

PERHITUNGAN NERACA MASSA DAN ENERGI PADA STASIUN PENGUAPAN DI PT. PG CANDI BARU

Devania Augustine Setiawan¹, Izzatul Aulia Azahra¹, Mufid¹, Muffatah Ryando Kemit²

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

²PT. Pabrik Gula Candi Baru, Jl. Raya Candi No.10, Sidoarjo 61271, Indonesia

devaniaaugustine62@gmail.com ; [mufidpolinema@gmail.com]

ABSTRAK

Stasiun penguapan merupakan salah satu unit krusial dalam proses produksi gula, yang berfungsi untuk meningkatkan konsentrasi nira dari kadar brix rendah menjadi lebih tinggi sehingga siap untuk tahap kristalisasi. Di PT. PG Candi Baru, sistem penguapan yang digunakan adalah sistem *quintuple effect evaporator* yang terdiri dari lima efek penguapan bertingkat dan bekerja secara seri. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan perhitungan neraca massa dan energi guna mengetahui efisiensi penguapan serta mengevaluasi performa operasional tiap unit evaporator. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan data aktual pabrik dan menggunakan asumsi kondisi operasi stabil. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa proses penguapan mampu meningkatkan kadar brix nira dari 12–13% menjadi 60–65% dengan efisiensi termal yang cukup tinggi. Evaluasi neraca massa menunjukkan kesesuaian antara *input* dan *output* massa uap dan nira pada tiap efek, dengan nilai kehilangan massa yang relatif kecil. Sementara itu, neraca energi menunjukkan bahwa pemanfaatan uap bekas dari turbin sebagai sumber panas utama memberikan efisiensi pemakaian energi yang optimal, terutama melalui prinsip pemanfaatan ulang uap (*bleeding steam*) antar efek. Pengaturan tekanan vakum pada masing-masing efek juga turut mendukung efisiensi proses karena mampu menurunkan titik didih dan mencegah degradasi termal pada nira. Sistem evaporasi ini secara keseluruhan mampu meminimalkan konsumsi uap primer, meningkatkan produktivitas, dan mendukung efisiensi energi di sektor industri gula. Analisis ini membuktikan bahwa pendekatan sistematis terhadap neraca massa dan energi sangat penting dalam evaluasi teknis unit operasi industri dan dapat menjadi dasar peningkatan performa proses ke depan.

Kata kunci: efisiensi termal, evaporator bertingkat, neraca energi, neraca massa, stasiun penguapan

ABSTRACT

The evaporation plant is one of the critical units in the sugar production process, serving to increase the concentration of sugarcane juice from a low Brix level to a higher one, making it ready for the crystallization stage. At PT. PG Candi Baru, the evaporation system used is a quintuple-effect evaporator system consisting of five cascaded evaporation effects operating in series. The primary objective of this study is to perform mass and energy balance calculations to determine evaporation efficiency and evaluate the operational performance of each evaporator unit. The calculations were conducted using actual plant data and assuming steady-state operating conditions. Calculation results show that the evaporation process is capable of increasing the Brix content of the sap from 12–13% to 60–65% with a fairly high thermal efficiency. A mass balance evaluation indicates consistency between the input and output masses of steam and sap in each stage, with relatively small mass losses. Meanwhile, the energy balance indicates that utilizing exhaust steam from the turbine as the primary heat source provides optimal energy utilization efficiency, particularly through the principle of steam reuse (*bleeding steam*) between effects. Vacuum pressure control in each effect also supports process efficiency by lowering the boiling point and preventing thermal degradation of the sugarcane juice. This evaporation system as a whole is capable of minimizing primary steam consumption, increasing productivity, and supporting energy efficiency in the sugar industry. This analysis demonstrates that a systematic approach to mass and

Corresponding author: Mufid

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

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

E-mail: mufidpolinema@gmail.com



energy balances is crucial in the technical evaluation of industrial process units and can serve as the foundation for future process performance improvements.

