

DESAIN *DIRECT CONTACT HEAT EXCHANGER* (DCHE) PADA UNIT MASAKAN DEFEKASI - *REMELT* - KARBONATASI (DRK) DI PG KEBON AGUNG MALANG

Alya Putri Ramadhanty¹, Christyfani Sindhuwati¹, Tiara Nur Azizah¹, Firmansyah Agil Saputra²

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

²PG Kebon Agung, Jl. Raya Kebonagung, Malang, Indonesia

alyaputriramadhanty23@gmail.com ; [c.sindhuwati@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Gula adalah salah satu komoditas yang banyak diproduksi di Indonesia untuk digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Gula yang ada di Indonesia umumnya diproduksi dengan menggunakan nira tanaman tebu atau *raw sugar*. *Raw sugar* yang digunakan akan dilelehkan dan dimurnikan kembali dengan menggunakan metode pemurnian defekasi-karbonatasi. Pada PG Kebon Agung yang berada di Kabupaten Malang, proses ini dilakukan di unit masakan Defekasi-Remelt-Karbonatasi (DRK). Gula yang telah dilelehkan kembali dengan air kemudian dimasukkan ke rangkaian peralatan karbonatasi, salah satunya adalah reaktor karbonatasi. Pada kenyataannya, reaktor ini memiliki beban kinerja yang cukup besar karena suhu bahan yang masuk sangat rendah. Untuk menanggulangi masalah ini, sebuah peralatan pertukaran panas dengan jenis *direct contact* akan ditambahkan pada rangkaian tersebut. Sebelum dipasangkan, peralatan perlu dirancang terlebih dahulu. Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain dari peralatan *direct contact heat exchanger* (DCHE) yang akan dipasangkan pada unit DRK PG Kebon Agung. Untuk mendapatkan desain DCHE yang dikehendaki, data lapangan serta data asumsi perlu dikumpulkan terlebih dahulu sebelum dilanjutkan dengan proses penghitungan dengan menggunakan berbagai rumus yang tersedia serta pembuatan gambar alatnya. Berdasarkan penghitungan yang dilakukan, peralatan DCHE yang digunakan memiliki diameter luar sebesar 1,1222 meter dengan tinggi 10,4480 meter. Maka dari itu, peralatan ini dinilai layak dari segi ekonomi maupun kegunaannya untuk digunakan pada proses pemanasan awal bahan sebelum masuk ke reaktor karbonatasi.

Kata kunci: DCHE, *heat exchanger*, perancangan alat, produksi gula.

ABSTRACT

Sugar is one of the commodities that is widely produced in Indonesia that is used in daily life. Generally, sugar in Indonesia is produced from sugarcane juice or raw sugar. Raw sugar used will be melted and purified again using the defecation-carbonatation purification method. In the Kebon Agung sugar factory located in Malang Regency, this process is carried out in the Defecation-Remelt-Carbonatation (DRC) unit. Sugar that was remelted with water would enter the carbonatation's equipment unit, one of which is the carbonatation reactor. In the reality, this reactor had a relatively big performance load as the entering material had a low temperature. To overcome this problem, heat exchanging equipment with the type of direct contact would be added to the unit. Before installation, this equipment should be designed first. This research aims to design a direct contact heat exchanger (DCHE) that would be installed in the DRC unit of the Kebon Agung sugar factory. To obtain the desired DCHE design, data from the factory and assumptions should be collected first before starting the calculation process by utilizing all the available equations and drawing the equipment's design. Based on the calculation that was done, the DCHE equipment that would be installed has an outside diameter of 1,1222 meters and 10,4480 meters of height. Therefore, this equipment is feasible to be used based on the economical and functionality side in the pre-heating of the material before entering the carbonatation reactor.

Keywords: DCHE, equipment design, heat exchangers, sugar production.

