

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET
VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK

**HULLADÉKOK ENERGETIKAI CÉLÚ HASZNOSÍTÁSÁNAK
VIZSGÁLATA ENERGIAHATÉKONYSÁG, KÖLTSÉG-HASZON ÉS
ÉLETCIKLUS-ELEMZÉSI MÓDSZEREKKEL**

PhD értekezés téziszfüzete

KÉSZÍTETTE:

Bodnár István

okleveles gépészmérnök, villamosmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK- ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

Prof. Dr. Tisza Miklós

a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Prof. Dr. Páczelt István

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, professzor emeritus

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Dr. Czibere Tibor

akadémikus, a műszaki tudományok doktora, rektor emeritus

TÉMAVEZETŐ:

Dr. Siménfalvi Zoltán

PhD, egyetemi docens

TÁRS-TÉMAVEZETŐ:

Dr. Mannheim Viktória

PhD, ügyvezető

Miskolc, 2015

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

Elnök: **Prof. Dr. Szabó Szilárd CSc**
Miskolci Egyetem GÉIK, egyetemi tanár

Titkár: **Dr. Hriczó Krisztián PhD**
Miskolci Egyetem GÉIK, tanársegéd

Tagok: **Dr. Bolló Betti PhD**
Miskolci Egyetem GÉIK, egyetemi docens

Dr. Örvös Mária PhD
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
GPK, egyetemi docens

Dr. Balázs Tibor PhD
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
GPK, ny. egyetemi docens

HIVATALOS BÍRÁLÓK

Dr. Tóthné Prof. Dr. Szita Klára CSc
Miskolci Egyetem GTK, egyetemi tanár

Dr. Kovács Viktória Barbara PhD
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
GPK, egyetemi adjunktus

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS.....	4
1.1.	CÉLKITŰZÉSEK.....	4
1.2.	HELYZETKÉP ÉS IRODALMI ÁTTEKINTÉS	5
2.	VIZSGÁLT ALAPANYAGOK ÉS TECHNOLÓGIÁK.....	6
2.1.	TŰZELŐANYAGKÉNT HASZNOSÍTOTT ALAPANYAGOK	6
2.2.	TERMIKUS KEZELÉSI TECHNOLÓGIÁK	8
3.	MÓDSZERTANI ALAPOK	10
4.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	12
4.1.	TÉZISEK	12
4.2.	THESIS	14
5.	HASZNOSÍTÁSI ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK	16
6.	AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK	17
6.1.	IDEGEN NYELVEN.....	17
6.2.	MAGYAR NYELVEN	17
	IRODALOMJEGYZÉK.....	19

1. BEVEZETÉS

Magyarország hulladékgazdálkodása az utóbbi évtizedben jelentős változáson ment keresztül. A 2004-es Európai Unióhoz való csatlakozását követően hazánkban is megjelent az intézményesített és szervezett szelektív hulladékgyűjtés, amely 2015. január 1-től kötelezővé vált a kommunális hulladék begyűjtésére vonatkozóan. Az Európai Unió előírásai kötelezik hazánkat, hogy 2020-ig a háztartási, és az ahhoz hasonló hulladékból származó üveg-, fém-, műanyag és papírhulladék újrahasználatra történő előkészítésének és újrafeldolgozásának mértékét 50%-ra növelje [1].

2012-ben beépült a hazai hulladékgazdálkodási jogszabályokba az integrált hulladékgazdálkodási piramis, ami a korábban alkalmazott deponálási módszerek helyett az újrahasznosítást helyezte előtérbe. Ennek megfelelően a lerakás és az energiatermelés nélküli hagyományos égetés helyébe, a jobban preferált, anyagában történő- és az energetikai célú hasznosítás lépett. A hulladékgazdálkodásban ez volt az első igazán jelentős lépés, amit a jogalkotók a környezetvédelem és a fenntartható fejlődés irányába tettek.

A hulladék energetikai célú hasznosítására termikus kezelési technológiákat alkalmazunk, mint például a hagyományos égetés, a pirolízis, a gázosítás és a plazmatechnológia, valamint ezek kombinációja. Az alternatív termikus technológiák legnagyobb előnye a hagyományos égetéssel szemben, hogy a szilárd halmazállapotú hulladékot gáz halmazállapotú energiahordozóvá, úgynevezett szintézisgázzá (pirolízisnél pirogázzá) alakítják át, amelyből nagyobb hatékonyságú technikai körfolyamatban termelhető hasznos hő- és villamos energia. Az így kapott gáztermék vegyipari szintézisekben történő hasznosítása is számottevő mértékű, ilyen eljárás például a metanol gyártás.

1.1. CÉLKITŰZÉSEK

A kutatómunkám legfőbb célja az azonos összetételű hulladékot hasznosító, eltérő paraméter-beállításokat alkalmazó technológiák összehasonlítása, a tervezési és üzemeltetési folyamatok során az optimális üzemi paraméterek meghatározásának elősegítése. E cél elérése érdekében az egyes technológiai kialakításokat komplex vizsgálatoknak vettem alá.

A bemutatott technológiák vizsgálata és összehasonlítása érdekében termo-kinetikai modellezést végzek fás szárú biomasszára és hulladékaikra vonatkozóan. A termokinetikai modellt a moláris anyag- és az energia megma-

radás tétele alapján építettem fel. Az egyenletrendszer numerikusan megoldható. A doktori értekezésemben az energetikai célú hasznosítást vizsgálom energiahatékonyság, környezetvédelmi megközelítés és gazdasági-gazdaságossági aspektusok figyelembevételével.

