

Toplinska analiza procesa – I. Sinteza mreže izmjenjivača topline *pinch*-postupkom

KUI – 20/2006
Prispjelo 9. studenog 2005.
Prihvaćeno 31. ožujka 2006.

Lj. Matijašević

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Savska c. 16
10000 Zagreb
E-mail: ljmatij@fkit.hr

Jedan od najvažnijih interesa posljednjih dvadesetak i više godina je minimaliziranje ukupnih godišnjih investicijskih i pogonskih troškova u kemijskoj procesnoj industriji. U radu je prikazana metodologija *pinch*-postupka na primjeru sinteze mreže izmjenjivača topline kojim se mogu postići znatne uštede energije. *Pinch*-postupak je termodinamički orijentirana metoda za sintezu mreže izmjenjivača topline i mreže ostalih energetski aktivnih jedinica unutar procesa. Postoje dva pristupa sinteze mreže izmjenjivača topline; jedan se temelji na termodinamičkim principima gdje korisnik pješice ili pomoću programskih sustava sintetizira mrežu i drugi koji primjenjuju matematičke metode linearnog i nelinearnog programiranja. U radu je prikazana termodinamički orijentirana metoda za sintezu mreže izmjenjivača topline.

Ključne riječi: *Mreža izmjenjivača topline, pinch-postupak, toplinska analiza*

Uvod

Kemijska postrojenja troše velike količine energije u obliku različitih goriva, električne energije, vodene pare, rashladne vode i slično. Veliki porast cijene energije sedamdesetih i osamdesetih godina ukazao je na potrebu da se postrojenja projektiraju tako da se za njihov rad troši što manje energije. Osim toga sve stroži propisi o zaštiti okoliša zahtijevaju od industrije smanjenje različitih emisija u okoliš, između ostalih i emisiju topline. Ova dva zahtjeva upućuju na djelotvornije iskorištenje energije unutar samog procesa. Krajem sedamdesetih godina B. Linnhoff^{1,2} i T. Umeda^{3,4} sa svojim suradnicima, nezavisno jedan od drugoga otkrili su tzv. "usko grlo izmjene topline" – *pinch* iz kojeg je proizašao pojam *pinch*-postupak. Sam *pinch*-postupak danas je dobar i vrijedan pažnje alat za analizu i sintezu energetski iskoristivih dijelova procesa, kako pri izgradnji novih tako i na postojećim postrojenjima. Metodologija *pinch*-postupka inženjeru projektantu daje jasan uvid kolika je nužna potrošnja energije i koji su uvjeti da se ona ostvari. Treba naglasiti da nemaju svi sustavi u kojima dolazi do izmjene topline *pinch*-točku ili područje, to su tzv. problemi *threshold*, gdje se javlja potreba samo za grijanjem ili hlađenjem. Da bi došlo do izmjene topline, mora postojati pogonska sila, a u slučaju izmjenjivača topline to je ΔT_{\min} . Početni radovi o *pinch*-postupku govorili su uglavnom o djelotvornom povezivanju izmjenjivača topline HEN (Heat Exchanger Network) design, a ključne energetski aktivne jedinice poput reaktora, separacijskih kolona, kompresora, kolona za sušenje, pranje i slično bile su zanemarene. Njihova analiza je složenija i zahtijeva drugačiji pristup rješavanju problema.

Toplinska analiza procesa temeljena na *pinch*-postupku pokazana je u ovom radu na jednostavnom primjeru povezivanja izmjenjivača topline. Složenija analiza mreže izmjenjivača topline napravljena je na postrojenju za proizvodnju nitratne kiseline.^{5,6}

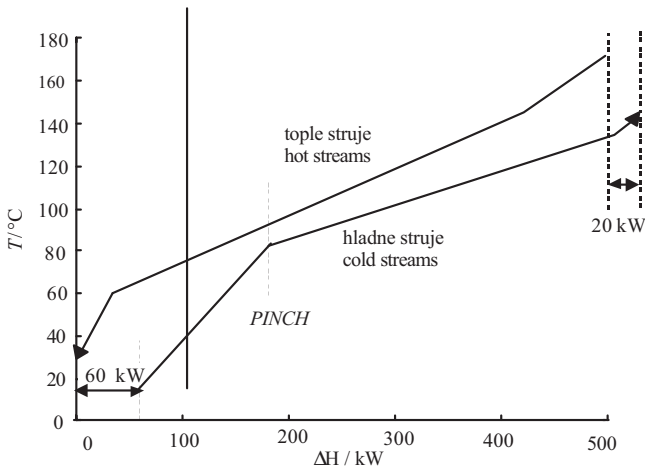
Sinteza mreže izmjenjivača topline

Sinteza mreže izmjenjivača topline vodi znatnom smanjenju energetskih zahtjeva. U posljednje vrijeme napravljeno je mnogo na razvoju metoda i modela za integraciju energije i djelotvorne izvedbe mreže izmjenjivača topline.^{7,8} Jedna od veoma uspješnih i upotrebljivih tehnika je *pinch*-postupak. Izraz *pinch* proizlazi iz činjenice da se na dijagramu ovisnosti temperature o prenesenoj toplini između krivulja toplih i hladnih struja javlja uski, stisnuti dio (*pinch* = stiska) koji čini razliku termodinamičkog loma u sustavima (Slika 1). Na slici se jasno vidi da se kod određene temperature razlike (T_{\min}) između tople i hladne struje ne prenosi topline, odnosno da postoji maksimalno iskorištenje energije.

U ovoj sekciji bit će obrađeni osnovni principi *pinch*-postupka s pregledom i ilustracijom jednostavnog problema i na primjeru analize izmjenjivača topline procesa dobivanja nitratne kiseline.

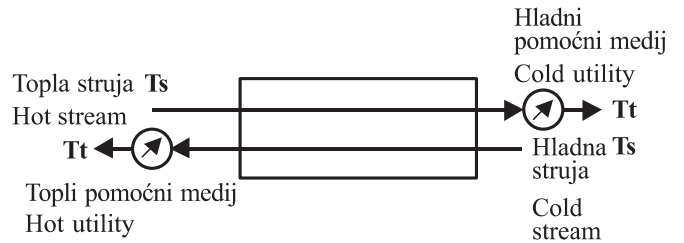
Pinch-postupak⁹

Razvoj i primjena metode biti će prikazana na primjeru uporabe energije između četiri procesne struje: dvije tople struje koje trebaju hlađenje i dvije hladne struje koje trebaju grijanje. Procesni podaci dani su u tablici 1.



Slika 1 – Ovisnost temperature o prenesenoj toplini
Fig. 1 – Temperature vs. enthalpy

Na slici se jasno vidi da se tople struje mogu upotrijebiti za grijanje hladnih struja i obratno. Zadatak je kako pronaći najbolje rješenje povezivanja odnosno integracije toplinskih izmjenjivača za postizanje ciljanih temperatura. Za bolje razumijevanje toplinske integracije ovisnost temperature o prenesenoj toplini prikazat će se na primjeru dviju struja koje izmjenjuju toplinu.



