



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

PhD értekezés tézisei

**Az életciklus-elemzés integrálása a környezettudatos
folyamattervezési gyakorlatba**

Készítette:

Benkő Tamás
okleveles biomérnök

Témavezető:

Dr. Mizsey Péter
MTA doktora

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék
Budapest 2008

Poszter bemutatók

- [22] **Tamas Benko**, Katalin Koczka, Agnes Szanyi, Peter Mizsey, Zsolt Fonyo: Agreements and Contradictions in the Environmental and Economic Evaluation of Waste Solvent Treatment Options. *The 3rd International Conference of the International Society for Industrial Ecology*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005.
- [23] **Tamas Benko**, Agnes Szanyi, Katalin Koczka, Peter Mizsey: Comparison of Flue Gas Desulphurization Processes Based on Life Cycle Assessment. *CAPE Forum 2005*, Cluj Napoca, Romania, 2005.
- [24] **Benkő Tamás**, Szanyi Ágnes, Mizsey Péter: Fonyó Zsolt: Oldószerkezelési Eljárások Környezetvédelmi és Gazdaságossági Elemzése. *BME-Ipari Nyílt Napok, Budapesti Műszaki Egyetem*, Budapest, 2004. (magyar nyelven)
- [25] **Tamas Benko**, Katalin Koczka, Agnes Szanyi, Gabor Rezessy, Peter Mizsey, Zsolt Fonyó: Ecological evaluation of comparison of treatment options of non-ideal solvent mixtures, *CAPE Forum 2004*, Veszprém, 2004.
- [26] Szanyi Ágnes, **Benkő Tamás**, Koczka Katalin, Mizsey Péter, Mészáros Alajos, Borus Andor, Fonyó Zsolt: Oldószer Regenerálás Extraktív Heterogén-Azeotróp Desztillációval. *AWARENET, Szimpózium az Agrár- és Élelmiszeripari Hulladékok Csökkentésének Lehetőségeiről*, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 2003. (magyar nyelven)

Előadások

- [12] **Benkő Tamás**, Az életciklus elemzés integrálása a környezettudatos folyamat-tervezésbe. *Magyar Kémikusok Egyesülete*, Budapest, 2007. (magyar nyelven)
- [13] **Benkő Tamás**: Életciklus elemzés integrálása a környezettudatos folyamat-tervezésbe. *MIPOET Szimpózium*, Tótvázsony, 2007. (magyar nyelven)
- [14] **Benkő Tamás**, Mizsey Péter, Füstgáz kéntmentesítés regionális hatásának és hatékonyságának vizsgálata a Kárpát-medencében. *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki Karának 4. Doktoráns Konferenciája*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2007. (magyar nyelven)
- [15] **Tamas Benko**, Daniela Jacob: Untersuchung des Atmosphärischen Kreislaufs von SO₂ und Weiteren Spurenelementen im Karpatenbecken. *DBU Seminar*, Hamburg, Germany, 2006. (német nyelven)
- [16] **Tamas Benko**, Daniela Jacob: Untersuchung des atmosphärischen Kreislaufs von SO₂ im Karpatenbecken. *DBU Seminar*, Stapelfeld, Germany, 2006. (német nyelven)
- [17] **Tamas Benko**, Daniela Jacob: Investigation of the Transboundary Atmospheric Transport of SO₂ in the Carpathian Basin. *IMPRS-ESM Retreat 2005*, Bremen, Germany, 2005.
- [18] **Tamas Benko**, Agnes Szanyi, Katalin Koczka, Peter Mizsey, Zsolt Fonyo: Environmental and Economical Evaluation and Comparison of Non-ideal Waste Solvent Treatment Options. *31st International Conference of Slovak Society of chemical Engineering*, Tatranské Matliare, Slovakia, 2004.
- [19] **Benkő Tamás**: Az életciklus elemzés integrálása a környezettudatos folyamattervezésbe. *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki Karának 2. Doktoráns Konferenciája*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2004. (magyar nyelven)
- [20] **Benkő Tamás**, Koczka Katalin, Szanyi Ágnes, Rezessy Gábor, Mizsey Péter, Fonyó Zsolt: Nemideális oldószerkegyek hulladékkezelési lehetőségeinek környezetvédelmi és gazdaságossági elemzése. *Műszaki Kémiai Napok '04*, Veszprém, 2004. (magyar nyelven)
- [21] Szanyi Ágnes, **Benkő Tamás**, Koczka Katalin, Mizsey Péter, Mészáros Alajos, Borus Andor, Fonyó Zsolt: Négykomponensű nemideális elegyek szétválasztása extraktív heteroazeotróp rektifikálással. *Műszaki Kémiai Napok '04*, Veszprém 2004. (magyar nyelven)

