



Analisis Pengaruh Perbandingan ΔT terhadap Optimasi Energi dengan Metode *Problem Table*

Widayat^{1,2*}, Ahmad Nur Ihsan², Edward Emmanuel Santosa², M. Syafiq Hazim², Natalia Lydia Efrata Simbolon², Safira Rizkya Puteri²

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: October 11, 2025; Accepted: December 14, 2025)

Abstract

Analysis of the Effect of ΔT Comparison on Energy Optimization Using the Problem Table Method. Problem Table Analysis is a quantitative method in pinch technology to calculate the minimum heat (hot utility) and cooling (cold utility) requirements in industrial thermal systems. By compiling temperature and enthalpy data in tabular form, this method divides the fluid into temperature intervals based on ΔT_{min} , then calculates the energy surplus or deficit in each interval through an enthalpy balance. The results are visualized as a heat cascade to determine the pinch point and the internal heat utilization limit. Analysis at ΔT_{min} 10–28°C shows that the greater the ΔT_{min} , the greater the hot utility requirement, while the cold utility fluctuates due to variations in heat distribution, stream characteristics and flow configuration. The correct selection of ΔT_{min} is important to balance internal energy efficiency with external energy consumption, in order to achieve an optimal, efficient and economical heat exchanger network design.

Keywords: *problem table, optimization, temperature*

Abstrak

Problem table analysis adalah metode kuantitatif dalam teknologi pinch untuk menghitung kebutuhan minimum panas (hot utility) dan pendinginan (cold utility) pada sistem termal industri. Dengan menyusun data suhu dan entalpi dalam bentuk tabel, metode ini membagi fluida ke dalam interval suhu berdasarkan ΔT_{min} , lalu menghitung surplus atau defisit energi di setiap interval melalui neraca entalpi. Hasil divisualisasikan sebagai heat cascade untuk menentukan titik pinch dan batas pemanfaatan panas internal. Analisis pada ΔT_{min} 10–28°C menunjukkan bahwa semakin besar ΔT_{min} , semakin besar kebutuhan hot utility, sementara cold utility mengalami fluktuasi akibat variasi distribusi panas, karakteristik stream dan konfigurasi aliran. Pemilihan ΔT_{min} yang tepat penting untuk menyeimbangkan efisiensi energi internal dengan konsumsi energi eksternal, guna mencapai desain jaringan penukar panas yang optimal, efisien dan ekonomis.

Kata kunci: *problem table, optimasi, suhu*

How to Cite This Article: Widayat, W., Ihsan, A. N., Santosa, E. E. S., Hazim, M. S., Simbolon, N. L. E., & Puteri, S. R. (2025). Analisis Pengaruh Perbandingan ΔT terhadap Optimasi Energi dengan Metode Problem Table. *JPII*, 3(4), 267-278. DOI: <https://doi.org/10.14710/potensi.%25Y.28250>

PENDAHULUAN

Problem table analysis merupakan pendekatan kuantitatif dalam teknologi *pinch* yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi pemanfaatan energi panas dalam suatu sistem proses termal (Kemp, 2007). Berbeda dari metode *composite curve* yang bersifat visual, pendekatan ini memanfaatkan penyusunan data suhu dan entalpi dalam bentuk tabel untuk menghitung secara sistematis kebutuhan panas (*hot utility*), kebutuhan pendinginan (*cold utility*), serta menentukan titik *pinch* dalam jaringan pertukaran panas. Dalam analisis ini, fluida panas dan fluida dingin diklasifikasikan berdasarkan suhu *inlet* dan *outlet*-nya, lalu dibagi ke dalam beberapa interval suhu sesuai dengan ΔT_{min} yang ditetapkan. Melalui perhitungan neraca panas pada setiap interval, diperoleh informasi tentang surplus dan defisit *energy*, yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk *heat cascade* (Mosadeghkhah & Beheshti, 2020). Titik *pinch* diidentifikasi pada saat total entalpi mendekati nol, yang menandakan batas optimal antara pemanfaatan panas internal dan kebutuhan energi eksternal. Dengan demikian, *problem table* menjadi alat penting dalam menentukan strategi integrasi energi dan pengurangan konsumsi utilitas dalam suatu proses industri (Klemes et al., 2018).

Pemanfaatan energi termal sisa dapat ditingkatkan melalui aplikasi teknologi *pinch* yang memiliki peranan sentral dalam proses industri, baik sebagai sumber pemanas maupun pendingin, sehingga efisiensinya sangat menentukan keberlanjutan operasional dan ekonomi proses tersebut (Schlosser et al., 2019). *Problem table analysis*, pemahaman terhadap ΔT_{min} atau perbedaan suhu minimum sangatlah penting, karena nilai ini menentukan seberapa dekat fluida panas dan dingin dapat saling bertukar panas secara efisien tanpa kehilangan kelayakan teknis. Semakin kecil ΔT_{min} yang digunakan, semakin besar potensi pemanfaatan panas internal, namun konsekuensinya adalah meningkatnya kebutuhan area penukar panas dan biaya peralatan (Kemp, 2007). Sebaliknya, ΔT_{min} yang lebih besar menurunkan potensi pemanfaatan energi internal dan meningkatkan kebutuhan utilitas eksternal. Di sinilah konsep *pinch point* menjadi krusial, yaitu sebagai titik kritis yang menandai batas maksimal pemulihan energi dalam sistem. Dengan mengidentifikasi titik ini secara akurat melalui perhitungan dalam *problem table*, perancang proses dapat merancang jaringan penukar panas yang optimal, meminimalkan kehilangan energi dan mereduksi biaya operasional secara signifikan.

Problem table tidak hanya digunakan untuk menentukan kebutuhan *hot utility* dan *cold utility* pada suatu kondisi ΔT_{min} tertentu, tetapi juga dapat digunakan untuk melakukan perbandingan antar berbagai nilai ΔT_{min} guna mengevaluasi dampaknya terhadap efisiensi pemanfaatan energi (Ibaaz et al., 2023). Setiap nilai ΔT_{min} menghasilkan pembagian interval suhu yang

berbeda, sehingga memengaruhi pola distribusi panas dan posisi titik *pinch*. Dengan melakukan pengoperasian *problem table* pada berbagai ΔT_{min} yaitu 10°C, 16°C, 18°C, 24°C dan 28°C, dapat dianalisis bagaimana kenaikan ΔT_{min} akan berdampak pada peningkatan kebutuhan *utility* eksternal akibat berkurangnya potensi pertukaran panas internal. Langkah-langkah utama dalam pengoperasian meliputi penghitungan besarnya panas masuk dan keluar pada setiap interval suhu, penentuan akumulasi entalpi secara bertahap melalui *heat cascade*, hingga identifikasi surplus atau *defisit* energi pada sistem (Febriana et al., 2019). Hasil dari pengoperasian ini memungkinkan perbandingan kuantitatif atas efisiensi energi pada berbagai konfigurasi sistem termal, sehingga dapat diambil keputusan desain yang optimal berdasarkan pertimbangan teknis maupun ekonomis.

Problem table memberikan keunggulan dalam bentuk pendekatan kuantitatif dan sistematis jika dibandingkan dengan metode lain seperti *composite curve* dan *grand composite curve* yang bersifat grafis (Gadalla, 2015). Keakuratan dalam menyajikan data numerik pada tiap interval suhu memudahkan identifikasi kebutuhan *hot utility*, *cold utility* dan titik *pinch* secara tepat. Pendekatan ini tidak bergantung pada interpretasi visual sehingga lebih mudah dianalisis secara presisi, terutama dalam mengamati surplus dan defisit panas pada tiap level temperatur. Kelemahan dari *problem table* terletak pada keterbatasannya dalam menggambarkan profil pertukaran panas secara menyeluruh, serta tuntutan ketelitian tinggi dalam perhitungan manual (Florides & Kalogirou, 2007). *Problem table* tetap menjadi alat yang efektif dan relevan dalam mendukung evaluasi efisiensi energi, khususnya untuk keperluan desain dan optimasi sistem termal berskala industri. Pemanfaatan metode ini menjadi fondasi yang kuat untuk analisis mendalam dan pengambilan keputusan teknis yang lebih efisien.