1. PENDAHULUAN

Gula merupakan salah satu jenis komoditas yang banyak diproduksi di Indonesia untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Gula diproduksi dari tanaman tebu yang melalui berbagai proses pengolahan untuk menghasilkan gula kristal putih (GKP). Tidak hanya menggunakan nira tebu, gula juga dapat diolah dengan menggunakan gula rafinasi atau dapat disebut juga dengan *raw sugar*. Agar dapat menjadi gula kristal putih, kedua bahan tersebut membutuhkan pemurnian terlebih dahulu untuk menghilangkan padatan yang terlarutkan, menghilangkan warna, serta meningkatkan nilai pH [1]. Proses pemurnian gula dapat dilakukan dengan berbagai cara, yaitu defekasi, sulfatasi, karbonatasi, atau fosfatasi. Proses-proses pemurnian ini dapat dilakukan secara bersamaan, contohnya dengan menggabungkan proses defekasi dengan karbonatasi.

PG Kebon Agung merupakan salah satu pabrik gula terbesar di Indonesia yang terletak di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Di pabrik ini, gula diproduksi dengan menggunakan nira tebu serta gula rafinasi. Pembuatan gula dengan menggunakan gula rafinasi dilakukan dengan melebur gula tersebut dengan air untuk diolah kembali dengan menggunakan proses pemurnian defekasi-karbonatasi. Proses pertama, yaitu defekasi, dilakukan dengan cara mencampurkan *slurry* kalsium hidroksida ke *remelt liquor* dan dilanjutkan dengan proses kedua, yaitu karbonatasi, dengan mengkontakkan gelembung-gelembung gas karbon dioksida dengan pH dan suhu yang terkontrol [2]. Proses ini akan menghasilkan padatan yang disebut sebagai *cake* yang kemudian dapat dibuang serta *clear liquor*. Peralatan yang digunakan dalam proses ini umumnya terdiri atas reaktor berpengaduk untuk mencampurkan *slurry* kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dengan *remelt liquor* yang akan dipurifikasi dan peralatan filtrasi untuk memisahkan padatan dengan larutannya. *Clear liquor* ini adalah bahan yang akan diolah untuk dijadikan produk gula dengan kualitas premium.

Heat exchanger (HE) merupakan sebuah peralatan yang banyak digunakan untuk memindahkan panas yang terdapat pada dua jenis fluida yang masuk dengan bantuan sebuah medium padat untuk proses kontakannya [3]. Salah satu fluida akan bertugas untuk menerima panas dari fluida lainnya yang akan melepaskan panas [4]. Fluida dengan suhu yang lebih tinggi akan memberikan panasnya ke fluida dengan suhu yang lebih rendah [5]. Jenis HE yang umum digunakan adalah *shell and tube heat exchanger* (STHE), *plate heat exchanger*, serta *double pipe heat exchanger* (DPHE). Kedua HE tersebut tergolong dalam peralatan HE yang bekerja secara tidak langsung (*indirect*). Tidak hanya itu, peralatan HE juga dapat dibedakan berdasarkan arah alirannya, yaitu *counter current* dan *co-current* [6].

Nyatanya, terdapat jenis HE lainnya yang memiliki kontak secara langsung antar fluidanya tanpa adanya dinding perpindahan panas sebagai perantaranya [7]. Salah satunya adalah *direct contact heat exchanger* (DCHE). Penggunaan sebuah DCHE memiliki keuntungan karena dapat menukar panas lebih cepat dan memiliki struktur yang sederhana. Sebagai tambahan, DCHE dapat merealisasikan kapasitas panas yang tinggi karena strukturnya yang sederhana serta tidak adanya perpindahan panas pada pipa maupun kapsul [8]. Perpindahan panas yang dilakukan secara kontak langsung akan memberikan perpindahan panas yang efektif dari segi biaya sehingga dinilai layak untuk proses penguapan maupun pemanasan awal

dari suatu fluida [9]. Umumnya, DCHE digunakan untuk proses desalinasi air laut, pemulihan panas, konversi energi termal di laut, dan masih banyak lagi [10].

Pada peralatan yang akan didesain ini, fluida dingin yang masuk ke peralatan HE adalah *remelt liquor* yang merupakan produk gula yang dicairkan kembali untuk melalui proses pemurnian ulang. Gula yang digunakan dapat berupa gula dengan ukuran kristal yang tidak sesuai dengan standar dari pabrik. Di sisi lain, fluida panas yang digunakan adalah uap panas yang dikeluarkan dari badan evaporator kedua. Penggunaan uap panas tersebut untuk peralatan lain dikenal juga dengan sebutan *vapor bleeding*. Sistem *vapor bleeding* ini dapat membantu pabrik untuk menurunkan konsumsi uap panasnya [11].

