



**Országos Tudományos Diákköri
Konferencia
2013**



Desztillációs üzem rugalmasságának vizsgálata

Készítette: **Danics Nóra**

Szak: Vegyészmérnöki MSc

Évfolyam: II. évf.

Témavezető: **dr. Varga Zoltán**, Egyetemi docens

Pannon Egyetem

Mérnöki Kar, Vegyészmérnöki és Folyamatmérnöki Intézet, Mol Ásványolaj- és
Széntechnológiai Intézeti Tanszék

Készítés éve: 2012

Kivonat

A világ energiafelhasználásának öt százalékát a desztillációs műveletekkel történő szétválasztó eljárások teszik ki. Ennek megfelelően egy kőolajfinomító egyik legenergiaigényesebb technológiája a kőolaj atmoszférikus és vákuum desztillációja. A desztillációs üzemek energiahatékonyságának növelése érdekében arra törekednek, hogy minél kisebb energia befektetéssel tudják biztosítani a megfelelő termékminőségeket. Ebben segít az ún. pinch analízisen alapuló energiaintegrációs módszer, illetve a hozzátartozó hőcserélőhálózat tervező eljárás. Az energiaintegráció során a technológiai meleg áramok hőtartalmát a lehető legnagyobb mértékben érdemes felhasználni a kőolaj előmelegítésére, hiszen így csökkenthető leginkább a külső energia felhasználása, valamint ennek köszönhetően csökken az üzem károsanyag kibocsátása is.

A kőolajfinomítók egyik fontos tulajdonsága a rugalmasság, azaz, hogy különböző kőolajtípusok feldolgozására is alkalmasak legyenek. Ahhoz, hogy az eltérő alapanyagokból, kívánt minőségű elsődleges lepárlási termékeket állítsanak elő, az üzem hőcserélő hálózatának az adott kőolajok esetén képesnek kell lennie a megfelelő hőmérsékletprofil biztosítására. Az atmoszférikus- és vákuumdesztilláló üzem hőcserélőinek optimális kapcsolásával az eltérő kőolajtípusok esetén is az előírt termékminőségeket érhetjük el.

Az előadásban ismertetett kutatás célja, hogy folyamat szimulációs (PRO/II) programmal elkészített modell alapján különböző kőolajok esetén vizsgáljam az üzem optimális hőcserélő kapcsolatát az előírt termékminőségek biztosítására és a legkevesebb segédenergia felhasználásra törekedve. Bemutatom a szűkületi pont helyzetének alakulását az egyes esetekben, valamint vizsgálom, hogy azonos hőcserélő elrendezés esetén megfelelő módon előmelegíthetőek-e az eltérő típusú kőolajok.

Kulcsszavak: eltérő alapanyag, energiaintegráció, pinch analízis, szűkületi pont, optimális hőcserélőhálózat

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	1
2	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
2.1	HŐCSERÉLŐ HÁLÓZATOK SZINTÉZISÉNEK TERVEZÉSE	4
2.2	TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS	4
2.3	HŐCSERÉLŐ HÁLÓZATOK SZINTÉZISÉNEK TERVEZÉSI MÓDSZEREI	6
2.4	A SZÜKÜLETI PONT MEGHATÁROZÁSON ALAPULÓ HŐCSERÉLŐ HÁLÓZATTERVEZÉS ÉS ENNEK JELENTŐSÉGE	7
2.5	FLEXIBILIS HŐCSERÉLŐ HÁLÓZATOK	8
2.6	DESZTILLÁLÓ RENDSZEREK ENERGETIKAI JAVÍTÁSA	9
2.7	ENERGIAHATÉKONY MŰKÖDÉST ELŐSEGÍTŐ LEHETŐSÉGEK ÉRTÉKELÉSE	10
2.8	A PINCH ANALÍZIS KITERJESZTÉSE	11
2.9	AZ IRODALMI RÉSZ ÖSSZEFOGLALÁSA	12
3	ELMÉLETI RÉSZ	13
3.1	AZ ATMOSZFÉRIKUS ÉS VÁKUUM DESZTILLÁCIÓS ELJÁRÁS RÖVID BEMUTATÁSA	13
3.2	A KŐOLAJOK ÖSSZETÉTELE, JELLEMZŐI, CSOPORTOSÍTÁSA	17
3.3	AZ ENERGIAINTEGRÁCIÓ GYAKORLATI MEGVALÓSÍTÁSA	19
3.3.1	<i>A szűkületi hőmérséklet és a kompozitgörbék meghatározása</i>	19
3.3.2	<i>Hőcserélő hálózat tervezés</i>	23
4	GYAKORLATI RÉSZ	25
4.1	AZ ALKALMAZOTT KŐOLAJOK JELLEMZÉSE	25
4.2	A SZIMULÁCIÓS MODELL ISMERTETÉSE	26
4.2.1	<i>Kiindulási adatok, elvárt termékminőségek</i>	26
4.2.2	<i>A szimulációs modell bemutatása</i>	29
4.3	ENERGIAINTEGRÁCIÓ ÉS HŐCSERÉLŐ HÁLÓZAT TERVEZÉSE AZ ELTÉRŐ KŐOLAJ TÍPUSOK ESETÉN	32
4.3.1	<i>A REB típusú kőolaj feldolgozása esetén kapott eredmények</i>	34
4.3.2	<i>Az „A” típusú kőolaj feldolgozása esetén kapott eredmények</i>	45
5	A KAPOTT EREDMÉNYEK ELEMZÉSE, ÉRTÉKELÉSE	53
5.1	A FELHASZNÁLT KÜLSŐ ENERGIÁK MENNYISÉGE	53
5.2	A SZÜKSÉGES HŐCSERÉLŐ FELÜLETEK	54
5.3	ALKALMAZOTT HŐCSERÉLŐK SZÁMA	54
5.4	A SZÜKÜLETI PONT HELYE	55
5.5	A CSŐKEMENCÉK HŐIGÉNYE	55
5.6	A SZÉNDIOXID KIBOCSÁTÁS ALAKULÁSA	56
5.7	OPTIMÁLIS HŐCSERÉLŐ HÁLÓZAT KIALAKÍTÁSA	57
6	ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI CÉLKITŰZÉSEK	62

7	IRODALOMJEGYZÉK.....	63
	MELLÉKELTEK.....	65

1 Bevezetés

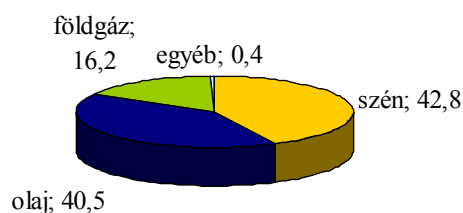
Napjainkban az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások, a gazdasági válság és az ebből is adódó növekvő energia árak következtében, egyre nagyobb figyelmet kell fordítani az energia hatékony működés javítására. Az Európai Tanács 2007 márciusában egy előremutató energetikai és környezetvédelmi programot határozott meg, amelynek keretében elkötelezte magát a „20-20-20” kezdeményezés mellett. Vállalta, hogy 2020-ig az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását 20%-kal csökkenti, az energiafelhasználáson belül a megújuló energiaforrások részarányát 20%-ra növeli, és a primerenergia-fogyasztást 20%-kal csökkenti. Az üvegházhatású gázok emissziójának csökkentése, valamint a megújuló energia részarányának növelése mind az energiahatékonyságot javítják. [1]

Az energiahatékonyság növelése a szénhidrogén feldolgozó ipar egyik kiemelkedő területe, hiszen ebben az iparágban jelentős kibocsátás csökkentés érhető el a megfelelő technikák alkalmazásával. Az 1. táblázatban a CO₂ kibocsátás változását tüntettem fel hazánkban, illetve az Európai Unió 27 tagállamában. Látható, hogy a kibocsátás jelentős része az olajiparhoz tartozik, ez is bizonyítja az energiahatékonyság növelésére irányuló kutatás, fejlesztés jelentőségét. A CO₂ kibocsátás megoszlásának változását a fosszilis energiahordozók feldolgozása során az 1. ábra szemlélteti, mind az EU-27, mind pedig Magyarország esetében.

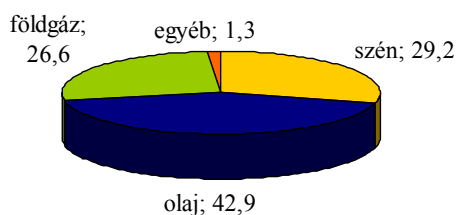
	1990	1995	2000	2005	2007	2008	2009	Változás
	Millió tonna CO₂ kibocsátás [2]							%
EU-27	4051,9	3847,5	3831,2	3978,9	3941,9	3868,2	3576,8	-11,7
Magyarország	66,7	57,3	54,2	56,4	54,1	53	48,2	-27,7
	Millió tonna CO₂ kibocsátás az olajiparban [2]							%
EU-27	1642,6	1672,5	1671,7	1698,6	1633,9	1623,9	1533,4	-6,6
Magyarország	22,7	19,8	17,3	16,8	17,7	17,2	17,2	-24,2

1. táblázat
A CO₂ kibocsátás alakulása az 1990-es évektől 2009-ig [2]

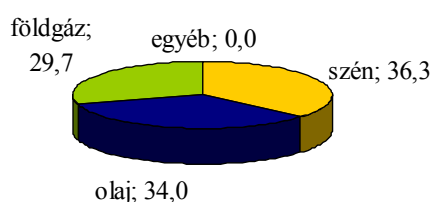
CO₂ kibocsátás % 1990-ben az EU-27 fosszilis energiahordozóinak feldolgozása során



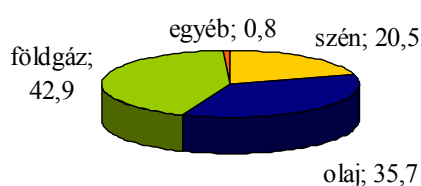
CO₂ kibocsátás % 2009-ben az EU-27 fosszilis energiahordozóinak feldolgozása során



CO₂ kibocsátás % 1990-ben Magyarországon fosszilis energiahordozók feldolgozása során



CO₂ kibocsátás % 2009-ben Magyarországon a fosszilis energiahordozók feldolgozása során



1. ábra

A fosszilis energiahordozók feldolgozása során bekövetkező CO₂ kibocsátás változása [2]

A kőolajfinomítók egyik fontos tulajdonsága a rugalmasság, azaz, hogy különböző kőolajtípusok feldolgozására is alkalmasak legyenek. A kőolaj só- és vízmentesítés után elsőként az atmoszférikus és vákuumdesztilláló üzemekbe kerül. Itt a kőolajat meghatározott forráspont tartományú szénhidrogén frakciókra választják szét. Az üzem műveleti paraméterei alapvetően meghatározzák a párlatok a főbb minőségi jellemzőit. Ahhoz, hogy különböző kőolajokból, kívánt minőségű elsődleges lepárlási termékeket állítsanak elő, az üzem hőcserélő hálózatának az adott kőolajok esetén képesnek kell lennie a megfelelő hőmérsékletprofil biztosítására. Az atmoszférikus és vákuumdesztilláló üzem hőcserélőinek optimális kapcsolásával az eltérő kőolajtípusok esetén is az előírt termékminőségeket érhetjük el.

Egy kőolajfinomító egyik legenergiaigényesebb technológiája a kőolaj atmoszférikus és vákuum desztillációja, ami nem meglepő, hiszen a világ energiafelhasználásának 5%-át a desztillációs műveletekkel történő szétválasztó eljárások adják.[3] Éppen ezért, ezen technológia hőcserélőinek és desztillációs oszlopainak energiaiintegrációjával, optimális hőcserélő hálózatának kialakításával a kívánt minőségű termékek mellett a finomító energia hatékonysága is javítható. Az hőcserélők integrációjával ugyanis csökkenthető a felhasznált segédenergia mennyisége, így a tüzelőanyagé is, ezáltal azonban a szennyezők kibocsátása is

jelentős mértékben csökken. A finomítók ilyen módon hozzájárulnak az Európai Unió energetikai- és környezetpolitikai célkitűzéseéhez. [3], [4], [5],[6]

TDK dolgozatom célja, hogy a PRO/II szimulációs programmal elkészített atmoszférikus és vákuumdesztilláló üzem modellje alapján különböző típusú kőolajok esetén vizsgáljam az üzem optimális hőcserélő kapcsolását a legkisebb segédenergia felhasználásra törekedve. Az egyes kőolajtípusok esetén kapott eredmények összehasonlító értékelését követően meghatározom az összes alternatívára nézve optimális hőcserélő kapcsolást.

Az elkészített szimulációs program a későbbiekben további kőolajtípusok esetén is alkalmazható lehet az üzem hőcserélő hálózatának vizsgálatára.

2 Irodalmi áttekintés

Az energiai integráció kialakulásának folyamata szervesen összefonódik az 1970-es évek elején bekövetkezett energiaválsággal. Ekkor ugyanis mind a zöldmezős beruházások, mind pedig a meglévő üzemek kapcsán egyaránt több figyelmet fordítottak az energiahatékony technológiatervezésre. Ennek keretén belül a legtöbbet tanulmányozott probléma a hőcserélő hálózatok optimális kapcsolásának vizsgálata lett. Az egyes technológiai rendszerekben a folyamathoz szükséges hőigényeket külső forrásokból elégítették ki. Ez az energiaválság hatására bekövetkező, rohamosan növekvő energiaárak miatt jelentős profitkiesést, veszteségeket okozott a vegyipari vállalatoknak. Ezért olyan megoldást kerestek, ami lehetőséget nyújt ezeknek a hőigényeknek technológián belüli kielégítésére gazdaságosan, és nem utolsósorban környezetbarát módon. A hőcserélő hálózatok szintézise kiválóan alkalmas a felvetett probléma megoldására. [7], [8], [9]

Ebben a fejezetben a történeti áttekintés után bemutatom a kialakult energiai integrációs módszereket, valamint a hőcserélők és desztillációs oszlopok integrálásának lehetőségeit.

2.1 Hőcserélő hálózatok szintézisének tervezése

Az üzemeltetési költségek legnagyobb részét a megfelelő energia biztosítása jelenti, így célszerű azt a lehető legnagyobb mértékben minimalizálni. Az energiai integráció, a hőcserélő hálózatok szintézisének tervezése során arra kell törekedni, hogy a technológiában szereplő áramok hőigényét minél inkább technológián belüli hőcserével valósítsák meg.

Az alábbiakban bemutatom miként és milyen módszerek alakultak ki az optimális hőcserélő kapcsolások tervezésére.

2.2 Történeti áttekintés

A hőcserélő hálózat szintézis tervezésének problémáját elsőként Ten Broeck fogalmazta meg 1944-ben. Ezt követően hosszas várakozás után csak az 1960-as évek második felében jelentek meg ezzel kapcsolatban újabb publikációk, amikor is különböző matematikai megközelítések fejlesztése kezdődött meg. Westbrook 1961-ben először alkalmazott matematikai programozást ezen a területen, majd 1965-ben Hwa elsőként alkalmazott szuperstruktúrás megközelítést. A hőcserélő hálózatok szintézisének korai vizsgálatai után 1969-ben Masso és Rudd voltak azok, akik egzaktul definiálták a problémát, ami a következő volt.

Egy technológiában adott:

- a technológiai meleg áramok (H) sora, amelyeket a belépő hőmérsékletükről le kell hűteni a kilépő hőmérsékletükre,
- a technológiai hideg áramok (C) sora, amelyeket a belépő hőmérsékletükről fel kell melegíteni a kilépő hőmérsékletükre,
- a technológiai meleg és hideg áramok hőkapacitása és térfogatárama,
- a segédenergia igények és ezeknek a segédenergiáknak az alkalmazhatósági hőmérséklete vagy hőmérséklet tartománya, illetőleg a költségeik,
- hőcserélők költség adatai.

A következő mérnököt Hohmann doktori disszertációjának egyik tézise jelentette, amelyben a Hohmann – Lockhart hőmérséklet-entalpia diagram, azaz a kompozit görbe alapján meg tudták határozni egy technológiai rendszer minimális segédenergia szükségletét. Ez a tézis nagyon jó alapot jelentett a továbbiakban. [9]

A legnagyobb áttörés az adott tématerületen Bodo Linnhoff és munkatársai nevéhez fűződik, akik 1978-ban meghatározták a szűkületi hőmérséklet, szűkületi pont (pinch pont) jelenségét. 1983-ban Linnhoff és Hindmarsh javasolták a pinch tervezési módszert (Pinch Design Method, PDM). Eközben a kitűzött céloknak megfelelően, a minimális segédenergia szükséglet meghatározására, az energia folyamaton belüli visszanyerésére a kezdeti matematikai formulákat is továbbfejlesztették. 1983-ban Papoulias és Grossmann által a probléma szekvenciális megközelítésére kifejlesztett matematikai modell lehetővé tette a minimális segédenergia szükséglet meghatározását csakúgy, mint Cerda és Westerberg módszere. [9]

1984-ben Linnhoff publikálta az első hőcserélő hálózat szintézist, 1986-ban pedig a hőcserélő hálózattervezés módszerét, aminek az alapját, az általa kialakított szűkületi pont meghatározás jelentette. Ezzel egy időben a matematikai alapon történő megközelítés is fejlődött, Floudas 1986-ban elsőként javasolt egy teljesen automatikus hőcserélő hálózattervező módszert, amit továbbfejlesztve 1989-ben Ciric-kel közösen publikált, mint szimultán hőcserélő hálózat tervező eljárás. [9]

Az 1990-es években az addig kifejlesztett módszerek, algoritmusok továbbgondolása, tökéletesítése zajlott le, illetve a korábbi modellek, elgondolások kombinációjaként újabb és újabb algoritmusokat készítettek. Ilyenek például a különböző lineáris programozáson, vagy az éppen nemlineáris programozáson alapuló megoldások. Ezek már optimalizálási

feladatként értelmezik a problémát, és számítási igényük az informatika jelen állása mellett már nem jelent megterhelést a számítógépeknek.

Fontos megemlíteni, hogy a pinch módszer kutatásában, fejlesztésében magyar professzorok is kiemelkedő szerepet töltöttek be, 1987-ben Rév Endre és Fonyó Zsolt azonosították a pseudo-pinch pontot. [9]

A legtöbbet tanulmányozott kérdéskör a hőcserélő hálózat szintézis (Heat Exchanger Network Synthesis, HENS) területén belül a flexibilitás, azaz a rugalmasság. Mivel az egyes üzemek nem állandó műveleti paraméter értékek mellett működnek, így az állandó értékekhez tervezett optimális hőcserélő kapcsolás mégsem tudja feltétel nélkül biztosítani az energiaiintegráció során kitűzött célokat. Marselle és munkatársai 1982-ben elsőként vezették be a rugalmas hőcserélő hálózatok fogalmát. Az általuk javasolt heurisztikus tervezési módszer figyelembe veszi a kiindulási hőmérsékletek és térfogatáramok változását. A rugalmas HENS tervezésében, algoritmizálhatóságának kifejlesztésében úttörő szerepet töltött be Grossmann. 1986-ban Floudas és Grossmann bevezették a több periódusú vegyes egészértékű lineáris programozású modellt (multi-period Mixed Integer Linear Programming, MILP). 2002-ben Aaltola egy szimultán több periódusú HEN tervező eljárást fejlesztett ki. Ilyen és ehhez hasonló modellek létrehozásával, fejlesztésével, továbbra is számos kutató foglalkozik, hiszen a flexibilis hőcserélő hálózatok kialakításával valósíthatók meg legnagyobb mértékben az energiaiintegráció célkitűzései. [7], [9], [10], [11]

2.3 Hőcserélő hálózatok szintézisének tervezési módszerei

Az első módszereket, ahogy már bemutattam, évtizedekkel ezelőtt publikálták, azóta számos tervezési stratégia alakult ki. A termodinamika törvényszerűségein és különböző heurisztikus szabályok kombinációján alapultak a korai fejlesztések. Később egyre több szisztematikus megközelítést dolgoztak ki a feladat elvégzésére, a pinch módszertől kezdve egészen a matematikai programozáson, vagy akár sztochasztikus alapú modellekig. A következőkben bemutatom a legjelentősebb hőcserélő hálózat tervező megoldásokat, amelyeket a vegyipar számos területén alkalmaznak.

A modellek fejlesztésében két fő irányvonal figyelhető meg. Az egyik a gyakorlati termodinamikai megközelítési mód, a másik pedig a matematikai, algoritmikus megoldások sora. Az évtizedes fejlesztések során azonban a két irányvonal mára már szinte összemosódott, így a matematikai alapon nyugvó modellek elengedhetetlen része a termodinamika, míg a termodinamikai megközelítések is algoritmizálhatóvá váltak. Mára a

legbonyolultabb technológiai rendszerek esetén is könnyedén elvégezhetők a számítások, anélkül, hogy az a pontosságot és a megbízhatóságot rontaná. [7], [8], [12]

2.4 A szűkületi pont meghatározáson alapuló hőcserélő hálózattervezés és ennek jelentősége

Az első szisztematikus módszert Hohmann vezette be 1971-ben, majd később Linnhoff és Flower finomított rajta, amit 1978-ban publikáltak. Meghatározták, hogy egy technológia esetében lehetséges olyan célok azonosítása, amelyekkel maximális energiavisszanyerés érhető el, miközben minimális számú hőcserélő berendezés alkalmazása szükséges. A pinch módszer manapság úgy ismeretes, mint egy termodinamikai eljárás, ami a termodinamika első és második főtételein alapszik.