Slika 3 – Izmjenjivač topline sa dvije struje
Fig. 3 – Two – stream exchanger

Tablica 1 – Procesni podaci zamišljenog procesa
Table 1 – Data for heat integration problem

Broj Number	Vrsta struje Type	CP/ kW/ °C ⁻¹	T _s /°C	T _t /°C	Toplinski tok Heat flow rate Φ/kW
1	topla, hot	3,0	180	60	360
2	topla, hot	1,0	150	30	120
3	hladna, cold	2,0	20	135	230
4	hladna, cold	4,5	80	140	270

Količina prenesene topline dana je sljedećim izrazom:

$$\Phi = \int_{T_s}^{T_t} CP \cdot dT = CP(T_t - T_s) = \Delta H$$

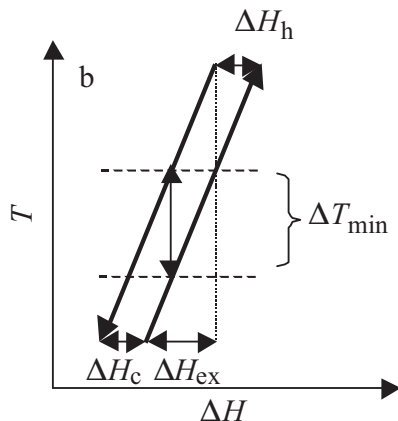
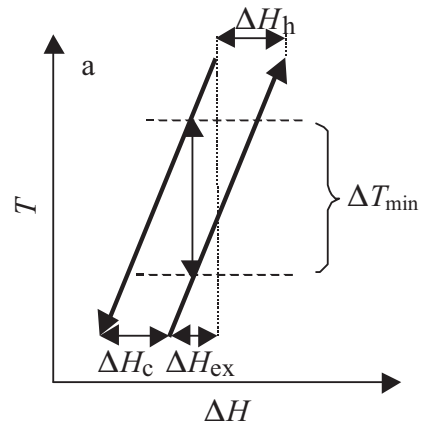
gdje je: $CP = q_m \cdot C_p$

Svaka struja počinje s početnom temperaturom T_s (source) i bit će grijana ili hladjena na ciljane temperaturu T_t (target). Toplinski učin je ukupna toplina potrebna za grijanje ili hlađenje struje od T_s do T_t. Shematski prikaz struja dan je na slici 2.

Struja 1	180 °C	CP = 3,0 kW / °C	→	60 °C
Struja 2	150 °C	CP = 1,0 kW / °C	→	30 °C
Struja 3	20 °C	CP = 2,0 kW / °C	←	135 °C
Struja 4	80 °C	CP = 4,5 kW / °C	←	140 °C

Slika 2 – Shematski prikaz procesnih struja
Fig. 2 – Schematic representation of process streams

Promjene entalpije s temperaturom dane su na slici 4 a i b. Za izmijenjenu toplinu minimalna temperaturna razlika ΔT_{min} mora biti održavana. Iskustveni minimalni ΔT u izmjenjivačima je između 5 i 20 °C.



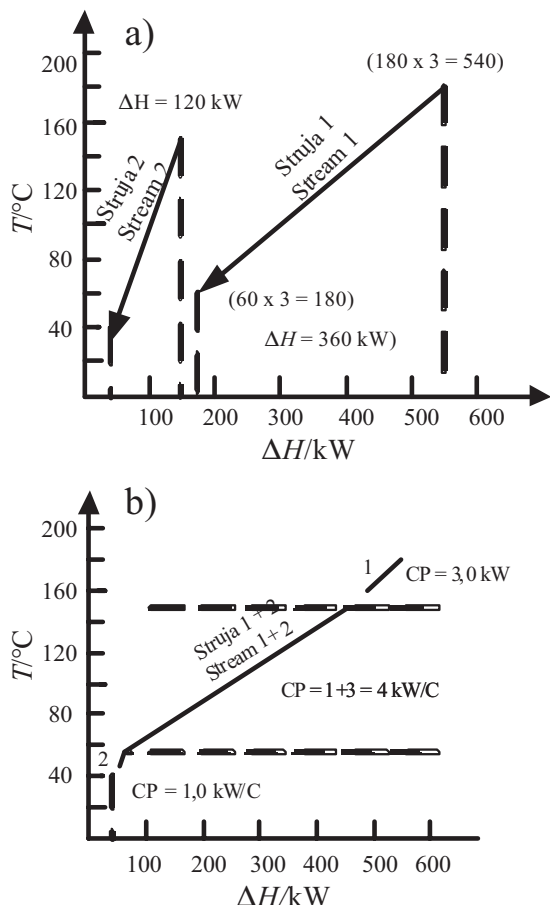
Slika 4 – Toplinski dijagram a i b
Fig. 4 – Heat curves a and b

Toplina prenesena između struja prikazana je kao ΔH_{ex}, a toplina prenesena iz hladnjaka i grijača: ΔH_c i ΔH_h.

$$\Delta H = CP \Delta T$$

Koliko će se grijati ili hladiti, ovisi o ΔT_{min} . Opadanjem, smanjenjem ΔT_{min} povećat će se količina izmijenjene topli- ne između dviju struja, a time će opadati potrošnja hladnog i toplog medija, što se vidi na slici 4 a i b.

Rješavanje problema s 4 struje:



Slika 5 – Dijagram ovisnosti temperature o entalpijskom protoku za tople struje u danom primjeru a) razdvojene tople struje; b) sastavljene tople struje (kompozitna topla krivulja)

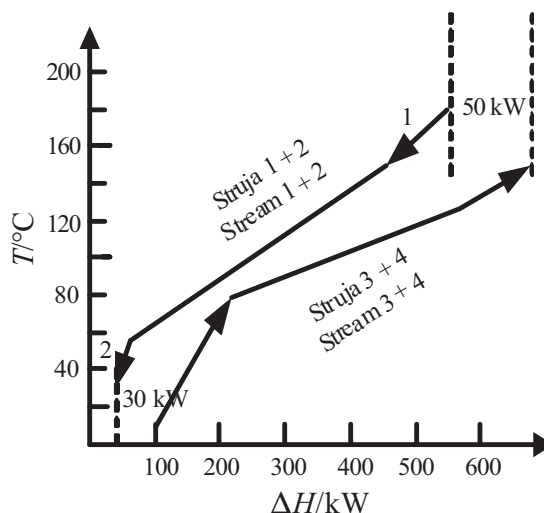
Fig. 5 – Hot stream temperature vs. enthalpy flow rate a) separate hot stream; b) Composite hot stream

Slika 5 pokazuje promjenu entalpijskog protoka za tople struje. Ujedno se vidi da se toplinski kapaciteti mogu dodavati kod kompozitnih krivulja. Na slici 6 dan je prikaz kompozitnih krivulja toplih i hladnih struja.

