



Szlovénia-Magyarország  
Határon Átnyúló Együttműködési Program  
2007-2013

# Folyamatintegráció és optimalizálás

**Dr. Jiří Jaromír Klemeš, Dr. Petar Sabev Varbanov, Andreja Nemet**

*„Információs és oktató öko-központ kis- és  
középvállalkozások támogatására hálózatok  
kialakításakor, innováció valamint környezetbarát  
termékek, eljárások és szolgáltatások  
fejlesztésekor és értékesítésekor”  
rövid név: ECO-HUB, azonosító: SI-HU-2-2-012*

2014. január



PROJEKT

Operatív program Szlovénia – Magyarország 2007 – 2013

## Folyamatintegráció és optimalizálás

ÍRTÁK:

Dr. Jiří Jaromír Klemeš

dr. Petar Sabev Varbanov

Andreja Nemet

KIADÓ

AZ ECO-HUB PROJEKT VEZETŐ PARTNERE

MARIBORI EGYETEM, KÉMIA ÉS VEGYÉSZMÉRNÖKI KARA

LEKTORÁLÁS

Conversus

GRAFIKAI SZERKESZTÉS ÉS TÖRDELÉS

[www.agd.si](http://www.agd.si)

NYOMDA

še ne vemo

PÉLDÁNYSZÁM

500 példány

A projekt az Európai Unió támogatásával, az

Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg



# Tartalom

oldal:

9	<b>1. fejezet Az ipari folyamatok fenntarthatósága</b>
10	<b>2. fejezet Folyamatintegráció</b>
10	2.1. Bevezető: A folyamatintegráció szükségessége
10	2.2. Mi a folyamatintegráció?
11	2.3. A folyamatintegráció történelme és fejlődése
11	2.4. Pinch technika és hővisszanyerés targeting: termodinamikai alapok
13	2.5. Szupertargeting: teljes körű HH célmeghatározása
13	2.6. A pinch ötlet átdolgozása a HH módosítására (angolul: retrofit)
13	2.7. Anyagvisszanyerés és vízkezelő hálózatok
14	2.8. A folyamatintegráció előnyei
14	2.9. A folyamatintegráció szerepe az ipar fenntarthatóságában
14	2.10. Összegzés
15	<b>3. fejezet Pinch-analízis az energiahatékonyság növelésére</b>
15	3.1. Bevezetés a hőcserébe és a hővisszanyerésbe
15	3.1.1. Hőcserecsatlós
17	3.1.2. A hőcserecsatlós használata
17	3.2. A folyamatintegráció alapjai

17	3.2.1. Folyamat- és hőintegráció
17	3.2.2. A folyamatintegráció hierarchiája
18	3.2.3. Teljesítménycélok
18	3.2.4. A hővisszanyerési feladat azonosítása
20	3.3. Alap pinch technológia
20	3.3.1. Az energiai célok meghatározása
20	3.3.1.1. Hővisszanyerés egy meleg és egy hideg áram között
21	3.3.1.2. A hővisszanyerés értékelése több áram esetében: összetett hővonalak
24	3.3.2. A hővisszanyerési pinch
25	3.3.3. Numerikus célmeghatározás: hőkaszkád-számítás
28	3.3.4. Threshold feladatok
30	3.3.5. Többszörös segédközeg használatának célmeghatározása
30	3.3.5.1. Segédközeg elhelyezés: Grand Composite Curve (GCC)-fő hővonal
31	3.3.5.2. A fő hővonal (GCC) szerkesztése
32	3.3.5.3. A segédközeg elhelyezésének a lehetőségei
36	3.3.6. Beruházás és teljes költség célmeghatározása
37	3.3.7. Az energaintenzív folyamatok hőintegrálása
37	3.3.7.1. Hőerőmű
39	3.3.7.2. Hőszivattyú
42	3.3.7.3. Desztillációs folyamatok és más elválasztók
43	3.3.7.4. Folyamatmódosítások
45	<b>4. fejezet HH szintézise</b>
45	4.1. A pinch tervezési módszer
45	4.1.1. A HH ábrázolása
47	4.1.2. A tervezési eljárás
50	4.1.3. A tervezés kiegészítése
54	4.1.4. A hálózat fejlesztése

55	4.2. A matematikai programozás felhasználása
55	4.2.1. MINLP-megközelítés
56	4.2.2. Hibrid megközelítés
57	4.2.3. A HH szintézismódszereinek összehasonlítása
58	<b>5. fejezet Total Site energiaintegrálás</b>
58	5.1. Total Site adat kivonása
59	5.2. Total Site Profiles
61	5.3. Hővisszanyerés a gőzrendszeren keresztül
63	5.4. Az áram kogenerálása
64	5.5. Előrehaladott Total Site optimalizálás és elemzés
66	<b>6. fejezet Új és módosított tervezés, gazdasági feltételek hatásai</b>
67	6.1. A hálózat optimalizálása
67	6.2. A hálózati pinch
70	<b>7. fejezet Anyagintegráció</b>
70	7.1. Bevezetés a vízintegrációba
71	7.2. A vízfelhasználás minimalizálása és a víz újrahasznosításának a maximalizálása
71	7.2.1. Törvények
71	7.2.2. Az elérhető legjobb technika
72	7.2.3. Vízlábnym
74	7.2.4. A víz felhasználása és a szennyvíz minimalizálása
74	7.2.4.1. A mértékegységek áttekintése
74	7.2.4.2. Szennyvízkezelés
75	7.3. Bevezetés a víz pinch-analízisbe
77	7.4. A víz minimalizálása – matematikai optimalizálással
77	7.4.1. A matematikai optimalizálás használata
78	7.4.2. Szemléltető példa: sörgyár
79	7.5. Összefoglaló

80	<b>8. fejezet A megújuló energia integrálása</b>
80	8.1. Áttekintés
81	8.2. Az energiaigény és ellátás tulajdonságai
81	8.2.1. Energiaellátási források – besorolás
81	8.2.2. Energia-felhasználó – besorolás
82	8.2.3. Az igények változása
83	8.2.4. A megújuló energiaforrások változékonysága
84	8.3. Az eszközök és megoldások követelményeinek a jellemzője
84	8.4. Hőenergia-tároló
85	8.5. Az integrálás architektúrája
88	<b>8. Referenciák</b>

oldal:

12	2.1. ábra: A hőviszanyerés célmeghatározás összegzése
16	3.1. ábra: Folyamatábra a hőcsere csatolására
17	3.2. ábra: Hagymadiagram
18	3.3. ábra: Adatkinyerés – A példa folyamatábrája
19	3.4. ábra: Adatkinyerés – fűtés és hűtésigények
20	3.5. ábra: Termodinamikai korlátok a hőviszanyerésre
22	3.6. ábra: A meleg hővonalak szerkesztése
22	3.7. ábra: A meleg és hideg összetett hővonal $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$
23	3.8. ábra: A hőviszanyerési célok változtatásai a $\Delta T_{\min}$ -vel
24	3.9. ábra: A beruházás és energiaköltségek közötti kompromisszum, mint a $\Delta T_{\min}$ függvénye
24	3.10. ábra: A pinch által meghatározott folyamat hőviszanyerési korlátai
24	3.11. ábra: A hőviszanyerési feladat kettéválasztása
25	3.12. ábra: More in – more out
26	3.13. ábra: A hőmérséklet-shifting a megvalósítható hőáramlás érdekében
28	3.14. ábra: A hőkaszkád a 3.2. táblázatban bemutatott folyamat adatai alapján
29	3.15. ábra: Threshold feladatok
29	3.16. ábra: Threshold HH tervezési esetek
30	3.17. ábra: Választások a meleg és hideg segédközegekre (amended after CPI 2004 and 2005)
31	3.18. ábra: A GCC szerkesztése a 3.2 táblázatban felsorolt áramokra
32	3.19. ábra: A GCC (baloldali) és a SCC (jobboldali) közötti összefüggés a 3.2 táblázatban bemutatott áramokra
33	3.20. ábra: A GCC használata célmeghatározásra – egy gőzsínt vagy többszíntű gőz használatára
33	3.21. ábra: A nem-izotermikus fűtőközeg tulajdonságai
34	3.22. ábra: A forró olajak, mint segédközegek elhelyezési korlátai
35	3.23. ábra: A gőz generálása a pinch alatt
35	3.24. ábra: A GCC zsebeinek segédközegre való lecserélése
35	3.25. ábra: A tiszta hűtőközegszíntek elhelyezése
36	3.26. ábra: Az LP-gőz segédközeg pinch elhelyezése
37	3.27. ábra: Entalpiaintervallumok és a terület célmeghatározása
37	3.28. ábra: A hőerőmű konfigurációja
38	3.29. ábra: A hőerőmű megfelelő elhelyezése
38	3.30. ábra: A gőzturbina integrálása a pinch felett
39	3.31. ábra: A hőszivattyú konfigurálása
39	3.32. ábra: A hőszivattyú elhelyezése a hőviszanyerés feladatában
40	3.33. ábra: A hőszivattyú méretezésének az eljárása
40	3.34. ábra: A hőszivattyú méretezésének a példája: kezdeti adatok
41	3.35. ábra: Hőszivattyú-méretezési példa: első próbálkozás
41	3.36. ábra: Hőszivattyú-méretezési példa: második próbálkozás
42	3.37. ábra: Hőszivattyú-méretezési példa: harmadik próbálkozás
42	3.38. ábra: Hőszivattyú elhelyezése a pinch-en keresztül



42	3.39. ábra: Hűtőrendszer
42	3.40. ábra: Desztillációs oszlop: T-H ábrázolás
43	3.41. ábra: Desztillációs oszlop: integrálási lehetőségek
43	3.42. ábra: A desztillációs oszlop megfelelő elhelyezése a GCC-ben
44	3.43. ábra: A plusz-mínusz elv
44	3.44. ábra: A meleg áramokat tartsuk melegen, és a hideg áramokat tartsuk hidegen
45	4.1. ábra: Az általános folyamatábra a HH ábrázolására
46	4.2. ábra: A hagyományos HH folyamatábrája
46	4.3. ábra: A HH rácsábrázolása
46	4.4. ábra: A rácsábrázolás és a pinch következményei
47	4.5. ábra: A pinch menti kettéosztás a 3.2. táblázatban lévő áramokra
47	4.6. ábra: A pinch tervezési elv
48	4.7. ábra: Megvalósíthatatlan hőcserecsatolás a pinch felett
48	4.8. ábra: Megvalósítható hőcserecsatolás a pinch felett
49	4.9. ábra: CP táblázatok
50	4.10. ábra: A kipipálás heurisztikája
50	4.11. ábra: A HH tervezése a pinch felett
51	4.12. ábra: A HH tervezése a pinch alatt
51	4.13. ábra: Teljes HH terv
52	4.14. ábra: A pinch feletti elágazás a $NH > NC$
52	4.15. ábra: A pinch alatti elágazás a $NC > NH$
52	4.16. ábra: Elágazások annak érdekében, hogy a CP-értékek lehetővé tegyék a nélkülözhetetlen csatolásokat
53	4.17. ábra: Elágazás és (triviális) kipipálás
53	4.18. ábra: Elágazás és előrehaladott kipipálás
54	4.19. ábra: Az elágazás eljárása a pinch felett
55	4.20. ábra: Ciklus és segédközeg út a HH-ban
56	4.21. ábra: Spagetti-szuperstruktúra töredéke
58	5.1. ábra: Tipikus ipari total site
60	5.2. ábra: A total site profile szerkesztése
61	5.3. ábra: Total site összetett vonal
62	5.4. ábra: A total site hővisszanyerésének a célmeghatározása
64	5.5. ábra: Optimalizált segédközeg-rendszer folyamatábra
65	5.6. ábra: Marginális gőzárak a segédközeg-rendszerre, amely az 5.5. ábrán van bemutatva
67	6.1. ábra: Létező HH
68	6.2. ábra: HH az E4 hőcserélő hozzáadásával a célok elérésére
76	7.1. ábra: A korlátozó összetett vonal és a víz pinch
77	7.2. ábra: A víz pinch-módszerrel tervezett vízkezelési rendszere
78	7.3. ábra: A víz újrafelhasználásának és újrahasznosításának a szuperstruktúrája a sörgyárban (Tokos és Novak Pintarič nyomán, 2009)
78	7.4. ábra: A víz újrafelhasználási lehetőségei a sörgyárban
83	8.1. ábra: Tipikus lakossági villamosenergia-igény 24 órás cikluson belül ( Bance nyomán, 2008)
85	8.2. ábra: Tároló típusok a hőmérsékletváltozás alapján (Nemet et. al nyomán, 2012b)
86	8.3. Helyileg integrált energiaszektor (Perry et al. nyomán, 2008)





# 1 Az ipari folyamatok fenntarthatósága

A fenntartható fejlődésre különböző meghatározások léteznek. A fenntarthatóságot úgy is lehet jellemezni, mint az adott rendszer azon kapacitását, hogy fenntartsa az életképességét. Ebben a kontextusban azonban a jelenlegi intézkedéseknek nem szabad károsítaniuk a jövő generációk lehetőségeit, és mérhető mutatókra van szükség ahhoz, hogy biztosítsuk ennek a teljesítését. Az ipari folyamatok releváns indikátora a források felhasználása és a kibocsátás aránya. Ezek a tényezők általában ún. lábnyomokkal vannak kifejezve (De Benedetto és Klemeš, 2009), mint pl. a folyamatok szénlábnyoma és/vagy vízlábnyoma. A szintézis és tervezési feladatok elvégzésekor a mért indikátorokat szükséges a javasolt rendszer teljes életciklusára felhasználni, az életciklus-elemzés részeként.

A lábnyomok azonban csak az ipar alapvető indikátorának (gazdasági teljesítmény) részeként vannak figyelembe véve. Ezen mértékegység költség vagy haszon formájában van jelen, a kiválasztott rendszer határainak függvényében. Környezeti szempontból bármennyire is vonzó egy projekt, ha az gazdaságilag nem megvalósítható, valószínűleg nem kivitelezik. A fenntarthatósági és jövedelmezőségi célokat többféleképpen lehet egyesíteni. A két legtöbbször használt hozzáállás a következő:

1) a lábnyomok kifejezése kizárólag gazdasági szempontból (költséggént), és ezáltal gazdasági célfüggvényként (költség vagy haszon) használatos, illetve

2) többcélú optimalizálás, ahol a lábnyomok és gazdasági indikátorok párhuzamosan vannak értékelve mint elérendő célok.

Miközben a fenntartható fejlődés kifejezés ellentmondásosnak tűnhet nyelvi szempontból, a folyamat a mérnököknek a lehető legjobb fenntarthatósági és gazdasági szempontokból elérhető teljesítményt jelenti. Ebben a folyamatintegráció kulcsfontosságú szerepet kap. A folyamatintegráció elősegíti a fenntartható fejlődést azáltal, hogy a releváns ipari és hozzátartozó folyamatokról jobb megértést nyújt, a rendszerben rejlő kulcsfontosságú tulajdonságok korlátainak a feltárásával, pl. energia- vagy vízszükségletek, valamint tovább kutatja az erőforrások és káros emissziók csökkentésének lehetőségeit, miközben javítja a folyamat gazdaságosságát.



## 2 Folyamatintegráció

### 2.1. Bevezető: A folyamatintegráció szükségessége

Az energia és víz felhasználásának csökkentése, a globális felmelegedés és az üvegházhatású gázok kibocsátása jelentős technológiai, társadalmi és politikai kérdéssé váltak. Ezek a problémák stratégiai fontossággal bírnak, mert szorosan kötődnek az energiaellátáshoz. Számos kutatást végeztek az energia hatékonyságának növeléséről, illetve az üvegházhatású gázok, illékony szerves vegyületek, illetve más szennyező anyagok kibocsátásának csökkentéséről.

1977-ben – reagálva az ipari és társadalmi követelményekre – számos új módszert fejlesztettek ki. Ezek közé tartozik a folyamatrendszer-technika (Sargent, 1979; Sargent, 1983) és a „folyamatintegráció” (Linnhoff et al. 1982, 1994), amelyet nagyon sok más munka követett az UMIST munkacsoporton belül. Mindkét tudományágnak saját konferenciát is szerveznek, mint pl. az ESCAPE (European Symposium on Computer Aided Process Engineering), amelyet az European Federation of Chemical Engineering Working Party on Computer Aided Process Engineering (CAPE) szervez, és a PRES konferencia (Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction; PRES, 2012), amelyet minden évben más-más kémiai és vegyészmérnöki egyesület szervez meg (pl. Magyar Kémiai Egyesület, stb.). Folyamatosan nyilvánvalóvá vált, hogy a források beviteli és az ipari folyamatok kibocsátásai

általában összefüggnek. A példák az alábbi összefüggéseket mutatják:

1. A külső fűtőközeg csökkentéséhez általában egyenértékű hűtőközeg csökkenése társul (Linnhoff and Flower, 1978; Linnhoff et al. 1982, 1994), ez nyilvánvalóan elősegíti a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentését a megfelelő üzemben.
2. A szennyvíz kibocsátása általában a friss bemeneti víz mennyiségének a csökkentéséhez vezet (Wang and Smith, 1994; Bagajewicz, 2000; Thevendiraraj et al. 2003).

A források csökkentése a folyamatban a felhasznált energia és anyagfolyamok újrahasznosításának és újrafelhasználásának növelésével érhető el, a friss anyagok illetve fűtő- és hűtőközeg felhasználása helyett. Azokban az üzemekben, ahol olyan projekteket vezetnek be, amelyek a folyamatok forrásfelhasználásának javítására irányulnak, gazdasági előnyökkel járnak, és ez az üzem nyilvános elfogadtatását is elősegíti. Azonban az ilyen projektet motiválására, elindítására és kivitelezésére megfelelő optimalizálási tanulmányokra van szükség, amelyek az üzemeknek megfelelően ábrázoló modelleken alapulnak.

### 2.2. Mi a folyamatintegráció?

A folyamatintegráció egy módszer-család, különböző áramok folyamatintegrálására – a források vagy a károsanyag-kibocsátás csökkentése érdekében. Elsődlegesen hőintegrációval kezdődött, amelyet az energiatárolás idézett elő az 1970-es években (Hohmann, 1971;

Linnhoff és Flower, 1978; Linnhoff, Mason és Wardle, 1979; Linnhoff et al. 1982; Linnhoff és Hindmarsh, 1983; Linnhoff és Vredeveld, 1984). E energiatakarékos módszert széles körben használták a feldolgozó, illetve villamosenergia-termelő iparban az elmúlt 30 év folyamán.

A folyamatintegráció a Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA-International Energy Agency) definícióját adaptálva (Gundersen, 2000) a következő: szisztematikus és általános módszer az integrált termelési rendszerek tervezésére, az egyes folyamatoktól egészen az ún. Total Site méretekig, különös figyelmet szentelve a hatékony energiafelhasználásnak és a környezeti hatások csökkentésének.

### **2.3. A folyamatintegráció történelme és fejlődése**

A folyamatintegráció területéről a legelső munkák közé tartozik Hoffmann (1971) diszszertációja, amely bevezette a szisztematikus termodinamikán alapuló érvelést – a minimális energiaigények az adott hőcserélő hálózat szintézis problémájának elemzésére. Az 1970-es évek vége felé ezt a munkát Linnhoff és Flower folytatta, akik a Hoffmannféle alapokat felhasználva kifejlesztették a pinch technológia alapjait, amelyet manapság a hőintegrálás alapkövének tekintünk. Mint ahogy az nagyon sokszor előfordul az úttörő innovációkkal, ezt a munkát is nehezen lehetett publikálni. A szerzők elkötelezettsége végül az ötleteik publikálásához vezetett (Linnhoff és Flower, 1978), amelyre azóta a vegyészmérnöki történelem során a legtöbb hivatkozás született. Hasonló munka került függetlenül publikálásra Japánban, de Linnhoff volt az, aki az új koncepciót átvitte az akadémiai szektorból az ipari szektorba. Az első „piros” könyv – Linnhoff et

al. (1982) publikálása – kulcsfontosságú szerepet játszott a hőintegrálás módszerének a terjesztésében. Ez a használati kézikönyv a pinch-analízishez részletezte a folyamat-hálózat tervezésére vonatkozó leggyakoribb feladatokat – beleértve a hőcserélő hálózat szintézisét, a hővisszanyerés célmeghatározását (angolul: targeting), és a számos fűtő- és hűtőközeg kiválasztásához kapcsolódó feladatokat.

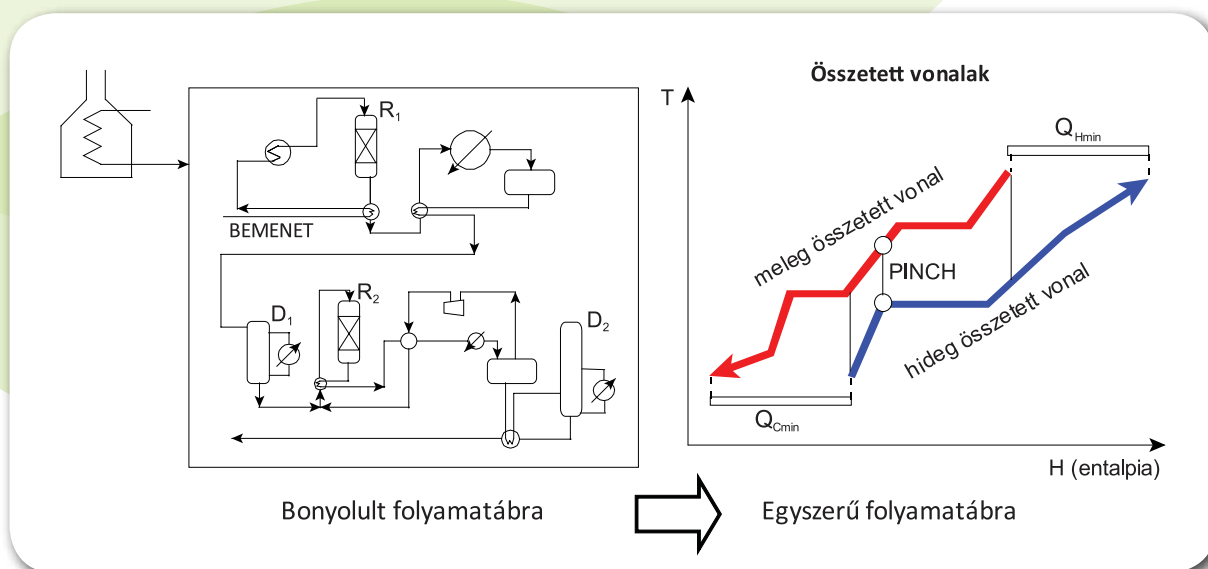
Ezeket a módszereket az UMIST, Department of Process Integration (Folyamatintegrálási Részleg, most Centre for Process Integration, CEAS, The University of Manchester) az 1980-as évek végén és az 1990-es években fejlesztették ki (Linnhoff et al. 1982, 1994, Linnhoff és Vredeveld, 1984; Klemeš et al. 1997; Smith et al. 2000; Smith, 2005). A Linnhoff-féle használati kézikönyv Kemp (2007) által további kiadásra került. A hőintegrálás használatát az élelmiszeriparban az alábbi publikációkban mutatta be Klemeš és Perry (2007a), valamint Klemeš, Smith és Kim (2008). Tan és Foo (2007) sikeresen alkalmazta a pinch-analízis megközelítést az energiaszektorok szénkorlátozott tervezésében.

### **2.4. Pinchtechnika és hővisszanyerés célmeghatározás: termodinamikai alapok**

Furman és Sahinidis (2002) egy átfogó áttekintést állított össze a Hőcserélő Hálózatok (továbbiakban: HH) fejlődéséről az idő folyamán. Ez a kutatás kimutatta, hogy csak enyhe érdeklődést tartottak számon a hővisszanyerés és energiahatékonyság iránt egészen az 1970-es évekig, hiszen addig csak néhány munka jelent meg az említett területről. De az 1973-1974-es olajválság idején, és az 1979-es évben, jelentős előrelépés történt a hőintegrálás terén.

Noha a beruházási költség még mindig fontos tényező volt, a fő hangsúlyt az energia-takarékosságra és a hozzáfűződő költségekre fektették. A hangsúly áttevődésének eredményeként az energiaáramlásra és az energia minőségére (hőmérséklet) egyre több figyelmet fordítottak. A fejlődés eredményeként került kifejlesztésre a pinch technológia, amely az első és a második termodinamikai törvényen alapul (Linnhoff és Flower, 1978). Így a HH szintézise – amely a folyamat-tervezés egyik legfontosabb és legáltalánosabb feladata – lett a kiindulópontja a folyamatintegráció forradalmának és az ipari rendszer tervezésének. Az ipari HH főleg az energiaköltségek megtakarítására szolgáltak. Több éven keresztül a HH tervezési módszere többnyire a heurisztika volt, ami a nagyszámú permutáció – amellyel a szükséges hőcserélők kerültek elrendezésre – miatt volt szükséges. Masso és Rudd (1969) – úttörő munkájuk során – definiálta a HH szintézisének feladatát; a cikkben a heurisztikán alapuló evolúciós szintézist javasolták.

A Furman és Sahinidis (2002) által közzétett cikk magába foglal sok részletet, beleértve a legelső ismert HH-kal foglalkozó tudományos cikket (Ten Broeck, 1944) is. A pinch hővisszanyerési koncepció fontos lépés volt a HH szintézisének fejlődésében. Az eljárás azon a gondolaton alapul, hogy az alapvető tervezési lépések előtt szerezzük meg a HH teljesítményével kapcsolatos irányelveket és célokat. Ezt az eljárást a termodinamika teszi lehetővé. A folyamat meleg („lehűtendő”) és hideg („felmelegítendő”) áramait egyesítjük, így kapjuk meg a 1) meleg összetett hővonalat, amely együttesen ábrázolja a hőforrásokat (lehűtendő áramok), és a 2) hideg összetett hővonalat, amelyek együttesen ábrázolják a hőelnyeléseket. A meghatározott minimális hőmérsékletkülönbség ( $\Delta T_{\min}$ ) betartásával a két összetett hővonal együttesen, egy ábrán van megjelenítve (2.1. ábra), ezzel biztosítva a jó termodinamikai rálátást a hővisszanyerési feladatra.



2.1. ábra: A hővisszanyerés célmeghatározás összegzése

A két összetett hővonal (angolul: *composite curve*) közötti átfedés a hővisszanyerés célját (angolul: *target*) ábrázolja. Az átfed-

és vetítése a hőcseretengelyre a folyamaton belüli maximális hővisszanyerés mennyiségét jelzi. Az átfedés függőleges vetítése azt

a hőmérséklettartományt határozza meg, amelyben a hővisszanyerés kivitelezése esedékes. A külső fűtést (fűtőközeg), ill. hűtést (hűtőközeg) a nem átfedett hideg és meleg összetett hővonal szegmensei jelölik.

## 2.5. Szupertargeting: teljes körű HH célmeghatározása

A HH fűtés, ill. hűtés igényeire vonatkozó célok meghatározása után a következő logikus lépés a beruházás és a teljes költség becslése. A beruházás a HH-ba sokféle tényezőtől függ, amelyek közül a legfontosabb a teljes hőátadó felület és ennek elosztása az egyes hőcserélők között. Townsend és Linnhoff (1984) a HH beruházásának becslésére a kiegyensúlyozott összetett hővonal (angolul: *balanced composite curve*) használatát javasolta, amelynél az összetett vonalak a hűtő-ill. fűtőközeg használatának kiegészítésével keletkeznek. Az eljárás az alábbi tényezők figyelembevételével javítható:

1. A HH felület céljai a nem egyforma hőátbocsátási tényező használatával pontosabban meghatározhatóak (Colberg és Morari, 1990; Jegede és Polley, 1992; Zhu et al. 1995; Serna-González, Jiménez-Gutiérrez, és Ponce-Ortega, 2007).
2. A gyakorlati megvalósítási tényezők, mint pl. az építőanyagok, nyomásértékelés és különböző típusú hőcserélők figyelembevételével (Hall, Ahmad, és Smith, 1990).
3. További korlátok figyelembevételével, mint a biztonság és a korlátozó távolság (Santos és Zemp, 2000).

## 2.6. A pinch ötlet átdolgozása a HH módosítására (angolul: retrofit)

Bochenek, Jezowski és Jezowska (1998) összehasonlította az optimalizálási megközelítéseket a szimulációsokkal a rugalmas HH módosítására. Zhu, Zafir és Klemeš (2000) egy eljárást javasolt a hőátadás javításának tervezésére a HH módosításaira, amelynek a használatával a hőintegrálás jelentősen előnyössé válhatna. Ez a megközelítés szélesebb körű használatra is alkalmas, különösen a módosítási (angolul: retrofit) tanulmányokban.

A HH módosítása az optimalizálás egy speciális esete. A módosítási feladatoknál a már meglévő hőcserélőkre – amelyeket már kifizettek – kell figyelmet szentelni. Ez a körülmény – az új tervezéssel szemben – jelentősen megváltoztatja a feladat gazdasági helyzetét. Ezt a témát a 6. fejezetben tárgyaljuk.

## 2.7. Anyagvisszanyerés és vízkezelő hálózatok

A víz az ipari folyamatokban nyersanyagként széleskörűen használatos. Sokszor használatos a víz mint fűtő- ill. hűtőközeg (pl. gőz vagy hűtővíz) és mint anyagszállító közeg (pl. mosás vagy extrakció). Több iparágban nagy mennyiségű kiváló minőségű vizet használnak fel, ezzel a szigorú – a termékminőségre és a hozzáfűződő gyártásbiztonságra vonatkozó – követelményeknek eleget téve. Napjainkban a vizet felhasználó ipari folyamatok és rendszerek egyre szigorodó környezetvédelmi szennyvíz-kibocsátási szabályozásnak vannak alávetve. A népesség gyarapodása és az életminőség javítása egyre nagyobb friss vízigényt eredményez. A gyors ütemű változások szükségessé tették a jobb vízgazdálkodást. Az anyag- és vízvisszanyerést a 7. fejezetben tárgyaljuk.

## 2.8. A folyamatintegráció előnyei

Az összetett hővonal egy vizuális eszköz, amely összegzi a folyamat energiával kapcsolatos fontosabb tulajdonságait (2.1. ábra). A termodinamikai összefüggések és korlátok felismerése a pinch tervezési módszer (Linnhoff és Hindmarsh, 1983) kifejlesztéséhez vezetett. Ezen túlmenően lehetővé tették a folyamatintegrálás további alkalmazásának a kiterjesztését a víz minimalizálására, valamint a régió energia- és kibocsátás-tervezésre, pénzügyi tervezésre és a szakaszos folyamatokra.

A termodinamikailag meghatározott hő-visszanyerési célok legfőbb tulajdonsága, hogy ezeket nem lehet felülmúlni semmilyen valós rendszerrel. Az összetett hővonalak fontos szerepet játszanak a folyamattervezésben, a HH szintézisének algoritmusában ezek jelentik a pontos maximum energia-visszanyerési célokat. A folyamatszintézisben, amelynél a matematikai programozást használják alapnak, az összetett hővonalak releváns alsó korlátot jelentenek a fűtés/hűtésigényre és beruházásra, ezáltal szűkítve a keresési teret a következő szupertargeting (előtervezés) szerkesztésében és optimalizálásában.

Az előző megfigyelések kiemelik a folyamat optimalizálási feladatának fontosabb jellegzetességeit, különösen azokat, amelyek a folyamat szintézisét és tervezését tartalmazzák. A rendszerre vonatkozó, stratégiailag kulcsfontosságú adatok megszerzésével – a korlátozott információk alapján – a nélkül is értékelhető a folyamat, hogy túl sok időt (vagy más forrásokat) szánnánk a tanulmány kidolgozására. Ez a stratégia az olajfúró projektek stratégiáját követi, miszerint a potenciális üzemet először a kulcsfontosságú mutatók alapján értékelik, a további tanulmányok, illetve a kezdeti fúrások pedig csak akkor történnek meg, ha az előzetes értékelések szerint a bevételek indokolják a további befektetéseket. Ezt

a megközelítést Smith (2005) írta le a könyvében, amely a folyamatszintézis folyamatintegrációjáról szól. Daichendt és Grossmann (1997) is bemutatta e megközelítést: cikkük a folyamatszintézis probléma megoldására a heurisztikus lebontást és a matematikai programozást integrálja.

## 2.9. A folyamatintegráció szerepe az ipar fenntarthatóságában

A folyamatintegrációnak közvetlen hatása van az adott ipari folyamat fenntarthatóságának javítására. Minden folyamatintegrációs technika a források csökkentésére és a kilépő károsító termékek minimalizálására irányul; ezek a célok közvetlenül kapcsolódnak az adott lábnyomhoz. Ezért a célok megközelítése a folyamatintegrálás felhasználásával elősegíti ezen lábnyomok minimalizálását.

## 2.10. Összegzés

Ez a fejezet bevezetést és áttekintést kínál a folyamatintegrációról, és e folyamat hőintegrációs gyökereiről, az alkalmazási területek bővítéséről és fejlődéséről. A fejezet tárgyalta a folyamatintegráció filozófiáját, valamint annak hozzájárulását a fenntartható fejlődéshez, és a projektek pénzügyi hatékonyságához.





## 3 Pinch-analízis az energiahatékonyság növelésére

### 3.1. Bevezetés a hőcserébe és a hővisszanyerésbe

Az iparban a fűtéshez nagy mennyiségű hőenergia felhasználása szükséges: például a nyersolaj előmelegítése a desztilláció előtt, a kémiai reaktorba belépő áramok előmelegítése, és a hő hozzáadása az endotermikus kémiai reakciókhoz. Hasonlóan néhány folyamat, mint pl. a kondenzáció, az exoterm kémiai reakciók, termékek véglegesítése a hő elvezetését követelik meg, ami hűtést igényel. A fűtésre több lehetőség van; ezek magukba foglalják a gőzt, a forró ásványi olajokat, és a közvetlen égéssel való fűtést. A gőz a legelterjedtebb lehetőség a magas fajhő értéke miatt, ami látens (rejtett) hő formájában jelenik meg. A hűtési lehetőségek magukba foglalják a vizet (a mérsékelt hőmérsékletű hűtés használata, amikor a víz rendelkezésre áll), levegőt (amikor a víz elégtelenül áll rendelkezésre, illetve nem gazdaságos a használata) és a fagyasztást (amikor az elérni kívánt hőmérséklet kevesebb, mint a környező hőmérséklet). A hővisszanyerés fűtést vagy hűtést nyújthat a folyamat áramainak. A hővisszanyerés számtalan alakban fordulhat elő: a hő átadása két folyamatáram közt, gőztermelés a magas hőmérsékletű folyamat hulladék hőjéből, előmelegítés (pl. a kazán levegőjének az előmelegítése, valamint a kazán levegőjének, ill. bemeneti vízének az előmelegítése).

A hőátadás a hőcserélőkben történik – közvetlen keveréssel vagy közvetve a falon

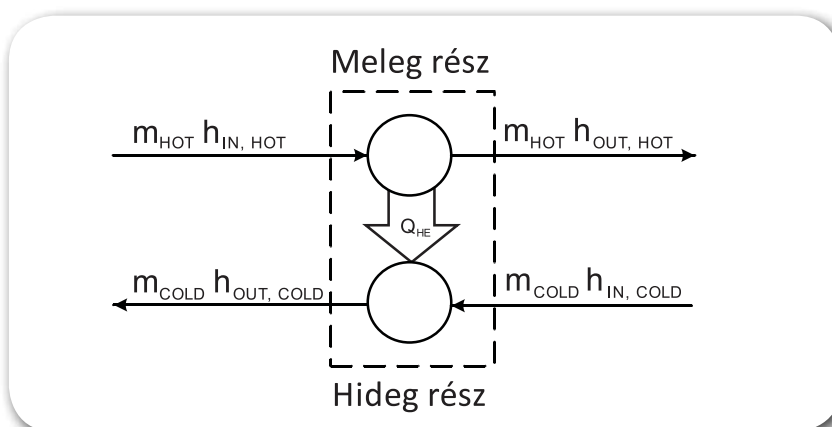
keresztül. A közvetlen hőátadást más néven nem-izotermikus keverésnek nevezzük, mert az áramok hőmérséklete változó. A keverő hőcserélők hatékonyak a hőátadásban, és általában alacsony a befektetés. A legtöbb iparágban a hőcserének a hőcserélendő áramok keverése nélkül kell megtörténnie. Annak érdekében, hogy a hőcsere alatt a folyadékokat elkülönítve tartsák, felületi hőcserélőket alkalmaznak. Ezekben az eszközökben a hőcsere az elválasztó falon keresztül történik. Általában az ellenáram (angolul: *counter-current*) elven alapuló csatolási rendet alkalmaznak, mert nagyobb a hőcsere hatékonysága. Az egyszerűség kedvéért ebben a dokumentumban az ellenáram elvet használjuk, kivéve, ha másképp van leírva. A hőcserélők szerkezete tekintetében a hagyományos csőköteges hőcserélő még mindig a leggyakoribb, viszont a lemezes hőcserélők is egyre nagyobb figyelmet kapnak a kompakt kivitelezésük miatt, és a szivárgás meggátolása terén elért jelentős javulás eredményeként, így ezek sok esetben előnyösnek bizonyulnak.

#### 3.1.1. Hőcserecsatolás

A meleg folyamatáram akkor tud hőt szállítani a hidegnek, amikor csatolva van egy vagy több egymást követő hőcserélővel. Minden ilyen csatolás egy hőcsere kapcsolatra utal. A hőcserecsatolások állandósult mérlegállapot alakja a legalkalmasabb a hőintegráció számításaihoz, és a meleg és hideg oldalból álló kapcsolat modellezésén alapszik, mint az a 3.1. ábrán látható. A me-

leg és a hideg részek egyszerű, állandósult állapot entalpiamérlegek, amelyek csak egy

anyagból álló áramot és egy hőátadás áramlást foglalnak magukba.



3.1. ábra: Folyamatábra a hőcsere csatolására

A modell jelentősebb összetevői a következők: 1) a hőátadás számítása az entalpiamérlegek által, és 2) a szükséges hőátadó terület becslése. Az utolsó pontnál mindkét logaritmikus közepes hőmérséklet és a

hőátbocsátási tényező is használatos. Az entalpiamérlegek – a meleg és hideg részre – és a hőátadási kinetikai egyenletek az alábbi egyenletekkel írhatóak le:

$$Q_{HE} = m_{hot} \cdot (h_{in,hot} - h_{out,hot}) \quad (3.1)$$

$$Q_{HE} = m_{cold} \cdot (h_{out,cold} - h_{in,cold}) \quad (3.2)$$

$$Q_{HE} = U \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (3.3)$$

A  $Q_{HE}$  [kW] a teljes hőátadás mennyisége a hőcserélőben, az  $U$  [kW·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>] a teljes hőátadási tényező, az  $A$  [m<sup>2</sup>] a hőátadás területe és a  $\Delta T_{LM}$  [°C] a logaritmikus közepes

hőmérséklet-különbség. További információ az alábbi cikkekben található: Shah és Sekulić (2003), Tovazshnyansky et al. (2004), és Shilling et al. (2008).



### 3.1.2. A hőcserecsatolás használata

A hőcserélő csatolásokat gyakran azonosítják a hőcserélőkkel, de ez nem mindig vagy így. Az adott hőcsere eltérő felépítésű eszközökkel vagy több eszköz kombinált csatolásával lehet kivitelezve: pl. kettő ellenáram elvén kivitelezett hőcserélők sorkapcsolása felhasználható egy hőcserecsatolásra. A hőcserecsatolás koncepció és a hőcsere hőcserélőkkel való végrehajtásának megkülönböztetése fontos a beruházás szempontjából.

## 3.2. A folyamatintegráció alapjai

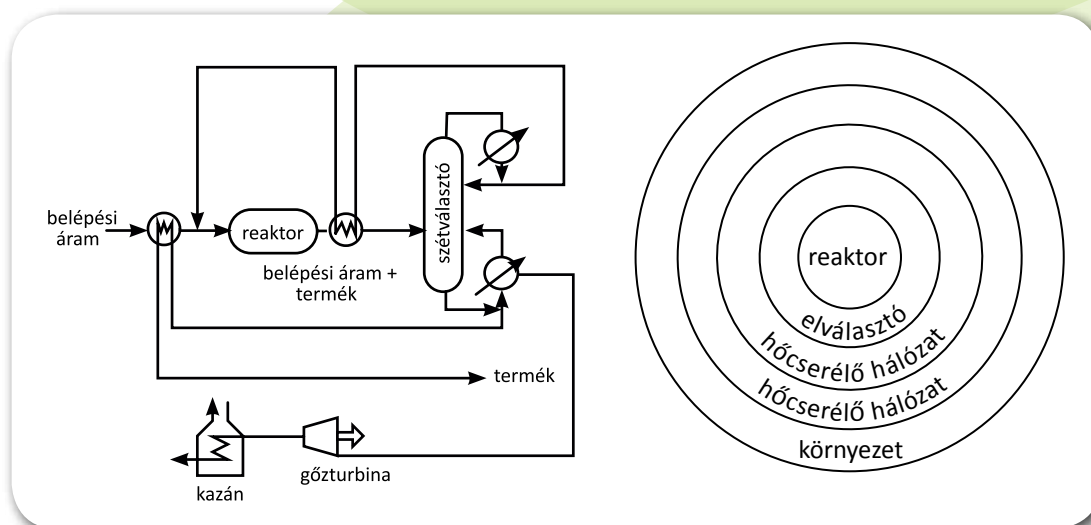
### 3.2.1. Folyamat- és hőintegráció

A folyamatintegráció kialakításakor a figyelem a különböző üzemekben termelt hulladékhő újrafelhasználására irányult. Minden hőcserélő felületet néhány állandósult állapotegyenlettel írtak le, és a hőenergia megtakarítása a hulladékhő újrafelhasználásával a fűtési/hűtési erőforrás költségeinek a csökkentéséhez vezetett. Ez a megközelítés hőintegráció és folyamatintegráció néven

vált népszerűvé. Ebben a kontextusban, a folyamatintegráció különböző folyamatok integrálását jelenti – energia-megtakarítások elérésére. A mérnökök rádöbrentek, hogy az integráció segítségével más források is csökkenthetőek, mint pl. a szennyezett anyag kibocsátása. A hő- és folyamatintegrációt szélesebb körben is definiálták, válaszként a hasonló fejleményekre a víz újrafelhasználása és a szennyvíz minimalizálása területén.