Dengan keuntungan yang sudah disebutkan tersebut, PG Kebon Agung hendak menambah peralatan DCHE tersebut untuk menaikkan suhu *remelt liquor* yang akan dimurnikan pada unit DRK dari suhu 60°C menuju 80°C. Tujuan dari penghitungan desain *direct contact heat exchanger* adalah untuk merancang suatu alat yang dapat meringankan beban kinerja dari reaktor karbonatasi yang merupakan salah satu peralatan dalam unit DRK PG Kebon Agung Malang dengan cara meningkatkan suhu bahan yang masuk.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan mengolah data yang didapatkan dari pabrik untuk dijadikan sebagai dasar penghitungan untuk mendesain *direct contact heat exchanger* (DCHE) ini. Data utama yang harus diperoleh adalah data fluida panas maupun fluida dingin yang terlibat dalam *heat exchanger*. Data untuk fluida dingin meliputi laju alir volumetrik dari bahan *remelt liquor*, suhu, derajat brix, dan harkat kemurniannya. Untuk fluida panas, data yang diperlukan adalah suhu, panas laten, dan volume spesifiknya. Setelah semua data diperoleh, dilakukan proses penentuan asumsi-asumsi yang digunakan untuk penghitungan. Data yang diasumsikan meliputi kecepatan *remelt liquor* yang masuk dan keluar *heat exchanger*, kuantitas uap tak terkondensasi, dan sudut dari *baffle*.

Penghitungan dilanjutkan dengan menghitung data penunjang, seperti entalpi, hingga diameter dari peralatan yang digunakan. Dari hasil penghitungan tersebut kemudian penghitungan spesifikasi dari DCHE yang digunakan dapat diperoleh. Spesifikasi yang diketahui tersebut kemudian dapat digunakan untuk menggambar alatnya untuk membantu memahami alat tersebut. Rumus-rumus yang digunakan untuk desain dirinci dibawah ini:

a. Penghitungan data tambahan

- Kuantitas *liquor*

$$\text{Kuantitas liquor} = \text{laju alir volumetrik} \times \rho \quad (1)$$

- Laju alir *liquor*

$$\text{Laju alir liquor} = \frac{\text{laju alir volumetrik liquor}}{3.600 \text{ detik}} \quad (2)$$

- Kuantitas uap panas (*steam*)

$$\text{Kuantitas uap} = \frac{\text{kuantitas liquor} \times \text{panas spesifik liquor} \times \Delta T}{\text{panas laten uap}} \quad (3)$$

- Laju alir uap (*steam*)

$$\text{Laju alir uap} = \frac{\text{kuantitas uap} \times \text{volume spesifik uap}}{3.600 \text{ detik}} \quad (4)$$

- Laju alir NCG (*non-condensable gas*)
 Laju alir NCG = %NCG x laju alir uap (5)

b. Penghitungan diameter pipa aliran

- Diameter aliran *liquor* keluar

$$d_{\text{liquor keluar}} = \sqrt{\frac{(\text{laju alir liquor+uap}) \times 4}{\pi \times \text{kecepatan uap keluar}}} \quad (6)$$

- Diameter *vent* NCG

$$d_{\text{vent NCG}} = \sqrt{\frac{\text{laju alir NCG} \times 4}{\pi \times \text{kecepatan NCG}}} \quad (7)$$

c. Penghitungan diameter *baffle* dan *annulus*

- Diameter *baffle* bawah

$$d_{\text{baffle bawah}} = \sqrt{\frac{\text{laju alir uap} \times 4}{\pi \times \text{kecepatan uap annulus}}} \quad (8)$$

- Diameter *baffle* atas

$$d_{\text{baffle atas}} = d_{\text{baffle bawah}} + \text{penambahan} \quad (9)$$

- Diameter *annulus* bawah

$$d_{\text{annulus bawah}} = d_{\text{baffle bawah}} \quad (10)$$

d. Penghitungan diameter rangka

- Diameter luar rangka

$$d_{\text{luar rangka}} = \sqrt{d_{\text{baffle bawah}}^2 + d_{\text{baffle atas}}^2} \quad (11)$$