Kao kod problema s dvije struje razmak krivulja kod vrha i dna nam daju količine potrebne energije toplog i hladnog pomoćnog medija. To je minimum vrijednosti potrebnih da se postignu ciljane temperature. Ta informacija je bitna radi izgradnje mreže izmjenjivača topli- ne. Kod većine mreža minimum ΔT će se javljati kod samo jedne točke. To se naziva *pinch*. U problemu koji promatramo *pinch* se javlja između 90 °C na toploj strani krivulje i 80 °C na hladnoj strani krivulje.

Važnost “pincha”

Pinch dijeli sustav u dva termodinamička područja. Područje iznad *pincha* može se promatrati kao topli spremnik



Slika 6 – Kompozitna krivulja toplih i hladnih struja
Fig. 6 – Hot and cold stream composite curves

s toplinom dovedenom s toplog izvora, ali ne izlazi iz njega. Ispod *pincha* vrijedi obratno. Kada bi ΔT_{min} bio 0, tada ne bi bilo toka topli- ne kroz *pinch*, što je nemoguće. Koliki će biti tok topli- ne kroz *pinch*, ovisi o ΔT_{min} . Veći ΔT_{min} znači veću potrošnju vrućeg ili hladnog medija i obratno.

Metoda tablica

Naziv metode potječe od *Linnhoffa* i *Flowera*.¹ To je zapravo numerička metoda za određivanje *pinch*-temperatura i minimuma potrebnih uređaja za grijanje odnosno hlađenje. Metoda izbjegava crtanje krivulja i pomicanje krivulja hlađenja da bi se dobio minimum ΔT na dijagramu.

Postupak je sljedeći:

1. Postojeće temperature T_{act} se prevode u intervalne temperature oduzimanjem polovice ΔT_{min} od tople struje i dodavanjem polovice ΔT_{min} hladnijoj struji.

$$\begin{aligned} \text{Topla struja } T_{int} &= T_{act} - \Delta T_{min}/2 \\ \text{Hladna struja } T_{int} &= T_{act} + \Delta T_{min}/2 \end{aligned}$$

Primjena intervalnih temperatura je bolje rješenje, jer se uvodi i ΔT_{min} . Za zadatak koji promatramo, $\Delta T_{min} = 10$ °C.

Tablica 2 – Intervalne temperature uz $\Delta T_{min} = 10$ °C
Table 2 – Interval temperatures for $\Delta T_{min} = 10$ °C

Struja Stream	Aktualna temperatura, °C Actual temperature, °C	Intervalna temperatura, °C Interval temperature, °C		
1	180	60	175	55
2	150	30	145	25
3	20	135	25	140
4	80	140	85	145

2. Treba označiti struje koje se ponavljaju
3. Poredati intervalne temperature po veličini tako da se temperature koje se ponavljaju stave samo jedanput.

Redosljed Rank	ΔT_n	Struje u intervalu Stream in interval
175	–	–
145	30	–1
140	5	4 – (2+1)
85	55	(3+4) – (1+2)
55	30	3 – (1+2)
25	30	3 – 2

4. Bilanca topline za struje

$$\Delta H_n = (\sum CP_c - \sum CP_h) \Delta T_n$$

ΔH_n = entalpijski protok n -tog intervala

$\sum CP_c$ = suma toplinskih kapaciteta svih hladnih struja u intervalu

$\sum CP_h$ = suma toplinskih kapaciteta svih toplih struja u intervalu

ΔT_n = razlika intervalnih temperatura

Tablica 3 – Metoda tablica

Table 3 – The table method

Interval	Int. temp. $T/^\circ\text{C}$	$\Delta T_n/^\circ\text{C}$	$\sum CP_c - \sum CP_h/\text{kW } ^\circ\text{C}^{-1}$	$\Delta H/\text{kW}$	Suvišak ili manjak Surplus or deficit
	175	–	–	–	–
1	145	30	–3	–90	s
2	140	5	0,5	2,5	d
3	85	55	2,5	137,5	d
4	55	30	–2	–60	s
5	25	30	1	30	d

5. Formiranje kaskade toplinskih intervala

Tablica 4 – Toplinska kaskada

Table 4 – Heat cascade

Interval	$\Delta H_n/\text{kW}$	$\Delta H_{n-1} - \Delta H_n/\text{kW}$	$\Delta H_{n-1} - \Delta H_n/\text{kW}$
175	0	50	
145	–90	90	–90
140	2,5	87,5	2,5
85	137,5	–50	137,5
55	–60	10	–60
25	30	–20	30

Kaskada pokazuje da se toplina može prenositi s hladne na toplu struju. Negativne vrijednosti u trećoj koloni od –50 kW i –20 kW ukazuju na to da je temperaturni gradijent krivo usmjeren i da izmjena termodinamički nije moguća.

6. Uvođenjem dovoljno topline na vrh kaskade (kolona 4) eliminiraju se sve negativne vrijednosti (kolona 5). Uspoređivanjem krivulja sa slike s kaskadom uvedena toplina je minimum topline toplog pomoćnog medija koju je potrebno dovesti i toplina uklonjena na dnu je minimum topline hladnog pomoćnog medija.

Pinch se javlja tamo gdje je toplinski tok u kaskadi = 0. Iz kaskade se vidi da se *pinch* javlja na temperaturi od 85 °C tj. između 80 i 90 °C. Nije nužno crtati kaskadni dijagram. To je učinjeno da se vidi princip. Jednostavniji pristup dan je primjerom.

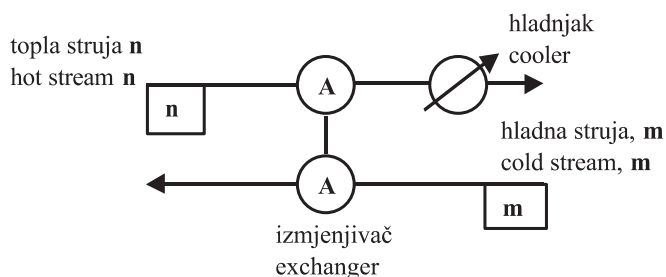
Zaključak:

Za maksimalno iskorištenje energije i minimum upotrebe toplinskih uređaja vrijede pravila:

- nema prijenosa topline kroz *pinch*
- ne upotrebljavati hladnjake iznad *pincha*
- ne upotrebljavati grijače ispod *pincha*

Mreža izmjenjivača

Prikladan način prikaza mreže izmjenjivača je rešetka. Procesne struje su horizontalne linije s brojevima struja u kvadratima. Topla struja je na vrhu i ide od lijeva na desno. Hladna struja je na dnu i ide od desna na lijevo. Izmjenjivači su dva kruga povezana okomitom linijom.

