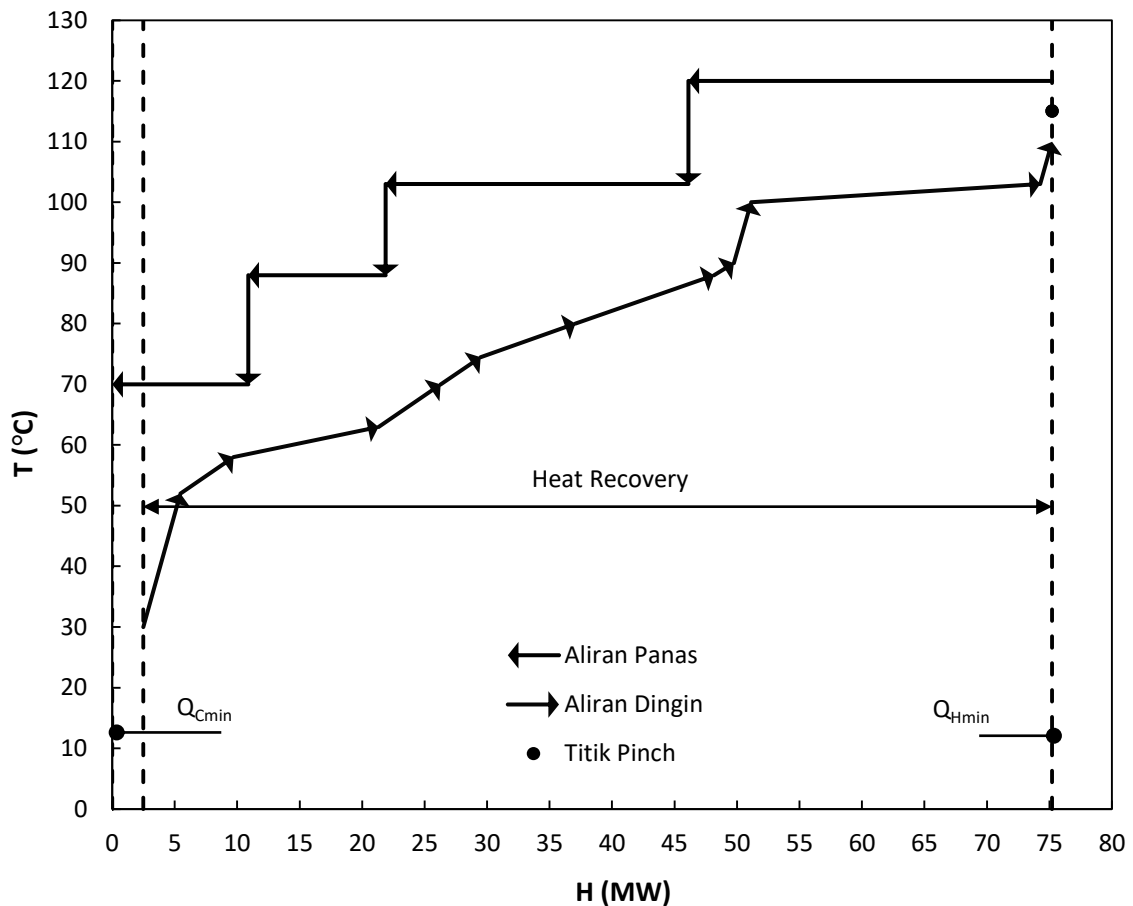
Tabel 4. Perhitungan nilai Q aliran dingin

Nama Aliran	T1 (°C)	T2 (°C)	mCp (MW/°C)	ΔH (MW)
Q1	30,0	52,0	0,135	2,965
Q2	52,0	58,0	0,710	4,258
Q3	58,0	63,0	2,317	11,584
Q4	63,0	70,0	0,710	4,967
Q5	70,0	74,5	0,713	3,208
Q6	74,5	80,0	1,382	7,599
Q7	80,0	88,0	1,384	11,070
Q8	88,0	90,0	0,806	1,611
Q9	90,0	100,0	0,137	1,369
Q10	100,0	103,0	7,708	23,125
Q11	103,0	110,0	0,137	0,958

Tabel 5. Perhitungan nilai Q aliran panas

Nama Aliran	T1 (°C)	T2 (°C)	ΔH (MW)
Q1	70	70	10,877
Q2	88	88	11,000
Q3	103	103	24,223
Q4	120	120	29,112

Data pada Tabel 4 dan Tabel 5 yang berisi *balanced composite* digunakan untuk menyusun kurva komposit. Kurva ini disajikan dalam bentuk diagram temperatur-entalpi (T-H diagram) yang menggabungkan seluruh aliran panas dan aliran dingin dari proses. Dengan demikian, kurva ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai distribusi serta kebutuhan energi panas dalam sistem.