Az energetikai hatékonyságot a jellemző mérőszámok bevezetésével és azok számításával megkeresem az optimum pontokat, valamint ajánlásokat teszek a technológiák alapanyagától függő optimális üzemeltetési paramétereire. A legfontosabb mérőszámok a kémiai és energiakonverziós hatásfok, valamint a hő- és a villamos-energetikai hatékonyság, amit a kezelt hulladék összetétele, nedvesség- és hamutartalma, valamint az alkalmazott segédgáz mennyisége és típusa is befolyásol. E paraméterek befolyásoló képességét hatásfok- és hatékonyságtérképeken ábrázolom.

A környezeti hatásokat életciklus-elemzés segítségével veszem figyelembe. Az életciklus-elemzést több évtizede sikerrel alkalmazzák termékek, technológiák és szolgáltatások környezetközpontú értékelésére. Az utóbbi években, az energiaiparban és a hulladékgazdálkodásban is használják döntéstámogató-döntéshozó módszerként. Az új hulladékgazdálkodási jogszabály 2013 januárjában bevezette az életciklus-szemléletet, de gyakorlati alkalmazást eddig még nem rendelt hozzá, így az elkészített elemzéseim új alapokra helyezhetik Magyarországot, a hulladékok energetikai hasznosításához való viszonyát. Az elemzéseim eredményeként a jelenleg is üzemelő, vagy a jövőben tervezett termikus hulladékhasznosító erőművek működése, környezetvédelmi szempontból is hatékonyabbá tehető. Az életciklus-térképek lehetővé teszik, hogy életciklus-elemző szoftver hiányában is számszerű értékeket kapjunk a technológiák működésére vonatkozóan, a korábban említett alapadatok megadásával.

Végül a gazdasági-gazdaságossági kérdések megválaszolása érdekében a technológiai adatok függvényében egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzést végzek a plazmatechnológiával történő kezelésre vonatkozóan. Az elemzések eredményeire alapozva az energetikai és a környezetvédelmi paraméterek felhasználásával optimum-keresési eljárás is alkalmazható.

1.2. HELYZETKÉP ÉS IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Világszinten a hagyományos égetéses technológia a legelterjedtebb megoldás hulladékok termikus kezelésére. A világszinten működő mintegy 2200 hulladékégető közül, a hagyományos égetéses technológia részesedése

meghaladja a 95 %-ot, míg a maradék kevesebb, mint 5 %-on az alternatív termikus kezelési technológiák, név szerint a pirolízis, a gázosítás és a plazma-technológia, valamint ezek kombinációja osztozkodik. Közép- és Kelet Európában jellemzően csak hagyományos égetők üzemelnek. Önálló kialakítású alternatív technológiájú rendszerekkel csak kísérleti, vagy fél üzemi kialakításúakkal találkozhatunk.

Az alternatív technológiák legnagyobb előnye, hogy nem csak az energiatermelésre helyezik a hangsúlyt, hanem lehetővé teszik a feladott hulladék, illetve tüzelőanyag bizonyos kémiai összetevőinek a visszanyerését. A visszanyert fémek a kohászatban, a vegyi anyagok pedig a vegyipari és rokonipari ágazatokban alkalmazhatóak nyersanyagok kiváltására. Az alaptechnológia más technológiával történő integrálása jelentősen javíthatja az energetikai hatékonyságot, ami így gazdaságosabb üzemeltetést tesz lehetővé, és csökkenthető a környezetterhelés mértéke is. A 2008/98/EK hulladék keretirányelvben megfogalmazott hatékonysági kritérium alapján, csak akkor beszélhetünk energetikai célú hasznosításról, ha új égetőknél a 65 %-ot, meglévőknél pedig a 60 %-ot meghaladó az energetikai hatékonyság. Ezen értékek alatt csak a kevésbé preferált ártalmatlanításról beszélhetünk, főként ez teszi indokolttá az alaptechnológiák kombinálását.

A Magyarországon működő 22 hulladékégető közül csak egy felel meg ennek a kritériumnak. Legkisebb anyagi ráfordítással a forgódobos égetőke-mencék alakíthatók át pirolízissel történő kombinációs technológiává. Az átalakítási költségek legnagyobb részét a szabályozási- és mérés-technikai eszközök jelentik [13]. Magyarországon három égetőmű alkalmazza ezt a kombinációt, de az üzemeltetési módjuk miatt továbbra sem felelnek meg az energetikai hatékonyság-kritériumnak. Európában jelenleg 462 hulladékégető üze-mel, ezek közül mindössze csak 32 alkalmaz valamilyen alternatív technológi-át, és azok is Nyugat Európában találhatók [12].

2. VIZSGÁLT ALAPANYAGOK ÉS TECHNOLÓGIÁK

2.1. TÜZELŐANYAGKÉNT HASZNOSÍTOTT ALAPANYAGOK

Magyarország földrajzi adottságainak köszönhetően jelentős megújuló energiaforrás-potenciállal rendelkezik. A legnagyobb lehetőség a napenergia hasznosításában rejlik, amit a szélenergia és a biomassa követ. A hazai bio-

massza-potenciál 328 PJ-ra tehető, amiből jelenleg 49,2 PJ kerül hasznosítása, ez 15%-os hasznosítási arányt jelent [14].