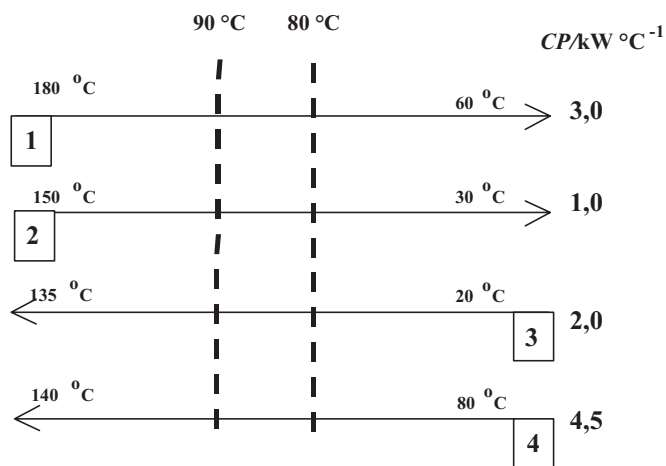


Slika 7 – Mrežni prikaz izmjenjivača

Fig. 7 – Grid representation

Izrada mreže uz maksimalno iskorištenje energije

U problemu koji imamo minimum prijenosa topline je 50 kW na toploj strani i 30 kW na hladnoj strani. *Pinch* se javlja između 80 i 90 °C. Mreža se radi na sljedeći način – dvije dodane vertikalne linije čine *pinch*-područje.



Slika 8 – Mrežni prikaz izmjenjivača za 4 struje

Fig. 8 – Grid representation for 4 streams

Izvedba mreže iznad *pincha*

Osnovni uvjet je sljedeći:

$$CP_h \leq CP_c$$

1. Primjenom ovog uvjeta struja **1** može biti povezana sa strujom **4**, ali ne i sa strujom **3**.

Povezivanje struje **1** i **4** i prenošenjem ukupne količine topline struji **1** do *pinch* temperature:

$$\Delta H_{ex} = CP (T_s - T_{pinch})$$

$$\Delta H_{ex} = 3 (180 - 90) = 270 \text{ kW}$$

Ovo će udovoljiti toplinu potrebnu struji **4** za njezinu ciljaneu temperaturu.

$$\Delta H_{ex} = 4,5 (140 - 80) = 270 \text{ kW}$$

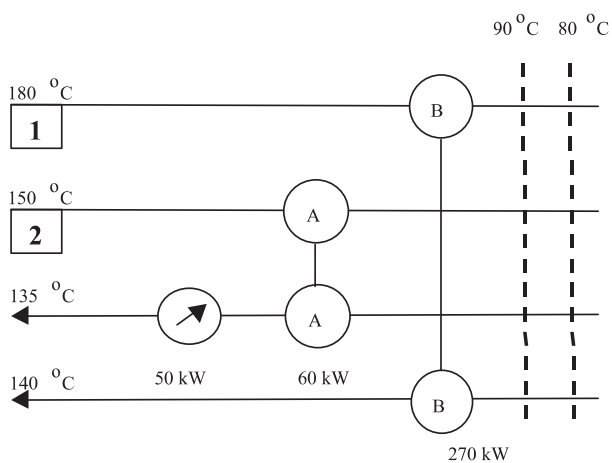
2. Struja **2** može biti povezana sa strujom **3**.

$$\Delta H_{ex} = 1 (150 - 90) = 60 \text{ kW}$$

3. Toplina potrebna od *pinch*-temperature do ciljane temperature

$$\Delta H = 2 (135 - 80) = 110 \text{ kW}$$

Razliku $\Delta H_{hot} = 110 - 60 = 50 \text{ kW}$ mora osigurati grijač. Mreža iznad temperature *pincha* prikazana je na sljedećoj slici:



$CP_h \leq CP_c$

$1 \longrightarrow 4$

$\Delta H = 3(180-90) = 270 \text{ kW}$

$\Delta H_4 = 4,5(140-80) = 270 \text{ kW}$

$2 \longrightarrow 3$

$\Delta H = 1,0(150-90) = 60 \text{ kW}$

$\Delta H_3 = 2,0(135-80) = 110 \text{ kW}$

Razliku: $110 - 60 = 50 \text{ kW}$
mora osigurati grijač

Slika 9 – Mrežna izvedba iznad *pincha*
Fig. 9 – Network design above pinch

Izvedba mreže ispod *pincha*

Osnovni uvjet je sljedeći:

$$CP_h \geq CP_c$$

4. Struja **4** je na temperaturi *pincha* od 80 °C

5. Veza između struje **1** i **3** do granice *pincha* udovoljit će gornji uvjet, prenošenjem do ciljane temperature

$$\Delta H_{ex} = 3,0 (90 - 60) = 90 \text{ kW}$$

6. Struja **3** treba dati toplinu do *pinch*-temperature

$$\Delta H = 2,0 (80 - 20) - 90 = 30 \text{ kW}$$

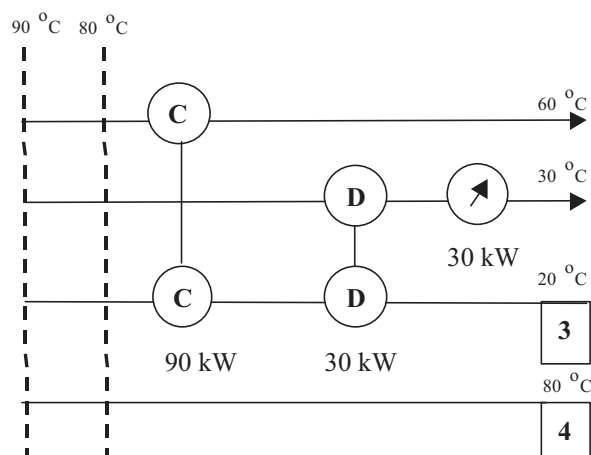
Povećanje temperature struje 3 bit će:

$$\Delta T = \Delta H / CP$$

Prijenos topline od 30 kW uzrokovat će povećanje temperature od $20 + 30/2 = 35 \text{ °C}$, što daje temperaturnu razliku na vanjskoj strani izmjenjivača: $\Delta T = 90 - 35 = 55 \text{ °C}$. Uvjet od $\Delta T_{min} = 10 \text{ °C}$ nije udovoljen ovim povezivanjem.