A módszer célkitűzései adott minimális hőmérséklet különbség mellett a következők:

- minimális segédenergia felhasználás,
- minimális hőcserélő szám és felület,
- valamint minimális költség.

A pinch pont meghatározásán alapuló hőcserélő hálózattervezés két nagyobb egységre osztható, a szűkületi hőmérséklet meghatározására, majd a hőcserélő hálózat szintézisére. A szűkületi pont meghatározásához csupán a technológiai áramok hőmérséklet, hőkapacitás, és térfogatáram adatai szükségesek. Ezeknek az adatoknak a segítségével a hőmérséklet–entalpia diagramok, azaz a hideg és meleg áramok esetén a kompozit görbék, majd az összes technológiai áram esetén a nagy kompozit görbe meghatározása történik. Ezekről a diagramokról leolvasható a szükséges minimális segédenergia mennyisége, ami a hőcserélő hálózattervezés során kapott értékekkel összevethető, ellenőrizhető.

A szűkületi pont, szűkületi hőmérséklet meghatározása révén a kezdeti feladat két kisebb egységre bomlik, egy szűkületi pont alatti, és egy szűkületi pont feletti részre. Innentől kezdve grafikusan, ún. hálódiaagram segítségével végigvezethető a hőcserélő hálózat tervezése. A könnyű ábrázolhatóság jelentős mértékben hozzájárult a pinch módszer elterjedéséhez, hiszen világosan nyomon követhető benne minden változás, ami az energiahatékony működés megvalósításához szükséges. A hálózattervezés során az ún. szűkületi szabályok betartásával megtervezhető az optimális hőcserélő kapcsolás, ami a fenti célok megvalósulását teszi lehetővé.

A pinch analízis gyors és hatékony módszerként, rövid időn belül az ipari folyamatok tervezésének szerves részévé vált. Széles körben alkalmazzák többek között a petrolkémiai

iparban, a kőolajiparban, bioüzemanyagok előállítása során, valamint a cellulóz feldolgozó és papíriparban.

A módszer nagy előnye, hogy a számszerűen meghatározott szűkületi hőmérséklet és a minimális segédenergia szükséglet mellett grafikus ábrázolásával megkönnyíti a megértést. Az idővel kialakult matematikai modellek közül több szekvenciális megközelítés számára alapot jelentett a pinch módszer az egyes célkitűzések megvalósításában, mint például a minimális hőcserélő szám, vagy a minimális külső energiafelhasználás mennyiségének meghatározása során.

A pinch analízis hátránya, hogy figyelmen kívül hagyja a hőátadási együtthatókat, valamint, hogy feltételezi, hogy a kompozit görbék és a nagy kompozit görbe esetén is az összekötő szakaszok egyenesek, ami azt jelenti, hogy a hőáramnak állandónak kell lennie az egész hőmérséklet tartományban. Ugyancsak hátrányként említhető meg, hogy a módszer nem jelent garanciát arra, hogy az optimális megoldást találja meg, másrésről viszont egyszerűen alkalmazható, és még a nagyméretű HENS problémák is könnyen megoldhatók egy személyi számítógéppel.

Számos későbbi tervezési eljárásnak ez a módszer jelenti az alapját. A három legnagyobb jelentőségű ezek közül a pinch tervezési módszer (pinch design method, PDM), a kettős hőmérsékletű megközelítési módszer (dual-temperature approach method, DTAM) és a pszeudo-pinch módszer (pseudo-pinch design method, PPDM). Ezen túlmenően a rugalmas hőcserélő hálózatok optimális kapcsolásával foglalkozó legújabb technikák is gyakran a pinch módszer alapjaira épülve keresik az optimális megoldást. [4], [7], [9], [13]

2.5 Flexibilis hőcserélő hálózatok

Napjaink leginkább tanulmányozott problémájának megfelelően az alábbiakban röviden bemutatom a rugalmas hőcserélő hálózattervezés kialakulását, lehetőségeit.

Állandó műveleti paraméter értékek esetén mára már kiváló technikák állnak rendelkezésre a HEN problémák kezelésére. A műveleti paraméterekben bekövetkező változások azonban az állandó paraméterek mellett kialakított optimális hőcserélő kapcsolástól eltérő hálózat kialakítását teszik szükségessé. Éppen ezért egy jól megtervezett hőcserélő hálózat akkor tekinthető optimálisnak, ha az adott fix műveleti paraméter értékekben bekövetkezett bizonyos mértékű változásokat is képes úgy kezelni, hogy az egyes termékek továbbra is megfeleljenek a kitűzött minőségi előírásoknak.

A műveleti paraméterek megváltozásának két fő oka lehet. Első esetben például a külső környezeti feltételek vagy a nem megfelelő szabályozás okoz eltérést a paraméterekben,

második esetben pedig a működési körülményekben bekövetkező periodikus változások, vagy például az alapanyagváltás hatására alakulnak ki az eltérő értékek. A rugalmas hőcserélő hálózatok ezeknek a változásoknak a kezelését teszik lehetővé.

A rugalmasság fontosságát, ahogy már korábban bemutattam Marselle és munkatársai vetették fel elsőként. A hőcserélő hálózat rugalmasságának megítélésére Saboo és kollégái bevezették az RI (Resilience Index) mutatót, aminek segítségével különböző kapcsolások kvantitatív alapon összehasonlíthatók. A flexibilitási index bevezetése Swaney és Grossmann nevéhez fűződik, és az egyes paraméterekben bekövetkező maximális eltéréseket jelentik.

A szekvenciális és szimultán modellek esetén is történtek fejlesztések a flexibilitás kezelésére. Verheyen és Zhang modellje egy szuperstruktúra elvű MINLP modell, aminek az alapja a Grossmann és Yee által kidolgozott szuperstruktúra, melyet Aaltola több periódusú modellé formált át. Kotjabasakis és Linnhoff ún. érzékenységi táblázatok segítségével egy állandó értékű paraméterekre támaszkodó kiindulási állapot alapján próbálták megoldani a flexibilis hőcserélő hálózattervezés problémáját.

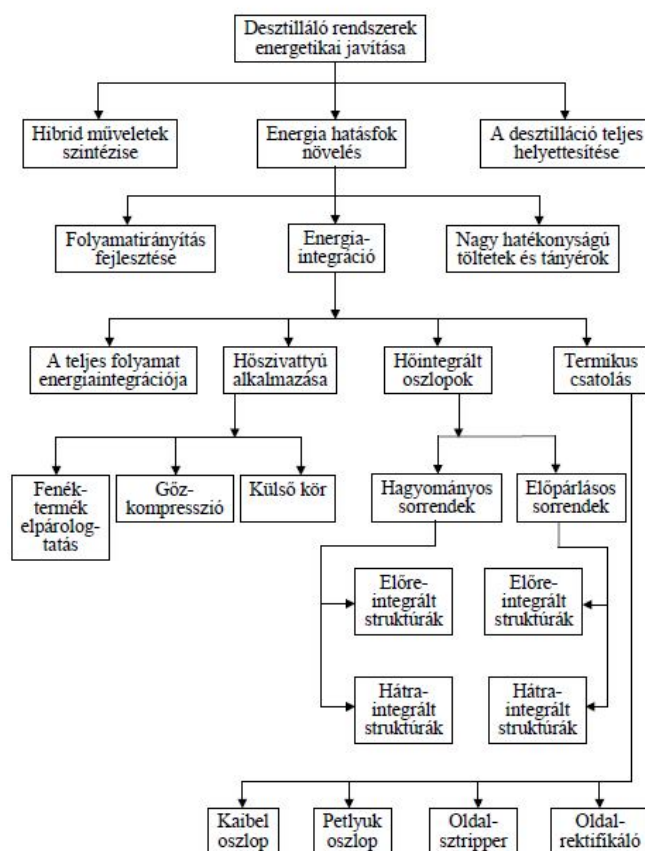
A HEN tervezés célja, hogy optimális és rugalmas hálózatokat hozzanak létre. Ez a szemléletmód tükröződik a több periódusos flexibilis hálózattervező eljárásokban. A legújabb megoldások komplex keverékei korábbi elképzeléseknek. Chen és Hung 2004-ben javasolt háromlépéses tervezési módszerében például Yee 1990-ben publikált szuperstruktúráját és Aaltola 2002-ben publikált matematikai formuláját is felhasználja flexibilis hőcserélő hálózat tervezéséhez. [7], [10], [12]

2.6 Desztilláló rendszerek energetikai javítása

TDK munkám során tulajdonképpen egy desztilláló üzem energetikai vizsgálatát kell elkészítenem, különböző alapanyagok feldolgozása mellett. Mivel a desztilláló kolonnák messze a legnagyobb energiafogyasztók a vegyiparban, ezért a rendszer hőcserélő hálózatának tervezésén túlmenően, az alábbiakban áttekintem a desztillációs rendszerek esetén alkalmazható energiahatékony működést elősegítő javítási lehetőségeket.

2.7 Energiahatékony működést elősegítő lehetőségek értékelése

A 2. ábra a desztilláló rendszerek energetikai javításának lehetséges megoldásait szemlélteti.



2. ábra
Desztilláló rendszerek energetikai javítása [14]

Az adott feladatot tekintve a desztilláló rendszer energetikai hatékonyságának javítására az energia hatásfok növelése jelenthet megoldást. Ezen belül a folyamatirányítás fejlesztése és a nagy hatékonyságú töltetek és tányérok alkalmazása valóban növelheti az oszlop, a rendszer hatékonyságát, azonban a legnagyobb változást az egész rendszer energiaintegrációjával érhetjük el. A másik két megoldás ezután lehetőséget biztosít az optimális kialakítás minden részletre kiterjedő tökéletesítésére.

A kőolaj atmoszférikus desztillációja során a hagyományos eljárás esetén egy oldal-sztrípperekkel ellátott főoszlopot alkalmaznak, így tulajdonképpen már az alap konstrukció is egy termikus csatolásnak felel meg. Magától értetődik, hogy a termikus csatolás alkalmazásával energiát lehet megtakarítani, azonban, bár ez a megoldás csökkenti a rendszer hűtési és fűtési igényeit, a hőmérséklet profilban bekövetkező degradáció és a velejáró hővisszanyerési lehetőségek csökkenése összességében nézve akár nagyobb üzemeltetési költséghez is vezethet.

Az oldal-sztripperek mellett ma már a főtorony esetén ún. cirkulációs refluxokat is alkalmaznak. Ezek olyan közvetlen hőcserélőként definiálhatók, amiknek a segítségével egy desztilláló kolonna esetén biztosítható a megfelelő hőmérsékletprofil és így az elérendő termékminőség is szabályozható. Energetikai szempontból a cirkulációs refluxok alkalmazása előnyös, hiszen a folyadékok lehűlése révén a keletkezett hőmennyiség az energiaiintegráció során felhasználható.

A felosztásban látható Petlyuk- és Kaibel-oszlop a feladatomból szempontjából irreleváns, hiszen a Petlyuk-oszloppal három, a Kaibel-oszloppal pedig négy frakcióra vágjuk a feldolgozandó elegyet.

A hőintegrált oszlopok esetét tekintve a legtöbb kőolaj desztilláló üzem ma már tartalmaz elő- vagy akár utófrakcionáló egységet.

A meglehetősen nagy beruházási költségek és bonyolult üzemeltetés miatt hőszivattyú alkalmazása abban az esetben indokolt csupán, ha egyéb egyszerűbb megoldásokkal már nem lehet növelni az energiahatékonyságot, illetve ha a fej- és fenéktermék forráspontja közel esik egymáshoz, mint például a propán-propilén szplitterek esetében.

A felvázolt lehetőségek közül a teljes folyamat energiaiintegrációja maradt hátra. Ennek lényege, hogy a desztillációs oszlopot és a hőcserélő sort energetikai szempontból együttesen kezeljük, azaz a hőcserélő hálózat tervezés során a kondenzátorok, a visszaforrálók, a cirkulációs refluxok illetve az oldal-sztripperek esetén alkalmazott sztripp gőzök hőtartalmát, hőigényét egyszerre vizsgáljuk az egyes hőcserélő egységekkel. [3], [6], [14], [15], [16], [17], [18]

2.8 A pinch analízis kiterjesztése

Az energiahatékonyság növelése az ipar minden területén kiemelkedő fontosságú. Ahogy azt korábban már bemutattam a hőcserélő hálózatok tervezése során két fő megközelítésmód fejlődött, a matematikai és a termodinamikai. Ezek kölcsönösen hatást gyakorolnak egymásra, hiszen mindkét nézőpont számos előnnyel bír. A pinch módszer széleskörű elterjedését annak egyszerűsége, átláthatósága és nem utolsósorban vizuális megjelenítési módszere tette lehetővé. Éppen ezért alternatív területeken kezdték el alkalmazni a pinch analízist, ami így ma már a hőcserélő hálózatok tervezésén túl számos más ipari probléma kezelésére nyújt lehetőséget.

A víz- illetve szennyvíz rendszereket már 1989-ben vizsgálta El-Halwagi és Manousiouthakis, valamint 1995-ben ugyancsak ezzel foglalkozott Wang és Smith. 1997-ben Klemes és munkatársai már olyan rendszert vizsgáltak a pinch módszer segítségével, ahol a

hő és teljesítmény adatokat együttesen kezelték. Oxigén áramok esetére 1999-ben Zhelev és Ntlahana, majd 2002-ben Zhelev; hidrogén áramok esetére pedig ugyancsak 2002-ben Alves és Towler publikált megfelelő módszert. A legnagyobb jelentőséggel talán a hidrogén áramok estén, valamint a víz- és szennyvíz kezelés területén alkalmazott eljárások rendelkeznek. [19], [20]

2.9 Az irodalmi rész összefoglalása

Az irodalmi áttekintés alapján elmondható, hogy a hőcserélő hálózatok szintézisében a legnagyobb jelentősége a pinch analízisnek van. Láthattuk, hogy az első problémafelvetéstől kezdve ennek a módszernek a megjelenésével a további fejlesztések, mind eköré az eljárás köré épültek, legyen szó a termodinamikai vagy a matematikai megközelítésről. A kőolajiparban a legtöbb mai hálózattervező szoftver valamilyen módon a pinch analízisen alapszik, hiszen a gyors, átlátható grafikus megjelenítés, mindig is sokat számít a különböző értékelések során. Jelentőségét mi sem bizonyítja jobban, mint a kiterjesztett alkalmazások megjelenése, ugyanis ezek még jobban ösztönzik a fejlesztőket a már meglévő módszerek tökéletesítésére.

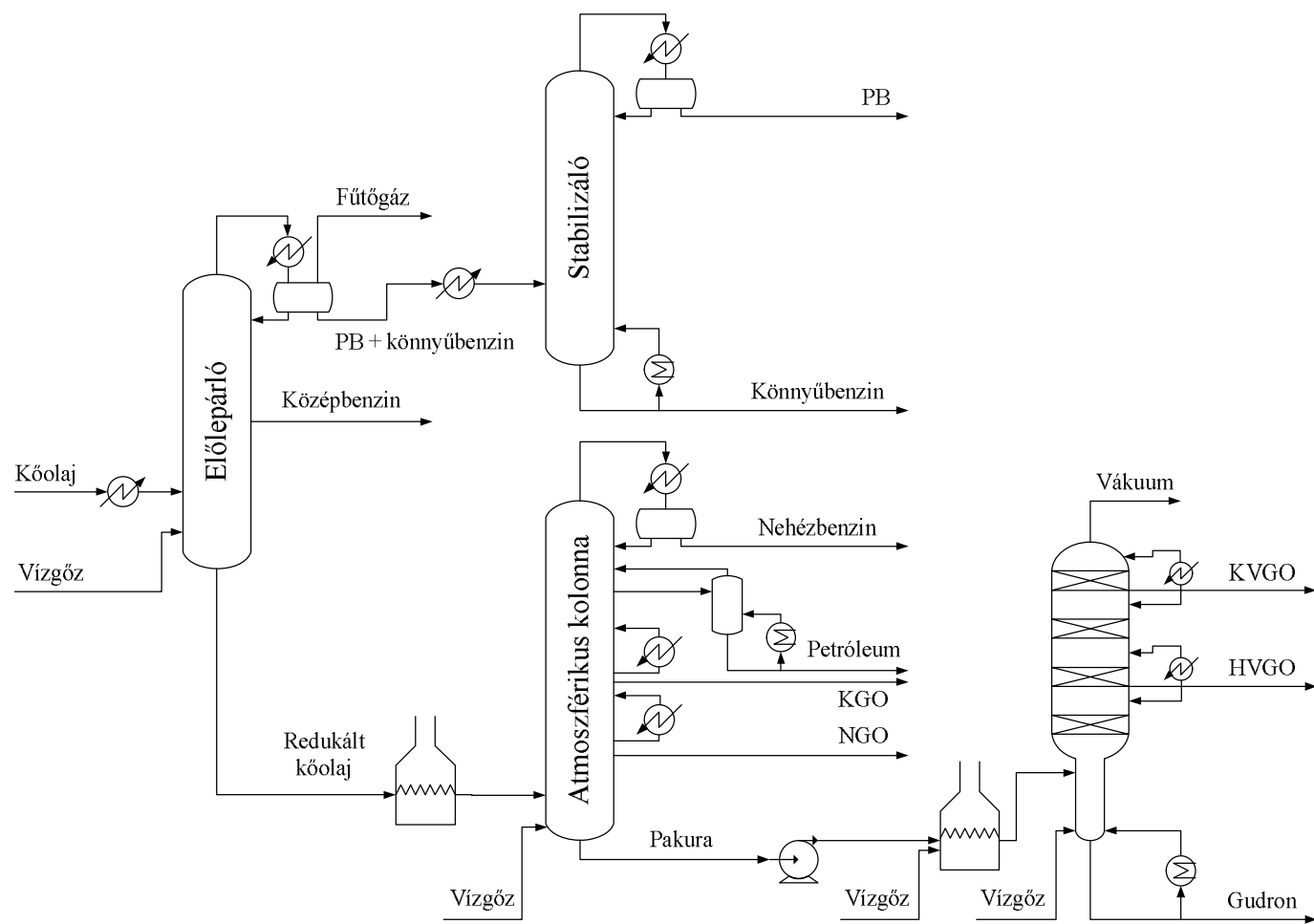
3 Elméleti rész

Ebben a fejezetben a gyakorlati részhez szükséges ismereteket mutatom be, azaz ismertetem a kőolaj feldolgozás első és legfontosabb műveletét az atmoszférikus és vákuum desztillációs eljárást, a kőolajok fajtáit és csoportosítási lehetőségeit, valamint a pinch analízis lépéseit.

3.1 Az atmoszférikus és vákuum desztillációs eljárás rövid bemutatása

A kőolaj atmoszférikus és vákuum desztillációja igen összetett eljárás, amelynek kialakulása szorosan összefügg a kőolajfinomítók születésével, ugyanis az első finomítók csupán egy kőolajdesztilláló üzemet foglaltak magukba. Idővel megjelentek a kőolajok só- és vízmentesítő technológiái. Ezek jelentősége abban rejlik, hogy megóvják az utánuk következő műveleti egységeket a lerakódásoktól, eltömődésektől, nagymértékű korróziós problémáktól. A desztillációs technológia fejlődésének köszönhetően ma már igen komplex üzemként vannak jelen a kőolajfinomítóknak. Míg a kezdeti időkben csupán a megfelelő kemencéből és desztilláló oszlopból álló üzemként működtek, addig mára már számos kiegészítő műveletet foglalnak magukba a megfelelő elválasztás biztosítása érdekében.

A só- és vízmentesített kőolaj feldolgozásának első lépése a kőolajfinomítóban az atmoszférikus és vákuum desztilláció. A kőolajat több frakcióra, meghatározott forrásponttartományú szénhidrogénelegyekre választják szét légköri, majd az alatti nyomáson. Egy tipikus kőolaj desztillációs üzemet mutat az 3. ábra.



3. ábra
Általános kőolaj feldolgozó atmoszférikus és vákuum desztillációs üzem elvi vázlata

A kőolaj rendszerint környezeti hőmérsékleten érkezik a tárolótartályok felől. Ezt egy hőcserélősoron előmelegítik 100-130 °C-ra, majd a só- és vízmentesítő üzemszobába kerül feldolgozásra. A sóban és vízben elszegényített nyersolaj a hőcserélő rendszer további részén előmelegszik és kb. 200-230 °C-on és 4-6 bar nyomáson belép az előlepárló oszlopba. Az előmelegítés során alkalmazott hőcserélőkben a kőolaj felmelegítése a termékek hőtartalmának hasznosításával történik. Az előlepárló kolonnában a könnyű szénhidrogének (gázok, könnyű- és középbenzin) elválasztása történik a redukált kőolajtól, sztrippgőz bevezetésével az oszlop aljára. A fejtermékként elválasztott könnyű termékek közül a szárazgázt fűtőgázként hasznosítják, míg a folyékony szénhidrogének stabilizálás céljából melegítés és nyomásnövelés után a stabilizáló kolonnába lépnek. Itt fejtermékként cseppfolyós PB, fenéktermékként pedig stabilizált könnyűbenzin keletkezik. Az előlepárló kolonnában lehetőség van oldaltermékként középbenzin elválasztására is, amennyiben ez a finomítói konfiguráció alapján indokolt.