### 3.2.2. A folyamatintegráció hierarchiája

A folyamatintegrációnak velejáró hierarchiája van, amely a döntéshozatalban hasznosítható. Ez a hierarchia az ún. hagymadiagrammal (3.2. ábra) szemléltethető (Linnhoff et al. 1982, 1994). Az ipari folyamatok tervezése a reaktorok és más kulcsfontosságú egységek tervezésével kezdődik (a hagyma magja). Ezeket az egységeket a folyamat többi része egészíti ki és támogatja, mint pl. a szétválasztási alrendszer (a következő réteg) és a hőcserélő hálózat alrendszere. A hátralévő fűtési- és hűtési igényeknek, valamint a villamosenergia-igénynek a segédközeg-rendszer tesz eleget.



3.2. ábra: Hagymadiagram

### 3.2.3. Teljesítménycélok

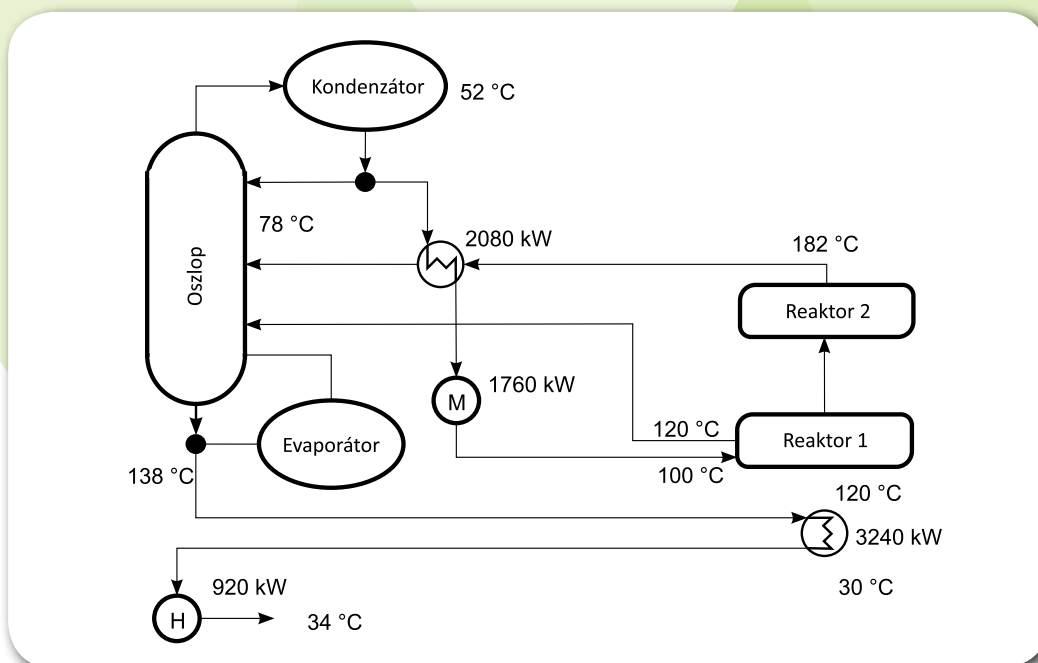
A termodinamikai határokat a hőcserélésre fel lehet használni a segédközegek használatának és a hőcserélési terület becslésére – az adott hővisszanyerési feladatra. A folyamat teljesítésére a kapott becslések képezik az alsó korlátot a segédközegek igényeire, és úgyszintén az alsó korlátot a hőátadás területére. Ezek a korlátok képezik a célokat, mert a hővisszanyerési becslések a gyakorlatban megvalósíthatóak, és általában minimalizálják a teljes költséget a HH tervére.

### 3.2.4. A hővisszanyerési feladat azonosítása

A hatékony hővisszanyerésre az iparban szükséges azonosítani és rendszerezni a releváns adatokat. A hőintegrálás területén ezt a folyamatot adatkinyerésnek nevezzük. A hővisszanyerési feladat adatai több lépésben nyerhetők ki:

1. Vizsgálja felül az általános folyamatábrát, amely tartalmazhat hőcserélőket.
2. Távolítsa el a hőcserélőket, és ezeket helyettesítse be „virtuális” fűtőberendezéssel és hűtőberendezéssel.
3. Egyesítse az összes egymás utáni fűtő- vagy hűtőberendezést.
4. A kapott virtuális fűtő- vagy hűtőberendezés fejezi ki a nettó fűtés- és hűtésigényt a folyamat egyes áramára.
5. A fűtés- és hűtésigényeket ezt követően sorolja táblázatokba, ahol minden fűtésigényre mint hideg áramra hivatkozzon, és ennek megfelelően a hűtésigényt meleg áramként tartsa számon.

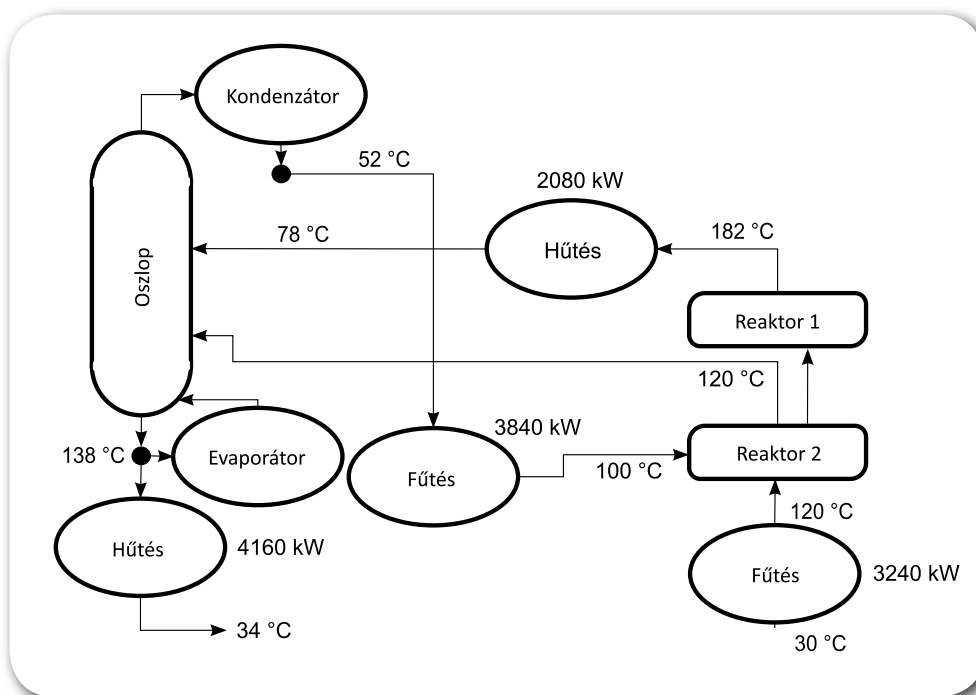
Ezt az eljárást legegyszerűbb példával bemutatni. A 3.3. ábra egy folyamatábrát mutat be, amely két reaktort és egy desztilláló oszlopot tartalmaz. A folyamat már két hővisszanyerő hőcserélőt tartalmaz. A folyamat segédközegének fűtésigénye  $H = 1200$  kW, és a hűtésigénye  $C = 360$  kW.



3.3. ábra: Adatkinyerés – A példa folyamatábrája

A szükséges hőadatokat az elsődleges folyamatábrából nyerhetjük ki. A 3.4. ábra a folyamatábrát mutatja be: az 1. lépéstől a 4. lépés befejezéséig. Az áramok fűtés- és hűtésigénye a már meglévő hőcserélők eltávolításával és szükséges összevonásával szerepel; viszont a

forraló és a kondenzátor igényei kimaradtak az elemzésből az egyszerűség kedvéért (bár ezeket az igényeket a tényleges tanulmányban figyelembe kell venni). Feltételeztük, hogy bármely folyamat hűtésigénye rendelkezésre áll bármelyik fűtésigény csatolására.



3.4. ábra: Adatkinyerés – fűtés és hűtésigények

Az 5. lépés alkalmazása a 3.4. ábra adatain a 3.1. táblázatban található adatsort eredményezi. Megegyezés alapján a fűtésigények pozitívak, míg a hűtésigények negatívak. Az

„S” (angolul: *supply*) alsó index a folyamatok áramainak bemeneti hőfokát, míg a „T” (angolul: *target*) a kimeneti hőfokát jelöli.

3.1. táblázat. Data Set for Heat Recovery Analysis - PREVOD!!!!

áram	típus	$T_s$ [°C]	$T_T$ [°C]	$\Delta H$ [kW]	CP [kW/°C]
H1	meleg	182	78	-2080	20
H2	meleg	138	34	-4160	40
C3	hideg	52	100	3840	80
C4	hideg	30	120	3240	36

Az utolsó oszlop a hőkapacitás-áramot ábrázolja. Azoknak az áramoknak, amelyek nem változtatják meg a halmazállapotukat (pl. folyadékból gáz és fordítva), a hőkapacitás-árama (CP) a fajhő és a tömegáram szorzataként nyerhető ki:

$$CP = m_{\text{stream}} \cdot C_{p,\text{stream}} \quad (3.4)$$

A CP az alábbi egyszerű egyenlettel is kiszámolható:

$$CP = \frac{\Delta H}{T_T - T_S} \quad (3.5)$$

Amikor a halmazállapot megváltozik, az áramok igényeinek a számításakor a CP helyett a látens (rejtett) hőt kell használni.

### 3.3. Alap pinch technológia

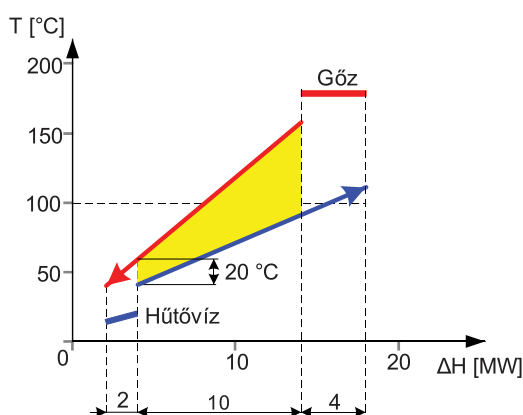
A pinch-en alapuló folyamatintegráció fő stratégiája a célok meghatározása a fő folyamat tervezés tevékenysége előtt. Ezen straté-

gia követésével fontos következtetésekre és tervezési irányelvekre tehetünk szert. A leggyakoribb fűtőközeg a gőz. A gőzzel általában a megközelítően állandó hőmérsékleten való fűtést feltételezzük. A vízzel való hűtés nem izotermikus, mert a hűtés a vízben fennálló szenzibilis (érzéklehető) hő abszorbalásával valósul meg, ezáltal növelve a hőmérsékletét.

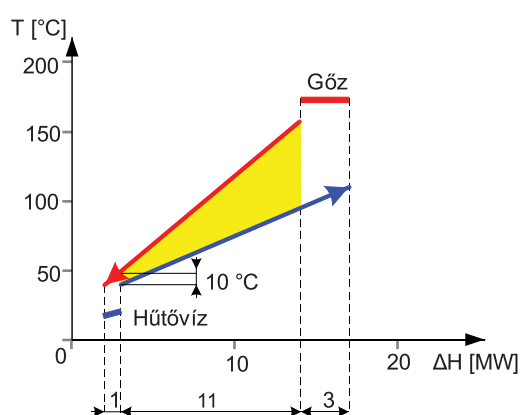
#### 3.3.1. Az energiai célok meghatározása

##### 3.3.1.1. Hővisszanyerés egy meleg és egy hideg áram közt

A második termodinamikai törvény kimondja, hogy a hőáramlás a magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé irányul. Amint azt a 3.3-as egyenlet mutatja, a hőcserélőben a szükséges terület arányos a hőmérséklet különbséggel az áramok közt.



(a) Hőcserélés:  $\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) Hőcserélés:  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.5. ábra: Termodinamikai korlátok a hővisszanyerésre

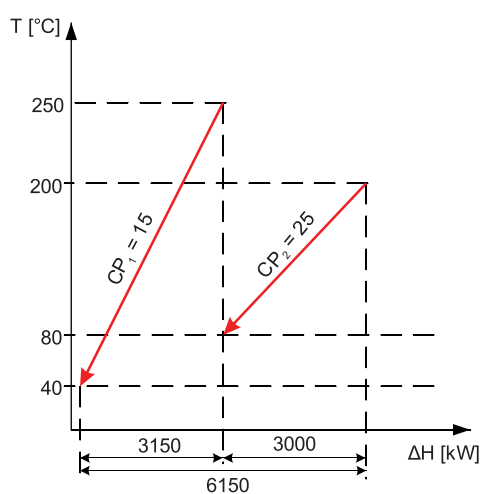
A HH tervezésében a minimális hőfokkülönbség ( $\Delta T_{\min}$ ) az alsó korlát bármilyen felmerülő hőmérsékletkülönbségre a hálózat bármelyik hőcserélőjében. A  $\Delta T_{\min}$  értéke tervezési paraméter, amelyet a nagyobb hővisszanyerés, illetve nagyobb hőátadási terület szükség kompromisszumaként (angolul: *trade-off*) határozunk meg. Minden meleg és hideg áramcsatolás annyi hőt tud átadni, amennyit az áram hőmérsékleti, és a minimális hőfokkülönbség korlátai engednek.

A két áramból álló, a 3.5. (a) ábrában bemutatott folyamatot vegyük példának. A hővisszanyerés mennyisége 10 MW, amelyet a  $\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$  engedélyezésével érünk el. Ha a  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ , mint a 3.5. (b) ábrában, akkor a hővisszanyeréskor „ki tudunk facsarni” még egy megawatt energiát. Minden  $\Delta T_{\min}$ -re lehetőség van meghatározni a maximum visszanyerhető hő mennyiségét két áram közt. A HH tervezésére, a hővisszanyerési célok meghatározására ezt az alapelvet ki kell terjeszteni több áram kezelésére.

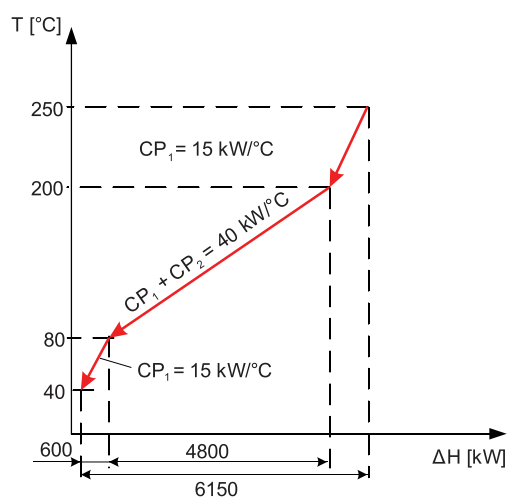
#### 3.3.1.2. A hővisszanyerés értékelése több áram esetében: összetett hővonalak

Az értékelést az összes meleg és összes hideg áram egyesítésével kezdjük az összetett hővonalakba (angolul: *Composite Curves* vagy *CCs*, *Linnhoff et al. 1982*). Minden folyamatra két hővonal létezik: egyik a meleg áramoknak (meleg összetett hővonal, angolul: *hot composite curve: HCC*), és a másik a hideg áramoknak (hideg összetett hővonal, angolul: *cold composite curve: CCC*). Mindegyik összetett hővonal hőmérséklet-entalpia (T-H) összefüggésből áll, amely a folyamat teljes – rendelkezésre álló – hő mennyiségét (HCC), és a teljes hőigényét (CCC) ábrázolja. A HCC szerkesztését a 3.6. ábra mutatja be – a 3.1. táblázatban lévő adatok alapján. Minden hőmérséklet-intervallumot a meleg

áram bemeneti és kimeneti hőmérséklete határozza meg. Minden hőmérséklet-intervallumon belül összetett szegmens képződik: egyfelől a 1) hőmérséklet-különbségből, amely egyenlő az intervallumával, másfelől a 2) teljes hűtésigényből, amely egyenlő az intervallumon belüli áramok hűtésigényének az összegével – ezt az egyes áramok hőkapacitásának összeadásával kapjuk meg. A következő lépésben az összes szegmens kombinálásával megszerkesztjük a meleg összetett hővonalat. A hideg összetett hővonal szerkesztése teljesen analóg a meleg összetett hővonal szerkesztésével.



(a) A meleg áramok külön ábrázolása

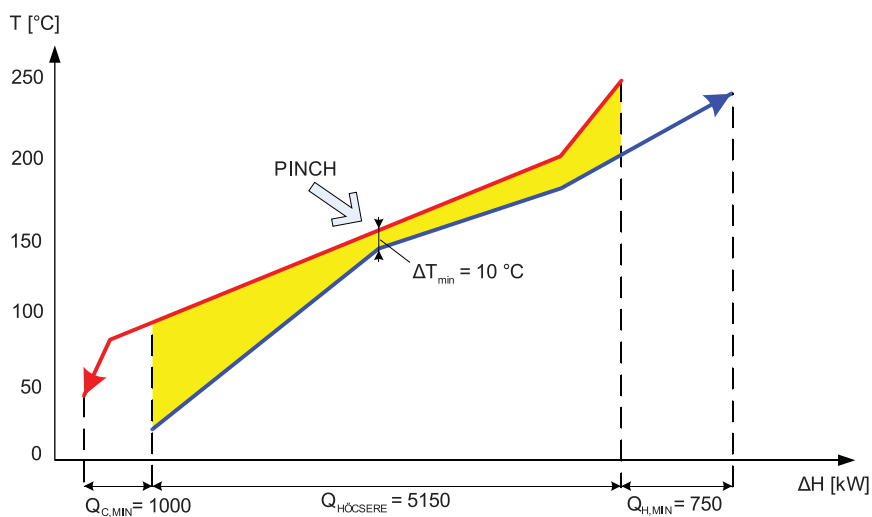


(b) Az összetett meleg áramok ábrázolása

3.6. ábra: A meleg hővonalak szerkesztése

A két összetett hővonalat együtt mutatjuk be egy ábrán azzal a céllal, hogy meghatározzuk a maximális átfedést, amely kimutatja a maximális hőmennyiséget, amelyet a

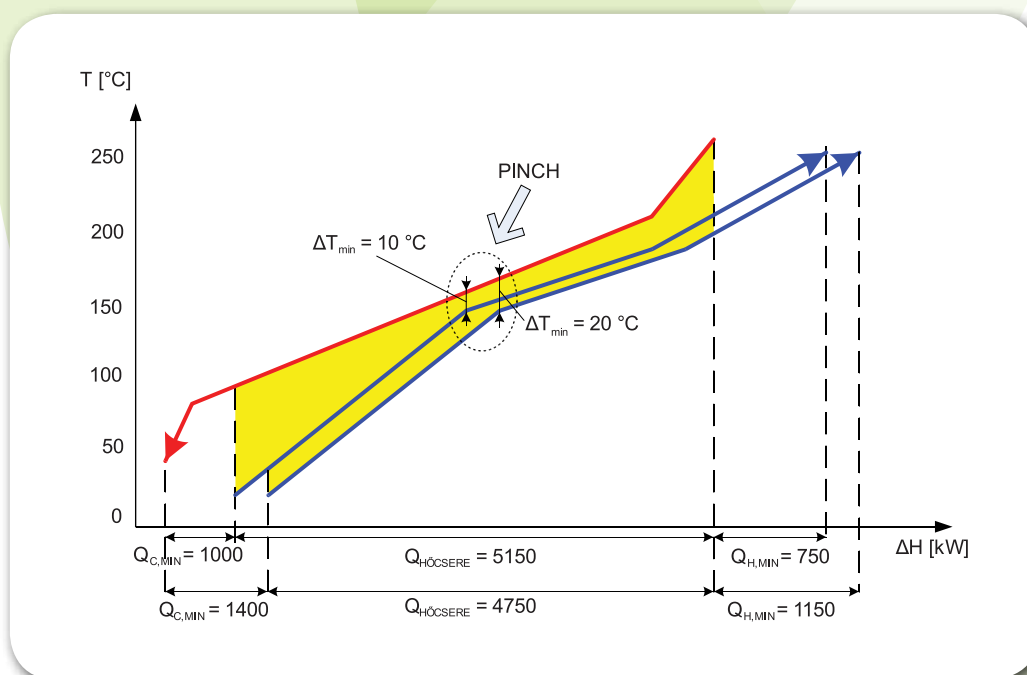
folyamatban vissza lehet nyerni. A HCC-t és a CCC-t a 3.7. ábra együttesen ábrázolja a 3.1. táblázatban bemutatott példára.



3.7. ábra: A meleg és hideg összetett hővonal  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ .

Mindkét összetett hővonal vízszintesen elmozdítható (a  $\Delta H$  tengely mentén), de általában a HCC helyzete rögzített, és a CCC tolódik. Ez egyenlő a változó hővisszanyerés mennyiségével és (egyidejűleg) a fűtés- és hűtésigény mennyiségével. Ahol az összetett hővonalak közt átfedés van, ott a hő visszanyerhető a meleg és a hideg áramok közt. Nagyobb átfedés nagyobb mennyiségű hővisszanyerést és kisebb segédközeg-i

gényt jelent, és fordítva. Amikor az átfedés növekedik, a hőmérséklet-különbség az átfedett hővonalszegmensek közt csökken. Végül, bizonyos fokú átfedés esetében, a hővonalak elérik a minimális hőfokkülönbséget –  $\Delta T_{\min}$ . E pont alatt semmilyen további átfedés nem lehetséges. A legkisebb megközelítést az összetett hővonalak közt pinch pontnak (vagy egyszerűen csak pinch-nek) nevezzük; azaz hővisszanyerési pinch-nek is szokták nevezni.

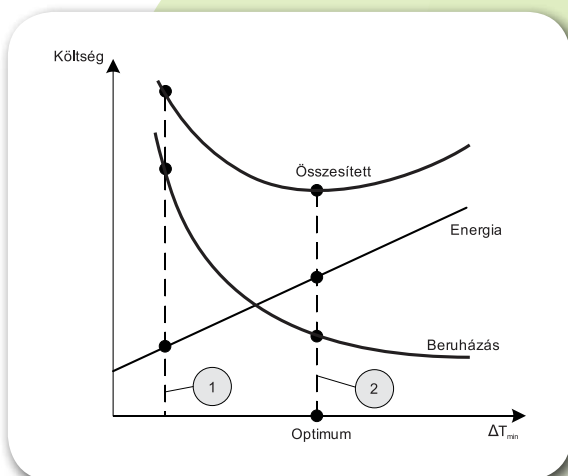


3.8. ábra: A hővisszanyerési célok változtatásai a  $\Delta T_{\min}$ -vel

Fontos megjegyezni, hogy a legnagyobb átfedés mennyisége (és ezzel a maximális hővisszanyerés mennyisége) megváltozik, ha megváltozik a minimális hőfokkülönbség ugyanazon a meleg és hideg áramkészlet esetében. Minél nagyobb a  $\Delta T_{\min}$  értéke, annál kisebb a lehetséges maximális visszanyert hő mennyisége. A minimális segédközeg fűtés, a minimális segédközeg hűtés vagy a minimális hőfokkülönbség meghatározásával rögzítjük a két összetett hővonal helyzetét, és ezzel a maximális hővisszanyerés mennyiségét. Az azonosított hővisszanyerési célokat a meghatározott minimális hőfokkülönbséghez viszonyítva kapjuk meg. Ha a  $\Delta T_{\min}$ -t növeljük a po-

tenciális maximális hővisszanyerés csökken (3.8. ábra).

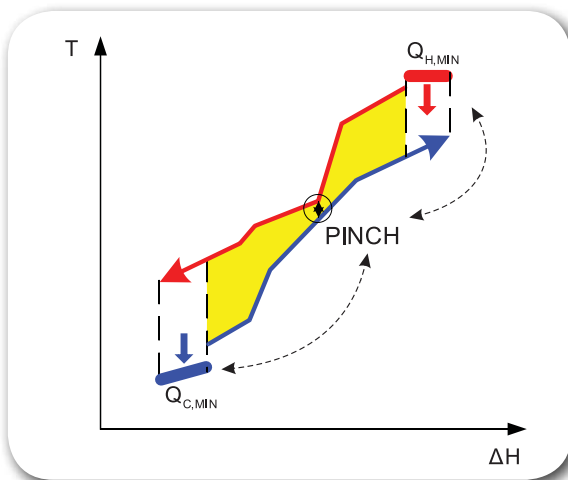
A megfelelő  $\Delta T_{\min}$  értékét a gazdasági kompromisszum (angolul: trade-off) alapján határozzuk meg. A  $\Delta T_{\min}$  növekedésének eredményeként nagyobb lesz a segédközegigény, és ezáltal az energiaköltségek is növekednek; nagyobb  $\Delta T_{\min}$  érték esetén kisebb hőátadási terület szükséges, és ezáltal a beruházás költsége is csökken. Ezzel szemben: ha a  $\Delta T_{\min}$  csökken, a segédközeg költségei is csökkennek, viszont a beruházás költségei növekedni fognak. Ez a kompromisszum a 3.9. ábrán látható.



3.9. ábra: A beruházás és energiaköltségek közötti kompromisszum, mint a  $\Delta T_{\min}$  függvénye

### 3.3.2. A hőviszanyerési pinch

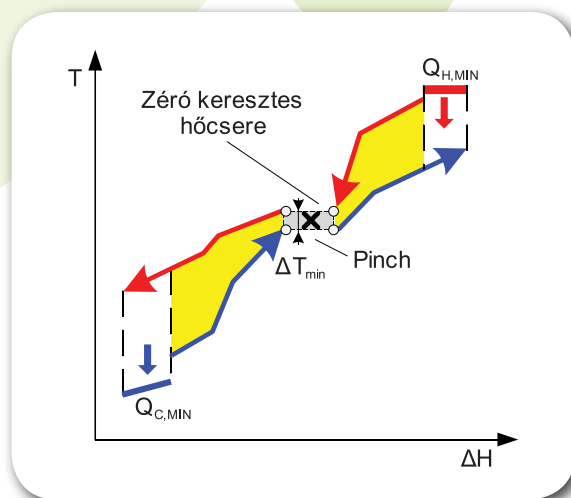
A hőviszanyerési pinch-nek fontos szerepe van a HH tervezésénél. Amint az a 3.10. ábrán látható, a pinch meghatározza az abszolút korlátokat a hőviszanyerésre a folyamaton belül.



3.10. ábra: A pinch által meghatározott folyamat hőviszanyerési korlátai

A pinch pont két részre osztja a hőviszanyerési feladatot, méghozzá a nettó energiaelnyelő részre a pinch felett, és a nettó hőforrás részre a pinch alatt (3.11. ábra). A pinch pontban a hőmérséklet-különbség a meleg és hideg áram között pontosan mege-

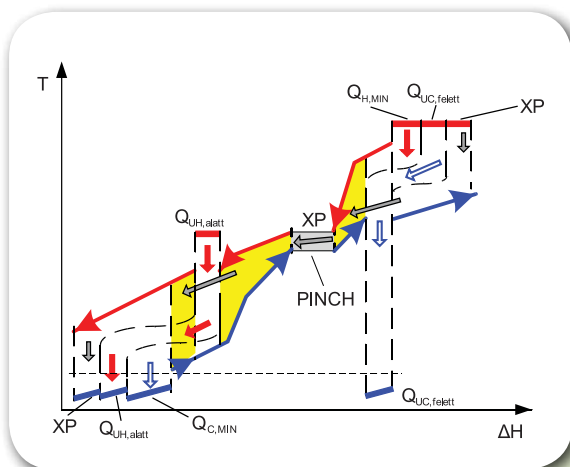
gyezik a minimális hőfokkülönbséggel, ami azt jelenti, hogy ebben a pontban az áramok között nem engedélyezett a hőcsere. Ennek eredményeként a hőelnyelés a pinch pont felett a minimális fűtőközeggel van egyensúlyban ( $Q_{H,\min}$ ), és a hőforrás pinch pont alatti része a minimális hűtőközeggel van egyensúlyban ( $Q_{C,\min}$ ), így tehát semmilyen hőátadás sincs a pinch ponton keresztül – segédközeggel vagy a folyamaton belül.



3.11. ábra: A hőviszanyerési feladat kettéválasztása

A pinch pont alatti részből a pinch pont feletti részbe semmilyen hőátadás sem megy végbe, mert ez termodinamikailag lehetetlen. Viszont lehetséges a hőátadás a pinch feletti meleg áramokból a pinch alatti hideg áramokba. Minden hideg áram – a pinch pont alatti is – fűthető a fűtőközeggel, és hasonlóképpen a meleg áramok – a pinch feletti is – hűthetőek a hűtőközeggel. Habár ezek az elrendezések termodinamikailag lehetségesek, a felhasználásuk a segédközeg nagyobb felhasználását eredményezné – a minimális segédközeg felhasználásánál, amelyet a pinch-analízis által határoztunk meg. Ezért a hőviszanyerő rendszerek tervezésekor alapvető követelmény a pinch pont meghatározása.





3.12. ábra: More in – more out

Mi történik, ha a hőátadás a pinch-en keresztül folyik? Ismétlésképpen: a hőátadás csak a pinch feletti területről a pinch alatti területre lehetséges. Ha pl. XP hőegység a pinch-en keresztül kerül átadásra, akkor a  $Q_{H,min}$  és a  $Q_{C,min}$  igény is ugyanannyi mennyiséggel megnő, annak érdekében, hogy megmaradjon a hőegyensúly a probléma két részén (3.12. ábra). Bármilyen további – a fűtőközeg által hozzáadott – hő a rendszerben el kell majd vezetni a hűtőközegbe, ami a minimum hűtőközeg  $Q_{C,min}$  növelését jelenti a rendszer ezen részében (3.12. ábra). Ezzel szemben bármilyen hűtés a pinch feletti részben a fűtőközegigény növelését eredményezi a rendszer ezen részében. A pinch-analízis következménye a hővisszanyerő problémákra az alábbi három feltételre vezethető le, ame-

lyet a folyamatok minimális energiacélok elérése érdekében szükséges betartani:

1. A pinch-en keresztül ne történjen hőátadás.
2. A pinch fölött ne hűtsünk.
3. A pinch alatt ne fűtsünk.

Bármelyik feltétel megszegése a külső segédközeg felhasználásának a növelését eredményezné. Ezeket a feltételeket kifejezetten a pinch tervezési módszer általi HH szintézisének alkalmazásánál alkalmazzák (Linnhoff és Hindmarsh, 1983), illetve a HH módosításának analízisének azoknak az okoknak az azonosítására, amelyek miatt túlzott külső segédközeg-igények szerepelnek a folyamatban. Amennyiben más HH szintézisének módszerei is elérik a minimum külső segédközeg-igényt, akkor azok is alátámasztják a pinch feltételeket (bár néha csak implicit módon).

### 3.3.3. Numerikus célmeghatározás: hőkaszkád-számítás

Az összetett hővonalak hasznos eszközök a hővisszanyerési célok vizualizálására. Viszont nagyon időigényesek lehetnek, ha a probléma nagyon sok áramot foglal magába. Továbbá a kizárólag grafikus technikától függő célok meghatározása önmagában nem lehet teljesen pontos.

3.2. táblázat: Problem Table Algorithm: Folyamatáramok adatai ( $\Delta T_{min} = 10^\circ\text{C}$ )

szám	típus	$T_s$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$T_r$ [ $^\circ\text{C}$ ]	CP [kW/ $^\circ\text{C}$ ]	$T_s^*$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$T_r^*$ [ $^\circ\text{C}$ ]
1	hideg	20	180	20	25	185
2	meleg	250	40	15	245	35
3	hideg	140	230	30	145	235
4	meleg	200	80	25	195	75

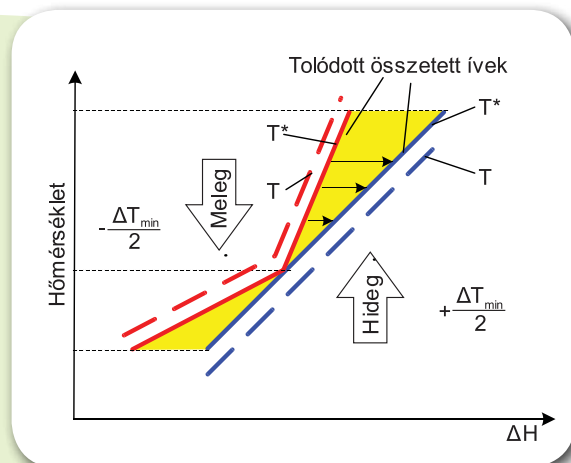
A numerikus célok meghatározásának a folyamata általában az ún. hőkaszkád-számítás alapján (angolul: *Problem Table Algorithm - PTA*) történik. Egyes szerzők az ezzel ekvivalens ún. "transshipment" modellt (Cerdá et al. 1990) használják, amely a következő lépésekből áll:

1. Tolja el (angolul: *shift*) a folyamat áramainak a hőmérsékletét.
2. Határozza meg a jellemező hőfokokat (a hőfokintervallumok határait).
3. Számítsa ki az intervallumok hőmérlegét (egyensúlyát).
4. Tételezzen fel nulla fűtésigényt, és számítsa ki a „lecsorgatott” hő mérlegét – mint hőáramlást.
5. A fűtésigény növelésével biztosítsa a pozitív hőáramlást a kaszkádok közt.

Az algoritmust a 3.2. táblázatban bemutatott adatok alapján mutatjuk be.

### 1. lépés

Mivel a PTA algoritmus hőfokintervallumokat használ, szükséges az egységes mérték meghatározása – kizárólag számítási célokra. Ha az áramok tényleges hőmérsékleteit használjuk, akkor a hővisszanyerés során bizonyos hőtartalom kimarad. Ezt a problémát a hőkaszkád számításánál az ún. shiftelt hőmérséklet ( $T^*$ ) használatával küszöbölhetjük ki. A meleg áram hőmérsékletét csökkentjük  $\Delta T_{\min}/2$ -vel, a hideg áramét viszont növeljük  $\Delta T_{\min}/2$ -vel. Ha tehát a meleg vagy hideg áram shiftelt hőmérséklete egyforma, akkor a tényleges hőmérsékletek közt a különbség  $\Delta T_{\min}$ , amely lehetővé teszi a megvalósítható hőáramlást. Ez a művelet egyenlő az összetett hővonalak összetolásával, ahogy az a 3.13. ábrán látható. Az utolsó kettő (árnyékolt) oszlop a 3.2. táblázatban a shiftelt hőmérsékletet mutatja be.



3.13. ábra: A hőmérséklet-shifting a megvalósítható hőáramlás érdekében

### 2. lépés

A hőfokintervallumokat az összes áram shifted hőmérsékletének csökkenő sorrendben való felsorolásával képezzük (az ismétlődő értékeket csak egyszer adjuk meg). Ez a művelet megteremti a hőmérséklet határokat (TBs), amelyek által a feladat hőfokintervallumait is meghatározhatjuk. A 3.2. táblázatban bemutatott példa alapján a TBs értékek a következők: 245 °C, 235 °C, 195 °C, 185 °C, 145 °C, 75 °C, 35 °C és 25 °C.

### 3. lépés

A hőmérleget minden hőfokintervallumban külön kiszámítjuk. Először az áramok a hőfokintervallumba eső populációját határozzuk meg (az első két oszlop a 3.3. táblázatba). Ezután a szegmensek CP-ít összeadjuk az intervallumon belül, majd ezt az összeget az intervallum hőfok-különbségével (azaz a hőfokintervallum határai közötti különbséggel, amely meghatározza az intervallumot) szorozzuk meg. E számítást szintén a 3.3. táblázatban mutatjuk be.

3.3. táblázat: Hőkaszkád-számítás a 3.2. táblázatban bemutatott áramokra

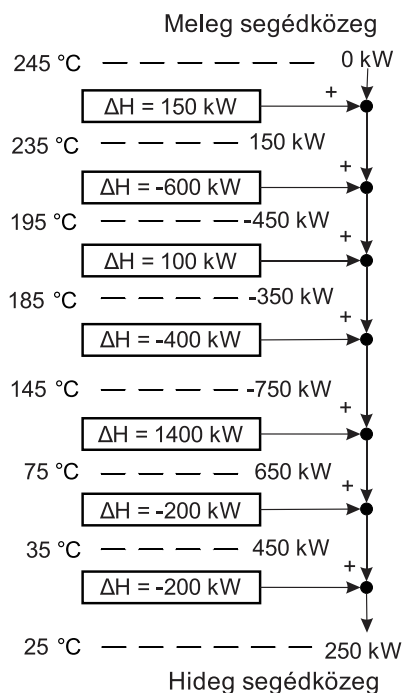
Intervallum T [°C]	Az áramok populációja	$\Delta T_{\text{INTERVALLUM}}$ [°C]	$\sum CP_H - \sum CP_C$ [kW/°C]	$\Delta H_{\text{INTERVALLUM}}$ [kW]	Többlet/ hiány
245-----		10	15	150	Többlet
235-----		40	-15	600	Hiány
195-----		10	10	-100	Többlet
185-----		40	-10	-400	Hiány
145-----		70	20	1400	Többlet
75-----		40	-5	-200	Hiány
35-----		10	20	-200	Hiány
25-----					

#### 4. lépés

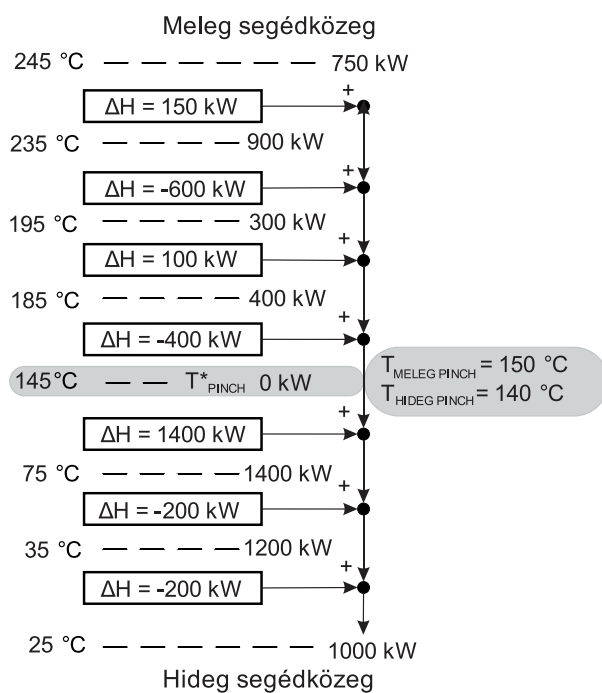
A feladat hőkaszkádját, amely a 3.14. ábrán látható, egy hozzárendelt doboz ábrázolja minden hőfokintervallumban; minden doboz az arra vonatkozó hőfokintervallum entalpiamérlegét tartalmazza. A dobozok a hőáramlás nyilaival vannak összekötve a hőmérséklet csökkenésének irányában. A legfelső hőáramlás a kaszkádnak nyújtott teljes fűtést, míg a legalsó hőáramlás a kaszkádnak nyújtott teljes hűtést ábrázolja. Feltételezzük, hogy a fűtés az első lépésben nulla értékkel bír. Ezt az értéket hozzáadjuk a legfelsőbb kaszkád-intervallumhoz, ezáltal meghatározva a következő – alacsonyabban fekvő – kaszkád hőáramlásának értékét („lecsorgatás”). Ezt a műveletet megismétljük az alacsonyabb hőmérsékletű hőfokintervallumban, összekapcsolva a hőáramlásokat egészen addig, míg a legalsó hőáramlást is ki nem számoljuk: ennek eredménye a kaszkád, amely a 3.14. (a) ábrán látható.

#### 5. lépés

A kaszkádban kapott hőáramlások értékét vizsgáljuk, és ezáltal megkapjuk a megvalósítható kaszkádot (3.14. (b) ábra) úgy, hogy a legkisebb hőáramlás értékét azonosítjuk, és ha ez nem negatív értékű (tehát pozitív vagy nulla), akkor a kaszkád termodinamikailag megvalósítható. Ha ez az érték negatív, akkor pozitív fűtési hőáramlatot kell biztosítani, mégpedig a negatív hőáramlat abszolút értékében, a legmagasabb hőáramlatban, ezután pedig megismétljük a 4. lépésben leírt „lecsorgatást”. A kapott hőkaszkád garantáltan megvalósítható, és megadja a számszerű hővisszanyerési célokat. A legfelsőbb hőáramlás jelenti a minimális fűtésigényt, a legalsó pedig a minimális hűtésigényt. A hőfokintervallum határa, ahol a hőáramlás nulla, utal a (hővisszanyerési) pinch elhelyezésére. Gyakran lehetséges egyszerre több nulla hőáramlást kapni a hőfokintervallum határain, ilyen esetben mindegyik határ pinch pontot jelent.



