

ANALISIS KEBUTUHAN LUAS PERMUKAAN PEMANAS PADA CALANDRIA PAN UNTUK PROSES KRISTALISASI MASAKAN A DENGAN UMPAN 7.000 KUINTAL

Alfina Nur Izza Awdiyah¹, Arief Rahmatulloh¹, Pandu Jati Ramadhan²

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

²PT Rajawali I Unit PG Kreet Baru II Jl. Raya Kreet No. 10, Kreet, Kecamatan Bululawang,

Kabupaten Malang 65171, Indonesia

alfinaizzaalf@gmail.com; [arief1289@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Manajemen energi dan efisiensi proses kristalisasi merupakan aspek fundamental dalam industri gula modern yang berdampak signifikan terhadap produktivitas dan keberlanjutan produksi. Kristalisasi menggunakan *calandria pan* atau *vacuum pan* menjadi tahap krusial yang memerlukan optimasi transfer energi panas untuk mengontrol kualitas gula dan konsumsi energi. Penelitian ini bertujuan menentukan jumlah *vacuum pan* yang dibutuhkan untuk mengolah masakan A dan menganalisis perbandingan kebutuhan luas permukaan pemanas teoritis dengan spesifikasi aktual *calandria pan*. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental analitis dengan analisis kuantitatif perpindahan panas, mengumpulkan data spesifikasi teknis peralatan, parameter operasional (tekanan dan temperatur uap, temperatur masakan), serta variabel proses (kapasitas giling 6000 TCD, brix masakan A 93,57%). Analisis dilakukan menggunakan metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dan perhitungan koefisien perpindahan panas. Hasil menunjukkan kebutuhan luas permukaan pemanas untuk mengolah masakan A dengan umpan 7.000 kuintal adalah 436,733 m², sementara tersedia 6 unit *calandria pan* dengan total luas 1.326 m². Surplus kapasitas sebesar 889,27 m² (67,1%) mengindikasikan proses dapat dilaksanakan optimal dengan mengoperasikan hanya 2 unit *calandria pan*, memberikan potensi signifikan untuk optimasi manajemen energi dan peningkatan efisiensi operasional dalam industri gula.

Kata kunci : *calandria pan, efisiensi energi, kristalisasi gula, luas permukaan pemanas, manajemen proses*

ABSTRACT

Energy management and crystallization process efficiency are fundamental aspects in the modern sugar industry, significantly affecting both productivity and production sustainability. Crystallization using a calandria pan or vacuum pan is a crucial stage that requires the optimization of heat transfer in order to control sugar quality and energy consumption. This study aims to determine the required number of vacuum pans for processing massecuite A and to analyze the comparison between the theoretical heating surface area demand and the actual specifications of the calandria pan. The research employed an analytical-experimental approach with quantitative heat transfer analysis, collecting data on equipment technical specifications, operational parameters (steam pressure and temperature, massecuite temperature), and process variables (milling capacity of 6000 TCD, massecuite A brix of 93.57%). The analysis was conducted using the Log Mean Temperature Difference (LMTD) method and the calculation of the overall heat transfer coefficient. The results indicate that the required heating surface area for processing massecuite A with a feed of 7,000 quintals is 436.733 m², while 6 units of calandria pans are available with a total area of 1,326 m². The surplus capacity of 889.27 m² (67.1%) suggests that the process can be optimally carried out by operating only two calandria pans, providing significant potential for energy management optimization and improved operational efficiency in the sugar industry.

Keywords: *calandria pan, energy efficiency, heating surface area, process management, sugar crystallization*

Corresponding author: Arief Rahmatulloh

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

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

E-mail: arief1289@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Manajemen energi dan efisiensi proses merupakan aspek fundamental dalam industri gula modern yang berdampak signifikan terhadap produktivitas, keberlanjutan produksi, dan keuntungan ekonomis [1]. Terkait dengan industri gula global saat ini, tuntutan terhadap keberlanjutan dan efisiensi energi semakin menguat seiring dengan meningkatnya kesadaran lingkungan dan kebutuhan untuk mengurangi jejak karbon dalam sektor manufaktur [2]. Di antara beragam tahapan proses dalam produksi gula, kristalisasi menjadi salah satu fase krusial yang memerlukan perhatian khusus, terutama dari segi konsumsi energi dan optimasi proses. Kristalisasi merupakan tahap kunci dalam produksi gula untuk mengontrol kualitas gula serta konsumsi energi [3].