METODE PENELITIAN

Analisis dengan Pembuatan *problem table* tersusun atas tiga langkah. Langkah pertama membuat *table shifted temperature* yaitu mengelompokkan data ke dalam dua bagian, yakni dengan membagi rentang suhu proses ke dalam beberapa interval berdasarkan suhu aliran panas dan dingin yang telah digeser sebesar $\frac{1}{2}\Delta T_{min}$. Pada setiap interval, neraca entalpi dihitung dari selisih kapasitas panas kumulatif antara aliran panas dan dingin sehingga diperoleh kondisi surplus atau *defisit* panas. Dari hasil ini, didapatkan titik *pinch* dan kebutuhan minimum untuk *utility* dapat ditentukan secara sistematis (Febriana et al., 2019). Neraca entalpi untuk setiap interval dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta H_i = (S_i - S_{i+1})(\sum CP_H - \sum CP_C)_i \quad (1)$$

Kemudian dari selisih kapasitas panas kumulatif yang didapat dibuat tabel yang menunjukkan data untuk sejumlah aliran suhu yang telah digeser. Representasi

skematik aliran pada skala suhu vertikal dengan batas-batas interval berdasarkan *shifted temperatures* terbentuk sebagai data untuk langkah kedua. Langkah kedua daerah membagi daerah *stream* dan *temperature intervals* sesuai suhu fluida proses dan disusun berurutan sesuai suhu interval. Untuk setiap interval *i*, hasil perhitungan disajikan dalam tabel dan kolom terakhir menunjukkan suatu interval berada dalam kondisi surplus panas atau defisit panas (Atuonwu, 2025). Dengan data ini, dimungkinkan untuk merancang jaringan pertukaran panas yang layak berdasarkan asumsi bahwa seluruh surplus panas dapat dimanfaatkan. Tujuan mencari *range target* adalah untuk meminimalkan *capital* dan *operating cost*. *Shifted temperatures* yang terbentuk akan digunakan untuk menghitung seberapa besar *enthalpy balances* (ΔH_i). Range terbaik pada *range* ΔT_{min} optimum tersebut dicari dari *enthalpy balances* yang paling rendah (Rashed et al., 2024).

Langkah ketiga adalah membuat *heat cascade* untuk mencari suhu *pinch* dan *heating cooling duty*. Tampilan *heat cascade* adalah dimanfaatkan sebagai dasar perhitungan *heating* dan *cooling duty* dari target minimum (Febriana et al., 2019). Surplus panas dari setiap interval tidak langsung dibuang ke utilitas dingin, melainkan dikaskadekan ke interval di bawahnya yang memiliki kebutuhan panas, sehingga menghasilkan total panas untuk dikaskadekan ke interval berikutnya. Pendekatan ini membentuk *heat cascade* yang memungkinkan optimasi penggunaan panas antar interval secara sistematis.

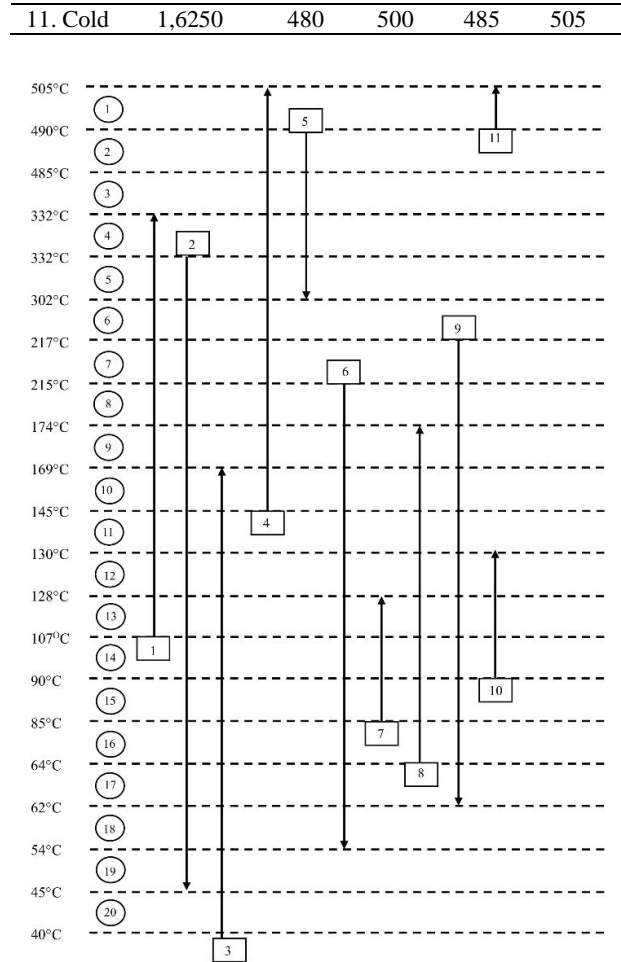
HASIL DAN PEMBAHASAN

Problem Table dengan ΔT_{min} 10°C

Berdasarkan analisis kebutuhan energi pada sistem dengan sebelas aliran menggunakan metode *problem table pinch analysis* dengan ΔT_{min} sebesar 10°C, diperoleh hubungan antara aliran, interval suhu dan distribusi entalpi yang digunakan untuk menentukan kebutuhan energi eksternal berupa *hot utility* dan *cold utility*. Hubungan tersebut ditunjukkan melalui Tabel 1, Gambar 1, Tabel 2, serta Gambar 2.

Tabel 1. Data *stream* untuk ΔT_{min} 10°C

Stream and number type	CP (MW/°C)	Actual Temperatures		Shifted temperatures	
		T _S (°C)	T _T (°C)	S _S (°C)	S _T (°C)
1. Cold	0,0987	102	327	107	332
2. Hot	0,0978	327	50	322	45
3. Cold	0,0698	35	164	40	169
4. Cold	0,1356	140	500	145	505
5. Hot	0,1340	495	307	490	302
6. Hot	0,1627	220	59	215	54
7. Cold	0,0767	80	123	85	128
8. Cold	0,0618	59	169	64	174
9. Hot	0,0684	222	67	217	62
10. Cold	0,1025	85	125	90	130

