



---

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR  
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA**

# **Desztilláló Rendszerek Komplex Energetikai és Irányítástechnikai Vizsgálata**

Tézisfüzet

Szerző: Haragovics Máté

Témavezető: Dr. Mizsey Péter

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

2014

## **Bevezetés**

A desztilláció egy széles körben elterjedt, közismert, megbízható elválasztási módszer. Néhány ipari szegmens, mint például a kőolaj finomítás, széles körben. Igen érett technológia, ugyanakkor ennek a világ iparában betöltött súlya miatt még mindig sokan kutatják többféle területen.

A legtöbb kutatás a desztillációs folyamat hatékonyságának fejlesztésére koncentrál. Az energia jobb felhasználása, hő és energiaintegráció, irányítás és tervezés a leggyakoribb kutatási témák.

Jobb energiafelhasználás két módon érhető el: hatékonyabb technológiák használatával, vagy a meglévő eszközök hatékonyabb üzemeltetésével. Nem ritka, hogy a már meglévő eszközök hatékonysága fejleszthető az oszloptöltet cseréjével vagy az oszlop újratervezésével. Másfelől viszont a veszteségek nem feltétlenül az eszközön és az elválasztás technológiáján múlnak, hanem a rendszer üzemeltetési módjától függenek.

Ahogy a globális gazdasági környezet kihívások elé állítja az európai finomítókat a folyamatok változtatása létszükséglet lett. Több olajipari társaság is elkezdte a „lean” termelési filozófiát magáévá tenni, ami új keretet ad az üzletük működésének. Néhány cég a lean-t egyes területekre alkalmazza csak, de például a MOL, a magyar olajipari vállalat az üzlete teljes lean átalakítását tűzte ki célul.

A lean filozófia szerint az érték áramlásának egyik akadálya a rugalmatlanság. A rugalmatlanság felszámolása fontos hogy az átfutási időt és készleteket csökkenteni lehessen, valamint hogy gyorsan lehessen a kereslet változására reagálni. Ez a megközelítés magában foglalja az igény szerinti megállást és indulást is.

Alapvetően a finomítók tervezésekor nem volt szempont a rugalmas működés sem alapanyag sem megállás-újraindulás tekintetében. Általában csak kis rugalmasság van alapanyag és termékek tekintetében. Jól látható, hogy ez az irány egy lehetséges fejlődési út lehet, így fontos lenne olyan üzemek tervezésére koncentrálni, amelyek energia-hatékonyak, ugyanakkor lényegesen rugalmasabban a jelenlegieknél.

A tervezett üzemelés mellett fontos, hogy a terveket be is lehessen tartani. A folyamatirányítás egy interdiszciplináris terület, amely az üzemeltetőknek segít, hogy a folyamatok a kívánt mederben folyjanak. A megfelelő irányítás minden eszköz és folyamat számára kulcsfontosságú a sikeres működés és profitabilitás szempontjából.

## **Irodalmi áttekintés**

Több friss kutatás vizsgálja a hőintegrált desztillációs rendszereket, mint például a belső-hőintegrált desztillációs oszlop, az intenzifikált hőintegrált oszlop, valamint a teljesen hőintegrált desztillációs oszlop.

A komplex tervezés is nagyobb figyelmet kapott az elmúlt évtizedben. Ennek során több szempontot vesznek figyelembe, és ennek során nagy számú szimulációra van szükség, és néha automata döntésekre. Ez az igény automata tervezési módszerek fejlesztését vonta maga után, melyek több szempontot foglalnak magukba.

## **Exergia analízis**

A tervezés során a mérnököknek több eszköz is a rendelkezésükre áll, hogy a desztillációs rendszereket energia-hatékonyság szempontjából kiértékeljék. Az egyik ilyen eszköz az exergia analízis. Az exergia koncepciója abból ered, hogy egy energiatartalom csak akkor értékes, amíg bizonyos paraméterek elérik a környezet azonos paramétereit. Ily módon exergia tartalma lehet hőnek, kémiai energiának, mozgási energiának, helyzeti energiának, vagy bármilyen energiának, ami különbözik a környezetétől.

Ez energiával kapcsolatos válságok óta a folyamatokat energiatartalom szempontjából javították, de az energia minőségét jellemzően nem vették figyelembe. Pedig a különböző energiatípusok, vagy akár azonos energiák is különböző minőséget képviselhetnek. Ez a különbség abból adódik, hogy egyikből a másikba alakítás veszteséggel lehetséges csak.