Kristalisasi dalam industri gula dilaksanakan menggunakan peralatan berteknologi khusus yang dikenal sebagai *calandria pan* atau *vacuum pan*, yang mengimplementasikan prinsip dasar *shell and tube heat exchanger* untuk mentransfer panas dari fluida pemanas (umumnya uap) ke nira gula yang sedang diolah [4]. *Vacuum pan* telah menjadi teknologi standar dalam industri gula karena kemampuannya untuk mengoperasikan proses kristalisasi pada tekanan rendah, sehingga mengurangi suhu operasi dan meminimalkan degradasi gula [5]. Larutan gula dari evaporator dikirim ke *vacuum pan* di mana larutan tersebut diuapkan lebih lanjut dengan tekanan vakum hingga mencapai supersaturasi [6].

Tantangan utama dalam proses kristalisasi gula terletak pada optimasi transfer energi panas, yang dipengaruhi oleh multivariabel termasuk karakteristik desain alat, properti termal bahan konstruksi, dinamika aliran fluida, serta parameter operasional seperti gradien tekanan dan temperatur [7]. Interaksi kompleks antara berbagai faktor tersebut secara langsung berdampak pada efisiensi perpindahan panas, yang pada gilirannya menentukan kualitas produk kristal gula yang dihasilkan [8].

Calandria pan sebagai komponen vital dalam proses kristalisasi menggunakan permukaan pemanas berupa rangkaian tabung vertikal yang membentuk antarmuka pertukaran panas antara uap dan nira. Luas permukaan pemanas ini menjadi parameter determinan dalam proses, dimana kecukupan luasnya akan menentukan kapasitas proses dan konsumsi energi secara keseluruhan [9]. Penelitian Pomantow, dkk. (2021) menunjukkan bahwa desain permukaan pemanas yang optimal dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 15-20% dalam proses kristalisasi gula [8]. Stasiun kristalisasi biasanya merupakan konsumen uap terbesar di pabrik gula [10].

Terkait dengan tuntutan industri modern yang menekankan efisiensi energi, perhitungan komprehensif kebutuhan luas permukaan pemanas merepresentasikan langkah strategis untuk menyeimbangkan konsumsi energi dengan produktivitas tanpa mengorbankan kualitas produk akhir. Perhitungan teoretis kebutuhan luas permukaan pemanas umumnya mengadopsi pendekatan matematis tervalidasi, termasuk metode *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) yang mengevaluasi perpindahan panas berdasarkan distribusi perbedaan temperatur logaritmik rata-rata, atau metode alternatif seperti efektivitas-NTU (*Number of Transfer Units*) yang mengkuantifikasi kinerja alat penukar panas berdasarkan parameter operasional spesifik [4]. Kedua metodologi ini memungkinkan estimasi kebutuhan luas permukaan pemanas berdasarkan kondisi operasional tertentu, yang kemudian dapat dibandingkan dengan spesifikasi aktual peralatan yang tersedia [9].

Studi yang dilakukan oleh Rozsa (2015) menekankan pentingnya detail dalam proses kristalisasi gula, dimana faktor-faktor seperti kecepatan terbentuknya inti kristal baru, pertumbuhan kristal, dan koefisien perpindahan massa sangat mempengaruhi efisiensi proses [9]. Kristalisasi gula melibatkan proses yang kompleks sehingga memerlukan desain yang tepat dari *vacuum pan* dan operasi alat yang tepat [11]. Penelitian lain yang fokus pada teknologi pengolahan gula, seperti yang dilakukan oleh Saloko, dkk. (2021), menunjukkan bahwa inovasi dalam teknik pengolahan dapat meningkatkan kualitas produk dan efisiensi proses secara signifikan [12]. Sementara itu, studi oleh Pomantow, dkk. (2021) dan Handayani, dkk. (2022) menekankan pentingnya optimasi peralatan dalam meningkatkan nilai ekonomis produk gula melalui inovasi teknologi proses [8,13].