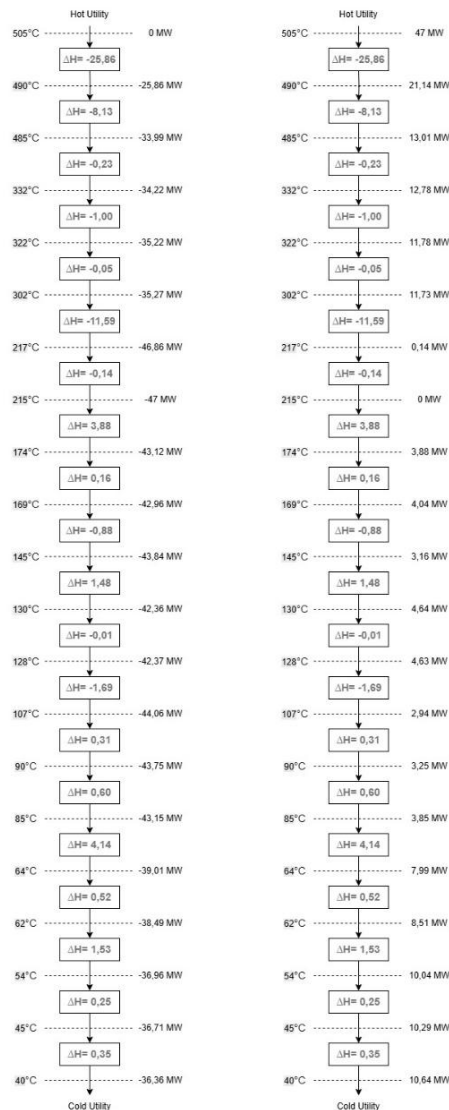


Gambar 1. Streams dan temperature intervals ΔT_{min} 10°C

Tabel 2. Temperature intervals dan heat loads untuk ΔT_{min} 10°C

Interval Number	(S _i - S _{i+1}) (°C)	$\sum CP_H - \sum CP_C$ (MW/°C)	ΔH_i (MW)	Surplus or Deficit
1	15	-1,761	26,40833	Deficit
2	5	-1,627	8,132565	Deficit
3	163	-0,002	0,246619	Deficit
4	20	-0,002	0,046915	Deficit
5	85	-0,068	5,780101	Deficit
6	2	0,095	0,189463	Surplus
7	41	0,095	3,884001	Surplus
8	5	-0,037	0,184269	Deficit
9	24	-0,037	0,884493	Deficit
10	15	0,099	1,480525	Surplus

11			-	
	2	-0,004	0,007597	Deficit
12			-	
	21	-0,081	1,691393	Deficit
13	17	0,018	0,30811	Surplus
14	5	0,121	0,603121	Surplus
15	21	0,197	4,144735	Surplus
16	2	0,191	0,381599	Surplus
17	8	0,191	1,526395	Surplus
18	9	0,028	0,252598	Surplus
19			-	
	5	-0,070	0,348837	Deficit



Gambar 2. Heat cascade $\Delta T_{\min} 10^{\circ}\text{C}$

Hasil dari *problem table* pada analisis *pinch* menunjukkan distribusi kebutuhan panas (*hot utility*) dan pendinginan (*cold utility*) yang penting untuk mengevaluasi efisiensi energi dalam sistem proses. Berdasarkan data, kebutuhan *hot utility* terbesar tercatat sebesar 40,6145 MW pada suhu 505°C, yang

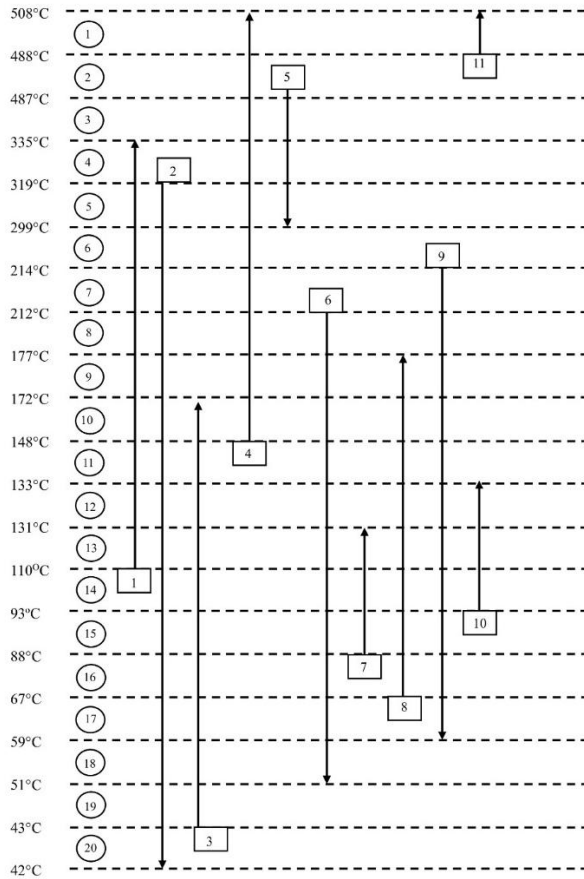
menunjukkan bahwa sistem memerlukan suplai energi eksternal dalam jumlah besar untuk mengatasi defisit panas pada *interval* suhu tersebut. Di sisi lain, kebutuhan *cold utility* tertinggi sebesar 9,6539 MW terjadi pada suhu 40°C, yang menunjukkan adanya kelebihan panas pada suhu rendah yang tidak dapat dimanfaatkan secara internal. Perbedaan signifikan antara kebutuhan *hot* dan *cold utility* pada berbagai rentang suhu menunjukkan adanya peluang besar untuk optimasi jaringan penukar panas (*Heat Exchanger Network*) agar memaksimalkan pemulihan panas internal dan meminimalkan ketergantungan pada utilitas eksternal.

Problem Table dengan $\Delta T_{\min} 16^{\circ}\text{C}$

Pada ΔT_{\min} sebesar 16°C, dilakukan analisis energi menggunakan pendekatan *pinch problem table analysis* untuk mengevaluasi aliran panas dalam sistem yang terdiri dari sebelas aliran. Melalui analisis ini, diperoleh data mengenai distribusi entalpi di berbagai *interval* suhu serta kebutuhan energi dari *hot utility* dan *cold utility*. Informasi tersebut ditampilkan dalam Tabel 3, Gambar 3, Tabel 4 dan Gambar 4 yang merepresentasikan profil aliran, pembagian interval suhu, serta perhitungan beban panas menggunakan metode *heat cascade*.

Tabel 3. Data stream untuk $\Delta T_{\min} 16^{\circ}\text{C}$

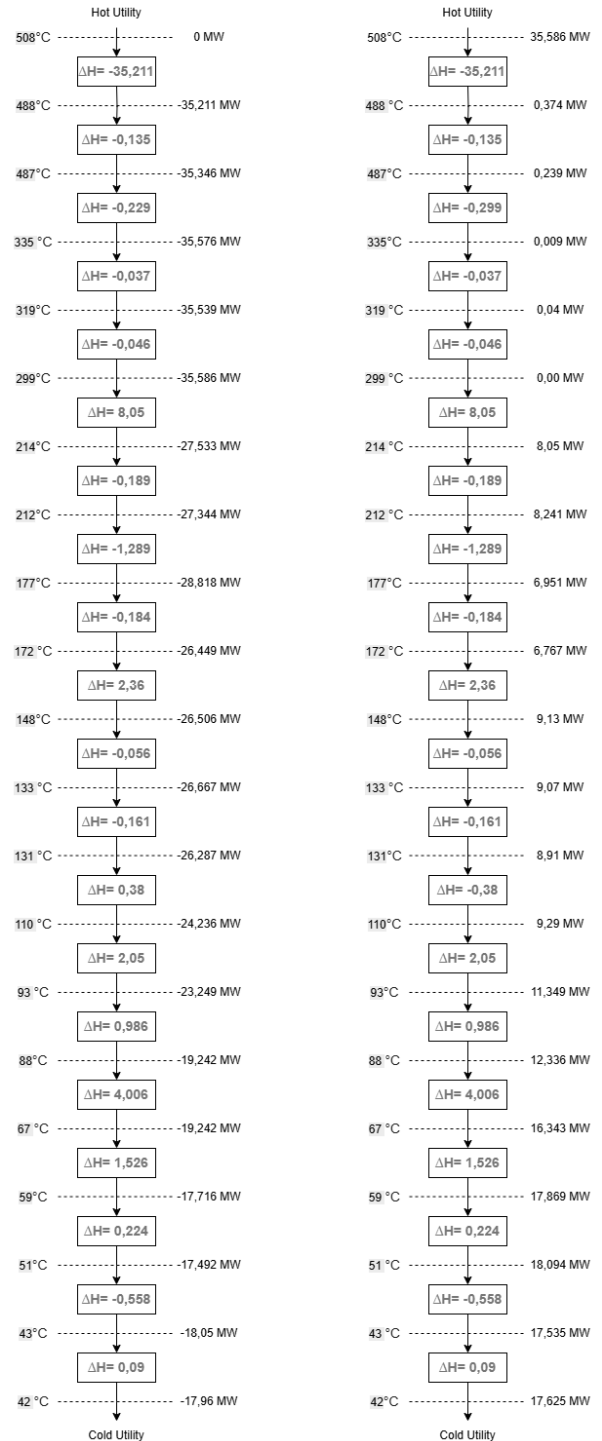
Stream and number type	CP (MW/°C)	Actual Temperatures		Shifted temperatures	
		T _S (°C)	T _T (°C)	S _S (°C)	S _T (°C)
1. Cold	0,0987	102	327	110	335
2. Hot	0,0978	327	50	319	42
3. Cold	0,0698	35	164	43	172
4. Cold	0,1356	140	500	148	508
5. Hot	0,1340	495	307	487	299
6. Hot	0,1627	220	59	212	51
7. Cold	0,0767	80	123	88	131
8. Cold	0,0618	59	169	67	177
9. Hot	0,0684	222	67	214	59
10. Cold	0,1025	85	125	93	133
11. Cold	1,6250	480	500	488	508