7. Struja **2** se mora hladiti do njezine ciljane temperature tako da hladnjak mora biti uključen.

$$\Delta H_{cold} = 1,0 (90 - 30) - 30 = 30 \text{ kW}$$



$CP_h \geq CP_c$

Struja 4 na T_{pinch}

$1 \quad 3$

$\Delta H = 3(90-60) = 90 \text{ kW}$

$\Delta H_3 = 2(80-20) - 90 = 30 \text{ kW}$

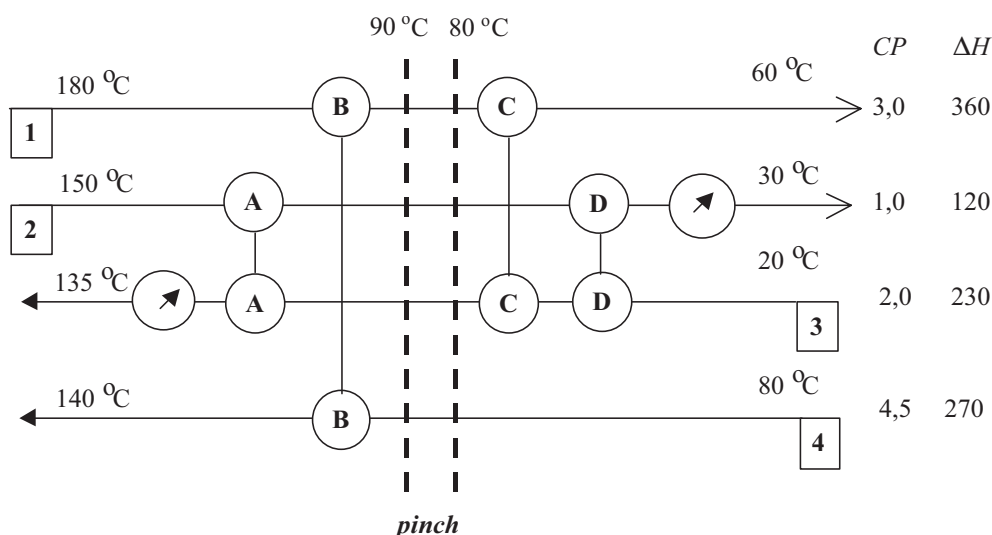
$\Delta T_3 = T_3 + \Delta H/CP = 20 + 30/2 = 35 \text{ °C}$

$\Delta T = 90 - 35 = 55 \text{ °C}$

Struja 2 se hladi do 20°C

$\Delta H_{cold} = 1(90-30) - 30 = 30 \text{ kW}$

Slika 10 – Mrežna izvedba ispod *pincha*
Fig. 10 – Network design below pinch

Slika 11 – Predložena mrežna izvedba uz $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Fig. 11 – Proposed heat exchanger network, $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Presjeci struja

Ako su toplinski kapaciteti takvi da nije moguće razviti povezivanje tako da se udovolji $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, tada se toplinski kapaciteti mogu promijeniti presjecanjem struja. Podijeljene struje reduciraju masene protoke na svakom kraju, a time i toplinske kapacitete.

Osnovni vodič za izgradnju mreže uz maksimalno iskorištenje energije je sljedeći:

1. odredi se područje *pincha*
2. izvedba dalje od *pincha*
3. iznad *pincha* napraviti povezivanje uz ograničenje $CP_h \leq CP_c$
4. ispod *pincha* povezati struje uz ograničenje $CP_h \geq CP_c$
5. ako kriteriji povezivanja nisu udovoljeni, presjeći struje
6. maksimalizirati toplinske učinke izmjenjivača
7. nadopuniti sa vanjskim grijanjem samo iznad *pincha* i vanjskim hlađenjem ispod *pincha*.

Važnost ΔT_{\min}

U izmjenjivačima je površina prenesene topline obrnuto proporcionalna temperaturnoj razlici.

$$A = \frac{\Phi}{k \Delta T}$$

To znači da će ΔT izravno odrediti veličinu izmjenjivača u mreži. Manji ΔT bit će veće iskorištenje energije, smanjit će se potrošnja energenata, ali će poskupjeti izmjenjivač. Za mrežu najbolje vrijednosti za ΔT_{\min} su one koje daju najnižu godišnju cijenu. Kada govorimo o iskorištenju topline, utjecaj promjene ΔT_{\min} treba istraživati.

Primjer:

Metodologija *pinch*-postupka primijenjena je na postrojenju za proizvodnju dušične kiseline⁵, Petrokemije d. d. iz

Kutine. Postrojenje datira iz 1982. godine i ima kapacitet 450 t d^{-1} dušične kiseline masenog udjela $w = 57 - 60\%$. Shema procesa dana je na slici 12.

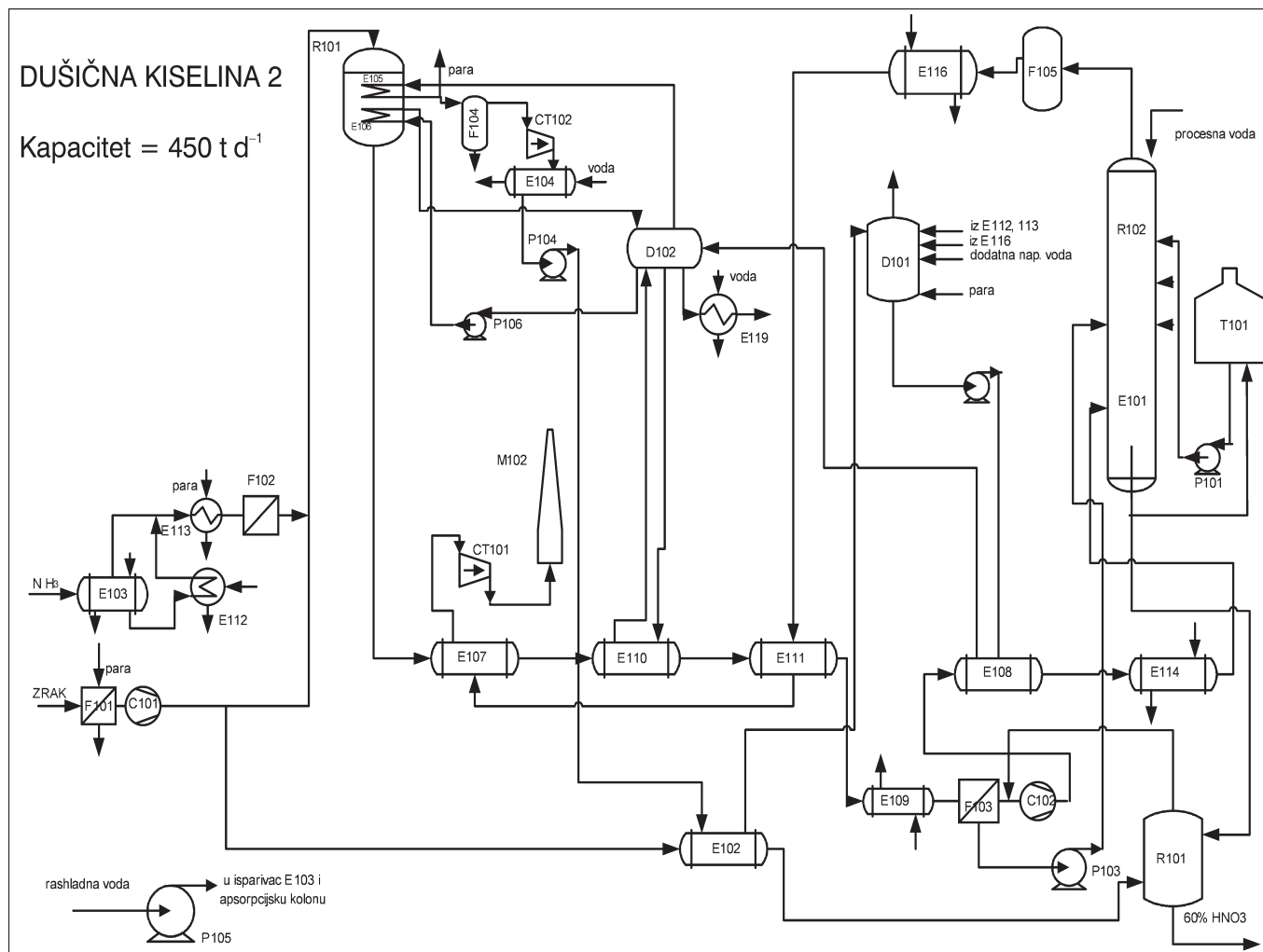
U tablici 5. dani su podaci o proizvodnji i potrošnji energenata na postrojenju.