A biomassza általános definíciója magába foglalja a Földön megtalálható összes élő tömeget. Mérnöki szempontból biomasszának csak az energetikailag hasznosítható növényeket, terméseket, melléktermékeket, valamint a növényi és állattartási hulladékokat értjük. Magyarországon jogi fogalmát a 2010. évi CXVII. törvény határozza meg (1. § 3. bekezdés): „*biomassza: a mezőgazdaságból - a növényi és állati eredetű anyagokat is beleértve, erdőgazdálkodásból és a kapcsolódó iparágakból, többek között a halászatból és az akvakultúrából - származó, biológiai eredetű termékek, hulladékok és maradványok biológiailag lebontható része, valamint az ipari és települési hulladék biológiailag lebontható része*”.

A kémiai összetétel alapján készítettem egy összefoglaló táblázatot (3.1. táblázat), ami a H/C és az O/C arányok (egy mólnyi karbon tartalomra vonatkoztatott hidrogén és oxigén mennyiség) alapján tartalmazza az egyes fajtákat.

3.1. táblázat: Fás szárú biomasszák H/C és O/C kategóriái [-]

H/C arány	O/C arány	O/C arány	O/C arány	O/C arány	O/C arány	O/C arány
1,15	-	0,45	0,50	0,55	-	-
1,20	-	0,45	0,50	0,55	0,60	-
1,25	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	-
1,30	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,40	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,45	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,50	-	-	0,50	0,55	0,60	0,65
1,55	-	-	0,50	0,55	0,60	0,65
1,60	-	-	-	-	0,60	0,65

Összesen 46 kategóriát különítettem el, ami jellemzően lefedi az ismert fafajtákat, valamint a fahulladékokat [8]. Megfigyelhető, hogy nem létezik olyan fás szárú biomassza, amely 1,15–1,20 H/C arány mellett 0,40 vagy 0,65 O/C aránnyal rendelkezik [9]. A feltüntetett arányok alapján elkészítettem az elemzéseket, pirolízisre, gázosításra, valamint plazmatechnológiára vonatkozó-

an, az említett reakciókörülmények mellett, változó nedvességtartalom esetében. A biomasszák közül a fás szárú biomasszákat és hulladékaikat vizsgáltam.

A biomassza a benne rejlő lehetőségnek köszönhetően a terület- és a településfejlesztésben, valamint a kistérségek munkahely-teremtésében kiemelt szerepet játszhat, ami ez által szerves részét képezheti a közmunkaprogramnak. A biomasszán alapuló fejlesztések lehetőséget adnak továbbá „falu fűtőművek” és villamos erőművek létesítésére, amik amellest, hogy zöldenergiát termelnek, még bevételi forrást is jelenthetnek a települések számára.

2.2. TERMIKUS KEZELÉSI TECHNOLÓGIÁK

A termikus kezelési technológiák olyan műveletek, amelyek alkalmasak a megsemmisítésre váró hulladékokat, valamilyen szempontból kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező termékeké, illetve energiává átalakítani. Az alkalmazott eljárások legfőbb végtermékei gáz-, illetve szilárd halmazállapotú anyagok [3].

A termikus kezelési technológiákat a tipikus reakciókörülményeik alapján szokás összehasonlítani. Az egyik legfontosabb reakciókörülmény az alkalmazott hőmérséklet, amely előzetes tájékoztatást ad a technológia környezetre gyakorolt hatásáról, és a beruházási költségéről. Általánosságban elmondható, hogy a hőmérséklet növelésével a lejátszódó reakciók minőségi javulásából következően csökkenthető a technológia környezetkockázati tényezője, de ezzel együtt arányosan növekedni fog a beruházási költség. A nagyobb hőmérséklet speciális anyagok, fémötvözetek és műszaki kerámiák alkalmazását igényli, amelyek jelentős költségnövekménnyel járnak. A beruházási költség legmeghatározóbb tényezői az üzemi hőmérséklet és nyomás.

A második, és egyben a legfontosabb reakciókörülmény a légfelesleg tényező. Részben ez a jellemző mutatja meg, hogy milyen a kibocsátott gáztermék kémiai összetétele és mekkora a fajlagos mennyisége. Tökéletes égetés esetében jelentős légfelesleggel kell számolnunk (a légfelesleg nagyobb, mint egy), amely így növeli közvetlenül a kibocsátott füstgáz mennyiségét (több levegőt tartalmaz), valamint közvetve - a füstgáztisztítási rendszeren keresztül - a beruházási és üzemeltetési költségeket.

A harmadik reakciókörülmény az üzemi nyomás, ami a reakciók lejátszódásának egymáshoz való viszonyát határozza meg. A keletkező gáztermék kémiai összetételében fontos szerepet játszik, továbbá a beruházási költségek egyik meghatározó tényezője.

A 3.2 és a 3.3 táblázatok szemléltetik az alaptechnológiák jellemző reakciókörülményeit, valamint a keletkező végtermékeket és az alkalmazott erőgépek típusát. A táblázatokban feltüntetésre kerültek az energiatermelést követően keletkező maradékanyagok megnevezései is [2, 3, 4, 5, 6, 7].