A redukált kőolaj 200 °C körüli hőmérsékleten távozik az előlepárló oszlop alján. Ezt követően csökemencében felmelegítik, ahol a hóbomlás (krakkolódás) elkerülése érdekében legfeljebb 350-370 °C-ig melegítik. Innen 1-2 bar nyomással az atmoszférikus nyomáson működő főlepárló kolonna alsó, evaporációs zónájába lép be. Az oszlop általában 30-50 elméleti egységet tartalmaz és 4-8 termék előállítására alkalmas az alapanyagból. A redukált kőolaj egy része a betáplálás helyén elpárolog, míg a másik része az elgőzölögtető térből a desztillációs kolonna alsó részébe jut.

A gőzök a torony frakcionáló részében felfelé haladnak, és közben nagyobb forráspontú komponenseik a lefelé csorgó folyadék (reflux) hatására fokozatosan kondenzálódnak. Az oszlop tetején a legkisebb forráspontú komponensek gőzhalmazállapotban távoznak. Kondenzáltatás, majd a kapott folyadék és gázválasztása után kapják az esetlegesen visszamaradt C3-C4 gázokat és a nehézbenzint. Oldaltermékként az egyre növekvő forrásponttartományba eső petróleumot és különböző gázolajfrakciókat, könnyű- és nehézgázolajat nyernek ki. (Amennyiben az üzemben nincs előlepárló oszlop, úgy a főlepárló fejtermékei a gázok, illetve folyadékként a könnyűbenzin. Ekkor az oldaltermékek között elsőként a benzin forrásponttartományba eső közép- és nehézbenzin frakciókat választják el.)

Egy tipikus kőolaj desztilláló kolonna esetén az oldaltermékként elvett frakciók kezdő forráspontjának beállítására különböző megoldásokat alkalmaznak. Ez történhet közvetlen hőközléssel, oldal-sztripperek vagy közvetett hőközléssel, kiforralók alkalmazásával. Az

egyes termékek ezután kerülnek a szivattyúhoz, amelyek a termékeket hőcserélőkön és hűtőkön át kitárolják.

Az atmoszférikus desztilláció fenékterméke, maradéka a pakura, amely 300-320 °C-on lép ki a torony aljáról. Ebből vagy vákuumdesztillációval különböző kenőolaj- vagy szélespárlatokat, vagy krakkoló eljárások során fehérárkat állítanak elő. Esetünkben az előbbi módon dolgozzák fel a pakurát. [5], [16], [18]

A vákuumdesztilláció során atmoszférikusnál kisebb nyomáson végzett lepárlásról beszélünk, ahol a pakurából akár motorhajtóanyag gyártás, akár kenőolaj gyártás céljából további értékes alapanyagok állíthatók elő. Az alacsonyabb nyomás révén forráspontcsökkenés érhető el, ami így lehetővé teszi a pakura hőbomlása nélküli feldolgozását, magasabb hőmérsékleten. Ennek köszönhetően az alapanyag egyes komponensei, molekulatömegük és szerkezetük megváltoztatása nélkül, forráspontjuknak megfelelő párlatokba kerülhetnek.

A pakurát csökemencében 400 °C körüli hőmérsékletre melegítik és így vezetik be a vákuumkolonna evaporációs terébe. Itt hasonló folyamatok mennek végbe, mint az atmoszférikus kolonnában, ugyancsak gőz bevezetésével segítik a gőz-folyadék szétválasztását az elgőzölögtető térben. A vákuum előállításához a vákuum desztillációs oszlop fejtermékét egy kondenzátoron vezetik át, ahol a szénhidrogének kondenzálódnak. A továbbáramló gázokat egy barometrikus, vízzel hűtött kondenzátorba vezetik, ahol a vízgőz kondenzál és ezzel az adott hőmérsékleten víz gőztenzióinak megfelelő nyomás alakul ki. Ez általában 40-50 Hgmm. A nem kondenzálódó gázok eltávolítása sorba kapcsolt gőzsugár-ejektorokkal és kapcsolódó vízgyűrűs vákuumszivattyúkkal történik.

A kőolajfinomító konfigurációjától, illetve a feldolgozott kőolaj minőségétől függően eltérő termékstruktúrájú vákuumoszlopokat különböztethetünk meg. Ezek lehetnek olajpárlatokat, illetve a szélespárlatokat előállító üzemek. Az előbbinél a kenőolaj- és motorolajgyártás céljából alkalmazzák a vákuum desztillációt, míg az utóbbi esetben a motorhajtóanyag gyártás számára állítják elő az egyes párlatokat. A vákuum desztilláció legkönnyebb terméke a vákuumgázolaj. Emellett szélespárlat üzemmódban csupán egy vagy két nehezebb szélespárlatot vesznek el, míg kenőolajgyártás esetén további 3-4 oldalpárlat elvételére is van lehetőség.

A vákuumdesztilláció maradéka a gudron, kb. 230-270 °C-on távozik a kolonna alján. Ezt fűtőolajként értékesítik, vagy különböző maradékfeldolgozó technológiák során még bizonyos értékes komponenseit ki tudják nyerni. [5], [16]

3.2 A kőolajok összetétele, jellemzői, csoportosítása

A kőolaj a nagy nyomás, magas hőmérséklet hatására, levegőtől elzárt körülmények között a szerves anyagok bomlástermékeiből alakult ki. A kőolaj a tektonikai mozgások, a földkéreg átalakulásának következtében porózusabb kőzetekbe vándorolt. Ez a mozgás általában fölfelé irányult és akkor állt le, amikor az olaj a föld felszínére került, vagy egy tömör rétegen már nem tudott átszivárogni, így csapdába került. A biológiai eredetű szerves anyag bomlásakor széndioxid és metángáz keletkezik. Így a kőolaj és a földgáz (metán, széndioxid és könnyű szénhidrogének keveréke) gyakran együtt fordul elő.

A kőolaj szénhidrogének és heteroatomokat tartalmazó vegyületek komplex elegye. A kőolajban található egyedi vegyületek száma igen nagy, valószínűleg legalább ezres nagyságrendű. Részletes, egyedi vegyületekre lebontott elemzése még a mai, korszerű analitikai módszerekkel is csak a kb. 250 °C-ig forró frakciókkal bezárólag lehetséges, a nehezebb párlatok esetében csoportelemzések és félempirikus vizsgálatok végezhetőek, de gyakorlati szempontból ezek is megfelelnek a kőolajok jellemzésére.

A kőolaj jellemző elemi összetételét tömegszázalékban kifejezve a 2. táblázat foglaltam össze. Ezek az értékek a lelőhelyektől nagymértékben függenek.

A kőolajok jellemző összetétele, %	
Szén	83,0 – 87,0
Hidrogén	10,0 – 14,0
Kén	0,05 - 6,0
Nitrogén	0,1 – 2,0
Oxigén	0,05 – 1,5
Fémek (Ni és V)	<1000mg/kg

2. táblázat
A kőolajok elemi összetétele

A szénhidrogén csoportokat tekintve a kőolajok a következő csoportokat tartalmazzák:

- paraffinok: kb. 70 szénatomszámig normál- és izoparaffin vegyületek egyaránt;
- cikloparaffinok, naftének: telített egygyűrűs vegyületek és alkilszármazékaik, valamint kondenzáltgyűrűs vegyületek és alkilszármazékaik;
- aromások: egygyűrűs és többgyűrűs vegyületek, valamint azok alkilszármazékai;
- aszfaltének: gyanták szintén aromás jellegű vegyületek, amelyek feldolgozás során a vákuum maradékban koncentrálnak.

A kőolajokban olefin szénhidrogének, vagyis kettős kötést tartalmazó, nyílt láncú telítetlen szénhidrogének gyakorlatilag nem találhatóak, acetilén szénhidrogének, vagyis

hármaskötést tartalmazó szénhidrogének pedig még nyomokban sem fordulnak elő. Az egyes kőolajipari termékekben található nyíltláncú telítetlen szénhidrogén vegyületek a kőolajfeldolgozás során keletkeznek.

Heteroatomot tartalmazó vegyületek a kőolajokban:

- kénvegyületek: savas jellegűek (pl.: tiolok vagy merkaptánok), nem savas jellegűek (pl.: szulfidok, diszulfidok, tiofének);
- nitrogénvegyületek: kevésbé bázikusak (pl.: pirrol, indol), erősen bázikusak (pl.: piridin), porfirin típusú fémkomplexek (Fe, V, Ni);
- oxigénvegyületek: savas vegyületek (pl.: karbonsavak, fenolok), semleges vegyületek (pl.: észterek, ketonok).

A kőolajfeldolgozás során fontos a kőolajok összetételének, fizikai és kémiai tulajdonságainak minél alaposabb ismerete. A kőolajok jellemzőit, fizikai és kémiai adatait egyedülálló módon írja le az ún. kőolaj assay. A kőolaj assay a kőolaj adatain túl az adott típusra vonatkozó hozamadatokat, valamint a kőolaj desztillációja során nyert termékek részletes minőségi elemzéseit is tartalmazza. A kőolajok jellemzése, csoportosítása a következő fontosabb tulajdonságok alapján történik:

- sűrűség: relatív sűrűség (d_4^{20} , $d_{15,6}^{15,6}$), API sűrűség;
- desztillációs görbék: atmoszférikus Engler (ASTM D86), vákuum Engler (ASTM D1160), valódiforráspont-görbe (TBP-True Boiling Point), szimulált desztillációs görbe (SimDis, ASTM D2887), egyensúlyi görbe;
- kéntartalom;
- sótartalom;
- Conradson karbon maradék (CCR);
- aszfaltén tartalom;
- viszkozitás;
- fémtartalom;
- nitrogéntartalom;
- folyáspont, stb.

A fenti tulajdonságok alapján a kőolajok különböző osztályokba sorolhatók. A legjellemzőbb csoportosítások során sűrűség, kéntartalom és szénhidrogén összetétel alapján osztályozzák az egyes kőolajokat.

A sűrűség alapján történő csoportosítást az 3. táblázat tartalmazza. Az egyes kőolajok sűrűségét a kőolajat alkotó molekulák típusa, szerkezete és mérete befolyásolja.

Típus	API sűrűség	Sűrűség, g/cm ³
Könnyű kőolaj	>30	<0,86
Közepes kőolaj	20-30	0,86-0,93
Nehéz kőolaj	<20	>0,93

3. táblázat
Sűrűség alapú kőolaj osztályozás

A kőolajiparban igen fontos szempont a kéntartalom, így érthető, hogy egy jellemző csoportosítás a kőolajok kéntartalmát veszi alapul és ekkor a kőolajok „édességét, savanyúságát” vizsgálják. Ezt az osztályozást a 4. táblázat tartalmazza.

Típus	Kéntartalom, m/m%
Édes kőolaj	<0,5
Közepes kőolaj	0,6-1,5
Savanyú kőolaj	>1,5

4. táblázat
Kőolajok kéntartalom szerinti csoportosítása

A kőolajok osztályozása tehát számos módon történhet a legfontosabb szempontok a sűrűség és kéntartalom. [21], [22], [23]

A dolgozatom elkészítése során ezeknek a csoportosításoknak megfelelően két eltérő típusú kőolaj feldolgozását vizsgálom a desztillációs üzem optimális hőcserélő hálózat kapcsolására.

3.3 Az energiaiintegráció gyakorlati megvalósítása

Dolgozatomban már többször említettem, hogy az üzemeltetési költségek legnagyobb részét a megfelelő energia biztosítása jelenti, így célszerű azt a lehető legnagyobb mértékben minimalizálni. Az energiaiintegráció, a pinch analízis módszere, ahogy az már az irodalmi összefoglalóból is kiderült éppen a külső energiafelhasználás minimalizálását teszi lehetővé.

Az alábbiakban a pinch analízis gyakorlati megvalósítását mutatom be, majd a dolgozatom további részében az itt leírt lépéseket követve végzem el az egyes modellek esetén a hőcserélő hálózatok szintézisének tervezését.

3.3.1 A szűkületi hőmérséklet és a kompozitgörbék meghatározása

A pinc analízis két nagyobb egységre osztható, a szűkületi hőmérséklet meghatározására és a hőcserélő hálózat szintézisére. Ennek fényében elsőként a szűkületi hőmérséklet meghatározást mutatom be.

3.3.1.1 Első lépés – a technológiai áramok csoportosítása

Az energiaintegráció első lépéseként a technológia áramait csoportosítani kell aszerint, hogy hideg, vagy meleg áramok, azaz, hogy fűteni, vagy hűteni kell azokat. Ehhez szükség van az egyes technológiai áramok kezdeti (T_s) és célhőmérsékleteire (T_T). [24], [25], [26], [27]

3.3.1.2 Második lépés – a technológiai áramok hőterhelésének és fajhőáramainak meghatározása

Az egyes áramok esetén szükség van a hőkapacitásokra és tömegáramokra. Ezekből az adatokból meghatározható az entalpiaváltozás, ami a közlendő, illetve az elvonandó hőmennyiséggel egyenlő.

Az áramok hőterhelését, azaz az entalpiaváltozását a következő képlettel lehet számítani:

$$Q = \int_{T_i}^{T_2} mc_p dT = mc_p (T_T - T_s) \quad 1.$$

$$CP = mc_p \quad 2.$$

ahol: Q vagy H – az áram hőterhelése, [MW], [MJ/s]

m – az áram tömegárama, [kg/s]

c_p – az áram fajhője (eltekintettem ennek hőmérsékletfüggésétől), [MJ/(kg°C)]

T_s – az áram kezdő hőmérséklete, [°C]

T_T – az áram vég hőmérséklete, [°C]

CP – az áram fajhőárama, [MW/°C], [MJ/(s°C)]

3.3.1.3 Harmadik lépés – a kompozitgörbék és a szűkületi pont meghatározása

A technológiai áramok csoportosítása és vizsgálata után a hideg és meleg kompozitgörbék, valamint a nagy kompozitgörbe meghatározása következik.

A kompozitgörbék (entalpia-hőmérséklet diagram) megszerkesztéséhez mind a hidegáramok, mind pedig a meleg áramok esetén a hőmérsékleteket csökkenő sorba kell rendezni, majd ki kell számolni az egyes értékek közötti különbségeket, azaz a ΔT meghatározása következik. A hideg és meleg áramok esetén is el kell helyezni a megfelelő technológiai áramokat a megfelelő hőmérsékletintervallumokban. Ehhez célszerű egy grafikus, táblázatos formát használni, ami megkönnyíti az átláthatóságot. Ezután az egyes hőmérsékleti intervallumokban található áramok fajhőáramait összegezni kell, majd ezen

fajhőáramok és a ΔT értékek alapján a fenti képlet segítségével meghatározható az adott tartományhoz tartozó hőmennyiség. Ezt követően egy egyszerű hőmérséklet-entalpia megfeleltetés után ábrázolható a hideg és a meleg kompozitgörbe is. Az említett hőmérséklet-entalpia megfeleltetés abból áll, hogy a legkisebb hőmérséklethez az entalpiaskála nulla pontját kell társítani, majd az egyre növekvő hőmérsékletekhez tartozó entalpia értékeket úgy kell meghatározni, hogy a nulla ponttól kiindulva ahhoz folyamatosan hozzá kell adni az egyes intervallumokhoz tartozó entalpiaváltozások értékeit. Így végül a legnagyobb hőmérséklethez a legnagyobb entalpia érték társul.

A kompozitgörbék közös diagramon történő ábrázolásához szükséges egy következő fogalom, a minimális hajtóerő, minimális hőmérsékletkülönbség ($\Delta T_{\min}$) bevezetése. A szükséges hőmérséklet meghatározásához meg kell adni, hogy mekkora a megengedett minimális hőmérsékletkülönbség, amelynél a hőcsere még gazdaságosan kivitelezhető, azonban annál kisebb hőmérsékletkülönbség már nem engedhető meg. Az optimális hajtóerő meghatározása az üzemeltetési és beruházási költségek alapján történik. Kőolajiparban ez hosszú évek tapasztalatai alapján 10°C és 30°C közötti értéknek adódott.

A hideg és meleg kompozitgörbék egy közös diagramon is lehet ábrázolni a hideg kompozitgörbe megfelelő mértékű eltolásával. Az eltolás esetén a cél az, hogy annak köszönhetően a minimális hajtóerőnél minden esetben nagyobb hajtóerővel rendelkezzen a hőcserélőrendszer. Az így kapott diagramról leolvasható, hogy mekkora az a hőmennyiség, amelyet folyamatáramok közötti hőcserével át lehet adni és mekkora a technológiai folyamat minimális hideg- és melegenergia ($Q_{C\min}$, $Q_{H\min}$) igénye. Azt a pontot, ahol a hőmérsékletkülönbség megegyezik $\Delta T_{\min}$ -gel, szükséges pontnak nevezzük.

A számítások során arra kell törekedni, hogy a legtöbb hőcserét folyamat - folyamat hőcsereként lehessen megvalósítani. Ehhez azonban, szükséges néhány feltételezést tenni. A legfontosabb a kompozitgörbék, nagy kompozitgörbe meghatározása során, hogy minden külső energia, tehát a hideg- és melegenergia, megfelelő hőmérsékleten áll rendelkezésre, azaz minden áram hőterhelése kielégíthető.

A nagy kompozitgörbe információt ad a hűtési és fűtési energia minőségéről, illetve segítségével meghatározható a minimális külső energia szükséglet mennyisége is. A görbe megszerkesztéséhez módosított hőmérsékleteket (T^*) kell meghatározni, majd ezeket csökkenő sorrendbe rendezni.

A módosított hőmérsékleteket a következőképpen kell meghatározni a minimális hajtóerő ismeretében:

Hideg áramok esetén:

$$T_{s*} = T_s + \frac{\Delta T_{\min}}{2} \quad 3.$$

$$T_{t*} = T_t + \frac{\Delta T_{\min}}{2} \quad 4.$$

Meleg áramok esetén:

$$T_{s*} = T_s - \frac{\Delta T_{\min}}{2} \quad 5.$$

$$T_{t*} = T_t - \frac{\Delta T_{\min}}{2} \quad 6.$$

Ezután hasonlóan kell eljárni, mint a kompozitgörbék esetén. A fajhőáramok összegzése során a hideg áramok fajhőáramát pozitív előjellel, a meleg áramokét pedig negatív előjellel kell figyelembe venni. Az összegzett fajhőáramok és a módosított hőmérsékletkülönbségek (dT^*) felhasználásával kiszámolható az adott hőmérséklethez tartozó hőmennyiség.

A legnagyobb energiaháánnyal rendelkező intervallum hőigényének ismeretében korrigálni kell annak az értéknek a hozzáadásával az összes intervallumhoz tartozó hőmennyiséget. Ekkor kialakul az az intervallum, ahol a nincs energiaforgalom. Ehhez az intervallumhoz tartozó hőmérsékletek (azokat korrigálni kell a $\Delta T_{\min}$ felével!) tekinthetők a rendszer szűkületi pontjának, azaz a meleg és hideg oldali szűkületi hőmérsékleteknek.

A legmagasabb hőmérsékletszintű intervallumhoz számolt hőmennyiség adja a rendszer minimális melegenergia igényét (Q_{Hmin}) a legalacsonyabb hőmérsékletszintű intervallumhoz számolt hőmennyiség pedig a rendszer minimális hidegenergia igényét (Q_{Cmin}).

Hőtani szempontból a szűkületi pont a folyamatot két egymástól független (szűkületi pont alatti és szűkületi pont feletti) részre osztja. A két rész hőigényének kielégítésekor különböző szűkületi szabályokat kell figyelembe venni, amelyeket a hálózattervezésnél mutatok be részletesen.

Az ebben a fejezetben leírtak alapján történik a szűkületi pont, és kompozitgörbék meghatározása, amik segítségével megállapítható a minimális fűtési (Q_{Hmin}) és minimális hűtési (Q_{Cmin}) igény. [24], [25], [26], [27]

A következő lépés a hálózattervezés, amely során törekedni kell arra, hogy a fent meghatározott külső hűtési és fűtési igényeken túl csak folyamat-folyamat hőcserével történjen az egyes technológiai áramok közötti hőátadás.

3.3.2 Hőcserélő hálózat tervezés

A hőcserélő rendszer tervezése is több részlépésre osztható, melyeket az alábbiakban mutatok be.

3.3.2.1 *Első lépés – hálódiaagram szerkesztése*

A hőcserélő rendszer tervezéséhez először a hálódiaagramot kell megszerkeszteni. A hálódiaagram a technológia meleg- és hideg áramait, azok fajhőáram és hőigényeit tartalmazza, majd a tervezés során a szükséges hőcserélőket is ezen a diagramon jelölöm. A hálódiaagram felső részén a meleg áramokat kell feltüntetni balról jobbra csökkenő hőmérséklettel, míg az alsó részén pedig a hideg áramokat jobbról balra növekvő hőmérséklettel.

A hálózattervezésnél célszerű külön ábrázolni a szűkületi pont alatti és feletti két részt. Ez a hálódiaagramon egy a megfelelő áramokat átszelő szaggatott vonallal történik.