Az exergia használatát összegezve: mindenféle energiatípust együtt tud kezelni, figyelembe veszi az irreverzibilis folyamatokat, és kifejezi, hogy a hő és a munka nem egyenértékűek. Ráadásul azt is megmutatja, hogy a hő értéke csökken alacsonyabb hőmérsékletek felé.

Ezzel párhuzamosan előtérbe került a teljes ipari parkokat felölelő energiaintegráció gondolata, amely a lokális optimumokon túlmutatva teljes rendszerek globálisan optimális integrációjára törekszik. Ezt többféle eszközzel is lehet vizsgálni, többek között exergia analízissel is.

## **Folyamatirányítás**

A legjobb szabályozott jellemző-módosított jellemző párosítások megtalálása kulcsfontosságú a berendezések megfelelő üzemeltetéséhez. A szabályozások tervezését általában szimulációval végzik, amik lehetnek statikus szimulációk, illetve dinamikusak. Dinamikus szimulációkat kétféleképpen lehet végezni: idő- és frekvenciatartományban. A dinamikus szimulációk használatának előnyét többen is kiemelték, ugyanakkor ez a szimulációs módszer csak az utóbbi évtizedekben vált lehetségessé a számítástechnika fejlődésének felgyorsult üteme által.

Folyamatok irányíthatóságát mind időtartományban, mind frekvenciatartományban vizsgálják, a vizsgálatot végző személy preferenciáitól függően. Frekvenciatartományban a szimulációk egyszerűbbek, viszont az eredmények értelmezése és magyarázata kevésbé nyilvánvaló. Időtartományban precízebb eredményeket kaphatunk, viszont több munka szükségeltetik.

A szakirodalomban felelős a frekvenciatartományban végzett vizsgálatok megítélése. Több kutató is használja vizsgálataihoz, ugyanakkor több helyen is felmerül, hogy az időtartományban végzett zavarásos vizsgálatok eredményei jelentős eltérést mutatnak, a frekvenciatartományban végzett mérésekhez képest.

Időtartományban a szabályozás minőségét hibaintegrálokkal mérik, ugyanakkor frekvenciatartományban több különféle mutatószám is használatos. Ezen mutatószámok sokszor közös töről fakadnak, ugyanakkor más és más tulajdonságát fejezik ki a rendszernek. A három leggyakrabban használt mutatószám az MRI, CN és RGA-szám.

## **Számítási módszerek**

### **Exergia analízis**

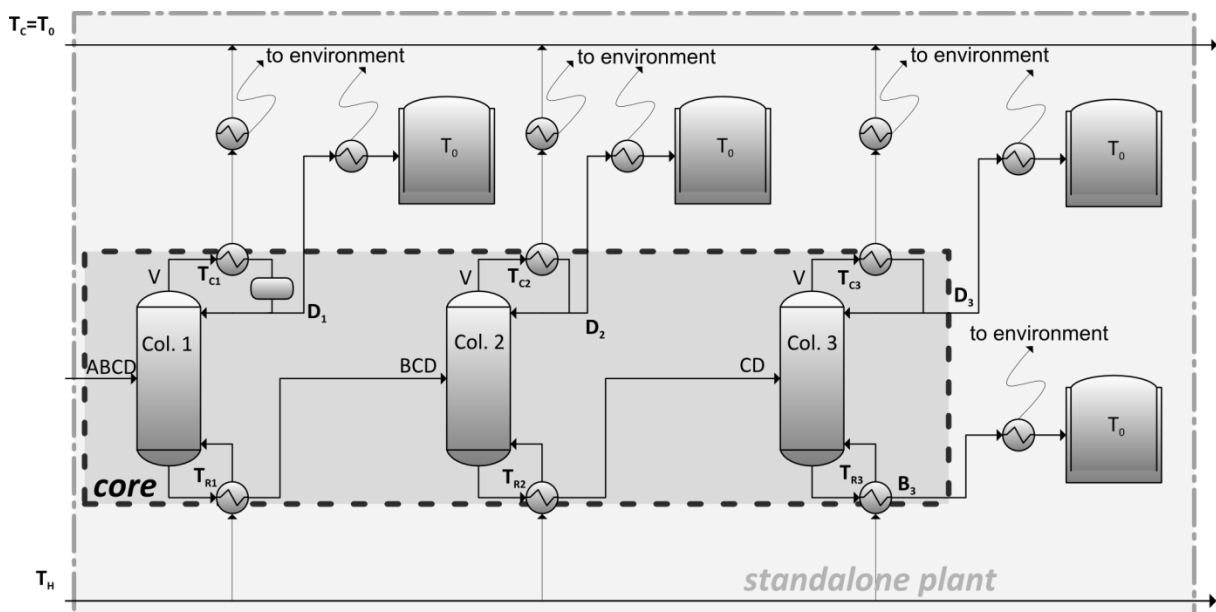
Egy új ötletet használtam a vizsgálatok során, mai használható mind a hagyományos, mind jövőbeli optimalizálási eljárásokkal, mint például a rugalmasság javítására lean filozófia szerint. Egy kifejezés bevezetése viszont szükségessé válik: az ideális háttér-hőkaszkádé. Ez a hőkaszkád bármilyen mennyiségben tud fogadni és szolgáltatni hőt tetszőleges hőmérsékleten. Ezzel a hőkaszkáddal történő optimális hőintegráció során a vizsgált rendszer exergia fogyasztása a legkisebb lesz. Bármilyen megvalósítható integráció egy létező rendszerrel rosszabb termikus hatásfokot eredményez.