3.2. táblázat: Termikus kezelési technológiák tipikus reakciókörülményei

Eljárás	Hőmérséklet [°C]	Légfelesleg tényező	Üzemi nyomás [bar]	Segédáramok
Pirolízis	300–600 (1.600) °C	$\lambda = 0$ endoterm	$p \leq 1$ bar $p \geq 1$ bar	- nitrogén
Pirolitikus- elgázosítás	800–1.000 °C	$0 < \lambda < 0,5$	$p \geq 1$ bar	levegő, vízgőz
Hagyományos égetés	850–1.200 °C	$\lambda \geq 1$ $1,1 \leq \lambda \leq 2,5$ exoterm	$p \geq 1$ bar	levegő, földgáz póttüzelés
Gázosítás	600–1.600 °C	$\lambda < 1$ $0,5 \leq \lambda \leq 0,8$ parciális oxidáció	$1 \leq p \leq 20$ bar	levegő, vízgőz, CO ₂ és O ₂ keverék, ezek kombinációja
Plazma- technológia	2.000–6.000 °C	$\lambda = 0,5$ endoterm	$1 \leq p \leq 20$ bar	levegő, vízgőz, CO ₂ és O ₂ keverék, ezek kombinációja
Referencia: Földgázüzemű gázmotoros erőmű	600–1.200 °C	$\lambda = 1,8$ exoterm	$p = 1$ bar	levegő

A negyedik reakciókörülmény a segédáramok típusát foglalja magába. A segédáramok két csoportba sorolhatók, egyrészt anyag-, másrészt energia áramokat különböztetünk meg. Az alkalmazott segédgáz befolyásolja a keletkező végtermékek összetételét, kezelhetőségét, fizikai- és kémiai tulajdonságait. Bizonyos technológiáknál külső hő bevitelre lehet szükség, amely jellemzően földgáz, szén, vagy olaj póttüzeléssel, illetve villamos energiával valósítható meg.

A keletkezett végtermékek megmutatják, hogy a technológiát elhagyó anyagok milyen formában hasznosíthatók, vagy esetlegesen milyen típusú utókezelést igényelnek. A hagyományos égetést leszámítva a termikus kezelési technológiák közvetlenül nem alkalmasak villamos és/vagy hőenergia előállítására, ezért a keletkező haszontermékeket tüzelés útján tudjuk alternatív ener-

giahordozóként hasznosítani. Ennek okán az új technológiákat gyakran kombinálják a hagyományos égetéses technológiával. Erőművi alkalmazás esetén célszerű megadni, hogy milyen erőgépet alkalmazunk. Az erőgép típusa közvetlenül a technológiák energetikai hatékonyságát, ez pedig közvetve a gazdaságossági mutatókat, legfőképpen a megtérülési időt befolyásolja, határozza meg. Az energetikai hatékonyság egyenes arányban áll a fajlagosított környezetterhelés mértékével, a környezetkockázati tényezővel.

3.3. táblázat: Termikus kezelési technológiák termékei és az alkalmazott erőgépek

Eljárás	Keletkező termék erőgép előtt	Erőgép	Keletkező végtermék erőgép után
Pirolízis	pirogáz, pirololaj, pirokoksz	gázmotor, gázturbina, dízelmotor, gőzkazán-gőzturbina	füstgáz (<5% éghető), salak, hamu, pernye
Pirolitikus-elgázosítás	pirogáz, kevesebb pirokoksz- és olaj		
Hagyományos égetés	tüzelőanyag, hulladék ¹	gőzkazán-gőzturbina	
Gázosítás	szintézisgáz, salak, hamu, pernye	gázturbina, gázmotor	füstgáz (<5% éghető)
Plazmatechnológia	szintézisgáz, üvegesedett salak	gázturbina, gázmotor	
Referencia: Földgázüzemű gázmotoros erőmű	földgáz ²	gázturbina, gázmotor	füstgáz (<3% CH ₄ tartalom)
<p><u>Megjegyzések:</u> ¹ nem a technológia terméke, hanem a technológiába belépő alapanyag, ami minden technológia esetében megegyezik ²a referencia erőműnél hulladék helyett földgáz a tüzelőanyag</p>			

Mindezek figyelembevételével célszerű a technológiákat tovább vizsgálni és az egyes összefüggéseket külön-külön ellenőrizni, összehasonlítani és értelmezni. Ahhoz, hogy a döntéshozatali folyamat során minden fontos és látszólag kevésbé fontos tényező hatása és súlya felismerhető legyen; egy átfogó modell alkalmazása válik indokolttá.

3. MÓDSZERTANI ALAPOK

Ha a hulladékokat energiatermelésre szeretnék használni, azaz elsődleges tüzelőanyagot akarunk kiváltani velük, akkor valamilyen termikus kezelési

technológiát kell alkalmaznunk. A legismertebb ilyen technológia a hagyományos égetés, ezen kívül a gázosítás, a pirolízis, a plazmatechnológia és az együttégetés áll a rendelkezésünkre. A technológiák kombinálásával új megoldások kerülnek előtérbe, amelyek az alaptechnológiák előnyös tulajdonságait ötvözve, küszöbölik ki a hátrányos sajátosságokat. A kombinációs technológiák terén bevezettem az egylépcsős, azaz a folyamatintegrált, valamint a két és többlépcsős, technológiaintegrált termikus kezelési technológiákat.

Kutatómunkám során a fás szárú biomasszát valamint a települési szilárd hulladékot vizsgáltam. A fás szárú biomasszákat a karbon tartalomra vonatkoztatott fajlagos hidrogén és oxigén tartalom alapján 46 kategóriára osztottam és termokinetikai modellvizsgálatokat végeztem a pirolizálására, gázosítására és plazmatechnológiával történő kezelésére vonatkozóan. Bevezettem a fajlagos energia kihozatal mértékét, ami megmutatja azt, hogy egységnyi tömegű szilárd tüzelőanyag kezelése során mekkora energiatartalmú szintézisgáz állítható elő.

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a nedvességtartalom növekedése a pirolízis során növeli a fajlagos energia kihozatal mértékét, ezen keresztül javítja a reakció hatásfokát. A gázosításnál és a plazmatechnológiánál ellentétes tendencia figyelhető meg. A modellvizsgálatok eredményeit energetikai-hatékonyság térképeken ábrázoltam. E térképek lehetővé teszik, hogy bonyolult számítások és mérések helyett, közvetlenül leolvassva meghatározhatjuk a bemenő alapanyag összetételének megfelelő energia kihozatalokat és hatásfokokat.