A hálódiaagramon az egyes áramok közötti hőcserélőket a hőcserében résztvevő meleg és hideg áramon elhelyezett egy-egy körrel és az azokat összekötő egyenessel, a külső hűtésű vagy fűtésű hőcserélőket az áramon elhelyezett körrel szokás jelölni. Az átláthatóság kedvéért az egyes hőcserélők esetén feltüntettem azok hőmennyiségét, a be- és kilépő áramok hőmérsékletét. [24], [25], [26], [27]

3.3.2.2 *Második lépés – hőcserélő hálózat tervezés*

A hőcserélő hálózat tervezése során a szűkületi pont alatti és szűkületi pont feletti részeket külön kell kezelni. A két rész hőigényének kielégítésekor a következő szűkületi szabályokat kell figyelembe venni:

- A szűkületi ponton keresztül nem szabad hőcserét megvalósítani, vagyis a szűkületi pont alatt és felett külön hőcserét kell alkalmaznunk.
- A szűkületi pont felett nem szabad külső hűtést alkalmazni, különben megnöveljük a külső fűtésigényt.
- A szűkületi pont alatt nem szabad külső fűtést alkalmazni, különben megnöveljük a külső hűtésigényt.

Az említett szabályok közül bármelyik megsértése a rendszer külső energiaigényének növekedésével jár.

A hálózattervezés során először a szűkületi pontba belépő, illetve az onnan kilépő áramok integrációját kell elvégezni, majd onnan kifelé haladva a többi áramét.

A hálózattervezés során a szűkületi pont alatti részre a következő általános szabályok vonatkoznak:

- Szűkületi pont alatt a meleg áramok száma nagyobb vagy egyenlő legyen a hideg áramok számánál ($N_H \geq N_C$), és az összekapcsolandó áramok közül a melegáram fajhőárama nagyobb vagy egyenlő legyen a hidegáram fajhőáramánál ($CP_H \geq CP_C$). Ha ez nem teljesül, akkor az áramokat meg kell osztani.
- Elsőként mindig a legnagyobb fajhőáramú, szűkületi pontba belépő áram energiaigényét elégítsük ki.
- Olyan áramok esetében, melyek nem érintik a szűkületi pontot elsősorban a hajtóerőt kellett figyelembe venni.

A szűkületi pont feletti részre a következő általános szabályok érvényesek:

- Szűkületi pont felett a hideg áramok száma nagyobb vagy egyenlő legyen a meleg áramok számánál ($N_C \geq N_H$), és az összekapcsolandó áramok közül a hidegáram fajhőárama nagyobb vagy egyenlő legyen a melegáram fajhőáramánál ($CP_C \geq CP_H$). Ha ez nem teljesül, akkor az áramokat meg kell osztani.
- Elsőként mindig a legnagyobb fajhőáramú, szűkületi pontba belépő áram energiaigényét elégítsük ki.
- Olyan áramok esetében, melyek nem érintik a szűkületi pontot elsősorban a hajtóerőt kellett figyelembe venni.

A fenti szabályok betartása mellett megvalósítható az optimális hőcserélő hálózat tervezése. Az egyes folyamat – folyamat hőcserélők hálódigramon történő elhelyezése után a külső energiát felhasználó hőcserélők felrajzolása is elvégezhető. A külső hideg- és melegenergiák felhasznált mennyisége optimális esetben meg kell, hogy egyezzen a kompozitgörbék, nagy kompozitgörbe esetén meghatározott értékekkel. Ez egy ellenőrzési lehetőséget is biztosít a hálózattervezés helyességére. [24], [25], [26], [27]

A gyakorlati részben a különböző köolajtípusokra elkészített szimulációs modell alapján az energiaiintegrációt, a hőcserélő hálózat tervezést a fent leírt lépések segítségével végzem el.

4 Gyakorlati rész

Ebben a fejezetben bemutatom az elvégzett számításokat, elemzéseket. Először ismertetem az eltérő kőolajtípusokat, majd röviden bemutatom a PRO/II szimulációs szoftver segítségével elkészített modellt. A szimulációs program adatai alapján ezt követően elvégzem az egyes modellek esetén az energiaintegrációt, azaz meghatározom az egyes esetekben az optimális hőcserélő hálózatot. Végül elvégzem a kapott eredmények összehasonlító értékelését.

4.1 Az alkalmazott kőolajok jellemzése

A modellek elkészítéséhez a két eltérő típusú kőolajat használtam fel. Az egyik a közepes sűrűségű Russian Export Blend (REB) típusú, a másik pedig egy könnyebb kőolaj, amire „A” jelűként hivatkozom a továbbiakban. Az egyes kőolajok fontosabb jellemzőit az 5. táblázatban foglaltam össze.

Tulajdonság	REB (Russian Export Blend)	„A” jelű könnyű kőolaj
Sűrűség, 15°C-on, g/cm ³	0,8643	0,8190
Kinematikai viszkozitás, 20 °C-on, mm ² /s	12,7	3,897
Kéntartalom, %(m/m)	1,39	0,58
Nitrogéntartalom, mg/kg	1631	700
Víztartalom, %(m/m)	0,05	0,05
Sótartalom, mg/kg	1,3	0,9
Ni tartalom, mg/kg	11	3
Cu tartalom, mg/kg	0,03	0,03
V tartalom, mg/kg	31	5,5
Fe tartalom, mg/kg	13	0,03

5. táblázat
A REB típusú kőolaj jellemzői

A kőolajok csoportosítása című fejezetben leírtak alapján az adatokból látható, hogy a REB kőolaj egy közepes sűrűségű, közepes kéntartalmú kőolaj, míg az „A” jelű kőolaj kis sűrűségű, édes kőolajnak tekinthető. Az egyes kőolajok hozamadatait a 6. táblázatban foglaltam össze.

	REB kőolaj, %	„A” kőolaj, %
Fűtőgáz	0,04	0,02
PB	1,30	2,08
Könnyűbenzin	4,41	7,97
Középbenzin	3,45	3,67
Nehézbenzin	7,28	13,69
Petróleum	7,67	9,54
KGO	14,24	18,04
NGO	6,67	9,04
SLGO	0,04	0,48
VGO	7,95	9,43
SZPOD	28,83	15,62
Gudron	18,13	10,42

6. táblázat
A REB típusú kőolaj hozamstruktúrája

4.2 A szimulációs modell ismertetése

Ebben a részben röviden bemutatom az atmoszférikus- és vákuum desztillációs üzem szimulációját. A szimulációt a PRO/II folyamat szimulációs szoftverrel készítettem el.

4.2.1 Kiindulási adatok, elvárt termékminőségek

Az alapmodell a REB típusú kőolajra készítettem el. A megfelelő tömegmérleghez szükséges adatokat egy meglévő AV üzem termékeinek minőségi és mennyiségi jellemzői biztosították. Ezen jellemzők és az üzemi paraméterekre vonatkozó irodalmi adatok alapján [28] elkészítettem a megfelelő alapmodellt.

Az alapmodell elkészítése során törekedtem arra, hogy az általam nyert termékek minősége közelítsen a kiindulási termékek minőségeihez, illetve teljesítsen olyan minőségi követelményeket, ami mindhárom alapanyag esetén elvárható az egyes termékekre vonatkozóan.

A szimuláció során bizonyos műveleti paramétereket, termék minőségére vonatkozó specializációkat úgy állítottam be, hogy azok a két kőolajtípus esetén is azonosak legyenek, hiszen a finomítói, üzemi rugalmasság célja, hogy eltérő alapanyagok esetén is képesek legyenek azonos minőségű termékek előállítására. Mivel a dolgozatomban célja az optimális hőcserélő hálózat kialakításának vizsgálata, az eltérő kőolaj típusok feldolgozása esetén is azonos tányérszámú, azonos betáplálási és elvételi helyű desztillációs oszlopokat modelleztem.

Az oszlopok műveleti paramétereit tekintve az irodalmi adatoknak megfelelő értékeket alkalmaztam annak érdekében, hogy az elvárt termék minőségeket kapjam. A fontosabb műveleti paramétereket, az elvárható minőségi jellemzőket és a technológia főbb adatait az alábbiakban foglaltam össze:

- A kőolaj előmelegítése két lépésben történik, először a tároló felől érkező átlagos környezeti hőmérsékletűt (15 °C) 130 °C-ra, ugyanis ennél magasabb hőmérséklettel nem mehet sómentesítésre, majd innen az előlepárló oszlopba belépő hőmérsékletre.
- Az előlepárló oszlop:
 - fejnnyomása: 3,5-4,5 bar;
 - fejhőmérséklete: 95-105 °C;
 - oldaltermékként elvett középbenzin frakció esetén az ASTM D86 desztillációs görbe 95 ftf%-ig átdestillált mennyiségéhez tartozó forráspont 150 °C;
 - fenék hőmérséklete: 185-215 °C;
- A benzinstabilizáló oszlopba 90-100 °C-on és 9-10 bar nyomáson lép be az előlepárló oszlop fejtermékének folyadék része.
- A benzinstabilizáló oszlop:
 - fejtermékeként elvett PB gáz összes C₅₊ tartalma legyen kevesebb, mint 0,5 m/m%;
 - a fenéktermékként elvételre kerülő könnyűbenzin ASTM D86 desztillációs görbe 5 ftf%-ig átdestillált mennyiségéhez tartozó forráspont 40 °C legyen.
- Az atmoszférikus desztilláló kolonna:
 - fejhőmérséklete: 115-135 °C;
 - fejnnyomása: enyhe vákuum alkalmazása szükséges: -24 mbarg körüli értékkel;
 - a folyadék fejtermékként elvett nehézbenzin frakció ASTM D86 desztillációs görbe 95 ftf%-ig átdestillált mennyiségéhez tartozó forráspont 156 °C;
 - az első oldaltermékként elvételre kerülő petróleum frakció ASTM D86 desztillációs görbe 95 ftf%-ig átdestillált mennyiségéhez tartozó forráspont 214 °C;

- a következő oldaltermék a könnyűgázolaj, melynek ASTM D86 desztillációs görbe 95 ftf%-ig átdesztillált mennyiségéhez tartozó forráspontja 298 °C;
- a nehézgázolaj, mint következő oldaltermék esetén az ASTM D86 desztillációs görbe 95 ftf%-ig átdesztillált mennyiségéhez tartozó forráspontja 360 °C;
- a pakura fenéktermék esetén az elvételi hőmérséklet 300-315 °C
- szükség esetén az egyes oldaltermékek kezdő forráspontjának beállításához kiforralók vagy sztripperek alkalmazhatók;
- A kondenzátor terhelésének csökkentésére, valamint a nagyobb hővisszanyerés érdekében cirkulációs refluxokat kell alkalmazni. Egyiket a petróleum és a könnyűgázolaj oldalmegcsapolásai között, kb. 140 °C hőmérsékleteséssel, a másikat a könnyűgázolaj és nehézgázolaj oldaltermékek elvétele között kb. 170 °C hőmérsékleteséssel.
- A vákuum desztillációs kolonna:
 - fejnnyomása: 43 mbar;
 - az első oldalterméke a könnyű vákuumgázolaj;
 - második oldalterméke a nehéz vákuumgázolaj esetén a TBP desztillációs görbe 95 m/m%-ig átdesztillált mennyiségéhez tartozó forráspont 570 °C;
 - a betáplálás fölötti mosózónából lecsurgó folyadékot összegyűjtve a csökemence elé célszerű visszavezetni;
 - hővisszanyerés érdekében cirkulációs refluxok alkalmazása szükséges, az első a hőelvonó ágy hűtésére, itt a könnyű vákuumgázolaj egy részét kell lehűtve visszavezetni, második esetben a szeparációs ágy alatt lévő hőelvonó ágy hűtésére a nehéz vákuumgázolaj egy részét kell visszavezetni. A két cirkulációs reflux elvont hőmennyiségének aránya legyen kb. 60% és 40%.
 - a harmadik cirkulációs áram az oszlop alsó részében kvencsként funkcionál, az oszlop alsó részének hűtésére, hőelvonásra szolgál.

A fenti tulajdonságok, korlátozások ismeretében elkészítettem az alapmodellt, amelyet a következő fejezetben mutatok be.

4.2.2 A szimulációs modell bemutatása

A kiindulási adatok alapján elkészítettem az alapmodellt, amit a 4. ábra mutat.

Az anyagáramokat folyadékok esetében forráspont görbéjük alapján, gázoknál pedig egyedi komponensenként vittem be a szimulációba. A visszakeveréses módon előállított kőolajáram a mérsékelt égővi évi átlag környezeti hőmérsékletnek megfelelően 15 °C-on kerül ki a tároló részből 5 bar nyomással. Ezt követően hőcserélőkön keresztül emeltem a hőmérsékletét, és így vezettem be az előlepárló oszlopba. Ez az oszlop parciális kondenzátorral és sztrippgőz bevezetésével rendelkezik.

Az oldaltermékként elvett középbenzin hőcserélőn áthaladva 35 °C-on, 4 bar nyomáson kerül kitérítésre. A fejtermék folyadék szivattyún és a hőcserélőn áthaladva 98 °C-on és 9,7 bar nyomáson lép be a stabilizáló oszlopba. A stabilizáló oszlopból fejtermékként elvett PB-t hőcserélőn áthaladva 40 °C-on, 9,1 bar nyomáson, a fenéktermék könnyűbenzint ugyancsak hőcserélőn át, 35 °C-on, 9,5 bar nyomáson tárolják.

Az előlepárló oszlop maradéka a redukált kőolaj az atmoszférus kolonna előtti csökemencén át jut az atmoszférus kolonnába. Az atmoszférus kolonna totál kondenzátorral, oldal sztripperrel, cirkulációs refluxokkal és sztrippgőz bevezetésével van ellátva.

Az atmoszférus oszlopból a fejtermék folyadék részét, a nehézbenzint, szivattyún és az hőcserélőn áthaladva 35 °C-on és 4,7 bar nyomáson tárolják. A petróleum frakció kezdő forráspontjának beállítására kiforrálóval szerelt sztripperrel kell alkalmazni. Az így kapott terméket szivattyún és hőcserélőn átvezetve 40 °C-on és 4,7 bar nyomáson tárolják. A könnyűgázolaj oldalterméket szivattyún és hőcserélőn át 40 °C-on és 4,7 bar nyomáson tárolják. Az atmoszférus kolonna utolsó oldaltermékét, a nehézgázolajat, szivattyún és hőcserélőn át 40 °C-on, 5 bar nyomáson tárolják.

Az atmoszférus oszlop kondenzátorának hőterhelésének csökkentésére két helyen cirkulációs refluxokat alkalmaztam. Ezeknek a hőjét az energiaiintegráció során fogom felhasználni.

Az atmoszférus kolonna fenékterméke, a pakura szivattyún áthaladva 10 bar nyomással 2 t/h túlhevített vízgőzzel keveredve a vákuum kolonna előtti csökemencébe jut. A csökemencéből kilépő elegy a vákuum kolonnába lép be.

Az oszlop első termékének, a vákuumgázolajnak egy részét cirkulációs refluxként, egy részét mosó folyadékként használják fel, a terméként kitérített részt pedig szivattyún és hőcserélőn átvezetve, 100 °C-on és 3,7 bar nyomáson tárolják. A vákuum kolonna főtermékét, a szélespárlatot, a vákuumgázolajhoz hasonló módon használják fel, a termékáramot szivattyún és hőcserélőn át, 110 °C-on és 3,7 bar nyomáson tárolják. A vákuum oszlop betáplálási tányérja fölötti tányérjáról lecsurgó folyadékot szivattyún és az áramegyesítőn át a

pakurával együtt a vákuum csőkemencébe vezettem. Ez azért célszerű, mert így lehetőség van a benne lévő még megfelelő forráspontú komponensek kinyerésére.

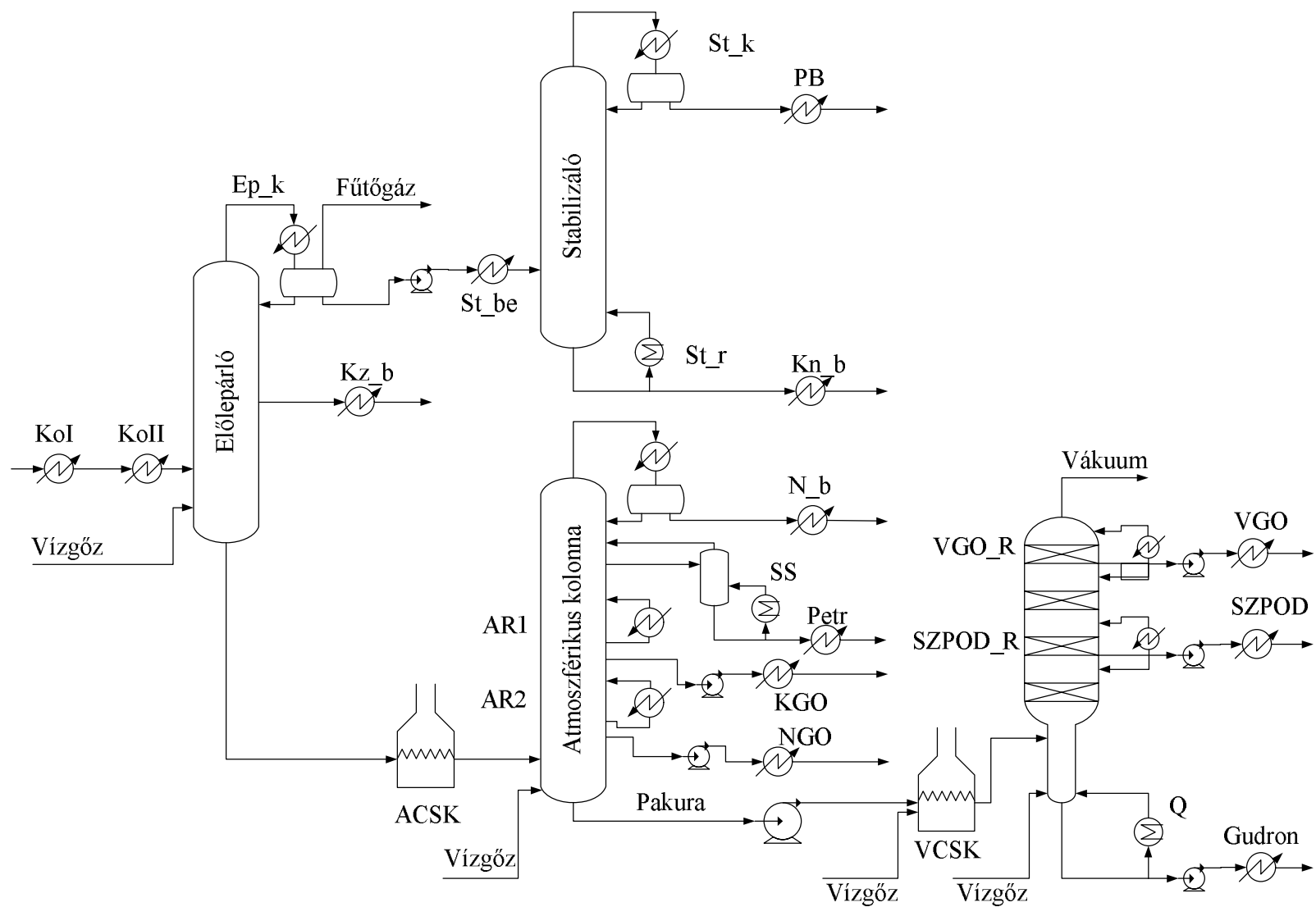
A vákuum oszlop esetében különösen nagy jelentősége van a cirkulációs áramok alkalmazásának, mert a csőkemencéből kilépő áram nagy hőmennyiséget tartalmaz, amit a desztilláció során vissza lehet nyerni, és azt az energiaiintegráció során fel lehet használni folyamat-folyamat hőcserére.

A bemutatott modell mindkét kőolaj típus esetén hasonló módon épül fel. A kapott termékek minőségi jellemzőit, illetve az egyes oszlopok főbb paramétereit az M1-M9. mellékletekben foglaltam össze. A következő lépés a megfelelő adatok kigyűjtése a programból, majd azok alapján az energiaiintegráció, a hálózattervezés elkészítése az egyes esetekben.

4.3 EnergiainTEGRÁCIÓ és hőCSERÉLŐ hálózAT tervezése az eltérő kőolaj típusok esetén

Az energiaiintegráció során a korábban leírtaknak megfelelően jártam el. Arra törekedtem, hogy a technológiában szereplő hideg és meleg áramok hőcseréjét minél inkább technológián belüli hőcserével valósítsam meg. A technológiai meleg áramok hőtartalmát a lehető legnagyobb mértékben érdemes felhasználni a kőolaj előmelegítésére, hiszen így csökkenthető leginkább a külső energia felhasználása, valamint ennek köszönhetően csökken az üzem károsanyag kibocsátása is.

A továbbiakban a könnyebb áttekinthetőség kedvéért egy következetes jelölésrendszert vezetek be. Ennek lényege, hogy az egyes áramok neveit a két kőolaj feldolgozása során az összehasonlíthatóság kedvéért azonosnak veszem, azzal a különbséggel, hogy az „A” kőolaj esetén az áramok neveit „A-„előtaggal látom el. A technológiai áramok elnevezéseit az 5. ábrán tüntettem fel.



5. ábra
A technológiai áramok elnevezéseit bemutató ábra

Az energiaiintegráció, a kompozit görbék kiszámításának menetét, csupán a REB típusú kőolaj esetében mutatom be. Az „A” jelű kőolaj esetében is hasonló módon végeztem el a számításokat ezért ott már csak az eredményeket tüntetem fel.

