



Composite Curve Pada Teknologi Pinch

Widayat^{1,2*}, O. K. Muhammad Fauzan², Amanda Nathalia Harti Marusaha Manulang², Elvira Salsabila²,
Ida Ratnawati², Nuraida Ridani²

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

²Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*Corresponding author: widayat@live.undip.ac.id

(Received: July 9, 2025; Accepted: September 7, 2025)

Abstract

Composite Curve in Pinch Technology. Pinch technology is a thermodynamics-based technique used to optimize heat consumption in industrial process systems using the design and optimization of heat exchanger networks (HEN). One key tool in the heat exchanger technology approach is a composite curve that describes the relationship between enthalpy and temperature of hot (steam) and cold (cooling) streams. This study discusses the application carried out on 11 process streams (4 hot streams and 7 cold streams) with variations of ΔT_{min} of 10°C, 12°C, 14°C, 20°C and 22°C. The parameters used are thermal capacity, enthalpy change and cumulative enthalpy at each heat interval. The results obtained inform that decreasing ΔT_{min} will increase the efficiency of heat utilization resulting in expensive installation costs. Conversely, a larger ΔT_{min} will decrease efficiency but reduce system complexity. Thus, it is necessary to determine the appropriate ΔT_{min} .

Keywords: pinch technology, composite curve, ΔT_{min} , heat integration, energy efficiency, Heat Exchanger Network

Abstrak

Teknologi *pinch* adalah teknik berdasar ilmu termodinamika yang digunakan untuk mengoptimalkan konsumsi panas pada sistem proses industri menggunakan perancangan dan optimasi jaringan penukar panas (Heat Exchanger Network/HEN). *One tool* utama pada pendekatan teknologi penukar panas adalah *curve* komposit yang memaparkan hubungan antara entalpi dan suhu aliran panas (panas/steam) dan aliran dingin (cooling). Penelitian ini membahas penerapan yang dilakukan pada aliran proses sebanyak 11 aliran proses (4 aliran panas dan 7 aliran dingin) dengan variasi ΔT_{min} sebanyak 10°C, 12°C, 14°C, 20°C dan 22°C. Parameter yang digunakan berupa kepanasan panas (*thermal capacity*), perubahan entalpi dan entalpi kumulatif pada setiap interval panas. Hasil yang didapatkan menginformasikan bahwa penurunan ΔT_{min} akan meningkatkan efisiensi pemanfaatan panas berakibat pada biaya instalasi yang mahal. Sebaliknya, ΔT_{min} yang makin besar akan menurunkan efisiensi tetapi mengurangi kompleksitas sistem. Dengan demikian perlu ditentukan ΔT_{min} yang tepat.

Kata kunci: pinch technology, composite curve, ΔT_{min} , heat integration, energy efficiency, Heat Exchanger Network

How to Cite This Article: Widayat, W., Fauzan, O. K. M., Manulang, A. N. H. M., Salsabila, E., Ratnawati, I., & Ridani, N. (2025). Composite Curve Pada Teknologi Pinch. *JPPII*, 3(3), 174-179. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2025.28240>

PENDAHULUAN

Istilah "*Pinch Technology*" diperkenalkan oleh Linnhoff dan Vredeveld untuk mewakili suatu metode berbasis termodinamika yang menjamin tingkat energi minimum dalam desain jaringan penukar panas atau *Heat Exchanger Network* (HEN). Istilah analisis *pinch* atau *pinch analysis* sering digunakan untuk mewakili penerapan alat dan algoritma dari *pinch technology* untuk mempelajari proses industri. Perkembangan program perangkat lunak yang ketat seperti *PinchExpressTM*, *SuperTargetTM*, *Aspen PinchTM* telah terbukti sangat berguna dalam melakukan analisis *pinch* terhadap proses industri yang kompleks secara cepat dan efisien (Zhao *et al.*, 2022).

