

Energijska in energetska integracija procesov

Peter Glavič
Univerza v Mariboru

1

Vsebina

Uvod

Sinteza procesov

Toplotna integracija procesov

Omrežje toplotnih prenosnikov, OTP

Osnove uščipne analize:

- Sestavljeni krivulji, SK
- Sestavljeni krivulji pogonskih sredstev
- Velika sestavljena krivulja, VSK

Toplotni stroji

Kogeneracija

Toplotne (energijske) črpalke

Zaključki

2

Uvod

Problemi:

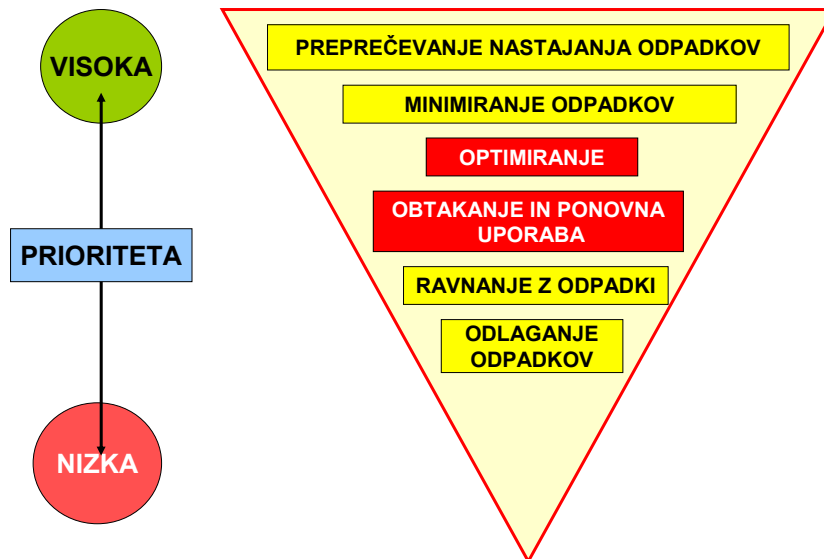
- naraščajoče potrebe svetovne populacije
- klimatske spremembe
- druga in tretja naftna kriza
- nafta in plin: vira energije in surovini za KPI

Odgovori:

- sinteza (načrtovanje) čistejših procesov
- čistejša proizvodnja → minimiranje odpadkov
- **toplotna integracija** → **racionalna raba energije**
- **optimiranje procesa** → **energijska in snovna integracija**

3

Hierarhija ravnanja z odpadki



4

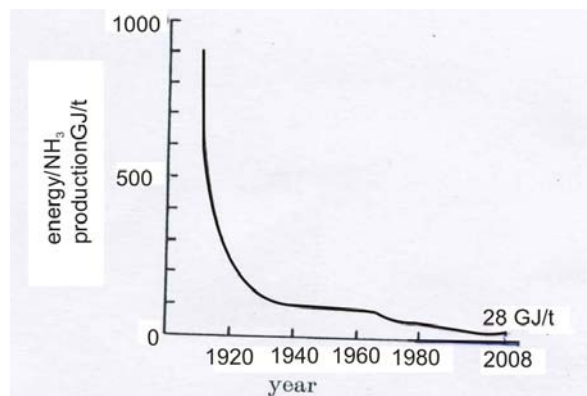
Sinteza procesov

Razvili so več različnih metod:

- **Evolucijska** – ‘Krivulje učenja’ (primer sinteze amoniaka)
- **Simulacijska** – generirajo omrežja in jih ovrednotijo na računalniku z matematično učinkovitimi, hitrimi isklanimi tehnikami – neučinkovito za npr. 10^{24} kombinacij
- **Hevristična** ali ‘pravilo palca’, npr. za destilacijo:
 - najprej odločimo komponento z največjim deležem,
 - najtežjo ločitev pustimo za konec – pravila si pogosto nasprotujejo
- **Termodinamska** – 2. zakon, ‘uščipna’ analiza

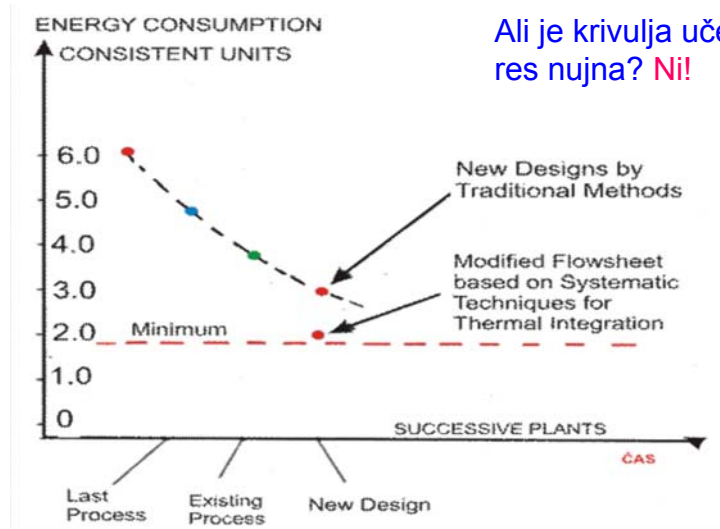
5

‘Krivulja učenja’ pri amoniaku



6

Krivulja učenja – termodinamski minimum



7

Dvostopenjska analiza in sinteza

Termodinamski pristop – ušcip: toplotni, vodni, masni
– min (vodika, nečistoč, virov brez CO₂),
finančni, upravljanja z dobavnimi verigami itd.