Az életciklus-elemzés (LCA- Life Cycle Assessment) napjainkban, az egyik legjobban teret hódító környezetmenedzsment rendszereszköz, amelynek alkalmazása elsősorban az egymást helyettesítő szolgáltatások, termékek és technológiák esetén a legcélravezetőbb. Az LCA kapcsán számszerűsítést és becslést végzünk arra vonatkozóan, hogy egy termék teljes élettartama során (előállítás, annak elosztásán, felhasználásán át a belőle képződő hulladék ártalmatlanításáig) milyen környezeti terheléseket okoz, illetve milyen és mennyi természeti erőforrást használ fel (beleértve az energiakiadásokat is) [10].

Az ISO 14040 szabvány alapján az életciklus-elemzés a következőképp definiálható: *"a termékkel kapcsolatos környezeti tényezők és potenciális hatások értékelésének olyan módszere, amely leltárt készít a termékkel kapcsolatos folyamatok rendszerének bemeneteiről és kimeneteiről; kiértékeli az ezekkel kapcsolatos potenciális környezeti hatásokat; értelmezi a leltári elemzésnek és*

a hatásértékelés fázisainak eredményeit a tanulmány céljainak figyelembevételével".

Életciklus-elemzéseket készítettem az összetétel függvényében mind a négy alaptechnológiára vonatkozóan, az ismertetett biomasszára, valamint települési szilárd hulladékáramokra. Az elvégzett elemzések végeredményeire támaszkodva elkészítettem az életciklus-térképeket, amelyek lehetővé teszik, hogy életciklus-elemző szoftver hiányában is számszerűsíteni tudjuk az egyes technológiák és hulladékok környezeti hatáskategóriáinak értékeit.

Végezetül a plazmatechnológiára vonatkozóan egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzést végeztem, amely a hagyományos módszerektől eltérően pénzügyi költség és energetikai haszon elemzéseként fogható fel. Széndioxid, valamint vízgőz segédgázként történő alkalmazását és ezek hatását vizsgáltam. Elmondható, hogy a fás szárú biomassza esetében a vízgőz alkalmazása energetikai és pénzügyi hasznot egyaránt eredményez, így gazdaságos alternatívája lehet a levegővel történő kezelésnek.

A költség-haszon elemzés egy olyan döntéstámogató módszer, amely segítséget ad egy termék, technológia, vagy szolgáltatás egységnyi költség befektetésével elérhető haszon becslésére. A módszer a releváns költségek és hasznok beazonosításának kiindulópontjaként szolgál, az alternatív lehetőségek összehasonlításához és értékeléséhez. Vizsgálja az adott projektberuházás során felhasználni kívánt források és az általuk nyerhető bevételeket az összes lehetséges megoldási módozatra vonatkozóan. Ideális esetben a költség-haszon elemzés bebizonyítja, hogy az egységnyi beruházási költségre jutó haszon nagyobb értékű, ekkor célszerű az adott beruházást végrehajtani [11].

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

4.1. TÉZISEK

T 1. Termokinetikai modellt alkalmaztam a termikus kezelési technológiák során keletkező gáztermék összetételének meghatározására vonatkozóan. Az elemzéseket különböző összetételű és nedvességtartalmú biomasszára végeztem el. A modelltől származó eredmények alapján *meghatároztam a fajlagos energia kihozatal mértékét*, ami megmutatja, hogy egységnyi tömegű bemenő szilárd tüzelőanyagra vonatkoztatva, mekkora energiameennyiség állítható elő. Mértékegysége MJ/kg_{szil.}, illetve kWh/kg_{szil.}. *E mérőszám ismeretében és a rendelkezésre álló potenciál függvényében méretez-*

hető a gáz hasznosítására szolgáló energiatermelő egység, illetve meghatározható az erőmű teljesítménye. [P1], [P5], [P6], [P8], [P14]

T 2. Elvégeztem az általam definiált hulladékok energetikai célú hasznosítására szolgáló alternatív termikus kezelési technológiák energia-hatékonyságának vizsgálatát. *A reakció hatásfokok mellett, bevezettem a fajlagos energia kihozatal mértékét jellemző mérőszámot, valamint a fajlagos gáztermelést.* Az így kapott eredmények lehetővé tették a hatékonyság-térképek felvételét. [P3], [P5], [P6], [P8], [P10], [P11], [P12], [P14], [P15], [P19], [P22]

- a. Fás szárú biomassza pirolízissel történő hasznosítása során a nedvességtartalom növekedése a fajlagos energia kihozatalt, a kémiai hatásfokot és a fajlagos gáztermelést pozitív irányban befolyásolja. A nagyobb nedvességtartalom nagyobb fajlagos energiakihozatalt eredményez. A pirolízis olaj és a pirolízis kokszt mennyisége a nedvességtartalommal fordított arányban áll.
- b. Gázosítás során a légszelektív tényező növelése és a nedvességtartalom növekedése csökkenti a fajlagos energiakihozatalt, a reakció hatásfokát, valamint a fajlagos szintézisgáz-termelést a száraz gázra vonatkozóan, továbbá növeli a nyers szintézisgáz mennyiségét. Az alkalmazott üzemi nyomás növelésével arányosan csökken a fajlagos energia kihozatal, ami a légszelektív tényező függvényében exponenciális jellegűt mutat.
- c. Plazmatechnológia alkalmazása során nagyobb a fajlagos energiakihozatal, mint gázosításnál. Az üzemi nyomás növelésének hatására a fajlagos energia kihozatal monoton csökkenő tendenciát mutat. A csökkenés mértéke 20 bar üzemi nyomás mellett 0,17%-ot képvisel.