Analisis kebutuhan luas permukaan pemanas dalam konteks *calandria pan* memiliki signifikansi multidimensional. Pertama, analisis ini memungkinkan evaluasi kecukupan kapasitas peralatan yang tersedia untuk memenuhi tuntutan produksi [8]. Pada situasi dimana kapasitas produksi perlu ditingkatkan, perhitungan ini memberikan dasar kuantitatif untuk menentukan apakah peralatan yang ada mampu mengakomodasi peningkatan tersebut, atau apakah investasi pada peralatan tambahan menjadi suatu keharusan. Kedua, analisis ini berkontribusi pada optimasi konsumsi energi dalam operasional pabrik gula. Luas permukaan pemanas yang tidak memadai dapat menyebabkan perpanjangan waktu proses dan konsumsi energi berlebih, sementara luas permukaan yang terlalu besar relatif terhadap kebutuhan operasional menghasilkan investasi modal yang tidak efisien [2]. Dengan demikian, penyesuaian optimal antara kebutuhan luas permukaan pemanas dengan spesifikasi aktual peralatan menjadi prasyarat untuk efisiensi energi dan ekonomi operasional.

Ketiga, analisis ini memberikan implikasi terhadap kualitas produk akhir. Luas permukaan pemanas yang tepat memastikan transfer energi yang efisien dan terkendali, menciptakan kondisi optimal untuk pembentukan kristal gula dengan karakteristik yang konsisten dan sesuai standar [1]. Sebaliknya, ketidaksesuaian dalam aspek ini dapat mengakibatkan variabilitas kualitas produk, yang pada gilirannya berdampak pada nilai komersial dan kepuasan konsumen. Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan terkait optimasi proses kristalisasi gula dan teknologi pengolahan gula, namun masih terdapat kesenjangan dalam analisis komprehensif kebutuhan luas permukaan pemanas untuk *calandria pan* dengan kapasitas spesifik. Penelitian-penelitian sebelumnya cenderung fokus pada aspek teknologi pengolahan umum atau inovasi produk, namun belum secara mendalam mengkaji hubungan antara kebutuhan teoretis luas permukaan pemanas dengan spesifikasi aktual peralatan dalam konteks optimasi energi dan produktivitas. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih spesifik untuk menganalisis kebutuhan luas permukaan pemanas pada proses kristalisasi masakan A dengan kapasitas tertentu, serta mengevaluasi kesesuaian antara kebutuhan teoretis dengan kondisi aktual peralatan yang tersedia di lapangan.

Analisis komprehensif dilakukan terhadap kebutuhan luas permukaan pemanas untuk proses kristalisasi masakan A dengan kapasitas umpan 7.000 kuintal. Penelitian ini bertujuan menentukan jumlah *vacuum pan* yang dibutuhkan untuk mengolah masakan A dan menganalisis perbandingan kebutuhan luas permukaan pemanas teoretis dengan spesifikasi aktual *calandria pan*. Temuan penelitian ini diharapkan mampu memberikan dapat memberikan kontribusi praktis bagi optimasi operasional pabrik gula dan kontribusi teoretis

dalam pengembangan metodologi analisis kebutuhan luas permukaan pemanas untuk industri gula yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental analitis untuk mengevaluasi kebutuhan luas permukaan pemanas pada *calandria pan* dalam proses kristalisasi masakan A. Fokus penelitian diarahkan pada optimasi efisiensi termal dan operasional dengan mengintegrasikan analisis kuantitatif perpindahan panas pada fasilitas produksi pabrik gula. Metodologi penelitian dirancang secara sistematis untuk memperoleh hasil yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan melalui observasi langsung dengan mengadopsi metode dokumentasi komprehensif terhadap parameter operasional *calandria pan*. Data primer yang dikumpulkan mencakup spesifikasi teknis peralatan (dimensi, jumlah *tube*, volume), parameter operasional (tekanan dan temperatur uap, temperatur masakan masuk dan keluar), serta variabel proses produksi (kapasitas giling, persentase masakan A terhadap tebu, brix masakan). Pendekatan ini memungkinkan peneliti memperoleh dataset otentik yang merepresentasikan kondisi aktual operasional, sesuai dengan rekomendasi Sugiyono (2020) yang menekankan pentingnya akurasi data primer dalam analisis efisiensi termal pada industri proses [14]. Selain data primer, penelitian ini juga mengintegrasikan data sekunder berupa dokumentasi historis kinerja produksi dan parameter standar operasional yang telah divalidasi oleh manajemen pabrik. Dokumentasi sistematis data operasional mencakup variabel teknis berupa kapasitas giling (6000 TCD), spesifikasi uap (0,3 kg/cm², 68,648°C), karakteristik masakan A (brix 93,57%), dan konfigurasi *calandria pan* (640 pipa per pan dengan diameter 101,6 mm dan panjang 1100 mm). Pendekatan integral ini menjamin komprehensivitas dataset sebagai fundamental analisis, sejalan dengan metodologi yang dikembangkan oleh Sugiyono (2020) dalam studi optimasi energi pada industri gula [14].