Matematični pristop – matemat. programiranje:
LP, NLP, MINLP¹

Kombiniran pristop – dvostopenjska integracija:
ušcipna analiza + (MI)NLP

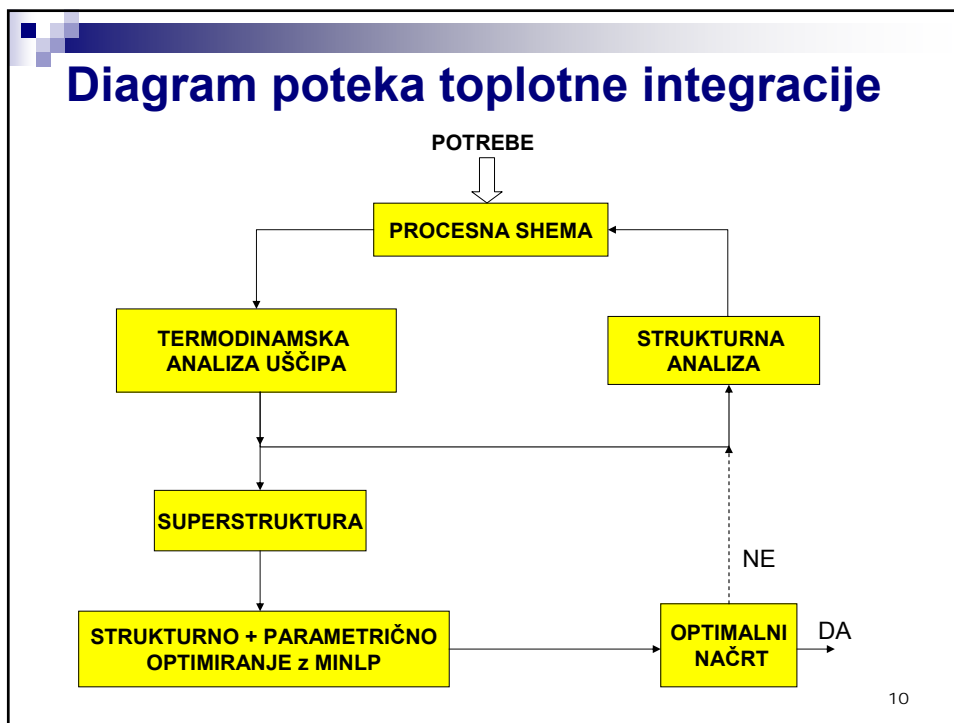
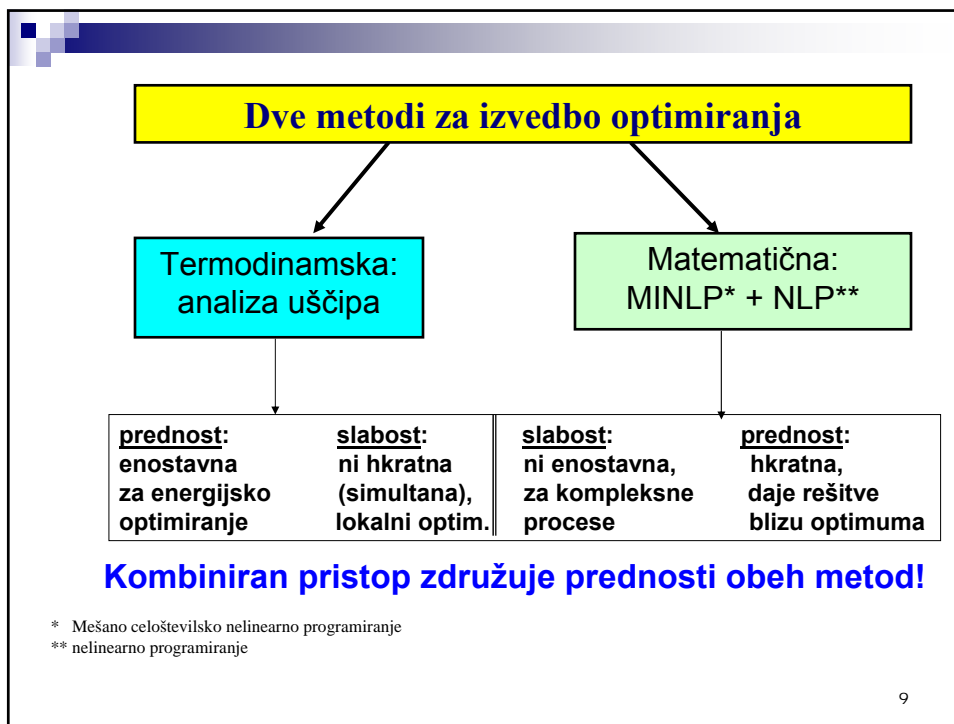
Razlikuj: energijski in energetski

OTP – omrežje toplotnih prenosnikov:

- prenosniki so: menjalniki, grelniki in hladilniki

¹MINLP – mešano celoštevilsko nelinearno programiranje

8



Toplotna integracija – analiza uščipa

Toplotna integracija:

- je odlična za razumevanje strukture in parametrov
- zmanjša porabo energije,
- zmanjša emisije CO₂ – učinek toplogrednih plinov, zato je zelo visoko na prioritetni lestvici.

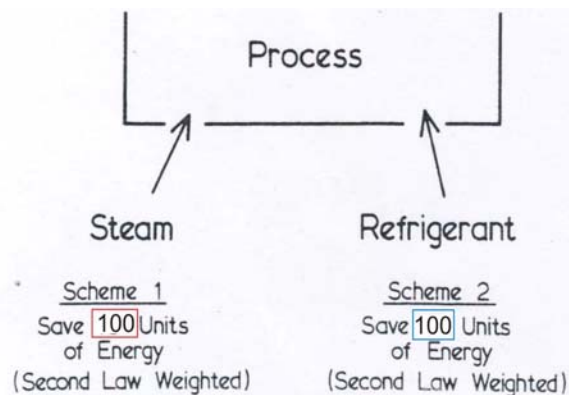
Analiza uščipa omogoča:

- *večje obtakanje energije*
- je primerna za konceptualno načrtovanje, ker
- daje hkrati dobre ideje in zožuje polje iskanja optimuma, a
- ne zagotavlja optimuma, daje pa 'superstrukturo'

Sledi ji hkratno strukturno in parametrično optimiranje 'superstrukture' z uporabo MINLP

11

Učinkovitejša raba energije, npr. dveh vrst prihrankov v kotlovnici



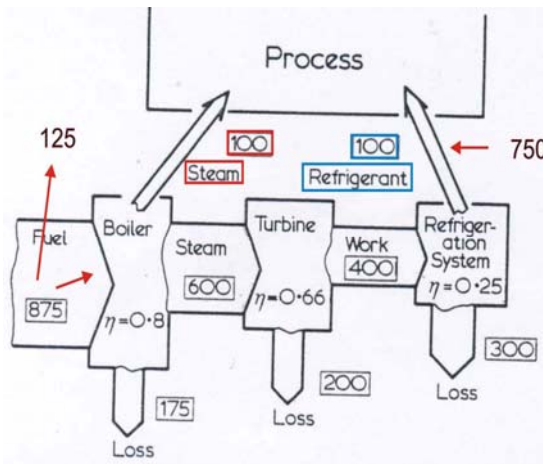
Dve varianti:

1. Prihrani 100 enot **pare**
2. Prihrani 100 enot **hladiva**

Obe enaki investiciji – navidez enako privlačni?

12

Učinkovitejša raba energije – neučinkovitosti se pomnožujejo

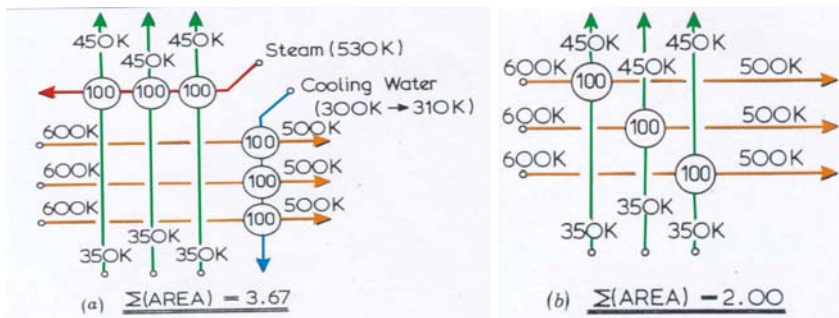


1. 100 enot pare:
 $\eta(\text{gorenja v kotlu}) \eta = 0,80 = 80 \%$;
 prihranek goriva:
 $100/0,8 = 125$ enot

2. 100 enot hladiva:
 η_i se množijo;
 prihranek goriva:
 $100/(0,25 \cdot 0,66 \cdot 0,8) = 750$ enot

13

Omrežje toplotnih prenosnikov – toplotna integracija v procesu



a) Potrebujemo 3 grelnike in 3 hladilnike, $A = 3,67 \text{ m}^2$

b) Ne potrebujemo niti pare niti hladilne vode, zadoščajo 3 toplotni prenosniki, $A = 2,00 \text{ m}^2$ – nižja investicija!