Gambar 3. Streams dan temperature intervals ΔT_{\min} 16°C

Tabel 4. Temperature intervals dan heat loads untuk ΔT_{\min} 16°C

Interval Number	$(S_i - S_{i+1})$ (°C)	$\sum CP_H - \sum CP_C$ (MW/°C)	ΔH_i (MW)	Surplus or Deficit
1	20	-1,761	35,21111	Deficit
2	1	-0,136	-0,13556	Deficit
3	152	-0,002	-0,22998	Deficit
4	16	-0,100	-1,60287	Deficit
5	20	-0,002	-0,04691	Deficit
6	85	-0,071	-6,00101	Deficit
7	2	-0,068	-0,13600	Deficit
8	35	0,095	3,31561	Surplus
9	5	0,033	0,16457	Surplus
10	24	-0,037	-0,88449	Deficit
11	15	0,099	1,48052	Surplus
12	2	-0,004	-0,00760	Deficit
13	21	-0,081	-1,69139	Deficit
14	17	0,121	2,05061	Surplus
15	5	0,121	0,60312	Surplus
16	21	0,197	4,14473	Surplus
17	8	0,259	2,07349	Surplus
18	8	0,191	1,52640	Surplus
19	8	0,028	0,22453	Surplus
20	1	0,098	0,09783	Surplus



Gambar 4. Heat cascade ΔT_{\min} 16°C

Analisis menggunakan *problem table* dalam pendekatan *pinch* menunjukkan pola kebutuhan energi panas (*hot utility*) dan energi pendingin (*cold utility*) pada berbagai interval suhu yang menjadi dasar evaluasi efisiensi termal sistem secara menyeluruh. Dari hasil perhitungan, ditemukan bahwa kebutuhan tertinggi

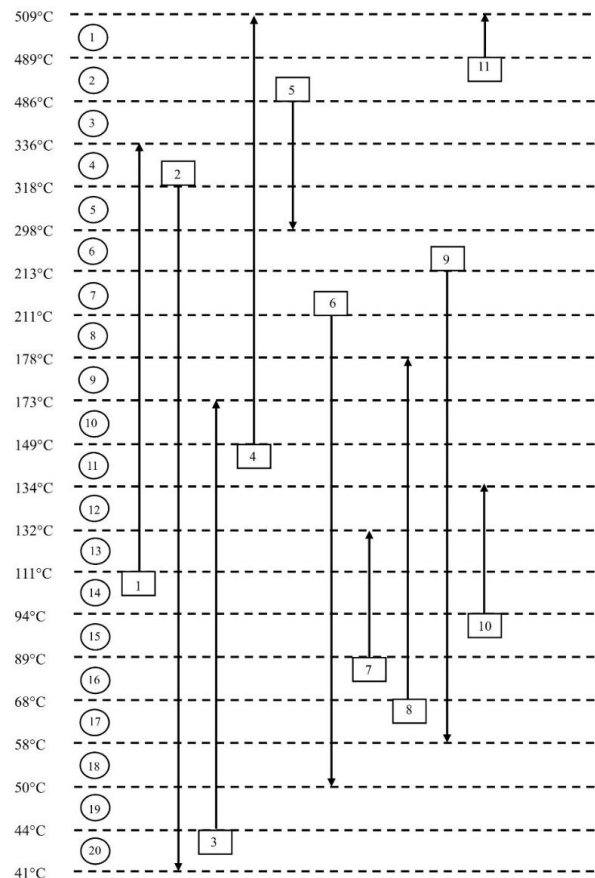
terhadap *hot utility* terjadi pada suhu 508°C dengan nilai mencapai 43,3634 MW. Kondisi ini mengindikasikan adanya kekurangan energi panas yang cukup besar pada temperatur tinggi, sehingga sistem harus mengandalkan pasokan energi eksternal dalam jumlah signifikan untuk memenuhi defisit tersebut. Di sisi lain, kebutuhan terbesar terhadap *cold utility* tercatat sebesar 13,0979 MW pada suhu 42°C. Nilai ini mencerminkan surplus panas di rentang suhu rendah yang tidak dapat diserap oleh aliran lain secara internal, sehingga harus dibuang melalui pendinginan eksternal. Ketidakeimbangan antara *hot utility* dan *cold utility* ini membuka peluang besar untuk merancang *Heat Exchanger Network (HEN)* yang lebih efisien, dengan fokus pada peningkatan pemanfaatan panas internal dan pengurangan ketergantungan terhadap sumber energi luar.

Problem Table dengan $\Delta T_{min} 18^\circ C$

Evaluasi kebutuhan energi pada sistem sebelas aliran dengan ΔT_{min} sebesar 18°C dilakukan menggunakan metode *pinch analysis* untuk mengidentifikasi pola pertukaran panas internal dan kebutuhan energi tambahan dari luar sistem. Hasil perhitungan entalpi untuk setiap interval suhu disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, yakni Tabel 5, Gambar 5, Tabel 6 dan Gambar 6, yang memuat informasi mengenai karakteristik aliran, interval suhu, serta distribusi beban panas secara menyeluruh.