Az exergia analízis módszertana ennek megfelelően fejlesztésre került: kettős analízis szükséges kétféle rendszerhatárral. Legtöbb esetben a magfolyamatot célszerű vizsgálni, amely az ideális hőkaszkáddal való integráció során a vizsgált rendszer.

A két határral számolt eset közti különbség megmutatja a lehetséges exergia megtakarítást és betekintést ad a rendszer rugalmasságába termikus határfokot illetően.

Az exergia analízist egy egyszerűbb módszerrel végeztem, ami csak azon különböző áramok (anyag, hő, stb.) tulajdonságait veszi alapul, amelyek áthaladnak a rendszer határain. Az irreverzibilis entrópia-változást kell kiszámolni először. ennek, és a környezeti hőmérséklet ismeretében így már kiszámolható az exergia veszteség. Ugyanezt az exergia mérlegből is ki lehet számolni. Az elválasztási munkát szintén szükséges kiszámítani, ez a kilépő termékek és belépő alapanyag exergiájának különbsége. Végül a termodinamikai hatékonyság is kiszámítható, ha a szükséges elválasztási munkát elosztjuk az összes felhasznált energiával.

Két elegyet vizsgáltam, kétféle terméktisztaság mellett, és az exergia analízis során kétféle határt vettem figyelembe. Ezen különböző határok ugyanazt a rendszert reprezentálják egyszer olyan környezetbe helyezve, ahol egyedülálló üzemként működik; és egyszer úgy, mintha egy ideális háttér-hőkaszkáddal lenne integrálva, ami korlátlan mennyiségben tetszőleges hőmérsékleten tud hőt szolgáltatni és elnyelni. Öt desztillációs sémát vizsgáltam.



1. ábra: vizsgálatok határai

## **Folyamatirányítás**

Egy egyszerű desztillációs oszlopot vizsgáltam, hogy megtaláljam a legjobban irányítható módosított jellemző, irányított jellemző párosítást. Összehasonlítottam a sikeres párosítások listáját hogy megtudjam, hogy az idő- és frekvenciatartományba végzett szimulációk képesek-e ugyanazt a sorrendet szolgáltatni.

MRI, CN, és RGA teljesítmény-mutatókat számoltam frekvenciatartományban, valamint integrált abszolút hibát időtartományban, hogy a sorrendeket fel lehessen állítani.

Frekvencia-tartományban a teljesítmény-mutatók különböző tulajdonságokat számszerűsítene, ezért összevontam őket a kívánatossági függvénnyel, hogy egy szám számszerűsíthesse az összes tulajdonságot.

## **Eredmények**

### **Exergia analízis**

A magfolyamat esetében az egyszerű egyenes sorrendű elválasztás (DS) bizonyult leghatékonyabbnak minden esetben. Az első mait ezzel kapcsolatban érdemes megemlíteni, hogy az alacsonyabb nyomású rendszerek hatékonysága jobb. Nagyobb nyomáson a folyadék-molekulák nagyobb energiát igényelnek az elszakadáshoz, ezért a forráspont emelkedik. Exergia értelmezésében a magasabb hőmérséklet magasabb minőséget jelent, így értékesebb energiát használunk ugyanahhoz az elválasztási munkához. Ez a hatékonyság csökkenését vonja maga után magasabb nyomás esetén.