T 3. A tüzelőanyagok kémiai összetételének felhasználásával és a lejátszódó kémiai reakciók ismeretében, *elkészítettem a vizsgált technológiák életciklus-elemzését, és vázoltam az erre vonatkozó életciklus-mátrixokat.* Az elemzések során a nedvességtartalom, gázosításnál pedig a légszelektív tényező hatását is vizsgáltam. [P2], [P4], [P5], [P7], [P9], [P11], [P12], [P14], [P15], [P16], [P18], [P19], [P20], [P22], [P24]

- a. Fás szárú biomasszák pirolízisének a nedvességtartalom növekedése a környezeti hatáskategóriák értékét növeli. 10%-os nedvességtartalom növekedés átlagosan 12,77%-os környezetterhelés növekedéssel jár a vizsgált 46 biomassza kategóriára vonatkozóan.

- b. Hagyományos égetésnél és plazmatechnológiánál a környezeti hatáskategóriák fordítottan arányosak a nedvességtartalommal. A kibocsátás csökkenés mértéke a 46 biomassza kategória átlagában 10%-os nedvességtartalom növekedés esetén, hagyományos égetésnél 3,13%, plazmatechnológiánál 4,70%.
- c. Gázosítással történő hasznosítás során a környezeti hatáskategóriák értékei a nedvességtartalommal fordítottan, a légfesleg tényezővel egyenesen arányosak. A hatásokat függvényekkel írtam le.

T 4. Egyszerűsített energetikai költség-haszon elemzést végeztem a plazmatechnológiánál alkalmazott különböző gázosító közegek fajlagos energia kihozatalra gyakorolt hatásának függvényében. [P11], [P12], [P15], [P22]

- a. *A palackozott, tiszta szén-dioxid nagy bekerülési költsége miatt, arra az eredményre jutottam, hogy annak segédgázként történő alkalmazása nem gazdaságos a fás szárú biomassza plazmatechnológiával történő kezelése során.* Felírtam egy összefüggést a gazdasági haszonra a szén-dioxid bekerülési költségének és keverési arányának, a villamos energia átvételi árának, valamint az erőgép hatásfokának függvényében.
- b. A vízgőz előállításának nincs közvetlen költsége, mert a szintézisgáz hűtéséből származó hő közvetlenül alkalmazható. A vízgőz, mind önálló segédgázként, mind levegővel keverten történő alkalmazása egyaránt növeli a fajlagos energia kihozatalát. *A vízgőz alkalmazása 40%-os nedvességtartalmú alapanyagig nagyobb haszonnal jár, mint költséggel.*

4.2. THESIS

T 1. I have used thermokinetic modeling to determinate the compositions of the gas produced by the thermic utilization technologies. I have executed analysis for different compositions and water conditions of biomass. *I have defined the quantity of specific energy capacity, which shows the calorific value of the gas produced from the unit of biomass. The units of measure are: MJ/kg_{sf}, and kWh/kg_{sf}. Knowing these data and the available potential to determine the performance and the design process and of the thermic utilization plant would be simpler.* [P1], [P5], [P6], [P8], [P14]

T 2. I have analyzed the energy-efficiency of the new thermic utilization technologies. *I have defined the energy conversion and reaction efficiency, the index of the specific energy capacity and the index of energy density in-*

crement of technologies and auxiliary gases. The results helped to set up the efficiency-map. [P3], [P5], [P6], [P8], [P10], [P11], [P12], [P14], [P15], [P19], [P22]

- d. The ascendant water condition extend the specific energy capacity, the chemical efficiency and the specific wood gas production by pyrolysis process of wood biomass. The amount of pyroil and pyrocoke and the water condition are reciprocally proportional.
- e. The ascendant excess air ratio and water condition reduce the energy capacity, the reaction efficiency and the amount of the auxiliary gas of the wood gas produced by gasification process. The ascendant operating pressure reduce the specific energy capacity, which has exponential connection with the excess air ratio.
- f. The gas produced by plasma technology has greater energy capacity as the gas produced by gasification technology. The ascendant operating pressure reduce the specific energy capacity. By 20 bar operating pressure the specific energy capacity reduce only 0,17%.

T 3. I have completed the life-cycle assessments of the technologies and the life-cycle maps. I have examined the influence of the water condition, and of the excess air ratio by gasification. [P2], [P4], [P5], [P7], [P9], [P11], [P12], [P14], [P15], [P16], [P18], [P19], [P20], [P22], [P24]

- d. The ascendant water condition extend the environmental impact categories by pyrolysis process of wood biomass. By 10% water condition extending, the environmental impact categories extend averagely 12,77% by the 46 categories of biomass.
- e. The environmental impact categories and the water condition are reciprocally proportional by conventional and plasma technology. By 10% water condition extending, the emission reduce 3,13% by conventional technology and 4,70% by plasma technology.
- f. The environmental impact categories and the water condition are reciprocally proportional and the environmental impact categories and the excess air ratio are proportional by gasification technology. I have defined the effects with functions.

T 4. I have executed energy cost-benefit analysis's of the specific energy capacity of different gases applied by plasma technology. [P11], [P12], [P15], [P22]

- c. *Applying the clean carbon dioxide by plasma technology is not remunerator because of its great investment cost.* I have correlated

the profit with the cost of the carbon dioxide, with its titer, with the procurement price of the electrical energy and with the efficiency of the prime mover.