Keywords: *thermal efficiency, multi-stage evaporator, energy balance, mass balance, evaporation station*

1. PENDAHULUAN

Industri gula merupakan salah satu sektor strategis dalam ketahanan pangan nasional karena menghasilkan komoditas yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat luas. Dalam proses produksinya, industri gula berbasis tebu melalui serangkaian tahapan yang kompleks dan saling terintegrasi. Salah satu tahapan paling vital dalam proses tersebut adalah stasiun penguapan, yang bertujuan untuk meningkatkan konsentrasi nira encer menjadi nira kental sebagai bahan baku utama untuk pembentukan kristal gula pada tahap selanjutnya [1]. Efisiensi dan efektivitas dari stasiun penguapan sangat menentukan kinerja keseluruhan pabrik gula karena berkaitan langsung dengan konsumsi energi, waktu proses, serta kualitas produk akhir.

Pada industri gula, stasiun penguapan dirancang untuk menghilangkan kandungan air dalam nira sebanyak mungkin menggunakan prinsip penguapan, sehingga diperoleh nira dengan kadar brix yang tinggi. Proses ini menggunakan sistem penguapan berulang untuk menghemat energi dan mempercepat hasil, pada PT. PG Candi Baru menggunakan sistem *quintuple effect*, yaitu lima unit evaporator yang bekerja secara seri. Dalam sistem ini, uap dari evaporator pertama digunakan kembali untuk menguapkan nira di evaporator kedua, dan begitu seterusnya. Perlakuan ini bertujuan untuk menghemat konsumsi uap utama, meningkatkan efisiensi termal, serta menurunkan biaya operasional secara keseluruhan[2]. Penggunaan tekanan vakum juga sangat penting karena memungkinkan penguapan pada suhu yang lebih rendah, sehingga risiko degradasi termal dan pembentukan karamel pada nira dapat diminimalkan [3].

Permasalahan utama yang sering dihadapi dalam stasiun penguapan adalah tingginya konsumsi energi, potensi kehilangan panas, serta efisiensi penguapan yang belum optimal. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk melakukan perhitungan neraca massa dan energi guna mengetahui efisiensi penguapan serta mengevaluasi performa operasional tiap unit evaporator. Menurut penelitian oleh Alivia, dkk. (2022) menunjukkan pentingnya perhitungan neraca massa karena untuk mencapai reaksi yang sempurna dan menghasilkan produk gula yang memiliki kualitas tinggi diperlukan neraca massa yang sesuai dengan hukum kekekalan massa. Oleh karena itu, perhitungan neraca massa dan energi menjadi penting untuk dilakukan sebagai bentuk evaluasi teknis guna mengetahui performa dari sistem evaporator yang digunakan. Neraca massa diperlukan untuk memastikan bahwa input dan output massa selama proses berjalan seimbang dan tidak terdapat kehilangan signifikan [4]. Sedangkan neraca energi digunakan untuk menilai berapa besar energi termal yang digunakan, bagaimana distribusinya di antara tiap efek, serta seberapa besar efisiensinya dalam menguapkan nira [5]. Evaluasi ini juga bermanfaat dalam upaya optimalisasi proses produksi, pemilihan teknologi, dan pengendalian energi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada stasiun penguapan di PT. PG Candi Baru, Sidoarjo, Jawa Timur, yang menggunakan sistem *quintuple effect evaporator* sebagai unit utama untuk

mengentalkan nira sebelum tahap kristalisasi. Stasiun ini terdiri dari lima unit evaporator yang bekerja secara seri dan satu unit cadangan yang digunakan bergantian untuk keperluan pembersihan dan pemeliharaan [6]. Evaporator yang digunakan pada PT Candi Baru memiliki desain calandria vertikal dengan pemanasan tidak langsung menggunakan uap bekas dari turbin.

Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan prinsip perhitungan neraca massa dan neraca energi. Perhitungan neraca massa mengacu pada hukum kekekalan massa seperti pada persamaan 1 [7].

$$M_{masuk} = M_{keluar} + M_{uap} \quad (1)$$

Dimana:

M_{masuk} = massa nira masuk ke evaporator

M_{keluar} = massa nira keluar dari evaporator

M_{uap} = massa uap air yang diuapkan

Energi yang dibutuhkan untuk proses penguapan dihitung menggunakan dua pendekatan seperti yang tertera pada persamaan 2 dan 3

$$Q_{sensibel} = m \times C_p \times \Delta T \quad (2)$$

Dan

$$Q_{laten} = m \times \lambda \quad (3)$$

Dengan:

Q = jumlah energi (kJ)

m = massa larutan (kg)

C_p = panas jenis larutan (kJ/kg·°C)

ΔT = selisih suhu pemanasan (°C)

λ = panas penguapan air = 2257 kJ/kg [8]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Neraca massa merupakan suatu metode analisis kuantitatif yang digunakan untuk mengetahui keseimbangan antara massa zat yang masuk dan keluar dari suatu sistem proses. Dalam praktik kerja industri di PT. PG Candi Baru, neraca massa menjadi aspek krusial dalam evaluasi efisiensi operasional, khususnya pada stasiun penguapan. Dalam pelaksanaannya, sistem penguapan di PT. PG Candi Baru menggunakan konfigurasi *quintuple effect evaporator*, yang terdiri atas lima evaporator yang beroperasi secara bertingkat dengan tekanan dan suhu yang semakin menurun dari satu evaporator ke evaporator berikutnya. Penggunaan lima efek bertingkat memungkinkan pemanfaatan kembali uap hasil evaporasi dari efek sebelumnya sebagai pemanas pada efek berikutnya, sehingga menciptakan sistem pemanasan yang hemat energi dan efisien secara termal [9].

Pada saat pengamatan, nira jernih yang masuk ke stasiun penguapan memiliki konsentrasi brix sekitar 12–13%. Setelah melalui lima efek evaporasi, nira keluar dengan konsentrasi brix mencapai 60–65%, menunjukkan keberhasilan poses penguapan dalam

meningkatkan kadar padatan terlarut. Selain itu, suhu operasi pada setiap evaporator dikendalikan agar sesuai dengan titik didih pada tekanan vakum, untuk menghindari degradasi termal sukrosa yang dapat menyebabkan pembentukan warna coklat atau karamelisasi [10]. Hal ini penting karena proses penguapan berlangsung di bawah kondisi vakum, yang memungkinkan air menguap pada suhu yang lebih rendah dari titik didih normal, yaitu sekitar 60–100°C tergantung pada efeknya, sehingga produk tidak mengalami kerusakan termal yang dapat mempengaruhi kualitas gula kristal yang dihasilkan [11].

Perhitungan neraca massa pada masing-masing badan evaporator dilakukan dengan cara membandingkan massa nira yang masuk dan keluar dari tiap unit, serta mempertimbangkan produk sampingan berupa uap dan air kondensat [12]. Massa nira masuk diperoleh dari data laju alir nira jernih serta konsentrasi padatan larut, sedangkan massa keluaran meliputi nira kental dan hasil penguapan berupa uap air yang diteruskan untuk pemanasan unit berikutnya. Data diperoleh dari pengukuran aktual di lapangan dengan mempertimbangkan parameter seperti suhu, tekanan, brix, dan volume alir. Neraca massa juga digunakan untuk mendeteksi kebocoran sistem, ketidakseimbangan proses, dan akumulasi kotoran yang dapat memengaruhi efisiensi proses penguapan. Misalnya, jika massa uap yang dihasilkan lebih kecil dari yang diharapkan, hal ini bisa menjadi indikasi adanya penurunan transfer panas akibat terbentuknya kerak pada permukaan pemanas [13].

Tabel 1. Neraca massa evaporator

Jenis Evaporator	Umpan Masuk	Massa (kg/jam)	Umpan Keluar	Massa (kg/jam)
Evaporator 1	Nira Encer (f)	102670.8333	Nira Kental 1 (L ₁)	85367.92134
	Steam (S)	17903.40589	Uap Nira 1 (V ₁)	17302.91199
			Kondensat 1 (W ₁)	17903.40589
	Total umpan	120574.2392	Total keluar	120574.2392
Evaporator 2	Nira Kental 1 (L ₁)	85367.92134	Nira Kental 2 (L ₂)	68333.8887
	Uap Nira 1 (V ₁)	17302.91199	Uap Nira 2 (V ₂)	17034.03264
			Kondensat 2 (W ₂)	17302.91199
	Total umpan	120574.2392	Total keluar	102670.8333
Evaporator 3	Nira kental 2 (L ₂)	68333.8887	Nira kental 3 (L ₃)	51797.4216
	Uap Nira 2 (V ₂)	17034.03264	Uap Nira 3 (V ₃)	16536.4671
			Kondensat 3 (W ₃)	17034.03264
	Total umpan	85367.92134	Total keluar	85367.92134
Evaporator 4	Nira kental 3 (L ₃)	51797.4216	Nira kental 4 (L ₄)	35788.47408
	Uap Nira 3 (V ₃)	16536.4671	Uap Nira 4 (V ₄)	16008.94752
			Kondensat 4 (W ₄)	16536.4671
	Total	68333.8887	Total	68333.8887
Evaporator 5	Nira kental 4 (L ₄)	35788.47408	Nira kental 5 (L ₅)	20170.83333
	Uap Nira 4 (V ₄)	16008.94752	Uap Nira 5 (V ₅)	15617.64075
			Kondensat 5 (W ₅)	16008.94752
	Total	51797.4216	Total	51797.4216