4.3.1 A REB típusú kőolaj feldolgozása esetén kapott eredmények

Első lépésként a technológiai áramok csoportosítását végeztem el. Az egyes technológiai áramokat és az energiaiintegrációhoz, valamint a hálózattervezéshez szükséges adatokat a 7. táblázatban és a 8. táblázatban foglaltam össze. A Kód oszlopban szereplő nevek a kompozit görbék szerkesztésekor használt rövidebb, az áttekintést ezáltal könnyebbé tevő megnevezései az egyes áramoknak.

Áram neve	Kód	Ts (°C)	Tt (°C)	CP (MW/°C)	dH (MW)
Ep_k	M1	101,4	52,8	0,165	8,020
St_k	M2	65,5	48	0,305	5,333
Kn_b	M3	137,4	35	0,013	1,336
PB	M4	48	40	0,005	0,038
Kz_b	M5	144,6	35	0,009	1,041
A_k	M6	124,7	74,8	0,286	14,249
AR1	M7	201,5	61,5	0,050	7
AR2	M8	266,7	96,7	0,032	5,5
N_b	M9	75	35	0,019	0,744
Petr	M10	188,4	40	0,022	3,273
KGO	M11	232,2	40	0,040	7,736
NGO	M12	285,5	40	0,019	4,667
VGO_R	M13	131,8	50	0,182	14,9
SZPOD_R	M14	293,7	130	0,079	13
Q	M15	310	230	0,046	3,702
VGO	M16	131,9	40	0,019	1,799
SZPOD	M17	293,8	110	0,089	16,399
Gudron	M18	310	150	0,050	8,029

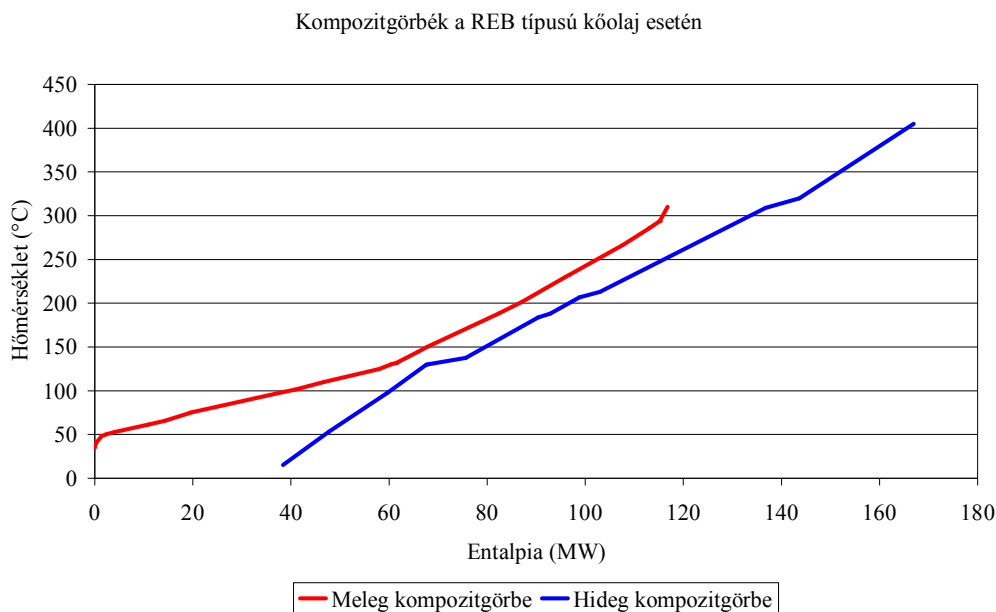
7. táblázat
Meleg áramok adatai

Áram neve	Kód	Ts (°C)	Tt (°C)	CP (MW/°C)	dH (MW)
VCSK	H1	309	405	0,274	26,325
SS	H2	183,7	188,2	0,223	1,003
ACSK	H3	206,8	320	0,352	39,869
St_r	H4	129,7	137,4	0,721	5,550
St_be	H5	53,2	98	0,019	0,887
KoI	H6	15,2	130	0,248	28,463
KoII	H7	130	213	0,319	26,529

8. táblázat
Hideg áramok adatai

A következő lépés a kompozitgörbék és a nagy kompozitgörbe elkészítése volt. Minimális hajtóerőnek, minimális hőmérsékletkülönbségnek **20 °C**-ot választottam, ez általánosan elfogadott érték a kőolajiparban.

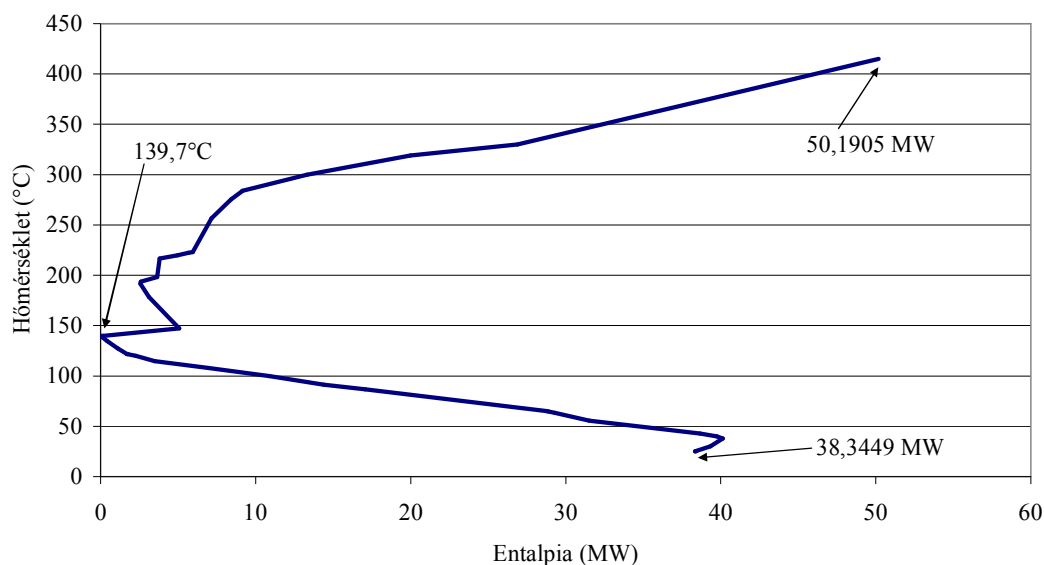
A hideg és meleg kompozitgörbék meghatározásának menetét az M10-M11. melléklet mutatja. A két görbét egy diagramon ábrázoltam. A hideg kompozitgörbét úgy toltam a meleg kompozitgörbe alá, hogy mindenhol meglegyen a minimális hajtóerő. Ezt a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra
A hideg és meleg kompozitgörbe a REB kőolaj esetén

A nagy kompozitgörbe elkészítését szintén a leírtaknak megfelelően végeztem el. Az M12. melléklet a nagy kompozitgörbe meghatározásának menetét, majd a 7. ábra a nagy kompozitgörbét szemlélteti.

Nagy kompozitgörbe a REB típusú kőolaj esetén

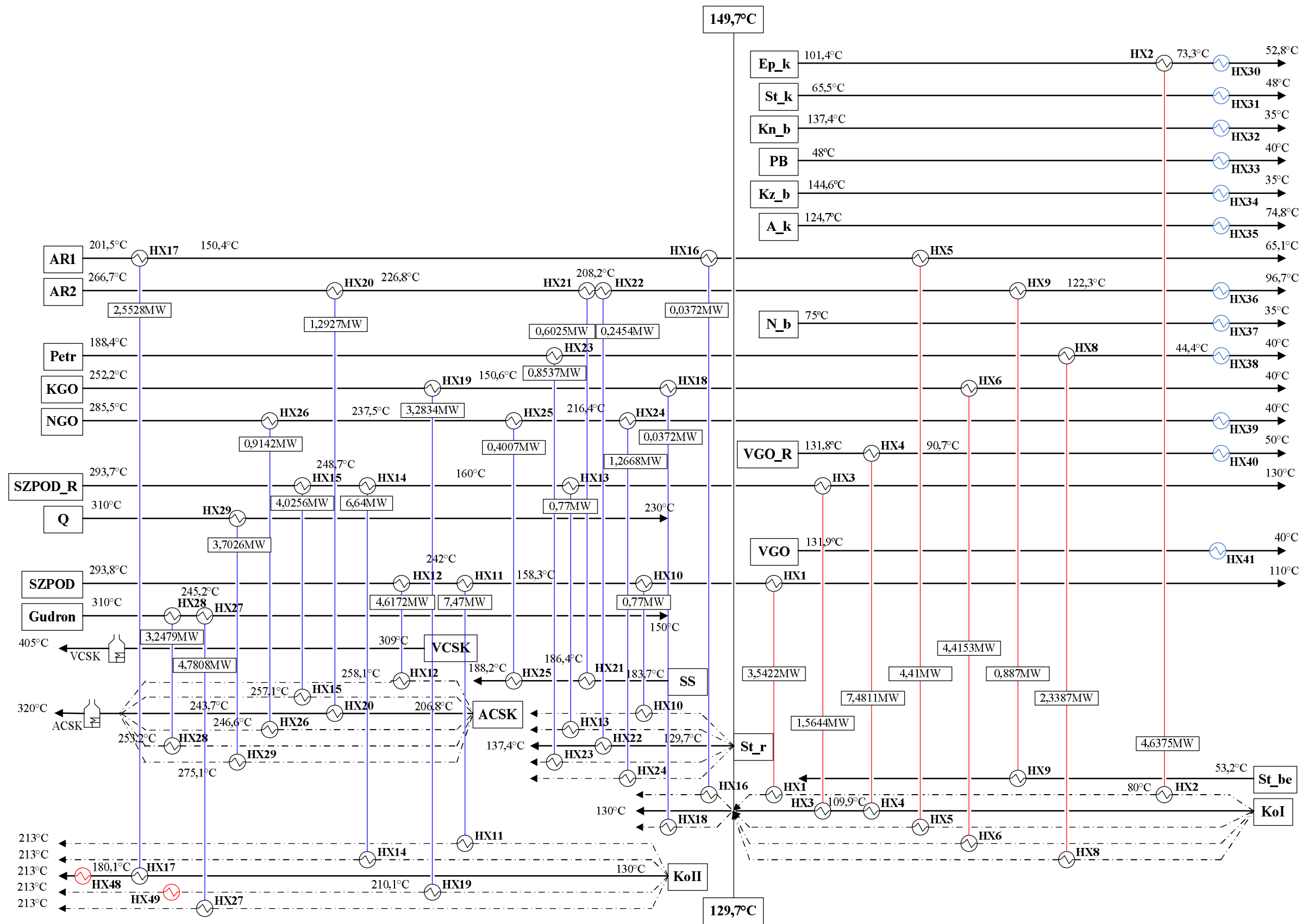


7. ábra
A nagy kompozitgörbe a REB kőolaj esetén

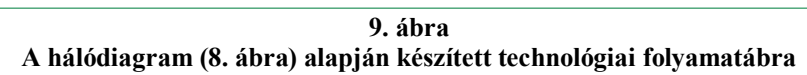
A nagy kompozitgörbe adatiból kiderül, hogy a rendszer a szűkületi pont mindkét oldalán elhelyezkedik, azaz hőnyelő és hőforrás is egyben. Az energiaintegráció után a minimálisan szükséges hűtési igény **38,345 MW**, minimális fűtési igény pedig **50,191 MW**, ahogy ez a nagy kompozitgörbéről leolvasható.

A nagy kompozitgörbén jól látható, hogy a szűkületi pont **139,7°C**. A szűkületi pontban a hőmérséklet-különbség megegyezik a minimális hajtóerővel. A szűkületi ponthoz tartozó hőmérséklet a meleg kompozitgörbén a meleg oldali szűkületi hőmérséklet **149,7°C**, a hideg kompozitgörbén a hideg oldali szűkületi hőmérséklet **129,7°C**.

A következő lépés a hőcserélő hálózat tervezése, amit szintén a fent leírtaknak megfelelően végeztem el. Az elkészített hálódigramot a 8. ábra szemlélteti. A hálódigram alapján elkészítettem a technológia folyamatábráját, hogy üzemeltetési szempontok szerint is megvizsgálhassam a kapott hőcserélő hálózatot. Ezt a 9. ábra mutatja.



8. ábra
A modell adatai alapján először elkészített hálódiaagram REB kőolaj esetén



A hálódigramon és a folyamatábrán is jól látható, hogy bár hővisszanyerés szempontjából megfelelő elrendezést alakítottam ki, üzemeltetési szempontból számos probléma adódik.

A kőolaj só- és vízmentesítőből kilépő ágán a HX48 és HX49 jelű hőcserélők külső fűtési energiát igényelnek, ami eltér az irodalmi, illetve a gyakorlatban alkalmazott eljárással, miszerint a technológiai melegáramok hőjével fel lehet melegíteni a kőolajat a megfelelő hőmérsékletre. Látható az is, hogy a stabilizáló oszlop kiforráló részét (HX10, HX13, HX22, HX23, HX24) öt ágra kellett osztanom, ahhoz, hogy a megfelelő hajtóerőt tudjam biztosítani az egyes folyamat-folyamat hőcserélők esetében. Ennek a hőcserélősornak az üzemeltetése, szabályozása meglehetősen komplex feladatot jelent. Ez nem csupán a költségek növekedését, de az egyes termékek minőségének romlását is maga után vonhatja.

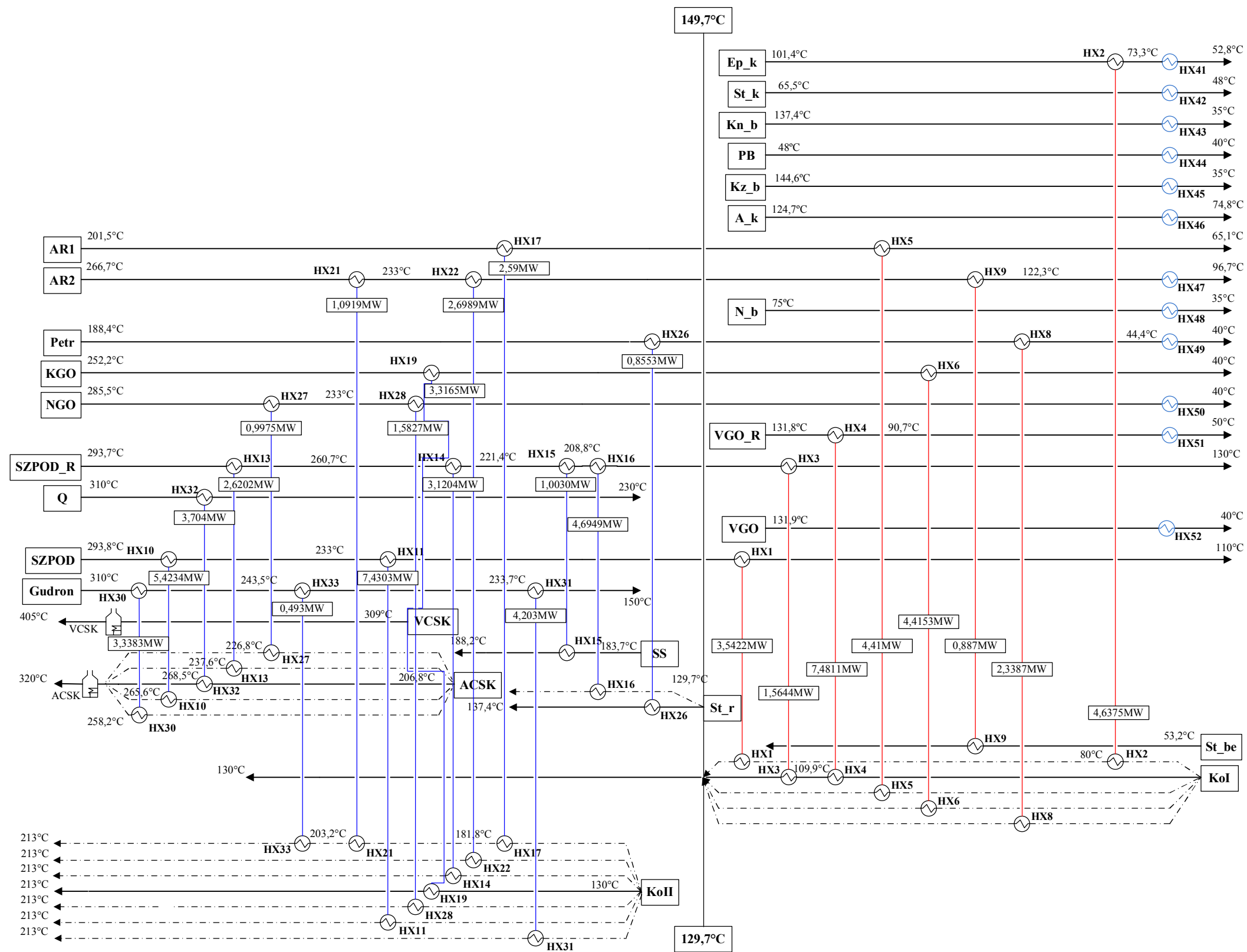
Az üzemeltetési szempontból is optimális hőcserélő hálózat kialakításához ezért újabb hálódigramot készítettem. Céлом volt, hogy a stabilizáló oszlop kiforrálóját, minél kevesebb ágra osszam ezzel csökkentve az üzemeltetési nehézségeket, valamint hogy a kőolajáramok előmelegítését csak folyamat-folyamat hőcsere révén valósítsam meg. A megfelelő hajtóerő biztosítása miatt ekkor a kőolaj só- és vízmentesítőbe belépő áram szűkületi pont feletti részét hat ágra kellett osztanom. Mivel azonban ennek 129,7 °C-ról 130 °C-ra történő felmelegítése kis hőmennyiséget igényel (0,0744 MW) várhatóan a hőcserélő felületek nem érik el a minimális elvárt 50 m²-t. Ezért az elkészített hálódigram esetén kiszámoltam a kapott hőcserélők felület igényeit. A várakozásaimnak megfelelően ezen hőcserélők nem bizonyultak elég nagy felületűnek, ezért újabb feltételeket állítottam a következő hálódigram tervezése előtt.

A céлом volt hogy ezt a kőolaj ágot áramosztás nélkül, egyetlen folyamat-folyamat hőcserélővel melegítsem fel a szükséges hőmérsékletre. Ekkor azonban számolnom kellett azzal, hogy a szűkületi pontba belépő melegáramok mindegyike (7 db) esetén nem tudom biztosítani a megfelelő hajtóerőt, hiszen a különböző korlátozások miatt csupán 3 db olyan hidegáram maradt, amelyik a szűkületi pontból indul ki. Így a maradék 4 db melegáram esetén az üzemeltetési szempontokat, a felület igényeket is figyelembe véve a minimális hajtóerőt csökkentenem kellett. Mivel azonban a szükséges csökkentés mértéke igen kicsi, 20 °C-ról 19,7 °C-ra ezért ezt elfogadhatónak tekintettem, így elkészítettem egy olyan hálódigramot, amely a fenti szempontokat kielégíti.

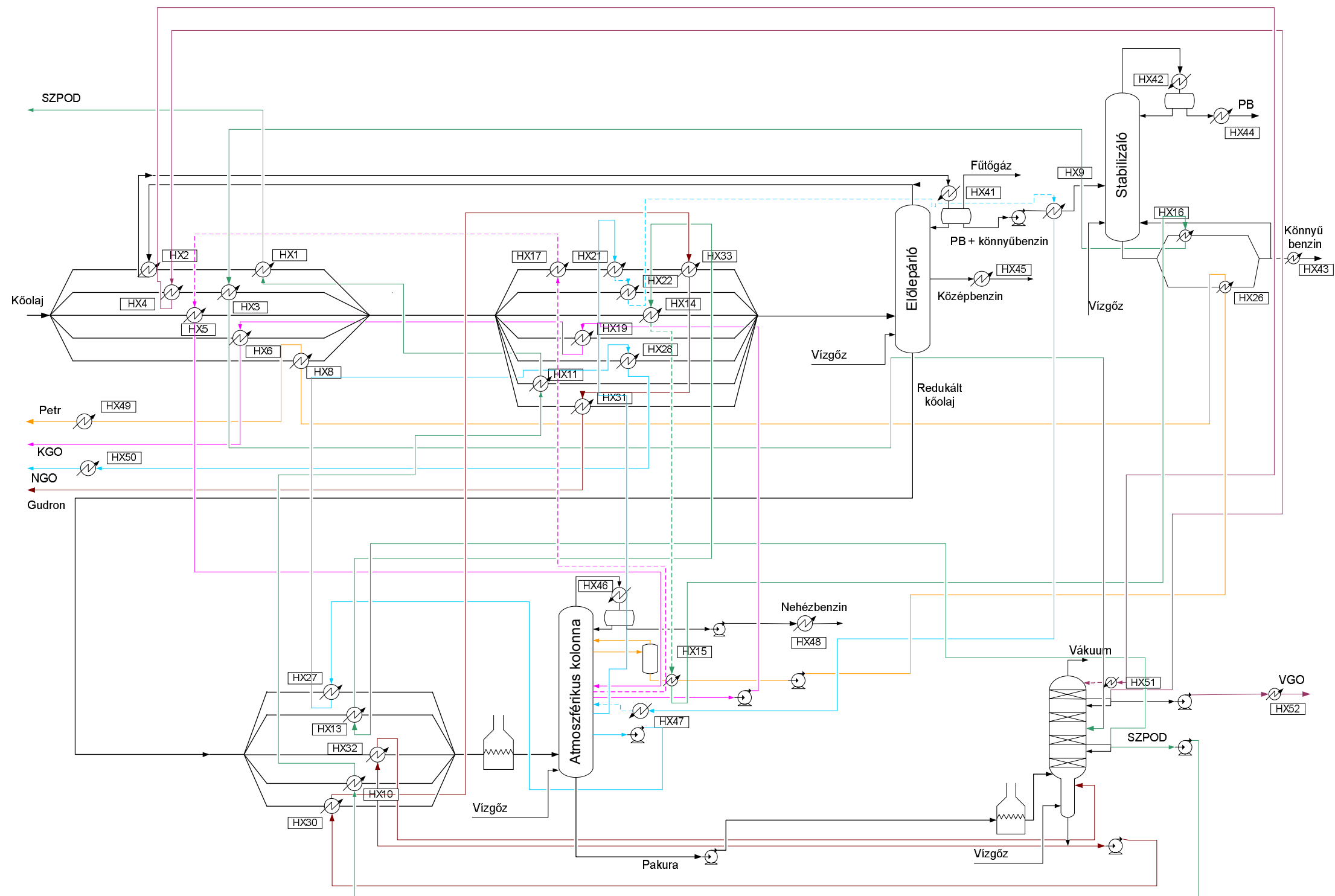
A módosított hálózat esetén ismét kiszámoltam a szükséges hőcserélő felületeket, majd megállapítottam, hogy a kőolaj só- és vízmentesítőből kilépő áram esetén a hideg oldali szűkületi hőmérsékletéről (129,7 °C) 130 °C-ra történő felmelegítése még egyetlen hőcserélő

alkalmazásakor is kis hőcserélő felületet kíván. Ezért úgy döntöttem, hogy az adott áramot nem melegítem fel 130 °C-ra, hanem csak a hidegoldali szükséges hőmérsékletre.