Tabel 5. Data stream untuk $\Delta T_{min} 18^\circ C$

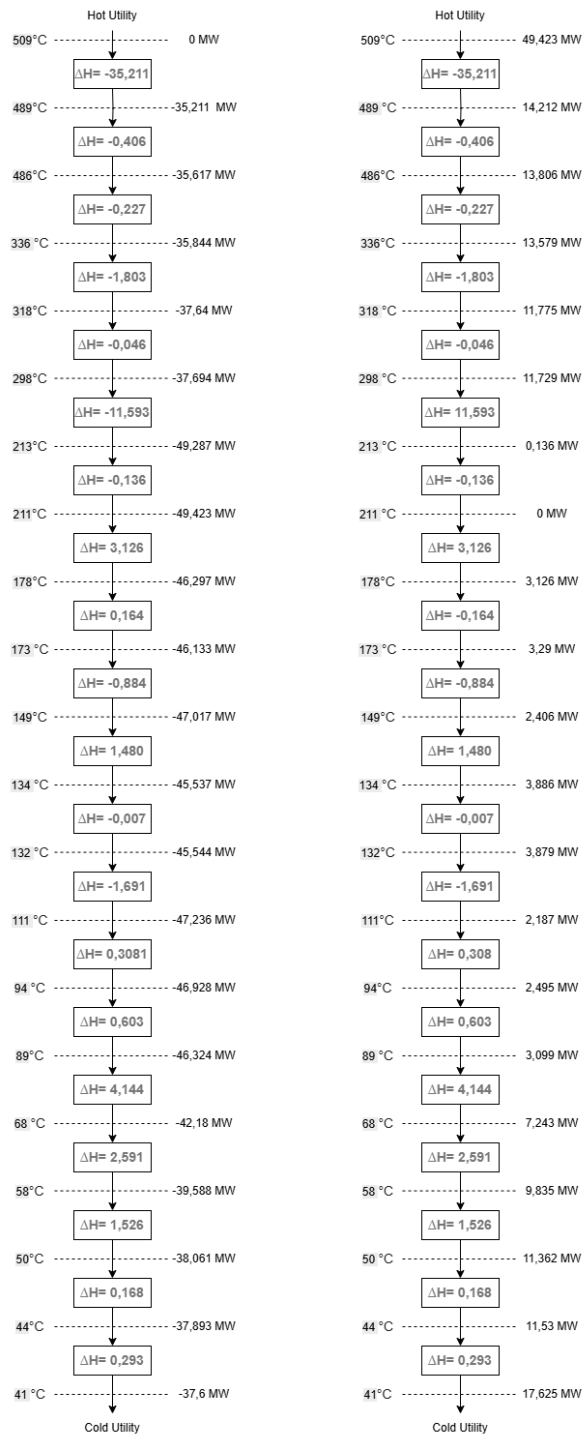
Stream and number type	CP (MW/°C)	Actual Temperatures		Shifted temperatures	
		T _S (°C)	T _T (°C)	S _S (°C)	S _T (°C)
1. Cold	0,0987	102	327	111	336
2. Hot	0,0978	327	50	318	41
3. Cold	0,0698	35	164	44	173
4. Cold	0,1356	140	500	149	509
5. Hot	0,1340	495	307	486	298
6. Hot	0,1627	220	59	211	50
7. Cold	0,0767	80	123	89	132
8. Cold	0,0618	59	169	68	178
9. Hot	0,0684	222	67	213	58
10. Cold	0,1025	85	125	94	134
11. Cold	1,6250	480	500	489	509



Gambar 5. Streams dan temperature intervals $\Delta T_{min} 18^\circ C$

Tabel 6. Temperature intervals dan heat loads untuk $\Delta T_{min} 18^\circ C$

Interval Number	(S _i - S _{i+1}) (°C)	$\sum CP_H - \sum CP_C$ (MW/°C)	ΔH_i (MW)	Surplus or Deficit
1	20	-1,760555556	-35,21111111	Deficit
2	3	-0,135555556	-0,406666667	Deficit
3	150	-0,001513002	-0,22695035	Deficit
4	18	-0,100179669	-1,80323404	Deficit
5	20	-0,002345734	-0,04691468	Deficit
6	85	-0,136388287	-11,5930044	Deficit
7	2	-0,06800119	-0,13600238	Deficit
8	33	0,094731729	3,126147051	Surplus
9	5	0,032913547	0,164567735	Surplus
10	24	-0,036853895	-0,88449348	Deficit
11	15	0,098701661	1,480524911	Surplus
12	2	-0,003798339	-0,00759668	Deficit
13	21	-0,080542525	-1,69139303	Deficit
14	17	0,018124141	0,308110402	Surplus
15	5	0,120624141	0,603120707	Surplus
16	21	0,197368327	4,144734875	Surplus
17	10	0,259186509	2,591865092	Surplus
18	8	0,190799412	1,526395299	Surplus
19	6	0,028066493	0,168398959	Surplus
20	3	0,097833935	0,293501805	Surplus



Gambar 6. Heat cascade $\Delta T_{min} 18^\circ C$

Hasil pemetaan energi melalui *problem table* pada $\Delta T_{min} 18^\circ C$ menggambarkan bahwa sistem mengalami kebutuhan energi tambahan yang signifikan baik dalam bentuk pemanasan maupun pendinginan. Nilai tertinggi dari *hot utility* ditemukan pada suhu $509^\circ C$, yakni sebesar 49,4239 MW. Ini menandakan bahwa sistem membutuhkan energi panas dalam jumlah besar pada titik

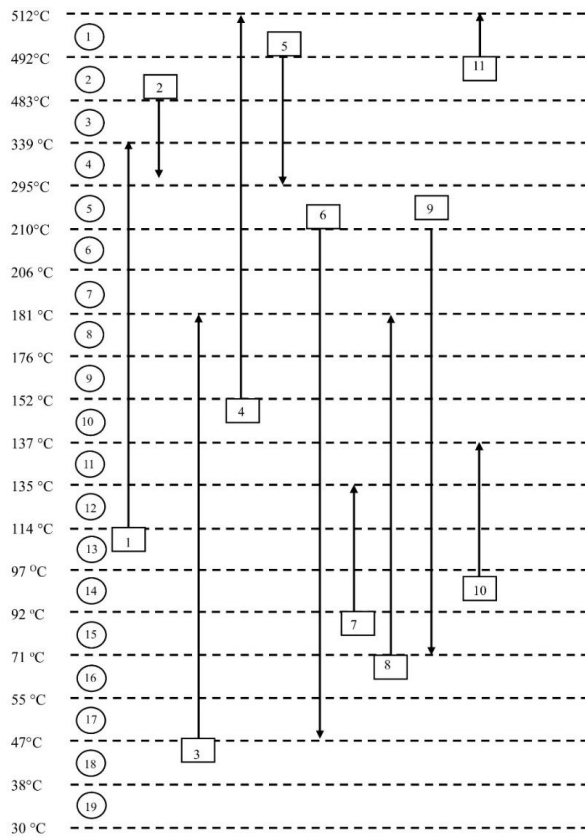
tersebut untuk menjaga kontinuitas proses yang berlangsung pada suhu tinggi. Sementara itu, kebutuhan maksimum *cold utility* tercatat sebesar 11,8239 MW pada suhu $41^\circ C$, menunjukkan akumulasi panas berlebih di temperatur rendah yang tidak dapat direutilisasi secara efisien oleh aliran *cold stream* lainnya. Perbedaan magnitudo antara kedua kebutuhan ini menunjukkan adanya ruang optimalisasi yang besar dalam desain jaringan penukar panas. Dengan merancang sistem pertukaran panas yang lebih strategis, energi yang selama ini dibuang atau tidak termanfaatkan bisa dialihkan untuk mengurangi beban utilitas eksternal dan meningkatkan efisiensi termal keseluruhan.

Problem Table dengan $\Delta T_{min} 24^\circ C$

Dengan menggunakan ΔT_{min} sebesar $24^\circ C$, dilakukan pendekatan *pinch analysis* guna memetakan aliran panas dan kebutuhan energi eksternal pada sistem yang melibatkan sebelas aliran. Data perhitungan entalpi pada setiap interval suhu digunakan untuk menyusun representasi visual dan numerik dalam bentuk Tabel 7, Gambar 7, Tabel 8, serta Gambar 8, yang mencerminkan distribusi beban panas dan hasil *heat cascade* sebagai dasar identifikasi *hot* dan *cold utility*.