Seperti yang terlihat pada Tabel 1, didapatkan keseimbangan yang cukup baik antara massa nira masuk dan massa produk serta residu keluar, yang menandakan bahwa sistem

bekerja dengan performa yang stabil. Analisis ini memberikan gambaran awal secara menyeluruh terhadap efisiensi kerja alat serta menjadi dasar untuk perencanaan pemeliharaan, terutama dalam menentukan waktu pembersihan alat evaporator guna mencegah penurunan laju penguapan. Selain itu, data neraca massa yang akurat dapat digunakan untuk perhitungan lanjut dalam neraca energi, serta sebagai landasan dalam penentuan efisiensi termal dan kebutuhan bahan bakar.

Di samping analisis neraca massa, evaluasi neraca energi pada stasiun penguapan juga memiliki peran vital dalam menilai efisiensi termal proses konsentrasi nira. Neraca energi bertujuan untuk mengetahui keseimbangan antara energi panas yang diterima sistem dan energi yang digunakan untuk menguapkan air dari nira. Di PT. PG Candi Baru, proses penguapan dilakukan dengan sistem *quintuple effect evaporator*, di mana lima unit evaporator dioperasikan secara berurutan dengan prinsip pemanfaatan kembali energi panas. Uap bekas yang digunakan pada evaporator pertama memiliki tekanan sekitar 0,7–0,8 kg/cm² dan temperatur sekitar 110°C, yang kemudian dimanfaatkan untuk memanaskan nira dan menguapkan air yang dikandungnya. Uap hasil evaporasi dari satu unit digunakan kembali sebagai pemanas untuk unit berikutnya, sehingga konsumsi energi dapat diminimalkan.

Dalam melakukan analisis neraca energi, pendekatan yang digunakan adalah prinsip konservasi energi yaitu jumlah energi yang masuk ke dalam sistem harus setara dengan energi yang keluar. Energi masuk berasal dari uap yang digunakan untuk pemanasan, sementara energi keluar terbagi dalam bentuk panas yang digunakan untuk memanaskan dan menguapkan nira, serta energi yang hilang bersama kondensat dan uap sisa. Parameter-parameter penting yang diperhitungkan mencakup entalpi uap, debit uap dan nira, kapasitas panas nira, serta perbedaan temperatur antar evaporator. Semua nilai ini kemudian dihitung dalam satuan energi seperti kkal atau kJ untuk memudahkan analisis menyeluruh pada setiap tahap penguapan.

Tabel 2. Neraca panas evaporator

Jenis Evaporator	Panas Masuk	(kJ/jam)	Panas Keluar	(kJ/jam)
Evaporator 1	Nira encer (f)	39300005.85	Nira kental 1 (L ₁)	30857460.46
	Q laten Steam (S)	39696482.82	Uap Nira 1 (V ₁)	46154204.06
			Heat loss (q loss ₁)	1984824.141
	Total	78996488.67	Total	78996488.67
Evaporator 2	Nira kental 1 (L ₁)	30857460.46	Nira kental 2 (L ₂)	22969860.19
	Q laten uap 1 (q _{s2})	39384289.2	Uap Nira 2 (V ₂)	45302675.01
			Heat loss (q loss ₂)	1969214.46
	Total	70241749.66	Total	70241749.66
Evaporator 3	Nira kental 2 (L ₂)	22969860.19	Nira kental 3 (L ₃)	16130408.77
	Q laten uap 2 (q _{s3})	38983400.32	Uap Nira 3 (V ₃)	43873681.73
			Heat loss (q loss ₃)	1949170.016
	Total	61953260.51	Total	61953260.51
Evaporator 4	Nira kental 3 (L ₃)	16130408.77	Nira kental 4 (L ₄)	9874725.526
	Q laten uap 3 (q _{s4})	38006317.7	Uap Nira 4 (V ₄)	42361685.06
			Heat loss (q loss ₄)	1900315.885