A legérdekesebb eredmény a DS és a visszafelé hőintegrált verziója (DS-BHI) esetében tapasztalható. A hőintegráció népszerű módja az energiafogyasztás csökkentésének. Annak ellenére, hogy a hőfogyasztás jelentősen csökkenthető, az eredmények azt mutatják, hogy ez a megoldás nem feltétlenül a legjobb megoldás. Ennek oka a már említett nyomásnövekedés, ami a folyamaton belüli integrációhoz szükséges és több exergiát fogyaszt. Másrészt kimondható, hogy a DS séma ugyan több energiát vesz be, de többet is ad le más folyamatokkal integrálva, ráadásul ezek magasabb hőmérsékleten és következésképpen minőségben kerülnek leadásra.

Még egy figyelemre méltó eredmény figyelhető meg: az oldaltermékes oszlop (SC) kevésbé éles elválasztás és kisebb reflux esetén hatékonyabb, mint a hőintegrált DS-BHI. Ez szintén azt mutatja, hogy a nyomásnövelés nélküli integráció hatékonyabb.

A másik esetben önálló folyamatot feltételezünk. Ebben az esetben az eredmények nagyon hasonlóak ahhoz, mint amit az entalpia analízissel kapunk. Igen korlátozott számú hőmérsékleten történik hőcsere azt eredményezi, hogy az exergia analízis nem ad több használható információt, így az a rendszer lesz a leghatékonyabb, amelyik a legkevesebb entalpiát használja. Ez pedig a visszafelé hőintegrált egyenes sorrendű elválasztási rendszer.

A környezeti hőmérséklet megváltozására irányuló érzékenységi vizsgálatok azt mutatják, hogy a magfolyamat esetében a környezeti hőmérséklet nem játszik jelentős szerepet, de önálló üzemet feltételezve nagyobb hatással bír az eredményekre.

### **Folyamatirányítás**

Az időállandók becslése után a kritikus frekvenciák a  $7,29 \cdot 10^{-4}$  and  $5,85 \cdot 10^{-3}$  rad/s tartományban adódtak. Minden mutatószám konstans ebben a tartományban, így könnyű leolvasni a megfelelő értékeket. Magas MRI és alacsony CN és RGAno értékek jobbak.

Frekvenciatartományban az MRI értékek minden elegyre ugyazat az eredményt hozzák, a DQ struktúrának vannak a legmagasabb értékei, az összes többinek jelentősen alacsonyabb, ugyanakkor közel vannak egymáshoz. A CN értékek általában elfogadhatók, jó irányíthatóságot feltételeznek. Az LQ struktúra az egyetlen, amelynek az értékei meghaladják a határnak tekintett 10-et, de csak egy esetben magasabb jelentősen. Minden esetben a DQ struktúrának van a legalacsonyabb értéke és az LQ-nak a legmagasabb.

Az RGAno értékek hasonló eredményeket mutatnak minden elegy esetében. minden esetben az RB struktúra mutatja a legalacsonyabb értékeket, és az LQ a legmagasabbat. Ez az egyetlen mutatószám ami a DQ struktúra rosszabb irányíthatóságát mutatja.

Nyilvánvaló, hogy ezek a mutatószámok nem támasztják alá egymás eredményeit egyértelműen. Ez arra ösztönzött, hogy megpróbáljam a mutatószámok összevonását kívánatossági függvényvel. Ez alapján a DQ lett ismét a legjobb, és sorrendben az LB, RB, RQ követik, végül a legrosszabb az LQ.

Összehasonlításképp időtartományban végzett zavarásos vizsgálatokat is elvégeztem, mind a betáplálás összetételét, mind mennyiségét megzavarva. Ennek során minden esetben az RQ struktúra produkálta a legkisebb hibaintegrálokat, a DQ pedig egy nagyságrenddel rosszabb eredményeket produkált, mint bármelyik másik struktúra.

Frekvenciatartományban az LQ a legrosszabb struktúrának mutatkozott, de időtartományban sok esetben az egyik legalacsonyabb hibaintegrált produkálta, és minden esetben jobb volt, mint a DQ.

