

Tools and Methods in Aiding Heat Exchanger Network Retrofit for Better Economic Performance

Című Doktori Értekezés Kivonata

Yong Jun Yow

Témavezető: Professor Dr. Jiří Jaromír Klemeš

Társ-Témavezető: Dr. Petar Varbanov



Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Pannon Egyetem

Veszprém, Magyarország

2018

Összefoglaló

Ez a doktori értekezés új eszközöket és módszereket mutat be, amelyek a specifikusan a hőcserélő hálózat módosítására lettek kifejlesztve. A módosítási (retrofit) folyamat legelső lépése az adatgyűjtés és kivonás a folyamat-adatok mért készleteiből. A munka első felfedezése egy új módszer javaslata, amely megkönnyíti az hőcserélő hálózatokra vonatkozó adatok összeegyeztetését a hő-integrálás elemzésére. Ezen munka elején bemutatott iteratív módszer különbözik a hagyományos összeegyeztetés módszertől. A módszert részletesen ismertetjük – beleértve a felhasznált modelleket és algoritmusokat. Bemutatjuk a részletes értekezést mint pl. az összeegyeztetés kezdő paramétereinek a hatása az eredményekre. Az iteratív módszer hátrányait azonosítottuk és különböző stratégiákat fejlesztettünk ki a hátrányok megoldására. Az esettanulmányokban az iteratív módszerek különböző stratégiáinak az egyesítésével elfogadható eredményeket értünk el. Ez a nagyobb számú paraméterek felhasználásával érhető el. Az adatok összeegyeztetését ezután kiterjesztettük az ún. Total Site szintre. A Total Site bonyolultságát figyelembe véve, a modell magába foglalja a segédközeg-rendszert és felszerelést, mint pl. a fűtők, hűtők és turbinák, viszont a hőcserélők az egyes üzemekben nem szerepelnek a modellben.

Az összeegyeztetett paraméter készletek elérése után, a következő lépés ezek bemutatása volt a hőcserélő hálózat struktúrájával összefüggésben. Míg a hagyományos rácsábrázolás elég információt tartalmaz a retrofit folyamathoz, nem tartalmaz elég adatot a felhasználó interakciójához és döntés hozatalához. A második felfedezés bevezet egy új eszközt a hőcserélő hálózat módosításához a szükséges részletes adatok bemutatására, amely jobban támogatja a mérnökök döntéseit a módosítás folyamatában. Ez az eszköz a módosított retrofit termodinamikai diagram (angolul: Shifted Retrofit Thermodynamic Diagram). Ez tartalmazza a pinch elemzés jellemzőit. Az eszközt fel lehet használni nem csak a folyamat pinch, hanem a hálózati pinch valamint a segédközeg pinch előfordulásának a meghatározására. A jobb vizualizálással, az új eszköz többféle felhasználását tárgyaljuk meg a hő-visszanyerés jobb növekedés érdekében. Irodalmi esettanulmány használtunk fel a módosított retrofit termodinamikai diagram felhasználásának és hasznosságának a bemutatására.

A termodinamikailag megvalósítható retrofit tevékenységek gazdaságilag nem feltétlenül megvalósíthatóak. Az utolsó fejezet a meglévő hőcserélő hálózat alternatív retrofit módszer felfedezést tárgyalja, különösen a hulladék-hő újrafelhasználásával. A módszer reális ipari esettanulmány felhasználásával kerül bemutatásra, amelynek magasak a beruházási költségei az első retrofit javaslatok elérésére. Az esettanulmányban a hulladék-hő újrafelhasználása javasolt némely áramok fűtésére. Ezzel csökkentjük a segédközegek felhasználását. Bár a javasolt megoldást hasonlít az eredeti javasolt módosításhoz a segédközegek felhasználásának a csökkentése szempontjából, sokkal jobban teljesíti a költségek megtakarítás és a megtérülés szempontjából.

1. Bevezető

Az energia visszanyerés a vegyi üzemekben már négy évtizede be vezették (Klemeš és Kravanja, 2013). A fizikai-betekintési módszerek fontos része a folyamat-integráció. Ez egyike az első munkák közül a Linnhoff és Flower (1978) cikke. A mai szintig való fejlődést már mások összegezték (Klemeš és mtsai, 2014) és kifejezetten a hő-integráció (Klemeš és Kravanja, 2013). Bakhtiari és Bedard (2013) módosította a hálózati pinch megközelítést a bonyolultabb hálózatok kezelésére az áramok szegmentálására és szétválasztására, többek közt felhasználva az egyes hőcserélőkre jellemző specifikus értéket a minimális megengedett hőmérsékleti különbségre.