(a) Elsődleges kaszkád



(b) Megvalósítható kaszkád

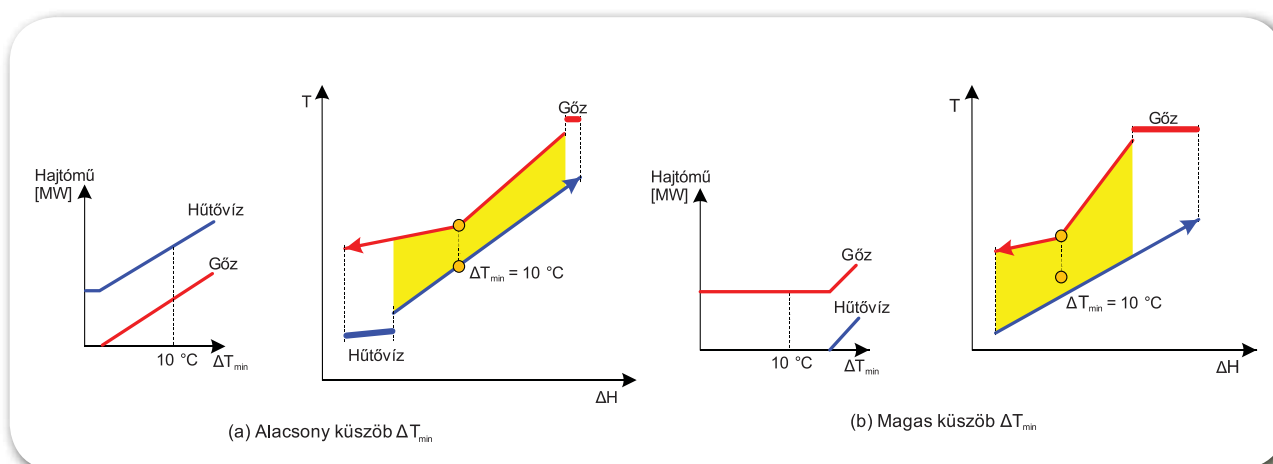
3.14. ábra: A hőkaszkád a 3.2. táblázatban bemutatott folyamat adatai alapján

### 3.3.4. Threshold feladatok

A threshold feladatnál csak egy típusú segédközegre van szükség. Ez főleg azért fontos, mert egy bizonyos  $\Delta T_{min}$  érték alatt gyakran a segédközeg-beruházás nincs kompromisszumhelyzetben, mert a minimális segédközegigény (meleg vagy hideg) állandó (független) a  $\Delta T_{min}$ -től, lásd a 3.15. ábrát.

Tipikus példa a threshold hőintegrálási feladatra a magas hőmérsékletű tüzelőanyag-cellák, amelynek általában magas a hűtésigénye, viszont nincs fűtésigénye (Varbanov et al. 2006; Varbanov és Klemeš, 2008). Az alapvető jellemző, ami által megkülönböztethetőek a threshold feladatok a pinch feladatoktól az az, hogy amikor változtatjuk a  $\Delta T_{min-t'}$ , akkor csak az egyik segédközeg-igénye (meleg vagy

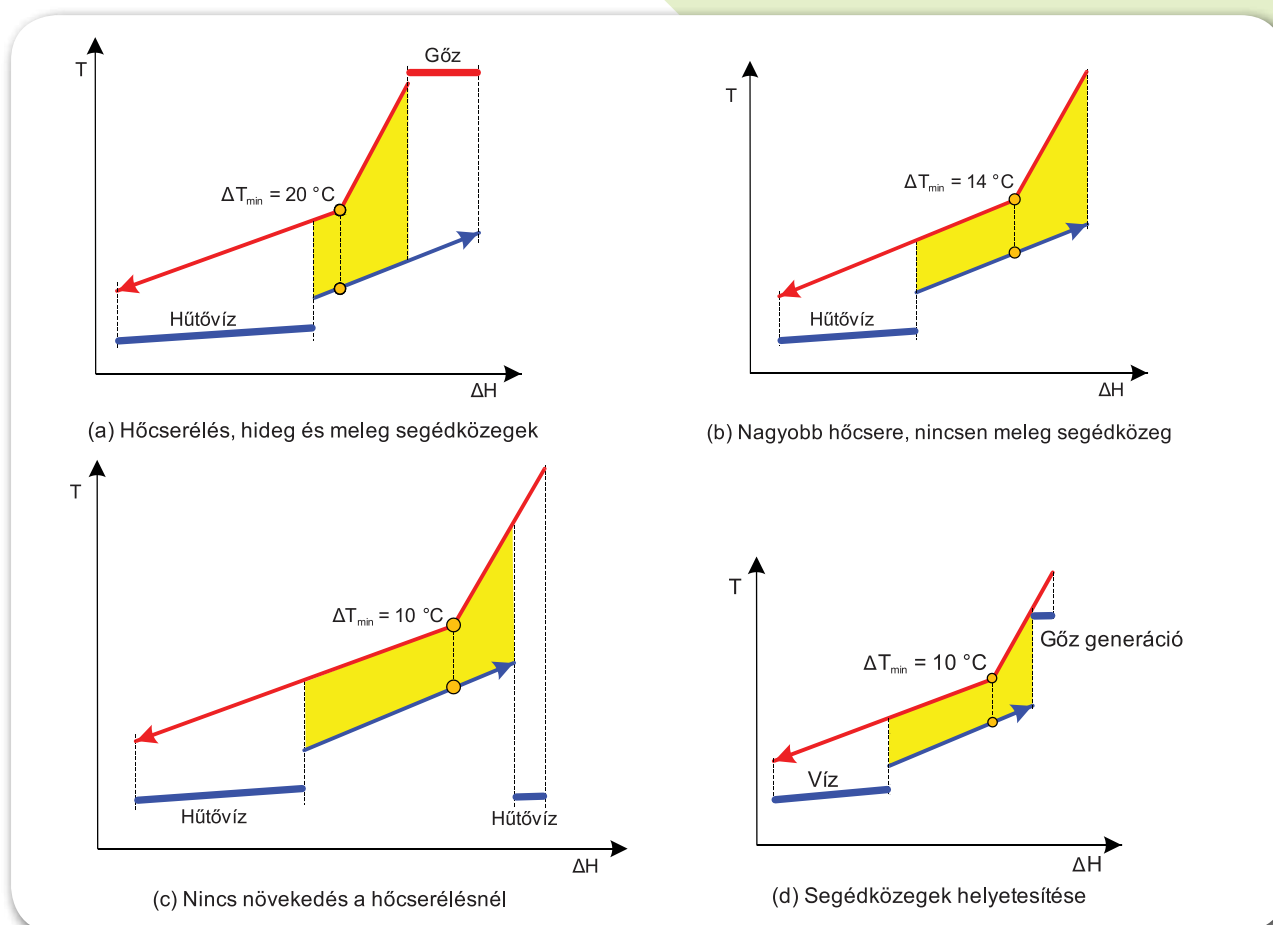
hideg) azonosítható be, ellentétben a pinch feladatokkal, ahol mindkét segédközeg változik a hőmérséklet intervallumon belül. A HH szintézisének két altípusa van (lásd a 3.16. ábrát).



3.15. ábra: Threshold feladatok

1. Alacsony threshold  $\Delta T_{\min}$ : ezen típusú feladatokat a pinch-típusú feladatokhoz hasonlóan kell kezelni.
2. Magas threshold  $\Delta T_{\min}$ : ezek esetében először szükséges a hőmérsékletigényt

kielégíteni azon az oldalon, ahol nincs segédközeg használata, és csak ezt követően kezdhetjük el tervezni az eljárását.



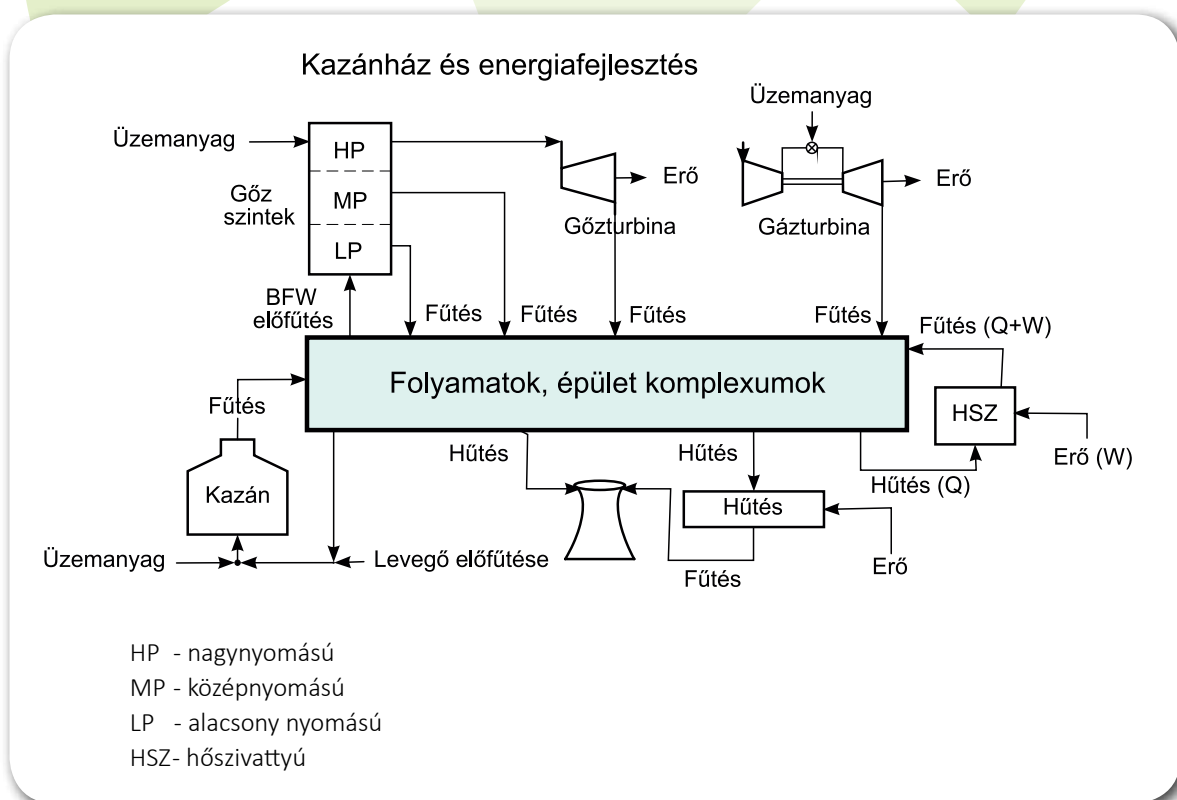
3.16. ábra: Threshold HH tervezési esetek

### 3.3.5. Többszörös segédközeg használatának célmeghatározása

#### 3.3.5.1. Segédközeg elhelyezés: Grand Composite Curve (GCC)-fő hővonal

Sok esetben több mint egy meleg és egy hideg segédközeg áll rendelkezésre a külső fűtés, illetve hűtésigények fedezésére a hő-

visszanyerés után. Ezért szükségessé válhat a rendelkezésre álló legolcsóbb és leghatékonyabb segédközeg kombinációja (3.17. ábra).



3.17. ábra: Választások a meleg és hideg segédközegekre (amended after CPI 2004 and 2005)

A döntéshozatal megkönnyítése és az összetett hővonalak által nyert információk javítása egy másik grafikus szerkezet létrejöttét segítette elő: Grand Composite Curve (GCC)-fő hővonal (Townsend és Linnhoff, 1983). A hőkaszkád és annak számítása (Linnhoff és Flower, 1978) irányelveket ad a fűtő- és hűtőközeg optimális elhelyezésére,

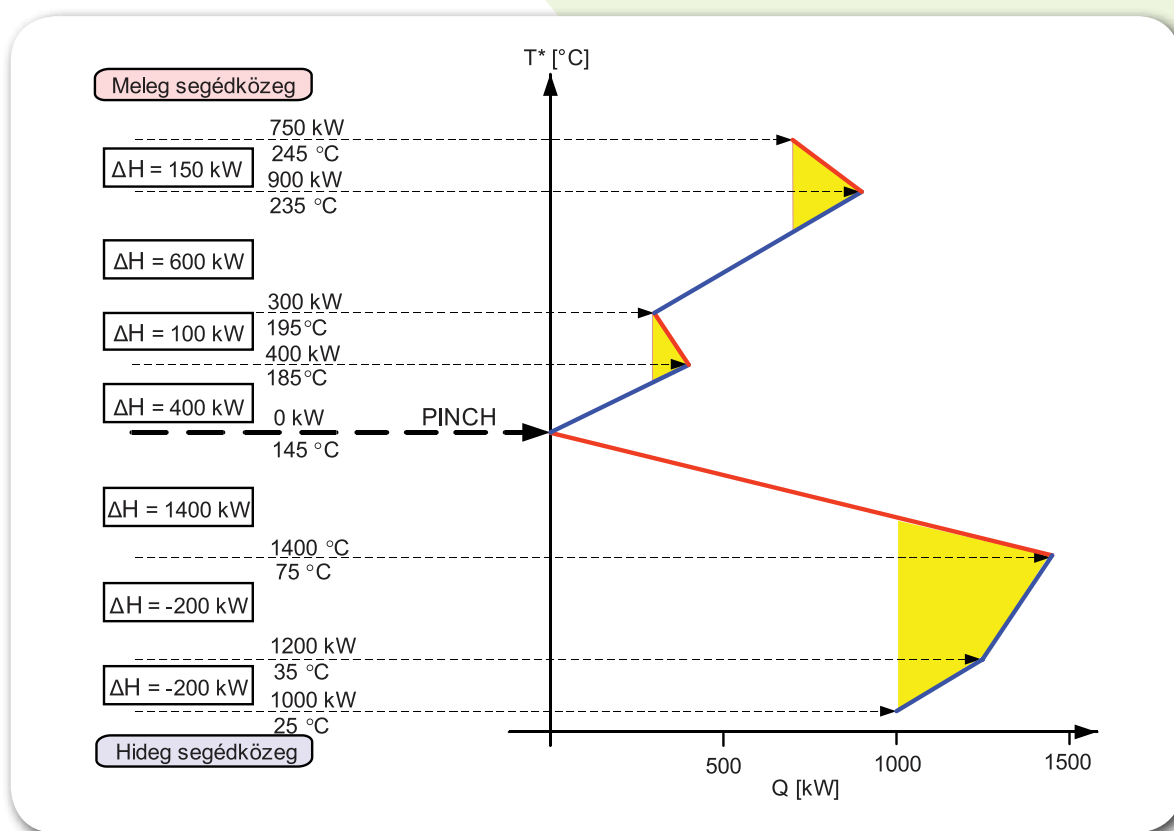
és ez lehetővé teszi az egyes segédközegek hőterhelésének a meghatározását. Eddig a pontig csak egy hideg és egy meleg segédközeg áll rendelkezésre – jóllehet elegendően alacsony és magas hőmérsékleten a folyamat hűtés- és fűtésigényeinek a kielégítésére. Viszont a legtöbb ipari üzem többszörös fűtő- és hűtősegédközeget igényel különböző

hőmérsékleti szinteken (pl. gőzszint, hűtőszint, forró olaj kör, a kemencéből kipufogó gáz). Minden segédközegnek saját egyiségára van. Általában a magas hőmérsékletű fűtőközegek és az alacsony hőmérsékletű hűtőközegek drágábbak, mint azok a segédközegek, amelyeknek a hőmérséklete közelebb van a környezet hőmérsékletéhez. Ez a tény alátámasztja a többféle segédközeg elegyének a kiválasztását, amely legalacsonyabb segédközegköltséget eredményez. Az általános cél az olcsóbb segédközegek használatának a maximalizálása, és a drágább segédközegek használatának a minimalizálása. Általában előnyösebb az alacsony nyomású (LP) gőz használata a magas nyomású (HP) helyett, és a hűtővíz használata a fagyasztás helyett. Az összetett hővonalak kényelmes nézetet kínálnak a folyamat hajtóerőéről és az általános hővisszanyerés céljairól. Az összetett

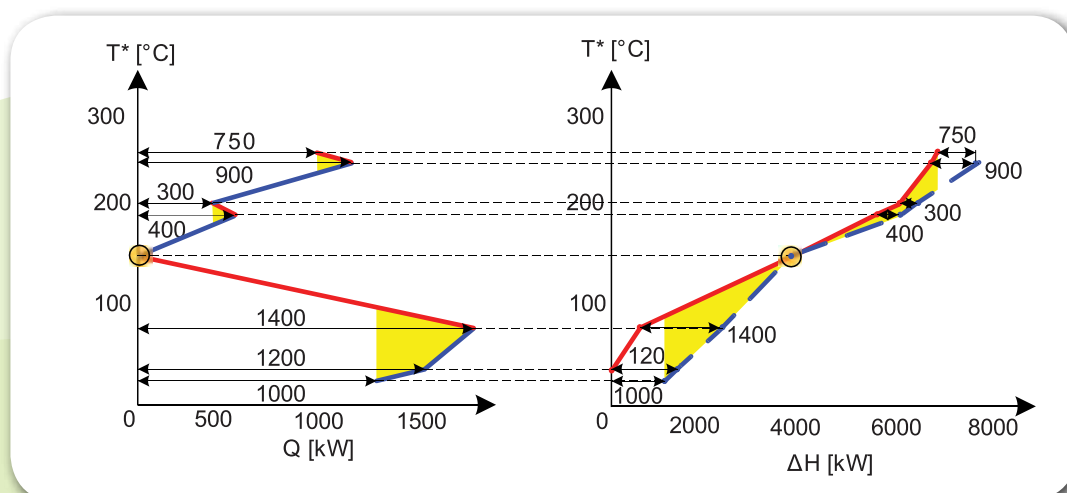
hővonalak viszont nem alkalmasak a célok meghatározására olyan esetben, amikor többszintű segédközeg áll rendelkezésre, erre a feladatra a fő hővonalat (GCC-t) használjuk.

### 3.3.5.2. A fő hővonal (GCC) szerkesztése

A fő hővonal szerkesztése a hőcaskád számolásának a segítségével történik (3.14. ábra). A hőáramlásokat a  $T$ - $\Delta H$  térben szerkesztjük, ahol a hőáramlás minden hőmérsékletnél az  $X$  koordinátának felel meg, a hőmérséklet pedig az  $Y$  koordinátának (3.18. ábra).



3.18. ábra: A GCC szerkesztése a 3.2 táblázatban felsorolt áramokra



3.19. ábra: A GCC (baloldali) és a SCC (jobboldali) közötti összefüggés a 3.2 táblázatban bemutatott áramokra

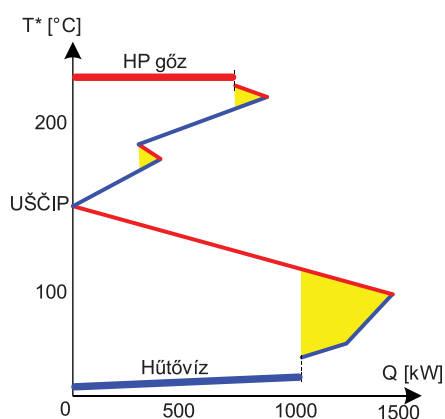
A fő hővonalat közvetlen összefüggésbe lehet hozni a shiftelt összetett hővonallal, ahol az összetett hővonalak hőmérséklete  $\Delta T_{\min}/2$ -vel tolódik el úgy, hogy a hővonalak érintik egymást a pinch pontban (lásd a 3.19. ábrát). Minden hőmérsékletnél a hőáramlás a hőszkád-számításban és a GCC-ben a vízszintes távolságnak felel meg a SCC-ben.

AGCC-nek számos olyan alapvető tulajdonsága van, amely elősegíti a hővisszanyerési feladat alapos megértését. A hővonal pozitív meredekséggel rendelkező része (amely jobbról balra emelkedik) arra mutat rá, hogy ebben a hőmérséklet-tartományban a hideg áramok túlsúlyban vannak (3.18. ábra és 3.19. ábra). Hasonlóan a negatív meredekséggel rendelkező részek a meleg áramok túlsúlyára utalnak. Az árnyékolt területek, amelyek a folyamaton belüli hővisszanyerést ábrázolják, az ún. hővisszanyerési zsebek.

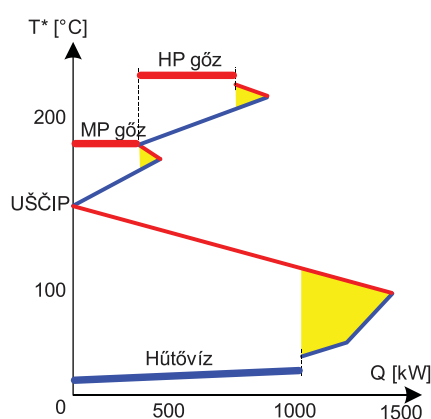
### 3.3.5.3. A segédközeg elhelyezésének a lehetőségei

A GCC a folyamat a fűtő- és hűtőközeg igényeinek az entalpiáját és a hőmérsékletét is ábrázolja. Ez lehetővé teszi a különböző hőmérsékletű segédközegek elkülönítését. Egy üzemben a segédközegek általában különböző hőmérsékletszinten állnak rendelkezésre, pl. magasnyomású (HP) és közepes nyomású (MP) gőz kínálata. Amint azt már említettük, elvárás az, hogy maximalizáljuk az olcsóbb segédközeg használatát, és hogy minimalizáljuk a drágább segédközeg használatát. A magasabb hőmérsékletű és/vagy nyomású segédközeg általában drágább (lásd a 3.20. ábrát). Ezért az MP gőzt használjuk először, az Y tengelynél kezdve egészen addig, amíg nem ér a GCC-hez, ami által maximalizáljuk az MP gőz használatát. Csak ezek után használjuk a HP gőzt.





(a) Egyes gőzsztint



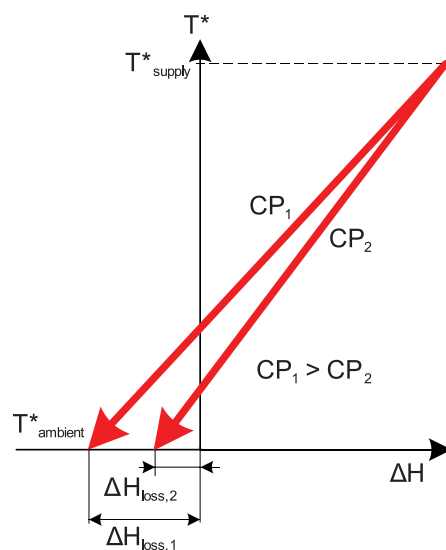
(b) Többsztintű gőz

3.20. ábra: A GCC használata célmeghatározásra – egy gőzsztint vagy többsztintű gőz használatára

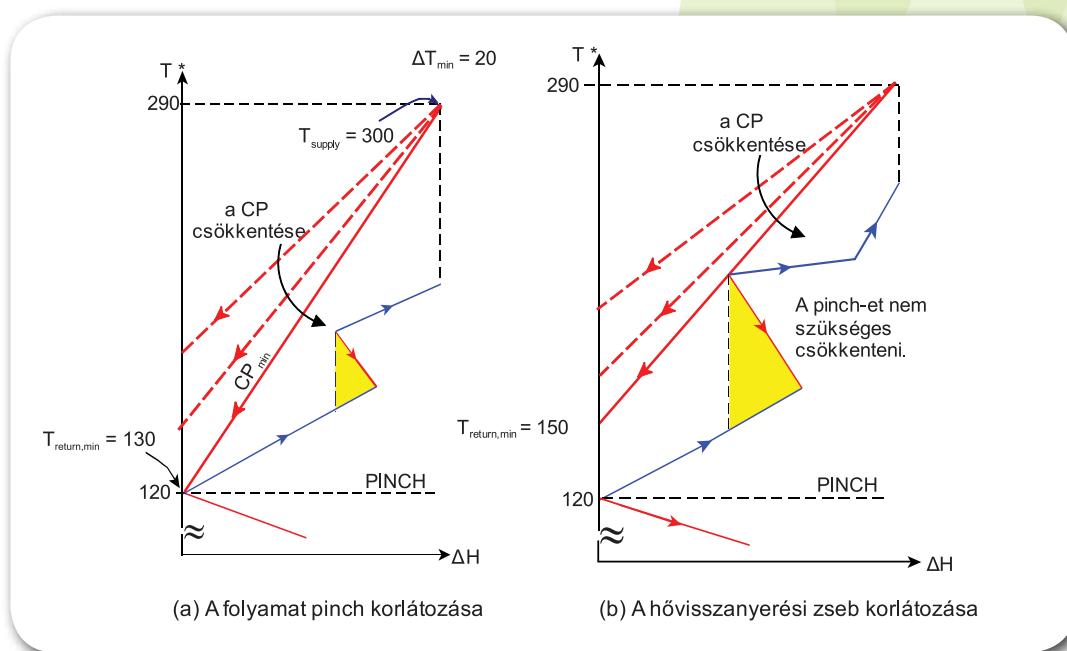
Amikor a segédközegevonal vagy profil érinti a GCC-t, új pinch pont jön létre, amit „segédközeg pinch”-nek nevezünk (3.20. ábra). Minden további gőzsztint újabb segédközeg pinch-hez vezet, és ezáltal növeli a segédközegrendszer összetettségét. A bonyolultabb rendszernek számos negatív következménye van, beleértve a magasabb beruházási költségeket, nagyobb az esély a szivárgásra, csökken a biztonság, és magasabbak a karbantartási költségek. A korlátok általában a segédközeg számára vonatkoznak.

A magasabb hőfokú fűtésigények nem izotermikus segédközeggel vannak lefedve. Ezek a segédközegek a forró olaj és a forró kipufogógázok – mindkét anyag széles hőmérséklet tartományban fenntartja a halmazállapotát (folyadék vagy gáz formájában). Az üzemeltetési költségek az ilyen segédközegek felhasználásával nagyban függenek a kemence hatékonyságától, és a szivattyúzás, illetve a ventilátor fűtésének intenzitásától és hatékonyságától. Az ilyen nem-izotermikus fűtőközeg elhelyezése célmeghatározás kivitelezésénél: a profilt egyenes vonallal ábrázoltuk, amely a 3.21. ábra grafikonján a jobb felső részből indul, és a bal alsó részben folytatódik. A

vonala kezdeti pontja a segédközeg bemeneti hőmérsékletének felel meg, a legjobboldalibb pont ugyanakkor a fűtőközeg teljesítményét ábrázolja. A segédközeg végső pontja a nullának felel meg a  $\Delta H$  tengelyen (ebben az esetben az összes fűtés a jelenlegi nem-izotermikus segédközeggel van lefedve), vagy a legbaloldalibb pont a  $\Delta H$  tengelyen a másik, olcsóbb fűtőközegnek felel meg.



3.21. ábra: A nem-izotermikus fűtőközeg tulajdonságai

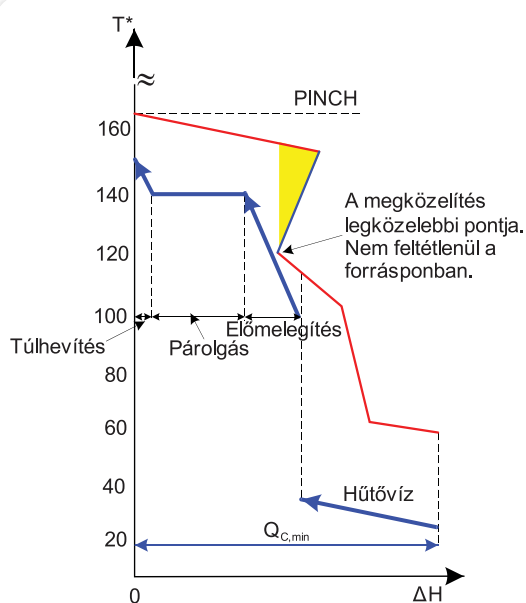


3.22. ábra. A forró olajak, mint segédközegek elhelyezési korlátai

Amint az a képen is látható, a nem-izotermikus segédközeg végződési pontja a környezeti hőmérséklet. Így e segédközeg használatánál a nulla és a  $\Delta H$  tengely közötti különbség mutatja a hőveszteségeket. A hőkapacitási áram a nem-izotermikus segédközeg célja, amelyet úgy határozzunk meg, hogy a segédközeg-vonalat olyannyira meredeken tervezzük, amennyire csak lehet, ezáltal csökkentve a CP-t és a hozzáfűződő hőveszteségeket (3.22. ábra). A bemeneti hőmérséklet általában rögzített a kemence maximális hőmérsékletével, illetve a hőhordozó összetételével az engedélyezett hőmérsékleten; a hátralévő szabadságfok a segédközeg hőkapacitására vonatkozik. Kisebb CP értékek eredménye a meredekebb lehajlás és kisebb hőveszteségek. A nem-izotermikus segédközeg elhelyezése (pl. forró olaj) két tulajdonsággal korlátozható: 1) a folyamat pinch pontjával és a „hurok”-kal ami a GCC-n le lehet fel a hővisszanyerési zseb felső végződésében (lásd példaként a 3.22. ábrát).

Az üzemanyag égetésekor a kemencében vagy a kazánban az eredményezett ki-

pufogógáz rendelkezésre áll a hozzátartozó hidegáramközeg fűtésére (a gőz generálására vagy a közvetlen folyamatigény fedezésére). A folyamatba történő hőátadás előidézi a kipufogógáz hőmérsékletének csökkentését – ahogy halad a kemencéből a kéménybe. A kémény hőmérsékletének meghatározott érték felett kell lennie, ez az ún. minimális megengedett kéményhőmérséklet, amelyet a rozsdásodás korlátai alapján határozzunk meg. Ha a kipufogógázt közvetlenül a fűtésre használjuk, akkor a pinch pont – ha magasabban helyezkedik el – lehet a korlátozó tényező, és nem a minimális megengedett kéményhőmérséklet (3.22. ábra). Ha az elemzett folyamatban mindkettő fűtőközegre szükség van – a magas- és a mérsékelt hőmérsékletűre is –, akkor nem biztos, hogy a kipufogógáz a legalkalmasabb ezen igények fedezésére. Ha a gőz olcsóbb, akkor a kipufogógázzal való kombinálása a kipufogógáz CP-jét csökkenti, ezzel csökkentve a hozzáfűződő hőveszteségeket a kéményben.

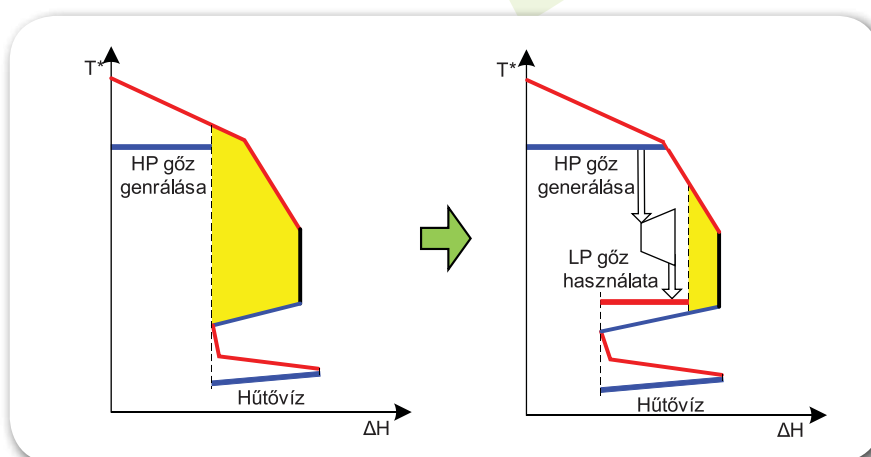


3.23. ábra: A gőz generálása a pinch alatt

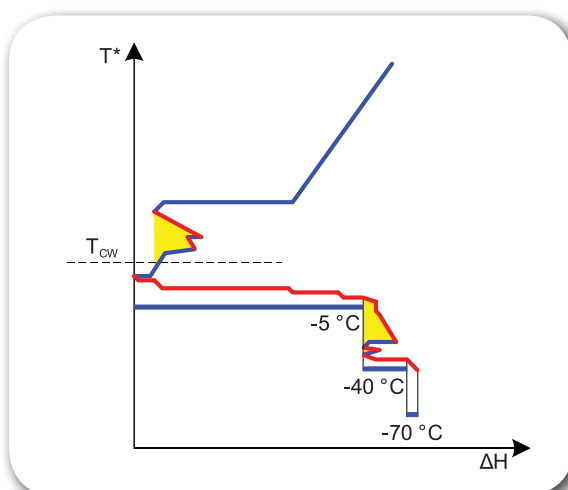
Egy másik lehetőség a segédközeg elhelyezésére a hűtésigény egy részének felhasználása a gőz generálására. Ez az alábbi ábrán (3.23. ábra) látható, ahol a gőz generálása a pinch pont alatt van elhelyezve.

A GCC segítségével rá lehet mutatni arra, hogy hol lehet a segédközeg elcszerelésével javítani az energiahatékonyságon (lásd a 3.24. ábrát). Az alapvető ötlet olyan hőviszanyerő zsebek elemzése, amelyeknél a hőátadás két vagy több segédközeg hőmérsékletszintjén ível át. E megközelítés műszaki megvalósíthatósága a hőmérséklet tartománytól és a zseben belüli hőteljesítménytől függ, amelynek elég nagy-nak kell lennie ahhoz (mindkét szempontból: hőteljesítmény és hőmérséklet-tartomány), hogy – összevetve a beruházási költségeket –

a cserét megérje kivitelezni.



3.24. ábra: A GCC zsebeinek segédközegre való lecserélése

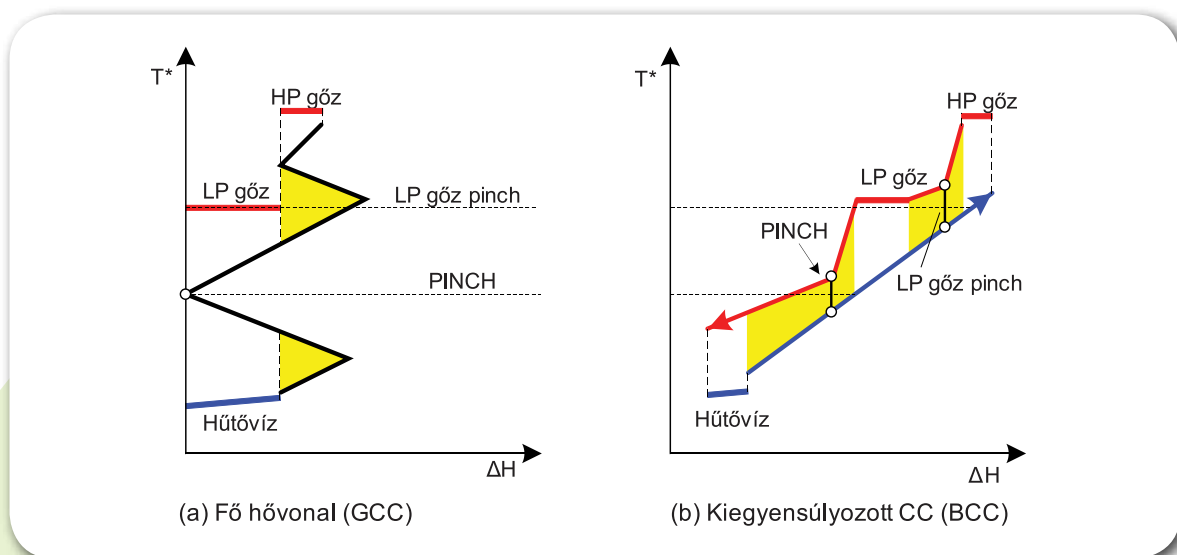


3.25. ábra: A tiszta hűtőközegszintek elhelyezése

Amikor a hűtés a környezeti hőmérséklet alatt van, az igények fedezésére általában fagyasztás szükséges. A hűtőközegek a hőt párolgás által abszorbálják. A tiszta hűtőközegnek állandó hőmérséklete van, ezért a hűtőközegek a  $T$  (vagy  $T^*$ ) kontra  $\Delta H$  ábrán vízszintes vonalakkal vannak jelölve, a gőzhöz hasonlóan. A GCC-n a hűtőközeg (fagyasztás) szintjei a gőzhöz hasonlóan vannak elhelyezve, lásd a 3.25. ábrát.

Amikor a segédközegszint hőviszanyerési zsebek hőmérsékletei között van elhelyezve, a segédközeg pinch-et nem lehet elhelyezni a GCC használatával, ebben az esetben a kiegyensúlyozott összetett hővonalat (BCC) használjuk.

A 3.26. ábra azt mutatja, hogyan lehet a segédközeg-elhelyezést átvinni a fő hővonalról (GCC-ről) a kiegyensúlyozott CC-re (BCC-re) úgy, hogy lehetővé tesszük a segédközegi pinch megfelelő elhelyezését, amely az LP gőzhöz tartozik.



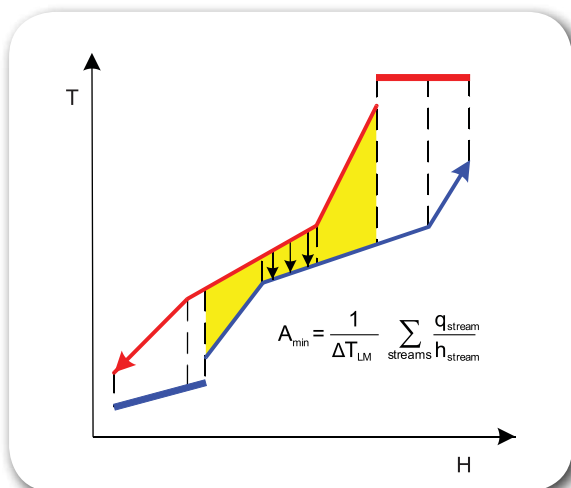
3.26. ábra: Az LP-gőz segédközeg pinch elhelyezése

A BCC létrehoz egy kombinált nézetet, amelyben minden hőforrás és hőelnyelés (beleértve a segédközegeket is) mérlegben van, és minden pinch látható. A BCC hasznos kiegészítő eszköz a hőviszanyerés elemzésére, a speciális segédközegek céljainak meghatározására és a régiók HH tervezésére.

### 3.3.6. Beruházás és teljes költség célmeghatározása

A maximális hőviszanyerés becslése mellett a beruházási költségek is felbecsülhetők. A becslések meghatározására az egyenlet a hőátadás területének és az egyes hőcserélők hatékonyságának arányára vezethető vissza. A beruházási és teljes költségek meghatározására a módszerek eredetileg Townsendtől és Linnhofftól (1984) származtak, majd mások továbbfejlesztették azt (pl. Ahmad, Linnhoff és Smith 1990; Colberg és Morari, 1990; Linnhoff és Ahmad, 1990; Zhu et al., 1995).

A HH beruházási költségei a hőátadás területétől, a hőcserélők számától, az áthaladás számától a csőköteges hőcserélőben, a szerkezeti anyagoktól, az eszköz típusaitól és a működési nyomásoktól függenek. A hőátadás területe a legjelentősebb tényező, és a csőköteges hőcserélők esetében lehetséges a teljes minimális szükséges hőátadási terület felbecsülése; ez az érték elősegíti a beruházás alsó korlátjának a meghatározását. A minimális hőátadási terület meghatározása az entalpiaintervallumokon alapul. Ahogy az a 3.27. ábrán látható, az entalpiaintervallum egy szelet (részlet), amelyet két függőleges vonal korlátoz – rögzített értékkel a  $\Delta H$  tengelyen. Ezt az intervallumot a  $\Delta H$  különbséggel határozzuk meg, az intervallumot továbbá a hozzátartozó hőmérsékletekkel az összetett hővonalon, ennek áram populációjával, és az áramok hőátbocsátási tényezőivel határozzuk meg.



3.27. ábra: Entalpiaintervallumok és a terület célmeghatározása

A minimális hőátadási terület célja az egyes entalpiaintervallumokban meghatározott becslések összegéből tevődik össze (Linnhoff és Ahmad, 1990):

$$A_{HEN,min} = \sum_{i=1}^{EI} \left[ \frac{1}{\Delta T_{LM,i}} \cdot \sum_s \frac{q_s}{h_s} \right] \quad (3.6)$$

Itt az  $i$  az entalpiaintervallum;  $s$  az áram; a  $\Delta T_{LM,i}$  a logaritmusos közepes hőmérséklet az  $i$  intervallumban (az összetett hővonal szegmenseiből); a  $q_s$  az entalpia-különbség az  $s$  áramban; és a  $h_s$  hőátadási tényező az  $s$  áramra. A hőátadási terület célját ki lehet egészíteni a héjak (shell) (Ahmad és Smith, 1989) és a hőcserélők számával, ennek alapján meg lehet határozni a HH beruházásának és a teljes költségek becslését. Ez a megközelítés az ún. szupertargeting (Ahmad, Linnhoff és Smith, 1989). A szupertargetinggel lehetséges a  $\Delta T_{min}$  optimalizálása a HH tervezés előtt. A javasolt beruházási fejlesztések főleg az alábbiakat tartalmazták:

1) A HH hőátadási területének pontosabb meghatározása a nem egységes hőátadási tényezők figyelembevételével (Colberg és Morari, 1990; Jegede és Polley, 1992; Zhu et al. 1995; Serna-González, Jiménez-Gutiérrez és Ponce-Ortega, 2007),

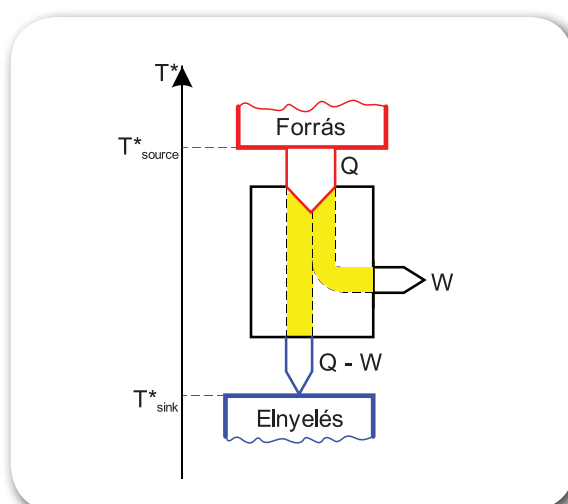
- 2) kiszámítások a szerkezeti anyagok, a nyomásfokok és a különböző hőcserélő típusok figyelembevételével (Hall, Ahmad és Smith, 1990),
- 3) a biztonsági tényezőket beleértve a korlátozó távolság figyelembevétele (Santos és Zemp, 2000).

További információ a Taal et al. (2003) cikkben található, amely összegzi az általános módszereket, amelyek a hőcserélő eszközök költségbecslésére irányulnak, és listázza a forrásokat az energiaárak előrejelzésére.