14

Praktični rezultati analize energijskega uščipa – dosežki ICI

- Energija: 6–60 % prihranki
- Investicija: do 25 % prihranki
- Donosnost investicije: do 4-krat večja
- Pogosto je mogoče prihraniti energijo in kapital
- Včasih je mogoče izboljšati fleksibilnost procesa
- Skrajša se čas načrtovanja
- Uporabna za novogradnje in rekonstrukcije
- Uporabna za široko območje tehnologij

Osnove ušcipne analize

Diagram: *temperatura / entalpijski tok*:

a) **Sestavljeni krivulji (SK)**

b) **Velika sestavljena krivulja (VSK)**

Ušcip, minimalna (gonilna) temperaturna razlika, ΔT

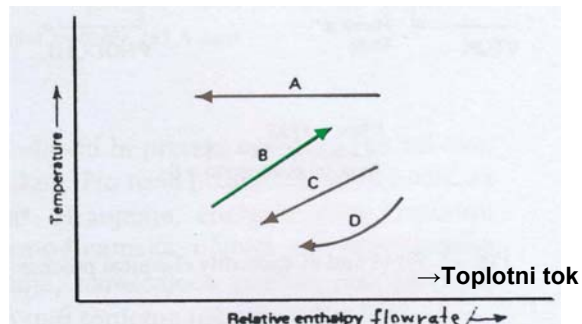
Oddajniki (donorji) energije, npr. **para**, in
sprejemniki (akceptorji) energije, npr. **hladivo**

Latentna toplota → vodoravna črta v diagramu T/I

- izparevanje, kondenzacija
- izotermna operacija, npr. reakcija

Zaznavna toplota → poševna črta v diagram T/I

Prikazovanje tokov v diagramu T/I



Slika 3 prikazuje vrste tokov:

- A - kondenziranje (čiste komponente), npr. pare; vrenje ima tudi vodoraven (izotermen) potek,
- B - segrevanje toka s $C_p = \text{konst.}$,
- C - hlajenje toka s $C_p = \text{konst.}$,
- D - hlajenje večkomponentne zmesi, ki spreminja fazo

17

Izrazje pri analizi uščipa (ISO 31)

Toplota, Q (J)

Toplotni tok, Φ (W = J/s)

Entalpija, H (J)

Entalpijski tok, I (W)

Toplotna konduktanca, R (W/K):

$$R = \Delta T / \Phi = C_m F = c_p q \text{ [J/(kg K)} \cdot \text{(kg/s)] = [W/K]}$$

kjer sta: C_m molska toplotna kapaciteta (J/(mol K))

F množinski tok (mol/s)

'pretok toplotne kapacitete', CF , CP , C_p

Diagrami:

OTP: temperatura/toplotni tok,

T/Φ

SK: temperatura/entalpijski tok,

T/I

VSK: temperatura/razlika entalpijskih tokov,

$T/\Delta I$

SKPS: temperatura/entalpijski tok +

+ razlika entalpijskih tokov,

$T/(I+\Delta I)$

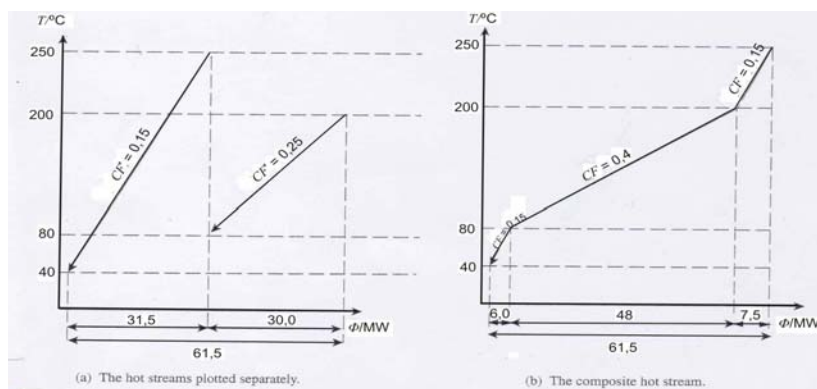
18

Primer procesa s štirimi tokovi – dvema hladnima in dvema toplima

Stream	Type	Supply temperature $T_s/^\circ\text{C}$	Target temperature $T_t/^\circ\text{C}$	ϕ/MW	Heat capacity flowrate $CF/(\text{MW/K})$
1. Reactor 1 feed	Cold	20	180	32.0	0.2
2. Reactor 1 product	Hot	250	40	-31.5	0.15
3. Reactor 2 feed	Cold	140	230	27.0	0.3
4. Reactor 2 product	Hot	200	80	-30.0	0.25

19

Sestavljanje toplih tokov v SK_t

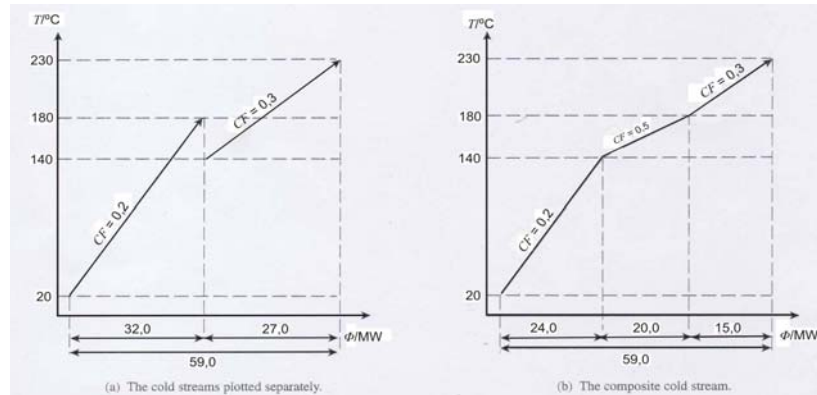


a) Ločena topla tokova
31,5 MW in 30 MW

b) Sestavljena topla tokova, SK_t ,
 CF je naklon krivulje

20

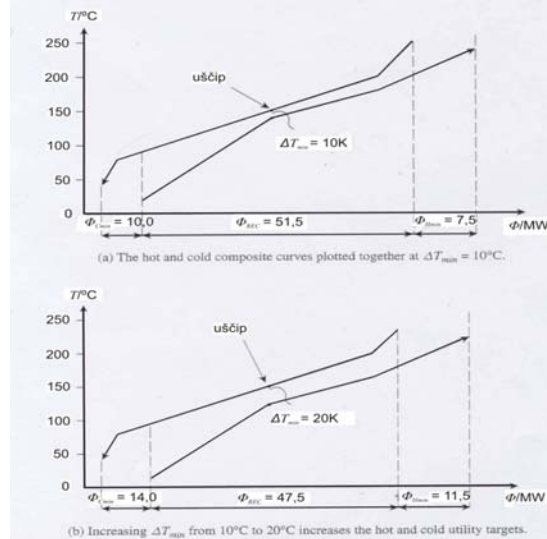
Sestavljanje hladnih tokov v SK_h



a) Ločena hladna tokova, b) Sestavljena hladna tokova, SK_h

21

Sestavljeni krivulji in uščip/pinch



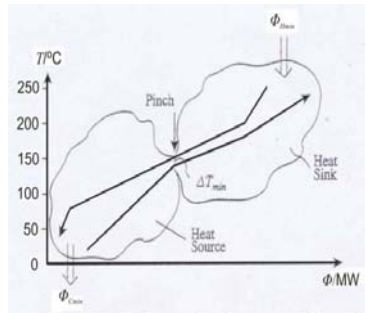
Krivulji lahko premikamo horizontalno, s tem spreminjamo $\Delta_{\min} T$

a) $\Delta_{\min} T = 10 \text{ K}$: Večja toplotna menjava (51,5 MW), manjša poraba pare (7,6 MW) in hladilne vode (10,0 MW)