Miközben a hő-integráció fontos a vegyi üzemekben, a meglévő hőcserélő hálózat retrofit módosítása is fontos (Klemeš, 2013). Megfigyelhető, hogy a közelmúltban a hő-integráció fókusza a meglévő vegyi üzemek retrofit módosítására irányult át. Ez annak a következmények, hogy a meglévő hőcserélő hálózat évek után elavult lett. A vegyi, petrokémiai, energetikai és egyéb iparágak az energiaköltségek (BP, 2013) és a egyre szigorúbb környezeti szabályozások (Európai Bizottság, 2011) miatt szeretnék javítani üzemük energiahatékonyságát. Az ingadozó energia árak, a termelés növekedése és a folyamat berendezések változásai miatt a retrofit módosítások csökkenthetik a működési költségeket némi tökebefektetéssel. Számos különböző módszer került bemutatásra a retrofit probléma megoldására. Általánosságban a módszerek a fizikai betekintésre, matematikai optimalizálásra vagy a kettő kombinációján alapulnak.

Az első lépés a hőcserélő hálózat retrofit folyamat elkezdésére az adatkivonás a meglévő hőcserélő hálózatra. A tervezési értékek elavultak lehetnek és nem pontosak az évek során változtatott beállítások és egységek hozzáadások következtében. Az adategyeztetés fontos lépés az adatkivonás folyamatában a hőcserélők retrofit módosítására. Csak két paramétert kell összeegyeztetni ebben a folyamatban. Az összes felhasznált korlátok közül az energiamérleg korlát okozza a nem-linearitást a modellben mert ez két fajta paramétert korlátoz. Az új bevezetett módszer megoldja ezt a nem-linearitást a 3.2 szakaszban, amely iteratív módon kapcsol össze két lineáris almodellt. Az esettanulmány felhasználásával bemutattuk, hogy az iteratív módszer képes elfogadható eredményeket produkálni rövidebb számítási idő alatt. A 3.3 szakaszban az iteratív módszer korlátait tárgyaltuk. A korlátok leküzdésére három különböző stratégiát fejlesztettünk ki. A 3.4 szakaszban egy új út van bemutatva az ún. Total Site adatok összeegyeztetés problémájának a megoldására. A modell a segédközeg rendszer adat összeegyeztetés probléma került bemutatásra illusztratív valamint ipari esettanulmány demonstrálásával. Összefoglalva, az iteratív módszer kevesebb számítási erőfeszítést használ az kisebb pontosság rovására, összehasonlítva a szimultán módszerrel. A módszer alkalmazható a hő-integrálás tanulmányokban különösen a hőcserélő hálózat retrofit módosítására, amelyhez nem használunk nagyon pontos adatokat.

Az összeegyeztetett adatok elérése után, a következő lépés a hőcserélő hálózat rács ábrázolás szerkesztése az elemzésre. A hagyományos rács diagram elégtelen és kellemetlen a hő-integráció elemzésére. Tovább fejlesztett vizuális eszköz a hőcserélő hálózat szükséges a hő-integráció elemzés megkönnyítésére. A 4. szakaszban bemutatjuk a kiterjesztett rács ábrázolást az ún. Eltolódott retrofit termodinamikai rács ábrázolás (SRTGD). A SRTGD egyedülálló szolgáltatáskészlettel rendelkezik, amivel elősegíti a kedvező retrofit lehetőségek azonosítására. Mivel ugyanabban a nézetben mutatja a CP-t (vagy terhelés), hőmérséklet és a hálózat, lehetővé teszi a felhasználóknak az egyidejű termodinamika, áram kapacitások és a

topológia egyidejű figyelembe vételét mint faktorokat. Ennek eredményeként a SRTGD hatékonyan használható a pinch technológia beépítésével, a folyamat pinch és a hálózati pinch azonosítására. A bemutatott példák és az esettanulmány egyértelműen bemutatják az új eszköz előnyeit. Bemutattuk, hogy a SRTGD képes a megvalósítható megoldások szűrését a nem megvalósíthatóktól, a vizuális információ bemutatásával a kedvezőbb hő-út kiválasztására. Amikor a hő-út kiválasztásra kerül, a SRTGD rámutat a hálózati pinch helyére valamint a maximális elérhető hő-visszanyerést. Azonban, a legnagyobb jelentőséggel bír az energiaárak és az előrejelzések ingadozási lehetőségeinek felmérése.