2.2. Pengolahan Data

Analisis kebutuhan luas permukaan pemanas dilakukan melalui serangkaian perhitungan terstruktur menggunakan aplikasi Microsoft Excel untuk menjamin presisi komputasional. Tahapan analisis mengikuti protokol terstandarisasi yang mencakup beberapa tahapan sekuensial sebagai berikut:

1) Penentuan Brix Masakan A

Perhitungan brix masakan A dinyatakan dalam kuintal brix (Ku brix), dengan Ku sebagai satuan kuintal dan dihitung menggunakan persamaan konversi berdasarkan rasio brix masakan A terhadap brix gula A, kemudian dikalikan dengan kuantitas masakan yang diproses:

$$Ku \text{ brix masakan A} = \frac{\text{brix masakan A}}{\text{brix gula A}} \times \text{masakan A yang diolah} \quad (1)$$

2) Perhitungan Kapasitas dan Parameter Aliran

Kapasitas masakan per *calandria pan* dihitung sebagai fungsi dari total Ku brix dan jumlah unit pan yang tersedia:

$$\text{Kapasitas per pan} = \frac{\text{Ku brix masakan A}}{\text{jumlah pan}} \quad (2)$$

Laju aliran masakan dikalkulasi dalam satuan massa per detik untuk memfasilitasi analisis lebih lanjut:

$$\text{Laju aliran masakan} = \frac{\text{Ku brix masakan A}}{24 \text{ jam} \times 3600 \text{ detik}} \quad (3)$$

Parameter waktu tinggal (t), yang merepresentasikan durasi proses kristalisasi per batch, diturunkan dari rasio kapasitas terhadap laju aliran:

$$t = \frac{\text{kapasitas per pan}}{\text{laju aliran masakan}} \quad (4)$$

3) Analisis Kebutuhan Pan Masak

Kebutuhan *calandria pan* dikalkulasi melalui konversi Ku brix ke satuan hektoliter (HL), dilanjutkan dengan perhitungan jumlah optimal pan berdasarkan volume turunan dan siklus operasional:

$$\text{HL masakan A} = \frac{\text{Ku brix masakan A}}{\text{Ku}_{\text{HL}}^{\text{brix}}} \quad (5)$$

$$\text{Pan masakan yang dibutuhkan} = \frac{\text{HL masakan A}}{\text{Volume turunan} \times \frac{24 \text{ jam}}{\text{waktu tinggal}}} \quad (6)$$

4) Determinasi Parameter Termodinamika

Karakteristik termodinamika masakan dikuantifikasi melalui perhitungan densitas, kapasitas panas spesifik, dan konduktivitas termal menggunakan persamaan empiris dengan brix sebagai variabel determinan. Koefisien perpindahan panas (K) dihitung menggunakan model yang mengintegrasikan temperatur operasional dan dinamika aliran:

$$K = 1,009 T (4,998 + v) \quad (7)$$

dimana T merepresentasikan temperatur steam dan v adalah kecepatan linear fluida masakan. Pendekatan ini mengadopsi formulasi yang divalidasi dalam studi komprehensif.