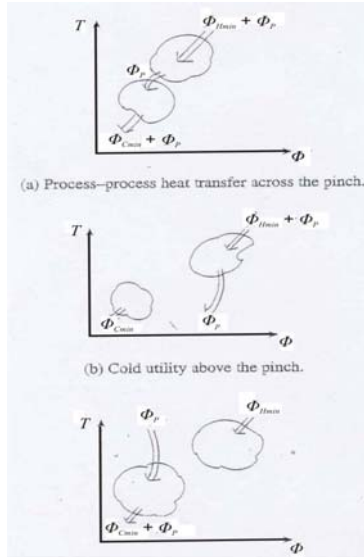
b) $\Delta_{\min} T = 20 \text{ K}$: t. menjava 47,5 MW, para 11,5 MW, hladilna voda 14,0 MW

22

Pomen uščipa za načrtovanje

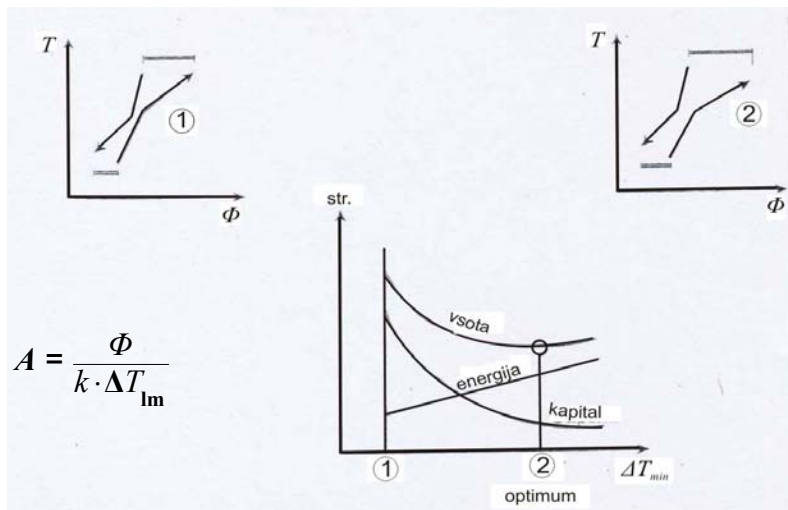


- Toplotni **ponor** – nad uščipom,
 toplotni **vir** – pod njim. **Pravila:**
- ne prenašaj toplote skozi uščip,
 - ne hladi nad temperaturo uščipa,
 - ne segrevaj pod temp. uščipa!



23

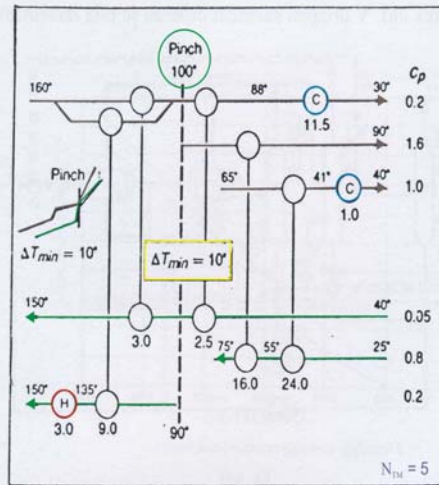
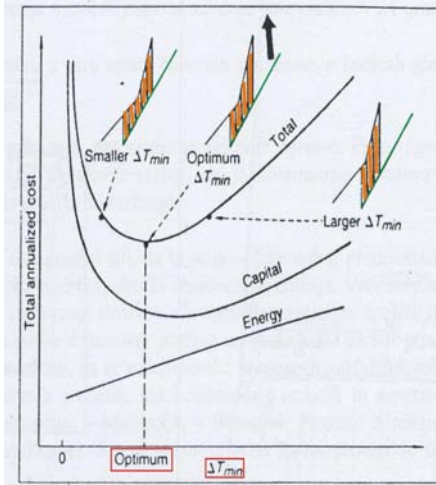
**Večji $\Delta_{min} T \rightarrow$ višja Φ (vročega in mrzlega po-
 g. sredstva), nižja A (investicija v TP) – $\Delta_{opt} T?$**



$$A = \frac{\Phi}{k \cdot \Delta T_{lm}}$$

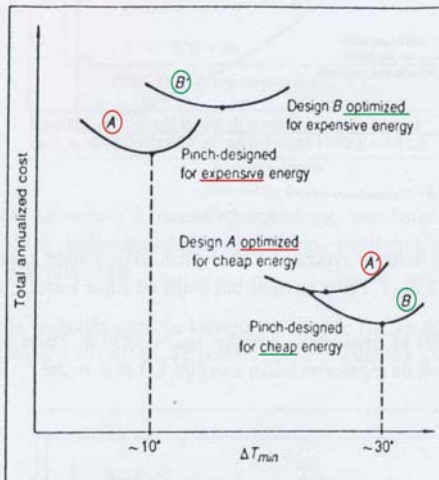
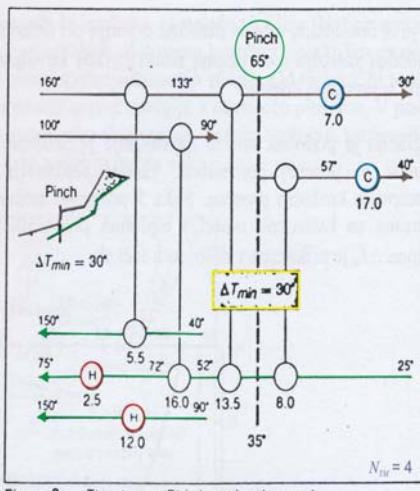
24

Optimalni $\Delta_{min}T$ Mrežni diagram



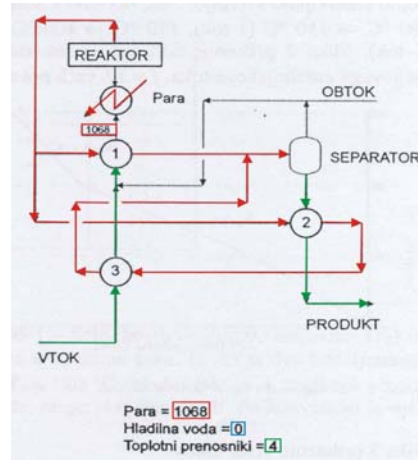
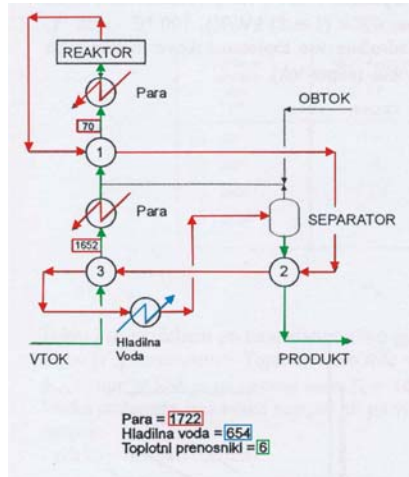
25