A 4. szakaszban a hőcserélő hálózatok mátrix ábrázolását javasoljuk a szintézis vagy a retrofit feladatok támogatására. Jól szervezett lehet, és segíthet a mérnököknek a rendszer elemzésében a pontosság megőrzésével. A HENSM rögzíti a hőcserélő hálózat minden hőcserélőjének hőmérsékletét, hőmérsékletkülönbségét és teljesítményét. A hőcserélők mindkét végén levő hőmérséklet különbség felhasználásával, a mátrixszal meg lehet határozni a folyamat és a hálózati pinch helyét. A retrofit út elemzés alatt a mátrixban látható a hőcserélő potenciálja, hogy a hálózati pinch helyén van. A HENSM-et egy esettanulmányban mutatjuk be. Az áram szétosztást nem tudjuk szemléltetni a mátrixban.

A folyamat hő-integráció elemzése alatt, vannak olyan esetek, amikor a segédközeg fogyasztás csökkentése a hőcserélő hálózat retrofit módosításával nem megvalósítható más szempontok miatt. A javasolt hőcserélő hálózat retrofit módosítása termodinamikailag megvalósítható ellenben gazdaságilag lehet, hogy nem megvalósítható. Különösen az alacsony hőmérsékleti hőcserélő hálózat tartományában, ahol általában hulladék-hőnek tekintik, ezt a hőt többnyire nem nyerik vissza. Ha ez a helyzet áll elő, a hőt felhasználhatjuk a hőcserélő hálózat retrofit módosítása során. Az 5.-dik szakasz sikeresen bemutatja, hogy ha a segédközeg felhasználását nem tudjuk csökkenteni gazdasági okok miatt, a hulladék-hő felhasználása megfontolandó lehetőséget jelent. Illusztratív és ipari esettanulmány felhasználásával, azt állapítottuk meg, hogy a hulladék hő áramok túl alacsony hőmérséklettel rendelkeznek a segédközeg felhasználás csökkentésére. Ebben az esettanulmányban a tervezett hő-út létrehozására irányuló kísérlet nagy beruházási költségeket eredményezett. Ezért a hőcserélő hálózatot úgy módosítottuk, hogy a hulladék hő áramokat forró víz előállítására használtuk fel. A szakasz a hőcserélő különböző elrendezéseit valamint ezek flexibilitását és összetettségét tárgyalja különböző körülmények alatt.