5) Kalkulasi LMTD dan Kebutuhan Luas Pemanas

Analisis *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) diimplementasikan untuk mengevaluasi gradien temperatur efektif:

$$T_{LMTD} = \frac{(T-t_1)-(T-t_2)}{\ln \frac{(T-t_1)}{T-t_2}} \quad (8)$$

dimana parameter T merepresentasikan temperatur steam, t_1 adalah temperatur masakan pada kondisi inlet dan t_2 merupakan temperatur masakan pada kondisi outlet. Kebutuhan luas permukaan pemanas (S) dikuantifikasi sebagai rasio:

$$S = \frac{Q}{K \times T_{LMTD}} \quad (9)$$

dengan Q sebagai energi pemanasan total, K adalah koefisien perpindahan panas, dan T_{LMTD} merupakan nilai LMTD yang telah dikalkulasi.

Hasil perhitungan teoretis ini kemudian dibandingkan dengan spesifikasi aktual *calandria pan* yang tersedia untuk mengevaluasi kecukupan kapasitas dan mengidentifikasi potensi optimasi. Metodologi analitis ini konsisten dengan pendekatan yang direkomendasikan oleh Laajalehto, dkk. (2014) dalam evaluasi efisiensi termal sistem penukar panas pada aplikasi industri proses [2].

6) Analisis Efisiensi Termal

Evaluasi efisiensi termal (η) dilakukan melalui perbandingan antara kebutuhan energi teoretis dan aktual:

$$\eta = \frac{Q_{akt}}{Q_{teo}} \times 100\% \quad (10)$$

dimana Q_{teo} merepresentasikan kebutuhan energi berdasarkan luas permukaan pemanas teoretis, sementara Q_{akt} adalah energi aktual yang ditransfer oleh *calandria pan* dengan luas permukaan eksisting. Parameter ini menjadi indikator kunci dalam mengevaluasi efisiensi operasional sistem dan mengidentifikasi potensi optimasi lebih lanjut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Kebutuhan Calandria pan untuk Kristalisasi Masakan A

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis data operasional, diperoleh informasi mengenai kebutuhan luas permukaan pemanas pada *calandria pan* untuk proses kristalisasi masakan A. Pada Tabel 1 disajikan data jumlah unit *calandria pan* masakan A yang tersedia beserta luas pemanas yang dimiliki setiap unit. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada aktualnya, pabrik memiliki 6 unit *calandria pan* dengan kapasitas pemanas masing-masing 221 m², sehingga total luas permukaan pemanas yang tersedia adalah 1326 m². Kapasitas desain ini menjadi parameter fundamental dalam mengevaluasi kecukupan sistem untuk mengakomodasi proses kristalisasi masakan A dengan umpan 7.000 kuintal. Perhitungan teoretis kebutuhan luas permukaan pemanas menggunakan metode LMTD menghasilkan nilai sebesar 436,733 m² untuk mengolah umpan masakan A sebanyak 7.000 kuintal. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, terdapat selisih signifikan antara luas permukaan tersedia (1326 m²) dengan kebutuhan aktual (436,733 m²), menghasilkan surplus kapasitas sebesar 889,27 m².

Tabel 1. Jumlah unit *calandria pan* masakan A

| Unit <i>Calandria pan</i> Masakan A | Luas Pemanas (m ²) |
|--|--------------------------------|
| 1 | 221 |
| 2 | 221 |
| 3 | 221 |
| 4 | 221 |
| 5 | 221 |
| 6 | 221 |
| Jumlah | 1326 |

Tabel 2. Ketersediaan luas permukaan pemanas dengan kebutuhan luas permukaan pemanas yang digunakan

| Luas Permukaan Pemanas Tersedia (m ²) | Kebutuhan Luas Permukaan Pemanas yang Digunakan (m ²) | Sisa Luas Permukaan Pemanas (m ²) |
|---|---|---|
| 1326 | 436,733 | 889,27 |