- d. Producing process of steam has no direct costs, because the heat from cooling the synthesis gas be used directly. The steam as auxiliary gas extend the specific energy capacity. *Applying the steam is more efficient than expensive, until the water condition of the biomass obtain 40%.*

5. HASZNOSÍTÁSI ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A kutatómunkám során elért eredményeim gyakorlati alkalmazhatóságát a bemutatott energetikai hatékonyság- és az életciklus-térképek jelentik. A térképek lehetőséget biztosítanak a különböző összetételű biomasszák energetikai célú hasznosítására szolgáló technológiák összehasonlítására modellezés, mérés és költséges szoftverek alkalmazása nélkül. A térképek alkalmazását példákon keresztül szemléltettem.

Továbbfejlesztési lehetőség az alkalmazott modell pontosságának mérésekkel történő meghatározása, valamint további technológiák vizsgálata jelenti. Jövőbeli célom a pirolízis és a gázosítás folyamatának mérési úton történő vizsgálata, valamint egyes folyamat- és technológiaintegrált technológiák modellezése és összehasonlítása az alaptechnológiákkal.

Tanszékünkön jelenleg ipari partnerekkel közösen folytatott kutatások eredményeként GINOP pályázat keretében létrehozunk egy plazmatechnológiával és gázosító rendszerrel felszerelt laboratóriumot, amely egy ipari berendezés tervezésének és beüzemelésének alapjait fekteti le. A kutatómunkám eredményeként kapott elemzések a tervezési folyamat kiinduló adatait szolgáltatják. Az elkészülő berendezéseken lehetőségem nyílik mérések végzésére, valamint további termokinetikai modellvizsgálatok és életciklus-elemzések készítésre, valamint az ismertetett eredmények mérési úton történő visszaigazolására.

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

6.1. IDEGEN NYELVEN

- [P1] BODNÁR, I.: *Energy Efficiency Analysis of the Basic and the Combined Thermic Treatment Processes*, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara- International Journal of Engineering, Vol. XIII. No. 2. 2015. pp. 33-38.
- [P2] BODNÁR, I.: *Global Warming Potential of The Thermic Treatment Processes*, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara- International Journal of Engineering, Vol. XII. No. 2. 2014. pp. 121-126.
- [P3] BODNÁR, I.: *Energy Efficiency Analysis of the Thermic Treatment Process*. MultiScience - XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference. University of Miskolc, Miskolc, Hungary, 2014. D13, pp. 1-8. (ISBN 978-963-358-051-6)
- [P4] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Life Cycle Assessment for thermic treatments of organic waste*, Enviro-management 2012: Municipal and regional waste management projects in Europe, October 9-11, 2012. pp. VII/1-17, Štrbské Pleso, Slovakia. (ISBN 978-80-85655-33-9)

6.2. MAGYAR NYELVEN

- [P5] BODNÁR, I.: *Települési szilárd hulladék energetikai hasznosításának komplex vizsgálata*. Műszaki Tudomány az Észak- Kelet Magyarországi Régióban 2015. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2015. pp. 47-52. (ISBN 978-963-7064-32-6)
- [P6] PLÁSZTÁN, B., BODNÁR I.: *Biomassza gázosításának termokinetikai modellezése gázösszetétel és energetikai hatékonyság szempontjából*. Műszaki Tudomány az Észak- Kelet Magyarországi Régióban 2015. Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2015. pp. 471-476. (ISBN 978-963-7064-32-6)
- [P7] BODNÁR, I., SIMÉNFALVI, Z.: *Fagázosítás élelciklus-elemzése különböző gázosító közegek alkalmazása esetén*, XXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT 2015) Konferencia kiadvány, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Gépészeti Szakosztály, Csíksomlyó, Románia, 2015. pp. 54-57. (ISSN 2068-1267)
- [P8] BODNÁR, I.: *Fagázosítás energetikai hatékonyság- vizsgálata különböző gázosító közegek alkalmazásával*, Műszaki Tudományos Közlemények

3. A XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészak Előadásai, Erdélyi Múzeum- Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, 2015. pp. 99-102. (ISSN 2393-1280)
- [P9] BODNÁR, I.: *A fagáz, mint alternatív üzemanyag környezetterhelési mutatóinak összehasonlítása az autógáz és a benzin üzemű járművek életciklus-elemzéssel kapott értékeivel*, ECONOMICA a Szolnoki Főiskola Tudományos közleményei. VII. új évf. 3. sz. 2014. pp. 35-44.
- [P10] BODNÁR, I.: *Biomassából előállított szintézisgáz alternatív üzemanyagként való alkalmazásának vizsgálata*. Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem kiadványa, 4. kötet. 2014. 1. sz. pp. 77-92.
- [P11] BODNÁR, I.: *Kombinált termikus kezelési technológiák Közép- és Kelet európai alkalmazhatóságának vizsgálata*, Műszaki Tudományos Füzetek, A XIX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka (FMTÜ) Nemzetközi Tudományos Konferencia kiadványa, Erdélyi Múzeum- Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, 2014. pp. 89-92. (ISSN 2067-6 808)
- [P12] BODNÁR, I.: *Termikus kezelési technológiák vizsgálata háromszögmodell segítségével*, Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem kiadványa. 3. kötet. 2013. 1-2. sz. pp. 203-214.
- [P13] BODNÁR, I.: *Termikus hulladékkezelési technológiák gazdasági és gazdaságossági kérdései*, GÉP magazin, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LXIV. évfolyam 5. sz. 2013, pp. 33-36.
- [P14] BODNÁR, I.: *A hulladék, mint másodnyersanyag, és mint kimeríthetetlen megújuló energiaforrás*, GÉP magazin, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LXIV. évfolyam 5. sz. 2013, pp. 3-10.
- [P15] BODNÁR, I.: *Szerves ipari hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata üvegházhatású gázok kibocsátása tekintetében kapcsolt energiatermelés esetén*, A „Tavaszi Szél” című Konferencia kiadványa, II. kötet, Budapest, 2013. pp. 398-407. (ISBN 978-963-89560-2-6)
- [P16] BODNÁR, I.: *Vegyipari hulladékok termikus ártalmatlanításának vizsgálata és az optimális technológia kiválasztását elősegítő módszer bemutatása*, A „Tudományos Próbabálya” című VI. PhD Konferencia elektronikus kiadványa, Budapest, 2013. pp. 256-265. (ISBN 978-963-88433-8-8)
- [P17] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Hulladékkezelési eljárások környezetterhelési és energiahatékonysági vizsgálata*, Energiagazdálkodás, Energia-