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben új elvárásokat és koncepcionális kihívásokat támasztottak a műszaki kémiával és a vegyészmérnökökkel szemben. A környezettudatosság és a fenntarthatóság fogalmának elterjedése új követelményeket támasztott a tudományos gyakorlattal illetve a folyamattervezéssel (és üzemeltetéssel?) szemben. Ezek a követelmények és a velük együtt járó kihívások jelentik a vegyészmérnökség aktuálisan irányadó *negyedik paradigmáját*.

A folyamattervezés egyik alapvető eleme a célfüggvény meghatározása, mely segítségével a tervező a lehetséges műszaki alternatívákat egymáshoz képest rangsorolja. A környezettudatos folyamattervezés során a célfüggvénynek számszerűen ki kell fejeznie környezetünk értékét, vagy károsításának várható mértékét, annak érdekében, hogy a tervező munkája során környezettudatos döntéseket hozhasson.

A környezeti hatások numerikus kifejezésére és értékelésére már számos koncepciót és eljárást dolgoztak ki. A műszaki kémiában ezek közül az életciklus-elemzést (Life Cycle Assessment, LCA-t) tartják a legesélyesebbnek arra, hogy egykor általánosan is elfogadott elemző eljárás legyen a környezettudatos folyamattervezésben. Ennek oka részben az, hogy az LCA az egyetlen olyan környezeti menedzsment rendszer, melynek kereteit szabványok (ISO) is rögzítik. Az LCA-n belül, a környezeti hatások kvantitatív becslése és értékelése életciklus-hatásértékelő (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) eljárásokkal valósul meg.

Annak ellenére, hogy az LCA alapvető elemeit szabványok rögzítik, számos szubjektív elemet is tartalmaz, mint pl. a rendszerhatárok definiálása, vagy az LCIA eljárás kiválasztása. Ebből adódik, hogy az LCA a környezettudatos folyamattervezésben történő alkalmazásának egyelőre nincs állandósult és bevett gyakorlata, számos kérdés megválaszolásra vár még.

2. CÉLKITŰZÉSEK

Munkám során fő célul az LCA környezettudatos folyamattervezésben történő alkalmazhatóságának vizsgálatát, illetve a legfontosabb alkalmazási lehetőségek bemutatását tűztem ki.

Az életciklus-elemzés egyik alapvető, szubjektív döntésen alapuló lépése a hatásértékelő eljárás (LCIA) kiválasztása. Ma már számos LCIA eljárás létezik, ezek azonban mind a környezetterhelési modellt, mind kármutatóik szempontjából eltérnek egymástól. Az LCIA eljárások sokrétűsége, alkalmazásukra vonatkozó konszenzus hiányának következtében a megfelelő LCIA eljárás kiválasztása a mérnökök számára gyakran nem könnyű feladat.

Mindezeket figyelembe véve, munkám során célul tűztem ki két jelentős, gyakran alkalmazott LCIA eljárás, az Eco-indicator 99 és az Európai Unió CAFE CBA (Clean Air For Europe, Cost-Benefit Analysis) kármutatóinak, és azok relatív kárbecslési tulajdonságainak összehasonlítását, figyelembe véve a kármutatók bizonytalanságait is.