Esetünkben a DQ struktúra, ami frekvenciatartományban a legjobb irányíthatóságot mutatta majd hogyanem használhatatlan volt időtartományban. Ugyanakkor az LQ a sor végén kullogog frekvenciatartományban, időtartományban pedig a legjobbak között szerepel. Az RQ struktúra egyértelműen a legjobb időtartományban, de a frekvenciatartományban ez nem mutatkozott meg. Következésképp kijelenthető, hogy a frekvenciatartományban végzett vizsgálatok még a kívánatossági függvényvel összevonva sem képesek helyettesíteni az időtartományban végzett vizsgálatokat desztillációs irányítási struktúra változópárjainak tervezésénél.



## **Tézisek**

### **1. Tézis [4]**

Kidolgoztam egy módszert, mely során egy rendszer exergia analízisét kettős peremfeltételekkel kivitelezve megállapítható az adott rendszer jobb integrálásával elérhető legnagyobb exergia megtakarítás. Bebizonyítottam, hogy ezzel a módszerrel, a kettős exergia analízissel elválasztó rendszerek termodinamikai hatékonyságának rugalmasságáról is információt nyerhetünk.

### **2. Tézis [4]**

Kidolgoztam az ideális háttér-hőkaszkád koncepcióját, mely tetszőleges mennyiségű hőt tud tetszőleges hőmérsékleten adni vagy fogadni. Bebizonyítottam, hogy a vizsgált folyamat ezen folyamattal történő integrálása meghatározza a magfolyamatot, amely csak a szükséges exergia veszteségeket foglalja magába.

### **3. Tézis [4]**

Bebizonyítottam, hogy a magfolyamat exergia analízise nem érzékeny a környezeti hőmérséklet megváltozására, de más esetekben a környezeti hőmérsékletek különbsége változást okozhat a termodinamikai hatékonyság alapján felállított sorrendekben.

### **4. Tézis [2,3,4]**

Bebizonyítottam, hogy a termodinamikai hatékonyság érzékenysége a terméktisztaságok megváltozására különbözik különböző desztillációs struktúrák esetében.

### **5. Tézis [3,4]**

Bebizonyítottam, hogy a desztilláló oszlopok visszafelé történő hőintegrációja csökkenti a termodinamikai hatékonyságot olyan esetekben, amikor az integráció megoldható lenne rendszeren kívüli folyamatokkal, nyomás növelése nélkül.

### **6. Tézis [1]**

Bebizonyítottam, hogy frekvenciatartományban használt teljesítményindikátorok (MRI, CN, RGAno) sem önállóan, sem összevonva nem használhatók egyedülálló rendszer legjobb irányítási struktúrájának tervezésekor; ezért időtartományban végzett zavarásos vizsgálatok szükségesek ilyen tervezési feladatokhoz.

## **Alkalmazási lehetőség**

A kettős exergia analízis lehetséges alkalmazási területei a tervezés, és a meglévő folyamatok javítása energetikai szempontból. Az egy területen található üzemek között egyre gyakrabban igyekeznek kapcsolatot létesíteni energia-megtakarítási céllal. Ilyen esetekben hasznos lehet egy olyan eszköz, amelyik megmutatja, hogy mely üzemek vagy folyamatok esetén lehet a legtöbbet nyerni az integrációval. Amivel az exergia alapú megközelítés itt többet ad, mint ha egyszerűen a felhasznált energia (entalpia) alapján vizsgáljuk a folyamatokat; hogy az energia felhasználás csökkentése egyes üzemek esetében kevésbé hatékony megoldás lehet, mint a folyamatok közti integráció, és a teljes üzemsoportok vizsgálata.

Az elmúlt két évtized igen nagy ingadozások voltak tapasztalhatók különböző termékek és szolgáltatások iránt, így egyre több területen kezdtek el alkalmazni a lean gondolkodást. Ennek egyik eleme a rugalmatlanság csökkentése, ami szénhidrogének feldolgozása során is jelenthet előnyöket.

Az előbb említett folyamatok közt preferált integrációval kapcsolatban viszont a rugalmasság gondot okozhat. Ugyanis ha egy üzem leáll, akkor az integráció lehetősége is kiesik. Ilyen esetben viszont az integráció nélküli folyamat termikus hatékonysága leromlik, és az integrált folyamatok állási idejének arányától függően hátrányossá is válhat egy másik, rosszabb hatásfokú, de rugalmas folyamattal szemben. Erre az eshetőségre felkészülve már a tervezés során a kettős exergia analízis és várható gazdasági forgatókönyvek segítségével a megfelelő üzemet lehet tervezni.