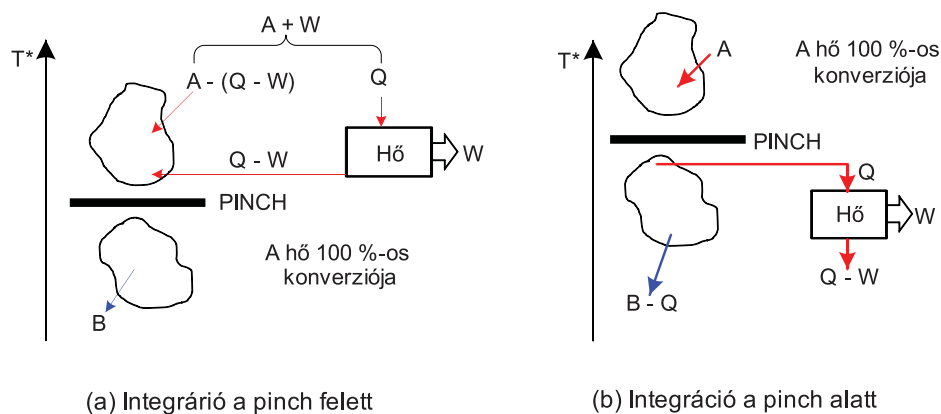
### 3.3.7. Az energiaintenzív folyamatok hőintegrálása

#### 3.3.7.1. Hőerőmű

Különösen fontos folyamatok zajlanak a hőerőművekben – gőz- és gázturbina –, valamint ezek hibridjeiben. A hőerőművek úgy működnek, hogy a magas hőmérsékletű forrás egy részét átalakítják mechanikai erővé, majd (némi energiavesztés után) a kimenetelen a fennmaradó hő alacsonyabb hőmérsékleten távozik (lásd: 3.28. ábra). A célmeghatározáskor az energiavesztéseket általában elhanyagolták.



3.28. ábra: A hőerőmű konfigurációja



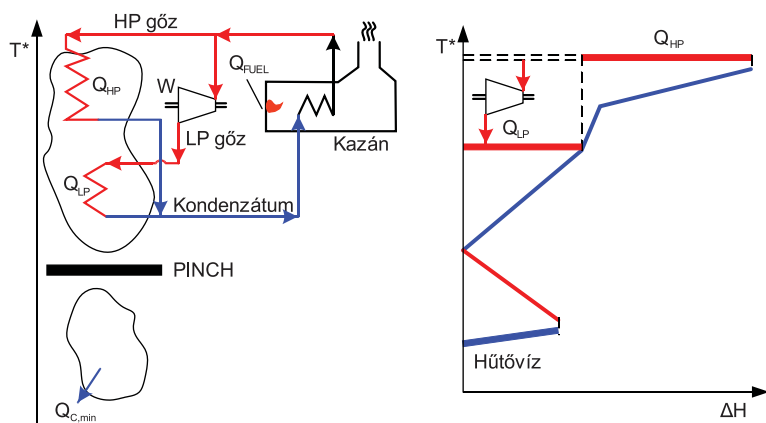
3.29. ábra: A hőerőmű megfelelő elhelyezése

A pinch-en keresztül történő hőerőmű integrálásának eredményeként – ami a pinchen keresztüli folyamaton belüli hőátadásnak felel meg – egyidejűleg növekszik a fűtő- és hűtőközeg felhasználása, amely általában mértéktelen beruházást eredményez a segédközegek hőcserélőjébe. Ha a hőerőműt a pinchen keresztül integráljuk, akkor a fűtőközeg felhasználása  $Q$ -val megnő, a hűtőközeg pedig  $Q-W$ -vel (a 3.29. ábra jelölésével összhangban) növekszik. A hőerőműveket kétféleképpen érdemes integrálni:

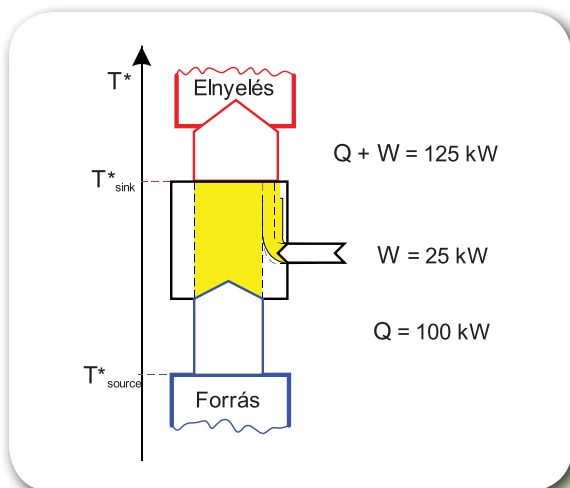
1) pinch felett (3.29. a ábra): az ilyen elhelyezés esetén  $W$ -vel megnő a fűtőközeg felhasználása, a teljes megnövekedett felhasználás pedig mechanikai munkává alakul át,

2) pinch alatt (3.29. b ábra): az efféle eljárás kettős hasznot eredményez, hiszen megta-  
karíthatunk a hűtőközeg felhasználásánál, és a folyamat hőjét a hőerőműnek a pinch alatt adja át (ahelyett, hogy a hűtőközeget használná).

A hőerőmű perspektívájából az elhelyezés eltérhet. A gőzturbinát el lehet helyezni a pinch felett vagy alatt, hiszen használják és kibocsátják a gőzt. A 3.30. ábra a gőzturbina integrálást mutatja be a pinch felett, ennek előnye, hogy további erőt kogenerál. Másfelől azokat a gázturbinákat, amelyek alapanyagként üzemanyagot használnak, általában a folyamatok segédközegének hőforrásaként használják, és így csak a pinch felett helyezhetők el.



3.30. ábra: A gőzturbina integrálása a pinch felett



3.31. ábra: A hőszivattyú konfigurálása

### 3.3.7.2. Hőszivattyú

A hőszivattyúk egy másik lehetőséget jelentenek az ipari folyamatok energiahatékonyságának javítására. A működésük a hőerőmű működésének fordítottja. Ez azt jelenti, hogy a hőszivattyúk a hőt alacsonyabb hőmérsékleten használják, és mechanikus erő alkalmazásával magasabb hőmérsékletű áramot bocsátanak rendelkezésre a hőelnyelő résznek (3.31. ábra).

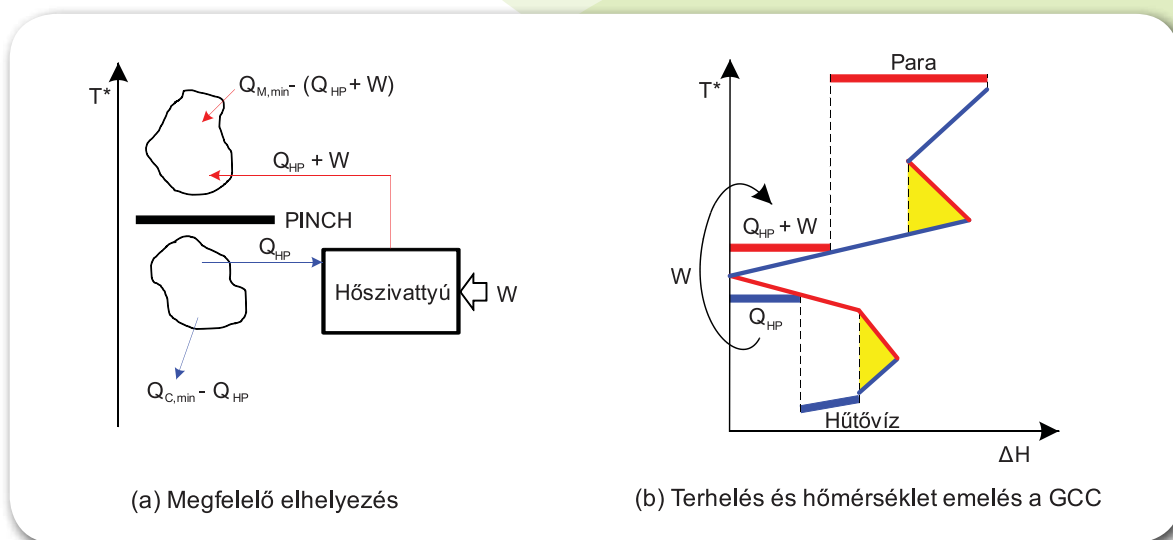
A hőszivattyú fontos tulajdonsága a teljesítménytényező (angolul: *coefficient of performance* - COP). Ezt a mértékegységet, amely a készülék hatékonyságát fejezi ki, a

hőmennyiség – amely a hőelnyelőhöz vezethető el – és a felhasznált mechanikus energia hányadosaként definiáltuk.

$$Q_{\text{sink}} = Q_{\text{source}} + W \quad (3.7)$$

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{sink}}}{W} = \frac{Q_{\text{source}} + W}{W} \quad (3.8)$$

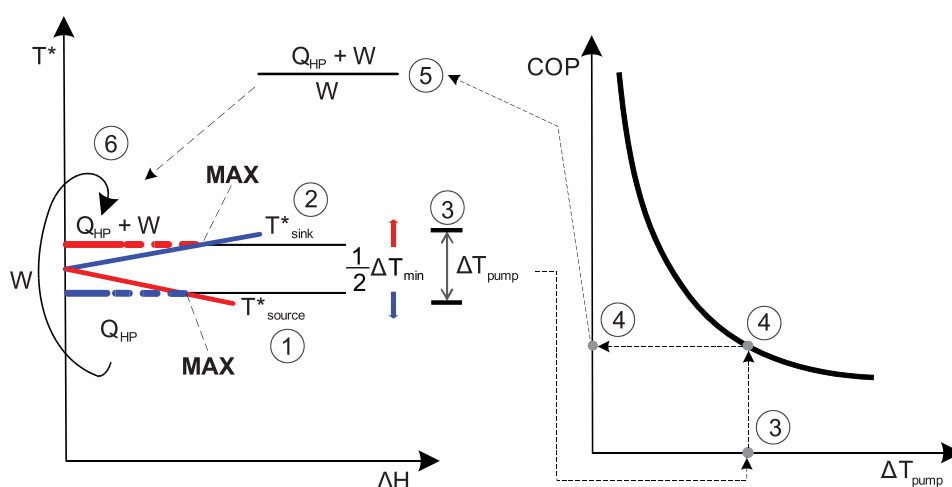
A COP a hőelnyelés és hőforrás közötti hőmérséklet-különbség nem-lineáris funkciója (Laue, 2006); ezt a különbséget más néven hőemelkedésnek is nevezzük. A 3.32. (a) ábra a hőszivattyú megfelelő elhelyezését a pinch ponton keresztül mutatja, úgy, hogy a hőforrás a pinch pont alatt, a hőelnyelés pedig a pinch pont felett van elhelyezve. A GCC elősegíti a hőszivattyú méretezését, a hőforrás, illetve hőelnyelés lehetséges hőmérsékleteinek és terhelésének az elemzésével, lásd a 3.32. (b) ábrát. Ha a hőszivattyút teljes egészében a pinch pont felett integráljuk, akkor a mechanikus energia közvetlenül hővé alakul át. Ez az elsődleges források veszteségéhez vezet, mert az erő nagy része kétszeres vagy akár háromszoros elsődleges energiaforrás felhasználásával generálódik. A másik alternatív megoldás szerint a hőszivattyút teljes egészében a pinch pont alatt kell elhelyezni, ami azt eredményezi, hogy a felhasznált erő mennyisége hozzáadódik a hűtésigényhez a pinch alatt.



3.32. ábra: A hőszivattyú elhelyezése a hővisszanyerés feladatában

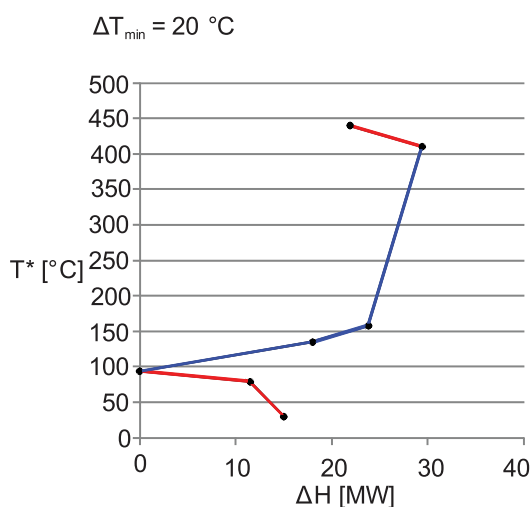
A hőszivattyú – pinch ponton keresztül integrált – méretezésének az eljárását a 3.33. ábra illusztrálja. Először a hőforrás és a hőelnyelés hőmérsékleteit választjuk ki. Ezt követően a vízszintes vetítés, amely a hőmérsékleti tengelytől a GCC-ig terjed, megadja a hőforrás és hőelnyelés maximális terhelésének értékét. Emlékeztetőül: a GCC az eltolt (shiftelt) hőmérsékleteket tartalmazza. Mivel a hőszivattyú hőemelkedésének

számításakor a valódi hőmérsékleteket használjuk, a GCC-n lévő hőmérséklet értékéhez hozzá kell adni vagy kivonni a  $\Delta T_{\min}/2$  (lásd a 3.3.5. fejezetet). A kiszámított hőfokemelkedés alapján meg lehet határozni a hőszivattyú teljesítménytényezőjét (COP), amelyet aztán felhasználunk a szükséges hőtérlettel számításakor.



3.33. ábra: A hőszivattyú méretezésének az eljárása

$\Delta H$ [MW]	$T^*$ [°C]
21,90	440
29,40	410
23,82	131
18,00	118
1,80	115
0,00	94
4,30	91
11,50	79
15,00	30



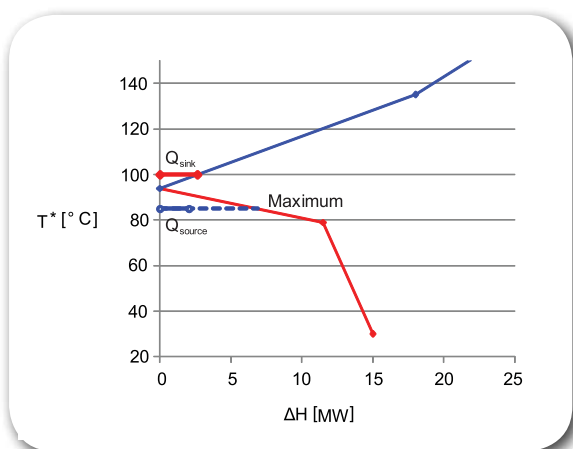
3.34. ábra: A hőszivattyú méretezésének a példája: kezdeti adatok



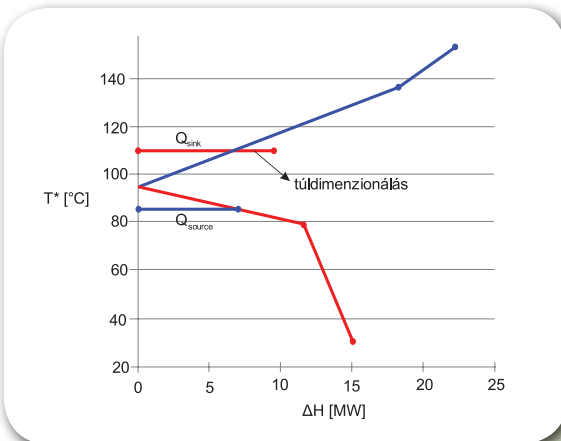
Konkrét példaként tételezzük fel, hogy a 3.34. ábrán lévő GCC ipari folyamatot ábrázol, ahol a  $\Delta T_{\min} = 20^\circ\text{C}$ , és a rendelkezésre álló hőszivattyú ekképpen írható le:

$$\text{COP} = 100.18 \cdot \Delta T_{\text{pump}}^{-0.874} \quad (3.9)$$

A pinch „orrára” összpontosítva (az éles „orr” jobb integrációs lehetőséget biztosít) lehetővé válik a hőforrás eltolt hőmérsékletének a kiválasztása, ez esetben:  $T_{\text{source}}^* = 58^\circ\text{C}$  (lásd a 3.35. ábrát). Ezt az értéket felhasználva legfeljebb 6.9 MW hőenergiát nyerhetünk ki a pinch alatt. A felső korlát a hőelnyelésre pedig 2.634 MW. A valódi hőmérsékletre transzformálva a hőfok-emelkedési hozam  $\Delta T_{\text{pump}} = 35^\circ\text{C}$ . A 3.9. egyenlet alapján a COP egyenlő 4.4799. A hőforrás és a hőelnyelés felső korlátainak a megadásával a kisebb értéket választjuk ki alapnak. Ebben a példában a hőelnyelés a kisebb, ezért az elnyelés a felső korlátra van méretezve:  $Q_{\text{sink}} = Q_{\text{sink,max}} = 2.634 \text{ MW}$ . Ebből kiindulva a szivattyú szükséges energiafogyasztása 0.588 MW. A hőszivattyú valódi hőforrás-teljesítménye tehát 2.046 MW. Ha ezt az eredményt összevetjük a hőforrás felső korlátával – ami 6.9 MW –, evidens, hogy a hőforrás jelentősen kihasználatlan.



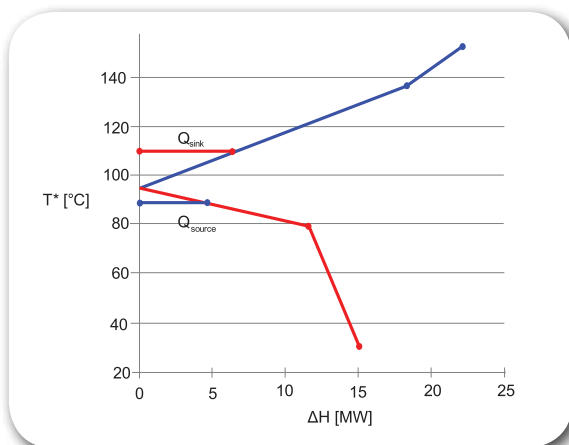
3.35. ábra: Hőszivattyú-méretezési példa: első próbálkozás



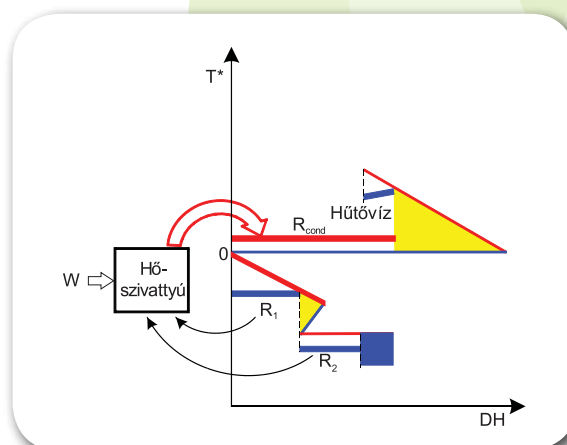
3.36. ábra: Hőszivattyú-méretezési példa: második próbálkozás

Másféle hőforrás és hőelnyelő hőmérséklet szükséges annak érdekében, hogy a hőforrás kihasználtsága jobb legyen. A második próbálkozásban a hőelnyelő hőmérsékletét megnöveltük  $100^\circ\text{C}$ -ról  $110^\circ\text{C}$ -ra. A maximális hőforrás nagysága 6.9 MW marad, a maximális hőelnyelés teljesítménye azonban 2.634-ről 7.027-re nőtt. Ennek eredményeként a hőfokemelkedés  $\Delta T_{\text{pump}} = 45^\circ\text{C}$ , a  $\text{COP} = 3.5964$ , a hőszivattyú energiafogyasztása  $W = 2.657 \text{ MW}$ , és a hőelnyelő teljesítménye  $Q_{\text{sink}} = 9.557 \text{ MW}$  (lásd: 3.36. ábra).

Az új helyzetben viszont a hőelnyelés van túlméretezve (3.36. ábra), ezért a hőforrás hőmérsékletét meg kell növelni. A  $2.28^\circ\text{C}$  általi hőmérséklet-növelésnél (lásd: 3.37. ábra) az alábbi eredményeket kapjuk:  $\Delta T_{\text{pump}} = 42.72^\circ\text{C}$ ; a maximális hőforrásterhelés (ha a valós hőforrásterhelést vesszük figyelembe) 5.152 MW; a maximális hőelnyelési terhelés, amely egyenlő a valós maximális hőelnyelési terheléssel = 7.016 MW;  $\text{COP} = 3.7637$ ; és  $W = 1.864 \text{ MW}$ . Jobb eredmények érhetőek el, ha a két hőmérsékletszintet együttesen optimalizáljuk, miközben kritériumként a teljes segédközeg-költséget használjuk.



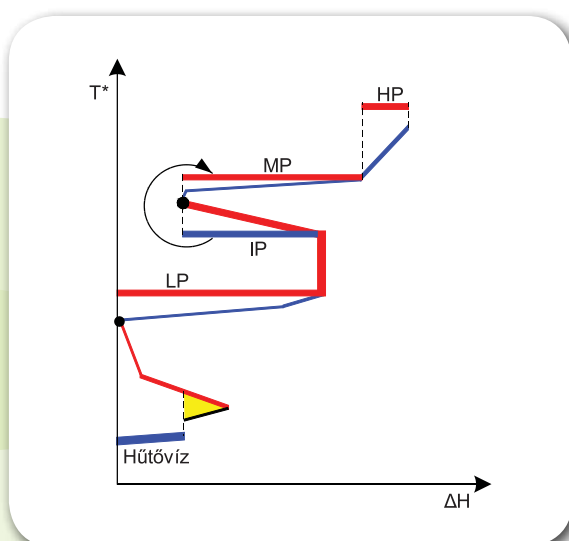
3.37. ábra: Hőszivattyú-méretezési példa: harmadik próbálkozás



3.39. ábra: Hűtőrendszer

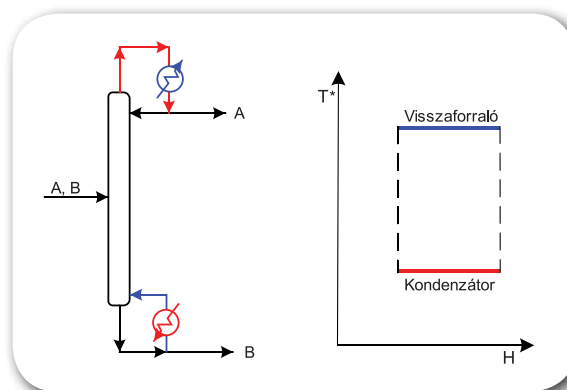
### 3.3.7.3. Desztillációs folyamatok és más elválasztók

A legegyszerűbb desztillációs oszlop egy visszaforralóból és egy kondenzátorból áll, és ezek az elemek teszik ki az oszlop energiaigényének a legnagyobb részét. A hőintegrálás céljából az oszlopot egy téglalap képviseli: a felső oldal az újraforralót jelöli – hideg áramként –, és az alsó oldal a kondenzátort – meleg áramként (lásd: 3.40. ábra).



3.38. ábra: Hőszivattyú elhelyezése a pinch-en keresztül

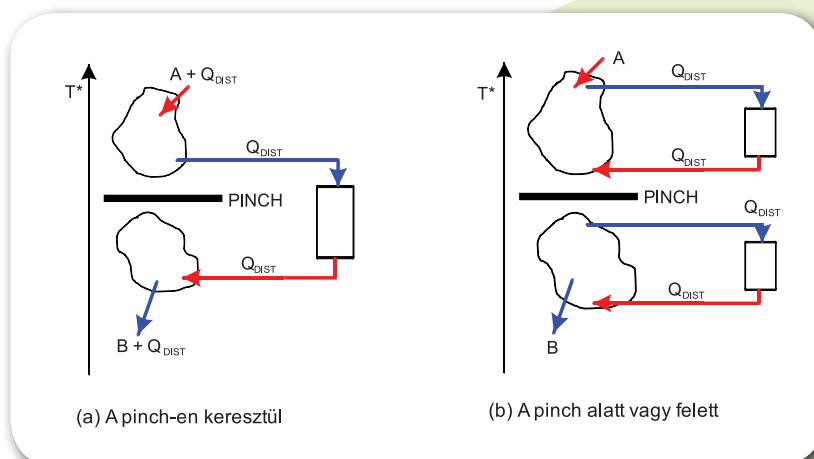
Amikor minden segédközegszintet kiválasztottunk, a hőszivattyú a segédközeg pinchén keresztül elhelyezhető (3.38. ábra). Az integráció speciális esete a hűtési szintek elhelyezése (3.39. ábra). A hűtőberendezések lényegében hőszivattyúk, amelyeknek elsődleges értéke abban rejlik, hogy a hideg végeken abszorbiálják a hőt. A hőszivattyúk meleg részeiben rendelkezésre álló hő jelentős mennyiségű fűtőközeget takaríthat meg, különösen akkor, amikor viszonylag alacsony hőmérsékletű fűtés szükséges.



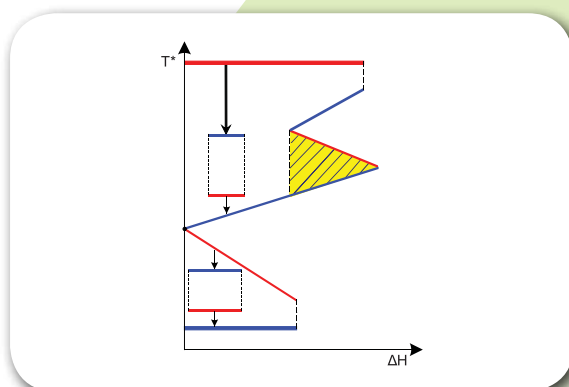
3.40. ábra: Desztillációs oszlop: T-H ábrázolás

Három lehetőség van a desztillációs oszlop integrálására: a pinch-en keresztül, ahogy azt a 3.41. (a) ábra mutatja; vagy teljes egészében a pinch felett, illetve alatt, ahogy azt a 3.41. (b) ábra mutatja. A pinch-en keresztüli integrálás a teljes energiaigény növeléséhez vezet, ezért ez a lehetőség nem alkalmazható. A másik két lehetőség nettó előnnyel jár, mert csökkenti

a külső segédközeg használatának szükségességét a desztillációs visszaforraló (pinch felett) vagy kondenzáló (pinch alatt) ellátásában. A GCC-t arra használjuk, hogy azonosítsuk a megfelelő lehetőséget a desztilláció integrálására.



3.41. ábra: Desztillációs oszlop: integrálási lehetőségek



3.42. ábra: A desztillációs oszlop megfelelő elhelyezése a GCC-ben

Amikor a desztillációs oszlop működési feltételei a pinch ponton keresztül helyezkednek el, számos szabadságfok adódik, amit ki lehet használni a megfelelő elhelyezésre. Lehetséges a működési nyomás megváltoztatása, ami a hőmérséklet tartomány oszlopát addig mozgatja a skálán fel és le, amíg az bele nem illik a pinch fölötti vagy alatti területbe. A refluxarány megváltoztatásával együtt változik az oszlop hőmérséklet tartománya, és a visszaforraló és kondenzáló terhelése is. A reflux-

arány növelésével kisebb lesz a hőmérséklet tartomány, és nagyobb a terhelés, miközben a refluxarány csökkentése ellentétes hatást vált ki. A desztillációs oszlop több részre osztása is lehetséges, ezzel a desztilláció „kettős hatását” érzük el. Ebben a megközelítésben az

egyik hatás a pinch alatt, a másik a pinch fölött van, ez pedig megakadályozza az oszlop belső hőintegrációs hatását.

További lehetőségek is rendelkezésre állnak, mint pl. a belső-visszaforralás és a belső-kondenzálás. A rendelkezésre álló szabadságfokok felhasználásánál szem előtt kell tartani, hogy az oszlopok és

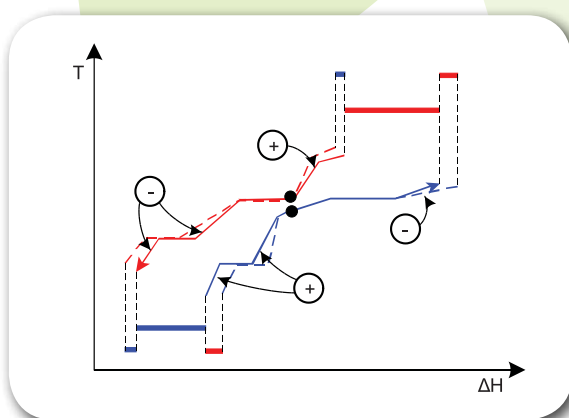
a fő folyamat egyesített, ezért az energia-beruházás kompromisszuma bonyolultabb, mint külön-külön az egyes kompromisszumok. A másik fontos kérdés az integrált tervek kormányozhatósága: kerülni kell a szükségtelen bonyodalmakat, és a zavar terjedési útjait meg kell szakítani. Általában elegendő a visszaforraló és a kondenzáló integrálása. Ha a nem megfelelő oszlop elhelyezése elkerülhetetlen, akkor szükséges lehet a kondenzáló pára hőszivattyúval való újrakompressziója a visszaforraló felmelegítésére.

A párologtatók a termikus elválasztók egy másik osztályát képezik. Ezekhez is szükséges a visszaforraló és a kondenzáló, a működésük hasonlít a desztillációs oszlopokéhoz, ezért hasonló integrációs elveket használunk rájuk is. Az abszorberek és a szárogatók hasonlóan integráltak.

### 3.3.7.4. Folyamatmódosítások

Az alap pinch-analízis számításai azt feltételezik, hogy a folyamat szintjei a hagymadiagramban (3.2. ábra) rögzítettek maradnak. Azonban lehetséges, sőt bizonyos esetekben

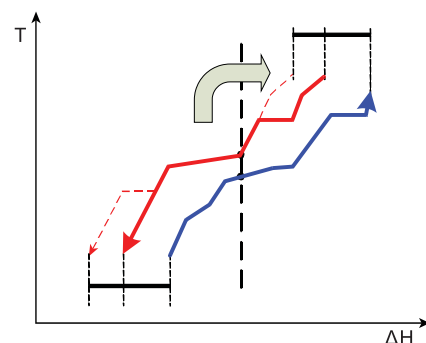
előnyös az, ha némely folyamatban néhány tulajdonságot megváltoztatunk. Azok a tulajdonságok, amelyeket szabadsági fokként lehet használni, az alábbiakat tartalmazzák: 1) a nyomás, a hőmérséklet és az átalakulási arány a reaktorokban; 2) nyomás, refluxarány, a cirkulációs térfogatáram a desztillációs oszlopokban; 3) a párologtató bemeneti áramának a nyomása és a párologtatón belüli nyomás.



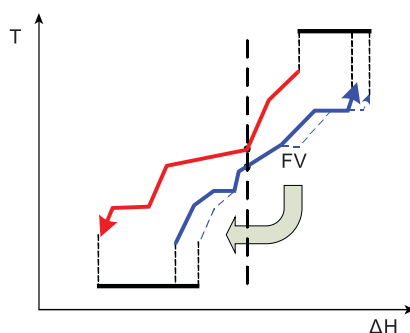
3.43. ábra: A plusz-mínusz elv

Az ilyen módosítások megváltoztatják a hőkapacitási áramokat és a hőmérsékleteket a kapcsolódó folyamatáramokon, amiket hőintegrálunk, és ez további változásokhoz vezet az összetett hővonalak alakjában és a GCC alakjában, ezáltal pedig módosul a segédközeg célmeghatározása. Az összetett hővonalak rendkívül értékelt eszközök a kedvező folyamat módosításának javaslatára (Linnhoff et al. 1982). A 3.43. ábra mutatja be az összetett hővonal alkalmazását a plusz-mínusz elv értelmében. Az alapötlet a CC meredekségének a megváltoztatása a megfelelő irányba, annak érdekében, hogy csökkentsük a szükséges segédközeg mennyiségét. Ezt a hőkapacitás változtatásával lehet elérni (pl. a tömeg áramváltoztatásával). Smith (2005) szerint ilyen segédközegigény csökkentését a következőképpen lehet elérni: 1) az összetett meleg áram terhelését a pinch fölött megnöveljük, 2) a pinch felett

csökkentjük az összetett meleg áram terhelést, 3) csökkentjük az összetett meleg áram terhelését a pinch alatt, és/vagy 4) növeljük az összetett hideg áram terhelését a pinch alatt.



(a) Meleg áramok



(b) Hideg áramok

3.44. ábra: A meleg áramokat tartjuk melegen, és a hideg áramokat tartjuk hidegen

Egy másféle útmutató a folyamatok módosítására a „tartsuk meg a meleg áramokat melegen és a hideg áramokat hidegen” elv. Amint az a 3.44. ábrán látható, a folyamatmódosítással történő hőmérsékletkülönbség-növelés nagyobb átfedést engedélyez az összetett vonalak közt, és ezáltal javítja a hővisszanyerést. Különösen az energiaigény javul, ha a fűtés- és hűtésigény a pinchén keresztül eltolható. Az elv azt javasolja, hogy 1) meleg áramokat toljuk át a pinch alatti területről a pinch feletti területre, és/vagy 2) a hideg áramokat a pinch feletti területről a pinch alatti területre toljuk át.

## 4 HH szintézise

A legtöbb ipari méretű szintézismódszer a hőcserélő hálózatokra az állandósult állapot feltételezése mellett (angolul: steady state) valósul meg.

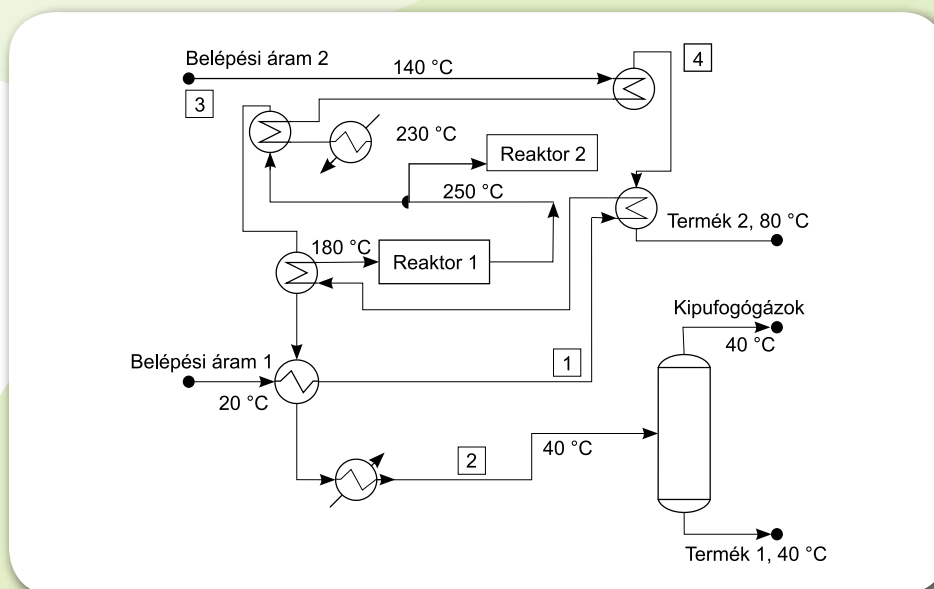
### 4.1. A pinch tervezési módszer

A pinch tervezési módszer (Linnhoff és Hindmarsh, 1983) az egyszerűsége és az összetettség hatékony kezelése miatt vált népszerűvé. A módszer mára már teljes hővisszanyerési eszközkészletté és energiahatékony tervezé-

si technikává nőtte ki magát, amely magába foglalja a módosítási iránymutatókat, és számos energaintenzív folyamatok integrálását.

#### 4.1.1. A HH ábrázolása

A hőcserélő hálózat ábrázolása az általános folyamatábrával, ahogy az a 4.1. ábrán látható, nem megfelelő. Ennek az oka az, hogy az ábrasegítségével nehéz megválaszolni számos fontos kérdést, mint például: „Hol van a pinch?”; „Milyen mértékű a hővisszanyerés?”; „Mennyi hűtésre és fűtésre van szükség a segédközegből?”.

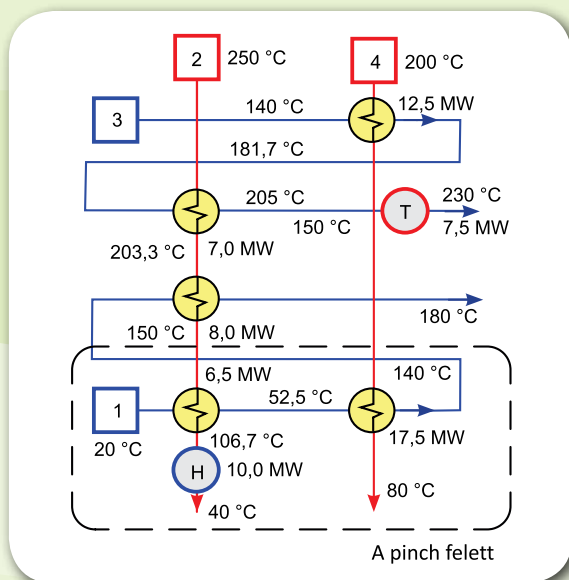


4.1. ábra: Az általános folyamatábra a HH ábrázolására

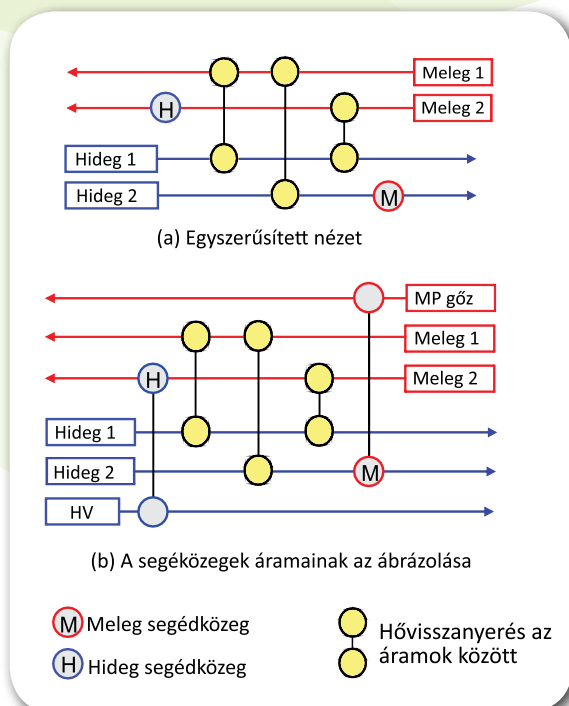
Az ún. hagyományos HH folyamatábra (4.2. ábra) csak kismértékű javulást kínál. Ez csak a hőátadási műveleteket mutatja, és egyszerű egyezményen alapul: a hideg áramok vízszin-

tesen, a meleg áramok pedig függőlegesen vannak ábrázolva. Noha a pinch helyzete az egyszerű esetekben meg lehet jelölve, még mindig nehéz meghatározni azt. Efféle

ábrázolásban nehéz kifejezni a hőcserélők megfelelő sorrendjét, és világosan ábrázolni a hálózatbeli hőmérsékleteket. Továbbá a kapcsolatok helyének a megváltoztatása gyakran bonyolult vonalábrázolást eredményez.

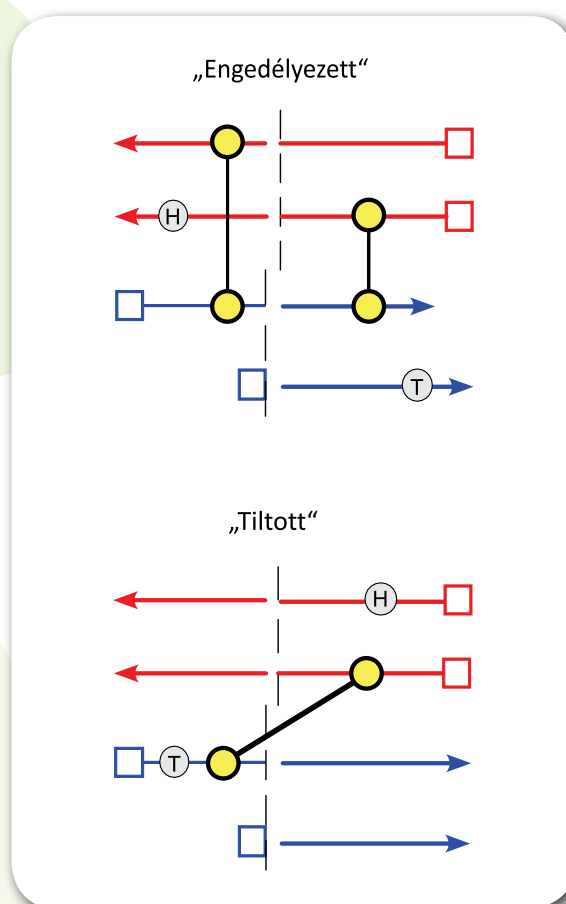


4.2. ábra: A hagyományos HH folyamatábrája



4.3. ábra: A HH rácsábrázolása

A rácsábrázolás, amint az a 4.3. ábrán látható, kényelmes és hatékony HH ábrázolási módszer, amellyel az előbb leírt problémák is kiküszöbölhetők. A rácsábrázolásnak számos előnye van: az áramok és hőcserélők ábrázolása világosabb és kényelmesebb a hőmérsékletek ábrázolására, a pinch elhelyezése (és annak a hatása) világosan látható, lásd a 4.4. ábrát. Emlékeztetőül: csak a hőátadás műveletét ábrázoltuk. A hőmérséklet a rácsábrázolásban intuitív módon balról jobbra nő, és a hőcserélők (újra) sorolása egyértelmű.