Teknologi *pinch* adalah sebuah metodologi untuk memperkecil pemakaian energi dari proses kimia dengan menghitung target energi secara pasti menggunakan prinsip termodinamika yang dapat dicapai dengan mengoptimalkan sistem pemulihan panas, metode pasokan energi dan kondisi operasi proses (Sharew *et al.*, 2024). Teknologi *pinch* juga dikenal dengan sebutan integrasi proses (*process integration*), integrasi panas (*heat integration*) dan integrasi energi (*energy integration*). Teknologi *pinch* ini menyajikan metodologi sederhana yang secara sistematis menganalisis proses kimia dan sistem utilitas di sekitarnya dengan bantuan Hukum Pertama dan Kedua Termodinamika. Hukum Pertama Termodinamika yaitu memberikan persamaan energi untuk menghitung perubahan entalpi (H) pada aliran yang melewati penukar panas. Hukum Kedua termodinamika yaitu menentukan arah aliran panas di mana energi panas hanya dapat mengalir dari aliran panas ke dingin. Hal ini tidak akan memicu terjadinya "*temperature crossover*" dari aliran panas dan dingin melalui unit penukar panas atau *Heat Exchanger*. Dalam unit penukar panas atau *Heat Exchanger* tidak ada aliran panas yang dapat didinginkan di bawah temperatur aliran dingin dan juga tidak ada aliran dingin yang dapat dipanaskan sampai melebihi temperatur aliran panas. Dalam prakteknya, aliran panas hanya dapat didinginkan ke suhu yang didefinisikan oleh pendekatan suhu minimum atau *temperature approach* dari penukar panas (Daniyanto *et al.*, 2023).

Analisis *pinch* juga digunakan untuk mengidentifikasi biaya energi dan jaringan penukar panas (*Heat Exchanger Network*) serta target biaya modal untuk proses dan mengetahui *pinch point*. Prosedur pertama yaitu memprediksi desain, persyaratan energi eksternal, area jaringan dan jumlah unit untuk suatu proses pada *pinch point*. Selanjutnya desain jaringan penukar panas (*Heat Exchanger Network*) yang sudah memenuhi target dianalisis. Setelah itu, jaringan dioptimalkan dengan membandingkan biaya energi dan biaya modal dari jaringan sehingga total biaya dapat diminimalkan (Fu *et al.*, 2023). Maka dari itu, tujuan utama dari analisis *pinch* ini adalah untuk mencapai penghematan keuangan

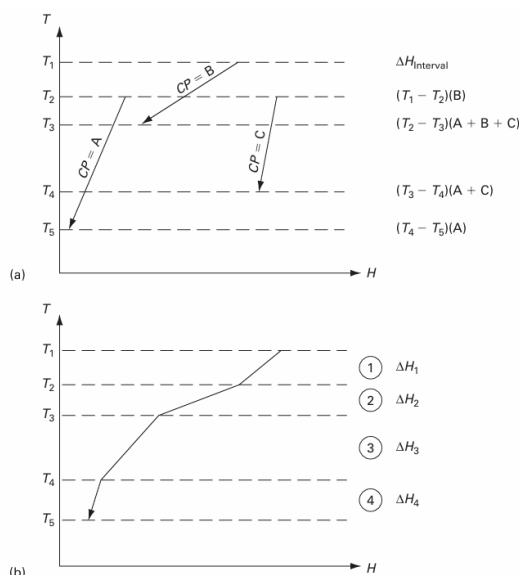
dengan proses integrasi panas (*Heat Integration*) yang lebih baik dan memaksimalkan *Heat Recovery* dari proses ke proses serta mengurangi beban utilitas eksternal.

METODE PENELITIAN

Pinch technology adalah teknik integrasi panas yang membutuhkan penyusunan plot suhu terhadap panas yang ditransfer dalam suatu sistem. Aliran fluida panas (fluida yang akan didinginkan) dan aliran fluida dingin (fluida yang akan dipanaskan) dari suatu sistem. Teknik ini digambarkan dalam *composite curve* yang berisi 2 kurva yang terpisah (Linnhoff, 1979).