Jenis Evaporator	Panas Masuk	(kJ/jam)	Panas Keluar	(kJ/jam)
Evaporator 5	Total	54136726.47	Total	54136726.47
	Nira kental 4 (L_4)	9874725.526	Nira kental 5 (L_5)	3954484.956
	Q laten uap 4 (q_{ss})	37002754.7	Uap Nira 5 (V_5)	41072857.54
			Heat loss (q_{loss5})	1850137.735
	Total	46877480.23	Total	46877480.23

lanjutan

Dari hasil perhitungan yang tercantum pada Tabel 2, menunjukkan bahwa sebagian besar energi berhasil dimanfaatkan untuk proses evaporasi, dan sisanya hilang melalui aliran kondensat atau gas buang. Dari perhitungan energi, diketahui bahwa kebutuhan energi terbesar terdapat pada efek pertama karena pada tahap ini uap bekas digunakan secara langsung untuk menguapkan air. Sedangkan pada efek-efek selanjutnya, energi berasal dari uap hasil evaporasi sebelumnya yang digunakan kembali (*bleeding steam*), sehingga kebutuhan uap primer dapat ditekan secara signifikan [14].

Salah satu aspek penting yang diamati adalah efisiensi energi termal dari sistem penguapan. Dengan mengoptimalkan panas melalui penguapan bertingkat, PT. PG Candi Baru dapat meningkatkan efisiensi yang lumayan tinggi karena satu unit uap dapat digunakan berkali-kali untuk menguapkan nira di beberapa efek. Efisiensi ini juga diperkuat oleh sistem pemeliharaan yang baik, di mana setiap badan evaporator secara bergiliran dibersihkan menggunakan larutan kaustik untuk menghilangkan kerak dan kotoran yang dapat menghambat perpindahan panas. Dengan demikian, perpindahan panas tetap optimal dan proses penguapan berjalan lancar [15].

Secara keseluruhan, hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem penguapan di PT. PG Candi Baru bekerja secara efisien baik dari segi neraca massa maupun neraca energi. Pemanfaatan uap bekas, pengaturan tekanan vakum, dan penggunaan sistem efek ganda secara bertingkat menjadikan proses ini hemat energi dan mendukung keberlanjutan operasional pabrik gula [16]. Hasil ini menunjukkan bahwa perhitungan neraca massa dan energi bukan hanya sebagai alat evaluasi teknis, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan energi dan peningkatan efisiensi produksi secara keseluruhan [17].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan, neraca massa dan neraca panas pada stasiun penguapan di PT. PG Candi Baru berada dalam kondisi seimbang. Hal ini menunjukkan bahwa aliran massa dan energi dalam sistem penguapan telah terdistribusi dengan baik. Analisis neraca panas menunjukkan adanya selisih antara energi yang diberikan dengan energi yang terukur di akhir proses, yang mengindikasikan terjadinya kehilangan panas (*heat loss*) sebesar 5% pada tiap unit evaporator. Kehilangan ini merupakan hal yang umum terjadi di pabrik karena panas tidak mungkin berpindah 100% tanpa ada yang menguap ke lingkungan. Untuk sistem penguapan lima tingkat seperti di PT. PG Candi Baru, kebocoran panas sebesar 5% ini masih dalam batas yang masuk akal.