Gambar 2. Kurva komposit untuk analisis *pinch*

Berdasarkan Gambar 2, titik *pinch* diidentifikasi pada suhu 115°C. Titik ini merupakan suhu kritis di mana selisih temperatur minimum (ΔT_{\min}) antara aliran panas (*hot stream*) dan aliran dingin (*cold stream*) mencapai nilai terkecil yang diperbolehkan. Pada kurva komposit, aliran panas memiliki suhu terendah sebesar 120°C, sedangkan aliran dingin memiliki suhu tertinggi sebesar 110°C. Selisih tersebut menunjukkan ΔT_{\min} sebesar 10°C, dan titik temu kurva panas dan dingin pada suhu 115°C menjadi batas pemisah dalam perhitungan integrasi energi. Lokasi *pinch* ini menentukan batas maksimal pemanfaatan energi panas internal tanpa memerlukan tambahan energi eksternal. Setelah titik *pinch* ditentukan, perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan minimum utilitas panas ($Q_{H\min}$) adalah 0 MW, pada kondisi ini seluruh kebutuhan pemanasan sudah dapat dipenuhi dari energi panas yang tersedia di dalam sistem. Kebutuhan minimum utilitas pendingin ($Q_{C\min}$) adalah 2,497 MW, yang menunjukkan masih ada sebagian energi panas yang belum dimanfaatkan lebih lanjut dan harus dibuang melalui sistem pendingin eksternal [12,14]. Nilai *heat recovery* yang dicapai sebesar 72,714 MW, mendekati nilai maksimum sebesar 75,211 MW, menunjukkan bahwa sistem *heat integration* berlangsung secara optimal untuk *recovery* energi panas antar aliran proses. Dengan demikian, sistem ini telah mendekati target *Maximum Energy Recovery* dan meminimalkan *Minimum Energy Requirement*, yang menunjukkan efisiensi energi yang sangat baik dalam proses produksi [6,15].

Kurva komposit pada Gambar 2 juga menunjukkan bahwa bagian *process house* di PG Modjopangoong dianggap telah memenuhi tiga kaidah utama integrasi panas dari March (1998) [15], yaitu:

1. Tidak ada pendinginan eksternal di atas suhu *pinch*,
2. Tidak ada pemanasan eksternal di bawah suhu *pinch*,
3. Tidak ada perpindahan panas melintasi titik *pinch*.

Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem distribusi panas di *process house* telah dirancang dengan memperhatikan efisiensi termal dan memenuhi kaidah-kaidah *pinch analysis*. Dengan demikian dapat mengurangi kebutuhan utilitas eksternal, baik untuk pemanas maupun pendingin, sehingga dapat menurunkan konsumsi energi total. Seluruh panas yang tersedia dimanfaatkan secara optimal dalam jaringan *heat exchanger*, sehingga dapat mendukung pencapaian target *Maximum Energy Recovery* (MER) dan memaksimalkan efisiensi termal proses.

3.2. Efisiensi Konsumsi *Steam* dan *Steam on Cane* (SOC)

Pada kondisi ini dapat dihitung total konsumsi *steam on cane* (SOC) sebesar 43%. Distribusi konsumsi uap di *process house* masing masing untuk pemanasan dan penguapan sekitar 37,3%, *service steam* 2,3% dan kehilangan 3,2%. Nilai ini di bawah ambang batas efisiensi ideal (50%), yang menunjukkan bahwa pabrik tidak membutuhkan bahan bakar tambahan selain *bagasse*, serta telah mencapai efisiensi energi yang baik. Jika dibandingkan dengan penelitian Daniyanto dan Rifai (2013) yang berhasil menurunkan SOC sebesar 8,8% dengan konsep *heat process integration*, maka nilai SOC yang sebesar 43% ini termasuk dalam kategori sangat efisien, dan dapat membuka peluang untuk pengembangan sistem kogenerasi listrik [7].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis konsumsi *steam* dengan teknik teknologi *pinch* pada proses produksi gula di PG Modjopangoong dapat diketahui titik *pinch* pada 115°C, dengan *heat recovery* 72,714 MW yang mendekati nilai maksimum 75,211 MW. Sistem ini dapat mencapai kebutuhan pemanas minimum 0 MW dan kebutuhan pendingin minimum 2,497 MW, menunjukkan efisiensi energi yang baik dan optimalisasi pemanfaatan panas dalam proses produksi gula. Dari hasil perhitungan didapatkan total konsumsi *steam on cane* (SOC) sebesar 43%, sesuai dengan kriteria pabrik gula yang efisien yaitu memiliki SOC kurang dari 50% sehingga efisiensi energinya cukup baik.