Tahapan pertama adalah melakukan ekstraksi data neraca massa dan panas dari *flowsheet* menjadi data *pinch*. Data *pinch* meliputi data termal dan informasi biaya yang dibutuhkan terkait aplikasi *pinch*. Ekstraksi data *flowsheet* ini berguna untuk menyusun data termal yang berguna untuk menentukan *hot stream* dan *cold stream*. Data *hot stream* merupakan data aliran fluida yang membutuhkan pendinginan (*heat sources*) sedangkan *cold stream* adalah aliran yang membutuhkan panas (*heat sink*). Data aliran fluida panas dan aliran fluida dingin yang telah disusun selanjutnya digambarkan dalam bentuk *composite curve* hubungan suhu-entalpi (T-H) yang digambarkan dalam bentuk grafik menunjukkan panas tersedia dalam proses (*hot composite curve*) dan panas yang dibutuhkan dalam proses (*cold composite curve*). Tahap kedua merupakan analisis yang meliputi penentuan *target energy*, optimasi antara biaya *capital* dan energi, penentuan modifikasi proses, penentuan tingkat utilitas dan penempatan *heat engine* dan *heat pump*. *Composite curve* yang terdiri dari *hot* dan *cold composite curve* memberikan gambar aliran berlawanan arah dan dapat digunakan untuk menentukan target energi minimum untuk proses tersebut. Target energi minimum ditentukan dengan menentukan selisih suhu minimum atau *pinch* (ΔT_{\min}) untuk kedua grafik untuk *hot* dan *cold composite curve* (Daniyanto & Rifai, 2013).

Untuk menangani beberapa aliran, kami menambahkan beban panas atau laju aliran kapasitas panas dari semua aliran yang ada pada rentang suhu tertentu. Dengan demikian, satu komposit dari semua aliran panas dan satu komposit dari semua aliran dingin dapat dihasilkan dalam diagram T/H, dan ditangani dengan cara yang sama seperti masalah dua aliran. Pada Gambar 1(a), tiga aliran energi ditampilkan secara terpisah, dengan suhu yang masuk dan yang diinginkan yang menetapkan rangkaian suhu "interval" T_1 - T_5 . Di antara T_1 dan T_2 , hanya aliran B yang terlibat, sehingga energi yang dapat dimanfaatkan dalam interval ini diberikan oleh $CP_B (T_1 - T_2)$. Namun, antara T_2 dan T_3 , ketiga tipe aliran ini terjadi, sehingga jumlah panas yang ada di interval ini adalah $(CP_A + CP_B + CP_C) (T_2 - T_1)$ (Kemp, 2007).



Gambar 1. Pembentukan kurva komposit panas

Serangkaian nilai ΔH untuk setiap periode dapat diperoleh melalui metode ini, dan hasilnya kemudian dapat dipetakan kembali seiring dengan suhu periode seperti yang terlihat pada Gambar 1(b). Grafik T/H yang dihasilkan merupakan satu kurva yang mencerminkan semua aliran panas, yang dikenal dengan sebutan *hot composite curve*. Langkah serupa menghasilkan *cold composite curve* dari semua aliran dingin yang terkait dengan sebuah masalah. Tumpang tindih antara kurva komposit menunjukkan potensi maksimum pemulihan panas yang dapat terjadi dalam proses. "Overshoot" di bagian bawah komposit panas mencerminkan jumlah minimum pendinginan eksternal yang diperlukan, sementara "overshoot" di bagian atas komposit dingin menunjukkan jumlah minimum pemanasan eksternal (Hohmann, 1971).

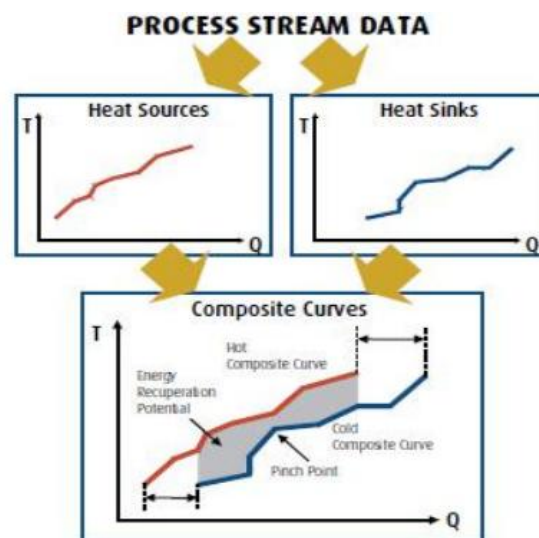
Dari keseluruhan tahapan dalam analisis *pinch* salah satu hal penting yang menjadi kunci utama teknologi *pinch* adalah kurva *composite*. Kurva ini menampilkan kebutuhan pemanasan untuk aliran dingin (*hot utility*) dan kebutuhan pendinginan untuk aliran panas (*cold utility*). Selain itu kurva ini menampilkan kebutuhan panas yang digunakan untuk kedua jenis aliran dan mendapatkan perbedaan suhu minimum (ΔT_{min}) di antara aliran panas dan aliran dingin (Febriana et al., 2019). Area paling kiri dari suhu *pinch* yang tidak terhimpit oleh kurva aliran panas dan dingin adalah *cold utility* yang ditunjukkan pada Gambar 2. Menurut Linnhoff (1983) besarnya panas yang dipindahkan sama dengan perubahan entalpi aliran fluida.