3.2. Analisis Efisiensi Termal dan Operasional

Surplus kapasitas sebesar 889,27 m² atau sekitar 67,1% dari total kapasitas terpasang mengindikasikan potensi optimasi signifikan dalam pengoperasian *calandria pan* untuk kristalisasi masakan A. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa kebutuhan luas permukaan pemanas sebesar 436,733 m² dapat dipenuhi dengan mengoperasikan hanya 2 unit *calandria pan* (dengan total luas 442 m²) dari 6 unit yang tersedia. Penemuan ini konsisten dengan studi Mahendra, dkk. (2023) yang menyarankan penggunaan 3-4 unit juice heater dengan 2 unit sebagai cadangan untuk mengoptimalkan efisiensi energi dalam proses pemurnian di pabrik gula [15]. Evaluasi parameter termodinamika menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas (K) yang mencerminkan efisiensi transfer energi termal dalam sistem *calandria pan* sangat dipengaruhi oleh temperatur operasional dan dinamika aliran fluida masakan. Hal ini selaras dengan temuan Alidifian dan Chalim (2024) yang menyatakan bahwa efektivitas alat penukar panas dipengaruhi oleh laju alir dan temperatur fluida, dengan kecenderungan peningkatan nilai NTU (*Number of Transfer Units*) seiring dengan peningkatan laju alir [16].

Perspektif ini diperkuat oleh hasil studi Zidan dan Chalim (2024) yang mendemonstrasikan korelasi positif antara laju alir fluida dengan efektivitas dan efisiensi alat penukar panas, dimana peningkatan laju alir fluida berkontribusi pada peningkatan nilai efektivitas hingga 0,89 dan efisiensi 86% [17]. Dalam konteks *calandria pan* di keadaan aktualnya, optimasi laju alir masakan dapat menjadi strategi efektif untuk meningkatkan efisiensi termal tanpa memerlukan aktivasi seluruh unit yang tersedia. Analisis LMTD yang dilakukan menunjukkan bahwa gradien temperatur efektif antara uap pemanas dengan masakan A berada pada level optimal untuk memfasilitasi transfer panas secara efisien. Parameter ini menjadi krusial mengingat karakteristik termodinamika masakan gula yang kompleks akibat viskositas tinggi dan variasi properti termal seiring perubahan konsentrasi sukrosa. Sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian Aurora, dkk. (2024), analisis luas permukaan pemanas yang tepat pada peralatan proses seperti juice heater dapat mengoptimalkan konsumsi energi dan meminimalkan biaya produksi [18].

3.3. Implikasi Temuan terhadap Manajemen Energi

Berdasarkan hasil analisis, surplus kapasitas luas permukaan pemanas yang signifikan memberikan implikasi penting terhadap strategi manajemen energi. Pertama, aktivasi selektif unit *calandria pan* sesuai kebutuhan aktual produksi dapat menghasilkan penghematan energi substansial. Dengan kebutuhan aktual hanya 436,733 m² untuk mengolah umpan 7.000 kuintal, pengoperasian minimal 2 unit dengan tambahan 1 unit sebagai cadangan akan lebih efisien dibandingkan mengaktifkan seluruh 6 unit yang tersedia. Temuan ini sejalan dengan pendekatan optimal yang direkomendasikan oleh Mahendra, dkk. (2023) dalam studi serupa pada juice heater di stasiun pemurnian, dimana

penggunaan unit secara selektif dapat meminimalkan konsumsi energi [15]. Strategi rotasi penggunaan unit juga dapat diimplementasikan untuk mendistribusikan beban kerja secara merata dan memperpanjang masa pakai peralatan, sebagaimana diindikasikan dalam studi Aurora, dkk. (2024) yang menekankan pentingnya cadangan operasional dalam sistem pemanas industri gula [18].

Kedua, surplus kapasitas ini juga berimplikasi positif terhadap fleksibilitas operasional pabrik dalam mengakomodasi fluktuasi kapasitas produksi. Dengan total luas permukaan pemanas tersedia sebesar 1326 m², pabrik memiliki kapasitas teoritis untuk mengolah masakan A hingga sekitar 21.200 kuintal (proyeksi berdasarkan proporsi linear), memberikan ruang signifikan untuk ekspansi produksi di masa mendatang tanpa memerlukan investasi infrastruktur tambahan pada sistem *calandria pan*.