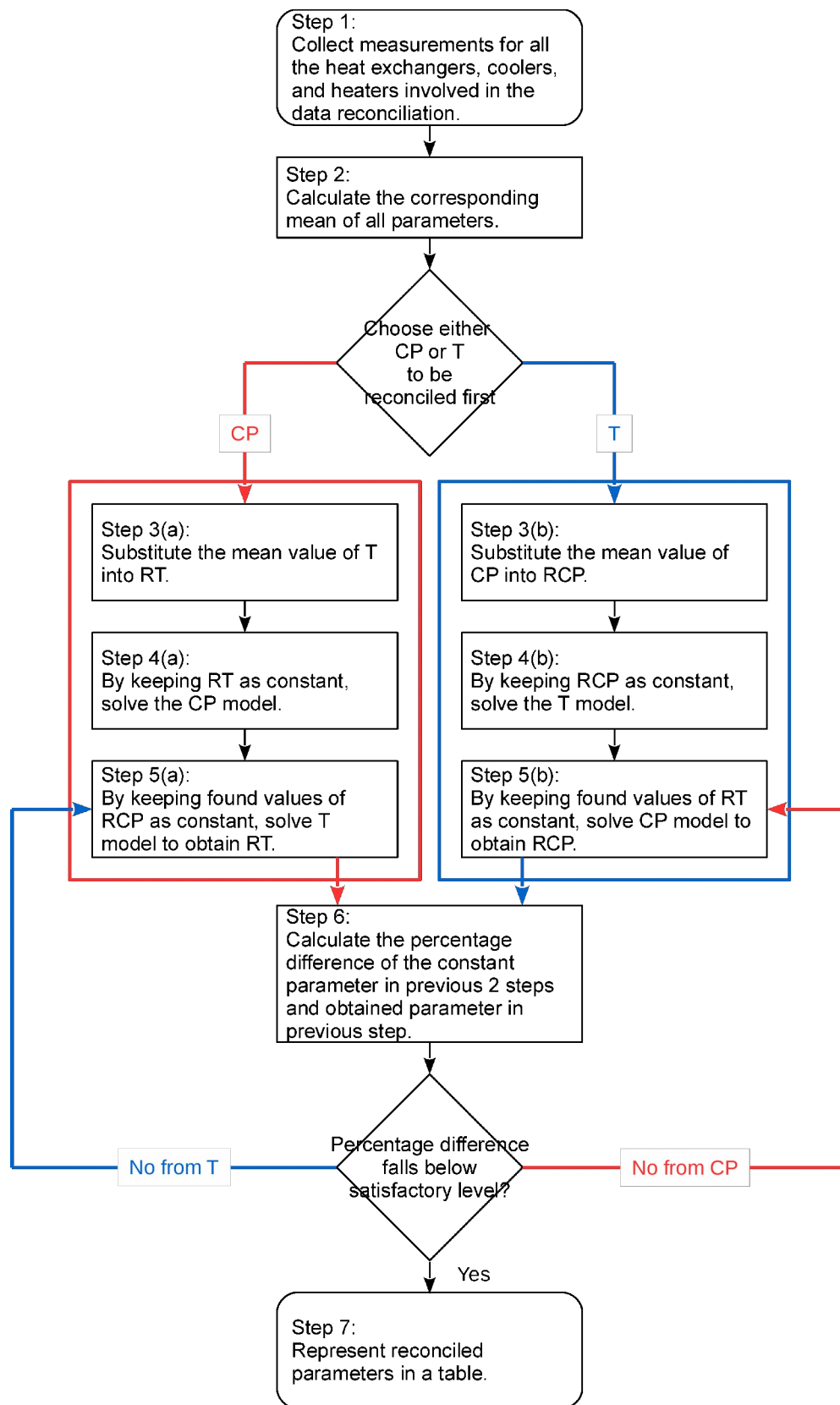
2. A javasolt eszközök és módszerek

2.1 Iteratív módszer az energia rendszerek adat összeegyeztetésére

Az iteratív módszer egy alternatív módszer a szimultán módszernek. A módszer szimultán módszerben modelljét két al-modellre. A két al-modell közötti iterálással, a módszer az egyik paramétert konstans tartja (pl. hőmérséklet) miközben a másik paramétert összeegyezteti (pl. CP), amíg el nem ér egy elfogadható konvergenciát. Kétféle paraméter van összeegyeztetve külön-külön miközben továbbra is fenntartja a másik paraméter fontosságát a modellekben. Annak ellenére, hogy az iteratív módszer bizonyos pontatlanságokkal rendelkezik, az szimultán módszerhez képest lényegesen kisebb számítási intenzitást igényel és egyszerűbben megvalósítható. A 3.3 ábra bemutatja az iteratív módszert. A 3.5 ábra bemutatja az algoritmust a modellek megoldására.

CP Model	T Model
$\text{Min} \sum_i^I \sum_s^S \sum_n^N (RCP_{i,s} - CP_{i,s,n})^2 \quad (3.9)$	$\text{Min} \sum_i^I \sum_s^S \sum_n^N (RT_{i,s} - T_{i,s,n})^2 \quad (3.10)$
subject to:	subject to:
Mass balance constraints	
$RCP_{i,HI} = RCP_{i,HO} \quad (3.2)$	
$RCP_{i,CI} = RCP_{i,CO} \quad (3.3)$	
Energy balance constraints	Energy balance constraints
$RCP_{i,HI} (RT_{i,HI} - RT_{i,HO}) = RCP_{i,CI} (RT_{i,CI} - RT_{i,CO}) \quad (3.4)$	$RCP_{i,HI} (RT_{i,HI} - RT_{i,HO}) = RCP_{i,CI} (RT_{i,CI} - RT_{i,CO}) \quad (3.4)$
where RT is set to be constant	where RCP is set to be constant
Constraints from network for example	Constraints from network for example
$RCP_{i1,HO} = RCP_{i2,HI} \quad (3.5)$	$RT_{i1,HO} = RT_{i2,HI} \quad (3.7)$
$RCP_{i1,CO} = RCP_{i2,CI} \quad (3.6)$	$RT_{i1,CO} = RT_{i2,CI} \quad (3.8)$

Ábra 3.1: A CP modellben és T modellben használt egyenletek



Ábra 3.2: A javasolt iteratív módszer algoritmusai

Az ún. Total Site-ban nagy számú hőcserélő, fűtő és hűtő van. Mindegyik vegyi üzem rendelkezik saját egyéni kémiai berendezésekkel és hőcserélő hálózattal. Ezeknek a vegyi üzemeknek az egyik közös és egyetlen jellemzője, hogy ugyanazon segédközeg rendszerhez kapcsolódnak. Ahelyett, hogy minden hőcserélőt bevonnának az összes adat összeegyeztetés feladatba, először a segédközeg rendszeren kivitelezük az adat összeegyeztetést. A segédközeg-rendszer adat összeegyeztetése után minden egyes üzem hőcserélő hálózatának az adat összeegyeztetését is végre hajtjuk az előző szakaszban bevezetett módszer felhasználásával. Feltételezzük, hogy a Total Site-ban használt segédközegek nem keverednek össze.