Ezután megterveztem a REB típusú kőolaj feldolgozására optimális hőcserélő hálózatot, amit a 10. ábrán tüntettem fel. A hálódiaagram alapján elkészített technológiai folyamatábrát a 11. ábra mutatja.



10. ábra
A REB kőolaj feldolgozására alkalmas hőcserélő hálózat hálódigramja



11. ábra
A REB kőolaj feldolgozására alkalmas AV üzem technológiai folyamatábrája

Látható, hogy a stabilizáló oszlop kiforralóját két részre kell csupán osztani, ami üzemeltetési szempontok tekintetében is megfelelőnek mondható. Az egyes hőcserélők fontosabb adatait a 9. táblázatban foglaltam össze.

Hőcserélő	Egyik oldal		Másik oldal		LMTD	Q (MW)	α (W/m ² K)	A (m ²)
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)				
Szűkületi pont alatt								
HX1	129,7	80	149,7	110	24,7	3,542	310	463
HX2	101,4	73,3	80	15,2	36,7	4,637	310	407
HX3	129,7	109,9	149,7	130	20,0	1,564	340	229
HX4	131,8	90,7	109,9	15,2	43,3	7,481	340	508
HX5	149,7	61,5	129,7	15,2	31,3	4,41	340	414
HX6	149,7	40	129,7	15,2	22,3	4,415	310	638
HX8	129,7	15,2	149,7	44,4	24,3	2,338	310	310
HX9	98	53,2	149,7	122,3	60,0	0,887	310	47
Szűkületi pont felett								
HX10	293,8	233	265,6	206,8	27,2	5,423	310	643
HX11	233	149,7	213	130	19,8	7,430	310	1207
HX13	293,7	260,7	237,6	206,8	55,0	2,620	340	140
HX14	260,7	221,4	213	130	67,2	3,120	340	136
HX15	221,4	208,8	188,2	183,7	29,0	1,003	310	111
HX16	208,8	149,7	137,4	129,7	40,4	4,695	310	375
HX17	201,5	149,7	181,5	130	19,8	2,59	340	383
HX19	232,2	149,7	213	130	19,4	3,317	310	550
HX21	266,7	233	203,2	181,5	57,3	1,092	340	56
HX22	233	149,7	213	130	19,8	2,699	340	400
HX26	188,4	149,7	137,4	129,7	33,1	0,855	455	56
HX27	285,5	233	226,75	206,8	40,3	0,998	310	80
HX28	233	149,7	213	130	19,8	1,582	310	257
HX30	310	243,5	258,2	206,8	43,8	3,338	170	448
HX31	233,7	150	213	130	20,3	4,203	170	1215
HX32	310	230	268,5	206,8	31,5	3,704	170	692
HX33	245,1	233,7	213	203,2	31,3	0,493	170	92
Csőkemencék								
ACSK	320	206,8	-	-	-	23,785		
VCSK	405	309	-	-	-	26,325		
Külső hűtők								
HX41	73,3	52,8	35	25	32,8	3,383	570	181
HX42	64,96	48	35	25	26,3	5,169	570	344
HX43	137,4	35	35	25	39,7	1,336	570	59
HX45	144,6	35	35	25	41,6	1,041	570	44
HX46	124,7	74,8	35	25	67,8	14,249	570	368
HX47	122,3	96,7	35	25	79,2	0,828	340	30
HX48	75	35	35	25	21,6	0,744	570	60
HX50	149,7	40	35	25	49,0	2,086	340	125
HX51	90,7	50	35	25	38,3	7,418	255	759
HX52	131,9	40	35	25	43,9	1,799	255	160

9. táblázat

A REB kőolaj feldolgozása során alkalmazott hőcserélők adatai

A termékek kitárolási hőmérsékletre történő hűtéséhez szükséges külső, vizes hűtők esetén sem 20 °C-os hajtóerővel számoltam. Ennek, oka, hogy a célhőmérséklet több esetben 35-40 °C, amit a 25 °C-os átlag kiindulási hőmérsékletű hűtővízzel sehogyan sem lehetne teljesíteni. A hűtés során a hűtővíz megengedett hőmérséklet emelkedése 10 °C. Az alkalmazott minimális hőmérsékletkülönbséget a vizes hűtők esetén 10 °C-nak választottam. Ez nagyobb hőcserélő felületeket jelent, mint 20 °C esetén, viszont több esetben még így is kis felületigényű hőcserélőt kaptam. Éppen ezért, megvizsgáltam ezeknek a külső hűtőknek a szükségességét az egyes termékek biztonságos tárolhatóságának figyelembe vételével. Azokban az esetekben, ahol a kis felületű külső hűtő alkalmazása nélkül is biztonságos tárolási hőmérséklet érhető el, eltekintettem a hőcserélő berendezések szükségességétől, míg másutt a kis felületek ellenére is indokoltnak tartom azok beépítését.

A REB típusú kőolaj esetén így, az egyes módszerekkel számolt minimálisan szükséges külső fűtési és hűtési energiák a 10. táblázatban láthatók.

	Minimális hűtésigény (MW)	Minimális fűtésigény (MW)
Energiaintegráció nélkül	116,772	128,627
Kompozitgörbék alapján	38,345	50,191
Nagy kompozitgörbe alapján	38,345	50,191
Hálózattervezéssel	38,056	50,194

10. táblázat
A szükséges külső energiák mennyisége

A hálózattervezés során kapott értékek esetén a kompozitgörbékhez viszonyított eltérések okai a hálózattervezés során bemutatott üzemeltetésre, felületre, hajtóerő változtatásra vonatkozó korlátozásokból erednek. Látható, hogy minden esetben igen jelentős külső energiafelhasználás csökkenés tapasztalható, ami az üzemeltetési költségek csökkentését is eredményezi. Emellett a fűtésigény drasztikus csökkenésével az üzem káros anyag kibocsátása is csökkenthető.

4.3.2 Az „A” típusú kőolaj feldolgozása esetén kapott eredmények

Az „A” típusú könnyebb kőolaj esetén hasonlóan jártam el, mint a REB típusú kőolajnál.

A technológiai áramok adatait, csoportosítását a 11. és 12. táblázatokban foglaltam össze. Az adatok alapján számolt kompozitgörbéket, illetve a nagy kompozitgörbét a 12. ábrán és a 13. ábrán tüntettem fel.

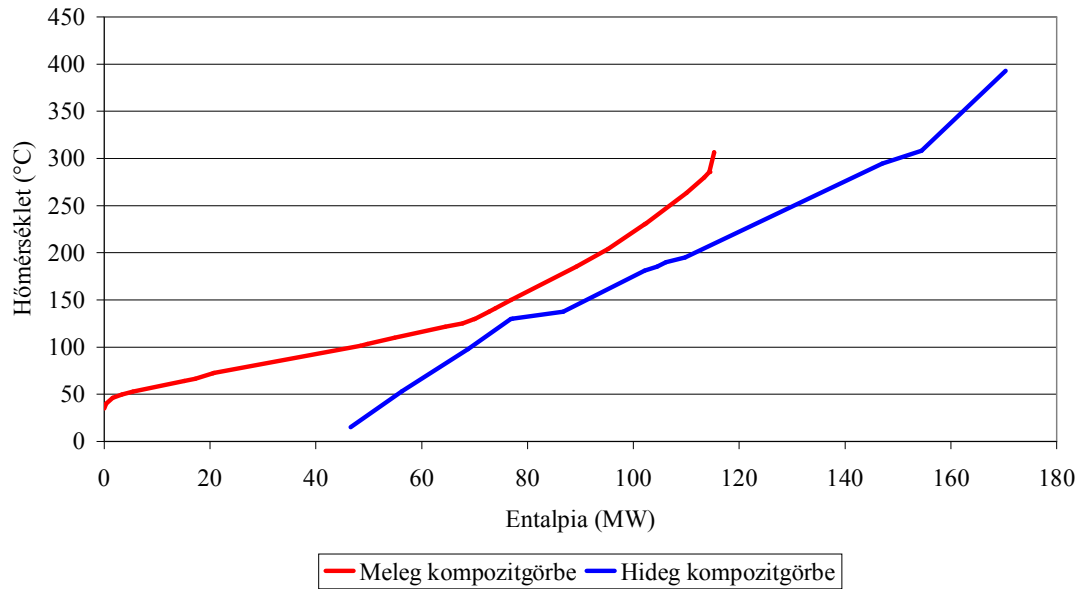
Áram neve	Ts (°C)	Tt (°C)	CP (MW/°C)	dH (MW)
A-Ep_k	101,6	52,9	0,217	10,562
A-St_k	66,5	46,4	0,340	6,838
A-Kn_b	137,4	35	0,018	1,910
A-PB	46,4	40	0,006	0,041
A-Kz_b	140,9	35	0,016	1,708
A-A_k	125,1	72,3	0,414	21,874
A-AR1	204,2	64,2	0,050	7,000
A-AR2	263,4	103,4	0,034	5,500
A-N_b	72,5	35	0,032	1,206
A-Petr	185,5	40	0,031	4,629
A-KGO	231,2	40	0,047	9,136
A-NGO	279,9	40	0,025	6,118
A-VGO_R	129,7	49,7	0,112	9,017
A-SZPOD_R	285,5	121,5	0,073	12,000
A-Q	306,4	230	0,018	1,401
A-VGO	129,9	40	0,018	1,680
A-SZPOD	285,6	110	0,062	11,003
A-Gudron	306,6	150	0,023	3,591

11. táblázat
A technológiai meleg áramok adatai

Áram neve	Ts (°C)	T t(°C)	CP (MW/°C)	dH (MW)
A-KoI	15	130	0,253	29,118
A-KoII	130	195	0,352	22,903
A-St_be	53,2	98	0,026	1,172
A-St_r	129,7	137,4	0,939	7,235
A-ACSK	190,1	308	0,374	44,097
A-SS	181,1	185,3	0,214	0,901
A-VCSK	294,7	393	0,186	18,319

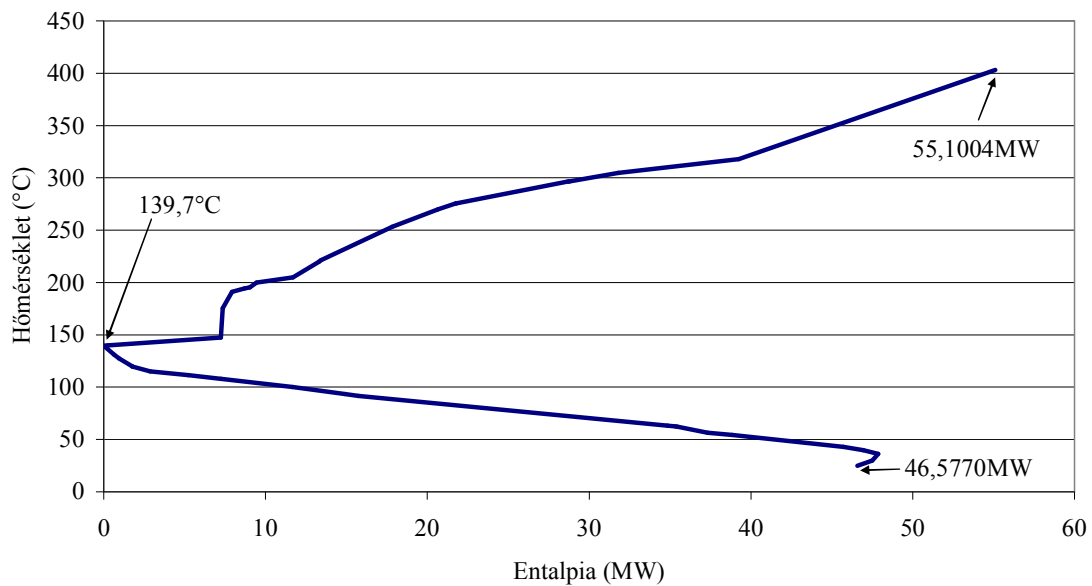
12. táblázat
A technológiai hideg áramok adatai

Kompozitgörbék az "A" jelű kőolaj esetén



12. ábra
A hideg és meleg kompozitgörbe az „A” kőolaj esetén

Nagy kompozitgörbe az "A" típusú kőolaj esetén



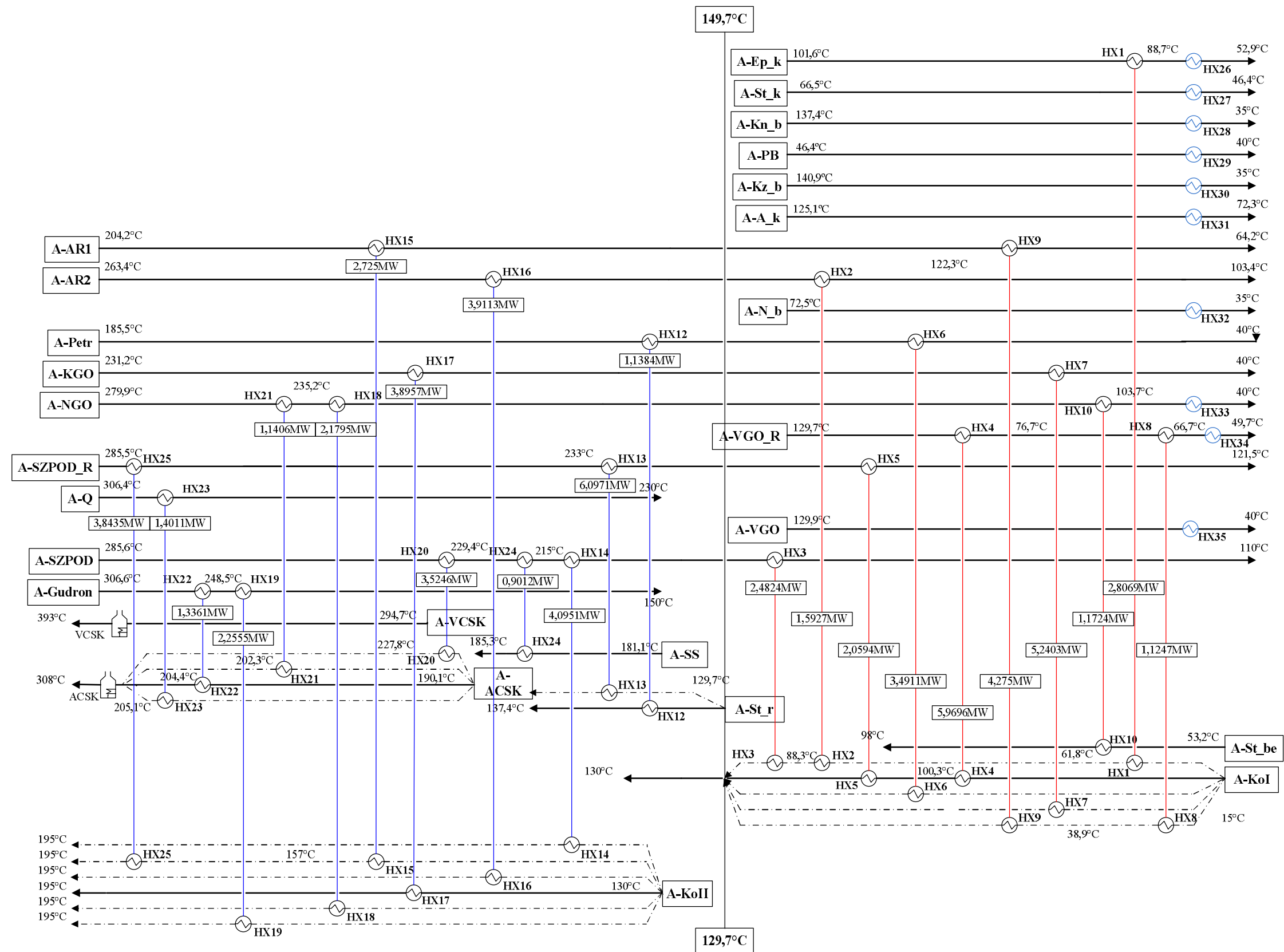
13. ábra
A nagy kompozitgörbe az „A” kőolaj esetén

Ebben az esetben az energiaiintegráció után a minimálisan szükséges hűtési igény **46,577 MW**, minimális fűtési igény pedig **55,1 MW**, ahogy ez a nagy kompozitgörbéről leolvasható.

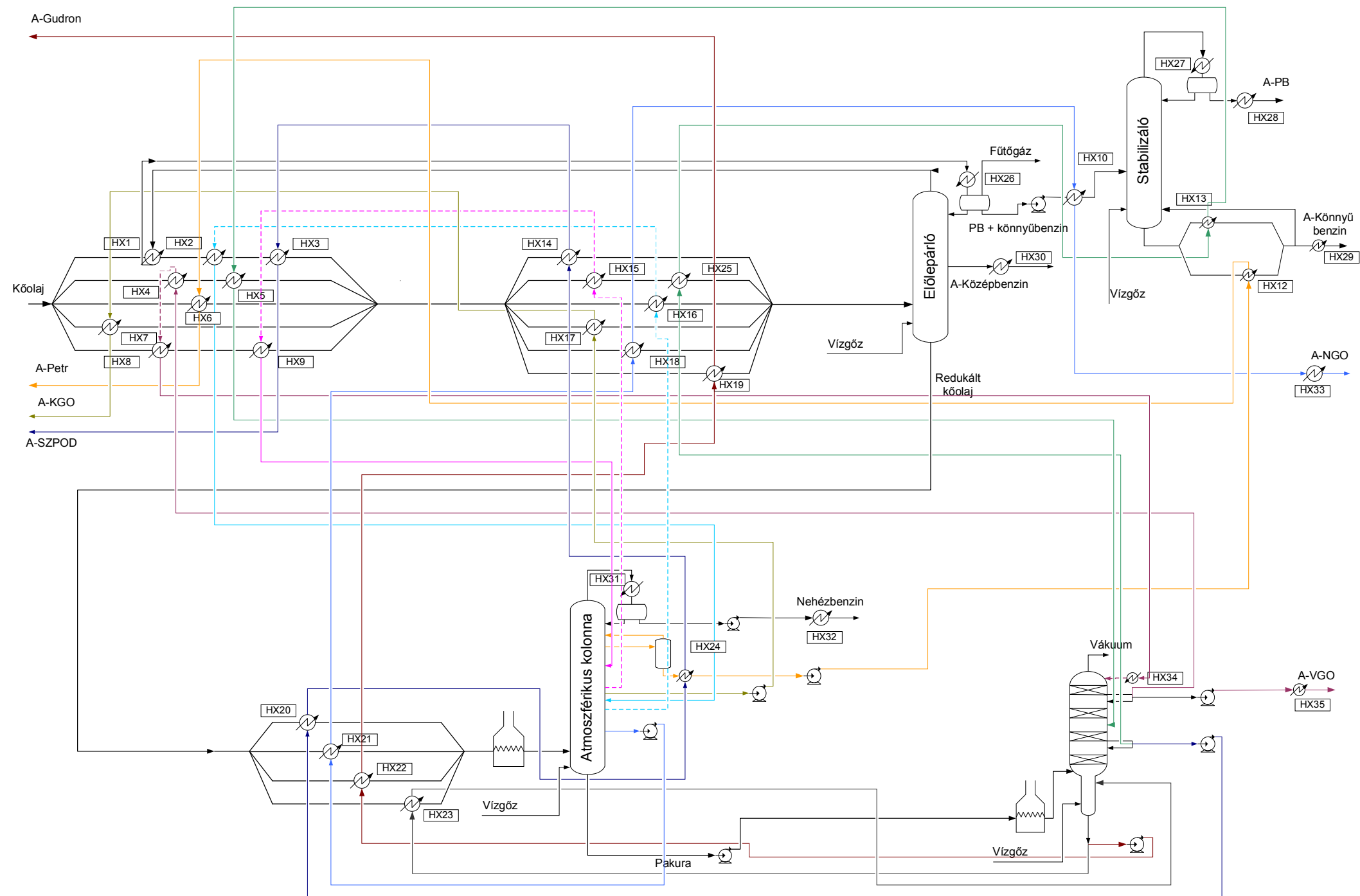
A nagy kompozitgörbén jól látható, hogy a szűkületi pont itt is **139,7 °C**, tehát a meleg oldali szűkületi hőmérséklet szintén **149,7 °C**, ahogy a hideg oldali szűkületi hőmérséklet is azonosan **129,7 °C**.