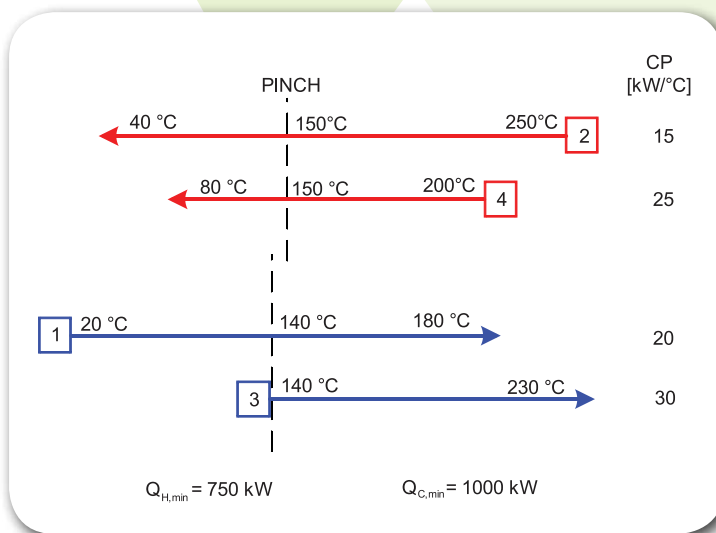


4.4. ábra: A rácsábrázolás és a pinch következményei

#### 4.1.2. A tervezési eljárás

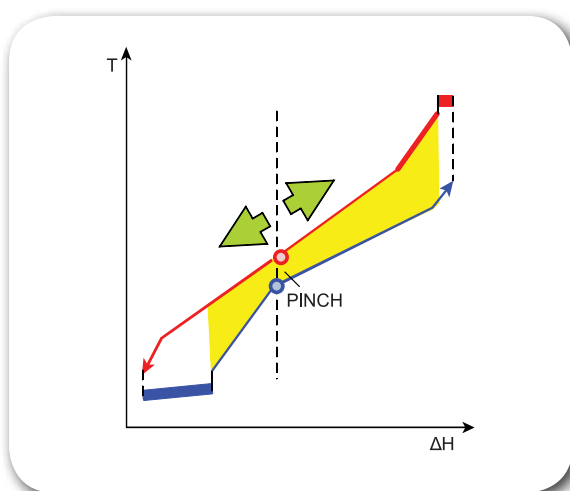
Az eljárás a HH tervezésére néhány egyszerű lépésből áll az alábbiak szerint:

1. A hővisszanyerés feladatának részletezése.
2. A hővisszanyerési célok és a hővisszanyerési pinch meghatározása (3. fejezet)
3. Szintézis.
4. A HH topológia fejlődése.



4.5. ábra: A pinch menti kettéosztás a 3.2. táblázatban lévő áramokra

Az első lépéseket a 3. fejezetben tárgyaltuk. A szintézis a feladat kettéosztásával a pinch-nél kezdődik, és utána a folyamat-áramok elhelyezésével folytatódik, ahogy az a 4.5. ábrán látható.



4.6. ábra: A pinch tervezési elv

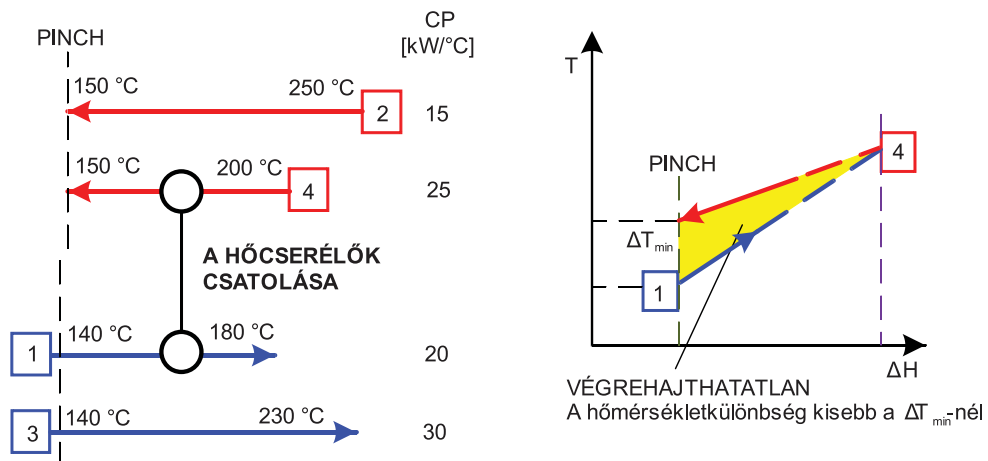
A pinch tervezési elv szerint a tervezést a pinch körül kell kezdeni (a hőfokkülönbség a tervezés leginkább korlátozott része, amely a minimális hőfokkülönbség megközelítését célozza meg), és csak ezután elhelyezni a hőcserélő csatlásokat, miközben távolodunk a pinch-től (4.6. ábra). A csatlások elhelyezésekor annak érdekében, hogy olyan hálózatot tervezzünk, ahol minimális a segédközeg használata, néhány szabályt be kell tartani: 1) egy hőcserélőben sem szabad kisebb hőfokkülönbségnek lenni, mint a  $\Delta T_{min}$ ; 2) a folyamaton belül semmilyen hőátadást nem szabad végezni a pinch-en keresztül; 3) nem engedélyezett semmilyen nem megfelelő segédközeg használata.

A pinch körül a hajtóerő-korlátozások azt vonják maguk után, hogy néhány csatlást el kell helyezni, ha a tervvel el akarjuk érni a minimális segédközeg használatát a  $\Delta T_{min}$  korlátozás megszegése nélkül – ezeket a csatlásokat nélkülözhetetlen csatlásoknak nevezzük. A pinch felett a meleg áramokat csak a hideg áramoknak való hőátadással lehet hűteni, hűtőközeggel nem. Ezért minden meleg áramot a pinch felett hideg árammal kell csatolni. Ez azt jelenti, hogy a pinch feletti csatlások tervezésénél a meleg bemeneti áramok a pinch-be elsőbbséget élveznek. Ezzel szemben a hideg bemeneti áramok a pinch-ben akkor élveznek elsőbbséget, amikor a csatlások a pinch alatt vannak tervezve.

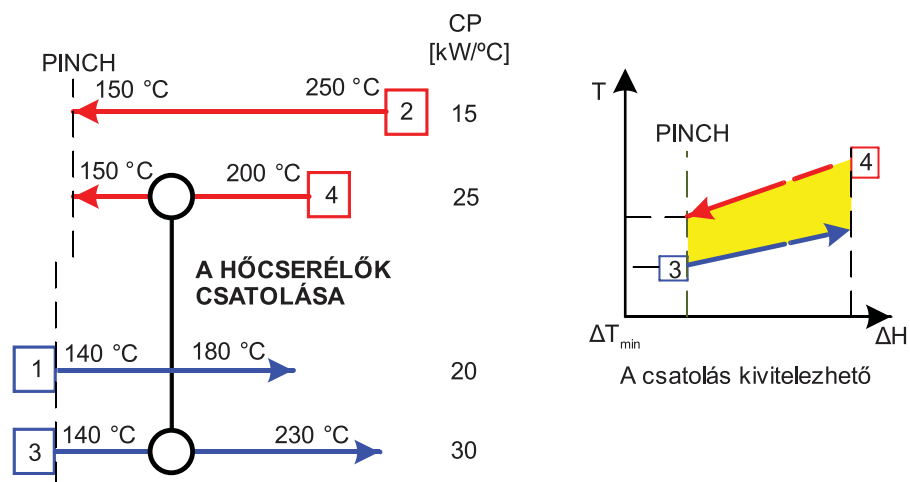
Idézzük fel a 3.2. táblázatban található példát. A 4.5. ábra egy üres rácsábrát mutat, amely a pinch-nél el van osztva. A meleg része (pinch felett) nélkülözhetetlen csatlásokat követel a 2-es és 4-es áramra, mert ezek a pinch bemeneti áramai. Tekintsük meg a 4-es áramot. Az egyik lehetőség sze-

rint azt az 1-es árammal csatolhatjuk, ahogy azt a 4.7. ábra mutatja. A 4-es áram meleg, és a CP-je nagyobb, mint a 1-es hideg áram CP-je. Ahogy az ábra is mutatja: a pinch-nél a hőfokkülönbség egyenlő a  $\Delta T_{\min}$ -vel. A pinch-től eltávolodva a hőmérséklet köze-

ledik egymáshoz, mert – a nagyobb CP miatt – a meleg áram meredeksége kisebb. Mivel a  $\Delta T_{\min}$  a hálózat hőfokkülönbségének alsó korlátja, a hőátadási csatolás ott nem valószínűsíthető meg, ezért elutasítottuk.



4.7. ábra: Megvalósíthatatlan hőcserecsatolás a pinch felett



4.8. ábra: Megvalósítható hőcserecsatolás a pinch felett



A másik lehetőség a 4-es áram hűtésigényének kezelésére a 4-es áram csatolása a 3-as áramhoz, ahogy az a 4.8. ábrán látható. A 3-as áram CP-je nagyobb, mint a 4-es áramé, ezért a hőmérsékletprofilok – a pinch-től távolabbra kerülve – eltávolodnak egymástól. Ezért a pinch feletti területre a szabály a következőképpen fejezhető ki:

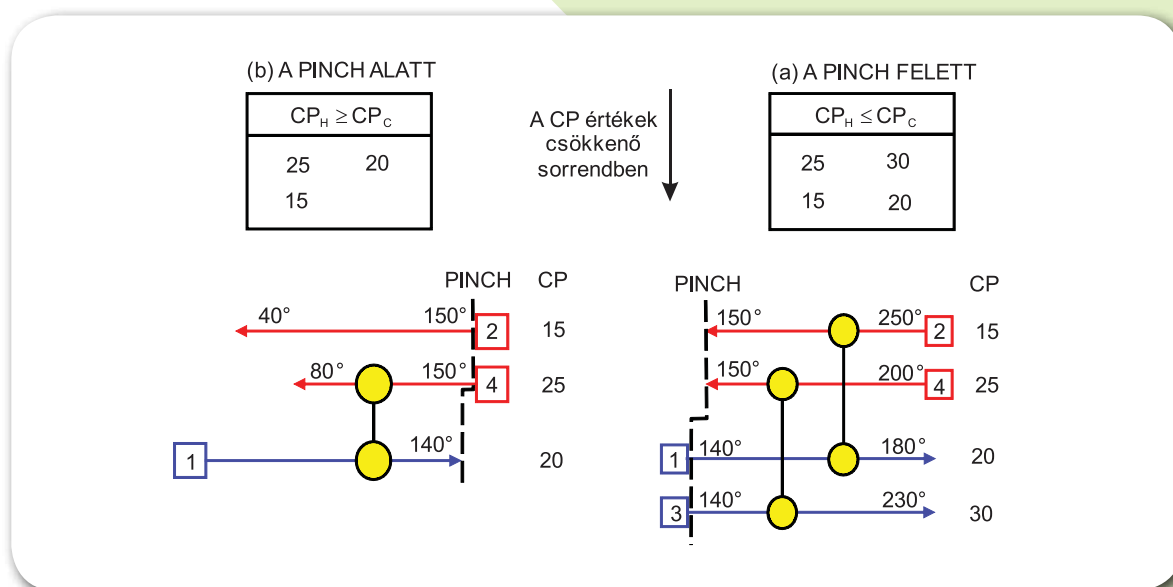
$$CP_{\text{hot stream}} \leq CP_{\text{hot stream}} \quad (4.10)$$

A pinch alatt a helyzet szimmetrikus. A tervezés ezen része a nettó hőforrás, ami azt jelenti, hogy a hideg áramok fűtésigényét a meleg áramokkal való csatolással kell fedezni. A pinch feletti érveléshez hasonlóan a következő követelmény fogalmazható meg: ha megvalósítható, nélkülözhetetlen csato-

lást akarunk elérni a hideg áram CP-értékének nem szabad nagyobbak lennie a meleg áram CP-értékénél. A 4.1. egyenlet általánosítása azt mutatja, hogy a bemeneti áram CP-jének a pinch-be kisebbnek vagy egyenlőnek kell lennie a kimeneti áram CP-jével.

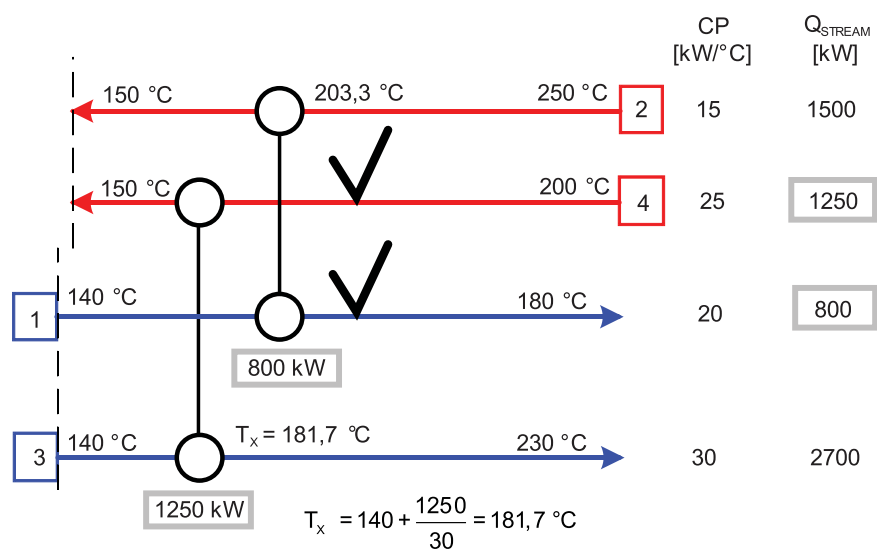
$$CP_{\text{entering pinch}} \leq CP_{\text{leaving pinch}} \quad (4.11)$$

A pinch tervezési módszer egy speciális eszközt foglal magába ennek a szakasznak a kezelésére, és pedig a CP táblázatot – 4.9. ábra (Linnhoff és Hindmarsh, 1983). Itt az áramokat a CP-értékük alapján jelölték, és csökkenő sorrendbe rendezték. Ez elősegíti az áramok közti ígéretes csatolások azonosítását, amelyek alkalmasak a nélkülözhetetlen csatolásokra.



4.9. ábra: CP táblázatok

A csatolások méretezését a kipipálás heurisztikája követi, amely kimondja, hogy az egyik áramnak az igényét a hőátadás-csatolásban teljes egészében ki kell elégíteni, és utána ezt az áramot a tervezési listán „ki lehet pipálni”, lásd: 4.10. ábra.

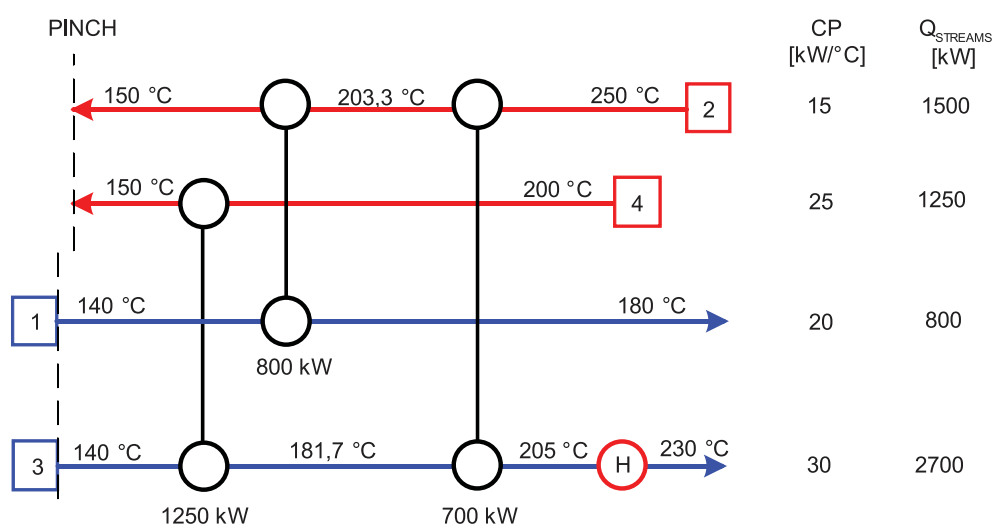


4.10. ábra: A kipipálás heurisztikája

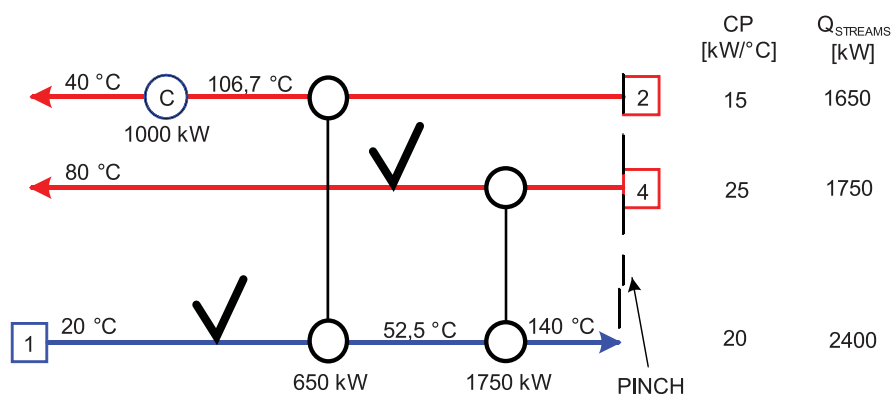
#### 4.1.3 A tervezés kiegészítése

A HH tervezése a pinch felett a 4.11. ábrán látható. A pinch alatti tervezés ugyanezeket a szabályokat követi, azzal a kis különb-

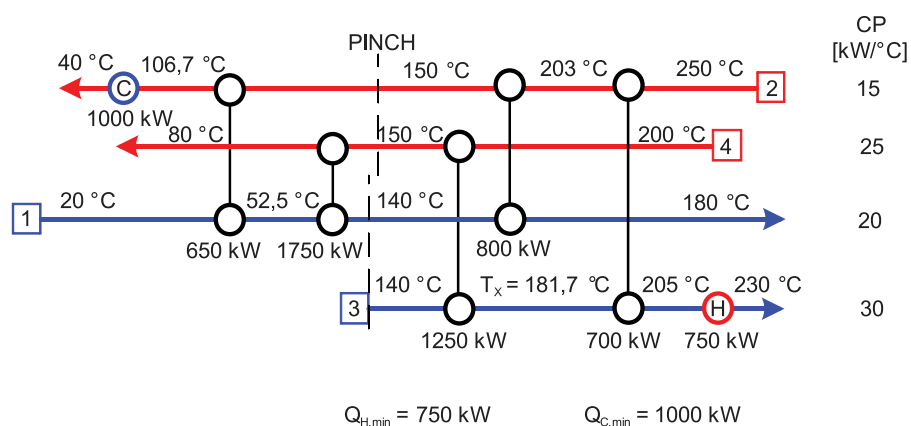
séggel, hogy a hideg áramok definiálják a nélkülözhetetlen csatlásokat.



4.11. ábra: A HH tervezése a pinch felett



4.12. ábra: A HH tervezése a pinch alatt



4.13. ábra: Teljes HH terv

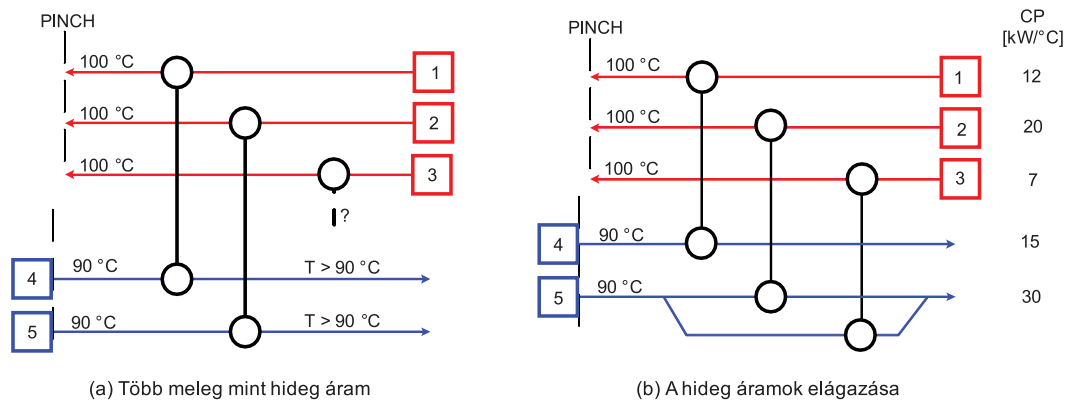
A 4.12. ábra részletezi a pinch alatti tervezést az említett példára. Először a 4-es és 1-es áram csatolása van elhelyezve és méretezve – a 4-es áram terhelését figyelembe véve. A másik csatolás, a 2-es és az 1-es áram közt formálisan megszegi a nélkülözhetetlen csatolások szabályát. Mivel azonban az 1-es áramnak már van egy csatolása, ezen a csatoláson kívül (a 4-es és 1-es áram között) nem lehet szigorúan nélkülözhetetlennek nevezni. A szükséges 650 kW-os terhelésig ez a csatolás nem szegi meg a  $\Delta T_{min-et}$  – a releváns korlát. A kiegészített HH topológiája a 4.13. ábrán látható.

A korábban leírt tervezés alapszabályai nem mindig elegendőek. Bizonyos esetekben szükséges az áramok elágazása, hogy a hőcserecsatlások megfelelően legyenek elhelyezve. Az elágazás az alábbi esetekben lehet szükséges:

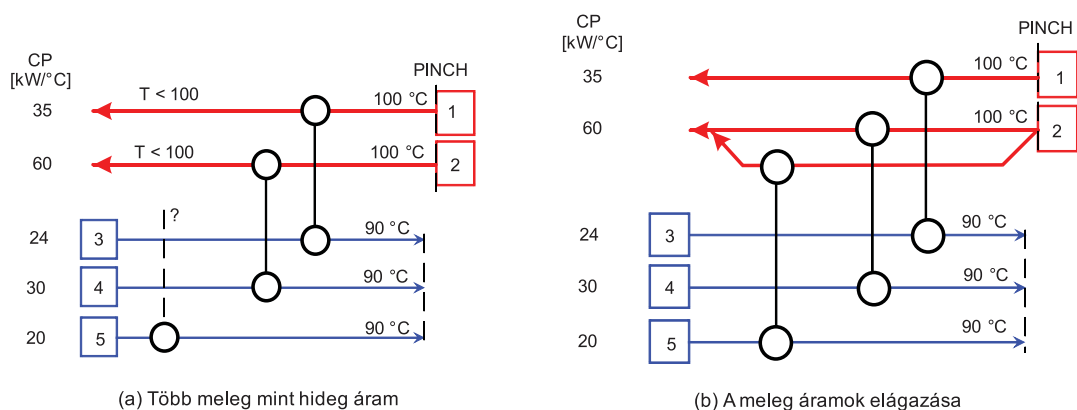
A pinch felett, amikor a meleg áramok száma meghaladja a hideg áramok számát ( $NH > NC$ ); lásd: 4.14. ábra.

A pinch alatt, amikor a hideg áramok száma meghaladja a meleg áramok számát ( $NC > NH$ ); lásd: 4.15. ábra.

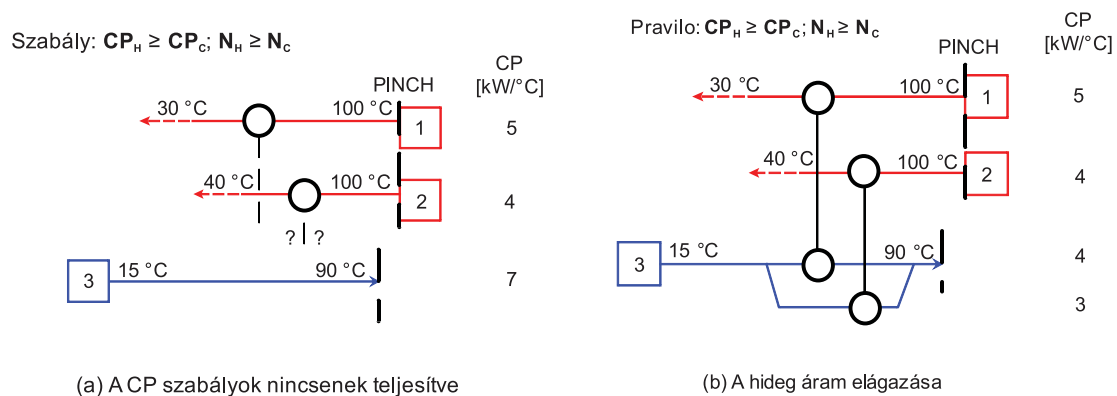
Amikor a CP értékek nem utalnak semmilyen megvalósítható nélkülözhetetlen csatolásra; lásd: 4.16. ábra.



4.14. ábra: A pinch feletti elágazás a  $N_H > N_C$



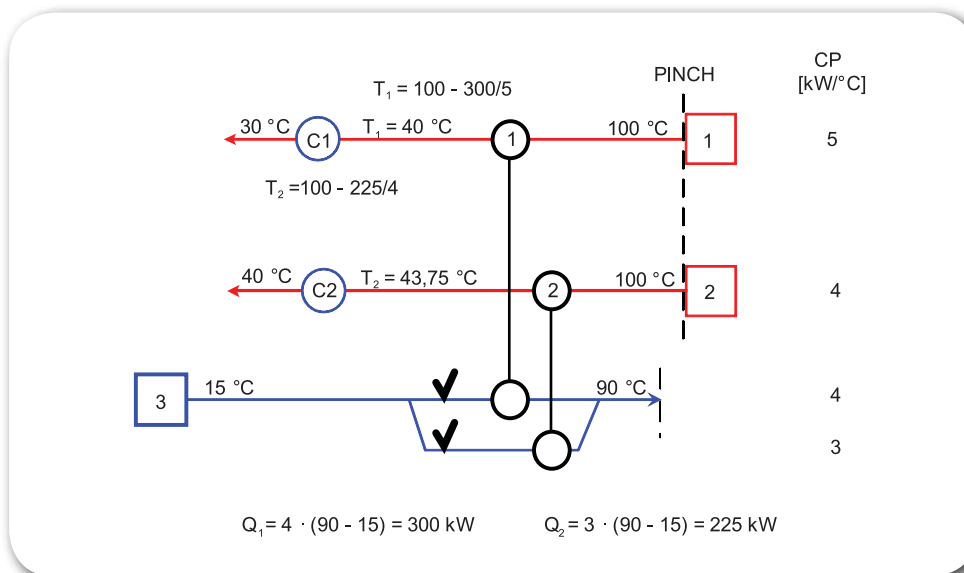
4.15. ábra: A pinch alatti elágazás a  $N_C > N_H$



4.16. ábra: Elágazások annak érdekében, hogy a CP-értékek lehetővé tegyék a nélkülözhetetlen csatlásokat

Az elágazáson lévő csatolások terhelését ugyanúgy a kipipálás heurisztikája által határozzuk meg. Mivel minden elágazás további szabadságfokot képvisel, szükséges a CP elosztásának a meghatározása az ágak közt.

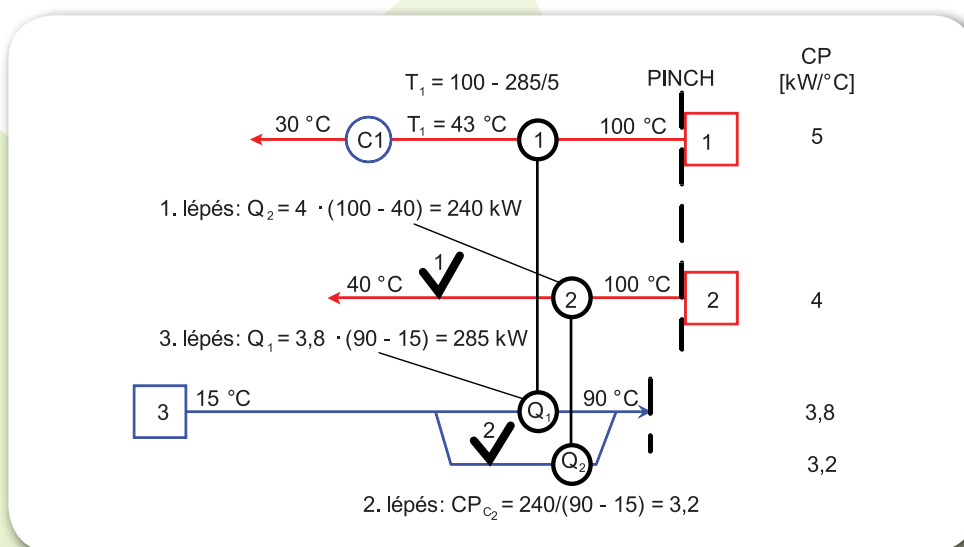
Az egyik lehetőség a 4.17. ábrán látható. A javasolt osztási arány 4:3. Ez a megközelítés teljes egészében kielégíti a hideg áram ágának a fűtésigényét.



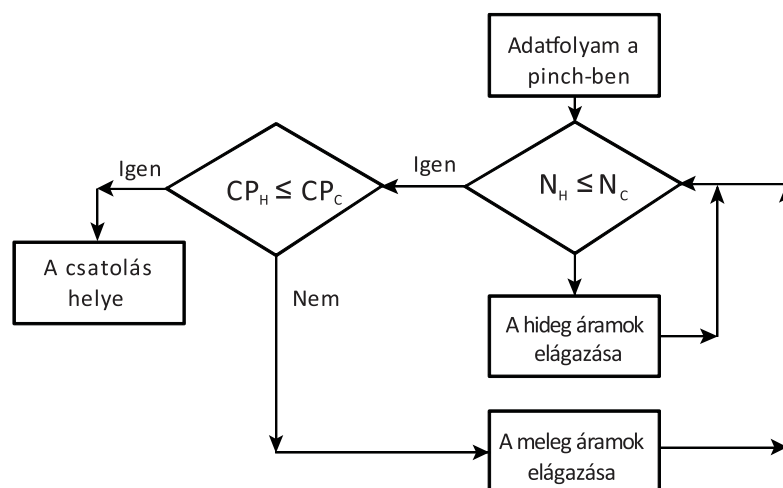
4.17. ábra: Elágazás és (triviális) kipipálás

A 4.17. ábrán látható elrendezés bizonyos értelemben triviális és tovább javítható. Az osztási arány lehetőségeinek a száma végtelen, ez alól kivételt csak az jelent, amikor az áram kombinálása előír bizonyos szigorú korlátokat. Ezt a tényt fel lehet használni a hálózat optimalizálására. Sok esetben meg

lehet takarítani egy további hőcserélő egységet egyes csatolások kipipálásával, ahogy azt a 4.18. ábra is ábrázolja, amely kielégíti mindkettő (2) meleg áram és a csatolt (3) hideg áram ágának a hőigényét, ezáltal eltávolítva egy hűtőberendezést.



4.18. ábra: Elágazás és előrehaladott kipipálás



4.19. ábra: Az elágazás eljárása a pinch felett

A teljes elágazásra vonatkozó algoritmus a pinch felett a 4.19. ábrán van megadva. A pinch alatti elágazás folyamata szimmetrikus, azzal a különbséggel, hogy a hideg és a meleg áram szerepe felcserélődik.

#### 4.1.4. A hálózat fejlesztése

A korábban leírt irányelvek alapján kapott HH az energiaigények szempontjából optimális, de általában nem felel meg a teljes költség optimumának. A pinch elosztás megfigyelése általában ciklusokat vezet be a végletes topológiába, és nagyobb számú hőcserélőegységhez vezet. Ezért az utolsó lépés a HH tervezésében a hálózat fejlesztése, amely által azonosítjuk a hőterhelési ciklusokat és a nyitott hőtermelési utakat, ezeket felhasználva a hálózat optimalizálására – hőterhelés, hőátadás és topológia szempontjából. Ebben a fázisban általában enyhülnek az előző fázisok szigorú követelményei, pl. az, hogy, minden hőfokkülönbségnek nagyobbnak kell lennie a minimális hőfokkülönbségnél; a pinch-en keresztüli hőátadás kizárása.

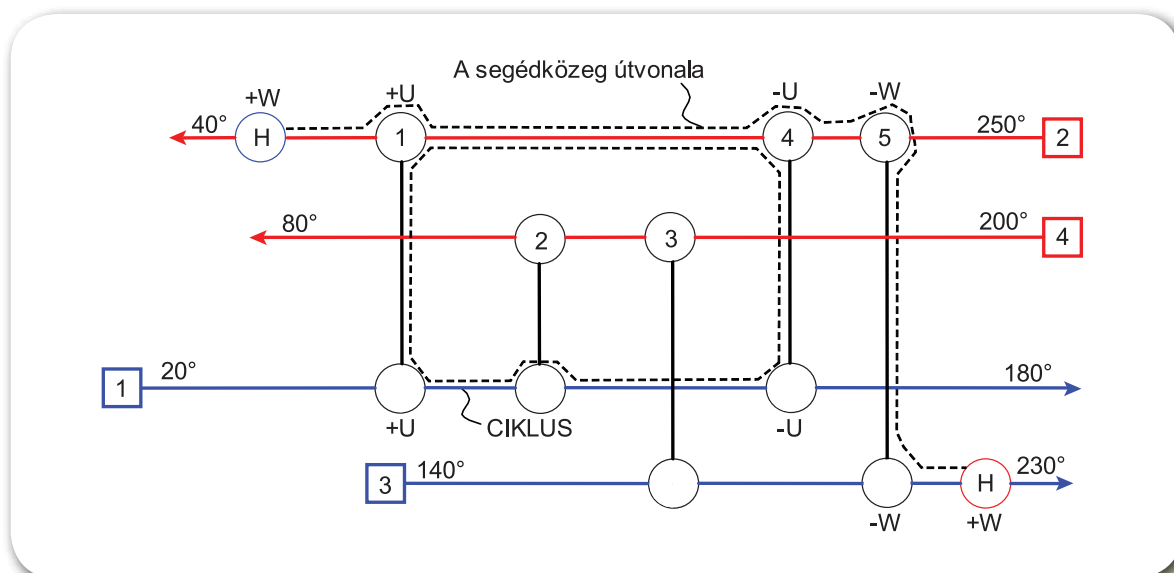
Az eredményezett optimalizálási megfogalmazás tipikusan nem lineáris, és strukturális döntéseket is magába foglal, ezért számítanak MINLP (vegyes egyészértékű nemlineáris programozás, angolul: mixed integer nonlinear programming) feladatoknak. Annak érdekében, hogy a lineáris és/vagy folyamatos megfogalmazást elérjük, különböző megközelítéseket és egyszerűsítő feltételezéseket lehet bevezetni. A tervezés fejlesztési lépése ciklustörésekkel és a hőcserélők számának a csökkentésével manuálisan is elvégezhető.

A hőcserélők topológiából való eltávolítása a hőterhelés átcsoportosításának (az eltávolított hővisszanyerési hőcserélőről) a rovasára megy, a segédközeg hőcserélőre: fűtőkre és hűtőkre. A topológia fejlesztését akkor hagyjuk abba, amikor az energiaköltség meghaladja a beruházási költségek megtakarítását, ez megfelel a teljes költség minimumának.

A hálózat fejlesztését a terhelés átcsoportosításával, – ezen belül – a túlzott hőcserélők eltávolításával és/vagy az effektív hőátadási

terület csökkentésével vitelezzük ki. A terhelés átcsoportosítására szükséges a ciklusok és segédközegi utak általi szabadságfokok hasznosítása. Ebben az összefüggésben a ciklus egy körös zárt út, ami összeköt két vagy több hőcserélőt, a segédközeg út pe-

dig összeköti a fűtő- és a hűtőközeget vagy két egyforma típusú segédközeget. A 4.20. ábra bemutatja a HH ciklust és a segédközeg utat. A hálózat számos ilyen ciklust és utat tartalmazhat.



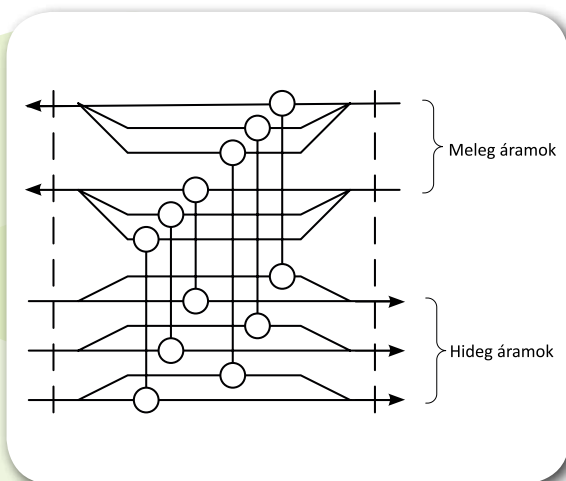
4.20. ábra: Ciklus és segédközeg út a HH-ban

## 4.2. A matematikai programozás felhasználása

### 4.2.1. MINLP-megközelítés

A MINLP vegyes egészértékű nemlineáris programozást jelent. Ez az egyik leggyakrabban használt megközelítés a vegyészmérnöki és ipari feladatok optimalizálásában. Ahogy már bemutattuk, a pinch tervezési módszer a szekvenciális stratégiát követi a HH konceptuális tervezésére. Először kifejleszti a folyamat áramkészlete által megszabott termodinamikai korlátok megértését, és ezután kihasználja ezt a tudást a magas energiahatékonysággal bíró HH tervezésére. Viszont más megközelítést is kifejlesztettek: szuperstruktúra-megközelítés a HH szintézisére, amely a vizsgált hálózat redukálható

struktúráján (szuperstruktúra) alapul, amit aztán a MINLP használatával redukálunk. A spagetti-féle HH szuperstruktúrájának töredéke, amely e módszerrel generálható (Yee és Grossmann, 1990), a 4.21. ábrán látható.



4.21. ábra: Spagetti-szuperstruktúra töredéke

Az efféle szuperstruktúra általában szakaszokból (angolul: stages; Yee és Grossmann, 1990) vagy tömbökből (angolul: Blocks; Zhu et al. 1995) van felépítve, amelyek közül mindegyik csoport egymást követő entalpiaintervallumból áll. Mindegyik entalpiaintervallumban a meleg áramok annyi felé ágazódnak el, ahány hideg áram van az intervallumban, és minden hideg áram hasonlóan ágazódik el. Ezután minden hideg ághoz meleg ágat csatolunk.

A megtervezés után a szuperstruktúra optimalizálásnak van kitéve. A döntési változók magukba foglalják a különböző áramok ágait és a hőcserélőket, a hőcserélők hőterhelését, és az elágazás osztási részét vagy az elágazott áramok áramlásának a létezését. A célfüggvény általában a hálózat teljes éves költségéből áll. A célfüggvény bővíthető büntető kifejezéssel, amikor bonyolult korlátokkal foglalkozunk. Attól függően, milyen feltételezéseket használunk, lehetséges elérni a MILP (vegyes egészértékű lineáris programozás) és MINLP megfogalmazást is. A lineáris megfogalmazások általában az elágazások izotermikus keverésének feltételezésével és a hőcserélők beruházási költség függvényének a szakaszos linearizációjával érhető el.

A szuperstruktúra-megközelítés több mint egy típusú hőcserélőt is tartalmazhat, pl. közvetlen hőátadó berendezések (keverés), továbbá a területi hőcserélőtípusok (cső a csőben, lemezes, csőköteges). Soršak és Kravanja (2004) egy olyan módszert mutatott be, amely különböző hőcserélőtípusokat foglal magába a szuperstruktúra tömbben – minden lehetséges hőátadás csatolására. Más érdekes munkák erről a területről: Daichendt és Grossmann (1997), Zamora és Grossman (1998), Björk és Westerlund (2002), valamint Frausto-Hernández et al. (2003).

#### 4.2.2. Hibrid megközelítés

Az világos, hogy a szuperstruktúra-módszer néhány előnnyel jár a folyamatszintézisben, különösen pedig a hőcserélő-hálózat szintézisében. Az előnyök közé sorolható: 1) a számos strukturális és operatív alternatíva egyidejű elemzésének a kapacitása, 2) a szintéziseljárás (magas fokú) automatizálásának a lehetősége, és 3) a képesség, hogy a további feladatokat hatékonyan kezeljék, mint pl. különböző típusú hőcserélők és további korlátok (pl. tiltott csatolások).

Viszont az előnyök mellett hátrányok is vannak. Először: a szuperstruktúra-megközelítés általánosságban nem tudja kiküszöbölni a feladattal járó nem-linearitást. Ezért linearizációt és egyszerűsítő feltételezéseket igényel, mint pl. az áramok ágainak az izotermikus keverésének az engedélyezése. Másodszor: a szintézis eljárásnál az átláthatóság és a vizualizáció majdnem teljesen elveszik, és kizárja a mérnököt a folyamatból. Harmadszor: a végleges hálózat csupán válasz a kezdeti feladatra, és nehéz megítélni, mennyire jó megoldást találtunk, illetve, ha létezik-e jobb megoldás. Negyedszer: a számítási problémák, és az eredmények értelmezésének problémája jelentősen meg-



nő a feladatok növekedésével. Végül pedig a kapott hálózat alhálózatokat tartalmaz, hogy bemutassa a spagetti-típusú szerkezetet: a párhuzamos tömbökben a számos meleg és hideg áram közt több hőcserélő van. A szuperstruktúra felépítéséből kifolyólag sok ilyen alhálózat a szolverek által nem távolítható el.

Mindezek a megfontolások kiemelik az alap kompromisszumot a termodinamikai meglátásokon alapuló technikák – mint pl. a pinch tervezési módszer – és a szuperstruktúrán alapuló megközelítések között. Ezért hasznosabb lenne egy középutat találni, amely magába foglalná a fenti két alapvető megközelítés előnyeit.

Egy ilyen középút a következőkben leírt hibrid szintézisek osztálya. Ezen osztály módszerei először a pinch-analízist használják a feladat termodinamikai korlátainak a meghatározására, utána pedig a közvetlen szintézis helyett a redukált szuperstruktúrát építik meg. Ezen a ponton a módszer a klasszikus szuperstrukturális megközelítést követi. Az optimalizálást és az egyszerűsítés ciklusát néhányszor megismételjük, mielőtt meghatározzuk a végleges optimális hálózatot. Minden így kapott hálózatban nagy a hővisszanyerés mennyisége, de az nem feltétlenül a maximális lehetséges. E technika kulcseleme a szuperstruktúrában zajló – felesleges – funkciók elkerülése, és ez az a terület, ahol a pinch-analízis bizonyítottan hasznos. A tömbbomlasztási módszer (angolul: *block decomposition method*) a hibrid módszerek jó példája a HH szintézisében (Zhu, 1997).