A használt segédközegeknek (pl. gőz, forró olaj, hűtővíz) minden típusának saját készlete van. Minden gőz áramot, hűtőt és fűtőt fekete dobozokként modellezünk. A hő-integrációs elemzésben a gőz áramlások a diagramban általában energiaáramlási sebességben, például kW, fejezzük ki. Meg kell említenünk, hogy az energia-áramot nem tudjuk közvetlenül mérni. Ehelyett, az adat összeegyeztetés folyamatában minden áram áramlását tömegáramban mérjük és fejezzük ki. Különösen a nem-izotermikus segédközegek felhasználásával működő fűtő- és hűtőberendezéseknél az ellátás és visszatérési áramokat tömegáramlatát mérjük. Ezzel a hozzáállással a célfüggvény csak tömegáramlatokat tartalmaz, és a berendezés körül a tömeg egyensúlyra korlátozódik.

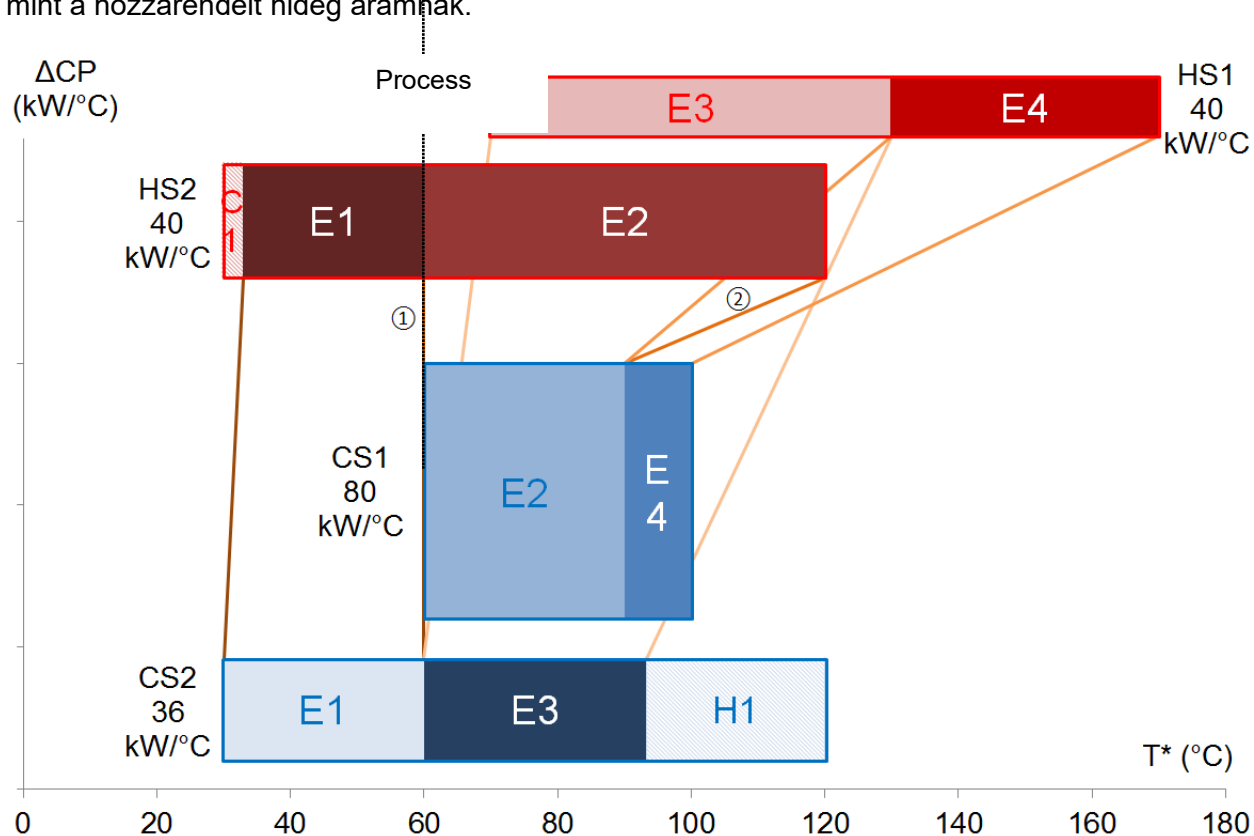
2.2 Előrehaladott vizualizáció a hő-integrációban a hőcserélő hálózat retrofit módosításra

A hőcserélő hálózat grafikus megjelenítésére hagyományosan a rácsábrázolást használjuk. Azonban a hagyományos rácsábrázolás nem mutat be bizonyos fontos jellemzőket, például a hő-kapacitás jelentőségét és a pinch helyét. Továbbra is szükség van egy megfelelő vizualizációs és döntéshozó eszközre, amely képes azonosítani, használni és leküzdeni a hőcserélő hálózat gátló tényezőit a nagyobb hő-visszanyerés elérésére. Az ilyen eszköz fontos, mivel segíthet a felhasználóknak döntéseket hozni, és hatékonyan támogathatja a matematikai optimalizálási modellek megformálását. Mint ilyen eszközt az Eltolódott retrofit termodinamikai rács ábrázolást javasoljuk ebben a tanulmányban.