A hálózattervezés során úgy jártam el, mint az előző esetben, azzal a különbséggel, hogy a REB típusú kőolaj hálózattervezése során tapasztalt problémákat és azok megoldásait már adottnak tekintettem. Ennek megfelelően itt is olyan hálódigramot terveztem, ahol a stabilizáló oszlop kiforrálóját csupán két ágra kell osztani. Itt is vizsgáltam a kőolaj só- és vízmentesítőből kilépő áram felmelegítéséhez szükséges felületek alakulását, és hasonlóan az előző esethez itt is eltekintettem ennek az áramnak a 130 °C-ra történő felmelegítésétől. Emiatt szintén szükséges néhány folyamat-folyamat hőcserélő esetén a minimális hajtóerő 20 °C-ról 19,7 °C-ra történő csökkentése. Ebben az esetben is vizsgáltam a külső hűtők felületigényét az alkalmazásuk szükségességével kapcsolatban.

Az „A” jelű könnyű kőolaj esetén ilyen módon kapott optimális hőcserélő hálózat hálódigramját a 14. ábrán tüntettem fel, az ez alapján készített technológiai folyamatábrát pedig a 15. ábra szemlélteti.



14. ábra
Az „A” kőolaj feldolgozására alkalmas hőcserélő hálózat hálódigramja



15. ábra
Az „A” kőolaj feldolgozására alkalmas AV üzem technológiai folyamatábrája

Az egyes hőcserélők fontosabb adatait a 13. táblázatban foglaltam össze.

Hőcserélő	Egyik oldal		Másik oldal		LMTD	Q (MW)	α (W/m²K)	A (m²)
	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)				
Szűkületi pont alatt								
HX1	101,6	88,7	61,8	15	55,0	2,807	310	165
HX2	149,7	103,4	88,3	61,8	50,9	1,593	310	101
HX3	149,7	110	129,7	88,3	20,8	2,482	310	384
HX4	129,7	76,7	100,3	15	43,6	5,970	340	403
HX5	149,7	121,5	129,7	100,3	20,6	2,059	340	294
HX6	149,7	40	129,7	15	22,4	3,491	310	503
HX7	149,7	40	129,7	15	22,4	5,240	310	754
HX8	76,7	66,7	38,9	15	44,4	1,125	340	75
HX9	149,7	64,2	129,7	38,9	22,5	4,275	340	558
HX10	149,7	103,7	98	53,2	51,1	1,172	310	74
Szűkületi pont felett								
HX12	185,5	149,7	137,4	129,7	32,0	1,138	455	78
HX13	233	149,7	137,4	129,7	48,3	6,097	340	371
HX14	215	149,7	195	130	19,8	4,095	310	666
HX15	204,2	149,7	157	130	31,5	2,725	340	255
HX16	263,4	149,7	195	130	39,1	3,911	340	294
HX17	231,2	149,7	195	130	27,1	3,896	310	463
HX18	235,2	149,7	195	130	28,7	2,180	310	245
HX19	248,5	150	195	130	34,0	2,256	170	390
HX20	285,6	229,4	227,8	190,1	48,0	3,525	310	237
HX21	279,9	238,2	202,3	190,1	61,7	1,141	310	60
HX22	306,6	248,5	204,4	190,1	78,3	1,336	170	100
HX23	306,4	230	205,1	190,1	65,9	1,401	170	125
HX24	229,4	215	185,3	181,1	38,8	0,901	310	75
HX25	285,5	233	195	157	83,0	3,844	340	136
Csőkemencék								
ACSK	308	190,1	-	-	-	36,695	-	-
VCSK	393	294,7	-	-	-	18,319	-	-
Külső hűtők								
HX26	88,7	52,9	35	25	39,4	7,755	570	345
HX27	66,5	46,4	35	25	26,1	6,838	570	459
HX28	137,4	35	35	25	39,7	1,910	570	84
HX30	140,9	35	35	25	40,6	1,708	570	74
HX31	125,1	72,3	35	25	66,4	21,874	570	578
HX32	72,5	35	35	25	20,8	1,207	570	102
HX33	103,7	40	35	25	35,3	1,626	340	136
HX34	66,7	49,7	35	25	28,1	1,923	255	269
HX35	129,9	40	35	25	43,3	1,680	255	152

13. táblázat

Az „A” kőolaj feldolgozása során alkalmazott hőcserélők adatai

A különböző módszerekkel meghatározott minimálisan szükséges külső hűtési és fűtési igényeket az 14. táblázatban foglaltam össze.

	Minimális hűtésigény (MW)	Minimális fűtésigény (MW)
Energiaintegráció nélkül	115,229	123,752
Kompozitgörbék alapján	46,577	55,100
Nagy kompozitgörbe alapján	46,577	55,100
Hálózattervezéssel	46,522	55,015

14. táblázat

Az egyes módszerekkel számolt külső energia igények

A hálózattervezés során kapott értékek azonos okok miatt térnek el a kompozitgörbék esetén számoltaktól, mint a REB kőolajnál.

5 A kapott eredmények elemzése, értékelése

A desztillációs üzem rugalmasságának vizsgálatához az egyes alapanyagok esetén kapott eredményeket össze kell hasonlítani. Meg kell vizsgálni, hogy az egyes esetekben kialakított hőcserélő hálózatok milyen mértékben különböznek egymástól. Az értékelés során meghatározom azt az optimális hőcserélő hálózat kialakítást, ami ahhoz szükséges, hogy az adott desztillációs üzem eltérő alapanyagok esetén is azonos minőségű termékek előállítására legyen alkalmas.

Az eredmények összehasonlítását többféle szempont alapján végzem el. Vizsgálom többek között az egyes esetekben szükséges minimálisan szükséges külső energia mennyiségét; a szükséges összes hőcserélő felület nagyságát; a széndioxid kibocsátás mértékét. Végül meghatározom az optimális hőcserélő hálózatot.

5.1 A felhasznált külső energiák mennyisége

A két kőolaj típus feldolgozása esetén szükséges minimális külső fűtési és hűtési igényeket az 15. táblázatban foglaltam össze.

	REB kőolaj	"A" kőolaj
Energiaintegráció nélkül		
Q_{HMIN} (MW)	128,627	123,752
Q_{CMIN} (MW)	116,772	115,229
Kompozitgörbék alapján		
Q_{HMIN} (MW)	50,190	55,100
Q_{CMIN} (MW)	38,345	46,577
Tervezett hőcserélő hálózattal		
Q_{HMIN} (MW)	50,194	55,015
Q_{CMIN} (MW)	38,056	46,522

15. táblázat

A külső energia igények összehasonlítása

Látható, hogy a könnyebb kőolaj esetén alacsonyabb hőmérséklet profil mellett is elérhető a megfelelő termékminőség. Éppen az alacsonyabb hőmérsékletek miatt azonban a folyamat melegáramainak hőtartalmát kevésbé lehet felhasználni a hideg áramok felmelegítésére. Így adott minimális hajtóerő különbség mellett kialakított hőcserélő hálózat esetén több külső fűtésre, hűtésre van szükség az „A” típusú kőolaj esetén.

Mivel a hálózattervezés során a minimális hajtóerő különbséget (20 °C) megsértettem, illetve a kőolaj só- és vízmentesítőből kilépő kőolaj áramot nem melegítettem fel a kívánt 130 °C-ra, valamint egyes termékáramok hűtését nem valósítottam meg, így mindkét kőolaj esetén

érthető, hogy a hálózattervezés során kisebb külső energiaigény lép fel, mint a kompozitgörbék meghatározása során.

5.2 A szükséges hőcserélő felületek

Az egyes kőolaj típusok esetén szükséges összes hőcserélő felület nagyságát a 16. táblázatban foglaltam össze.

	REB kőolaj	"A" kőolaj
Összes felület (m²)	11998	9003
Ebből		
Folyamat-folyamat (m²)	9865	6805
Külső (m²)	2133	2198
Szüksületi pont felett		
Folyamat-folyamat (m²)	6847	3495
Külső (m²)	2 csökemence	2 csökemence
Szüksületi pont alatt		
Összes felület (m²)	5151	5508
Ebből		
Folyamat-folyamat (m²)	3018	3310
Külső (m²)	2133	2198

16. táblázat
A szükséges hőcserélő felületek összevetése

A könnyebb kőolaj estén az alacsonyabb hőmérséklet szint következménye az is, hogy lényegesen kevesebb a szükségleti pont feletti részen szükséges hőcserélő felület nagysága, ugyanis a melegáramok hőtartalma kevésbé használható fel folyamat-folyamat hőcsere során. A szükségleti pont alatti részre vonatkozó adatok esetén gyakorlatilag nem tapasztalható különbség a felületigényekben.

5.3 Alkalmazott hőcserélők száma

A REB típusú kőolaj esetén több hőcserélő beépítése szükséges a megfelelő hőcserélő hálózat kialakításához. Ez összefügg a korábban bemutatottakkal, hiszen ez is arra utal, hogy nagyobb mértékben lehet kihasználni a melegáramok hőtartalmát. A szükséges hőcserélő számokat a 17. táblázatban foglaltam össze.

	REB kőolaj	"A" kőolaj
Szűkületi pont felett		
Folyamat-folyamat	17	14
Külső	2 csökemence	2 csökemence
Szűkületi pont alatt		
Folyamat-folyamat	8	10
Külső	10	9
Összes hőcserélő szám	35	33

17. táblázat
A hőcserélők számának összehasonlítása

5.4 A szűkületi pont helye

Ahogy azt már a könnyű kőolaj kompozitgörbéinek meghatározása során említettem, a szűkületi pont, szűkületi hőmérséklet mindkét kőolaj esetén **139,7 °C**, így a hideg oldali szűkületi hőmérséklet **129,7 °C**, a meleg oldali pedig **149,7 °C**.

5.5 A csökemencék hőigénye

Mindkét kőolaj feldolgozása során két-két csökemence alkalmazása szükséges. Az egyikkel az atmoszférikus desztillációs oszlop előtt, a másikkal pedig a vákuum desztillációs oszlop előtt melegítem fel az egyes áramokat a megfelelő belépési hőmérsékletre. A felmelegítéshez szükséges hőmennyiségeket az egyes esetekben a 18. táblázatban tüntettem fel.

	REB kőolaj	"A" kőolaj
Energiaintegráció nélküli hőigény (MW)		
ACSK	39,869	44,097
VCSK	26,325	18,319
Tervezett hőcserélő hálózattal szükséges hőigény (MW)		
ACSK	23,785	36,695
VCSK	26,325	18,319

18. táblázat
A csökemencék összehasonlítása

A vákuum oszlop előtti csökemencék esetén elmondható, hogy mindkét esetben már magas kiindulási hőmérsékletű áramokat melegítenek még magasabb belépési hőmérsékletre, ezért egyik melegáramot sem lehet a pakura melegítésére alkalmazni. Az atmoszférikus oszlop előtti csökemence esetében a befektetett külső energia mennyisége csökkenthető a meleg technológiai áramok hűtéséből származó hőmennyiséggel, amit a 18. táblázat adatai is mutatnak.

5.6 A széndioxid kibocsátás alakulása

Az energiai integráció egyik fontos hajtóereje a károsanyag kibocsátás csökkentése. Ugyanis azáltal, hogy a technológiai áramok hőigényeit külső források helyett technológiai áramok segítségével fedezik, csökken a felhasznált külső energiaforrások, így az elhasznált tüzelőanyag mennyisége is. Tehát csökken a károsanyag kibocsátás mértéke.

Földgáz tüzelésű csökemencék alkalmazását tekintve az alábbiakban bemutatom, hogyan változik az egyes esetekben kibocsátott CO₂ mennyisége éves szinten egy atmoszférikus és vákuumdesztilláló üzemben. A számítások során a földgáz tökéletes égését feltételeztem, valamint az egyes csökemencék esetén 90%-os hatásfokot.

Szükséges adatok:

- a metán égéshője: **40 MJ/Nm³**,
- a széndioxid sűrűsége: **1,96 kg/m³**
- a normál állapothoz tartozó moláris térfogat: **22,41 dm³/mol**.

A számolás menete a REB típusú kőolaj kiindulási esetén, azaz amikor az összes külső fűtési energiát külső energiaforrásból fedezzük. A többi esetben csupán a végeredményt mutatom be.

A szükséges külső energia mennyisége: 128,627 MW. A csökemence 90%-os hatásfokát tekintve a szükséges befektetett energia:

$$\frac{128,627 \text{ MW}}{0,9} = 142,918 \text{ MW}$$

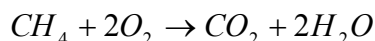
A megfelelő fajlagos hőigény:

$$142,918 \text{ MW} = 514505 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}$$

A metán égéshőjét felhasználva kiszámoltam a szükséges földgáz mennyiségét:

$$\frac{514505 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}}{40 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3}} = 12863 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

A metán tökéletes égését feltételezve, látható, hogy a metán és a keletkező széndioxid 1:1 mol arányú.



Innen a széndioxid sűrűsége ismeretében kiszámolható a keletkező széndioxid mennyisége:

$$12863 \frac{Nm^3}{h} \cdot 1,96 \frac{kg}{m^3} = 25211 \frac{kg}{h} = 25,211 \frac{t}{h}$$

25,21 t/h a széndioxid kibocsátás, ami **0,2208 milliót/évnek** felel meg.

Tehát az egyes esetekben tapasztalt széndioxid kibocsátás mértékét a 19. táblázatban foglaltam össze.

	REB kőolaj	"A" kőolaj
	Széndioxid kibocsátás t/h	
Energiaintegráció nélkül	25,21	24,26
Tervezett hőcserélő	9,82	10,78

19. táblázat
Károsanyag kibocsátás

Jelentős csökkenés figyelhető meg mindkét esetben az energiaintegrációt követően, azaz egyértelműen látszik annak kiemelkedő jelentősége a károsanyag kibocsátás terén. Megfigyelhető, hogy a könnyebb kőolaj esetén a hőcserélő hálózat szintézist követően, nagyobb külső energia felhasználásnak megfelelően nagyobb a károsanyag kibocsátás mértéke is mint a közepes kőolaj esetén.

5.7 Optimális hőcserélő hálózat kialakítása

Mindkét kőolaj típus esetén megterveztem az üzemeltetésnek, minimális felület igénynek megfelelő hőcserélő hálózatot. Az alábbiakban ezek összehasonlítását végzem el, és megtervezem az atmoszférikus és vákuum desztillációs rugalmasságát biztosító optimális hőcserélő hálózatot.

Bemutattam, hogy a REB típusú kőolaj esetén nagyobb az összes felületigény a hőcserélő hálózatnál, így az optimális kialakításnál ezt vettem figyelembe, ehhez hasonlítottam a könnyebb kőolaj esetén kapott hőcserélő hálózatot. Azokban az esetekben, ahol mindkét alapanyagnál megtalálhatóak voltak az egyes hőcserélők, ott a nagyobb felületűeket választottam az optimális kialakítás megvalósításához, hiszen így válik lehetővé mindkét kőolaj típus megfelelő feldolgozása.

Ahogy az a szükséges felület nagyságából is látható volt, a szűkületi pont alatti részen nagyjából azonos hőcserélő sor szükséges a kőolaj áram felmelegítésére. A REB típusú kőolaj szűkületi pont alatti részén a kőolajáram felmelegítésére szolgáló hőcserélő sort csupán két kisebb méretű hőcserélő beépítésével optimálissá lehet tenni mindkét alapanyag esetére. A két beépítendő hőcserélő a **HX5** és a **HX8**. Eltérő melegáramok hőmennyisége szükséges az egyes esetekben a stabilizáló oszlop betáplálási áramának felmelegítéséhez. A REB kőolaj

esetén az atmoszférikus oszlop alsó cirkulációs áramának, míg az „A” kőolaj esetén a nehéz gázolaj termékáramának hőmennyisége szükséges a megfelelő hőmérséklet biztosításához.

A szűkületi pont feletti rész esetén is elmondható általánosságban, hogy a hőcserélő felületek szükségességét a nehezebb kőolaj szabja meg, hiszen a kapott nagyfelületű hőcserélők megfelelő kapcsolásával a könnyebb kőolaj is feldolgozható. Ennek megfelelően a kőolaj só- és vízmentesítőből kilépő szűkületi pont feletti kőolaj áram felmelegítésére a könnyebb kőolaj esetén is azonos hőcserélő sor használható megfelelő kapcsolással.

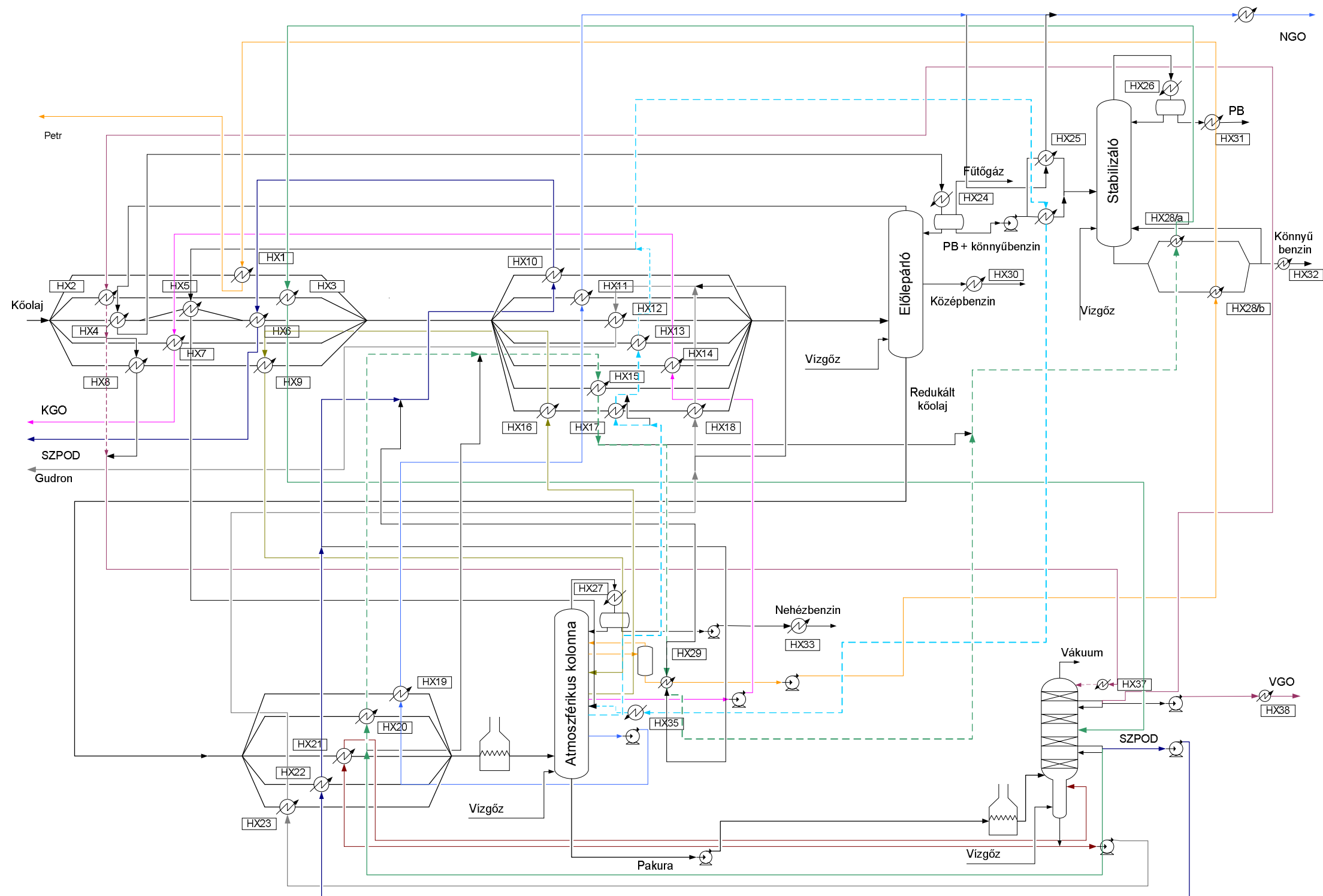
A két kőolaj feldolgozása során több termékáram, cirkulációs áram esetén eltérő sorrendben követeik egymást a szükséges hőcserélők, amit azonban megfelelő csőhálózat kiépítésével biztosítani lehet. Eltérő technológiai melegáramok hőmennyiségét kell felhasználni például az atmoszférikus oszlop petróleum kiforrálójához. A REB kőolaj esetén a vákuum oszlop szélespárlat termékárama, míg a könnyebb, „A” kőolaj esetén a szélespárlat cirkulációs árama biztosítja a megfelelő hőmennyiséget.