3.4. Optimasi Proses Kristalisasi

Mengacu pada data kebutuhan luas permukaan pemanas dan spesifikasi aktual *calandria pan*, optimasi proses kristalisasi dapat diarahkan pada beberapa aspek kunci. Analisis menunjukkan bahwa dengan mengoperasikan hanya 2-3 unit *calandria pan* dari 6 unit tersedia, pabrik dapat mencapai efisiensi energi optimal tanpa mengorbankan produktivitas. Pendekatan ini konsisten dengan paradigma manajemen energi modern dalam industri gula yang menekankan operasi peralatan pada kapasitas optimal untuk meminimalkan konsumsi energi per unit produk. Selain itu, evaluasi parameter termodinamika mengungkapkan potensi optimasi tambahan melalui penyesuaian suhu operasional dan laju alir masakan. Sebagaimana ditunjukkan oleh Alidifian dan Chalim (2024), kombinasi optimal antara suhu dan laju alir dapat meningkatkan nilai NTU dan efektivitas alat penukar panas, yang pada gilirannya berkontribusi pada efisiensi energi secara keseluruhan [16]. Dalam konteks *calandria pan* di pabrik gula, penyesuaian parameter operasional ini dapat diimplementasikan pada unit yang aktif untuk memaksimalkan efisiensi termal tanpa memerlukan aktivasi seluruh kapasitas terpasang [11].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis kebutuhan luas permukaan pemanas pada *calandria pan* untuk proses kristalisasi masakan A menghasilkan beberapa kesimpulan penting. Kebutuhan luas permukaan pemanas untuk mengolah masakan A dengan umpan 7.000 kuintal adalah 436,733 m², sementara spesifikasi aktual menunjukkan ketersediaan 6 unit *calandria pan* dengan total luas permukaan pemanas 1.326 m². Berdasarkan perbandingan ini, proses kristalisasi masakan A dapat dilaksanakan secara optimal dengan mengoperasikan hanya 2 unit *calandria pan* yang memiliki total luas permukaan pemanas 442 m², dengan 1 unit tambahan sebagai cadangan untuk mengantisipasi fluktuasi operasional. Surplus kapasitas sebesar 889,27 m² atau sekitar 67,1% dari total kapasitas terpasang mengindikasikan potensi signifikan untuk optimasi manajemen energi dan peningkatan efisiensi operasional. Temuan ini menegaskan bahwa pada aktualnya memiliki fleksibilitas substansial untuk mengakomodasi peningkatan kapasitas produksi hingga tiga kali lipat tanpa memerlukan investasi tambahan pada infrastruktur *calandria pan*.

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis, direkomendasikan beberapa strategi untuk mengoptimalkan operasional *calandria pan* di pabrik gula. Pertama, implementasi

sistem rotasi penggunaan unit *calandria pan* untuk mendistribusikan beban kerja secara merata dan memperpanjang masa pakai peralatan. Kedua, penyesuaian parameter operasional seperti suhu dan laju alir masakan pada unit yang aktif untuk memaksimalkan efisiensi termal tanpa memerlukan aktivasi seluruh kapasitas terpasang. Ketiga, pengembangan sistem monitoring real-time untuk parameter termodinamika kunci seperti koefisien perpindahan panas dan LMTD untuk memfasilitasi pengambilan keputusan operasional yang lebih presisi. Keempat, evaluasi komprehensif terhadap potensi penggunaan surplus kapasitas untuk diversifikasi produk atau peningkatan kualitas kristal melalui modifikasi parameter proses kristalisasi. Kelima, studi lanjutan mengenai optimasi energi pada keseluruhan sistem produksi gula dengan mempertimbangkan integrasi panas antar stasiun untuk meminimalkan konsumsi energi total pabrik.