A SRTGD jellemzői a következők. A vízszintes tengely nyomon követi a hőmérsékleti skálát, míg a függőleges tengely a CP skálát reprezentálja. Minden áramot téglalap alakban mutatunk be, ahol a téglalap szélességét az áram hőmérsékleti tartományának megfelelő, miközben a magasságot a CP szerint állapítjuk meg. A téglalap területe a cserélhető hő mennyiségét jelenti. Az áramot szegmensekre lehet osztani, ahol minden egyes szegmens egy hőcserélőben lévő áramot képvisel. Amint a 4.2. Ábrán látható, két áramnak két szegmense van amelyet a 2 számmal jelzünk. Ezek az E2 hőcserélő meleg és hideg részei, és a HS2 és CS1 áramokhoz tartoznak. Az E2 hőcserélőnél a ① és a ② jelzésű vonalakat ennek a hőcserélőnek a hideg és meleg végű kapcsolódásának nevezzük.

Minden hő-visszanyerési hőcserélőnek két kapcsolódása van a végénél, miközben a fűtő- és hűtőberendezés csak szegmensként jelenítünk meg az áramok téglalapjain. A kapcsolódások fontosak mert ezek jelzik a hőátadás termodinamikai megvalósíthatóságát. Mivel a meleg áram hőmérsékletét eltoljuk a ΔT_{min} csökkentésével az tényleges hőmérsékletről, a függőleges

kapcsolódás (nulla hőmérséklet-különbséggel) mutatja a pinch pontot, legyen az folyamat pinch vagy a hálózat pinch. A megvalósítható hőátadásra a hőcserélő kapcsolódásoknak pozitív dőlésének kell lennie, ez egyenértékű azzal, hogy a meleg áramnak magasabb a hőmérséklete, mint a hozzárendelt hideg áramnak.



Ábra 4.3: A HEN példa egy SRTGD használatával

A hőcserélő hálózat grafikus bemutatásának van néhány korlátozása. 1. Az adatok pontossága csökkentet, amikor grafikus ábrázolást használunk. A pontos értékeket nem tudjuk közvetlenül megállapítani. 2. A grafikus ábrázolás bonyolult, ha sok hőcserélő van a hőcserélő hálózatban. 3. Fontos adatok, mint például a hőmérséklet-különbségek a hőcserélők végein, nem láthatók közvetlenül a grafikonon.

Ezért javasoltuk a hőcserélő hálózat számszerű megjelenítését mátrix formájában. A hőcserélő hálózat áram mátrixa (HEN Stream Matrix –HENSM) lehetővé teszi a grafikus ábrázolás tárgyalt hátrányai javítását. Azonban, a HENSM nem nyújt ugyanolyan a betekintést a feladatban, mint a grafikon, és ezért a két eszközt együttesen érdemes használni. Az egyes hőcserélőkre vonatkozó adatokat számszerűen vannak rögzítve és közvetlenül valamit pontosan hozzáférhetőek. Ez a mátrix egy nagyszámú hőcserélővel rendelkező hőcserélő hálózatot is képes rögzíteni, mivel nem használ vonalakat vagy kapcsolódásokat. Ez egy jól szervezett reprezentáció, amely támogatja a folyamat elemzését. A hőmérséklet különbségeket közvetlenül követhetjük és értékelhetjük, ami segít a pinch helyének a meghatározásában. A hő-út nyomon

					Hot Stm	H1	H1	H1	H2	H3	H4	H5			
					CP (kW/° C)	86	86	86	21	185	24	129			
					TS (°C)	310	239	167	299	273	230	206			
					TT (°C)	239	167	103	173	254	133	178			
HEX No.	Cold Stm	CP (kW/° C)	TS (°C)	TT (°C)									Heater Duty (kW)	HETD (°C)	CETD (°C)
3	C1	144	52	91				5,557						66.6	40.6
7	C1	144	91	116								3,623		80.2	77.4
6	C1	144	116	132							2,292			88.3	6.7
4	C1	144	132	150					2,689					138.6	31.6
2	C1	144	150	193			6,135							35.6	6.8
5	C1	144	193	217						3,431				46.1	51.4
1	C1	144	217	260		6,141							14,453	40.4	11.7
					Cool er Duty (kW)			657	1,142	817	881				

2.3 A hőcserélő hálózat módosítása a hulladék-hő felhasználására

Három különböző általános elrendezés van a forró vízkör számára:

- Annak ellenére, hogy mindkét elrendezésnek vannak előnyei vannak, a választás eseti alapon történik.