Az egyes technológiai melegáramok útvonalát a 20. táblázatban tüntettem fel. A táblázatban dőlt betűvel szedtem azokat a hőcserélőket, amelyek különbözőek a megfelelő áram esetén. A 16. ábraán a fentieknek megfelelően az optimális hőcserélő hálózat kialakítását mutatom be. A színes áramokról kiinduló fekete leágazások az „A” kőolaj esetén lévő különbségeket mutatják.

Az áram neve	1. hőcserélő száma	2. hőcserélő száma	3. hőcserélő száma	4. hőcserélő száma	5. hőcserélő száma
Ep_k	HX4	HX24			
A-Ep_k	HX4	HX24			
St_k	HX26				
A-St_k	HX26				
Kn_b	HX32				
A-Kn_b	HX32				
PB	HX31				
A-PB	HX31				
Kz_b	HX30				
A-Kz_b	HX30				
A_k	HX27				
A-A_k	HX27				
AR1	HX16	HX9			
A-AR1	HX16	HX9			
AR2	<i>HX17</i>	HX13	<i>HX25</i>	<i>HX35</i>	
A-AR2	HX13	<i>HX5</i>			
Nb_b	HX33				
A-NB_b	HX33				
Petr	HX28/b	HX1			
A-Petr	HX28/b	HX1			
KGO	HX14	HX7			
A-KGO	HX14	HX7			
NGO	HX19	HX11	HX36		
A-NGO	HX19	HX11	<i>HX25</i>	HX36	
VGO_R	HX2	HX37			
A-VGO_R	HX2	<i>HX8</i>	HX37		
SZPOD_R	<i>HX20</i>	HX15	<i>HX29</i>	HX28/a	HX3
A-SZPOD_R	HX15	HX28/a	HX3		
Q	HX21				
A-Q	HX21				
VGO	HX38				
A-VGO	HX38				
SZPOD	HX22	HX10	HX6		
A-SZPOD	HX22	<i>HX29</i>	HX10	HX6	
Gudron	HX23	<i>HX18</i>	HX12		
A-Gudron	HX23	HX12			

20. táblázat

Az egyes technológiai áramok útja a hőcserélők mentén



16. ábra
Az optimális hőcserélő hálózat kialakítása az eltérő típusú kőolajok feldolgozására

Az optimális hőcserélő hálózat esetén szükséges hőcserélők felületigényét a 21. és a 22. táblázatban tüntettem fel.

Név	Felület (m ²)	Név	Felület (m ²)
HX1	503	HX10	1208
HX2	508	HX11	257
HX3	230	HX12	1215
HX4	407	HX13	400
HX5	101	HX14	550
HX6	456	HX15	137
HX7	754	HX16	384
HX8	75	HX17	56
HX9	558	HX18	93

21. táblázat
A szükséges hőcserélők felülete I.

Név	Felület (m ²)	Név	Felület (m ²)	Név	Felület (m ²)
HX19	80	HX24	345	HX30	74
HX20	140	HX25	74	HX31	84
HX21	692	HX26	459	HX32	59
HX22	644	HX27	578	HX33	102
HX23	448	HX28/a	375	HX35	31
		HX28/b	78	HX36	136
		HX29	112	HX37	759
				HX38	161

22. táblázat
A szükséges hőcserélők felülete II.

Az optimális hőcserélő hálózat kialakításához, tehát az összes felületigény: **13320 m²**. Ez több mint az egyes esetekben számolt összes felületigény, azonban ilyen kialakítás esetén biztosítható a desztillációs üzem rugalmassága, vagyis, hogy eltérő alapanyagok esetén azonos termékminőségek előállítására legyen képes.

6 Összefoglalás, további célkitűzések

A TDK dolgozatomban elkészítettem az irodalmi összefoglalót, valamint a szimulációs modelleket az egyes kőolajtípusokat felhasználva. A modellek adatai alapján elvégeztem az energiaiintegrációt, meghatároztam a szűkületi pont értékét, a minimálisan szükséges külső energiaigényeket, majd az egyes kőolaj típusok esetén megterveztem a szükséges hőcserélő hálózatot.

A két kőolaj esetén kapott hőcserélő hálózatot összehasonlítva, megterveztem a desztillációs üzem rugalmasságát biztosító optimális hőcserélő hálózat kialakítását. Ennek révén eltérő alapanyagok esetén is azonos termékminőségek előállítása lehetséges, miközben az energiaiintegrációnak köszönhetően csökkenthető a károsanyag kibocsátás mértéke.

A későbbiekben egy a REB típusú kőolajnál nehezebb kőolaj esetén is elvégzem a hálózattervezést, majd így már a három eltérő típusú kőolaj megfelelő feldolgozására alkalmas optimális hőcserélő hálózat kialakítását fogom vizsgálni, ami még rugalmasabbá teszi az atmoszférikus és vákuum desztillációs üzemet.

7 Irodalomjegyzék

- [1]. Az európai Községek Bizottsága: A Bizottság Közleménye
- [2]. IEA Statistics-2011 Edition
- [3]. Varga, Z., Kubovics Stocz, K., Rabi, I., Lörincová, M., Polakovičová, M., „Improve of Energy Efficiency a Tool for Reduction of CO₂”, Chemical Engineering Transactions, 2009, 18, 463-468
- [4]. Thernesz, A., Varga, Z., Rabi, I., Czaltang, Zs., Lörincova, M., „Applying process design softwer for capacity increase and revamp of distillation units”, Clean Techn Environ Policy, 2010, 12(2), 97-103
- [5]. Hancsók, J., „Korszerű motor és sugárhajtómű üzemanyagok I. Motorbenzinek”, Tankönyv, 1997, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém (ISBN 963733274 X), 219 oldal
- [6]. Varga, Z., Rabi, I., Kubovics Stocz, K., „Process Simulation for Improved Energy Efficiency, Maximised Asset Utilization and Increase in Feed Flexibility in a Crude Oil Refinery”, Hydrocarbon World, 2011, 6(1), 39-42
- [7]. Verheyen, W., Zhang, N., „Design of flexible heat exchanger network for multi-period operation”, Chemical Engineering Science, 2006, 61, 7730-7753
- [8]. Felber, G., „Eljárástervezés III.”, 1995, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 85 oldal
- [9]. Furman, K. C., Sahinidis, N. V., „A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis int he 20th Century,” Ind. Eng. Chem. Res., 2002, 41, 2335-2370
- [10]. EL-Temtamy, S. A., Gabr, E. M., „Flexible Heat Exchanger Networks”, Chemical Engineering, 2011, 118
- [11]. Czuczai, B., Farkas, T., Rév, E., Fonyó, Zs., Lelkes, Z., „Desztillációs kolonna R-gráf alapú szuperstuktúrája és MINLP modellje”, Acta Agraria Kaposváriensis, 2006, 10(1), 177-184
- [12]. Tantimuratha, L., Asteris, G., Antonopoulos, D. K., Kokossis, A. C., „A conceptual programming approach for the design of flexible HENs”, Computers and Chemical Engineering, 2001, 25, 887-892
- [13]. Castier, M., „Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting”, Applied Thermal Engineering, 2007, 27, 1653-1656

- [14]. Fonyó, Zs., „A vegyipari folyamattervezés koncepcionális kihívásai”, Előadás 2004. november 16.
- [15]. Gadalla, M., Olujic, Z., Sun, L., De Rijke, A., Jansens, P. J., „Pinch Analysis-Based Approach to Conceptual Design of Internally Heat-Integrated Distillation Columns”, Chemical Engineering Research and Design, 2005, 83(A8), 987-993
- [16]. Liebmann, K., Dhole, V. R., Jobson, M. „Integrated Design of a Conventional Crude Oil Distillation Tower Using Pinch Analysis”, Trans IChemE, 1998, 76,
- [17]. Liebmann, K., Dhole, V. R., „Integrated Creude Distillation Design”, Computers chem. Engng, 1995, 19(Suppl.), S119-S124
- [18]. Benali, T., Tondeur, D., Jaubert, J. N., „An improved crude oil atmospheric distillation process for energy integration: Part II: New approach for energy saving by use of residual heat”, Applied Thermal Engineering, 2012, 40,
- [19]. Zhelev, T., „The conceptual design approach – A process integration approach ont he move, Resources”, Conservation and Recycling, 2007, 50, 143-157
- [20]. Nelson, A. M., Liu, Y. A., „Hydrogen-Pinch Analysis Made Easy”, Chemical Engineering, 2008, 56-61
- [21]. Optimalizálás az olajiparban, Jegyzet, 2009.
- [22]. Kémiai technológiák III, Előadás ábrák, 2010/2011
- [23]. A kőolajipar gazdaságtana, Előadás ábrák, 2011/2012
- [24]. Linhoff, B., Wtherell, W. D., „Pinch Technology Guides Retrofit”, Oil & Gas J., 1986, 54-65
- [25]. Linhoff, B., Vredeveld, D. R., „Pinch Technology Has Come of Age”, Cehm. Eng. Progress, 1984, 80(7), 33-40
- [26]. Tjoe, T. N., Linhiff, B., „Using Pinch Technology for Process Retrofit,” Chem. Eng., 1986, 47-60
- [27]. Linhoff, B., „Pinch Technology for the Synthesis of Optimal Heat and Power Systems”, Trans. of the ASME, J. of Eneergy Res. Tech, 1989, 111(3) 137-147
- [28]. Kőolajipari tervezés, Előadás ábrák, 2012/2013

Mellékeltek

	REB kőolaj	"A" kőolaj	REB kőolaj	"A" kőolaj	REB kőolaj	"A" kőolaj
ASTM D86 at 760 MM HG (LV)	Közép benzin	Közép benzin	Könnyű benzin	Könnyű benzin	Nehéz benzin	Nehéz benzin
IBP	29,9	27,3	26,4	25,8	46,2	43,3
5%	58,6	55,5	30,5	29,9	71,0	64,1
10%	77,1	77,8	35,7	35,0	92,6	89,5
30%	103,8	96,5	38,6	37,4	113,5	107,9
50%	115,5	110,4	45,7	45,0	124,4	121,3
70%	125,6	122,5	63,6	63,4	136,5	133,9
90%	143,0	141,2	83,9	80,0	150,0	150,0
95%	150,0	150,0	92,9	87,8	155,9	156,1
EBP	156,1	157,3	100,9	96,6	160,1	162,1

M-1. melléklet

Az eltérő kőolajokból származó termékek minőségi jellemzői 1.

	REB kőolaj	"A" kőolaj	REB kőolaj	"A" kőolaj	REB kőolaj	"A" kőolaj
ASTM D86 at 760 MM HG (LV)	Petróleum	Petróleum	KGO	KGO	NGO	NGO
IBP	129,4	120,8	148,3	135,6	146,0	126,5
5%	159,1	155,5	207,8	200,7	244,5	232,0
10%	172,3	173,4	229,0	226,7	287,5	283,3
30%	182,8	182,9	251,4	251,7	317,0	317,2
50%	190,6	189,9	262,2	260,8	328,6	329,7
70%	198,8	197,5	273,5	273,2	340,4	340,8
90%	208,1	207,9	291,0	291,3	361,2	362,0
95%	214,0	214,1	298,0	298,0	368,1	369,3
EBP	220,1	220,8	304,9	305,1	375,4	378,4

M-2. melléklet

A kőolajból származó termékek minőségi jellemzői 2.

	REB kőolaj	"A" kőolaj	REB kőolaj	"A" kőolaj
TBP at 760 MM HG (WT)	VAKUUMGO	VGO	SZPOD	SZPOD
IBP	244,3	236,5	353,9	345,4
5%	268,3	263,2	378,2	373,1
10%	281,6	277,7	388,7	384,9
30%	314,5	312,9	430,1	421,3
50%	336,9	336,9	466,4	455,4
70%	353,9	353,0	507,0	496,8
90%	370,8	370,5	552,3	549,9
95%	379,2	378,4	570,0	570,0

EBP	387,2	386,2	591,1	589,8
-----	-------	-------	-------	-------

M-3. melléklet

A kőolajból származó termékek minőségi jellemzői 3.

Tulajdonságok	REB kőolaj esetén	„A” kőolaj esetén
Fejghőmérséklet (°C)	101,4	101,6
Fejnyomás (bar)	4,5	4,5
Elméleti tányérszám	16	
Oldaltermékek (elvételi tányér száma)	4	
Fenékhőmérséklet (°C)	209,1	190,1
Fenéknomás (bar)	4,88	4,88
Sztrippgőz mennyisége és állapota	1,5t/h (250°C, 11bar)	

M-4. melléklet

Az előleparló oszlop főbb tulajdonságai.

Tulajdonságok	REB kőolaj esetén	„A” kőolaj esetén
Fejghőmérséklet (°C)	65,5	66,5
Fejnyomás (bar)	9,5	9,5
Elméleti tányérszám	25	
Fenékhőmérséklet (°C)	129,7	129,7
Fenéknomás (bar)	9,94	9,94

M-5. melléklet

A stabilizáló oszlop fontosabb tulajdonságai.

Tulajdonságok	REB kőolaj esetén	„A” kőolaj esetén
Fejghőmérséklet (°C)	124,7	125,1
Fejnyomás (bar)	0,98	0,98
Elméleti tányérszám	38	
Oldaltermékek (elvételi tányér száma)	Petróleum: 11 KGO: 19 NGO: 28	
Fenékhőmérséklet (°C)	303,7	290,8
Fenéknomás (bar)	1,14	1,14

M-6. melléklet

Az atmoszférus kolonna fontosabb paraméterei

	Kilépési tányér	Belépési tányér
AR1	16	15
AR2	24	23

M-7. melléklet

Az atmoszférus oszlop cirkulációs refluxainak adatai

Tulajdonságok	REB kőolaj esetén	„A” kőolaj esetén
---------------	-------------------	-------------------

Fejghőmérséklet (°C)	50	50
Fejnyomás (mbar)	43	43
Elméleti tányérszám	13	
Oldaltermékek (elvételi tányér száma)	VGO: 3 SZPOD: 9	
Fenékghőmérséklet (°C)	310	306,4
Fenéknyomás (mbar)	73	73

M-8. melléklet
A vákuum kolonna fontosabb paraméterei

	Kilépési tányér	Belépési tányér
VGO_R	3	1
SZPOD_R	9	7
Q	13	13

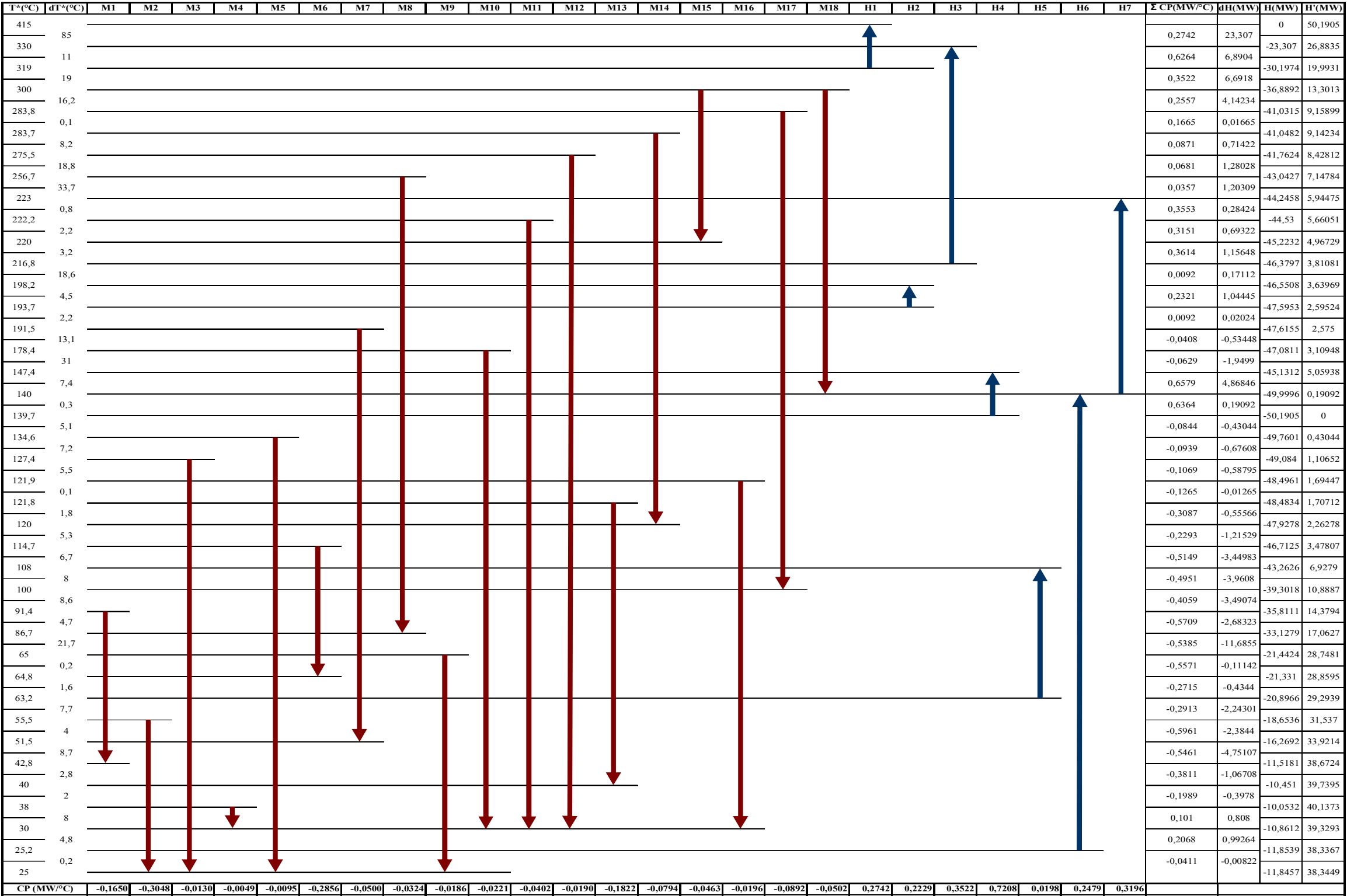
M-9. melléklet
A vákuum kolonna cirkulációs refluxai

T(°C)	dT(°C)	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	Σ CP(MW/°C)	dH(MW)	H(MW)	H'(MW)
405											128,609	166,954
320	85	↑							0,2741	23,2985	105,31	143,655
309	11	↑		↑					0,6263	6,8893	98,4208	136,766
213	96								0,3522	33,8112	64,6096	102,955
206,8	6,2			↑				↑	0,6718	4,16516	60,4445	98,7894
188,2	18,6								0,3196	5,94456	54,4999	92,8448
183,7	4,5		↑						0,5425	2,44125	52,0586	90,4035
137,4	46,3								0,3196	14,7975	37,2612	75,6061
130	7,4				↑			↑	1,0404	7,69896	29,5622	67,9071
129,7	0,3					↑			0,9687	0,29061	29,2716	67,6165
98	31,7						↑		0,2479	7,85843	21,4132	59,7581
53,2	44,8					↑			0,2677	11,993	9,4202	47,7651
15,2	38						↑		0,2479	9,4202	0	38,3449
CP (MW/°C)		0,2742	0,2229	0,3522	0,7208	0,0198	0,2479	0,3196				

M-10. melléklet
A hideg kompozitgörbe meghatározása

T(°C)	dT(°C)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	Σ CP(MW/°C)	dH(MW)	H(MW)
310																				0,0965	1,56268	116,772
293,8	16,2																			0,1857	0,01857	115,209
293,7	0,1																			0,2651	2,17382	115,19
285,5	8,2																			0,2841	5,34129	113,017
266,7	18,8																			0,3165	10,918	107,675
232,2	34,5																			0,3567	0,78477	96,7573
230	2,2																			0,3104	8,84729	95,9725
201,5	28,5																			0,3604	4,72165	87,1253
188,4	13,1																			0,3825	14,6876	82,4036
150	38,4																			0,3323	1,79448	67,716
144,6	5,4																			0,3418	2,46101	65,9215
137,4	7,2																			0,3549	1,9517	63,4605
131,9	5,5																			0,3744	0,03744	61,5088
131,8	0,1																			0,5566	1,00186	61,4714
130	1,8																			0,4772	2,52904	60,4695
124,7	5,3																			0,7627	11,2123	57,9405
110	14,7																			0,6735	5,79225	46,7282
101,4	8,6																			0,8385	3,94117	40,9359
96,7	4,7																			0,8062	17,4944	36,9947
75	21,7																			0,8248	0,16496	19,5003
74,8	0,2																			0,5392	5,01499	19,3354
65,5	9,3																			0,8440	3,37616	14,3204
61,5	4																			0,7940	6,90815	10,9442
52,8	8,7																			0,6290	1,76123	4,03609
50	2,8																			0,4469	0,89372	2,27485
48	2																			0,1469	1,17533	1,38113
40	8																			0,0412	0,20581	0,20581
35	5																					0
CP (MW/°C)		-0,1650	-0,3048	-0,0130	-0,0049	-0,0095	-0,2856	-0,0500	-0,0324	-0,0186	-0,0221	-0,0402	-0,0190	-0,1822	-0,0794	-0,0463	-0,0196	-0,0892	-0,0502			

M-11. melléklet
A meleg kompozitgörbe meghatározása



M-12. melléklet
A nagy kompozitgörbe meghatározása

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a szakmai segítséget témavezetőmnek, dr Varga Zoltán Tanár úrnak.

.....

Danics Nóra
(Vegyészmérnök hallgató)