Emellett az LCA környezettudatos folyamattervezésben történő alkalmazásának két, gyakorlati szempontból is fontos területét tanulmányoztam. Ezek a következők:

- Alternatívák összehasonlítása, melynek során az azonos célt szolgáló műszaki megoldások környezetközpontú értékelése alapján történik az egyes alternatívák rangsorolása, és a környezetet legkevésbé károsító alternatíva kiválasztása. Az ilyen típusú elemzések során az alternatív folyamatokat rögzített üzemeltetési paraméterek mellett vizsgáljuk.
- Környezettudatos folyamattervezés, melynek során egy vizsgált folyamat azon üzemeltetési paramétereinek megállapítása történik, amely esetében a folyamat a legkisebb környezeti kárt okozza.

Konferencia kiadványok

- [5] **Tamas Benko**, Katalin Koczka, Agnes Szanyi, Peter Mizsey, Zsolt Fonyo: Agreements and Contradictions in the Environmental and Economic Evaluation of Waste Solvent Treatment Options. *The 3rd International Conference of the International Society for Industrial Ecology, Royal Institute of Technology*. Stockholm, Sweden, 2005, pp96-97.
- [6] Tamás Benkő: Environmental Evaluation and Comparison of Waste Solvent Treatment Options. *Periodica Polytechnica Ser. Chem. Eng.* 49 (2005), pp31-32.
- [7] **Tamas Benko**, Katalin Koczka, Agnes Szanyi, Gabor Rezessy, Peter Mizsey, Zsolt Fonyo: Environmental and Economical Analysis and Evaluation of Solvent Treatment Processes. *CAPE Forum 2004*, Veszprém, 2004.
- [8] **Tamas Benko**, Agnes Szanyi, Katalin Koczka, Peter Mizsey, Zsolt Fonyo: Environmental and Economical Evaluation and Comparison of Non-ideal Waste Solvent Treatment Options. *Proceedings - 31st International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering*, Tatranské Matliare, Slovakia, 2004, pp115.
- [9] **Benkő Tamás**, Koczka Katalin, Szanyi Ágnes, Rezessy Gábor, Mizsey Péter, Fonyó Zsolt: Nemideális oldószerkegyek hulladékkezelési lehetőségeinek környezetvédelmi és gazdaságossági elemzése. *Műszaki Kémiai Napok'04*, Veszprém, 2004, pp250-252. (magyar nyelven)
- [10] Szanyi Ágnes, **Benkő Tamás**, Koczka Katalin, Mizsey Péter, Mészáros Alajos, Borus Andor, Fonyó Zsolt: Négykomponensű nemideális elegyek szétválasztása extraktív heteroazeotróp rektifikálással. *Műszaki Kémiai Napok'04*, Veszprém, 2004, pp 248-249. (magyar nyelven)
- [11] Szanyi Ágnes, **Benkő Tamás**, Koczka Katalin, Mizsey Péter, Mészáros Alajos, Borus Andor, Fonyó Zsolt: Oldószer regenerálás extraktív heterogén-azeotróp desztillációval. *AWARENET, Szimpózium az Agrár- és Élelmiszeripari Hulladékok Csökkentésének Lehetőségeiről*, Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 2003, pp47-50. (magyar nyelven)

7. PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

Az értekezés témájában közzétett közlemények

- [1] **Tamas Benko**, Claas Teichmann, Peter Mizsey, Daniela Jacob: Regional Effects and Efficiency of Flue Gas Desulphurization in the Carpathian Basin. *Atmospheric Environment* 41 (2007), pp8500-8510. (IF: 2.630)
- [2] **Tamas Benko**, Peter Mizsey: Comparison of Flue Gas Desulphurization Processes Based on Life Cycle Assessment. *Periodica Polytechnica Ser. Chem. Eng.* 51 Vol. 2 (2007), pp 1-18.
- [3] Peter Mizsey, Luis Delgado, **Tamas Benko**: Comparison of Environmental Impact and External Cost Assessment Methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Accepted by reviewers, 2007. (IF: 1.483)
- [4] **Tamas Benko**, Agnes Szanyi, Peter Mizsey, Zsolt Fonyo: Environmental and Economic Comparison of Waste Solvent Treatment Options. *Central European Journal of Chemistry* 4 (2006), pp92-110. (IF: 0.561)

Az LCA környezettudatos folyamattervezésben történő alkalmazhatóságának vizsgálata során munkámat a levegőszennyezés-megelőzéséhez és a hulladékoldószerkezetek kezelési problémáihoz kapcsolódó esettanulmányok kiértékelése mentén hajtottam végre. Az életciklus-hatásértékelő eljárások közül az ún. károrientált, vagy egyponyos eljárásokat részesítettem előnyben. Ezek közé tartoznak a választott Ecoindicator-99 és a CAFE CBA is.