#### 4.2.3. A HH szintézismódszereinek összehasonlítása

A különböző szintézismódszerrel meghatározott hálózatok különféle tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek kihatással vannak a teljes költségekre és a működési és irányítási tulajdonságokra. Mivel a pinch tervezési módszer a kipipálás szabályát követi (4.10. ábra), a szintetizált hálózatok többnyire egyszerű topológiával rendelkeznek – kevés elágazással. Mindkettő – a kipipálás szabálya és a pinch elve – azt diktálja, hogy a segédközeg-hőcserélőket a legvégén helyezzük el úgy, hogy általában közvetlenül az áramok célhőmérséklete előtt legyenek találhatóak. Azonban a kipipáló szabály azt is eredményezheti, hogy számos áramon nem lesz segédközeg-hőcserélő, ami csökkenti az irányíthatóságot. A pinch tervezési módszer csökkenti a hálózat rugalmasságát, mert a pinch osztásra épül (4.6. ábra), és így nagymértékben rögzíti a hálózat viselkedését.

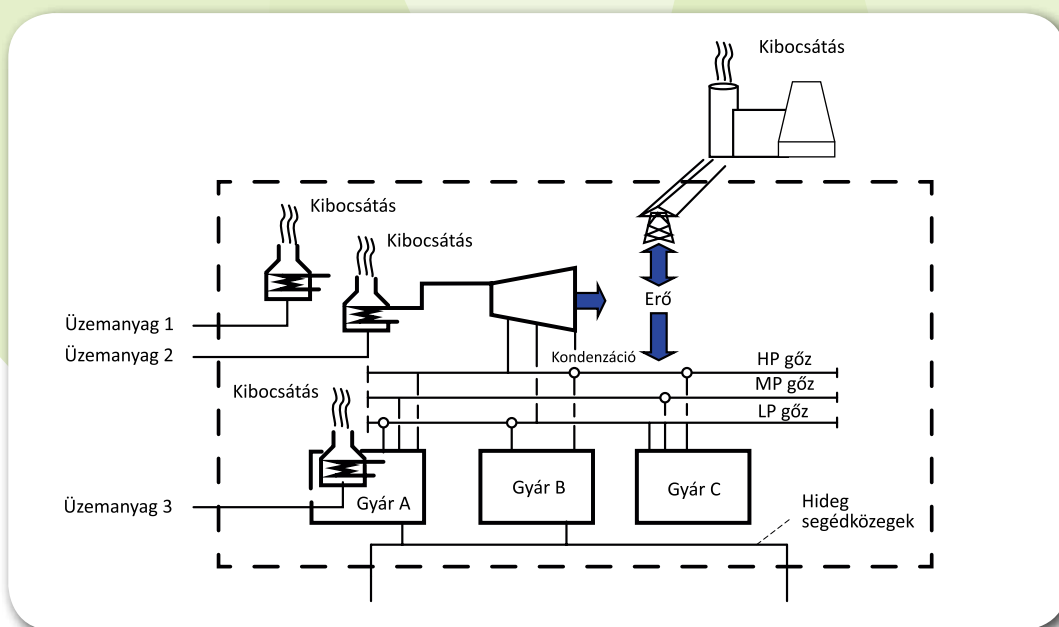
Mindkét, a teljesen szuperstruktúrán alapuló megközelítés és a hibrid megközelítés többnyire összetettebb topológiát eredményez. Megkülönböztető tulajdonságuk a nagyobb számú hőcserélők és elágazások, amelyeket a kezdeti szuperstruktúra eredményezi. A spagetti-típusú alhálózatok is jelentős kihívást jelentenek – a rugalmasság és ellenőrzés szempontjából.



## 5 Total Site energiai integrálás

A total site koncepciót Dhole és Linnhoff (1993) vezette be. A 5.1. ábra tipikus ipari total site-ot mutat be. A finomító és a vegyipari folyamatok általában nagy üzemek vagy gyárak részeként működnek. Az üzemeknek számos folyamatuk van, amelyeket a közpon-

ti segédközegrendszer látja el, amelybe beletartozik a gőz- és áramtermelés. A total site integrálásnak két fő eleme – a hővisszanyerés a gőzhálózat által és az áram kogenerálása – szorosan összefügg egymással.



5.1. ábra: Tipikus ipari total site

### 5.1. Total Site adat kivonása

Az egyes folyamatok fűtés- és hűtésigényeit a hozzáfűződő főhővonalak (GCC-k) képviselik (lásd: 4. fejezet). A GCC egy folyamat-segédközeg felületét mutatja be. Az egyes folyamatok GCC-i a gőzhálózat általi hővisszanyerés potenciálját azonosítják. Amikor az üzem számos termelési folyama-

tot foglal magába, mindegyik folyamat GCC-je jelezhet bizonyos gőzsztintet, amely megfelel az adott folyamatnak. Ez arra utal, hogy kompromisszumot kell elérni a különböző folyamatok energiaigényei között a total site szinten, mivel minden folyamatnak általában különböző fűtés- és hűtésszint felel meg.

Az iparban használatos tipikus fűtőközeg a gőz. A gőzhálózat nyomásszintjének a kiválasztása jelentősen befolyásolja a total site segédközeg-igényét. Az egyik folyamatban keletkező felesleges hőt, a folyamaton belüli hőintegrálás után egy másik folyamatban használhatjuk fel – a gőz hálózaton keresztül. Ennek elérése érdekében minden gőznyomásszintnek lehetővé kell tennie a hő generálását és felhasználását – kellő mennyiségbe. Pl.: ha az adott nyomásszinten 10 MW gőzt lehet generálni a folyamat hőforrásából, és csak 5 MW hőt lehet felhasználni a folyamat hőelnyelésével, akkor ez csak 5 MW hővisszanyerést jelent a segédközeg-rendszeren keresztül. Másrészt, ha a gőznyomás szintjét emeljük, nagyobb mértékben nyerhetünk vissza hőt – az adott gőzhálózaton keresztül. A folyamat hűtéséből nyert gőzt a legnagyobb mértékben fel kell használni annak érdekében, hogy maximalizáljuk az üzemi szintű hővisszanyerést.

A nem-izotermikus segédközegekkel, mint pl. a meleg vízzel, hasonlóképpen kell eljárni. Az egyetlen különbség ott van, hogy a generálás és a felhasználás hőmérséklete különbözik egymástól. Következésképpen: minden segédközegnek van felső és alsó hőmérsékletkorlátja. A nem-izotermikus segédközegek hőmérsékletkorlátja különböző lehet, míg az izotermikus segédközegek (pl. telített gőz) felső és alsó hőmérsékletkorlátjának értéke feltételezhetően azonos.

A total site célmeghatározásban általában a gőz ábrázolása egyszerűsített, csak az állandó hőmérsékletű szegmenseket mutatjuk be, és a célmeghatározás alkalmazásában nem vesszük figyelembe az előmelegítést, a túlhevítést és a túlűtést. A vízzel való hűtés is virtuálisan izotermikusnak tekinthető – annak eredménye a vízszintes vonal. Ez a hűtés a hűtővíz nagy tömegáram feltételezésével érhető el.

Az összes folyamatra és minden folyamat segédközeg-hőátadásra egyetlen  $\Delta T_{\min}$  specifikáció feltételezésével az eljárás a következő: az üzemhez tartozó folyamat mindegyik GCC-jéből csak a nettó hőelnyeléseket és a hőforrásokat vonjuk ki azzal a feltétellel, hogy a hővisszanyerést minden folyamatban külön maximalizáljuk. A kivont szegmensek összevonásával megkapjuk a Site Heat Source Profile-t (hőforrás) és a Site Heat Sink Profile-t (hőelnyelés), a két vonalra együttesen Total Site Profiles-ként (TSP) hivatkozunk. A TSP, azaz a Total Site Összetett Vonal a segédközeg generálását és felhasználását szolgálja – a segédközeg hőmérsékleteinek specifikációjával.

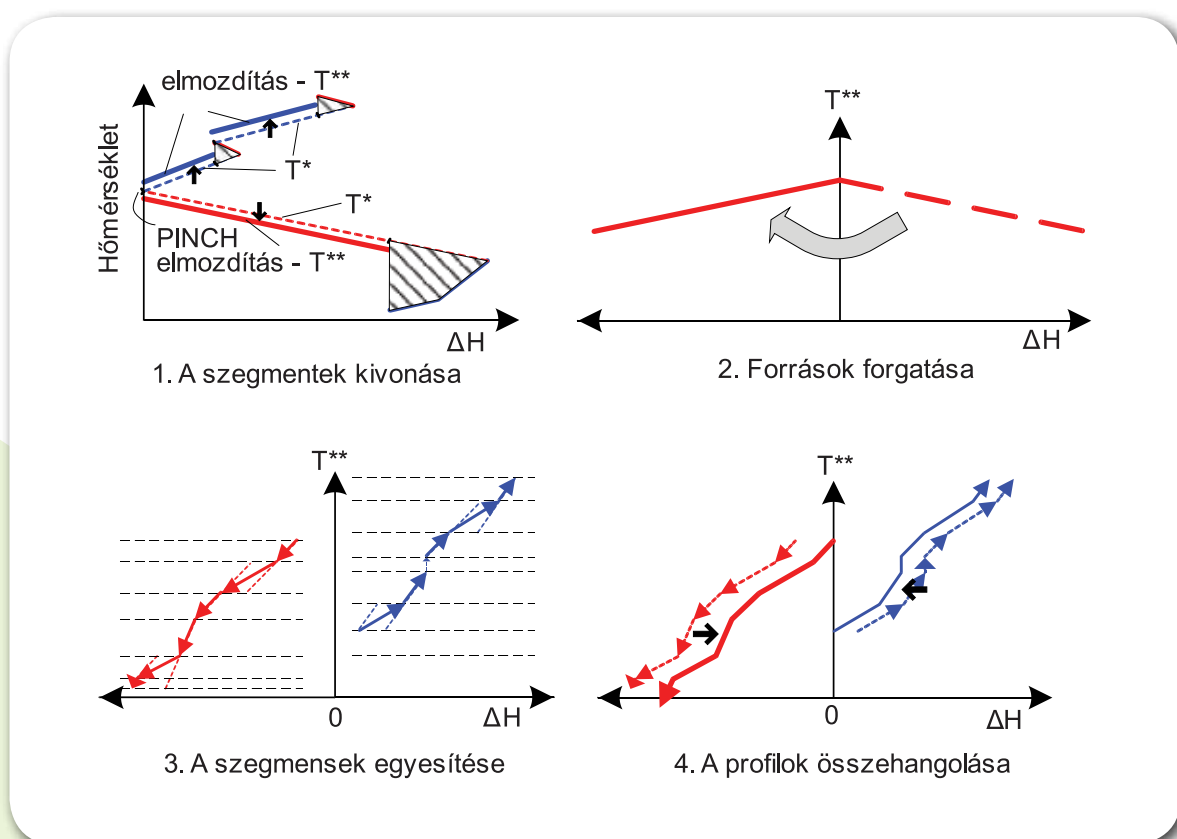
## 5.2. Total Site Profiles

A hővisszanyerési célmeghatározás eljárása a teljes üzemben termikus profilokon történik, amelyeket Total Site Profilenak nevezünk. Az első lépés (lásd: 5.2. ábra) a nettó fűtés- és hűtésigények kivonása a GCC-kből. Erre két lehetőség létezik: minden folyamaton belül korlátozzuk a hőintegrációt (úgy, hogy a hővisszanyerési zsebek nincsenek figyelembe véve a total site elemzésnél), vagy engedélyezzük a bővített integrációt a folyamatok közt, belefoglalva a GCC szegmenseit, amelyek a zsebeket alkotják. Amikor a site integrálás kiterjed a bővített integrálásra, néhány tervezési lehetőség célszerűtlenné válik: pl. az elemzés olyan áramokat akar integrálni, amelyek távol esnek egymástól; adódhatnak irányítási, illetve beindítási problémák is.

Említésre méltó, hogy minden olyan GCC-részt, amelynek az igényeit közvetlenül ki lehet egészíteni a helyi segédközegekből (pl. a folyamaton belüli kemencékkel), ki kell zárni az analízisből. A hátralévő vonalszegmensek azok a szegmensek, amelyek azt a nettó fűtés- vagy hűtésigényt képviselik,

amelyet a központi segédközegrendszer által kell kielégíteni. Amint az a képen is látható, a további lépések a hőforrás szegmenseinek a forgatását tartalmazzák (kizárólag grafikus okok miatt), az áramok szegmenseinek a ter-

mikus kombinálását (az összetett hővonalak szerkesztéséhez hasonlóan), és a kapott total site source profile és total site sink profile összehangolását.



5.2. ábra: A total site profile szerkesztése

Amint az a 5.2. ábrán látható, a GCC-ből kivont hőforrás és hőelnyelés elemei  $\Delta T_{\min}/2$ -vel eltolódnak: a hőforrások hőmérséklet-szegmensei csökkennek, miközben a hőelnyelés szegmenseinek a hőmérséklete növekszik. Ez a művelet biztosítja, hogy minden – az ábrán lévő – hőmérséklet a valódi segédközegt skálán maradjon. Ha tehát a segédközeg profilja hozzáér a folyamatból kivont profilokhoz, akkor is elegendő lesz a hőmérséklet hajtóereje ahhoz, hogy megvalósuljon a hőátadás. A hőforrások összetett vonala az ún. site source profile és a hőelnyelésekből szerkesztett vonal a Site Sink Profile.

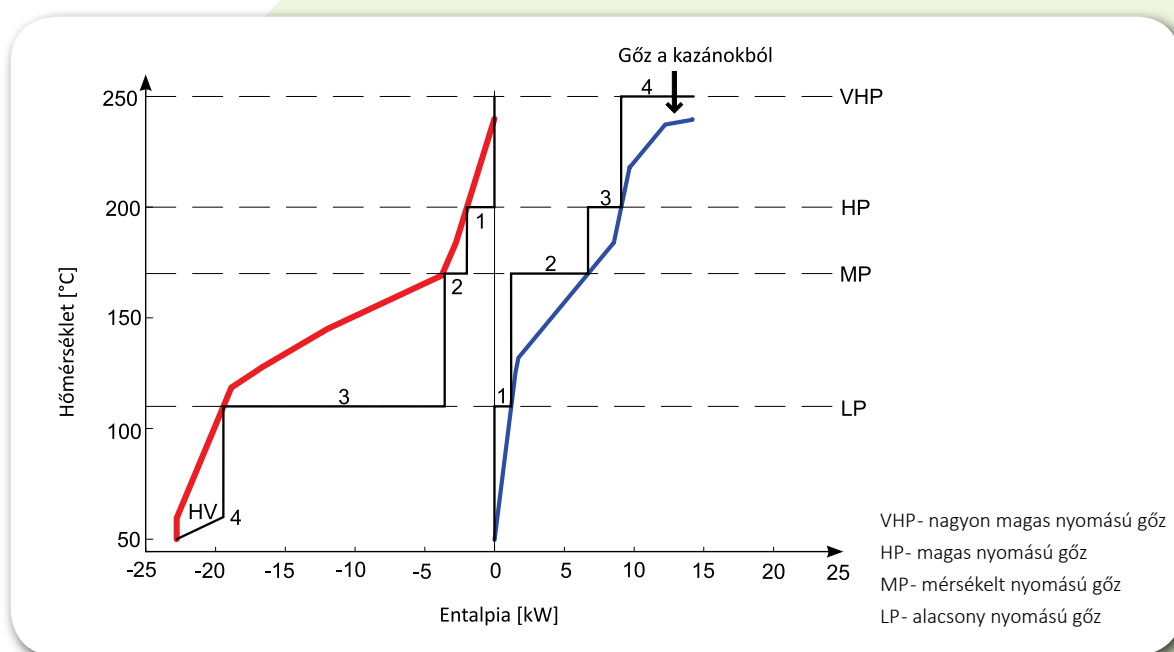
A Site Source Profile-t és a Site Sink Profile-t elsődlegesen a folyamat GCC-jéből kapjuk meg. Más gőzigényeket (többnyire azoknak a folyamatoknak az igénye, amelyek a fűtéshez közvetlenül nem kapcsolódnak) a GCC-n általában nem ábrázolunk; pl. ejektorok és reaktorok, valamint az indokolatlan gőz használata. Ezeket a további igényeket a site segédközeg-rendszerének az analizálásakor és tervezésekor kell figyelembe venni. Az ilyen gőzigényeket – hőelnyelő elemként – a Site Sink Profile-hoz adjuk hozzá – bármilyen hőmérséklet-módosítás nélkül.

### 5.3. Hővisszanyerés a gőzrendszeren keresztül

A maximális lehetséges hővisszanyerés célját a segédközeg-rendszeren keresztül a site sink és source profilok segítségével lehet meghatározni – a gőz fejléc telítettség hőmérsékletével. A segédközeg generálását és felhasználását szolgáló source összetett vonal úgy van megszerkesztve, hogy a hőátadás megvalósítható a site source profile-ról a site source összetett vonalra és a site sink összetett vonalról a site sink profile-ra.

A site összetett vonalak az egyes folyamatok összetett vonalaihoz hasonlítanak. A source CC szerkesztése a legmagasabb megvalósítható

gőzszinten kezdődik. A gőz generálását minden szinten maximalizáljuk, még mielőtt a következő, alacsonyabb szintet elemzzük. Ez biztosítja a hőforrás hőmérséklet-potenciáljának a maximális kihasználását. A site source profile maradékának (az a rész, amelynek nincs átfedése az újonnan szerkesztett source CC-vel) igényét hűtővízzel elégítjük ki. A sink CC szerkesztése szimmetrikus eljárást követ, azzal a különbséggel, hogy itt a leg-alacsonyabb lehetséges szintről kezdjük a szerkesztést. A felhasználást ezen a szinten maximalizáljuk, még mielőtt az elemzést egy szinttel feljebb folytatjuk, ezt a folyamatot addig ismételve, amíg el nem érjük a legmagasabb lehetséges szintet, beleértve a kazán által előállított gőzt is.



5.3. ábra: Total site összetett vonal

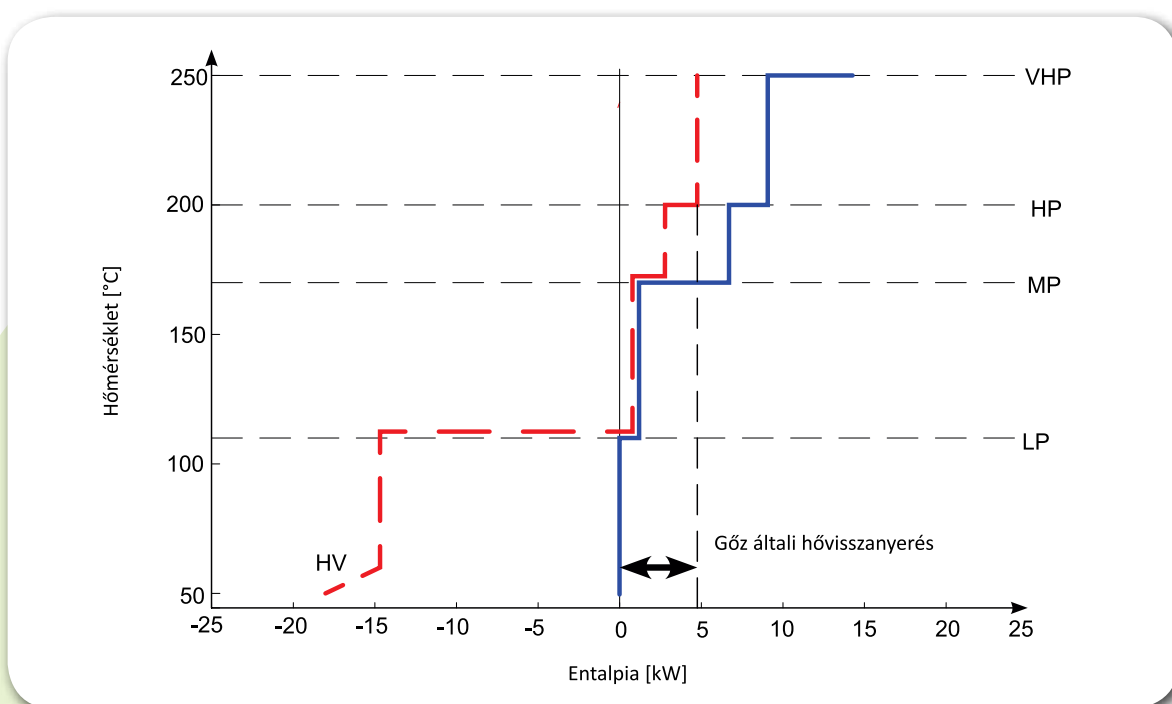
Az 5.3. ábra a total site CC szerkesztésének a folyamatát mutatja be, itt az 5.2. ábrán látható Total Site Profile-t használtuk fel újra. Több gőznyomásszint van jelen, amelyeket a telítettség hőmérsékletével ábrázoltunk. A főbb elosztás a következő: magas nyomású gőz (*high pressure-HP*), amelynek a telített-

ségi hőmérséklete 240 °C-nál van és az alacsony nyomású gőz (*low pressure-LP*) 115 °C telítettségű hőfoknál. Továbbá a nagyon magas nyomású gőz (*very high pressure-VP*) 300 °C-nál van generálva a gőzkazánban, és a hűtővíz is rendelkezésre áll.

A site source profile az 5.3. ábrán legfeljebb 2 MW HP gőzt tud biztosítani, valamint további 2 MW MP gőzt és 15 MW LP gőzt. A többi hőforrásokat hűtővízzel kell ellátni, amellyel kiegészítjük a site source CC-t. A site sink CC arra utal, hogy az 1 MW LP, a 6,5 MW MP, a 2,5 MW HP, és a maradék 5 MW gőzigényt a VHP gőz által kell biztosítani. A két site CC átfedhető egymással ugyanúgy, mint a folyamat CC-k, ezáltal illusztrálva a total site hővisszanyerését a gőzrendszeren keresztül.

Az 5.4. ábra a site CC-k átfedését mutatja. A total site hővisszanyerés mennyiségére a site CC közti átfedés utal. Ezért a hővisszanyerést úgy lehet maximalizálni, ha a két site CC hozzáért egymáshoz, és nem

lehet tovább tolni. A terület, ahol a vonalak egymáshoz érnek, és amely általában két gőzszintre van korlátozva (ebben az esetben a MP és az LP szint), az ún. Total Site Pinch. A gőzhálózat, amely a site pinch körül van elhelyezve, ellentétes a nettó gőzterheléssel. Másként fogalmazva: a gőzhálózat a pinch felett a nettó gőzfelhasználó, miközben a pinch alatti rész a gőzfejlesztő. A folyamat pinch-hez hasonlóan a site pinch is a teljes hővisszanyerési feladatot két részre osztja, és pedig a nettó hőforrásra és a nettó hőelnyelésre.



5.4. ábra: A total site hővisszanyerésének a célmeghatározása

## 5.4. Az áram kogenerálása

A tényezők, amelyek irányítják a segédközeg-rendszer gazdaságosságát a következők: az üzemanyagok és azok tulajdonságai, az üzemanyagköltség és az áramköltség hányadosa, a segédközeg-rendszer hatékonysága, valamint az exportált/importált áram mennyisége. Ezekről a tényezőktől és a total site áram igényétől függően a site lehet nettó áram importáló vagy exportáló (vagy egyensúlyban).

A legtöbb ipari folyamatban különböző nyomás szintű gőzre van szükség – egészen 30 bár-ig. A központi segédközeg-kazánok nagyobb nyomású gőzt (40 –100 bar) állítanak elő. Az ellennyomású gőzturbinákat használjuk a gőz tágitására a magasabbról az alacsonyabb szintű gőz felé, ami egyben áramot generál, miközben ellátja a folyamat gőzigényét.

Egy másik kogenerálási módszer a gázturбина használata, ami önmagában áramfejlesztő eszköz. A gázturбина az áramtermeléssel nagy mennyiségű hulladékhőt termel, a hőáram aránya kb. 1,5:2. Ez magas hőmérsékletű (450 – 600 °C) hulladékhő, amelyből még VHP gőzt is lehet előállítani. A gázturбина kipufogójának áram hőjét fel lehet használni a hővisszanyerő gőztermelőkkel – kiegészítő tüzeléssel vagy a nélkül. A generált gőz felhasználható közvetlenül a folyamat fűtésére, vagy először a gőzturбина segítségével tágitjuk, majd felhasználjuk további áram fejlesztésére.

Dhole és Linnhoff (1993) – a gőzrendszer általi hővisszanyerésről szóló – munkáját Raisi (1994) és Klemeš et al. (1997) fejlesztette tovább. Ez utóbbi cikk az ún. Site Utility GCC (SUGCC) kifejlesztését írja le. A görbe által körbezárt terület arányos a site gőzrendszerének az áramkogenerációs potenciáljával. Klemeš et al. (1997) definiált egy egyszerű arányossági tényezőt, amit a SUGCC-n lehet használni, és amelynek az értékét általában minden ipari

site-on külön elemezzük. Ezt a kogenerációs célmeghatározó modellt „T-H modell”-nek is nevezzük, mert a gőzrendszer hőáramlásán alapul.

Az SUGCC használata lehetővé tette Klemeš et al.-nak (1997), hogy meghatározza a termodinamikai célokat (target) az áram kogenerálására és a célokat a site-méretű hővisszanyerésre – a segédközeg költségének minimalizálása érdekében. A maximális hővisszanyerés elérése a minimális kazánból kinyert gőzigényhez vezet, amit viszont a gőz visszanyerésének maximalizálásával lehet elérni. Ebben az esetben a gőzturbinák általi áramfejlesztés minimális, aminek az a hatása, hogy maximalizálja a beszállított áramot. Ezt az esetet a site CC-kell lehet ábrázolni, amelyek a maximális átfedés pozíciójában vannak összetolva (azaz a pinch elérésével). Ez a cél ábrázolja a rendszer hatékonyságának a termodinamikai határát, de ez nem az a specifikáció, amit mindekképpen el kell érni. A segédközeg minimalizálása a gőzvisszanyerés és a gőzturbinák általi áram kogenerációja közötti kompromisszummal érhető el. Ha a tervezési irányelvek a minimális költségeken alapulnak, akkor az így kapott hálózat általában különbözik attól a hálózattól, amit a minimális üzemanyag felhasználására tervezünk.

Mavromatis és Kokossis (1998) javasolt egy ellennyomású teljesítményű gőzturбина modellt. Ebben a modellben a gőzturбина teljesítménye a méretétől (a maximum tengelyteljesítmény) és a részterhelés működésétől függ. A tengelyteljesítmény a gőz tömeg áramának függvényeként van modellezve, ezt a függvényt Willan-egyenesként ismerjük. Ezt a modellt Shang (2000) továbbfejlesztette a kondenzációs gőzturbinákra. Mindegyik említett munka ugyanazt a modellszerkezetet követi és ugyanazokat az egyenleteket, de a turбина regressziós együtthatókra már különböző értékeket használnak.

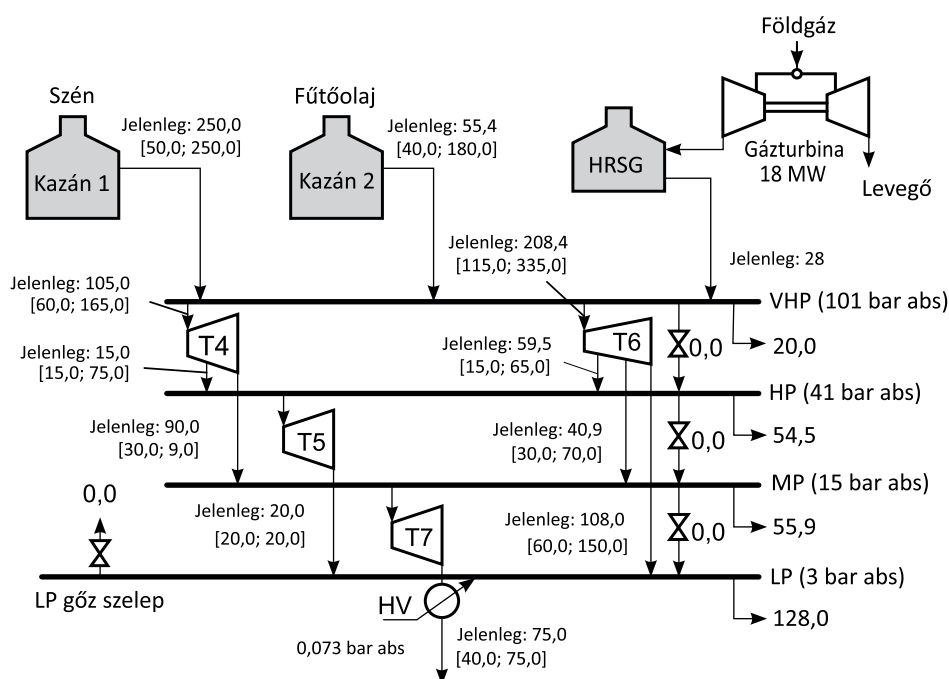


Willan egyenes metszéspontját Mavromatis és Kokossis (1998), valamint Shang (2000) ekképpen képezte le: egyenlő a turbina energiaveszteségével – a fix veszteségi arány feltételezése mellett.

Varbanov et al. (2004a) bevezetett néhány fejlesztést: 1) felismerte, hogy a Willan egyenes metszéspontjának nincs közvetlen fizikai jelentése, és egyszerűen egy linearizálás metszéspontja, valamint 2) számba vette a gőzturbina bemeneti és kimeneti nyomását. Ezeket a továbbfejlesztett gőzturbina modelleket már beépítették a gőzhálózatok szimulációs és optimalizálási módszereibe; a hő és áram kogenerációs céljainak meghatározásánál is már felhasználták őket azzal a feltételezéssel, hogy egy nagy gőzturbina van minden expanziós zónában – két egymást követő gőz fejléccel.

## 5.5. Előrehaladott Total Site optimalizálás és elemzés

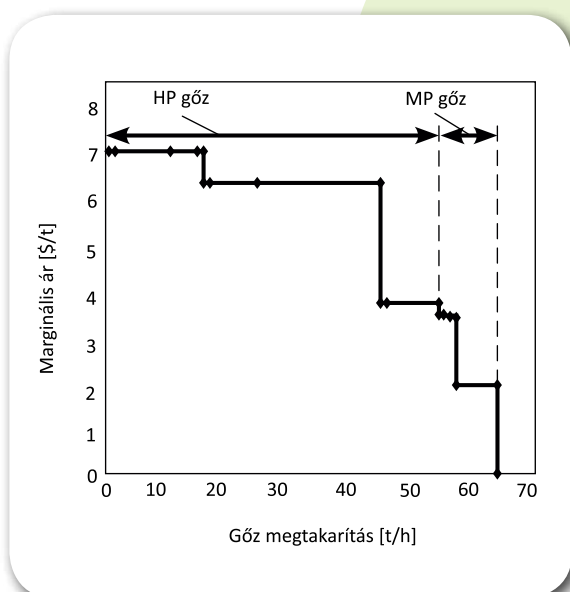
A segédközeg-rendszerben az optimalizálási modell eszközként szolgál a site – az energiára vonatkozó – működési költségeinek a csökkentésére, és az energiaátalakítások termodinamikai korlátainak az elemzésére. Az előrehaladott megközelítés ehhez a koncepcióhoz az ún. felső szintű elemzés, amely megengedi a site olyan jellegű „méretezését”, amelyből kiderül, hogy melyik folyamatokat kell megcélózni a hőintegrálás javítására (Varbanov et al. 2004b). Az 5.5. ábrán (Smith és Varbanov, 2005) bemutatott segédközeg-rendszer tulajdonságait már optimalizálták az adott gőz- és áramigényekre.



Az áramok egysége [t/h]. Az alsó és felső határok [min; max] formában vannak megadva.

5.5. ábra: Optimalizált segédközeg-rendszer folyamatára





5.6. ábra: Marginális gőzárak a segédközeg-rendszerre, amely az 5.5. ábrán van bemutatva

A marginálisár-görbe az 5.5. ábrán ábrázolt segédközeg-rendszerre az 5.6. ábrán látható. A görbe azt jelzi, hogy a legtöbb lehetőség a folyamatok javítására a HP gőzt felhasználó folyamatokban van, ezt követi a MP gőzt felhasználó, az LP gőz esetében pedig a megtakarítás nyilvánvalóan igen szerény.

Tételezzük fel, hogy lehetőség van a HP gőzigény csökkentésére, pl. azon folyamatok energiahatékonyságának a növelésével, amelyek HP gőzt használnak. Vajon mennyit is ér egy ilyen gőzmegtakarítás valójában? A HP gőzigény csökkentése azt jelentené, hogy kevesebb gőzt kellene tágítani a VHP szintről, ami alacsonyabb áramkogenerációhoz vezetne, és nagyobb áramimportot eredményezne. Mint a döntéshozatalt támogató eszközt, amely annak kiderítésére szolgál, hogy hogyan lehet legjobban hasznosítani a potenciális gőzfelesleget, és a potenciális HP gőz megtakarításának a becslésére Varbanov et al. (2004b) megvizsgálta a marginális gőzár fogalmát. Ez a számítás magába foglalja a segédközeg-rendszernek az egységnyi gőzigénye energiaköltségeinek a változását, és specifikusan érvényes egy adott gőzsztint és működési feltételek kombinációjára. A segédközeg-rendszer optimalizálásával a fokozatos potenciális gőzigény csökkentésével egyes szinten el lehet érni a marginális gőzárát az elérhető megtakarításokkal szemben.



## 6 Új és módosított tervezés, gazdasági feltételek hatásai

A HH tervezési módszer, amelyet a 4. fejezetben tárgyaltunk, az új üzemek tervezésére vonatkozik. Ez hasznos a releváns hő- és energiatakarékossági projektek ismereteinek alapos kifejtésére. A legtöbb ipari projektben azonban arra törekednek, hogy a meglévő létesítményekből hozzák ki a legtöbbet – ahelyett, hogy teljesen újonnan tervezetteket vegyenek igénybe. Jellegzetesen a műveleteknek a javítására irányulnak, hogy eltávolítsák a szűk keresztmetszeteket; javítsanak az energia- és nyersanyag-felhasználás hatékonyságán.

A leggyakrabban használt kifejezés az ilyen típusú projektekre a retrofit. A tipikus gazdasági paraméterek vagy korlátok a maximális megengedett megtérülési idő és a beruházási költségek. A retrofit projekt célja a lehető legtöbb energia megtakarítása, azzal, hogy eleget teszünk a gazdasági korlátoknak. A retrofit feladatok stratégiájának különbözni kell az újonnan tervezettől. A történelem folyamán három különböző megközelítés volt a legnépszerűbb (Kemp, 2007):

1. A maximum energia-visszanyerés (MER) szintézise – a meglévő üzem HH-a, a meglévő csatolások újrahasznosításának a maximalizálása. Ez implicit módon teszi a meglévő HH-ot a folyamat céljává, ezért gyenge eredményeket kapunk.
2. Kezdje a meglévő hálózattal, és próbálja meg módosítani lépésről lépésre úgy, hogy illeszkedjen a MER célok közeledéséhez. Az eljárás általában a jelenlegi folyamatáramok, segédközegek és  $\Delta T_{\min}$  speci-

fikációknak az összegyűjtésével kezdődik. Továbbá: a MER célokat a pinch-analízissel érjük el – minimális hűtés és fűtés, számos segédközeg által, valamint a pinch-ek elhelyezkedésével. A HH topológiáját használjuk a pinch-en keresztüli hőátadási csatolások azonosítására. A javaslat a HH topológiájának módosítására ezeknek a hőátadásoknak a javításával történik – csatolások hozzáadásával, eltolásával, eltávolításával.

3. Egy másik lehetőség, amely viszonylag vonzó az iparnak az, hogy a meglévő HH-ból indulunk ki, és azonosítjuk a legkritikusabb változásokat a hálózatokban, amelyek módosításával jelentősen tudjuk csökkenteni a segédközeg-felhasználást. Ez a megközelítés nagyon alkalmas lehet, ha az aktuális HH nagyon messze van a MER céltól, és a szükséges topológiai módosítások a célok eléréséhez túl összetettek és költségesek. Asante és Zhu (1997) bebizonyította, hogy ez a megközelítés igen hatékony más helyzetekben is. A legfontosabb rálátás a hálózati pinch, amely rámutat az energia-visszanyerés javításának a jelenlegi hálózati szerkezet által megszabott keresztmetszetére.

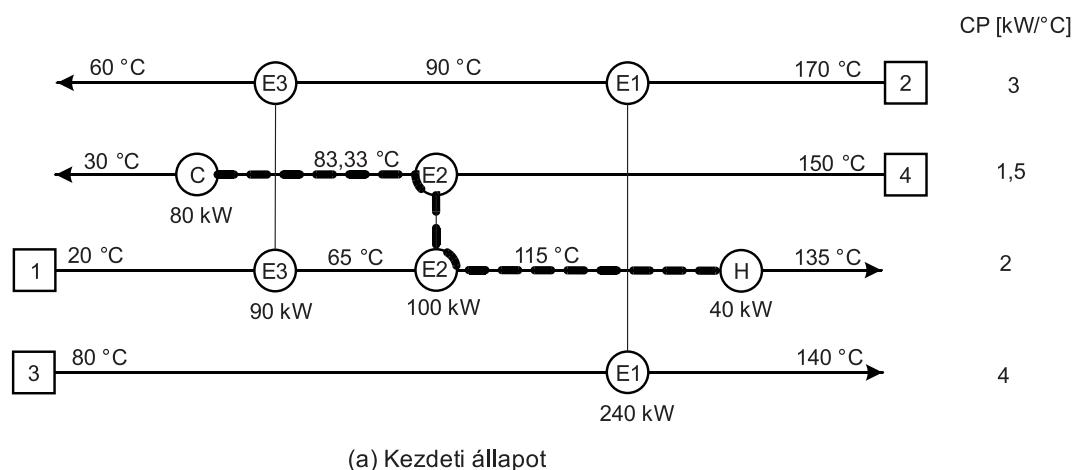
A következő fejezet egy rövid áttekintést nyújt a hálózati pinch módszeréről (Asante és Zhu, 1997).

## 6.1. A hálózat optimalizálása

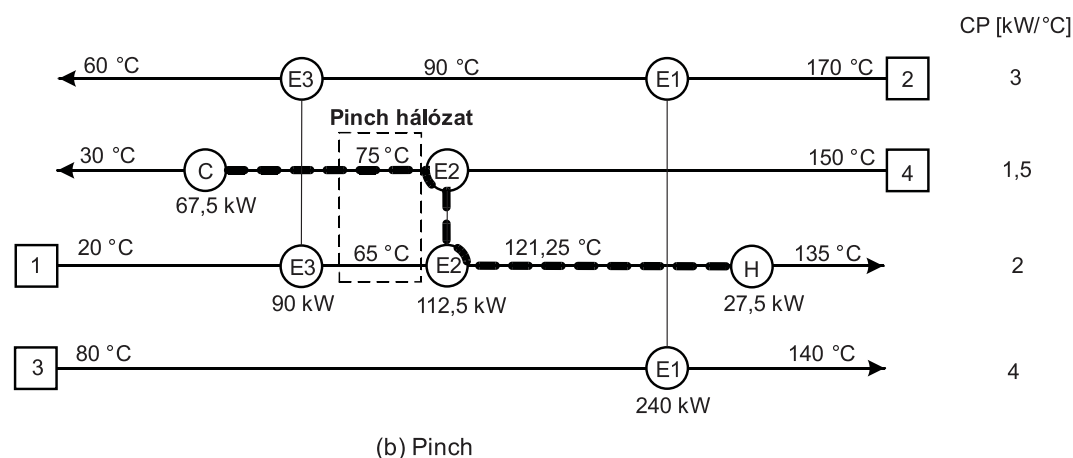
A hálózati pinch módszer a hővisszanyerés szűk keresztmetszetének az azonosításán alapul, amelyet a már meglévő HH topológiája ábrázol. Ez általában a HH folyamatos tulajdonságainak az optimalizálásával van azonosítva (a hőcserélők terhelése és az áramok hőmérséklete, miközben a hálózat topológiája rögzített). Az optimalizálás folyamatában a  $\Delta T_{\min}$  korlátot fel lehet oldani úgy, hogy egészen nulláig megengedett legyen, és ekkor a teljes költség a célfüggvény, ez pedig minden hőcserélőben azonosítja a legjobb hőmérséklet-különbségeket.