$$Q = \int_{T_s}^{T_t} CP dT = CP(T_t - T_s) = \Delta H \quad (1)$$

di mana Q merupakan laju perpindahan panas yang dipindahkan, kW CP merupakan kapasitas panas aliran (kW/°C), T_t merupakan suhu *supply* (°C) dan T_s merupakan suhu target (°C).

Dengan *slope* kurva aliran adalah:

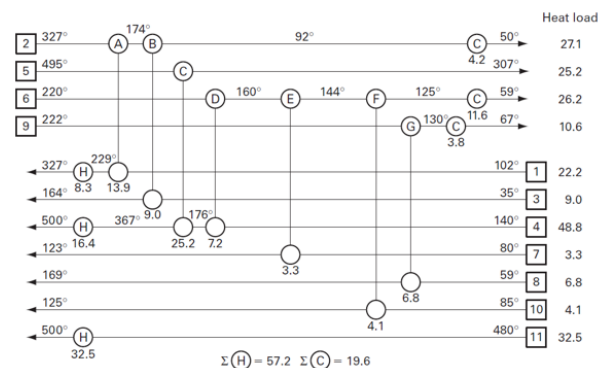
$$\frac{dT}{dQ} = \frac{1}{C_p} \quad (2)$$



Gambar 2. Skema proses data menjadi *composite curve*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jika diketahui data-data dari suatu *plant* sebagai berikut dengan menggunakan masing-masing nilai ΔT_{min} yang berbeda dengan nilai (10, 12, 14, 20 dan 22)°.



Gambar 3. Persoalan *pinch*

Berdasarkan permasalahan yang diberikan, diketahui bahwa *plant* tersebut memiliki total 11 aliran proses, yang terdiri dari 4 *hot stream* dan 7 *cold stream*. Aliran *hot stream* meliputi stream 2, 5, 6 dan 9, sedangkan *cold stream* terdiri dari stream 1, 3, 4, 7, 8, 10 dan 11. Informasi mengenai perubahan suhu masing-masing aliran dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perubahan suhu pada setiap aliran

	Stream	T _{Supply} (°C)	T _{Target} (°C)	Heat load (Kw)
Hot Stream	2	327	50	27,1
	5	495	307	25,2
	6	220	59	26,2
	9	222	67	10,6
Cold Stream	1	102	327	22,2
	3	35	164	9,0
	4	140	500	48,8
	7	80	123	3,3
	8	59	169	6,8
	10	85	125	4,1
	11	480	500	32,5

Untuk melanjutkan perhitungan, diperlukan data kapasitas panas pada masing-masing *stream*. Kapasitas panas (CP) dapat dicari menggunakan rumus sebagai berikut:

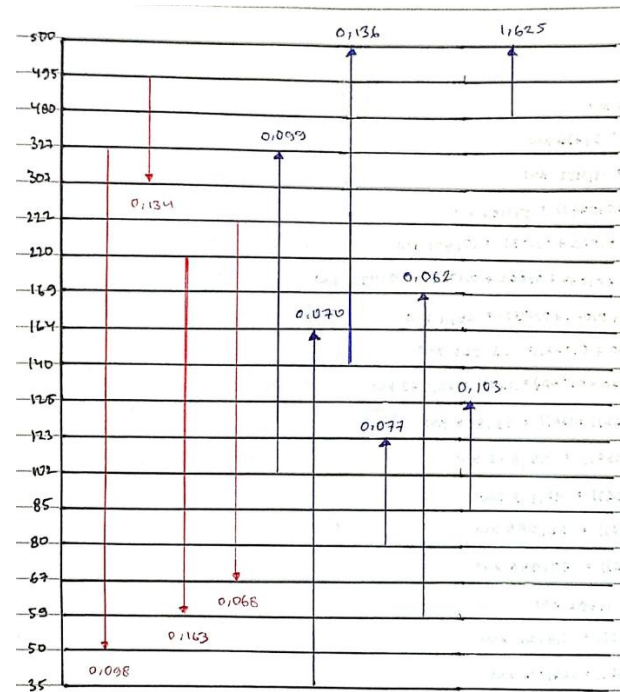
$$CP = \frac{Q}{\Delta T} \quad (3)$$

Data kapasitas panas pada masing-masing *stream* dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Kapasitas panas pada masing-masing aliran

	Stream	T _{Supply} (°C)	T _{Target} (°C)	Heat load (Kw)	Heat Capacity (CP)
Hot Stream	2	327	50	27,1	0,09
	5	495	307	25,2	0,13
	6	220	59	26,2	0,16
	9	222	67	10,6	0,06
Cold Stream	1	102	327	22,2	0,09
	3	35	164	9,0	0,06
	4	140	500	48,8	0,13
	7	80	123	3,3	0,07
	8	59	169	6,8	0,06
	10	85	125	4,1	0,10
	11	480	500	32,5	1,62

Selanjutnya diperlukan data ΔH pada setiap interval. Untuk itu diperlukan diagram *grid* untuk menentukan interval pada setiap *stream*.

**Gambar 4.** Diagram *grid* pada setiap interval

Untuk mencari ΔH pada setiap interval dapat menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\Delta H = (\sum CP_{cold} - \sum CP_{hot}) \times \Delta T_{interval} \quad (4)$$

Selanjutnya, diperlukan data entalpi kumulatif pada setiap interval menggunakan rumus sebagai berikut.

$$H_{i+1} = H_i + \Delta H_{i+1} \quad (5)$$

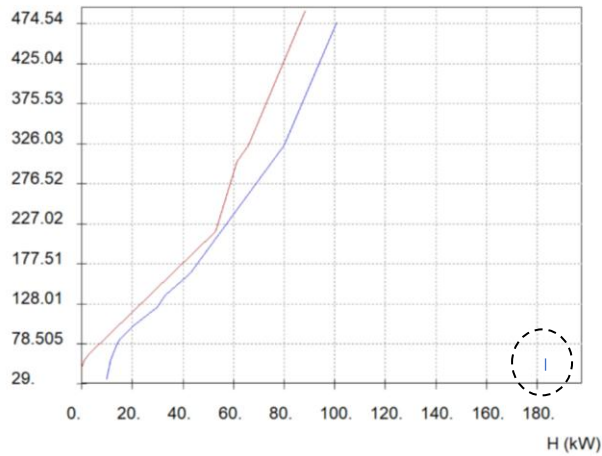
Perhitungan dimulai dari $H_{i+1}=0$. Data *heat load* (H) kumulatif pada masing-masing interval dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Data *heat load* (H) kumulatif pada setiap interval

Interval	H _{hot stream} (Kw)	H _{cold stream} (Kw)
1	0	0
2	0,882	1,050
3	2,970	1,680
4	7,470	2,736
5	8,892	4,452
6	14,485	5,497
7	21,394	10,801
8	22,052	19,432
9	26,987	20,100
10	34,883	23,565
11	36,528	32,373
12	53,307	33,858
13	53,639	45,843
14	61,969	46,313
15	66,609	66,288
16	87,111	70,988
17	89,121	91,796
18	-	118,211

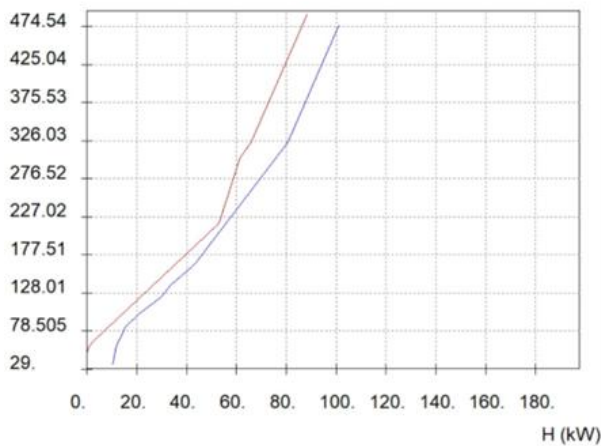
H kumulatif pada setiap interval aliran, kemudian diplot-kan dengan temperatur pada setiap interval aliran untuk membentuk kurva komposit. Berdasarkan persoalan di atas, dapat dilihat kurva komposit pada masing-masing ΔT_{\min} .