3. FELHASZNÁLT ADATOK ÉS MÓDSZEREK

Az életciklus hatásértékelési lépését munkámban a károrientált Eco-indicator 99 (EI-99) eljárás kármutatóinak segítségével valósítottam meg. Az EI-99 *hierarchist* és *egalitarian* modellváltozatait használtam tanulmányonként eltérő, egyedi súlyozó faktorokkal. Az EI-99 kármutatóival történő munkáimat a SimaPro szoftver támogatta.

Emellett az Európai Unió Tiszta Levegőt Európának (CAFE) programja keretein belül elkészített és közzétett költség-haszon elemzés (CBA) kármutatóit használtam és vizsgáltam munkám során. A CAFE CBA kármutatók különböző modellfeltételek mellett számított értékeit is alkalmaztam.

A füstgáz kéntelenítő berendezések levegőszennyezés csökkentésben mutatkozó hatékonyságának vizsgálata során a szennyező anyagok regionális légköri terjedését vizsgáltam. Ehhez a *REMOTE* regionális atmoszferikus terjedési modellt és a hozzá kapcsolt *RADM II* légköri-kémiai modellt alkalmaztam.

4. A KUTATÓMUNKA SORÁN ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK MENETE

4.1. Hatásértékelő eljárások vizsgálata

Megvizsgáltam és összehasonlítottam az EI-99 és a CAFE CBA hatásértékelő eljárásokat, hogy megállapítsam a köztük fennálló esetleges hasonlóságokat és különbségeket. A vizsgálat során öt jelentős légszennyező anyag (SO₂, NO_x, VOC, NH₃ and PM_{2.5}) kármutatóját vettem alapul. A kutatás eredményeit az **1. tézisben** foglaltam össze.

Vizsgáltam a két hatásértékelő eljárás numerikus eredményeinek, a kármutatók bizonytalanságából adódó, érzékenységet: öt ipari nagyváros légszennyezési adatai értékeltém a két hatáselemző eljárás segítségével, a hatáselemzés eredményét Monte Carlo szimulációval generált kármutató-sokaságok formájában adtam meg. Az így nyert hatásindikátorokat városonként összehasonlítottam. A kutatás eredményeit a **2. tézisben** foglaltam össze.

Összehasonlítottam az öt ipari nagyváros légszennyezését jellemző, bizonytalansági elemzés alapján megállapított, legvalószínűbb hatásindikátor értékeket a hatásértékelő eljárások ugyanazon esettanulmányra vonatkozó, egy pontos kármutatókkal (a bizonytalansági adatok nélkül) számított eredményeivel. A kutatás eredményeit a **3. tézisben** kerültek összefoglalásra.

Átfogó esettanulmányt készítettem egy ipari nagyváros légszennyezési adatai alapján. A kibocsátási adatokat az EI-99 eljárás segítségével értékeltém, az eredményeket a szennyező anyagok és azok forrásainak jelentősége szempontjából történő rangsorolása szempontjából elemeztem. A kutatás eredményeit a **4. tézisben** foglaltam össze.

környezetközpontú döntések meghozhatók, (iii) környezeti szempontból legjobb füstgáz-kéntelenítési eljárás kiválasztását, (iv) azok évszaktól függő működtetési irányelveinek meghatározását, továbbá (v) hulladékoldószerkezetek kezelési alternatívái és azok működési paramétereinek környezeti értékelését. A hulladékoldószer kezelésre vonatkozó kutatásom eredményei továbbá élesen rámutatnak a környezetközpontú folyamattervezés jelentőségére és szükségességére.