## 6.2. A hálózati pinch

Az említett HH optimalizálásának kivitelezésével végül előállítható a terhelés és hőmérséklet olyan kombinációja, ahol legalább egy hőcserélő-csatolás lesz, amelynek valamelyik végén a hőmérséklet eléri a  $\Delta T_{\min}$ , és a HH segédközeg-igény általában nagyobb, mint a pinch-analízis által becsült minimum. Ezt a csatolást pinch csatolásnak nevezzük, és azt a véget, ahol a hőmérsékletek közelednek egymáshoz a  $\Delta T_{\min}$ , hálózati pinch-nek nevezzük. Tekintsük meg a 6.1. ábrán lévő hálózatot, amelynek a  $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$



(a) Kezdeti állapot



(b) Pinch

6.1. ábra: Létező HH

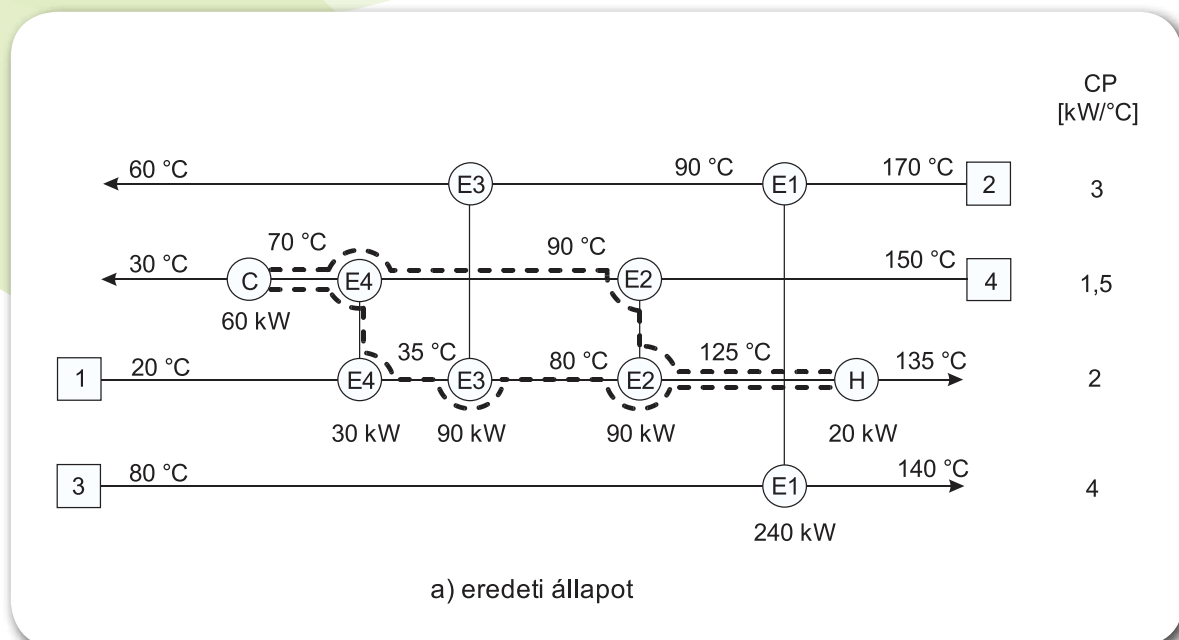
Az áram adataiból kiindulva a cél 20 kW fűtőközeg és 60 kW hűtőközeg. A hálózatban segédközeg-vonal folyik a **H** fűtőkészüléktől – az **E2** hőcserélőn keresztül – a **C** hűtőkészülékig. A vonal elemzésével azt állapítjuk meg, hogy az **E2** hőcserélő méretét meg lehet növelni 100 kW-ról egészen 112.5 kW-ig, ezen a ponton a hőfokkülönbség az **E2** hideg végén egyenlő lesz a 10°C-os korláttal, és az **E2** terhelését nem lehet tovább növelni a korlát megszegése nélkül (6.1. ábra). A fűtőberendezés terhelése 27.5 kW-os, és a hűtő berendezése 67.5 kW, mindkettő 7.5 kW-tal magasabb, mint a cél.

Ha a  $\Delta T_{\min}$ -t nulláig csökkentjük, hasonló helyzet alakul ki, ahol a cél 0 kW fűtésigény és 40 kW hűtésigény, ez pedig threshold feladatot jelent. Ebben az esetben a 6.1. ábrán látható hálózat elméletileg eltolható a kicsit nagyobb hővisszanyerésre – a fűtőkészülék 12.5 kW-os és a hűtőkészülék 52.5 kW-os terhelésével.

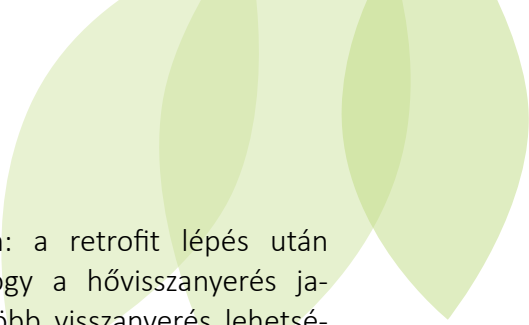
Így az **E2** hőcserélő hideg vége jelenti a hálózati pinch-et. A hálózati pinch azonosítása után számos – különböző típusú – műveletet lehet használni a hővisszanyerés javítására. Ezek az alábbiak:

- A csatolások újrasorolása. Ez a csatolások sorrendjének a változtatását jelenti, miközben az áramok, amelyek közt a csatolás létrejött, nem változnak.
- A csővezetékek újratervezése. Ez a művelet megváltoztatja a csatolásban az egyik áramot.
- Új csatolás hozzáadása. Ez a művelet a már meglévő hálózatba hozzáad egy új hőcserélőt – a stratégiailag kiválasztott helyen.
- Áramelágazás. Az egyik áram a vizsgált csatolásban elágazhat, engedélyezve a csatolásban fennmaradó ág jobb CP igazodását.

A vizsgált esetben az történik, hogy egy új csatolás hozzáadásával olyan hálózatot kapunk, amely képes a pinch célok elérésére (6.2. ábra).



6.2. ábra: HH az E4 hőcserélő hozzáadásával a célok elérésére



Általánosságban: a retrofit lépés után megtörténhet, hogy a hővisszanyerés javulhat, de még több visszanyerés lehetséges, és a hálózati pinch pont elhelyezése is nagy valószínűséggel egy másik csatlósra helyeződik át. Ebben az esetben a hálózati pinch azonosítását szolgáló eljárás után új retrofit műveletet lehet alkalmazni.

A részletesebb utasításokért a retrofit hálózati pinch módszerről lásd: Asante és Zhu (1997), valamint Kemp (2007).



## 7 Anyagintegráció

Az anyagintegráció egy szisztematikus módszer, amely biztosítja a folyamatok globális anyagáramlásnak az alapvető megértését, és azután felhasználja azt a teljesítmény céljainak az azonosítására, és az áramok és részesek elosztásának, elválasztásának és generálásának az optimalizálására. Speciális esete a szennyvíz minimalizálása, ahol a feladat magába foglalja az anyag átvitelét a „gazdag” folyamatáramból a „szegény” folyamatáramba annak érdekében, hogy elérjék a kimenet koncentrációjának céljait, miközben egyidejűleg minimalizálják a hulladék termelését és a segédközegek felhasználását, beleértve a friss vizet és a külső elválasztó anyagokat (Rašković, 2006).

### 7.1. Bevezetés a vízintegrációba

A víz széleskörűen használatos az iparban, mint fontos nyersanyag, illetve a fűtő- és hűtő segédközeg-rendszerekben (pl. a gőz termelésénél, hűtővízként), valamint mint anyagelválasztó közeg – különböző anyagátadási műveletekre (pl. mosás, extrakció). A termékek minőségére vonatkozó szigorú követelmények és a hozzáfűződő biztonsági kérdések a gyártásban hozzájárulnak a nagy mennyiségű jó minőségű víz felhasználásához az iparban. A szigorú környezeti előírások a növekvő emberi népességgel együtt megnövekedett vízigényhez vezetnek. Ezek a fejlemények a jobb vízgazdálkodást és a szennyvíz minimalizálásának a megnövekedett igényét eredményezték. A víz felhasználásának a minimalizálására kifejlesztett technikák alkalmazásával hatékonyan csökken a vízigény és a szennyvíz mennyisége. Továbbá az említett környezeti előnyökön kívül a

hatékony vízgazdálkodás csökkenti a friss víz felhasználásának és a szennyvíz kezelésének a költségeit.

Számos különböző módszert is alkalmaznak. Közéjük tartozik:

- A víz felhasználásának a minimalizálása hatékony vízgazdálkodással és a folyamatok műveleteinek az ellenőrzésével.
- A folyamatok anyag- és energiamérlegeinek optimalizálása – fejlett optimalizálási stratégiák felhasználásával, amelyek célja a vízfelhasználás csökkentése.
- Az optimalizálás integrálása, a gyártás tervezési technikáinak bevonásával – a valós időmérésekkel együtt, a termék minőségének az ellenőrzésére és a veszteségek minimalizálására.
- Folyamatintegrálási technikák felhasználása, amelyek a pinch-analízisen alapulnak.

A feldolgozóipar mindegyik területének megvannak a sajátosságai. Mindig azonban a legegyszerűbb mérésektől – a hatékony gazdálkodáson, irányításon és karbantartáson alapuló gondos kezeléstől – a fejlettebb módszerekig ajánlatos haladni. Egyes folyamatok kontinuálisan, hetente hét napot működnek egész évben, mások időszakosak és/vagy nagyban függenek attól, hogyan állnak rendelkezésre a nyersanyagok. Jellemzően időszakos termelés a cukrot, a gyümölcslejt és a gabonaféléket feldolgozó üzemekben zajlik. Ezzel szemben a sörfőzdék majdnem folyamatosan működnek, bár a feldolgozás ott is szakaszosan történik. A felsorolt tényezők befolyásolják a beruházást a feldolgozó üzemekben, és a kiválasztott technológiát, beleértve azokat is, amelyek a vízzel kapcsolatosak.

## 7.2. A vízfelhasználás minimalizálása és a víz újrahasznosításának a maximalizálása

### 7.2.1. Törvények

A vízhasználatnak és a szennyvízkibocsátásnak egyaránt nemzeti és nemzetközi szabványoknak kell megfelelniük.

Az Egyesült Államokban a legjelentősebb vízzel kapcsolatos szövetségi szabályozás magába foglalja a: 1) the National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) permit program (1972) (magyarul: A nemzeti szennyezőanyag-mentesítés megszüntetését szolgáló rendszer), 2) the Clean Water Act (magyarul: A tiszta víz törvény), (Federal Water Pollution Control Amendments of 1972), amely utána módosításra került az 1997-es Clean Water Act-el, 3) the Safe Drinking Water Act of 1974 (magyarul: Biztonságos ivóvíz törvény), 4) the Toxic Substances Control Act of 1976 (magyarul: A mérgező anyagok ellenőrzéséről szóló törvény 1976), és a 5) the Water Quality Act of 1987 (magyarul: A víz minősége törvény 1987). Az egyes államokban is vannak a vízre vonatkozó jogszabályok, pl. a Kaliforniában elfogadott, és a kormányzó által 2009-ben aláírt – átfogó – víztörvény.

Az Európai Unió tagországaiban a jogszabályok az Európai Bizottság – végrehajtó testület – irányelveit követik. A legfontosabb irányelveket közzé teszik az EU hivatalos honlapján (EUROPA, 2012). A válogatott fejezetek és címek a következők:

- The European water policy on river basin management (magyarul: Az európai vízügyi politika vízgyűjtő gazdálkodása)
- Water Framework Directive (2000/60/EC) (magyarul: Víz keretirányelv)
- Strategies to prevent chemical pollution of surface water under the Water

Framework Directive (magyarul: Stratégiák a felszíni vizek szennyezésének a megelőzésére a Víz Keretirányelven belül)

- “Priority” substances under Article 16 of the Water Framework Directive (magyarul: „Prioritás” anyagok a Víz Keretirányelv 16. cikke alapján)
- A European action program on flood risk management (magyarul: Az európai intézkedési program az árvíz kockázatkezelésére)
- Water pollution stemming from urban wastewater and certain industrial sectors; Urban Waste Water Treatment Directive (91/271/EEC) (magyarul: A városi és bizonyos ipari szektorokból származó vízszennyezés; városi szennyvízkezelési irányelv 91/271/EEC)
- Water pollution caused by nitrates from agricultural sources; Nitrates Directive (91/676/EEC) (magyarul: A mezőgazdasági forrásokból származó nitrátok általi vízszennyezés, nitrát irányelv)
- Drinking water quality; Drinking Water Directive (98/83/EC) (magyarul: Az ivóvíz minősége, az ivóvízről szóló irányelv)

### 7.2.2. Az elérhető legjobb technika

A környezetszennyezés integrált megelőzéséről és csökkentéséről (IPPC) szóló irányelv (96/61/EC) bevezette a keretet, amelyen belül az uniós tagállamok kötelesek kiadni a működési engedélyeket az egyes tevékenységek végzésére kialakított ipari létesítményeknek. Ezekben az engedélyekben olyan feltételeket kell előírni, amelyek az elérhető legjobb technikát (BAT) veszik alapul. Az elérhető legjobb technikák azok a technikák, amelyek a legjobb környezeti teljesítményt nyújtják – elfogadható költségekkel, és a magas szintű – átfogó – környezetvédelmet tűzték ki célul. Az IPPC kulcsfontosságú célja az európai tagállamok és érintett iparok közötti intenzív információcsere a BAT-



ról. Az európai IPPC iroda (eippcb.jrc.es) szervezi ezt az információcserét, és előállítja a BAT referencia dokumentumokat (BREF-eket), amelyeket a tagállamok kötelezőek figyelembe venni az engedélyezési feltételek létrehozásakor. Az iroda a munkáját szakmai munkacsoportokban (technical working groups- TWGs) végzi, amely az iparágak, az EU tagállamok, az Európai Szabadkereskedelmi Társuláshoz tartozó országok, és a környezettel foglalkozó nemkormányzati szervezetek által jelölt szakértőkből áll. Mivel az európai IPPC iroda Sevilla-ban (Spanyolország) van, az IPPC irányelvei keretében elvégzett tevékenységeket gyakran nevezik „sevillai folyamatnak”.

Számos BAT-orientált tanulmány készült az élelmiszer-feldolgozó iparban. Jó példák állnak rendelkezésre a flammand BAT központból (BAT-CENTRE, 2009). Ez a dokumentum áttekintést tartalmaz a zöldség- és gyümölcsfeldolgozó iparról – a rendelkezésre álló információk alapján. A BAT iránymutatásként való használatával a tanulmány a következő javaslatokat tartalmazza:

- A flamand hatóságoknak: az engedélyezési feltételeket és technikákat, amelyekért beruházási támogatás igényelhető, mert kevésbé károsak a környezetre.
- A flamand vállalatoknak: irányelveket a BAT koncepció kivitelezésére.

Amint az a tanulmányban olvasható, a gyümölcs- és zöldségfeldolgozó ipar a lefagyasztott zöldségek és gyümölcsök, a gyümölcskonzervek és zöldségfélék, a feldolgozott burgonya, a hámozott burgonya, és a gyümölcslevek ágazatára terjed ki. A legjelentősebb környezeti problémát a nagy mennyiségű talajvíz felhasználása és a – szerves szén, nitrogén és foszforral szennyezett – szennyvíz termelése jelenti. Az elérhető legjobb szennyvízkezelési techni-

ka magába foglalja pl. az elsődleges és aerob szennyvízkezelést kisebb burgonyahámozási vállalkozásokban, valamint az elsődleges, anaerob és aerob szennyvízkezelést a nagy feldolgozó üzemekben.

A BAT koncepció volt az alapja annak a megállapításnak, mely szerint a flamand szennyvíz-kibocsátási korlátok a felszíni vizekben technológiailag és gazdaságilag megvalósíthatóak, viszont a teljes foszforkibocsátásra új határértékeket (25 – 50 mg/L) javasoltak. Az éves szennyvízkezelés költségei egy átlagos vállalatnál a becslések szerint 2.500.000-3.500.000 €-t tesznek ki.

A kisebb méretű burgonyahámozó vállalatok szennyvíz-kibocsátására a csatornarendszerbe való kibocsátást találták a legmegfelelőbbnek.

A vízmegtakarító mérések és a víz újrahasznosítása a talajvíz felhasználását 25-30%-kal csökkentheti. Jó információforrás a BAT gyakorlatokról az ENVIROWISE, az Egyesült Királyság kormányának programja, amelyet a Momenta (AEA Technology Plc részlege) és a TTI (Serco Ltd. részlege) kezel, és gyakorlati tanácsokkal látja el a vállalkozásokat. A honlapokon (ENVIROWISE, 2009) széles körű információk találhatók, beleértve a híreket és a példákat a jó gyakorlatra.

### 7.2.3. Vízlábnyom

Hoekstra (2008) a vízlábnyomot (water footprint-WFP) mint a közvetlen és közvetett vízhasználat mutatóját definiálta, amelyet úgy kapunk meg, hogy a felhasznált, kipárolgott és/vagy szennyezett víz térfogatát mérjük ki. A vízlábnyom magába foglalja a fogyasztó „virtuális” zöld, kék és szürke vízének a felhasználását. A virtuális zöld víz annak a csapadék mennyiségének a térfogata, amely a termelési folyamat során elpárolog. Az ételiparban ez a térfogat nagyjából a mezőgazdasági termé-



kék által felhasznált víz, és ez képviseli a teljes csapadékvíz elpárolgását a földekből – a termény növekedési időszaka alatt. A virtuális kék víz annak a felületi, illetve talajvíznek a tér-fogata, amely a termelés eredményeként párolog el, pl. az öntözővíz párolgása a földekről, az öntözőcsatornákból és a tárolási víztározóból. A virtuális szürke víz az a vízmennyiség, amelyet a szennyvíz hígítására kell felhasználni annak érdekében, hogy a víz minősége eleget tegyen az újrahasznosítására vagy a szennyvíz környezetbe való kibocsátására vonatkozó szabványoknak.

A vízlábnyom kiszámolható bármilyen olyan termékre vagy tevékenységekre, amelyek jól meghatározott termelői és fogyasztói csoportja van. A vízlábnyom földrajzilag és az idő szempontjából explicit mutató: nem csak a vízfelhasználás és szennyezés mennyiségét tükrözi, hanem a vízhasználat típusát is, valamint azt, hogy hol és mikor volt a víz felhasználva.

A leggyakoribb vízfelhasználó műveletek:

- Fűtés: kazánok, hőcserélők stb.
- Folyamatvíz: hűtőtorony
- Ivóvíz-felhasználás: irodák, étkezdék, stb.
- Mosás: berendezés, üvegek, padlók, járművek stb.
- Öblítés: berendezés, üvegek, élelmiszer-alapanyagok, végtermékek
- Tűzoltás
- Szállítási közeg

Az élelmiszeripar nagy mennyiségű vizet használ fel: a felhasználás a becslések szerint Kanadában 347.2 Mm<sup>3</sup> (Dupont és Renzetti, 1998), és Németországban 455 Mm<sup>3</sup> (Fahnich et al. 1998). Más tanulmányok beszámoltak (Hoekstra és Chapagain, 2007) néhány gyakori élelmiszertermék előállításához szükséges virtuális víz felhasználásáról (7.1. táblázat).

7.1. táblázat: A virtuális víz – kiválasztott termékekre (Hoekstra és Chapagain nyomán, 2007)

Termék	virtuális víz (L)
1 pohár sör (250 mL)	75
1 pohár tej (200 mL)	200
1 csésze kávé (125 mL)	140
1 csésze tea (250 mL)	35
1 szelet kenyér (30 g)	40
1 szelet kenyér (30 g) sajttal (10 g)	90
1 burgonya (100 g)	25
1 alma (100 g)	70
1 pohár bor (125 mL)	120
1 pohár almalé (200 mL)	190
1 pohár narancslé (200 mL)	170
1 zacskó burgonyaszirom (200 g)	185
1 tojás (40 g)	135
1 hamburger (150 g)	2400
1 paradicsom (70 g)	13
1 narancs (100 g)	50

Átfogó felmérés a vízkezelő- és szennyvíz-alkalmazásokra az élelmiszeriparban az alábbi könyvekben található: Smith (2005) és Klemeš, Smith és Kim, (2008). A legtöbb technika a víz felhasználásának a minimalizálására a két csoport egyikébe esik:

1. **Folyamatmódosítás:** Ezek jelentős változásokat foglalnak magukba azokban a műveleti egységekben, amelyek friss vizet használnak. A példák tartalmazzák a szintek számának a növelését az extrakció folyamatában, annak érdekében, hogy csökkenjen a víz használata, továbbá tartalmazzák a vízzel működő hűtőtorony léghűtésre

történő lecserélését, az energiahatékonyság növelését a gőzigény csökkentése érdekében, a kondenzátum visszaforgatásának a növelését a gőzrendszerekben és a továbbfejlesztett kezelést. A kezelés magába foglalja a víz felhasználásának és pazarlásának az elemzését és mérését, a vízpazarlás csökkentését, rendszeres tisztítási műveleteket és a berendezés karbantartását.

2. **Újrafelhasználás, újrahasznosítás és regeneráció:** Ezek az opciók lehetővé teszik a szennyvíz újrafelhasználását a vízfelhasználó műveletekben. Természetesen figyelembe kell venni a szennyező anyagok jelenlétét úgy, hogy a következő vízhasználó folyamatokat nem érintik hátrányosan. Ezt a nézőpontot a 7.2.4. fejezetben tárgyaljuk részletesebben.

A víz minimalizálására számos módszer áll rendelkezésre (Klemeš és Perry, 2007b):

- A víz pinch-analízis technikája
- Matematikai optimalizálási technika
- A folyamat műveleteinek a hatékony irányítása és ellenőrzése
- Az optimalizálás, valamint a termelési és tervezési technikák integrálása – a valós időmérésekkel, a termék minőségének és a veszteségek minimalizálásának az ellenőrzésére.

#### **7.2.4. A víz felhasználása és a szennyvíz minimalizálása**

##### **7.2.4.1. A mértékegységek áttekintése**

Smith (2005) azokat a mértékegységeket, amelyeket a víz felhasználásának csökkentésére és a szennyvíz minimalizálására használunk, az alábbiak szerint foglalta össze:

1. **Folyamatmódosítások:** Ezek magukba foglalják mindazokat a mértékeket, amelyeket a 7.2.3. fejezetben listáztunk – az első tétel alatt. A vízminőséget is javítani le-

het bizonyos feldolgozási komponensek használatának a csökkentésével, mint pl. a veszélyes tisztítószer, vegyi anyagok és adalékanyagok. A csökkentett felhasználást és a megnövekedett hatékonyságot a berendezések korszerűsítésével vagy új technológiák bevezetésével tudjuk elérni.

2. **Újrafelhasználás:** Ez egy lehetséges stratégia, amelynél a szennyvizet az adott műveletből közvetlenül felhasználjuk egy másik műveletben, feltéve, hogy a szennyező anyagok az újrafelhasznált vízben nem zavarják a folyamatot a későbbi műveletek során.
3. **Regenerációs újrafelhasználás:** Ez a folyamat magába foglalja a szennyvíz tisztítását az egyik műveletben, és utána az újrafelhasználását a másikban.
4. **Regenerációs újrahasznosítás:** Ebben az esetben a szennyezőanyagok a szennyvízben csak részben vannak eltávolítva mielőtt a vizet visszajuttatjuk ugyanabba a folyamatba.

##### **7.2.4.2. Szennyvízkezelés**

A szennyvízkezelés műveleteit különböző kezelési szakaszokra lehet felosztani az alábbiak szerint:

- **Előkezelés:** A durva részecskék mechanikus elválasztása (pl. botok, műanyagok).
- **Elsődleges kezelés:** A lebegő szilárd részecskék eltávolítása fizikai vagy fizikai-kémiai kezeléssel. Ez a folyamat a természetes ülepedésből, illetve a koagulánsok és flokkuláló anyagok segítségével való elválasztásból vagy centrifugálásból állhat. Az elsődleges kezelés magába foglalja a semlegesítést, szitipelést (pl. az ammónia, NH<sub>3</sub> eltávolítása), valamint az olaj és zsír flotációs eltávolítását.
- **Másodlagos kezelés:** A kolloidok és hasonló anyagok eltávolítása a szennyvízből. Ez a kezelés magába foglalhatja a kémiai és biológiai folyamatokat, minimalizál-

ja a szennyvíz szerves anyag terhelését. A gyakran használt folyamatok közé tartozik az eleveniszapos kezelés és az anaerob lebontás – mindkettő segít a foszfátok, az ammónia és az oxigénnel lebontható szennyeződések eltávolításában.

- **Harmadlagos kezelés:** Ez a szakasz olyan fizikai és kémiai folyamatokat foglal magába, amelyek eltávolítják a foszfátokat, ammóniát, ásványi anyagokat, nehézfémeket és szerves vegyületeket. Ezek a folyamatok képezik a „csiszolási szakaszt”, és általában drágábbak, mint a hagyományos technikák. Az ilyen típusú kezelés szükségessége nagyban függ az alábbi két tényezőtől:

- (i) A szennyvíz kibocsátásra vonatkozó környezeti minőségi előírások (EQS) elérésétől, amelyek szigorúbbak lehetnek, mint a BAT követelmények. A szennyező anyagokhoz tartozik az ammónia és az ún. List I and List II anyagok és lebegőanyagok.
- (ii) A szennyvíz újrahasznosításától – további használatra az üzemben (mint folyamatvíz vagy mint tisztító víz).

A harmadlagos kezelés különösen fontos a környezetileg érzékeny területeken, ahol a kilépő szennyvíz kis mennyiségű nitrogént és foszfort tartalmazhat.

### 7.3. Bevezetés a víz pinch-analízisbe

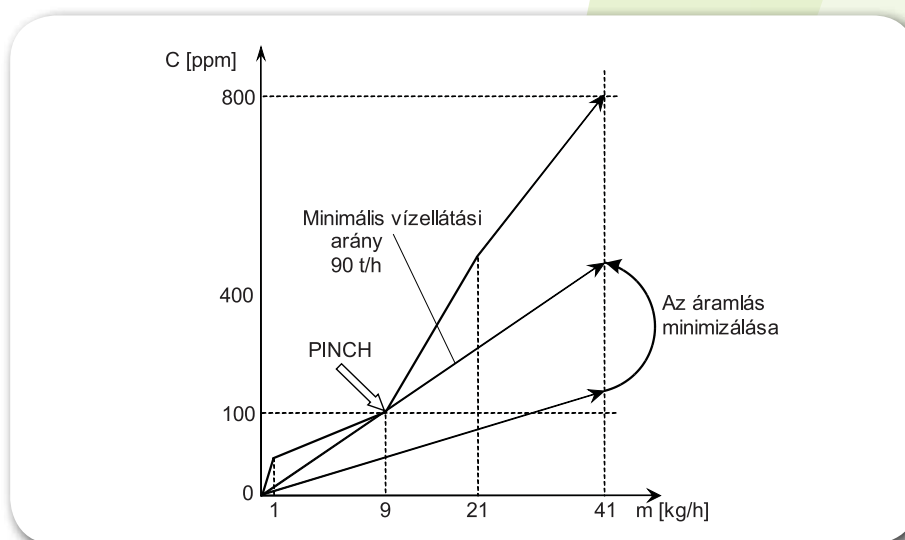
A pinch-analízist először a hőcserélő-hálózat szintézisére fejlesztették ki, és utána bővítették ki a további integrációs alkalmazásokra (El-Halwagi, 1997; Klemeš et al. 1997; Smith, 2005). A víz pinch-analízis az anyagintegráció speciális eseteként alakult ki Wang és Smith (1994) kezdetleges munkáját követve.

A víz pinch-analízisben az újrafelhasználás azt jelenti, hogy az egyik egységből kilépő szennyvíz fel van használva egy másik egységben, de nem abban az egységben, ahonnan kilépett. Ezzel szemben az újrahasznosítás azt jelenti, hogy az egységből kilépő szennyvíz ugyanabban az egységbe lesz újrahasznosítva – bizonyos tisztítás után –, ahol azelőtt is alkalmazták. A regenerációs egységet (pl. filter, sztripper) részben lehet használni a vízgőz tisztítására az újrafelhasználás vagy újrahasznosítás előtt (Wang és Smith, 1994).

Wang és Smith (1994) leírt egy módszert, amellyel meghatározható a szükséges friss víz mennyiségének igénye különböző műveletekre, amikor a vízkimeneteket bizonyos műveletekben újra felhasználjuk. Rámutattak: jelentős vízmegtakarítás érhető el azzal az esettel szemben, amikor csak friss víz használata áll fenn. A szerzők egyszerű példát használtak, a 7.2. táblázatban bemutatott adatokkal.

7.2. táblázat: A feladat adatai a Wang és Smith (1994) által bemutatott példára

Művelet száma	szennyezőanyag tömegáram [kg/h]	$C_{in}$ [ppm]	$C_{out}$ [ppm]	$F_L$ [t/h]
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10



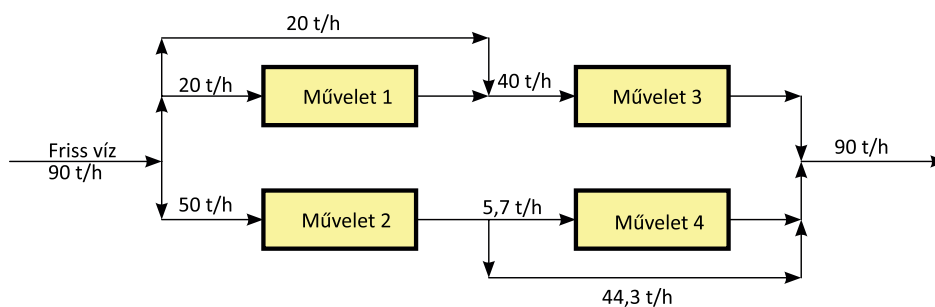
7.1. ábra: A korlátozó összetett vonal és a víz pinch

A táblázat egyetlen szennyezőanyag maximális bemeneti és kimeneti koncentrációját sorolja fel, négy különböző műveletre. Az utolsó oszlop megadja a vízáram korlátot, amely az a vízáram, amelyet a művelet megkövetel, ha a víz felveszi azt a szennyezőanyag tömeget, ami megfelel a bemeneti és kimeneti koncentráció közötti különbségnek. Az olyan műveletek esetében, ahol a koncentráció nagyobb a nullánál, a szennyezetlen friss víz lehetővé teszi az olyan áramot, amely alacsonyabb a megadott vízáramkorlát által meghatározott áramtól. Az egyszerű adatelemzés – feltételezve, hogy minden művelet friss vizet használ – megállapítja, hogy a teljes, a műveletek által igényelt (szennyezetlen) friss víz követelmény 112.5 t/h, a négy művelet vízigénye pedig: 20, 50, 37.5, és 5 t/h.

Ha a víz újrafelhasználása megengedett, akkor az analízis, amely a korlátozó összetett vonalat használja, a minimális friss víz áramának céljával a 90 t/h-t határozza meg. A korlátozó CC a négy vízfelhasználó műveletre a 7.1. ábrán látható. A vízellátás vonalának – amely kielégíti a vízfelhasználó műveletet, és amelyet a korlátozó CC ábrázol – az indulási helye a nullában koncentrálódik, és a CC vonal alatt van. A vonal meredeksége olyan, hogy

egy ponton hozzáér a CC-hez, amit víz pinch-nek nevezünk. Más vízellátási vonal ugyanazzal a kiindulási ponttal is szerkeszthető, de ez nem érne hozzá a CC-hez, és így az áram nagyobb lenne, mint az (előnyben részesített) minimális áram. Ha a vízellátási vonalat nagyobb meredekséggel szerkesztjük a kisebb áram elérésére, akkor a vonal valójában átnyúlik a korlátozó CC-n, és így nem lehet a megvalósítható tervezés része.

Wang és Smith (1994) előállított egy eljárást a vízrendszer tervezésére, a meghatározott célok elérésére. A 7.2. ábra a víz műveletek végleges rendszerének tervezetét mutatja, amely az 5.2. táblázatban van leírva. Az ábra azt mutatja, hogy az eredetileg megcélzott friss víz mennyisége 90 t/h, ebből 20 t/h-t az első műveletre használunk fel, és 50 t/h-t a második műveletre. A maradék 20 t/h-t a 3. műveletre használjuk, együtt a 20 t/h-val, amit az első műveletből kapunk. Az eredetileg a 2. műveletre szánt vízáram 50 t/h-ból 5.7 t/h-t a 4. műveletben használunk fel újra, a maradék 44.3 t/h pedig közvetlenül szennyvízként távozik. A szerzők elismerték, hogy ezt a tervet tovább lehet fejleszteni más alternatív hálózatokkal. További részletek a tervezés eljárásáról a cikkben találhatók.



7.2. ábra: A víz pinch-módszerrel tervezett vízkezelési rendszere

Az áramok vízének újrafelhasználási és újrahasznosítási céljainak meghatározására számos más grafikus és táblázatos célmeghatározási technika alkalmazható. A Wang és Smith (1994) által bemutatott korlátozó összetett vonal mellett az alábbi módszereket is lehet használni: a víztöbblet diagram (Hallale, 2002), anyag-visszanyerési pinch diagram (El-Halwagi, Gabriel és Harell, 2003; Prakash és Shenoy, 2005), a kaskád analízistechnika (Manan, Foo és Tan, 2004), és a forrás összetett vonal (Bandyopadhyay, Ghanekar és Pillai, 2006). Miután azonosítottuk az áramcélokat, a vízhálózat tervezésére és a célok elérésére, számtalan technika áll rendelkezésünkre. A munkákat, amelyekre hivatkoztunk, a kontinuitással bíró folyamatokra fejlesztették ki, de már több jelentés készült olyan erőfeszítésekről, ahol a víz pinch-analízist szakaszos folyamatokra is felhasználták, pl. (Wang és Smith, 1995; Foo et al. 2005).

## 7.4. A víz minimalizálása – matematikai optimalizálással

### 7.4.1. A matematikai optimalizálás használata

A víz pinch-analízisen kívül a víz minimalizálási feladatait matematikai optimalizálással is igyekeztek megoldani. Számtalan ilyen jellegű megközelítést dolgoztak ki, amelyek kiegészítették a víz pinch-analízist – össze-

tett feladatok megoldására, pl. a többféle szennyezőanyagot tartalmazó rendszer esetében (Alva-Argáez, Kokossis és Smith, 1998; Huang et al. 1999), és a tiltott/kötelező kapcsolaton a vízfelhasználó folyamatok közt (Tokos és Novak Pintarič, 2009). Mindezek a megközelítések valamilyen szinten a víz újrafelhasználásának a céljaira támaszkodnak, ezt pedig a szuperstruktúra szerkesztése és redukálása követ – optimalizálással.

### 7.4.2. Szemléltető példa: sörgyár

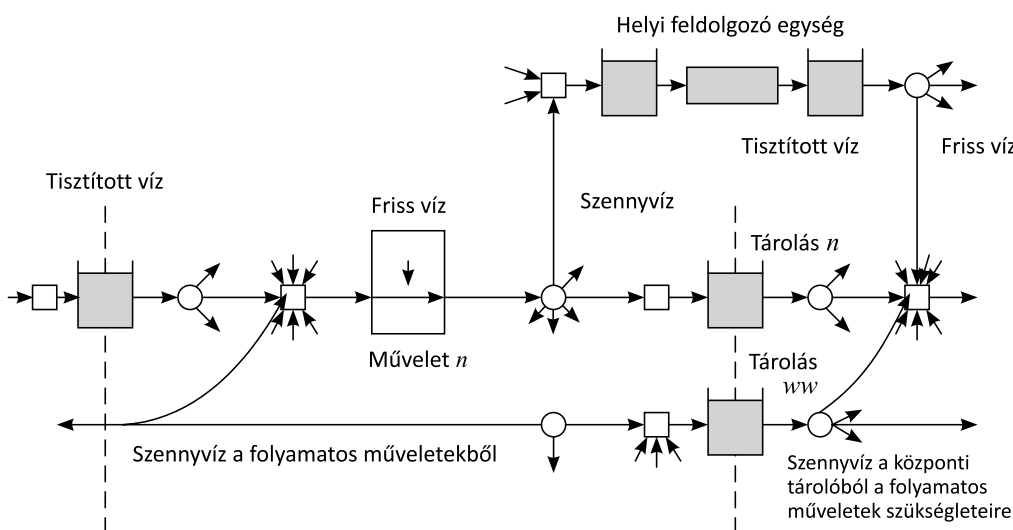
Ez a fejezet egy sörgyár esettanulmányát tárgyalja (Tokos és Novak Pintarič, 2009) annak érdekében, hogy szemléltesse, hogyan használható a matematikai optimalizálás a víz minimalizálási feladatára. A vizsgált sörgyárban a térfogathányados a sörgyártás folyamat vízfelhasználása és a termék közt 6.04 : 1. Ez 653,300 m<sup>3</sup>/y friss víz felhasználását jelenti évente. A BREF (2006) által előírt hányados alapján a felső korlátot, ami 144,900 m<sup>3</sup>, a sörgyár túllépi. E helyzetelemzés fényében a vállalat elkötelezte magát a folyamat javítására – retrofit módosítással a meglévő vízhálózaton úgy, hogy az üzem friss víz felhasználását a minimálisra csökkentse.

A termelés az üzemben szakaszos és fél-folyamatos folyamatokat foglal magába. A vízfelhasználó műveletek a csomagolási területen többnyire szakaszos üzemmódban működnek, kivéve a nem visszaváltható üvegek és palackok öblögetését. A fél-folyamatos folyamatok szennyvízárama a szakaszos

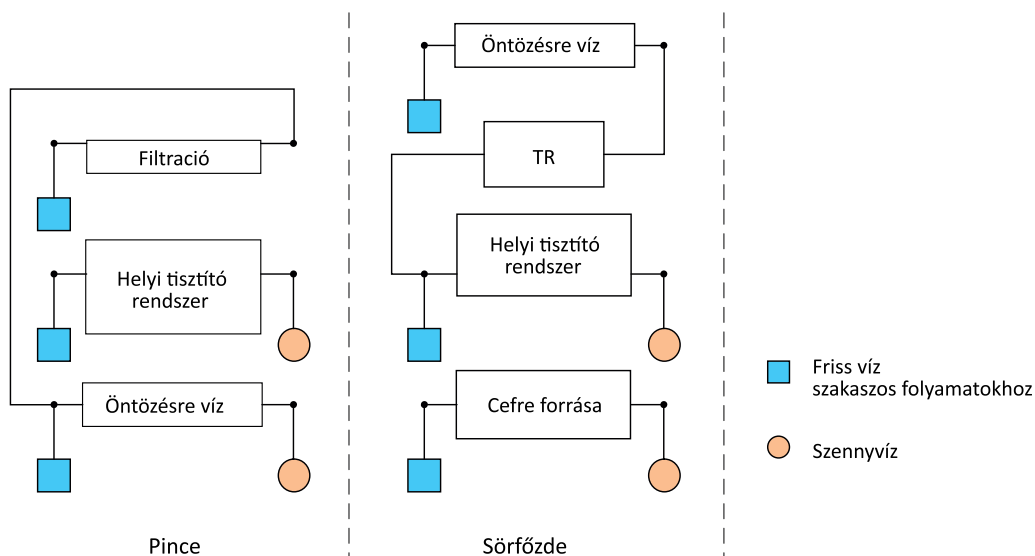
folyamatokban újrafelhasználható – alacsonyabb tisztasági követelményekkel. Ezért az alapvető megfogalmazás először a hatékony félfolyamatos és szakaszos vízfelhasználó folyamatok integrálását tette lehetővé.

A folyamatos szennyvizet úgy kezelik, mint korlátolt friss víz forrását, a nem felhasznált szennyvizet pedig kibocsátják. A következő lé-

pésben bővítették a modellt, figyelembe véve a köztes tartályok telepítésének a lehetőségét, a nem felhasznált szennyvízáramok gyűjtésére és későbbi újrafelhasználására – több további időintervallumban. Ezt a tervezési módosítást a töltősorok üzemeltetési ütemezése közti különbség motiválta. A víz újrafelhasználását és regenerációs felhasználását szolgáló szuperstruktúrát a 7.3. ábra mutatja be.



7.3. ábra: A víz újrafelhasználásának és újrahasznosításának a szuperstruktúrája a sörgárban (Tokos és Novak Pintarič nyomán, 2009)



7.4. ábra: A víz újrafelhasználási lehetőségei a sörgárban



A regenerációs újrafelhasználás lehetőségeit a sörfőző részlegben és a pincében elemeztük (lásd: 7.4. ábra), mivel ezekre a folyamatokra jellemző a szennyező anyag magas koncentrációja. Itt az alap modellt helyi (helyszíni) szennyvízkezelő egységgel bővítettük ki, amely szakaszos vagy folyamatos módban is működhet, ezzel lehetővé téve a víz regenerációs újrafelhasználását és újrahasznosítását. A szakaszos szennyvízkezelő egység ütemezése párhuzamosan zajlik annak érdekében, hogy a kezelés ütemezése egybeessen a rögzített szakaszos folyamatok ütemezésével. A tervezés magába foglalja a tárolótartályok telepítését a kezelés előtt és után, ezzel lehetővé téve a szennyvíz és/vagy tisztított víz tárolását a kezelés által meghatározott ütemterv alapján.

Amint Tokos és Novak Pintarič (2009) cikkében olvasható, a vízhálózat integrálása a csomagoló területen lehetővé tette a palackok öblítésénél keletkezett szennyvíz felhasználását a pasztörizálási folyamatokban. Ezáltal a friss víz használata 23%-kal csökkenthető, a közös friss víz és szennyvíz kezelési költségei pedig 22%-kal. Ezek a fejlesztések nem követelnek semmilyen tartályok hozzáadását. A nettó jelenérték az ajánlott vízhálózat átalakítására pozitív (15% leszámítolási kamatlábnál), és a megtérülési idő 0.29 év (kb. 15 hét).

A sörfőzde részlegben és a pincében a folyamatos vízkezelési egységet (nanoszűrés) választottuk ki a szennyvíz tisztítására az optimális vízhálózatba. A tisztítás lehetővé teszi a szakaszos folyamatból kibocsátott anyagban tartalmazott víz újrafelhasználását a helybeli tisztítási (clean-in-place, CIP) rendszerben, és a szűrésből a szennyvizet újra fel lehet használni – közvetlenül a szakaszos anyagok öntésénél. Összefoglalva: a friss víz felhasználást 28%-kal lehet csökkenteni és a hozzáfűződő friss víz és szennyvíz kezelési költségét 27.9 %-kal. A módosítás – amely 83 m<sup>2</sup> membrán

területet követel – beruházási költségeinek összege 117 205€. A nettó jelenérték az optimális vízhálózatnak pozitív 15 % leszámítolási kamatlábnál, és a megtérülési idő 1.3 év. A friss víz költségének jelentős befolyása van az optimális vízhálózatra. A költségek növelésének eredményeként további újrafelhasználási és regenerációs felhasználási lehetőségeket azonosítunk. A példák magukba foglalják: a nem-visszaváltható üvegek öblítésére és az üvegek mosására használt víz újrafelhasználását, a víz újrafelhasználását a pasztörözésnél és az üvegmosónál, és a regenerációs újrafelhasználást a cefre forralása és a CIP rendszer között.

A teljes javasolt tervezés megvalósításával a sörgyár a jelenlegi friss víz felhasználását kb. 25%-kal csökkenthetné, és 27%-kal a friss víz és szennyvíz közös kezelési költségét. Továbbá a sörgyár hányadosa a vízfelhasználás és eladott sör között 4.53 : 1-re csökkenthető (6.04 : 1-ről), ami fontos a vállalaton belüli tisztább termelés és fenntartható fejlődés szempontjából.