Tabel 7. Data stream untuk $\Delta T_{min} 24^\circ C$

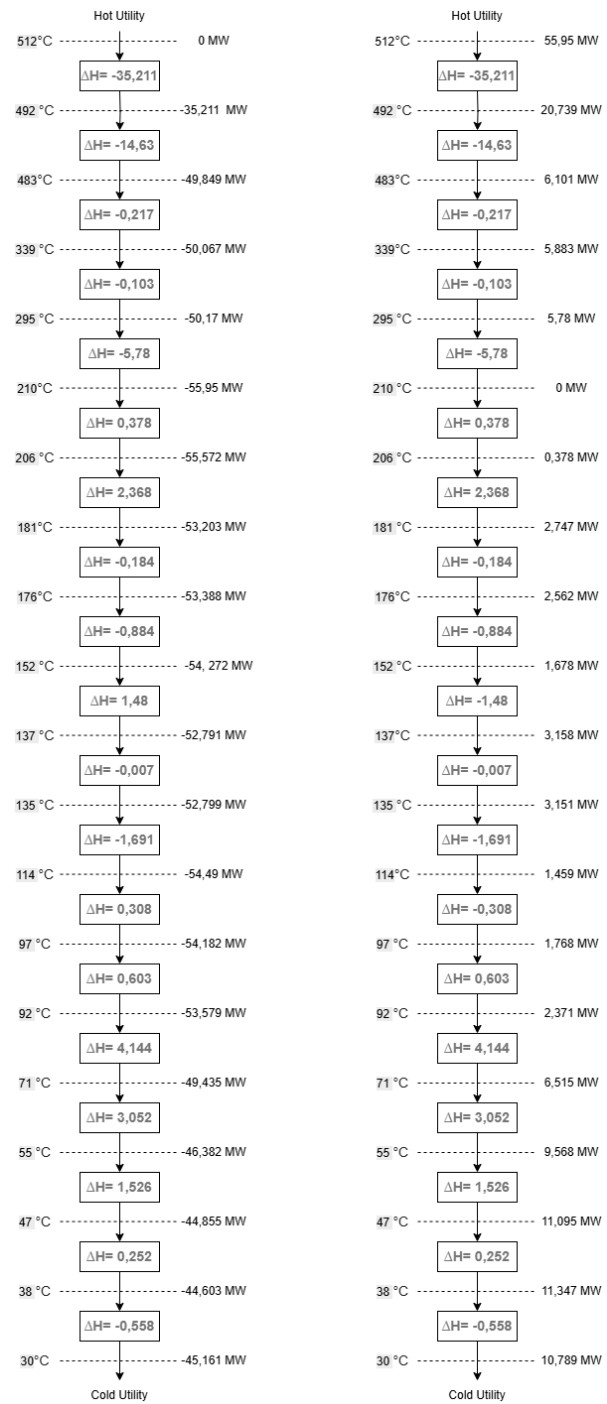
Stream and number type	CP (MW/°C)	Actual Temperatures		Shifted temperatures	
		T_s (°C)	T_T (°C)	S_s (°C)	S_T (°C)
1. Cold	0,0987	102	327	114	339
2. Hot	0,0978	327	50	315	38
3. Cold	0,0698	35	164	47	176
4. Cold	0,1356	140	500	152	512
5. Hot	0,1340	495	307	483	295
6. Hot	0,1627	220	59	208	47
7. Cold	0,0767	80	123	92	135
8. Cold	0,0618	59	169	71	181
9. Hot	0,0684	222	67	210	55
10. Cold	0,1025	85	125	97	137
11. Cold	1,6250	480	500	492	512



Gambar 7. Streams dan temperature intervals ΔT_{\min} 24°C

Tabel 8. Temperature intervals dan heat loads untuk ΔT_{\min} 24°C

Interval Number	$(S_i - S_{i+1})$ (°C)	$\sum CP_H - \sum CP_C$ (MW/°C)	ΔH_i (MW)	Surplus or Deficit
1	20	-1,76055556	-35,2111	Deficit
2	9	-1,626513002	-14,63862	Deficit
3	144	-0,001513002	-0,217872	Deficit
4	44	-0,002345734	-0,103212	Deficit
5	85	-0,06800119	-5,780101	Deficit
6	4	0,094731729	0,378927	Surplus
7	25	0,094731729	2,368293	Surplus
8	5	-0,036853895	-0,184269	Deficit
9	24	-0,036853895	-0,884493	Deficit
10	15	0,098701661	1,480525	Surplus
11	2	-0,003798339	-0,007597	Deficit
12	21	-0,080542525	-1,691393	Deficit
13	17	0,018124141	0,30811	Surplus
14	5	0,120624141	0,603121	Surplus
15	21	0,197368327	4,144735	Surplus
16	16	0,190799412	3,052791	Surplus
17	8	0,190799412	1,526395	Surplus
18	9	0,028066493	0,252598	Surplus
19	8	-0,069767442	-0,55814	Deficit



Gambar 8. Heat cascade ΔT_{\min} 24°C

Evaluasi distribusi kebutuhan energi panas dan pendinginan melalui pendekatan *pinch* dengan ΔT_{\min} sebesar 24°C menghasilkan gambaran beban energi eksternal yang semakin besar seiring meningkatnya batas minimum suhu pertukaran panas. Hasil *problem table* menunjukkan bahwa kebutuhan *hot utility* tertinggi mencapai 55,9509 MW pada suhu 512°C, yang menandakan keterbatasan aliran internal untuk

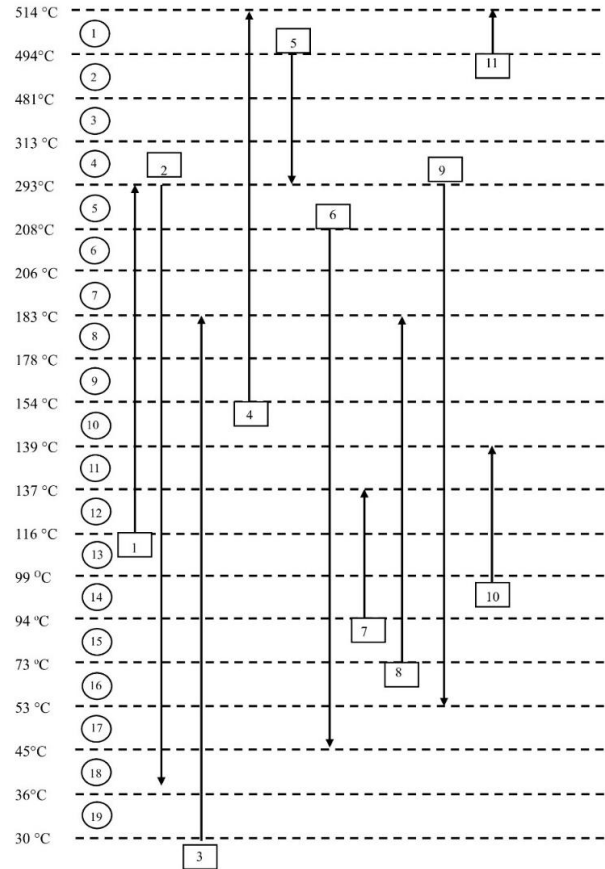
mencukupi permintaan energi pada temperatur tinggi. Di sisi lain, surplus panas pada suhu rendah tercermin dari kebutuhan *cold utility* sebesar 10,7896 MW yang tercatat pada suhu 30°C. Ketidakseimbangan energi pada dua kutub ini tidak hanya menunjukkan potensi kehilangan energi, tetapi juga menjadi sinyal penting untuk meninjau kembali efisiensi sistem yang ada. Dengan meningkatnya ΔT_{min} , peluang untuk pertukaran panas internal menjadi semakin terbatas, sehingga desain *Heat Exchanger Network* harus semakin cermat agar tetap dapat mengurangi beban utilitas eksternal tanpa mengorbankan efisiensi proses.

Problem Table dengan ΔT_{min} 28°C

Analisis energi dengan ΔT_{min} sebesar 28°C diterapkan pada sistem multi-aliran menggunakan metode *pinch analysis* untuk mengkaji keseimbangan panas internal dan eksternal. Distribusi entalpi serta kebutuhan energi eksternal yang tidak terpenuhi oleh pertukaran panas dalam sistem disajikan melalui Tabel 9, Gambar 9, Tabel 10 dan Gambar 10, yang menggambarkan hubungan aliran dengan interval suhu serta perhitungan *heat cascade*.