- Diameter dalam rangka

$$d_{\text{dalam rangka}} = d_{\text{luar rangka}} - (2 \times \text{ketebalan}) \quad (12)$$

- Area uap tersedia

$$\text{Area uap} = \pi \times d_{\text{dalam rangka}}^2 \quad (13)$$

e. Penghitungan tinggi kerucut bawah

$$h_{\text{kerucut}} = \tan \theta \times 0,5(d_{\text{dalam rangka}} - d_{\text{liquor keluar}}) \quad (14)$$

f. Penghitungan tinggi *baffle* dan *annulus*

- Tinggi *baffle* bawah

$$h_{\text{baffle bawah}} = |\tan \theta \times 0,5(d_{\text{dalam rangka}} - d_{\text{baffle bawah}})| \quad (15)$$

- Tinggi *baffle* atas

$$h_{\text{baffle atas}} = |\tan \theta \times 0,5d_{\text{baffle atas}}| \quad (16)$$

- Tinggi *annulus* bawah

$$h_{\text{annulus bawah}} = d_{\text{uap masuk}} + \text{penambahan} \quad (17)$$

- Tinggi antara *baffle* atas dan *annulus* bawah

$$h_{\text{baffle atas ke annulus bawah}} = \frac{\text{laju alir volumetrik liquor}}{\text{area uap tersedia}} \quad (18)$$

- g. Penghitungan tinggi total

$$h_{\text{total}} = h_{\text{kerucut atas}} + h_{\text{vapour space}} + d_{\text{liquor masuk}} + \text{jarak inlet} + n \times (h_{\text{baffle atas}} + h_{\text{baffle bawah}} + \text{gap}) + h_{\text{annulus bawah}} + h_{\text{baffle atas ke annulus bawah}} + h_{\text{kerucut bawah}} \quad (19)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data-data yang didapatkan dari pabrik meliputi data laju alir volumetrik, derajat brix, harkat kemurnian, suhu *liquor* atau larutan gula pada saat masuk dan keluar dari peralatan DCHE, serta diameter pipa *inlet* dari peralatan yang akan dirancang. Data-data tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data sifat fisik *remelt liquor* dan ukuran pipa dari pabrik

Jenis data	Nilai
Laju alir volumetrik (m ³ /jam)	100
Derajat brix (°)	60
Harkat kemurnian	92%
Suhu <i>liquor</i> masuk (°C)	60
Suhu <i>liquor</i> keluar (°C)	80
Diameter pipa <i>inlet</i> (in)	6

Data-data dari pabrik tersebut kemudian digunakan untuk mengetahui laju alir dari fluida dingin yang masuk ke peralatan DCHE. Panas laten dari uap diperoleh dengan interpolasi pada *steam table* menggunakan suhu yang diketahui, yaitu sebesar 743,8877 kkal/kg. Dengan mengetahui data panas laten tersebut, kuantitas uap dapat diketahui dengan menggunakan rumus. Data derajat brix dan harkat kemurnian dapat digunakan untuk mengetahui data densitas dan panas spesifik dari *remelt liquor*. Keseluruhan data tambahan untuk penghitungan desain DCHE dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data-data tambahan

Jenis data	Nilai
Densitas <i>liquor</i> (kg/m ³)	1.286
Panas spesifik <i>liquor</i> (kkal/kg/°C)	0,74
Suhu uap (°C)	103
Panas laten uap (kkal/kg) [12]	743,8877
Volume spesifik uap (m ³ /kg)	1,5208
Kuantitas <i>liquor</i> (ton/jam)	128,6
Laju alir <i>liquor</i> (m ³ /s)	0,0278
Kuantitas uap (ton/jam)	2,5586
Laju alir volumetrik uap (m ³ /s)	1,0808
Laju alir volumetrik NCG (m ³ /s)	0,0216

Setelah data dari pabrik dan data tambahan diperoleh, dilakukan pengasumsian beberapa parameter untuk membantu proses penghitungan desain alat dari DCHE ini. Data-data yang diasumsikan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data-data asumsi penghitungan