Tablica 5 – Proizvodnja i potrošnja energenata na postrojenju HNO_3

Table 5 – Production and consumption of energy in actual nitric acid plant

Energenti Utilities	Količina Quantity
Proizvodnja Energy production	
Visokotlačna para (44 bar) HP steam (44 bar)	7119 kg h^{-1}
Potrošnja Energy consumption	
Srednjetačna para (12,2 bar) MP steam	4800 (ljetno) / 9800 kg h^{-1} (zima) (summer) / (winter)
Niskotlačna para (4,4 bar) LP stea (4,4 bar)	703 kg h^{-1}
Rashladna voda Cooling water	2702 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
Napojna voda za kotlove Boiler feedwater	3431 kg h^{-1}

Treba utvrditi može li se potrošnja kojeg energenta smanjiti tako da se proizvedena visokotlačna vodena para ne smije dirati, jer se rabi u drugim petrokemijskim procesima. Napravljena je analiza mreže izmjenjivača topline *pinch*-postupkom, kojih u procesu ima 17. Iz razmatranja su izuzeti neki izmjenjivači koji čine posebne podsustave u procesu. Tablica 6 sadrži podatke o ciljanim i početnim temperaturama, toplinskim kapacitetima i pripadajućim prijelaznim toplinama za struje u kojima se odvija kondenzacija ili isparavanje.



Slika 12 – Shematski prikaz procesa proizvodnje dušične kiseline

Fig. 12 – The proces flowsheet of nitric acid plant

Tablica 6 – Procesni podaci procesa proizvodnje dušične kiseline

Table 6 – Process data of produced nitric acid

Broj No.	Struja Stream	$T_j/^\circ\text{C}$	$T_i/^\circ\text{C}$	λ , kW or CP, kW $^\circ\text{C}^{-1}$	Broj No.	Struja Stream	$T_j/^\circ\text{C}$	$T_i/^\circ\text{C}$	λ , kW or CP, kW $^\circ\text{C}^{-1}$
1	NH_3 ,l	8.5	8.5	133.5 kW	11	HP para HP steam	258.0	400.0	18.2 kW $^\circ\text{C}^{-1}$
2	NH_3 ,g	8.5	100.0	4.0 kW $^\circ\text{C}^{-1}$	12	parni kondezat steam condensate	44.0	44.0	10467.5 kW
3	LP NO _x	850.0	90.0	30.4 kW $^\circ\text{C}^{-1}$	13	HP para HP steam	258.0	258.0	12150.2 kW
4	H_2O ,g	90.0	90.0	8033.1 kW	14	kondezat turbine turbine condensate	50.0	70.0	18.0 kW $^\circ\text{C}^{-1}$
5	NO _x mix l,g	90.0	38.0	34.8 kW $^\circ\text{C}^{-1}$	15	napojna voda boiler feedwater	105.0	200.0	27.7 kW $^\circ\text{C}^{-1}$
6	HP NO _x	232.0	76.0	30.1 kW $^\circ\text{C}^{-1}$	16	rashladna voda cooling water	255.0	50.0	0.8 kW $^\circ\text{C}^{-1}$
7	H_2O ,para	76.0	76.0	1296.5 kW					
8	NO _x mix l,g	76.0	46.0	29.2 kW $^\circ\text{C}^{-1}$					
9	vršni plinovi top gases	25.0	350.0	23.0 kW $^\circ\text{C}^{-1}$					
10	sekundarni zrak secondary air	194.0	120.0	4.9 kW $^\circ\text{C}^{-1}$					

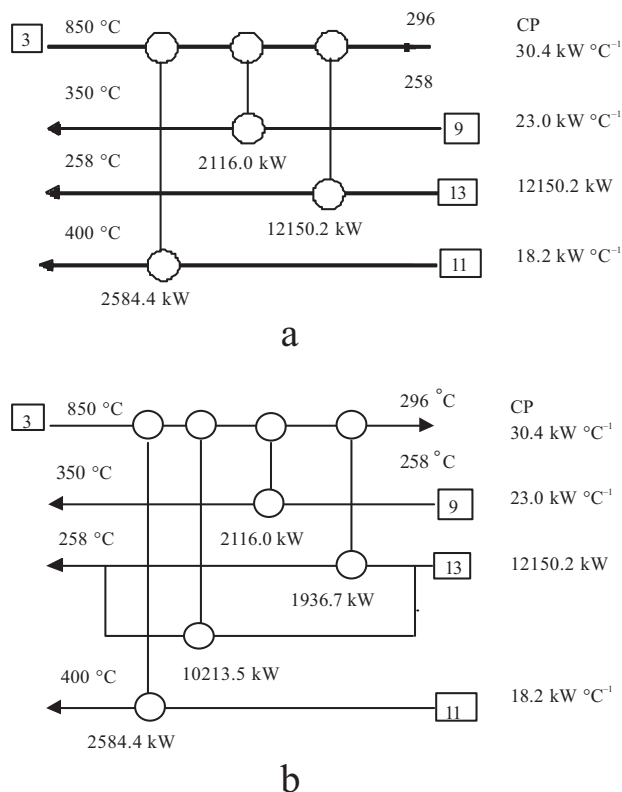
Na slici 13 dana je izvedba mreže iznad temperature *pincha*, na slici 14 ispod temperature *pincha*, a na slici 15 predloženo rješenje.

Nakon dobivene uspješne mreže izmjenjivača *pinch*-postupkom uočeno je da postojeći izmjenjivač E 111 više ne udovoljava i trebalo bi ga zamijeniti izmjenjivačem veće površine. No bilo bi besmisleno odbaciti opremu koju već imamo, pa je jeftinije kupiti samo jedan manji izmjenjivač koji će nadopuniti postojeći. Iparivač E 112 i **pregrijač** amonijaka E 113 nema potrebe uporabiti jer se sada isparavanje i **pregrijavanje** provodi pomoću druge tople struje koja ima druga toplinska i korozivna svojstva.

Izmjenjivači s rashladnom vodom koji se nalaze na strujama 3, 4, 5 te 6, 7, 8 imaju manje toplinske dužnosti nego postojeći E 109 i E 114. To znači da je potrebna manja površina izmjene. Naravno ne treba kupovati nove izmjenjivače već ih samo jednostavnim modifikacijama prilagoditi novim zahtjevima.