A Folyamatirányítás egy örökzöld téma az élet minden területén, így az irányítástechnika első alkalmazási területén, a desztillációban is. A számítástechnika és szoftverek fejlődésével a modellezés és szimuláció lehetőségei jelentősen bővültek. A jelenlegi számítási kapacitások mellett viszont már egyes módszerek, amik valaha egyszerűségük miatt voltak népszerűek, mára háttérbe szorulhatnak. Úgy tűnik, hogy a frekvenciatartományban végzett vizsgálatok is kiszorulnak pontatlanságuk okán az egyre precízebbé váló időtartományban végzett kísérletek mögött. Főleg ha ezen kísérleteket automatizálva nagy számban és gyorsan el tudjuk végezni, mint az egyre több szoftverrel lehetséges.

## Közlemények

### Folyóiratcikkek

[1] Haragovics, Máté, Kencse Hajnalka, és Mizsey Péter (2012). “Applicability of Desirability Function for Control Structure Design in the Frequency Domain”. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51.49. (IF=2,206, Független hivatkozás=1), pp. 16007–16015. doi: 10.1021/ie300973b.

[2] Haragovics, Máté és Mizsey Péter (2012). “Exergy Analysis of Multicomponent Distillation Systems for Efficiency Ranking”. *Chemical Engineering Transactions* 29. doi: 10.3303/CET1229058.

[3] Haragovics, Máté és Mizsey Péter (2012). “Ranking of rectification structures separating quaternary mixtures with exergy analysis”. *Periodica Polytechnica: Chemical Engineering* 56.1. (IF=0,217), pp. 31–35. doi: 10.3311/pp.ch.2012-1.04.

[4] Haragovics, Máté és Mizsey Péter (2014). “A novel application of Exergy Analysis: lean manufacturing tool to improve energy efficiency and flexibility of hydrocarbon processing”. In: *Energy. Elfogadva (2014 szept.)*, (IF=4,159).

[5] Haragovics, Máté és Mizsey Péter (2014). Complex evaluation of multicomponent distillation systems: exergy, emission, and costs”. *International Journal of Exergy. Elfogadás alatt*, (IF=0,847).

### Poszter prezentációk

[6] Haragovics, Máté, Hajnalka Kencse, and Péter Mizsey (2010). “Frekvenciavizsgálatok alkalmazhatósága desztillációs oszlopok szabályozhatóságának megállapítására”. Oláh György Doktori Iskola konferenciája 2010. Budapest, HU.

[7] Haragovics, Máté és Mizsey Péter (2012). “Exergy Analysis of Multicomponent Distillation Systems for Efficiency Ranking”. PRES 2012. Praha, CZ.

[8] Haragovics, Máté és Mizsey Péter (2013). “Exergy analysis of multicomponent distillation systems for efficiency ranking”. Oláh György Doktori Iskola konferenciája 2013. Budapest, HU.

[9] Mizsey Péter, Benkő Tamás, Cséfalvay Edit, Haragovics Máté, Koczka Katalin, Manczinger József, Nagy Tibor, Pauer Viktor, Tóth András, és Valentínyi Nóra (2011). “Zöld

technológiák alkalmazása a fenntartható fejlődésben”. A mi világunk kémiája szimpózium. Budapest, HU.

[10] Mizsey Péter, Benkő Tamás, Cséfalvay Edit, **Haragovics Máté**, Koczka Katalin, Manczinger József, Nagy Tibor, Pauer Viktor, Tóth András, és Valentinyi Nóra (2012). “Zöld technológiák alkalmazása a fenntartható fejlődésben”. Jövő Hídja. Budapest, HU.

### **Előadások**

[11] **Haragovics, Máté** és Mizsey Péter (2011). “Applicability of desirability function for control structure design in frequency domain”. Interfaces '11. Sopron, HU.

[12] **Haragovics, Máté** és Mizsey Péter (2012). “Exergy analysis of distillation structures separating quaternary mixtures”. Műszaki Kémiai Napok '12. Veszprém, HU: Pannon Egyetemi Kiadó, p. 86.