Cena energije vpliva na $\Delta_{min}T$ in s tem na (optimalni) načrt OTP



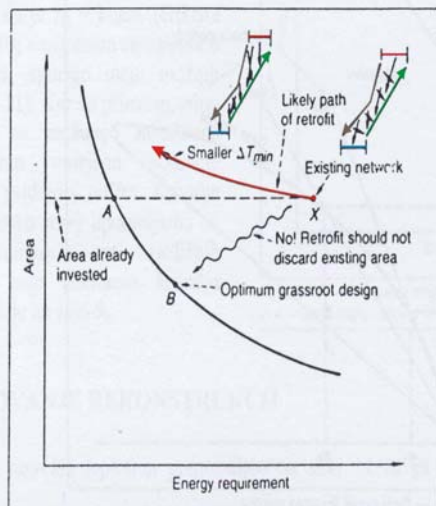
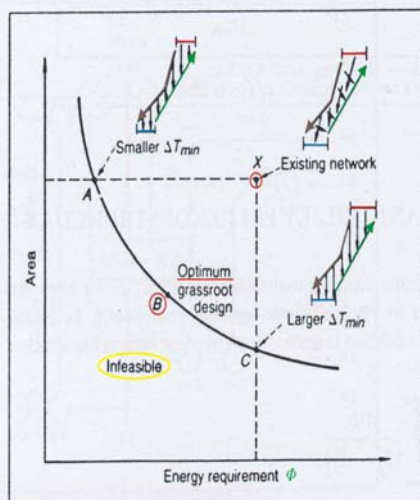
26

Primer toplotne integracije kemijskega procesa – 40 % manj energije, manj enot



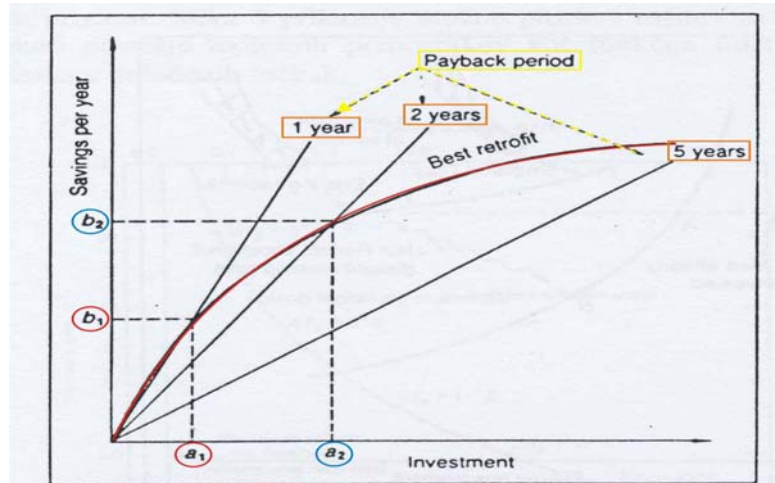
27

Rekonstrukcija obstoječega OTP z diagramom *ploščina / toplotni tok*



28

Diagram *investicija / prihranki* za različne vračilne roke 1–5 a (let)



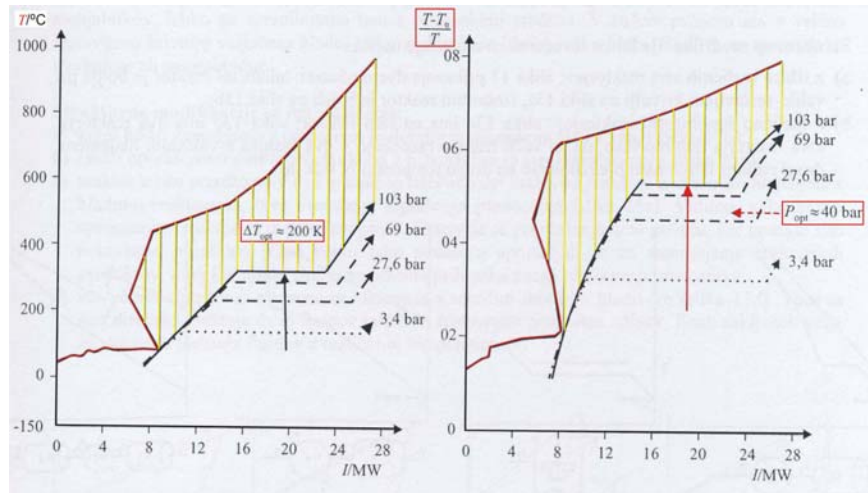
29

Sestavljeni krivulji pogonskih sredstev in velika sestavljena krivulja, VSK

Diagram *temperatura / entalpijski tok* s sestavljenima krivuljama **ni primeren** za izbiro **pogonskih sredstev** (tlaka pare, načina hlajenja)

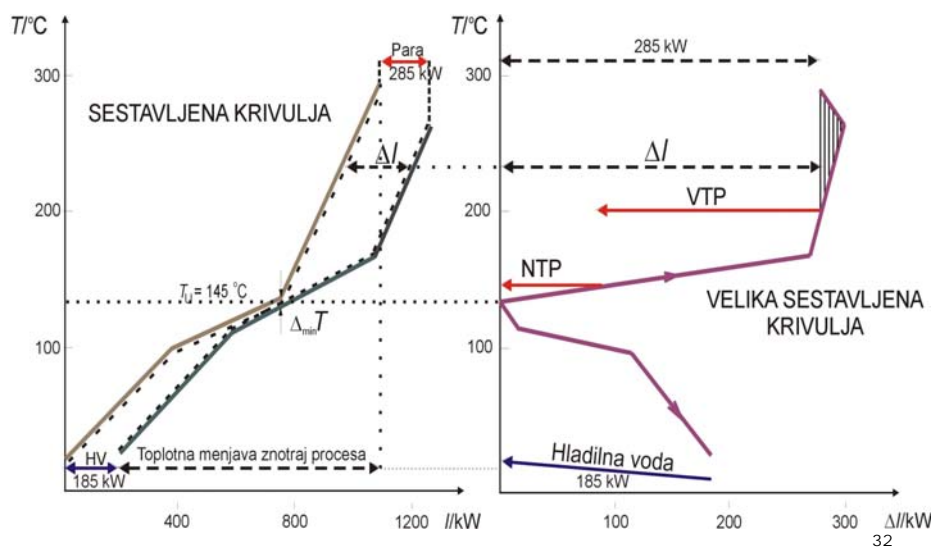
- Uporabljamo **sestavljene krivulje pogonskih sredstev**, ki vključujeta tudi **kemijske reaktorje** ali
- diagram *temperatura / razlika entalpijskih tokov* ali **veliko sestavljeno krivuljo, VSK** z variantami
 - Cepljena VSK, CSK
 - Uravnotežena VSK, UVSK
 - **Razširjena VSK, RVSK**

Sestavljeni krivulji pogonskih sredstev – kem. reaktorjev in kotla v CC (H_2SO_4)



31

Sestavljeni krivulji in velika sestavljena krivulja



32

Oddajniki in prejemniki energije, razvrščeni po svojih cenah

Cena	Energetski donorji	Energetski akceptorji
Donosen		Proizvodnja pare
Zastorj	Izpušni plini, $T > T_{atde}$ Vroča voda, vroča vhodna para Kondenzator destilacijske kolone Eksotermni reaktor	Izpušni plin, $T < T_{atde}$ Topla voda, hladni vtok Vretnik destilacijske kolone Endotermni reaktor
Poceni do drago	NT para Tekoče gorivo Plinasto gorivo ST para Vroče olje VT para Električna energija	Hladilni stolp Hladna rečna voda Mzla podtalnica Hladiva, kot so: - amoniak - propilen - etilen

33

Posebne vrste velike sestavljene krivulje

Čepljena VSK (CVSK):

procesna(e) enota(e) so čepljena na VSK
(separator, toplotna črpalka, eksotermni reaktor)