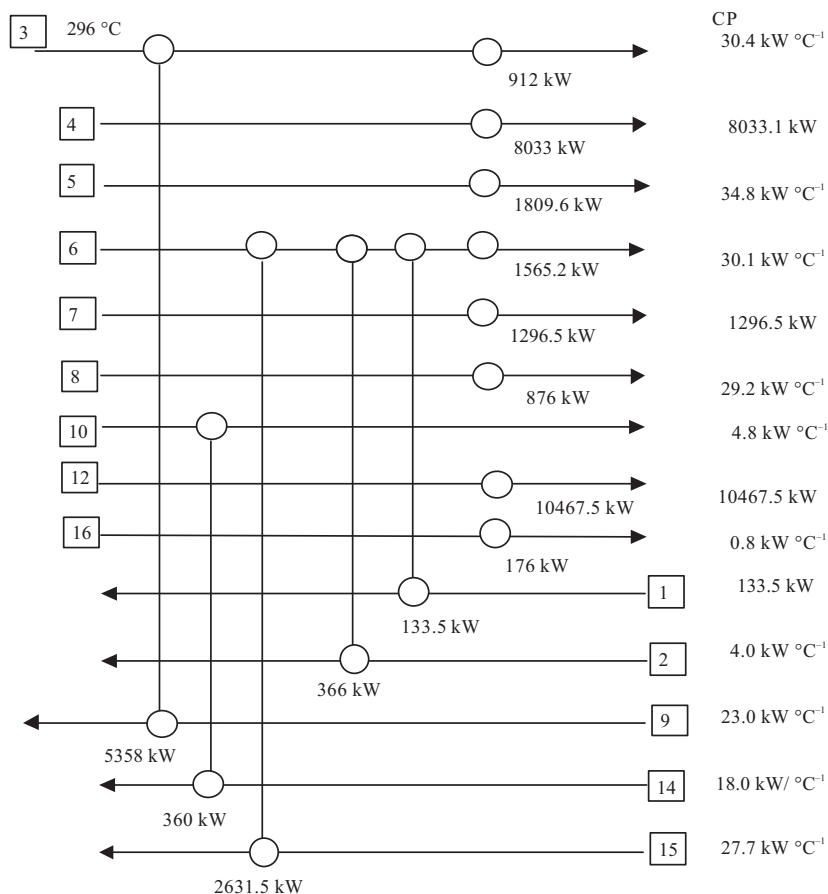
Zaključak

Prethodna mreža daje maksimalno iskorištenje energije i radi toga daje minimum potrošnje i koštanja uređaja za hlađenje i grijanje. To nije dovoljno za optimalnu izvedbu mreže. U kriterije za optimizaciju treba uključiti i optimalni odnos ulaganja u opremu i utroška dovedene vanjske energije. Optimum će biti kada se postignu najniži godišnji troškovi: govori se o cijeni temeljnog kapitala, troškovima pomoćnih uređaja (utilities) i ostalih pogonskih troškova.



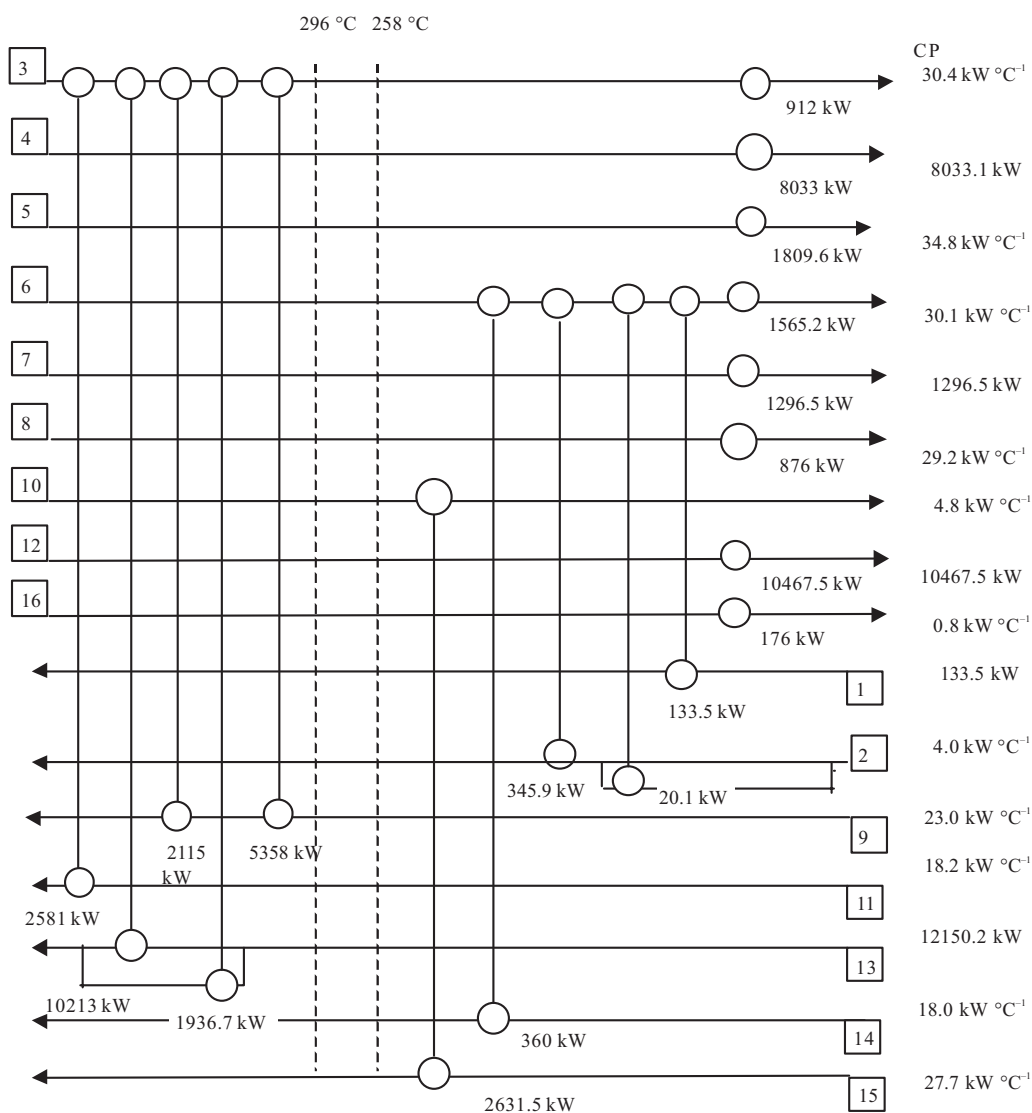
Slika 13 – Izvedba mreže iznad *pincha*: a – postojeće stanje procesa dušične kiseline; b – poboljšana mreža izmjenjivača

Fig. 13 – Network design above pinch: a – existing arrangement of nitric acid plant; b – retrofit existing network



Slika 14 – Izvedba mreže ispod *pincha*

Fig. 14 – Network design below pinch



Slika 15 – Mrežni prikaz cijelog djelotvornijeg sustava

Fig. 15 – The proposed heat exchanger network

Broj izmjenjivača i njihova veličina odredit će glavnu cijenu. Izmjenjivač topline D može se ukloniti i učinci topline hladnjaka i grijača će se povećati dovođenjem struja 2 i 3 njihovim ciljanim temperaturama. Toplina kroz *pinch* i potrošnja energenata će se povećati.