Jenis data	Nilai
Kuantitas NCG (%)	2
Kecepatan <i>liquor</i> masuk (m/s)	1,8
Kecepatan <i>liquor</i> keluar (m/s)	3
Kecepatan uap masuk (m/s)	2
Kecepatan uap pada <i>annulus</i> (m/s)	2,5
Kecepatan NCG (m/s)	10
Sudut <i>baffle</i> atas (°)	130
Sudut <i>baffle</i> bawah (°)	120
Sudut kerucut bawah (°)	60
Tinggi <i>vapor space</i> (mm)	1.500
Jarak <i>inlet liquor</i> dengan <i>baffle</i> bawah (mm)	200
Penambahan tinggi / lebar (mm)	100
Ketebalan (mm)	12
Jumlah <i>baffle</i>	4

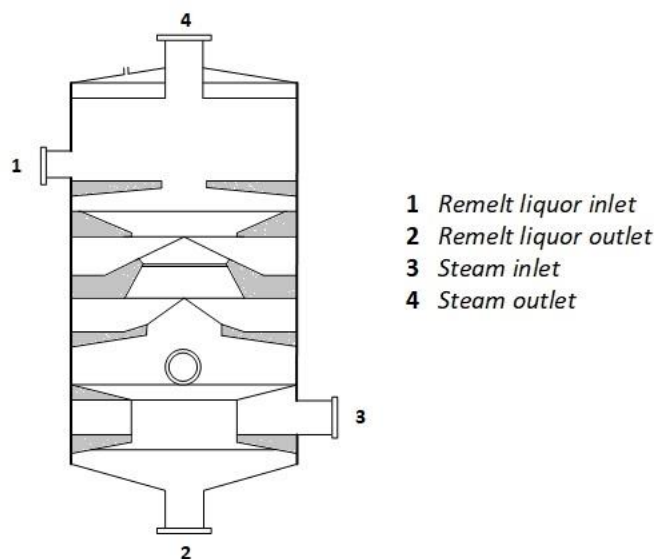
Pada tabel data asumsi, disebutkan bahwa sudut yang digunakan untuk menghitung *baffle* atas dan bawah memiliki angka sebesar 130° dan 120°. Penggunaan asumsi tersebut didasarkan karena semakin tinggi sudut yang digunakan, maka akan semakin tinggi pula koefisien perpindahan panas dari peralatan yang digunakan [13]. Tidak hanya itu, kecepatan alir dari fluida akan meningkat seiring dengan meningkatnya sudut dari *baffle* yang digunakan dan kecepatannya akan terdistribusi dengan lebih merata merata. Adanya peningkatan energi kinetik karena kecepatan yang semakin meningkat ini berkontribusi terhadap meningkatnya laju perpindahan panas [14]. Apabila ditinjau dari *pressure drop* peralatannya, semakin rendah sudut yang digunakan akan menyebabkan *pressure drop* menjadi semakin besar karena resistensi dari *baffle* yang digunakan menjadi meningkat. Ketika sudut yang digunakan semakin besar, maka *baffle* akan memberikan aliran yang lebih lembut [15]. Kemudian, ukuran sudut kerucut bawah, yang merupakan bagian *outlet remelt liquor* dari peralatan, diasumsikan sebesar 60°. Hal ini didasarkan pada sumber yang menyebutkan bahwa sudut tersebut adalah besar sudut yang banyak digunakan untuk jenis tutup *conical* [16].

Setelah semua data dapat digunakan, proses penghitungan kemudian dapat dilaksanakan. Dari hasil proses penghitungan yang dilakukan, dapat diketahui bahwa dimensi dari peralatan DCHE yang disarankan untuk dipasangkan dalam rangkaian peralatan untuk unit DRK pada PG Kebon Agung Malang. Secara singkat, diameter luar dari peralatan yang digunakan adalah sebesar 1,1222 m dengan tinggi sebesar 10,4480 m. Dimensi-dimensi ini dapat diuraikan menjadi diameter *baffle* bagian bawah dan *annulus* bawah yang bernilai sama, yaitu sebesar 0,7419 m. Sedangkan diameter dari *baffle* bagian atas adalah 0,8419 m. Dengan ketebalan sebesar 12 inch, maka diameter bawah dari peralatan adalah sebesar 1,0982 m. Karena bagian tutup atas dan bawah peralatan menggunakan bentuk kerucut dengan sudut yang berbeda, tinggi keduanya juga memiliki perbedaan, yaitu sebesar 0,3450 dan 0,3570 m. Data dimensi secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4. Gambar desain sederhana dari peralatan DCHE yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 4. Dimensi DCHE hasil penghitungan