Tabel 9. Data stream untuk ΔT_{min} 28°C

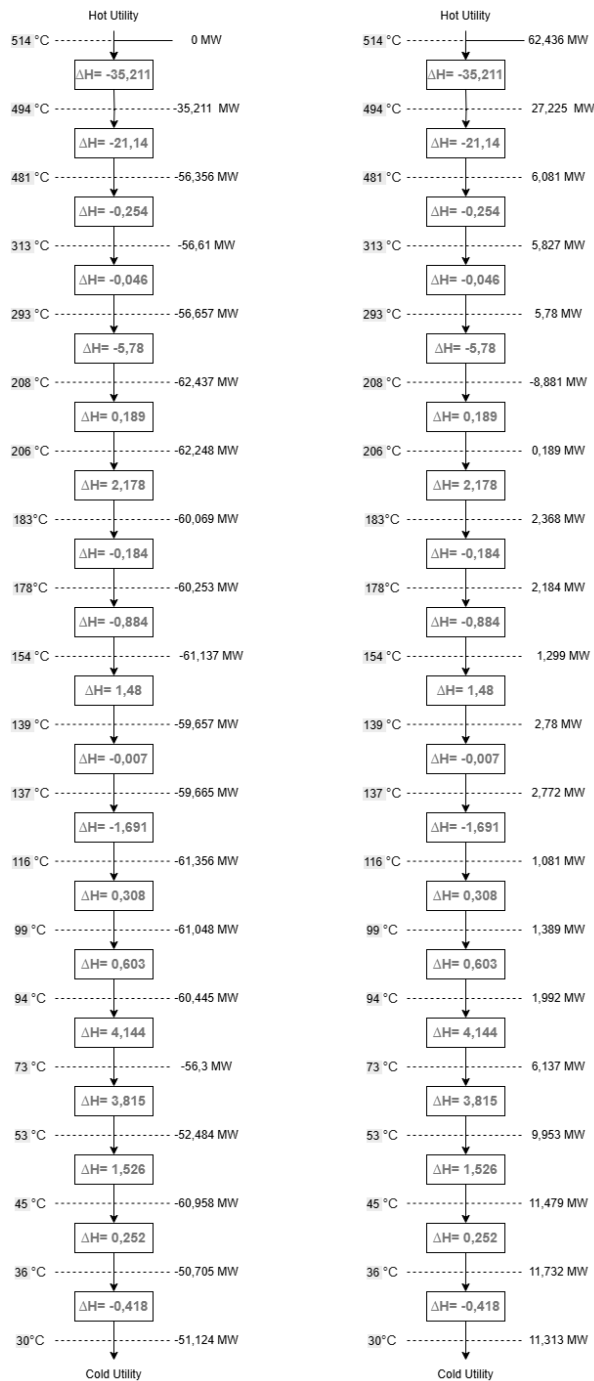
Stream and number type	CP (MW/°C)	Actual Temperatures		Shifted temperatures	
		T _S (°C)	T _T (°C)	S _S (°C)	S _T (°C)
1. Cold	0,0987	102	327	116	341
2. Hot	0,0978	327	50	313	36
3. Cold	0,0698	35	164	49	178
4. Cold	0,1356	140	500	154	514
5. Hot	0,1340	495	307	481	293
6. Hot	0,1627	220	59	206	45
7. Cold	0,0767	80	123	94	137
8. Cold	0,0618	59	169	73	183
9. Hot	0,0684	222	67	208	53
10. Cold	0,1025	85	125	99	139
11. Cold	1,6250	480	500	494	514



Gambar 9. Streams dan temperature intervals ΔT_{min} 28°C

Tabel 10. Temperature intervals dan heat loads untuk ΔT_{min} 28°C

Interval Number	(S _i - S _{i+1}) (°C)	$\sum CP_H - \sum CP_C$ (MW/°C)	ΔH_i (MW)	Surplus or Deficit
1	20	-1,760555556	-35,21111	Deficit
2	13	-1,626513002	-21,14467	Deficit
3	168	-0,001513002	-0,254184	Deficit
4	20	-0,002345734	-0,046915	Deficit
5	85	-0,06800119	-5,780101	Deficit
6	2	0,094731729	0,189463	Surplus
7	23	0,094731729	2,17883	Surplus
8	5	-0,036853895	-0,184269	Deficit
9	24	-0,036853895	-0,884493	Deficit
10	15	0,098701661	1,480525	Surplus
11	2	-0,003798339	-0,007597	Deficit
12	21	-0,080542525	-1,691393	Deficit
13	17	0,018124141	0,30811	Surplus
14	5	0,120624141	0,603121	Surplus
15	21	0,197368327	4,144735	Surplus
16	20	0,190799412	3,815988	Surplus
17	8	0,190799412	1,526395	Surplus
18	9	0,028066493	0,252598	Surplus
19	6	-0,069767442	-0,418605	Deficit



Gambar 10. Heat cascade $\Delta T_{min} 28^\circ C$

Pada ΔT_{min} sebesar $28^\circ C$, hasil analisis dari *problem table* menunjukkan peningkatan signifikan dalam kebutuhan energi eksternal akibat semakin sempitnya ruang untuk pertukaran panas internal. Ditemukan bahwa beban *hot utility* tertinggi mencapai 62,4369 MW pada suhu $514^\circ C$, yang menunjukkan bahwa semakin besar ΔT_{min} , semakin besar pula kebutuhan pemanasan dari sumber eksternal. Selain itu, sistem juga mencatat kebutuhan *cold utility* tertinggi

sebesar 11,3134 MW pada suhu $30^\circ C$, sebagai akibat dari panas berlebih yang tidak dapat dimanfaatkan dalam sistem. Fenomena ini memperkuat asumsi bahwa semakin besar nilai ΔT_{min} , semakin terbatas kemampuan sistem dalam mengoptimalkan aliran internal. Oleh karena itu, ketergantungan terhadap utilitas eksternal meningkat, berdampak pada konsumsi energi total dan beban biaya operasional. Implikasi ini menekankan pentingnya analisis mendalam dalam penentuan ΔT_{min} agar diperoleh kompromi terbaik antara efisiensi energi, biaya peralatan dan keberlanjutan operasi sistem termal.

Problem Table dengan $\Delta T_{min} 16^\circ C$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan terhadap sistem pertukaran panas dengan variasi nilai ΔT_{min} sebesar $10^\circ C$, $16^\circ C$, $18^\circ C$, $24^\circ C$ dan $28^\circ C$, diperoleh data mengenai hubungan antara kenaikan ΔT_{min} terhadap kebutuhan energi eksternal berupa *hot utility* dan *cold utility*. Data ini memberikan gambaran sejauh mana kenaikan ΔT_{min} memengaruhi efisiensi pemanfaatan panas internal dalam sistem, di mana semakin tinggi ΔT_{min} , maka semakin besar pula energi yang tidak dapat ditutup oleh pertukaran panas internal. Hasil analisis ini disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hubungan ΔT_{min} terhadap kebutuhan *hot utility* dan *cold utility*

No	ΔT_{min} (°C)	Hot Utility (MW)	Cold Utility (MW)	T_{Hot} (°C)	T_{Cold} (°C)
1.	10	40,6145	9,6539	505	40
2.	16	43,3634	13,0979	508	42
3.	18	49,4239	11,8239	509	41
4.	24	55,9509	10,7896	512	30
5.	28	62,4369	11,3134	514	30