3. Új tudományos felfedezések a doktori értekezésben

Értekezés 1: Az első felfedezés a meglévő hőcserélő hálózat (HEN) adat összeegyeztetése a hő-integráció és a pinch elemzés céljából. Ez egy döntő lépés, mielőtt bármiféle retrofit módosítást eszközölnénk. Csak két paramétert lehet összeegyeztetni, a tömegáramlást és a hőmérsékletet. Mivel mindegyik hálózatnak számos hőcserélője van, minden hőcserélőnek hőmérséklet- és áram adatokat tartalmaz. A bonyolultság abból ered, hogy a korlátozó egyenletek, amelyeket a modellben használunk nagymértékben nem-lineárisak. A hagyományos módszernek amit az adat összeegyeztetésben folyamán használunk nagy a számítási kapacitás igénye. Ebben az értekezésben bevezetett iteratív módszer megoldja a nem-linearitást az adat összeegyeztetési folyamatban. Az iteratív módszer biztosítja a pontos eredményeket kevesebb számítási kapacitással. Bár az iteratív módszernek vannak korlátai, ebben a munkában stratégiákat dolgoztunk ki e korlátozások megoldására. Ezután a tanulmány kiterjesztettük az energia és a gőzrendszerre az ún. Total Site szintre. A modell bonyolítása nélkül, mivel a Total Site számos hőcserélővel rendelkezik, először csak az energia- és gőzrendszerbe tartozó berendezések kerültek összeegyeztetésre. *(Kapcsolódó publikáció: P[4], P[5])*

Értekezés 2: A második felfedezés a hőcserélő hálózat rácsábrázolásból származik. Egy új, reprezentatív ábrát vezettünk be a Eltoló retrofit termodinamikai rácsábrázolás (SRTGD) néven, amely a folyamatok retrofit módosítására használhatunk. A hagyományos rácsábrázoláshoz képest az SRTGD az y-tengelyen minden egyes áram hőtartalmát mutatja, miközben a hőmérsékletkülönbségeket az x tengelyen mutatja be. Az SRTGD nem csak az egyes hőcserélők hő-tartalmát mutatja a hozzá tartozó hőátadási területnek megfelelően, hanem a pinch helyét is. Az SRTGD egy meglévő hőcserélő hálózat módosítását is bemutatja. A mátrix ábrázolás korai fogalmát is tárgyaljuk, hőcserélő mátrix néven. Az ilyen ábrázolás csökkenti a grafika ábrázolásának nehézségét, és a szimulációs szoftver bemenetként használható. *(Kapcsolódó publikáció: P[2], P[6], P[8])*

Értekezés 3: A harmadik felfedezés a hulladék-hő hasznosítása a segédközeg előállítására. A hőcserélő hálózat retrofit módosítás általános célja az, hogy csökkentjük a segédközeg felhasználását. Különböző eszközök felhasználásával, mint például a pinch elemzés, meg lehet határozni a minimális segédközeg igényt valamint módosításokat lehet kivitelezni a cél elérés érdekében. Meg kell jegyezni, hogy vannak olyan esetek, hogy bár a javasolt hőcsere hálózat retrofit módosítási opciók termodinamikailag megvalósíthatók, egyéb szempontok alapján azonban nem megvalósíthatókat. A gazdasági megvalósíthatóság egyike azoknak a tényezőknek, amelyek gátolhatják a hőcserélő hálózat retrofit módosítását. A hő-integrációs elemzés elvégzése után megállapítható, hogy bár a módosítás megvalósítható, de gazdaságilag nem megvalósítható. Különösen a hőcserélő hálózat alacsonyabb hőmérsékleti tartományában az ilyen alacsony hőmérsékletű áramokat gyakran hulladék-hőnek tekintik, és általában nem foglalkoznak ezeknek a hő-visszanyerésével. Ebben az értekezésben tárgyaljuk a ilyen hulladék-hő hasznosításának a lehetőségei, amely bevételekhez vezetnek. Egyszerű lépések mutatunk be a hulladék-hő potenciáljának azonosítására. Tárgyaljuk a forróvíz-előállító áramkör konfigurációját, és általános elképzelést adunk meg arról, hogy hogyan lehetne maximalizálni a hulladék-hő felhasználását, amelyet egyébként figyelmen kívül hagynánk. *(Kapcsolódó publikáció: P[1], P[7], P[12])*