U svakom slučaju revidirana mreža bit će bolja, ekonomičnija i ovisit će o cijeni ključne opreme i pomoćnih uređaja (hladnjaka ili grijača). Uvijek treba imati nekoliko alternativnih rješenja. Treba pronaći kompromis između cijene ključne opreme određene brojem i veličinom izmjenjivača, koštanjem energenata i postignutim iskorištenjem topline.

Primjenom *pinch*-postupka analizirana je mreža izmjenjivača topline postrojenja za proizvodnju dušične kiseline kako bi se pronašle mogućnosti za uštedu energije. Analiza je pokazala da proces oslobađa velike količine topline i da

nema potrebe za dodatnim grijanjem. Utvrđena je minimalna potrošnja rashladnog medija.

Na temelju provedene analize predložene su izmjene koje daju godišnju uštedu od 357 120 \$. Procjena investicijskog ulaganja je 431 845 \$, a vrijeme povrata investicije je 14,5 mjeseci. U ovom primjeru treba naglasiti da se radi o relativno novom procesu proizvodnje dušične kiseline koji ima dobro iskorištenu energiju.

Primjena *pinch*-postupka pokazana je na primjeru integracije izmjenjivača topline. Metoda se može primijeniti pri integraciji drugih procesnih jedinica kao što su separacijske kolone, reaktori, kompresori, ekspanderi, grijači, toplinske pumpe. Široka primjena *pinch*-postupka pri integraciji procesa rezultirala je brojnim radovima sve do današnjih dana i danas je osnovni tekst na kolegijima koji se bave procesima i projektiranjem procesa.

Popis simbola List of symbols

A	– površina izmjene topline, m^2 – heat transfer area, m^2
C_p	– prosječni specifični toplinski kapacitet, pri konstantnom tlaku, $kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ – average specific heat capacity, at constant pressure $kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
CP	– toplinski kapacitet izražen kao q_m, c_p , $kW\ ^\circ C^{-1}$ – heat capacity, $CP = q_m c_p\ kW\ ^\circ C^{-1}$
ΣCP_c	– suma toplinskih kapaciteta svih hladnih struja u intervalu, $kW\ ^\circ C^{-1}$ – sum of the heat capacities of all the cold streams in the interval, $kW\ ^\circ C^{-1}$
ΣCP_h	– suma toplinskih kapaciteta svih toplih struja u intervalu, $kW\ ^\circ C^{-1}$ – sum of the heat capacities of all the hot streams in the interval, $kW\ ^\circ C^{-1}$
ΔH	– entalpijski protok, kW – enthalpy flow rate, kW
ΔH_n	– prenesena toplina n -tog intervala, kW – heat required in the n -th interval, kW
ΔH_c	– toplina prenesena s hladnjaka, kW – heat transferred from cold utility, kW
ΔH_{ex}	– prenesena toplina u izmjenjivaču, kW – heat transferred in exchanger, kW
ΔH_h	– toplina prenesena s toplog spremnika, kW – heat transfer from hot utility, kW
k	– koeficijent prolaza topline, $kW\ m^2\ ^\circ C^{-1}$ – the overall heat transfer coefficient, $kW\ m^2\ ^\circ C^{-1}$
q_m	– maseni protok, $kg\ s^{-1}$ – mass flow rate, $kg\ s^{-1}$
Φ	– toplinski tok, $kJ\ s^{-1} = kW$ – heat flow rate, $kJ\ s^{-1} = kW$

ΔT_n	– razlika intervalnih temperatura, $^\circ C$ – internal temperature difference ($T_{n-1} - T_n$), $^\circ C$
T_{ac}	– stvarna temperatura, $^\circ C$ – actual temperature, $^\circ C$
ΔT_{min}	– minimalna temperaturna razlika, $^\circ C$ – minimum temperature difference, $^\circ C$
T_n	– intervalna temperatura, $^\circ C$ – interval temperature, $^\circ C$
T_s	– početna temperatura, $^\circ C$ – source temperature, $^\circ C$
T_t	– ciljana temperatura, $^\circ C$ – target temperature, $^\circ C$
w	– maseni udjel, % – mass fraction, %

Literatura References

1. B. Linnhoff, J. R. Flower, *AIChE J.* **24** (4) (1978) 633.
2. B. Linnhoff, D. R. Mason, J. Wardle, *Comp. Chem. Eng.* **3** (1979) 295.
3. T. Umeda, T. Harada, K. Shiroko, *Comput. Chem. Engng.*, **3** (1979) 273.
4. T. Umeda, K. Nidda, K. Shiroko, *AIChE J.* **25** (1979) 423.
5. H. Otmačić, Ušteda energije primjenom *pinch* tehnologije, Diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb 2000.
6. Lj. Matijašević, H. Otmačić, *Applied Thermal Engineering* **22** (2002) 477.
7. T. Gundersen, L. Naess, *Comput. Chem. Engng.* **12** (1988) 503.
8. B. Linnhoff, D. W. Townsend, D. Boland, G. F. Hewitt, B. E. A. Thomas, A. R. Guy, R. H. Marsland, *User Guide on Process Integration for Efficient use of Energy*, IChemE, London (1994).
9. R. K. Sinnott, *Chemical Engineering, Chemical Engineering Design*, Vol. **6**, Butterworth-Heimann, Oxford, 1996, pp. 102.

SUMMARY

Heat Analysis of Processes – I. Synthesis of Heat Exchanger Network by *Pinch* Method

Lj. Matijašević

In the last twenty-five years in the chemical process industry an important point of interest has been, how to minimize total costs, i.e. capital and operating costs expressed as annual charges. *Pinch* method is thermodynamically oriented method for the synthesis of heat exchanger networks with extended to combined heat and power system, separation schemes, integrated distillation columns and general process design. There have been two schools of the heat exchanger network synthesis. One relies on thermodynamic principles where the designer manually or interactively if software is available, synthesizes the network.

The heat exchanger network of a nitric acid plant has been studied and it was found that it is possible to reduce requirements for cooling water and medium pressure steam. In order to enable these savings, three heat exchangers should be replaced with new ones. Energy consumption in steam power system increases slightly. However, the final result is a reduction of energy costs and a payback time of 14.5 months.

The other approach relies on mathematical methods like linear and nonlinear programming. In this work thermodynamically oriented method is presented for the synthesis of heat exchanger network.