- $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$



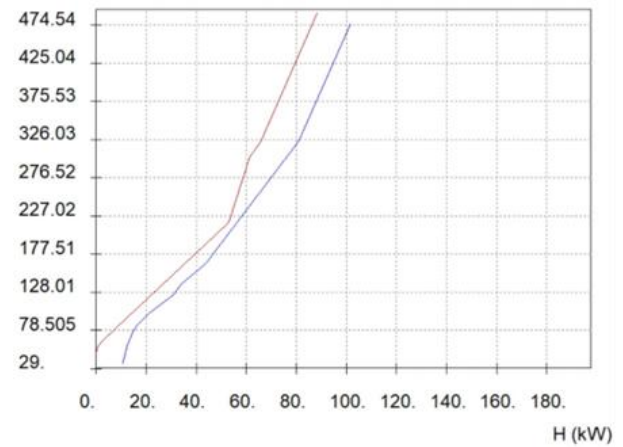
Gambar 5. Kurva komposit pada $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$

- $\Delta T_{\min} = 12^{\circ}\text{C}$



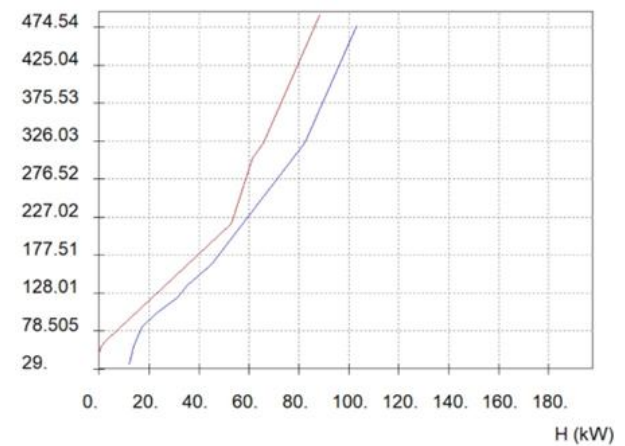
Gambar 6. Kurva komposit pada $\Delta T_{\min} = 12^{\circ}\text{C}$

- $\Delta T_{\min} = 14^{\circ}\text{C}$



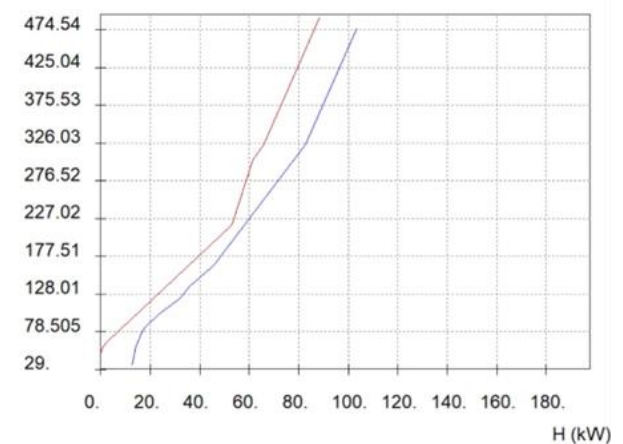
Gambar 7. Kurva komposit pada $\Delta T_{\min} = 14^{\circ}\text{C}$

- $\Delta T_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$



Gambar 8. Kurva komposit pada $\Delta T_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$