Jenis dimensi	Nilai
Diameter aliran <i>liquor</i> keluar (m)	0,6859
Diameter <i>vent</i> NCG (m)	0,0525

Jenis dimensi	Nilai
Diameter <i>baffle</i> bawah (m)	0,7419
Diameter <i>baffle</i> atas (m)	0,8419
Diameter <i>annulus</i> bawah (m)	0,7419
Diameter luar rangka (m)	1,1222
Diameter dalam rangka (m)	1,0982
Tinggi kerucut bawah (m)	0,3570
Tinggi kerucut atas (m)	0,3450
Tinggi <i>baffle</i> bawah (m)	0,3085
Tinggi <i>baffle</i> atas (m)	0,5017
Tinggi <i>annulus</i> bawah (m)	0,2524
Gap (m)	1,0982
Tinggi <i>baffle</i> atas ke <i>annulus</i> bawah (m)	0,0073
Tinggi total DCHE (m)	10,4480



Gambar 1. Desain sederhana *direct contact heat exchanger* (DCHE)

Ukuran diameter dari annulus diasumsikan bernilai sama dengan diameter dari *baffle* bawah peralatan DCHE yang digunakan dengan tujuan untuk mendapatkan *pressure drop* yang serendah mungkin. *Pressure drop* pada bagian annulus akan meningkat seiring dengan adanya peningkatan *spacing* atau diameter dari *baffle* yang digunakan [17]. Jika ukuran dari annulus semakin kecil maka kecepatan aliran akan semakin meningkat, sehingga ada peningkatan bilangan Reynolds. Jika bilangan Reynolds yang digunakan semakin besar, maka *pressure drop* dan *friction factor* akan semakin meningkat pula.

Dari segi kegunaannya, peralatan DCHE yang dirancang ini telah sesuai apabila hendak digunakan untuk menaikkan suhu yang tidak besar, seperti salah satu kegunaan yang disebutkan pada penelitian yang dilakukan oleh Hyun, dkk [18]. Ketika ditinjau dari segi ekonomi, peralatan ini memiliki desain yang sederhana sehingga dapat menurunkan biaya untuk pemasangannya. Selain itu, peralatan ini memiliki diameter luar yang relatif tidak terlalu besar sehingga tidak membutuhkan ruang yang besar. Terakhir, peralatan DCHE telah dirancang untuk memiliki nilai *pressure drop* sekecil mungkin. Sebuah peralatan HE yang baik adalah yang memiliki perpindahan panas yang maksimum, memiliki *pressure drop* yang rendah, serta memiliki biaya yang rendah [19]. Maka dari itu, peralatan ini dinilai layak untuk

digunakan dalam proses *preheating* dari *remelt liquor* yang akan dimurnikan kembali pada unit masakan DRK di PG Kebon Agung Malang.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Peralatan DCHE yang disarankan untuk dipasang memiliki diameter luar silinder sebesar 1,1222 m dengan tinggi sebesar 10,4480 m. Desain *direct contact heat exchanger* (DCHE) yang dihasilkan dari proses penghitungan yang telah dilakukan dinilai layak untuk digunakan sebagai dasar pemilihan peralatan berdasarkan dimensinya apabila PG Kebon Agung berkehendak untuk membeli peralatan ini. Sebaiknya, agar ukuran peralatan yang digunakan lebih akurat, data-data yang bersifat asumsi dalam penelitian ini diganti dengan data lapangan. Sehingga, ukuran peralatan dapat cocok dengan kebutuhan sebenarnya.