Berdasarkan Tabel 11, diperoleh data hubungan antara variasi ΔT_{min} terhadap kebutuhan energi berupa *hot utility* dan *cold utility*, serta suhu terjadinya kebutuhan energi tersebut. Pada ΔT_{min} sebesar $10^\circ C$, diperoleh *hot utility* sebesar 40,6145 MW dan *cold utility* sebesar 9,6539 MW yang masing-masing terjadi pada suhu $505^\circ C$ dan $40^\circ C$. Pada ΔT_{min} sebesar $16^\circ C$, *hot utility* meningkat menjadi 43,3634 MW dan *cold utility* menjadi 13,0979 MW, dengan suhu kejadian masing-masing di $508^\circ C$ dan $42^\circ C$. Selanjutnya, pada $\Delta T_{min} 18^\circ C$, *hot utility* tercatat sebesar 49,4239 MW dan *cold utility* sebesar 11,8239 MW, terjadi pada suhu $509^\circ C$ dan $41^\circ C$. Untuk $\Delta T_{min} 24^\circ C$, nilai *hot utility* kembali meningkat menjadi 55,9509 MW dan *cold utility* menjadi 10,7896 MW, yang terjadi pada suhu $512^\circ C$ dan $30^\circ C$. Terakhir, pada ΔT_{min} sebesar $28^\circ C$, diperoleh *hot utility* tertinggi sebesar 62,4369 MW dan *cold utility* sebesar 11,3134 MW pada suhu $514^\circ C$ dan $30^\circ C$. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa semakin besar ΔT_{min} yang

digunakan dalam sistem, maka kebutuhan *hot utility* cenderung meningkat, sementara kebutuhan *cold utility* tidak menunjukkan fluktuasi pada ΔT_{\min} 10°C dan 28°C.

Berdasarkan data yang diperoleh, peningkatan nilai ΔT_{\min} menunjukkan kecenderungan meningkatnya kebutuhan *hot utility* dan perubahan variatif pada *cold utility*. Hubungan ini sejalan dengan prinsip dasar *pinch analysis*, di mana kenaikan ΔT_{\min} memperlebar jarak suhu minimum antara aliran panas dan dingin, sehingga mengurangi potensi pemanfaatan panas internal. Akibatnya, sistem harus menambah pemasukan energi eksternal.

Peningkatan nilai ΔT_{\min} dalam *pinch analysis* berpengaruh langsung terhadap efisiensi pemanfaatan energi dalam sistem pertukaran panas (Li et al., 2019). Ketika ΔT_{\min} dinaikkan, perbedaan suhu minimum antara *hot stream* dan *cold stream* yang diperbolehkan dalam proses juga menjadi lebih besar (Varbanov et al., 2012). Hal ini membatasi kedekatan suhu antar aliran yang bisa dicapai secara internal, sehingga mengurangi potensi pemulihan panas. Akibatnya, sistem perlu menambah pasokan energi eksternal berupa *hot utility* untuk pemanasan dan *cold utility* untuk pendinginan, karena sebagian besar energi tidak dapat didaur ulang di dalam sistem. Penurunan efisiensi ini juga dapat meningkatkan beban operasional dan investasi, terutama pada sistem berskala besar yang bergantung pada integrasi energi (Poole & Berman, 2001).

Berdasarkan penjelasan yang telah dipaparkan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai ΔT_{\min} maka semakin besar pula kebutuhan *hot utility* dan *cold utility* secara umum. Namun pada hasil analisis, tidak seluruh data mengikuti pola teoritis tersebut karena terjadi fluktuasi pada kebutuhan *cold utility*, yaitu menurun saat ΔT_{\min} meningkat dari 16°C ke 18°C, dan kembali menurun pada ΔT_{\min} 24°C sebelum naik kembali pada ΔT_{\min} 28°C. Ketidaksesuaian ini dapat disebabkan oleh ketidakseimbangan distribusi beban panas antar interval suhu, variasi jumlah dan karakteristik *stream*, serta keterbatasan konfigurasi aliran dalam sistem pertukaran panas, yang memengaruhi kemampuan pemanfaatan panas internal secara optimal (Klemes et al., 2018).

KESIMPULAN

Peningkatan ΔT_{\min} dalam sistem *heat exchanger network* secara signifikan meningkatkan kebutuhan energi eksternal, yang tercermin dalam tren kenaikan nilai *hot utility* dari 40,6145 MW menjadi 62,4369 MW pada rentang ΔT_{\min} antara 10°C hingga 28°C. Hal ini sesuai dengan prinsip analisis *pinch* yang menjelaskan bahwa semakin tinggi nilai ΔT_{\min} , semakin rendah potensi pemanfaatan panas internal, sehingga sistem menjadi lebih bergantung pada energi eksternal. Di sisi lain, kebutuhan *cold utility* menunjukkan fluktuasi yang tidak konsisten, seperti penurunan dari 13,0979 MW pada

ΔT_{\min} 16°C menjadi 11,8239 MW pada ΔT_{\min} 18°C, yang mengindikasikan adanya ketidaksesuaian dengan teori yang ada. Ketidaksesuaian ini mungkin disebabkan oleh distribusi suhu aliran yang tidak merata antara aliran panas dan dingin pada rentang suhu tertentu. Oleh karena itu, pemilihan nilai ΔT_{\min} yang tepat menjadi faktor krusial dalam merancang dan mengoptimalkan jaringan penukar panas. Nilai ΔT_{\min} yang terlalu kecil akan meningkatkan biaya investasi karena memerlukan area penukar panas yang lebih luas, sementara ΔT_{\min} yang terlalu besar akan menurunkan efisiensi pemanfaatan energi. Oleh karena itu, penting untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi termal dan kelayakan ekonomi dalam menentukan ΔT_{\min} , agar sistem dapat beroperasi secara optimal dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Atuonwu, J. C. (2025). A simulation tool for pinch analysis and heat exchanger/heat pump integration in industrial processes: Development and application in challenge-based learning. *Education for Chemical Engineers*.
- Febriana, A. A., Widodo, K., & Utomo, B. (2019). *Optimasi Jaringan Heat Exchanger Dengan Metode Pinch Technology Menggunakan Perangkat Lunak Aspen Energy Analyzer V. 10 Pada Train F PT Badak NGL Bontang* (Doctoral dissertation, Sepuluh Nopember Institute of Technology).
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable energy*, 32(15), 2461-2478.
- Gadalla, M. A. (2015). A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration. *Energy*, 81, 159-174.
- Ibaaz, K., Oudani, M., Cherkaoui, M., & El Harraki, I. (2023). Automated Pinch-Exergy Analysis for Industrial Processes: ΔT_{\min} Effect on Energy and Exergy Targets. *International Journal of Supply and Operations Management*, 10(4), 417-438.
- Kemp, I. C. (2011). *Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*. Elsevier.
- Klemeš, J. J., Varbanov, P. S., Walmsley, T. G., & Jia, X. (2018). New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 439-468.
- Li, B. H., Castillo, Y. E. C., & Chang, C. T. (2019). An improved design method for retrofitting industrial heat exchanger networks based on Pinch Analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 148, 260-270.
- Mosadeghkhah, A., & Beheshti, M. (2020). Heat flow diagram as an extension of bridge retrofit method

to save energy in heat exchanger networks. *Applied Energy*, 267, 114971.

- Poole, G. C., & Berman, C. H. (2001). An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental management*, 27(6), 787-802.
- Rashed, A., Sakal, S., Ali, A., & Abdulllah, A. (2024). Simplified Superstructure Approach For Designing Heat Exchanger Network In Heating Systems Of Distillation Crude Oil Unit: Zawiya Refinery Plant Case Study. *Journal of Applied Science*, 109-127.
- Schlosser, F., Arpagaus, C., & Walmsley, T. (2019). Heat pump integration by pinch analysis for industrial applications: A review. *Chem. Eng. Trans*, 76.
- Varbanov, P. S., Fodor, Z., & Klemeš, J. J. (2012). Total Site targeting with process specific minimum temperature difference (ΔT_{min}). *Energy*, 44(1), 20-28.