## 7.5. Összefoglaló

A víz a legtöbb ipari folyamatban használatos, az alkalmazása széleskörű. Manapság a vízfelhasználó ipari folyamatok és rendszerek – a szennyvízkezelés tekintetében – egyre szigorúbb környezetvédelmi előírásoknak vannak kitéve.

Ezen tendenciák üteme növelte a jobb vízgazdálkodásnak és a szennyvíz minimalizálásának a szükségességét. A víz minimalizálási technikák felhasználásával hatékonyan tudjuk csökkenteni a teljes friss vízigényt és a szennyvíz mennyiségét is. Ezek a csökkentések a friss vízellátás és szennyvízkezelés költségeinek a csökkentését eredményezik.



## 8 A megújuló energia integrálása

A CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentése a hőviszszanyerés maximalizálásával és a megújuló energiaforrások arányának a növelésével – az elsődleges energiamixben – érhető el. Ezt csak a keresleti oldal energiaigényének az optimalizálása után használjuk. A folyamatintegrálást fel lehet használni ennek elérésére, és a vizsgált rendszer hatékonyságának a maximálására. A folyamatintegráció egyik fontos fejlesztése a total site hőintegrálása (lásd: 2.3. fejezet), amely egyesíti az egyes folyamatok fűtés- és hűtésigényeit, így lehetővé téve a jobb integrációt. Jelen fejezet bemutatja a megújuló energiaforrások rövid besorolását, és az energiarendszerekbe történő integrálásukhoz kapcsolódó főbb kérdéseket.

### 8.1. Áttekintés

A valódi energiarendszerek – az ipari folyamatokat és a total site-okat is beleértve – a kínálati és a keresleti oldalon is változásoknak vannak kitéve. A változások típusa magába foglalja a rendszeres változásokat az energiahordozó terhelésében és tulajdonságaiban, amit mintáknak nevezünk, és a véletlen változásokat, átmeneti eltéréseket is, amiket ingadozásnak nevezünk. Az energiarendszerek tervezői is szembesülnek az energiaigény kielégítésének változó terhelési problémájával, továbbá a kívánt állandó minőség biztosításának problémájával, illetve az energiaforrás felhasználásának változó hozzáférhetőségével és minőségével.

A feladat másik fontos tulajdonsága a számos energiaforrás (fosszilis üzemanyag, nukleáris, biomassa, szél, nap stb.) kombinálása – számos energia felhasználóval (ipari, lakossági, nagy kereskedelmi létesítmények, szállodák, kórházak).

Egészen a közelmúltig a fosszilis üzemanyagok fölénye az ellátási oldalon fontos szabadsági fokot biztosított a változó energiaigény kezelésére. A megújuló energiaforrások megjelenésével és azzal a törekvéssel, hogy növeljék a részesedésüket az energiaellátási oldalon egyre fontosabb szerep jutott a hozzáférhetőség változékonyságának.

A megújuló források általában kis méretben állnak rendelkezésre – elosztva az adott területen. A rendelkezésre állásuk (a biomassa kivételével) általában jóval 100% alatt van. A forrás hozzáférése idővel és a hellyel jelentősen változik. Ezt a változó időjárási és földrajzi feltételek okozzák. A megújuló energiaforrások – az ellátásra és igényekre vonatkozó – változásai részben előre jelezhetőek és néhánynak állandó időbeli változási mintái vannak, pl. a napenergia esetében: nappal és éjjel. Más megújuló energiaforrás hozzáférése – mint pl. a szélből előállított energia – azonban már kevésbé jelezhető előre.



## 8.2. Az energiaigény és ellátás tulajdonságai

### 8.2.1. Energiaellátási források – besorolás

A felhasználók elsődleges energiaforrásai nagyjából két csoportba sorolhatók:

- **Fosszilis üzemanyagok.** Jelenleg uralják az energiapiacot. Minden szektorban fel lehet használni őket – lakossági, ipari üzemek és a szolgáltatói épületkomplexumok.
- **Napsugárzás.** Tárolni lehet a hőenergia hordozókban (víz, gőz, fagyálló, stb.) vagy villamosenergia-termelésre. A kettő kombinációja is lehetséges.
- **Szél.** Leginkább villamosenergia-termelésre használják – a jövőbeli hidrogéntermelés lehetőségével – a rövid távú kémiai energia tárolására.
- **Hulladék eredetű biomassza és energianövény biomassza.** Közvetlenül hasznosíthatóak a helyszínen a nagyobb felhasználónál, mint pl. ipari üzemek, épületkomplexumok, parasztgazdaságok és a távfűtési üzemekben.
- **Vízenergia.** A villamosenergia-termelésre használják. Ez azonban általában központilag, nagyszabású erőműként működik, a gáteken. Mikro-vízierőmű technológiák is rendelkezésre állnak, de ezek általában távolabbi helyszínekre alkalmasak – kevesebb integrált energia.
- **Geotermikus energia.** A kivitelezése a forrásnál, vagy ahhoz közel van elhelyezve. Kétféle kivitelezése létezik: a talaj fűtése vagy hűtése. Ha a geotermikus energia felhasználására hőszivattyúkat használnak, a legtöbb besorolás szerint még mindig megújuló energiaforrásról beszélünk.

### 8.2.2. Energia-felhasználó – besorolás

Az energiaigény változik a típus és az idő ütemezése függvényében. Az ipari üzem leggyakoribb igényei:

- fűtés nagy hőmérséklet tartományban 100°C-tól egészen 400°C-ig, egyes esetekben még magasabb, közel 1000°C-os hőmérsékletet is elérhet,
- hűtés 20°C-tól 50°C-ig hőmérséklet tartományban, és hűtés 0°C-tól 10°C-os hőmérséklet tartományban,
- fagyasztás, amely eléri a -100°C-ot, és alacsonyabb hőmérsékleteket.

A felhasználás egy különleges osztálya a mezőgazdaság és a mezőgazdasági termelés. E téren találhatók példák az alacsony potenciálú hulladékokra és a megújuló hőre az üvegházak igényeinek ellátására – pl. Kondili és Kaldellis (2006) munkája.

A lakóterületek (lakóházak és ezek komplexumai távfűtés esetén) mérsékelt hőmérsékletű igényekkel rendelkeznek: lakásfűtésre és meleg vízre, légkondicionálásra, közvetlen villamosenergia-felhasználásra a kivilágításra, főzésre, fagyasztásra és más háztartási gépekre, villamos energia a hőszivattyúkra.

A szolgáltatások és épületegyüttesek (szállodák, kórházak, iskolák és egyetemek, bankok, szórakoztató helyiségek, kormányzati komplexek) energiaigényei – az összetevők alapján – nagyon hasonlítanak a lakossági helyekhez. Néhány különleges tulajdonságuk:

- A hőigény egy része magasabb hőmérsékletű állományban lehet (90°C–150°C). Pl. a gőzt lehet használni a szállodákban főzésre, a kórházakban pedig az ágynemű és egyéb készülékek sterilizálására.
- A légkondicionáló használatának az aránya jelentősen magasabb lehet, mint a lakóterületeken.
- Az egy személyre eső speciális források

felhasználása a szolgáltató iparban (pl. szálloda, kórház) általában nagyobb, mint a lakóházakban a magasabb rezszi (az állandó kiegészítő szolgáltatások), az infrastruktúra és a teljesítőképesség miatt – pl. éttermek, bárok és szórakozási lehetőségek.

### 8.2.3. Az igények változása

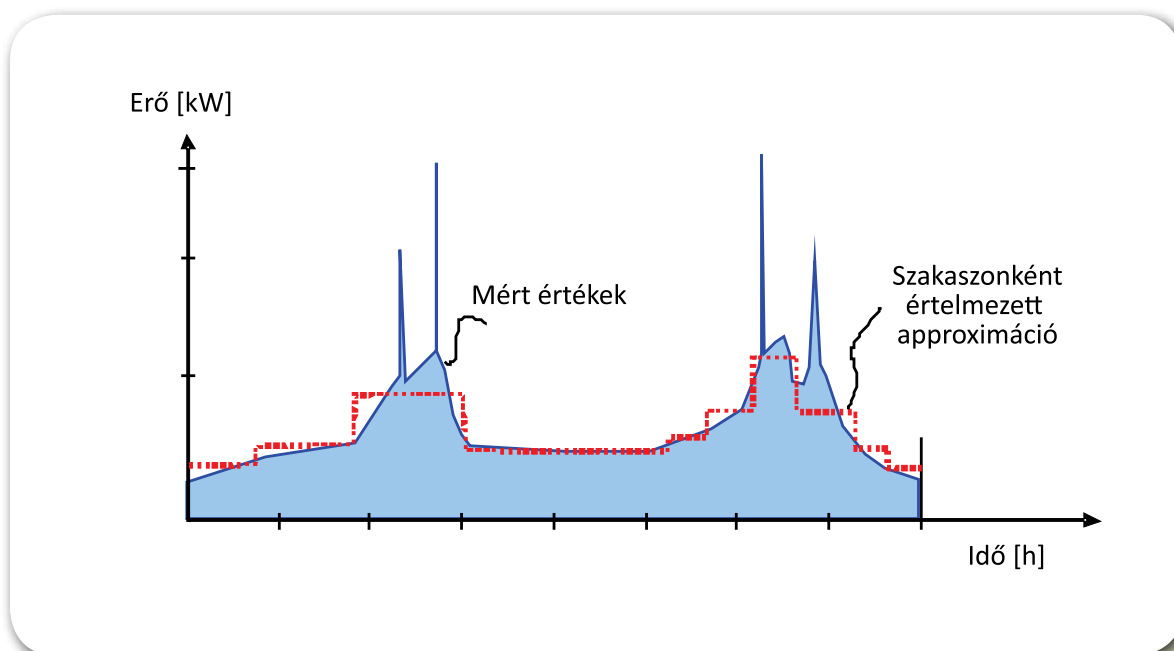
Az energiaigények változására vonatkozó példát egy tanulmány mutatja be, amely a lakossági energiafogyasztásról szól – a fűtés, a villamos energia és a meleg víz ingadozásait vizsgálja (Bance, 2008). Az eredmények két fajta trendet mutatnak: óránkénti variációk a nap folyamán, és az évszakonkénti variáció az év folyamán.

8.1. táblázat Az igény ingadozásainak a típusai

	<b>ház/lakás</b>	<b>Ipartelep</b>	<b>Szolgáltatási épületegyüttes</b>	<b>Gazdaságok/agrikultúra</b>
<b>Villamos energia</b>	csúcs/ kikapcsol	fő műszak/többi műszak, időszak/off időszak	nappal/éjjel néha kevesebb	nyár/tél
<b>fűtés</b>	tél/nyár	tél/nyár- időszak/off időszak	tél/nyár	tél/nyár
<b>hűtés</b>	nyár/tél	tél/nyár- időszak/off időszak	nyár/tél	nyár/tél
<b>légh kondicionálás</b>	főként nyáron	főként nyáron	főként nyáron, néha kevésbé előrejelezhető	nem alkalmazandó széles körben
<b>közvetlen tengely teljesítmény</b>	nem használatos	széles körben elterjedt, gőz- és gázturbina használata	nem jellemző	nem jellemző

A 8.1. ábra a tipikus villamosenergia-felhasználást ábrázolja, de a meleg víz használata ingadozása szorosan követi ezt a trendet. Az évszakos ingadozások viszonylag simák, a megnövekedett fűtési igény októbertől áprilisig jelentkezik.

Ez az ábra változó lehet különböző épületek, ipari telkek és mezőgazdasági területek közt. Hasonló a helyzet a szolgáltatás létesítményeiben, mint pl. a szállodákban és kórházakban, ahol az igények szintjei a kihasználtságtól és néhány kevésbé előrejelezhető tulajdonságtól is függnének. A 8.1. táblázat bemutatja a tipikus időszakos változásokat az energiaigényekben – különböző felhasználók számára.



8.1. ábra: Tipikus lakossági villamosenergia-igény 24 órás cikluson belül ( Bance nyomán, 2008)

#### 8.2.4. A megújuló energiaforrások változékonysága

A hatékony megújuló energia hasznosítására szükséges felmérni a teljes rendelkezésre álló megújuló energia időbeli ingadozását. Közülük néhányan a fosszilis üzemanyaghoz hasonló teljesítményt nyújtanak, és jól tárolhatóak a folyamatos energiatermelésre. Példa erre a biomassa, amelynek esetében az ellátás évszakonként változik, és a biohulladék rendelkezésre állásától függ. A megfelelő nagyságú tároló rendelkezésre bocsátásával azonban az energia állandóan biztosítható. A többi megújuló energiaforrások rendelkezésre állása – mint pl. szél és nap – gyorsabban változik, óránként vagy akár percenként.

A megújuló energiaforrások ingadozására két részletesebb tanulmányt tudunk bemutatni. Egyik az International Energy Agency (IEA, 2005) jelentése, amely a szélenergia-termeléssel, valamint más energiaforrás időszakosságával foglalkozik. Ez az energiaforrások változékonyságának az időszakok

elemzését nyújtja, a természetes variációs ciklusok alapján. Látható, hogy a rendelkezésre álló napenergia változhat, időszaktartománya lehet egy perctől egészen több évig. A második példa egy fejezet Von Bremen-től (2010), aki leírja a szél és napenergia rendelkezésre állását, és vizuális példákat is nyújt – ábrák formájában. Ez a fejezet kitér az ingadozásoknak a következményeire és a villamosenergia-mérleg stratégiáira, annak érdekében, hogy az igényeket ellássa.

Az ingadozások ezen típusa integrálási kihívást jelent ott, ahol a változások időtartama is változó. A biomasszára megadott példa esetében a feladat Time Slice modelljének időtartama hónapok vagy rövidebb pl. hetek lehetnek. A szél- és napenergia Time Slice tartama nyilvánvalóan rövidebb lesz (Nemet et al. 2012a). Ez a Dhole és Linnhoff (1993) által tervezett Total Site módszer bővítésének a szükségességét vonta maga után, amit Klemeš et al. (1997) kidolgozott a kogenerálásra, oly módon, hogy foglalkozzon a leírt változásokkal.

### 8.3. Az eszközök és megoldások követelményeinek a jellemzője

A fenti analízisből az energiarendszertervezés és működtetés néhány fontos követelménye azonosítható:

- Különböző energia-felhasználóknak kell megfelelni. A leginkább figyelemre méltó ügyfelek a nagy- és kisipari üzemek, lakóterületek, kereskedelmi és szolgáltatási létesítmények, valamint a potenciális mezőgazdasági komplexumok is.
- A megújuló energiaforrások integrálása stratégiai fontosságú: a CO<sub>2</sub> csökkentése és több ország külső energiafüggőségének csökkentése miatt.
- Kulcsfontosságú figyelembe venni az energiaellátás és igény változékonyságát. Számos eszközt lehet használni, mindegyik a tárolóval kapcsolatos.
- Egységes modellezési keret szükséges a hőforrásra és a hőelnyelésre – a hőtárolóval és nem-izotermikus segédközzel kombinálva.

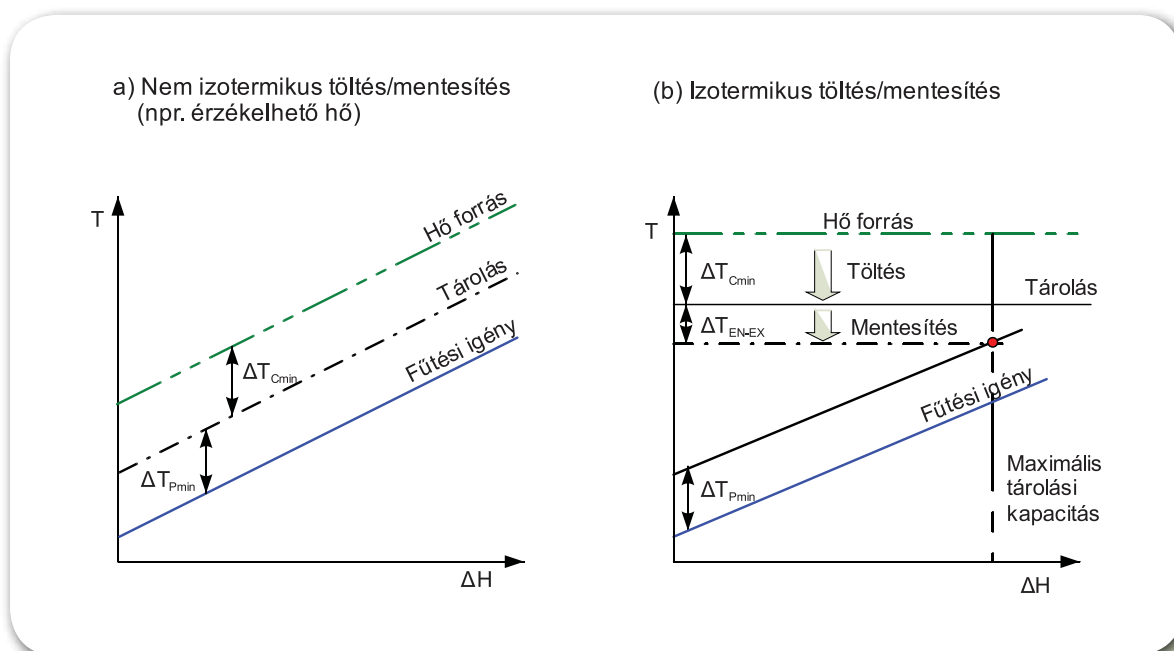
találunk. Ez a forrás több tároló típust tárgyal, ezek között van az érzékelhető hőtároló és a rejtett hőtároló. Az utóbbi a halmazállapotukat változtató anyagok (sók, parafin alapú anyagok, glikol polimerek) alapján működik. A forrás tartalmazza a visszafordítható kémiai reakciók alapján működő hőtárolókat is, különös tekintettel a só hidratálására/dehidratálására.

Az ipari hőintegrálást szolgáló energia-tárolót már korábban kutatták, jó példák erre a szakaszos folyamatok integrálásáról szóló cikkek – Kemp és Deakin (1989a): a munka létrehozza az alapfogalmakat és célzási eljárásokat; (1989b) a fejlett hőcserélő elemzése és az esettanulmány (1989c). Részletes jelentést a témában Klemeš et al. (1994) írt egy EU által támogatott kutatási projekt kapcsán. Ezek a források egy folyamat keretébe összpontosítanak. Feltárták az ún. Time Slice Model-t és a Time Average Model-t a szakaszos folyamatok hőintegrálására és a tárolók tulajdonságainak (hőmérsékletszint és teljesítmény) a kiválasztására.

### 8.4. Hőenergia-tároló

Az tároló használatának az ötlete – az energiaellátás és igény változékonyságának a ki-simítására, ezzel lehetővé téve a rendelkezésre álló hő későbbi felhasználását – nem új. A hő tárolásának számos módja létezik – fizikai, kémiai, és fizikai-kémiai alapelvek alapján. Az iparban használatos egyszerű, de hatékony technika az elosztó víztároló (stratified water tank), amelyet a hővisszanyerés körében használnak. Egy értékelést az ilyen elrendezésre egy tejporgyártó üzemben Atkins et al. (2010) mutatott be.

Átfogó áttekintést a hőtárolók különböző formáiról Huggins (2010) dokumentumában



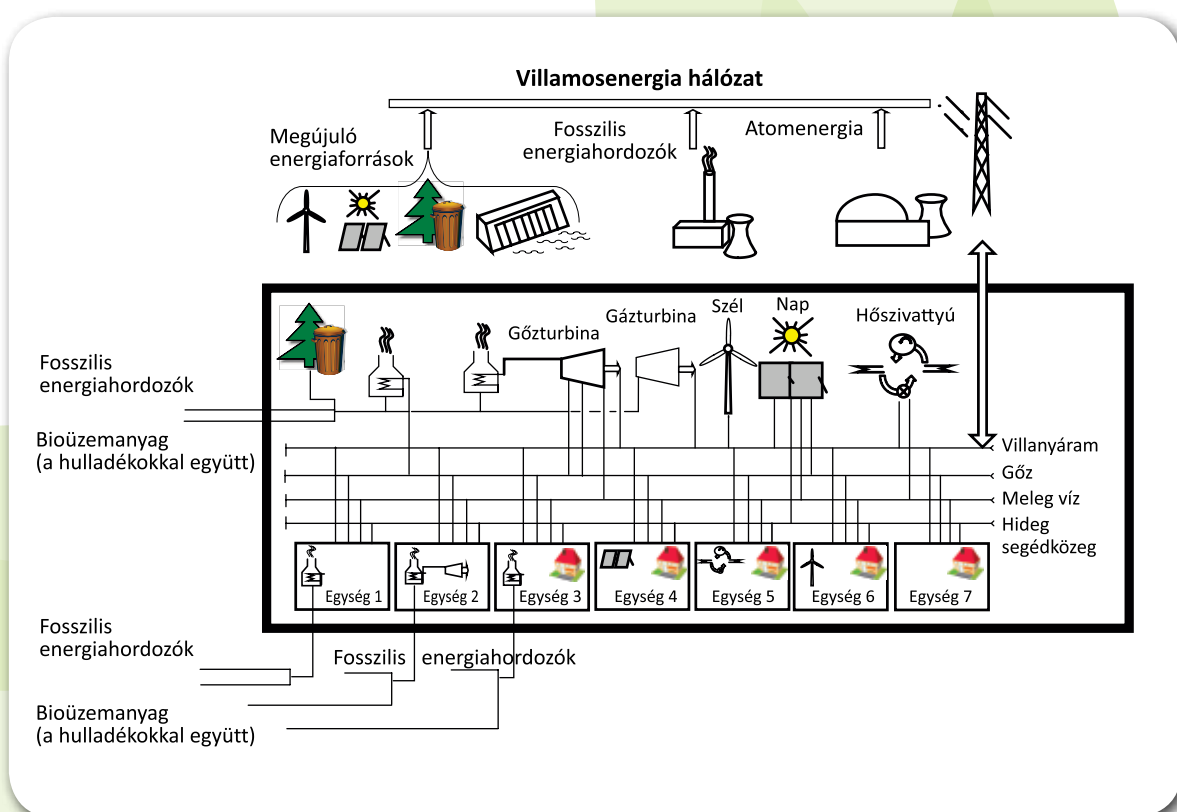
8.2. ábra: Tároló típusok a hőmérsékletváltozás alapján (Nemet et. al nyomán, 2012b)

Ezt a filozófiát – kibővítvé – felhasználták a total sitera. Ezt elsőként Perry et al. (2008) tette meg, aki az ipari típusú folyamatok mellett más típusú folyamatokat vezetett be a total site koncepcióba, valamint Varbanov és Klemeš (2011), aki egy teljes körű keretet biztosított a modellezés és a – Total Site segédközeg-rendszerében elhelyezett – hőtároló berendezések hőmérsékletszintjének és teljesítményének kiválasztására.

Annak ellenére, hogy különböző hőtároló módszerek és eszközök léteznek, a hőintegrálás céljának tekintetében két típusba sorolhatjuk be őket (Nemet et al. 2012b): azok a létesítmények közé, amelyeknél a hőmérséklet változik a töltés/ki-bocsátás közben, és azok közé, amelyeknél mindkét műveleti mód gyakorlatilag állandó hőmérsékleten van kivitelezve (8.2. ábra).

## 8.5. Az integrálás architektúrája

Az igények ingadozását figyelembe véve a megújuló energiaforrások rendelkezésre állása és egyidejűleg a hővisszanyerés maximalizálása érdekében a Total site integrálást kell használni, és ha szükséges, a hőtároló lehetőségét is fontolóra kell venni.



8.3. Helyileg integrált energiaszektor (Perry et al. nyomán, 2008)

A Dhole és Linnhoff (1993) által bemutatott, és Klemeš et al. (1997) által továbbfejlesztett hagyományos total site (a részletekért lásd a 2.3. fejezetet) csak ipari folyamatokat tartalmazott – a fűtés-, hűtés- és áramigényeivel, a segédközeg-rendszer gőzhálózatán keresztül (5.1. ábra). Ez a tudás néhány évtizeden át szolgálta az ipart, és hasznosnak bizonyult számos alkalmazásban.

Perry et al. (2008) kibővítette ezt a fogalmat azzal a javaslattal, hogy adják hozzá a lakóterületet és a szolgáltatásokra használt épületeket (kórházak, szállodák, irodák) – site folyamatokként, valamint vegyék figyelembe az alternatív energiaforrásokat (biomassza, szél, nap, talajhő), és átalakítási technológiákat (kisméretű kazánok, Stirling motorok, üzemanyagcellák, mikroturbinák, napkollektorok, fotovoltaiikus napelemek). Az így kapott architektúrát helyileg integrált energiaszektornak (8.3. ábra) nevezték el.

Ez a konceptuális bővítés lehetővé teszi a total site integrációs stratégiájának a felhasználását a helyi közösségeken, számos kisebb méretű egységek bevonásával – ezt helyileg integrált energiaszektorként ismerjük. Az energia-felhasználók és termelők típusainak bővítésével, valamint az átalakítási technológiák hozzáadásával lehetővé tesszük a különböző felhasználók és termelők időbeli mintáinak kombinálását, és a bennük rejlő potenciális eltérések simítását. Az elosztott energia- és hőtermelés a felhasználás területén – vagy annak közelében – lehetővé teszi a központi és elosztott termelés közötti kompromisszumot. Az utóbbi fontos elem, hiszen lehetővé teszi a legelőnyösebb elrendezést, amely figyelembe veszi az üzemanyag és energiatermékek (hő- és energiatermelés) szállítása során keletkezett energiaveszteségeket.





## 9 Referenciák

Ahmad S., Linnhoff B., Smith R., 1989. Supertargeting: Different process structures for different economics. *Journal of Energy Resources Technology*, 111(3), 131–136.

Ahmad S., Linnhoff B., Smith R., 1990. Cost optimum heat exchanger networks: 2. Targets and design for detailed capital cost models. *Computers & Chemical Engineering*, 14(7), 751–767.

Ahmad S., Smith R., 1989. Targets and design for minimum number of shells in heat exchanger networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 67(5), 481–494.

Alva-Argáez A., Kokossis A.C., Smith R., 1998. Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach. *Computers & Chemical Engineering*, 22, 741–744.

Asante N.D.K., Zhu X.X., 1997. An automated and interactive approach for heat exchanger network retrofit. *Chemical Engineering Research and Design*, 75(part A), 349–360.

Atkins M. J., Walmsley M. R. W., Neale J. R., 2010. The challenge of integrating non-continuous processes – milk powder plant case study. *Journal of Cleaner Production*, 18, 927–934.

Bagajewicz M., 2000. A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Computers & Chemical Engineering*, 24, 2093–2113.

Bance P., 2008. Residential-Scale Fuel Cell CHP: A Better Match for Domestic Loads, Cogeneration & On-Site Power Production, 9(3), <[www.cospp.com/display\\_article/330132/122/CRTIS/none/none/1/Residential-scale-fuel-cell-CHP-a-better-match-for-domestic-loads](http://www.cospp.com/display_article/330132/122/CRTIS/none/none/1/Residential-scale-fuel-cell-CHP-a-better-match-for-domestic-loads)> accessed on 04/07/2010.

Bandyopadhyay S., Ghanekar M.D., Pillai H.K., 2006. Process water management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 5287–5297.

BAT-CENTRE, 2009. Vito's Centre for Best Available Techniques <[www.emis.vito.be/vito%E2%80%99s-centre-best-available-techniques-bat-centre](http://www.emis.vito.be/vito%E2%80%99s-centre-best-available-techniques-bat-centre)> (accessed 30 April 2010).

Bochenek R., Jezowski J., Jezowska A., 1998. Retrofitting flexible heat exchanger networks—Optimization vs. sensitivity tables method. CHISA '98 / 1st Conference PRES '98 (Czech Society of Chemical Engineering, Prague), lecture F1.

Björk K.M., Westerlund T., 2002. Global optimization of heat exchanger network synthesis problems with and without the isothermal mixing assumption. *Computers & Chemical Engineering*, 26(11), 1581–1593.

BREF, 2006. Reference Document on Best Available Techniques in Food, Drink and Milk Industries (Seville, Spain). <[ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/fdm\\_bref\\_0806.pdf](http://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/fdm_bref_0806.pdf)> (accessed 26 December 2009).

CAPE, 2012. Working Party of Computer Aided Process Engineering, European Federation of Chemical Engineering. <[www.cape-wp.eu](http://www.cape-wp.eu)>, Accessed 29/10/2012.



Colberg R.D., Morari M., 1990. Area and capital cost targets for heat exchanger network synthesis with constrained matches and unequal heat transfer coefficients. *Computers & Chemical Engineering*, 14(1), 1–22.

Cerdá J., Galli M.R., 1990. Synthesis of flexible heat exchanger networks—II. Nonconvex networks with large temperature variations. *Computers & Chemical Engineering*, 14(2), 213–225.

CPI [Centre for Process Integration], 2004 and 2005. Heat integration and energy systems (MSc course, School of Engineering and Analytical Science, UMIST). Manchester, U.K.

Daichendt M.M., Grossmann I.E., 1997. Integration of hierarchical decomposition and mathematical programming for the synthesis of process flowsheets. *Computers & Chemical Engineering*, 22(1-2), 147–175.

De Benedetto L., Klemeš J., 2009. The environmental performance strategy map: An integrated LCA approach to support the strategic decision making process. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 900–906.

Dhole V.R., Linnhoff B., 1993. Total site targets for fuel, co-generation, emissions and cooling. *Computers & Chemical Engineering*, 17(Suppl.), 101–109.

Dupont D., Renzetti S., 1998. Water use in the Canadian food processing industry. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 46(1), 83–92.

El-Halwagi M.M., 1997. Pollution prevention through process integration: Systematic design tools. San Diego, CA: Academic Press.

El-Halwagi M.M., Gabriel F., Harell D., 2003 Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 4319–4328.

ENVIROWISE, 2009. <envirowise.gov.uk> (accessed on 4 November 2009).

EUROPA, 2012. EUROPA—Gateway to the European Union. <europa.eu>, Accessed 29/10/2012.

European Commission, DG Environment. 2000. Water Framework Directive (2000/60/EC). <ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index\_en.html> (accessed 10 December 2009).

European Commission [EC], 2009. Council Directive 96/61/EC of 24 September 1996 (concerning integrated pollution prevention and control). *Official Journal L 257*, 10 October 1996, pp. 0026–0040.

Frausto-Hernández S., Rico-Ramírez V., Jiménez-Gutiérrez A., Hernández-Castro S., 2003. MINLP synthesis of heat exchanger networks considering pressure drop effects. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8-9), 1143–1152.

Foo D.C.Y., Manan Z.A., Tan Y. L., 2005. Synthesis of maximum water recovery network for batch process systems. *Journal of Cleaner Production*, 13(15), 1381–1394.

Foo D., Tan R., Ng D.K.S., 2008. Carbon and footprint-constrained energy planning using cascade analysis technique. *Energy*, 33(10), 1480–1488.

Fahnich A., Mavrov V., Chmiel H., 1998. Membrane processes for water reuse in the food industry. *Desalination*, 119(1-3), 213–216.

Furman K.C., Sahinidis N.V., 2002. A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41, 2335–2370.

Gundersen T., 2000. A process integration primer—Implementing agreement on process integration. Trondheim, Norway: International Energy Agency, SINTEF Energy Research.

Hall S.G., Ahmad S., Smith R., 1990. Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings and exchanger types. *Computers & Chemical Engineering*, 14(3), 319–335.

Hallale N., 2002. A new graphical targeting method for water minimization. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 377–390.

Hoekstra A.Y., 2008. The value of water. Research Report Series, 28, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., 2007. Water footprints of nations. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48.

Hohmann E.C., 1971. Optimum networks for heat exchange. PhD thesis, University of Southern California, Los Angeles, USA.

Huang C.-H., Chang C.-T., Ling H.-C., Chang C.-C., 1999. A mathematical programming model for water usage and treatment network design. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(7), 2666–2679.

Huggins R. A., 2010. *Energy Storage*. Springer, New York, United States, ISBN: 978-1-4419-1023-3, DOI: 10.1007/978-1-4419-1024-0.

IEA, 2005. Variability of wind power and other renewables Management options and strategies. <[www.uwig.org/IEA\\_Report\\_on\\_variability.pdf](http://www.uwig.org/IEA_Report_on_variability.pdf)>, Accessed 12/08/2012.

Jegade F.O., Polley G.T., 1992. Capital cost targets for networks with non-uniform heat exchanger specifications. *Computers & Chemical Engineering*, 16(5), 477–495.

Kemp I.C., 2007. Pinch analysis and process integration. A user guide on process integration for efficient use of energy. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Kemp I.C., Deakin A.W., 1989a. The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes. Part 1: Calculation of Energy Targets. *Chemical Engineering Research and Design*, 67, 495–509.

Kemp I. C., Deakin A. W., 1989b. The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes. Part 3: Network Design and Process Scheduling. *Chemical Engineering Research and Design*, 67, 510–516.

Kemp I. C., Deakin A. W., 1989c. The Cascade Analysis for Energy and Process Integration of Batch Processes. Part 3: A Case Study. *Chemical Engineering Research and Design*, 67, 517 – 525.

Klemeš J., Linnhoff B., Kotjabasakis E., Zhelev T. K., Gremouti I., Kaliventzeff B., Heyen G., Marechal F., Lebon M., Puigjaner L., Espuña A., Graells M., Santos G., Prokopakis G.J., Ashton G. J., Murphy N., Paor de A. M., Kemp I.C., 1994. Design and Operation of Energy Efficient Batch Processes, Final Report, Commission of the European Communities. Brussels, Belgium.

Klemeš J., Dhole V.R., Raissi K., Perry S.J., Puigjaner L., 1997. Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO<sub>2</sub> on total sites. *Applied Thermal Engineering*, 7, 993–1003.

Klemeš J., Perry S., 2007a. Process optimisation to minimise energy use in food processing. In K. Waldron (Ed.), *Handbook of waste management and co-product recovery in food processing*, vol. 1, pp. 59–89. Cambridge, U.K.: Woodhead.

Klemeš J., Perry S., 2007b. Process optimisation to minimise water use and wastage. In K. Waldron (Ed.), *Waste management and co-product recovery in food processing*, vol. 1, pp. 90–118. Cambridge, U.K.: Woodhead

Klemeš J., Smith R., Kim J.-K. (Eds.), 2008. *Handbook of water and energy management in food processing*. Cambridge, UK: Woodhead.

Kondili E., Kaldellis J., K., 2006. Optimal Design of Geothermal–Solar Greenhouses for the Minimisation of Fossil Fuel Consumption, *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9), 905-915.

Laue, H.J., 2006. Heat pumps. In C. Clauser, T. Strobl, and F. Zunic (Eds.), *Renewable energy*, vol. 3C. Berlin, Germany, Springer.

Linnhoff B., Ahmad S., 1990. Cost optimum heat exchanger networks—1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. *Computers & Chemical Engineering*, 14(7), 729–750.

Linnhoff B., Flower J.R., 1978. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks. *AIChE Journal*, 24(4), 633–642.

Linnhoff B., Hindmarsh E., 1983. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 38(5), 745–763.

Linnhoff B., Mason D.R., Wardle I., 1979. Understanding Heat Exchanger Networks. *Computers & Chemical Engineering*, 3(1-4), 295-302.

Linnhoff B., Townsend D.W., Boland D., Hewitt G.F., Thomas B.E.A., Guy A.R., Marsland R.H., 1982. *A user guide on process integration for the efficient use of energy*. Rugby, U.K.: IChemE [revised edition published in 1994].

Linnhoff B., Vredeveld D.R., 1984. Pinch technology has come of age. *Chemical Engineering Progress*, 80(7), 33-40.

Manan Z.A., Foo C.Y., Tan Y.L., 2004. Targeting the minimum water flow rate using water cascade analysis technique. *AIChE Journal*, 50(12), 3169–3183.

Masso A.H., Rudd D.F., 1969. The synthesis of system designs II. Heuristic structuring. *AIChE Journal*, 15(1), 10–17.

Mavromatis S.P., Kokossis A.C., 1998. Conceptual optimisation of utility networks for operational variations—II. Network development and optimization. *Chemical Engineering Science*, 53(8), 1609–1630.

Nemet A., Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kravanja Z., 2012a. Methodology for maximising the use of renewables with variable availability. *Energy*, 44 (1) 29-37.


Nemet A., Kravanja Z., Klemeš J.J., 2012b. Integration of solar thermal energy into processes with heat demand. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14 (3), 453-463,

Prakash R., Shenoy U.V., 2005. Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations. *Chemical Engineering Science*, 60(1), 255–268.

PRES, 2012. Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction. <[www.conferencepres.com](http://www.conferencepres.com)>, Accessed 29/10/2012.

Raissi K., 1994. Total site integration. PhD thesis, UMIST, Manchester, UK.

Rašković P., 2006. Process integration approach for energy saving and pollution prevention in industrial plants.



French-Serbian European Summer University: Renewable Energy Sources and Environment-Multidisciplinary Aspect (Vrnjačka Banja, Serbia, 17–24 October).

Santos L.C., Zemp R.J., 2000. Energy and capital targets for constrained heat exchanger networks. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 17(4-7), 659–670.

Sargent R.W.H., 1979. Flowsheeting. *Computers & Chemical Engineering*, 3(1–4), 17–20.

Sargent R.W.H., 1983. Computers in chemical engineering—Challenges and constraints. *AIChE Symposium Series*, 79(235), 57–64.

Serna-González M., Jiménez-Gutiérrez A., Ponce-Ortega J.M., 2007. Targets for heat exchanger network synthesis with different heat transfer coefficients and non-uniform exchanger specifications. *Chemical Engineering Research and Design*, 85(10), 1447–1457.

Shah R.K., Sekulić D.P., 2003. *Fundamentals of heat exchanger design*. New York, USA: Wiley.

Shang Z., 2000, *Analysis and Optimisation of Total Site Utility Systems*. Ph.D. Thesis, UMIST, UK.

Shilling R.L., Bell K.J., Berhhagen P.M., Flynn T.M., Goldschmidt V.M., Hrnjak P.S., Standiford F.C., Timmerhaus K.D., 2008. Heat-transfer equipment. In D.W. Green and R.H. Perry (Eds.), *Perry's chemical engineers handbook*, 8th ed, chap. 11.. New York: McGraw-Hill.

Smith R., 2005. *Chemical process design and integration*, Chichester, UK: Wiley.

Smith R., Klemeš J., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Uliev L.M., 2000. *Foundations of heat processes integration*. Kharkiv, Ukraine: NTU KhPI (in Russian).

Smith R., Varbanov P., 2005, What's the Price of Steam?, *Chemical Engineering Progress*, 101(7): 29-33.

Soršak A., Kravanja Z., 2004. MINLP retrofit of heat exchanger networks comprising different exchanger types. *Computers & Chemical Engineering*, 28(1-2), 235–251.

Taal M., Bulatov I., Klemeš J., Stehlik P., 2003. Cost estimation and energy price forecast for economic evaluation of retrofit projects. *Applied Thermal Engineering*, 23, 1819–1835.

Tan R., Foo D.C.Y., 2007. Pinch analysis approach to carbon-constrained energy sector planning. *Energy*, 32(8), 1422–1429.

Ten Broeck H., 1944. Economic selection of exchanger sizes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(1), 64–67.

Thevendiraraj S., Klemeš J., Paz D., Aso G., Cardenas J., 2003. Water and wastewater minimisation study of a citrus plant. *Resources, Conservation and Recycling*, 37, 227–250.

Tokos H., Novak Pintarič Z., 2009. Synthesis of batch water network for a brewery plant. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1465–1479.

Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Arsenyeva O.P., 2004. *PHEs in industry*. Kharkiv, Ukraine: NTU KhPI (in Russian).

Townsend D.W., Linnhoff B., 1983. Heat and power networks in process design. Part II: Design procedure for equipment selection and process matching. *AIChE Journal*, 29(5), 748 – 771.

Townsend D.W., Linnhoff B., 1984. Surface area targets for heat exchanger networks. *ICHEME 11th Annual Research Meeting* (Bath, UK, April).

Umeda T., Harada T., Shiroko K.A., 1979. Thermodynamic approach to the synthesis of heat integration systems in chemical processes. *Computers & Chemical Engineering*, 3(1-4), 273–282.

Varbanov P., Doyle S., Smith R., 2004a. Modelling and optimization of utility systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(A5), 561–578.

Varbanov P., Klemeš J., 2011. Integration and Management of Renewables into Total Sites with Variable Supply and Demand. *Computers and Chemical Engineering*, 35(9), 1815-1826.

Varbanov P., Perry S., Makwana Y., Zhu X.X., Smith R., 2004b. Top-level analysis of site utility systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(A6), 784–795.

Von Bremen L., 2010. Large-Scale Variability of Weather Dependent Renewable Energy Sources. In: Troccoli A. (Ed.), *Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry*, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Weather/Climate Risk Management for the Energy Sector, Santa Maria di Leuca, Italy, 6-10 October 2008, Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry, Springer, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 978-90-481-3690-2, 189-206.

Wang Y.P., Smith R., 1994. Wastewater minimisation. *Chemical Engineering Science*, 49(7), 981–1006.

Wang Y.P., Smith R., 1995. Time pinch analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 73, 905–914.

Yee T.F., Grossmann I.E., 1990. Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 14(10), 1165–1184.

Zamora J.M., Grossmann I.E., 1998. A global MINLP optimization algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits. *Computers & Chemical Engineering*, 22(3), 367-384.

Zhu X.X., 1997. Automated design method for heat exchanger networks using block decomposition and heuristic rules. *Computers & Chemical Engineering*, 21(10), 1095–1104.

Zhu X.X., O'Neill B.K., Roach J.R., Wood R.M., 1995. Area-targeting methods for the direct synthesis of heat exchanger networks with unequal film coefficients. *Computers & Chemical Engineering*, 19(2), 223–239.

Zhu X.X., Zafir M., Klemeš J., 2000. Heat transfer enhancement for heat exchanger network retrofit. *Heat Transfer Engineering*, 21(2), 7–18.