REFERENSI

- [1] G. Eggleston dan I. Lima, "Sustainability Issues and Opportunities in the Sugar and Sugar-Bioproduct Industries," *Jurnal Sustainability*, vol. 7, no. 9, hal. 12209–12235, 2015.
- [2] T. Laajalehto, M. Kuosa, T. Makila, M. Lampinen, dan R. Lahdelma, "Energy Efficiency Improvements Utilising Mass Flow Control and a Ring Topology in a District Heating Network," *Jurnal Applied Thermal Enggining*, vol. 69, no. 1, hal. 86–95, 2014.
- [3] S. Awasthi, A. Goyal, D. Kumar, dan D. Mishra, "A New Vertical Continuous Vacuum Pan (Evaporating Crystallizer) Design," *Jurnal Sugar Industry*, vol. 145, no. 5, hal. 288–293, 2020.
- [4] D. Rackemann dan R. Broadfoot, "A New Design of Jigger System to Improve Vacuum Pan Performance," *Jurnal International Sugar Journal*, vol. 110, hal. 1564–1572, 2008.
- [5] P. E. de M. Gonzales, M. A. de S. Peloso, dan J. E. Olivo, "Fed-Batch Sucrose Crystallization Model for the B Masecuite Vacuum Pan, Solution by Deterministic and Heuristic Methods," *Jurnal Processes*, vol. 8, no. 9, hal. 1145, 2020.
- [6] M. A. Clarke dan R. P. Singh, "Sugar," *Encyclopaedia Britannica*. Encyclopaedia Britannica, Inc, 2025.
- [7] E. V. Semenov, A. A. Slavyanskiy, D. P. Mitroshina, dan N. N. Lebedeva, "Thermodynamic Factor and Vacuum Crystallization," *Jurnal Foods and Raw Materials*, vol. 10, no. 2, hal. 304–309, 2022.
- [8] S. F. E. Pomantow, L. C. Ch. E Lengkey, dan R. Molenaar, "Uji Kinerja Mesin Pengolah Gula Semut Horja MPN20 di Kelompok Tani Karya Tani Desa Talaitad Kecamatan Suluun Tareran Kabupaten Minahasa Selatan," *Jurnal Cocos*, vol. 5, no. 5, 2021.
- [9] L. Rozsa, "Sugar Crystallization: Look for the Devil in the Details Part 1," *Jurnal International Sugar Journal*, vol. 110, no. 1320, 2015.
- [10] B. Morgenroth, H. Max, M. Mogalle, dan H. S. Bola, "Batch Pan Automation and Its Impact on Energy Conservation in Cane Sugar Factories," *Jurnal International Sugar Journal*, vol. 116, no. 1392, hal. 892, 2014.
- [11] P. W. Rein, L. F. Echeverri, dan S. Acharya, "Circulation in Vacuum Pans," *Jurnal American Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 24, hal. 1, 2004.
- [12] S. Saloko, Y. Sulastri, dan A. Kadir, "Enkapsulasi Gula Semut Aren Menggunakan Kitosan Dan Maltodekstrin," *Jurnal Pro Food (Jurnal Ilmu dan Teknologi Pangan)*, vol. 7, no. 1,

- 2021.
- [13] P. A. Handayani, F. S. Pribadi, S. Sariyoga, M. R. Putri, dan R. Andriyani, "Inovasi Produk Gula Aren Cetak Menjadi Gula Semut untuk Meningkatkan Nilai Jual," *Jurnal Pengabdian Dinamika*, vol. 9, no. 1, hal. 87-93, 2022.
- [14] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*, ed. ke-19. Bandung: Alfabeta, hal. 82, 2020.
- [15] A. R. Mahendra, Mufid, P. J. Ramadhan, dan M. Handayani, "Analisis Kebutuhan Luas Permukaan Pemanas Juice Heater II pada Stasiun Pemurnian Pabrik Gula Krebet Baru II Malang," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 9, no. 4, hal. 580–586, 2023.
- [16] F. Alidifan dan A. Chalim, "Pengaruh Variasi Suhu dan Laju Alir terhadap Kinerja Pertukaran Kalor Sistem Fluida Formalin-Glisierol Menggunakan Shell and Tube Heat Exchanger pada Aliran Laminer," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 1, hal. 322–328, 2024.
- [17] M. A. Zidan dan A. Chalim, "Pengaruh Laju Alir Gliserin terhadap Efisiensi Pertukaran Panas dalam Shell and Tube Heat Exchanger," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 3, hal. 664–673, 2024.
- [18] A. D. Aurora, F. N. Bratastuti, M. Mufid, dan P. J. Ramadhan, "Analisis Perhitungan Luas Pemanasan Juice Heater I pada Stasiun Pemurnian," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 2, hal. 485–491, 2024.