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yang difokuskan pada pengembangan sistem utilitas pendingin untuk mengakomodasi kebutuhan pendinginan minimum sebesar 2,497 MW yang belum tercapai. Demikian juga perlu dikembangkan sistem pemanfaatan energi panas *steam* yang berlebih untuk proses pendukung, seperti pra-pemanasan air umpan *boiler*, pemanasan bahan baku, atau pembangkit listrik skala kecil. Strategi ini dapat memberikan dampak positif terhadap pengurangan konsumsi bahan bakar tambahan, menurunkan biaya operasional, serta meningkatkan keberlanjutan energi dalam sistem produksi gula secara keseluruhan.

REFERENSI

- [1] F. Brahim, A. Lehnberger, S. Malikarjun, R. Nasim, dan S. Shafqat, "Further Reduction of Steam Demand at Modern Cane Sugar Mills," *Agribusiness Intelligence*, hal. 340–348, 2017.
- [2] H. Morales, F. di Sciascio, E. Aguirre-Zapata, dan A. Amicarelli, "Crystallization Process

- in the Sugar Industry: A Discussion On Fundamentals, Industrial Practices, Modeling, Estimation and Control,” *Food Engineering Reviews*, vol. 16, no. 3, hal. 441–469, 2024.
- [3] R. Filkoski, A. Lazarevska, D. Mladenovska, dan D. Kitanovski, “Steam System Optimization of an Industrial Heat and Power Plant,” *Thermal Science*, vol. 24, no. 6A, hal. 3649–3662, 2020.
- [4] I. Riadi dan D. Utomo, “The Effect of Operating Condition on Low Pressure Steam (LPS) in Sugar Factory by Pinch Analysis,” *Jurnal Pendidikan dan Aplikasi Industri UNISTEK*, vol. 9, no. 1, hal. 68–82, 2022.
- [5] B. P. Lavarack, J. J. Hodgson, R. Broadfoot, S. Vigh, dan J. Venning, “Improving the Energy Efficiency of Sugar Factories: Case Study for Pioneer Mill,” *International Sugar Journal*, vol. 26, hal. 337–342, 2004.
- [6] R. Smith, *Chemical Process Design and Integration Second Edition*, 2 ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [7] Daniyanto dan F. Rifai, “Aplikasi Analisis Pinch untuk Menurunkan Konsumsi Steam di Bagian Process House Pabrik Gula,” *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 7, no. 1, hal. 6–13, 2013.
- [8] B. Umar, E. Aliyu, dan S. Ahmed, “Energy Integration of Sugar Production Plant using Pinch Analysis (A Case Study of Savanah Sugar Company Numan, Nigeria),” *IMPACT: International Journal of Research in Engineering & Technology*, hal. 1–12, 2017.
- [9] J. Medina, A. Valencia, J. Marin, dan Y. Castrillón, “Thermal Integration in Sugar Production Using Pinch Analysis,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 26, no. 3, hal. 1–22, 2024.
- [10] M. Jeong, G. Seon, H. Choon, dan J. In, “Optimization of Heat Exchanger Network in the Dehydration Process using Utility Pinch Analysis,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 37, no. 9, hal. 1565–1572, 2020.
- [11] S. Mrayed, B. Mohamed, A. Mohammed, dan A. Nasser, “Application of Pinch Analysis to Improve the Heat Integration Efficiency in a Crude Distillation Unit,” *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, hal. 1–8, 2021.
- [12] N. Al-Azri, “Energy Management through Heat Integration: a Simple Algorithmic Approach for Introducing Pinch Analysis,” *SQU Journal for Science*, vol. 20, no. 2, hal. 1–11, 2015.
- [13] D. Rosarina, “Studi Pengaruh Proses Pengintegrasian Panas terhadap Konversi Amoniak pada Intercooler Reaktor Amoniak Pusri II dengan Analisis Pinch,” *Jurnal Redoks*, vol. 1, no. 2, hal. 26–34, 2016.
- [14] H. Somayeh dan M. Mozdianfard, “Energy Optimization of Light Naphtha Isomerization Unit at PGSOC1 Using by Pinch Analysis,” *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, vol. 14, no. 3, hal. 1–8, 2023.
- [15] L. March, *Introduction to Pinch Technology*. England: Linnhoff March, Ltd, 1998.