Munkám és elért eredményem rámutatnak, hogy az életciklus elemzés mely területeken, a folyamattervezés mely szakaszaiban alkalmazható, mekkora befektetett munka szükséges, és milyen problémákkal kell számolni, amennyiben a mérnök, korunk elvárásainak megfelelően, tervezési munkája során környezettudatos döntéseket kíván hozni.

5.3. Az életciklus-elemzés alkalmazása: hulladékoldószerkezelése

7. tézis. Hulladékoldószer-kezelési alternatívák általam elvégzett környezeti és gazdaságossági értékelése és rangsorolása alapján megállapítottam, hogy a vizsgált alternatívák környezeti és gazdaságossági értékelése egymással ellentmondásos eredményeket adnak. Amíg gazdaságilag egyértelműen az oldószer-regenerálás az előnyös megoldás, addig a környezeti értékelés rámutat, hogy a korszerűtlen, bonyolult, kevésbé hatékony regenerálási eljárás környezeti terhelése közel azonos, sőt valamivel magasabb is, mint az égetése [4].

6. EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA

A disszertációban összefoglalt kutatásaim inkább alapkutatás jellegűek, azonban kutatási eredményeim aktívan hozzájárulnak a mérnökök környezettudatos folyamattervezéséhez, melynek során környezetközpontú tervezési alternatívákat hoznak létre és azokat értékelik.

Az általam vizsgált hatáselemző eljárások között felfedezett hasonlóság egyrészt kölcsönösen bizonyítja azok alkalmasságát és érdemeit, másrészt segíti azok jövőbeni kutatását és fejlesztését. Emellett az egyponthasznú hatáselemző eljárások bizonytalanságával kapcsolatos eredményeim irányadóak az eljárások megfelelő alkalmazásában, segítik a vizsgált eljárások eredményeinek megfelelő kiértékelését. Mindezek nagy mértékben segíthetik a környezetvédelem területén dolgozó döntéshozók gyakorlati munkáját.

Dolgozatomban több, gyakorlati szempontból is jelentős példát mutattam be az életciklus elemzés megfelelő integrációjára és alkalmazására, és ez által a környezettudatos folyamattervezés eredményes megvalósítására.

Ezek a példák magukba foglalják a (i) az egyponthasznú LCIA eljárások helyes alkalmazásának szabályait, (ii) a levegőszennyezésre vonatkozó vizsgálatokat, melyek esetében a szennyezések és azok forrásai rangsorba állíthatók, a szükséges

4.2. Az életciklus-elemzés alkalmazása levegőszennyezés megelőzésére

A.) Füstgáztisztítási eljárások vizsgálata

Életciklus-elemzés segítségével három, egymástól alapvetően eltérő füstgáztisztítási eljárást vizsgáltam: (1) tüztéri kéntelenítés száraz mészkő adagolásával, (2) mészkő-szuszpenziós nedves mosás, és (3) regeneratív, réz-oxidos füstgáz-kéntelenítés. A kutatás eredményeit az **5. tézis** tartalmazza.

B.) Füstgázkéntelenítés hatékonyságának vizsgálata a Kárpát-medencében

Vizsgáltam, hogy a nagykapacitású erőműveknél telepített füstgáz-kéntelenítő eljárások milyen hatékonysággal csökkentik a regionális légszennyezettséget. A REMOTE modell segítségével modelleztem az emittált kén-dioxid légköri terjedését, és különböző kén-dioxid kibocsátási forgatókönyvek esetére megállapítottam az immisszió mértékét. A vizsgált földrajzi egység a Kárpát-medence volt. A kutatás eredményeit a **6. tézis** tartalmazza.

4.3. Az életciklus-elemzés alkalmazása hulladékoldószerkezelésére

Elkészítettem egy valós ipari probléma, egy erősen nem ideális oldószer elegy hulladékkezelési alternatíváinak környezetközpontú és gazdaságossági elemzését. A vizsgált hulladékkezelési alternatívák az oldószer-regenerálás és a termikus hasznosítás, vagyis az égetés volt. Munkám során két oldószer-regenerálási alternatívát vizsgáltam: egy bonyolultabb, turner vágásos eljárást, és egy újabb, hibrid elválasztási sémát.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEIM

5.1. Hatásértékelő eljárások vizsgálata

1. tézis. Kimutattam, hogy a vizsgált esetekben a két hatásértékelő eljárás (EI-99 és CAFE CBA) egyponos kármutatói között egyértelmű kapcsolat van. A kapcsolat jellege lineáris.