REFERENSI

- [1] M. Saska, B. S. Zossi, dan H. Liu, "Removal of colour in sugar cane juice clarification by defecation, sulfitation and carbonation," *Int. Sugar J.*, vol. 112, no. 1337, hal. 258–268, 2010.
- [2] M. Moodley, P. M. Schorn, D. C. Walthew, dan P. Masinga, "Optimising the carbonation process," *Int. Sugar J.*, no. 76, hal. 469–476, 2002.
- [3] R. J. Prabaswara, S. Rulianah, dan C. Sindhuwati, "Evaluasi Pressure Drop Heat Exchanger -03 Pada," *Distilat J. Teknol. Separasi*, vol. 7, no. 9, hal. 505–513, 2021.
- [4] D. Alfianingrum dan A. A. Wibowo, "Studi Pengaruh Ratio Umpan Reaksi Esterifikasi Terhadap Fouling Factor Preheater Kolom Destilasi Pemurnian Produk Metil Asetat," *Distilat J. Teknol. Separasi*, vol. 6, no. 2, hal. 254–258, 2020, doi: 10.33795/distilat.v6i2.70.
- [5] M. R. Zain dan A. Mustain, "Evaluasi Efisiensi Heat Exchanger (He - 4000) Dengan Metode Kern," *Distilat J. Teknol. Separasi*, vol. 6, no. 2, hal. 415–421, 2020, doi: 10.33795/distilat.v6i2.133.
- [6] E. N. N. A. Ansar, A. Maylia, A. Chumaidi, dan A. Kresmagus, "Evaluasi Efisiensi Heat Exchanger (E-3101) Pada Pabrik ALF3 Departemen Produksi III B PT Petrokimia Gresik," *Distilat J. Teknol. Separasi*, vol. 7, no. 2, hal. 218–223, 2021, doi: 10.33795/distilat.v7i2.221.
- [7] T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, dan T. Akiyama, "Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, no. 1, hal. 26–34, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.062.
- [8] T. Nomura, M. Tsubota, N. Okinaka, dan T. Akiyama, "Improvement on heat release performance of direct-contact heat exchanger using phase change material for recovery of low temperature exhaust heat," *ISIJ Int.*, vol. 55, no. 2, hal. 441–447, 2015, doi: 10.2355/isijinternational.55.441.
- [9] T. Lemenand, C. Durandal, D. Della Valle, dan H. Peerhossaini, "Turbulent direct-contact heat transfer between two immiscible fluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 10, hal. 1886–1898, 2010, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.05.014.
- [10] H. Wang, Q. Xiao, J. Xu, H. Wang, Q. Xiao, dan J. Xu, "Direct-Contact Heat Exchanger Direct-Contact Heat Exchanger," *Heat Exch.*, no. April, hal. 145–174, 2017.
- [11] S. Chantasiriwan, "Optimum surface area distribution of multiple-effect evaporator for minimizing steam use in raw sugar manufacturing," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 61, no. 2004, hal. 805–810, 2017, doi: 10.3303/CET1761132.

- [12] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Separation Process Principles (include Unit Operations)*, Fourth Edi. New Jersey: Pearson Education, Inc, 2003.
- [13] W. Du, H. Wang, dan L. Cheng, "Effects of shape and quantity of helical baffle on the shell-side heat transfer and flow performance of heat exchangers," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 22, no. 3, hal. 243–251, 2014, doi: 10.1016/S1004-9541(14)60041-0.
- [14] H. Ameer, "Effect of the baffle inclination on the flow and thermal fields in channel heat exchangers," *Results Eng.*, vol. 3, no. March, hal. 26–27, 2019, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100021.
- [15] R. Thundil Karuppa Raj dan S. Ganne, "Shell side numerical analysis of a shell and tube heat exchanger considering the effects of baffle inclination angle on fluid flow," *Therm. Sci.*, vol. 16, no. 4, hal. 1165–1174, 2012, doi: 10.2298/TSCI110330118R.
- [16] L. E. Brownell dan E. H. Young, *Process Equipment Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1959.
- [17] S. Vivek *et al.*, "Performance evaluation of simple DPHX with helical baffles in annulus side," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1921, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1921/1/012090.
- [18] Y. J. Hyun, J. H. Hyun, W. G. Chun, dan Y. H. Kang, "An experimental investigation into the operation of a direct contact heat exchanger for solar exploitation," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 32, no. 3–4, hal. 425–434, 2005, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.06.003.
- [19] H. Sadighi Dizaji, S. Jafarmadar, dan F. Mobadersani, "Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics for new arrangements of corrugated tubes in a double pipe heat exchanger," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 96, hal. 211–220, 2015, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.05.009.