Industri dapat menambah alat pengukur parameter tekanan dan suhu pada setiap evaporator agar dapat diketahui efisiensi tiap evaporator. Menjaga kestabilan kondisi

operasi evaporator, diperlukan sistem isolasi termal yang lebih optimal pada jaringan perpipaan agar kehilangan panas dapat diminimalkan. Penelitian sebelumnya diketahui kehilangan panas sebesar 5%. Saran untuk penelitian berikutnya dapat berfokus pada simulasi atau pengujian berbagai jenis material isolasi (seperti *rockwool*, *calcium silicate*, atau *ceramic fiber*) dan menghitung ketebalan optimalnya untuk menekan *heat loss* hingga di bawah 3%.

REFERENSI

- [1] Selvia, "Proses pembuatan gula PT. Pabrik gula candi baru Sidoarjo," Laporan Praktek Kerja Lapangan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran, hal. 18-31, 2022.
- [2] A. Dehnavi, K. Arastou, dan H. Kashani, "Performance evaluation of single- and multi-effect evaporators for multi-pollutant removal and energy efficiency assessment in baker's yeast wastewater," *Water Resources Industry*, vol. 35, hal. 2212-3717, 2025.
- [3] A.U. Hafidza, M. Meiliana, M.F. Nugroho, A. Manggala, R. Daniar, dan Zurohaina, "Analisis Efisiensi Termal Evaporator Vakum pada Proses Pemekatan Nira Tebu," *Jurnal Pendidikan Tambusai*, vol.7, no. 3, hal. 31665-31670, 2023.
- [4] M. Batkormbawa dan A. Setiyono, "Optimasi Yield Produk Kolom Distilasi C1-1 Di Unit CDU V PT X," *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Terpadu*, vol. 8, no. 12, hal. 2246-6111, 2024.
- [5] S.I. Munawaroh, N. Azizah, dan M. Subur, "Perhitungan Neraca Massa Dan Neraca Energi Evaporator Pada Unit Kilang Ppsdm Migas Cepu," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 1, hal. 13–19, 2021.
- [6] R. E. V. Putri, "Pengawasan Proses Pengolahan Gula di Pt. Industri Gula Glenmore," Laporan Praktek Kerja Lapangan, Politeknik LPP, 2021.
- [7] D. Himmelblau dan J. Riggs, *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 7th ed. New Jersey: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004.
- [8] E. Hugot, *Handbook of Cane Sugar Engineering*, 3rd ed. Amsterdam: elsevier science publishing company inc, 1986.
- [9] Atulkmar. G. Sanadi dan S. A. Khot, "Design & Analysis of Multiple effect Evaporator for Sugar Industry", *Research square*, hal. 1-26, 2024.
- [10] N. H. Ramadhani dan N. Rahmatika, "Desain Direct Contact Heater Exchanger (Dche) Pada Pemanas," Laporan Magang, Universitas Internasional Semen Indonesia, 2023.
- [11] K. P. Ramadhan dan S. Sulistyaningrum, "Laporan Kerja Praktek PT. Perkebunan Nusantara Xi Pg. Redjosari," Universitas Internasional Semen Indonesia, 2022.
- [12] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Unit Operations*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall Professional Technical Reference, 1993.
- [13] I. Marcelina, S. Santosa, M. D. Hidayati, dan M. F. Rosidin, "Perhitungan Neraca Massa Pada Stasiun Penguapan Dengan Kapasitas 12500 Tcd Di Pg Kebon Agung," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 10, no. 3, hal. 610–615, 2024.
- [14] O. Yakarimilena, "Analisis Kontribusi Kerusakan Boiler Terhadap Kegagalan Proses Produksi di PT. Perkebunan Nusantara II Kebun Arso Menggunakan Failure Modes and Effect Analysis (Fmea) Dan Fishbone Diagram," Skripsi, Universitas Internasional Semen Indonesia, 2019.

- [15] A. Setyawan dan N. M. Sujati, "Evaluasi Hasil Analisis Efisiensi Kinerja Sistem Evaporator Iplr Tahun 2014-2017," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV*, vol. 15, hlm. 255–260, 2017.
- [16] F. Faraldo dan P. Byrne, "A Review of Energy-Efficient Technologies and Decarbonating Solutions for Process Heat in the Food Industry," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2024.
- [17] H. M. Nityas dan A. Agustin, "Pra-Rancangan Pabrik Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (Pltbg) Dari Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit Dengan Kapasitas 2,30 Mwel," Skripsi, Universitas Islam Indonesia, 2024.