A kármutatók között kimutatott kapcsolat azt mutatja, hogy a két eljárás a szennyező anyagokat környezetkárosítási potenciáljuk alapján közel teljesen azonosan rangsorolja. Az általam vizsgált légszennyezők esetében ez a szoros kapcsolat nem függött a CAFE CBA modellváltozatától [3].

2. tézis. Ipari nagyvárosok légszennyezési adatait EI-99 és CAFE CBA hatásértékelő eljárásokkal kiértékelve kimutattam, hogy a kármutatók bizonytalanságának figyelembevételével számolt, 90%-os konfidencia szint mellett kiértékelt eredmények nehezen különböztethetők meg, és a légszennyezésre vonatkozó környezeti preferencia nem alakítható ki. Másrésről, az öt vizsgált városra generált hatásindikátorok statisztikailag valószínű értékei között szoros lineáris kapcsolat van, ezt alátámasztja a determinációs együttható (R^2) 0,95-nél nagyobb értéke [3].

3. tézis. Kimutattam, hogy az EI-99 és a CAFE CBA hatásértékelő eljárások kármutatóinak alkalmazása esetében a bizonytalanság figyelembevételével és anélkül számított LCIA eredmények közötti különbség kisebb, mint 10%. Ez alapján javaslom a hatásértékelő eljárások egyponos kármutatóinak (az EI-99 eljárás esetén az ún. „best guess” értékek, a CAFE CBA esetében pedig az egyes szennyezőkre vonatkozó kármutatók átlagértékének) használatát, mivel ezek elegendőek a környezeti preferencia felállítására [3].

4. tézis. Az általam vizsgált ipari nagyváros légszennyezés-adatainak elemzése alapján rámutattam, hogy károrientált LCIA eljárások, mint az EI-99, egyponos

kármutatói segítségével a légszennyező anyagok és forrásaik rangsorba állíthatók, ami alapján lehetőség nyílik levegőminőség-védelmi stratégiák kidolgozására [3].

5.2. Az életciklus-elemzés alkalmazása: levegőszennyezés megelőzése

5. tézis. Három füstgáztisztítási eljárás EI-99 kármutatókkal általam elvégzett környezeti értékelése alapján megállapítottam, hogy a kibocsátást nem korlátozó esethez képest az emissziócsökkentő technikák a környezetre káros hatásokat 80 és 92% közötti mértékben mérsékelik.

Megállapítottam továbbá, hogy az általam vizsgált rendszerek közül a kéneltávolító vegyület szempontjából egyutasnak számító nedves mosás és a száraz mészkő adagolásos technikák nagyjából azonos környezeti mutatókkal bírnak, míg a regeneratív eljárás, melynek alapját a kéneltávolító ágens, a réz-oxid, szorpció/redukció/oxidációs ciklusa adja, környezeti szempontból jelentősen kiemelkedik [2].

6. tézis. Megállapítottam, hogy állandó, 90%-os eltávolítási hatásfokkal üzemelő kénkibocsátást csökkentő eljárások, egész évre vonatkoztatva, 79%-al csökkentik a kén-dioxid horizontális, 66%-al a vertikális terjedését. Továbbá nagymértékben csökkentik az országhatáron túljutó szennyezés mértékét is.

Kimutattam, hogy az időjárási tényezőknek jelentős, nem elhanyagolható mértékű szerepe van a légszennyezés kialakulásában: azonos kéneltávolítási hatásfok mellett télen 25%-al magasabb légszennyezettség alakul ki, mint más évszakokban. Megállapítottam, hogy ezért télen nagyobb mértékű kéneltávolítás szükséges ahhoz, hogy a többi évszakhhoz hasonlóan jó levegőminőséget lehessen biztosítani [1].