gazdálkodási Tudományos Egyesület tudományos folyóirata, 54. évf. 3. sz. 2013. pp. 8-11.

- [P18] BODNÁR, I.: *Növényvédőszer hulladékok termikus kezelési eljárásainak összehasonlítása*, Doktoranduszok Fóruma című konferencia, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolc, 2012. pp. 12-17.
- [P19] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Termikus kezelési technológiák vizsgálata szerves ipari hulladékokra*. ECO-MATRIX, Az LCA Center- Magyar Életciklus Elemzők Szakmai Egyesületének on-line folyóirata, 2012. 1-2 sz. pp. 39-51.
- [P20] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Hulladékból energia sokféleképpen. Hulladékkezelési eljárások vizsgálata szerves hulladékokra életciklus-elemzéssel (2. rész)*, Zöld Ipar Magazin, 13. évf. 1. sz. 2013. pp. 8-9.
- [P21] BODNÁR, I., MANNHEIM, V.: *Szerves ipari hulladékok kezelésére szolgáló technológiák vizsgálata környezetterhelési, energiahatékonysági, és gazdasági aspektusokból*, Multidiszciplináris Tudományok, A Miskolci Egyetem kiadványa, 2. kötet. 2012. 1. sz. pp. 9-20.
- [P22] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Súlyozási rendszer kidolgozása termikus ártalmatlanítási eljárások összehasonlíthatóságára vonatkozóan*, GÉP magazin, A Gépipari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata, LXIII. évf. 10. sz. 2012, pp. 37-40.
- [P23] BODNÁR, I.: *Növényvédőszer gyártástechnológiája, valamint hulladékaik kezelési módjai az Európai Unióban*, Diáktudomány, A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból, 4. kötet. 1. sz. 2012. pp.69-74.
- [P24] MANNHEIM, V., BODNÁR, I.: *Veszélyes hulladék-kezelés és LCA. Termikus hulladék-kezelési eljárások vizsgálata életciklus-elemzéssel*, Zöld Ipar Magazin. 12. évf. 8. sz. 2012. pp. 27-29.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A hulladékról szóló 2012. évi CLXXXV. törvény. Magyar Közlöny. 2012. 160. sz. p. 44.
- [2] DR. CSÖKE, B.: *Hulladékgazdálkodás*, Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet, 2. javított kiadás, Veszprém, 2011. p. 699.
- [3] SZUHI, A.: *Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők*. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium 2009. p. 36.

- [4] SZUHI, A.: *Az új termikus technológiák környezeti hatásai (pirólízis, elgázosítás és plazma technológia)*. Humusz Szövetség és Vidékfejlesztési Minisztérium 2013. p. 14.
- [5] DR. ÖRVÖS, M.: *Ártalmatlanítás termikus eljárásokkal*. Oktatási segédlet BME, 2011. p. 31.
- [6] DR. HORNYÁK, M., BÁNHIDY, J., DR. KOVÁCS, E., DR. KOVÁCS, L., DR. VARGA, P.: „*Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a hulladékégetők engedélyezése során.*” Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest 2008. p. 386.
- [7] MANNHEIM, V.: *Szerves vegyipari hulladékok termikus kezelése plazmatechnológiával. Energiagazdálkodás*. Budapest, 2010. 51.évf. 3. sz. p. 21–23.
- [8] RED, T., B., DAS, A.: *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*, Solar Energy Research Institute, Colorado, 1988. p. 148.
- [9] BASU, P.: *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory*, Second edition, Elsevier, San Diego, 2013. p. 529.
- [10] KÓSI, K., VALKÓ, L.: *Környezetmenedzsment*, Tiptex Kiadó, Budapest, 2008. p. 307.
- [11] KÓRÓDI, M. (szerkesztő): *Turizmus kutatások módszertana*. Pécsi Tudományegyetem. 2011. p. 200.
- [12] SZUHI, A.: *Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők*. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium 2009. p. 36.
- [13] ZHU, Y., CHAI, X., LI H., ZHAO, Y., WEI, Y.: *Combination of combustion with pyrolysis for studying the stabilization process of sludge in landfill*. *Thermochimica Acta*. 464, 2007. pp. 59-64.
- [14] GYULAI, I.: *A biomassza dilemma*. Negyedik átdolgozott kiadás, Magyar Természetvédők Szövetsége, Föld Barátai Magyarország, 2010. p. 116.