- $\Delta T_{\min} = 22^{\circ}\text{C}$



Gambar 9. Kurva komposit pada $\Delta T_{\min} = 22^{\circ}\text{C}$

KESIMPULAN

Teknologi *pinch* merupakan metode berbasis termodinamika yang bertujuan untuk meminimalkan konsumsi energi dalam desain jaringan penukar panas (*Heat Exchanger Network/HEN*) melalui pendekatan sistematis dan analitis. Teknologi ini bekerja dengan menggunakan prinsip Hukum Pertama dan Kedua Termodinamika, memanfaatkan panas yang tersedia dalam suatu sistem proses untuk meningkatkan efisiensi termal dan mengurangi kebutuhan utilitas eksternal. Salah satu alat utama dalam analisis *pinch* adalah *composite curve*, yaitu kurva yang menggambarkan hubungan antara suhu dan entalpi (panas) untuk aliran fluida panas (*hot stream*) dan fluida dingin (*cold stream*). Kurva ini menyajikan informasi visual tentang distribusi energi dalam proses, serta menunjukkan titik minimum perbedaan suhu atau *pinch point*, yang menjadi referensi penting untuk mendesain jaringan penukar panas secara optimal.

Dalam studi kasus yang diberikan, digunakan 11 aliran proses (4 *hot stream* dan 7 *cold stream*) untuk membentuk kurva komposit dengan berbagai nilai ΔT_{min} , yaitu 10°C, 12°C, 14°C, 20°C dan 22°C. Perhitungan dilakukan dengan menghitung kapasitas panas (*CP*), perubahan entalpi (ΔH), dan entalpi kumulatif untuk setiap interval suhu. Data ini digunakan untuk membentuk grafik *composite curve* yang menggambarkan kebutuhan dan ketersediaan panas dalam sistem, serta untuk menentukan target efisiensi energi yang dapat dicapai.

Dari grafik-grafik tersebut, terlihat bahwa semakin besar nilai ΔT_{min} , maka semakin besar pula kebutuhan energi eksternal karena area pemulihan panas menjadi semakin kecil. Sebaliknya, semakin kecil ΔT_{min} , efisiensi pemanfaatan panas meningkat, tetapi kompleksitas dan biaya modal untuk unit penukar panas juga meningkat. Oleh karena itu, pemilihan nilai ΔT_{min} yang tepat menjadi sangat penting untuk menyeimbangkan antara efisiensi energi dan biaya kapital. Secara keseluruhan, teknologi *pinch* dengan bantuan kurva komposit terbukti sangat efektif dalam merancang sistem pemulihan panas yang hemat energi. Hal ini memberikan dampak positif tidak hanya pada aspek teknis dan ekonomis, tetapi juga pada aspek lingkungan karena dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca.

DAFTAR PUSTAKA

- Daniyanto, D., & Faturrahman, R. (2013). Aplikasi analisis pinch untuk menurunkan konsumsi steam di bagian process house pabrik gula. *Jurnal Rekayasa Proses*, 7(1), 6-13.
- Febriana, A. A., & Widodo, B. U. K. (2019). Optimasi Jaringan Heat Exchanger Dengan Metode Pinch Technology Menggunakan Perangkat Lunak Aspen Energy Analyzer V. 10 Pada Train F PT

- Badak NGL Bontang. *Jurnal Teknik ITS*, 8(1), B6-B12.
- Fu, D., Li, Q., Li, Y., Lai, Y., Lu, L., Dong, Z., & Lyu, M. (2023). Pinch-based general targeting method for predicting the optimal capital cost of heat exchanger network. *Processes*, 11(3), 923.
- Hohmann, E. C. (1971). *Optimum networks for heat exchangers*, PhD. Thesis, University of S. California, USA.
- Kemp, I. C. (2011). *Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*. Elsevier.
- Linnhoff, B. and Hindmarsh, E. (1983). The pinch design method of heat exchanger networks, *Chem Eng Sci*, 38(5): 745–763.
- Linnhoff, B., Mason, D. R. and Wardle, I. (1979), Understanding heat exchanger networks, *Comp Chem Eng*, 3: 295–302.
- Sharew, S. S., Di Pretoro, A., Yimam, A., Negny, S., & Montastruc, L. (2024). Combining exergy and pinch analysis for the operating mode optimization of a steam turbine cogeneration plant in Wonji-Shoa, Ethiopia. *Entropy*, 26(6), 453.
- Zhao, H., Zhou, Y., & Sun, M. (2022). Pinch analysis for heat integration of pulverized coke chemical looping gasification. *Processes*, 10(2), 357.