Uravnovežena VSK (UVSK):

procesna(e) enota(e), vstavljena v VSK

Razširjena VSK (RVSK):

procesna(e) enota(e) postavljena ob VSK

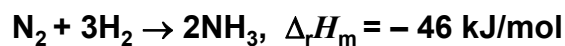
Podobno kot pri načrtu stavbe:

tlorisi, prerez, fasade, ostrešje

34

Analiza procesa z uporabo RVSK

Primer: proizvodnja amoniaka



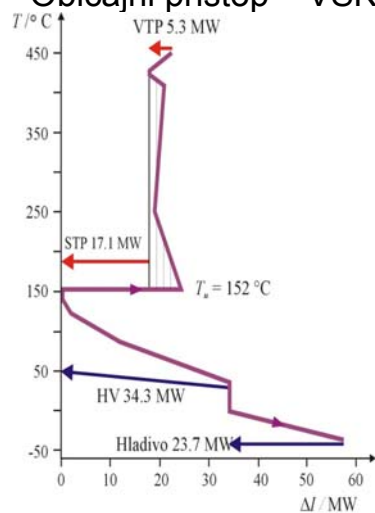
Koristi:

- potrebe po pari lahko zmanjšamo do 87 %
- potrebe po procesni energiji lahko zadovoljimo s procesom samim
- izpust CO₂ v okolje lahko zmanjšamo do 77 % (27 kt/a) – kjotski sporazum!
- dodatni čisti dobiček: 3,6 MEUR/a

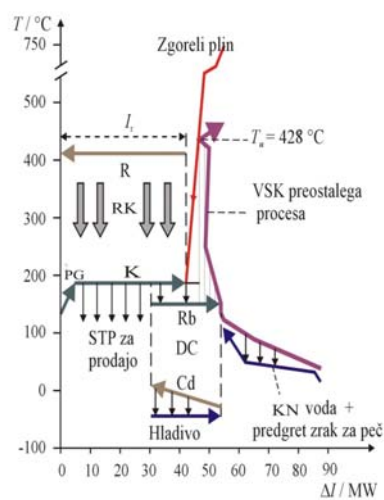
35

Uporaba tehnologije uščipa:

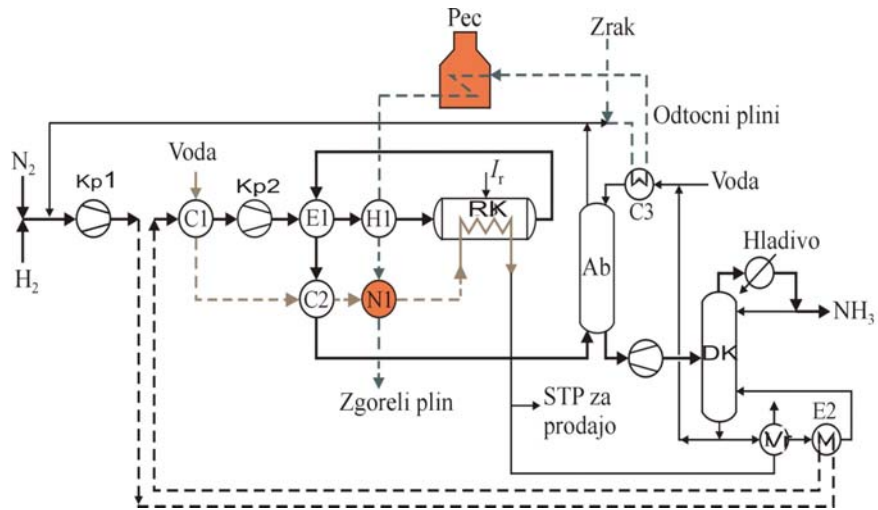
Običajni pristop – VSK



Tehnika RVSK



Procesna shema modificiranega procesa proizvodnje amoniaka



37

Toplotni stroji, npr. parna turbina

1. zakon termodinamike:

$$P = \Phi_v - \Phi_m$$

2. zakon termodinamike:

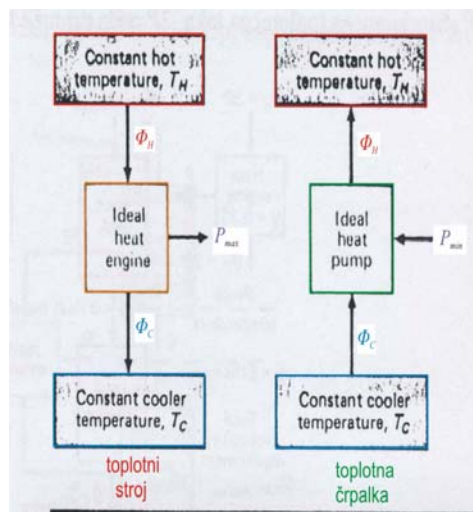
$$P \leq \frac{T_v - T_m}{T_v} \Phi_v = \eta_t \Phi_v$$

η_t = termonamska ali Carnotova učinkovitost

Realni (ireverzibilni) stroj:

$$P = \eta_m \eta_t \Phi_v$$

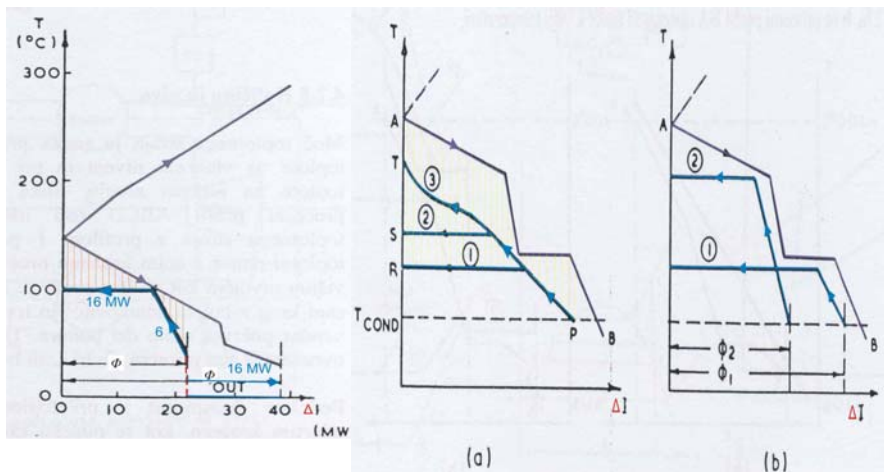
mehan. učink.: $1 > \eta_m \geq 0$



38

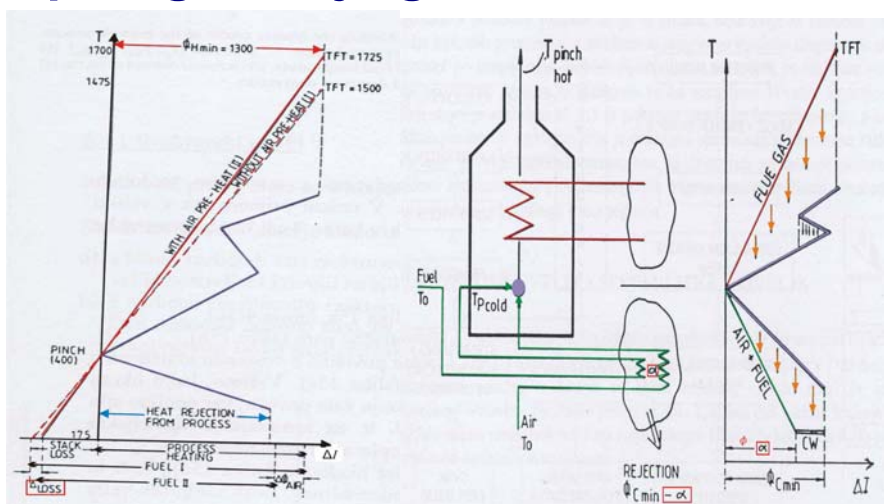
Toplotni stroj pod uščipom

Izbira tlaka in izbira količine/nivoja tlaka



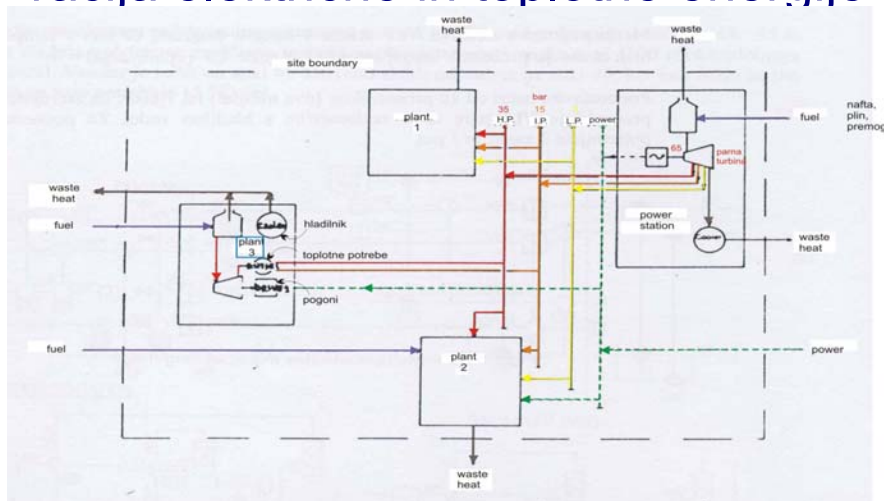
41

Integracija peči s procesom – predgrevanje goriva in zraka



42

Integracija moči v proces – kogeneracija električne in toplotne energije

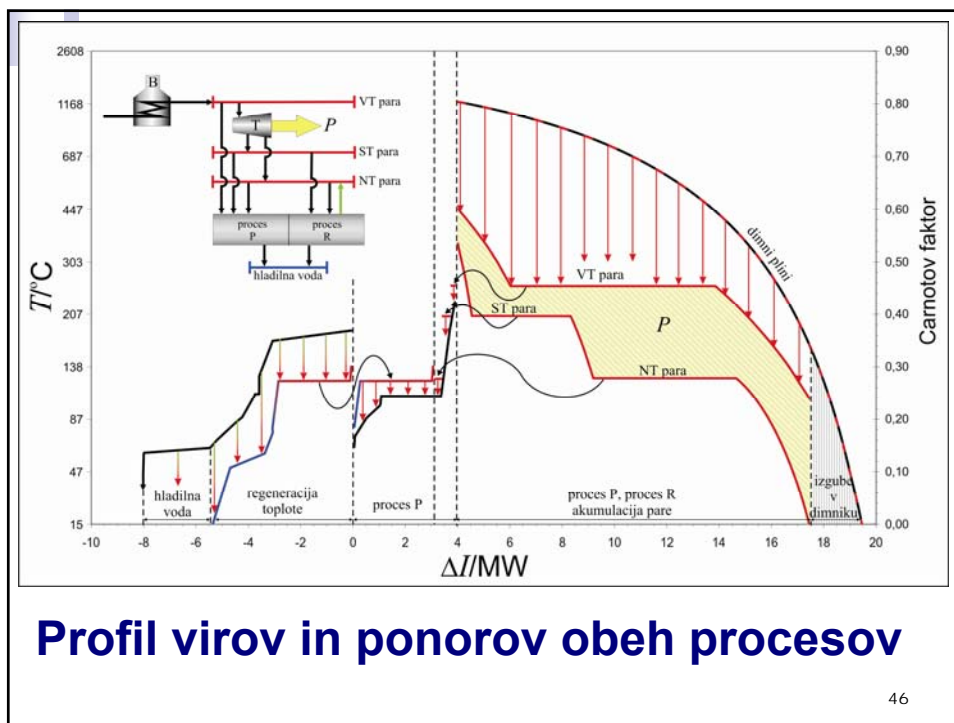
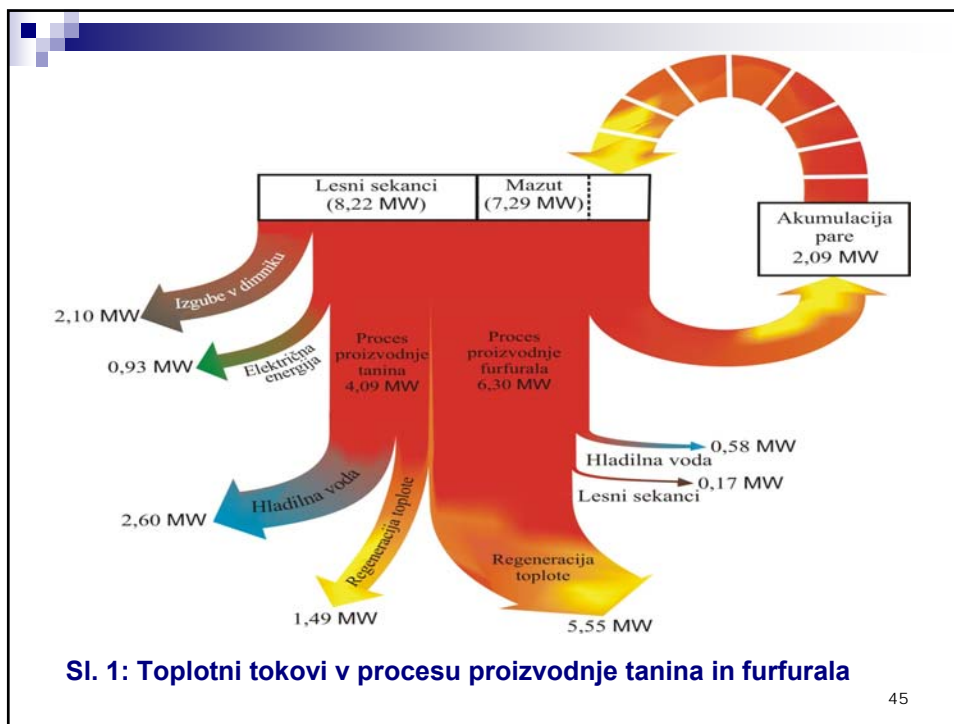


43

Optimiranje procesa za proizvodnjo specialnih kemikalij (Tanin Sevnica)

- Računalniška simulacija procesa
- Energetski pregled procesa vključno s sistemom kogeneracije
 - Energijska integracija – “Uščipna analiza”
 - Koncept SK, VSK, CVSK, RVSK
- Toplotna integracija dveh procesov
- Ekonomska analiza predlaganih modifikacij

44



Rezultati

Predlagana rekonstrukcija procesov P in R:

- dodatni toplotni prenosnik za **predgrevanje zraka** (proces P)
- namesto hlajenja s hladilno vodo – **predgrevanje kotlovene vode** (proces R)

Predlagana rekonstrukcija kogeneracijskega sistema:

- **Nov visokotlačni kotel (100 bar)**
- **Nova turbina (2,3 MW)**

S predlagano rekonstrukcijo bi dosegli:

- **9 % zmanjšanje porabe VTP (procesa P in R)**
- **5 % zmanjšanje porabe STP (procesa P in R)**
- **100 % regeneracijo odpadnega entalpijskega toka v procesu R**
- **2,4-kratno povečanje proizvodnje električne energije.**

Ekonomska analiza:

Modifikacija	Investicijska sredstva/ EUR	Letni prihranki/ (EUR/a)	Doba vračanja/ a
Energijska integracija	47 400	104 500	0,45
Kogeneracija	1 438 700	619 000	2,32

47

Toplotna črpalka

1. Zakon termodinamike:

$$P \geq \frac{T_v - T_m}{T_m} \Phi_m = \eta_t \Phi_m$$

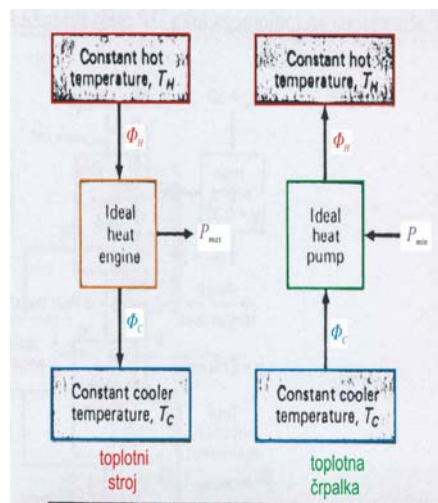
η_t – koeficient obratovanja
 $\varepsilon = 1/\eta_t$ – grelna število

Realna toplotna črpalka:

$$P = \eta_t \Phi_m / \eta_m$$

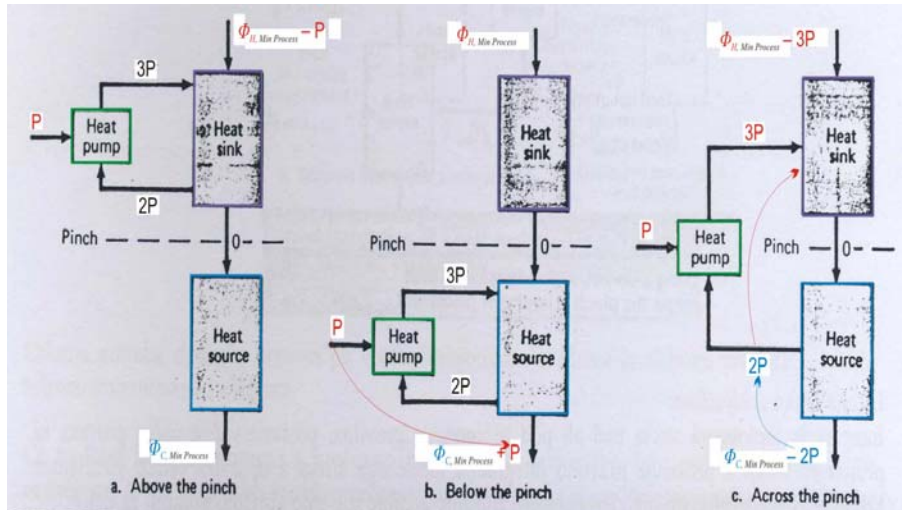
Mehanska učinkovitost:

$$1 > \eta_m \geq 0$$



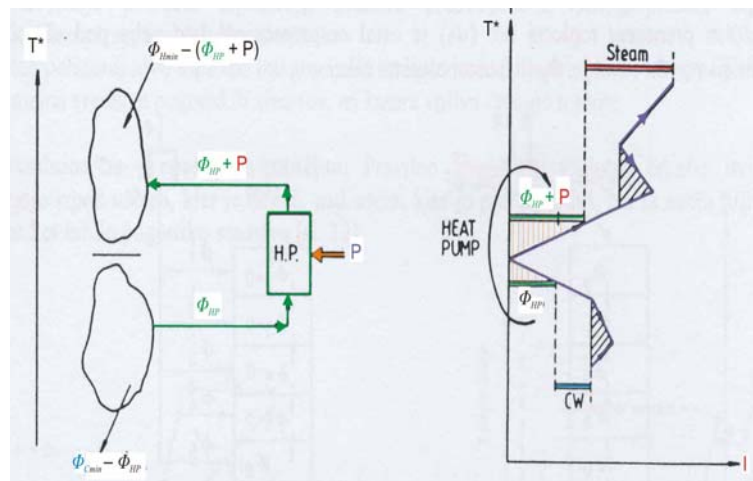
48

Integracija toplotne črpalke glede na ušcip – najbolje je čez ušcip



49

Toplotna črpalka v procesu



50

Energijske črpalke

Toplotna črpalka:

Električna moč,
para
 P (W)

$$\Phi_{\text{pod}} + P = \Phi_{\text{nad}}$$

Kemijska črpalka (eksotermni reaktor):

Kemijska moč,
tok reakcijske entalpije

$$\Delta_{\text{reakcije}} I = \Delta_r H_m F = [(J/\text{mol})(\text{mol/s})] = W$$

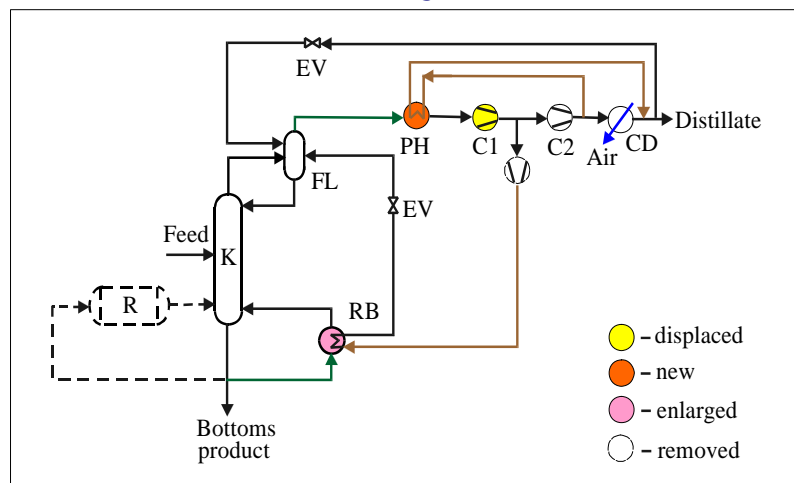
$$I_{\text{pod}} + \Delta_r I = I_{\text{nad}}$$

Primer:

- odprta mehanska toplotna črpalka – frakcionator (destilacijska kolona) mešanih butanov
- dodatni dobiček: 1,2 MUSD/a (27 % znižanje stroškov)

51

Odprta mehanska toplotna črpalka C-RB v destilacijski koloni K



Zaključki

Omejenost neobnovljivih virov energije in zaščita okolja zahtevata dejanja. Potrebno je:

- minimirati v procesu nastajajoče odpadke in varovati zdravje,
- zmanjšati uporabo goriv in električne energije,
- obtakati vse več energije in snovi,
- kontinuirno optimirati parametre obratov glede na tržne in tehnološke spremembe
- uvajati poligeneracijo v procesih.

Uščipna analiza z izboljšanim modeliranjem in optimizacijo je dobro orodje, ki omogoča velike prihranke energije ob sorazmerno nizkih vračilnih rokih.

53

Hvala za pozornost

Prof. dr. Peter Glavič

peter.glavic@uni-mb.si

54