4. Hivatkozás

- Klemeš J.J., Kravanja Z., 2013. Forty years of Heat Integration: Pinch Analysis (PA) and Mathematical Programming (MP), *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(4), 461 – 474.
- Linnhoff B., Flower J.R., 1978. Synthesis of heat exchanger network: I. Systematic generation of energy optimal networks, *AIChE Journal*, 24, 633 – 642.
- Klemeš J.J., Varbanov P.S., Wan Alwi S.R., Manan Z.A., 2014, *Process Integration and Intensification: Saving Energy, Water and Resources*, Walter de Gruyter: Berlin, Germany
- Bakhtiari B., Bedard S., 2013, Retrofitting Heat Exchanger Network using a Modified Network Pinch Approach, *Applied Thermal Engineering*, 51 (1-2), 973 – 979.
- Klemeš J.J., 2013, *Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emission*, Woodhead Publishing/Elsevier: Cambridge, UK
- European Commission, 2011, Poor Energy Use is Chemical Industry's Top Environmental Issue, Science for Environment Policy, <ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/243na2_en.pdf> accessed 09.01.2014

5. A kiadványok jegyzéke

- P[1] **Yong J.Y.**, Klemeš J.J., Varbanov P.S., Huisinigh D., 2015, Cleaner energy for cleaner production: modelling, simulation, optimisation and waste management, *Journal of Cleaner Production*, 111, 1-16. (IF: 5.651, citation: 46)
- P[2] **Yong J.Y.**, Varbanov P.S., Klemeš J.J., Heat Exchanger Network Retrofit supported by Extended Grid Diagram and Heat Path Development, 2015, *Applied Thermal Engineering*, 89, 1033-1045. (IF: 3.771, citation: 11)
- P[3] Liu Z.-Y., Varbanov P.S., Klemeš J.J., **Yong J.Y.**, 2016, Recent developments in applied thermal engineering: Process integration, heat exchangers, enhanced heat transfer, solar thermal energy, combustion and high temperature processes and thermal process modelling, *Applied Thermal Engineering*, 105, 755-762. (IF: 3,771, citation: 5)
- P[4] **Yong J.Y.**, Nemet A., Varbanov P.S., Kravanja Z., Klemeš J.J., 2016, Data reconciliation for total site integration, *Chemical Engineering Transactions*, 52, 1045-1050. (citation: 2)
- P[5] **Yong J.Y.**, Nemet A., Bogataj M., Zore Ž., Varbanov P.S., Kravanja Z., Klemeš J.J., 2016, Data Reconciliation for Energy System Flowsheets, *Computer Aided Chemical Engineering*, 38, 2277-2282. (citation: 1)

- P[6] **Yong J.Y.**, Varbanov P.S., Klemeš J.J., 2015, Matrix representation of the grid diagram for heat exchanger networks, Chemical Engineering Transactions, 45, 103-108. (citation: 1)
- P[7] **Yong J.Y.**, Nemet A., Varbanov P.S., Klemeš J.J., Čuček L., Kravanja Z., Mantelli V., 2015, Heat exchanger network modification for waste heat utilisation under varying feed conditions, Chemical Engineering Transactions, 43, 1279-1284.
- P[8] **Yong J.Y.**, Varbanov P.S., Klemeš J.J., 2014, Shifted retrofit thermodynamic diagram: A modified tool for retrofitting heat exchanger networks, Chemical Engineering Transactions, 39, 97-102. (citation: 7)
- P[9] **Yong J.Y.**, Klemeš J.J., Friedler F., Varbanov P.S., Deak C., 2018, The chemical industry in Hungary, Chemical Engineering Progress, 44-48 (the main journal of AIChE, US).
- P[10] Haleem A.A., Hashim H., Varbanov P.S., **Yong J.Y.**, Klemeš J.J., Yusup S., 2015, Case Study: Optimisation of Federal Land Development Authority Jengka Supply Chain Management Using P-Graph Approach, CET, 45, 1375, 1380.
- P[11] Barna B., Varbanov P.S., Klemeš J.J., **Yong J.Y.**, 2015, Object-Oriented Model and File Format for Heat Exchanger Network Computations, CET, 45, 319-324.
- P[12] Čuček L., Mantelli V., **Yong J.Y.**, Varbanov P.S., Klemeš J.J., Kravanja Z., 2015, A procedure for the retrofitting of large-scale heat exchanger networks for fixed and flexible designs applied to existing refinery total site, CET, 45, 109-114.
- P[13] Čuček L., **Yong J.Y.**, Mantelli V., Voccianti M., Varbanov P.S., Klemeš J.J., Karlopoulos, E., Kravanja, Z., 2014, Data acquisition and analysis of total sites under varying operational conditions, CET, 39, 1819-1824.

6. Reviews Completed

Journals	Number of Reviews
Chemical Engineering Transactions (CET)	48
Journal of Clear Production (JCLEPRO)	28
Energy (EGY)	23
Applied Energy (APEN)	5
Computer Aided Chemical Engineering (CACE)	3
TOTAL	107

