

## TERMIKUS KEZELÉSI TECHNOLÓGIÁK VIZSGÁLATA HÁROMSZÖGMODELLEL SEGÍTSÉGÉVEL

**Bodnár István**

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,  
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék  
3515 Miskolc, Miskolc- Egyetemváros, e-mail: [vegybod@uni-miskolc.hu](mailto:vegybod@uni-miskolc.hu)

### **Összefoglalás**

*A tanulmány a termikus kezelési technológiák háromszögmodell szerinti kiértékeléséről szól. Az új modell lehetővé teszi, hogy a különböző technológiákat komplex módon vizsgáljuk és a legfontosabb felmerülő kérdések figyelembevételével egy prioritási sorrendet állítsunk fel. A modell értékelési szempontrendszere a napjainkban kiemelten fontos környezetvédelmi hatáskategóriákat, technológiai és energetikai hatékonysági paramétereket, valamint gazdasági- és gazdaságossági mutatókat összegzi. Az optimumkeresési eljárás numerikus megoldásával nem csak fontossági sorrendet lehet felállítani, hanem számszerűsíthetőek az egyes technológiák erősségei és gyengeségei, amelyek ez által kijelölhetik a fejlesztési irányvonalakat.*

**Kulcsszavak:** termikus kezelési eljárások, energetikai hatékonyság, életciklus-elemzés, háromszögmodell

### **Abstract**

*This paper provides the evaluation of thermic treatment processes on the basis of the triangle-model. The new model enables us to analyse different technologies in a complex way and to set up a priority list with using to the most important questions. Nowadays the evaluation criterion of the model sums up the most relevant environmental impact categories. These are the energy efficiency, the economic and economical parameters. The numerical solution of the optimum search allows not only to make a priority list, but also to define the strong and weak points of a given technology. According to this processes the research and the development guidelines can be specified.*

**Keywords:** thermic treatment processes, energy efficiency, Life Cycle Assessment, triangle-model

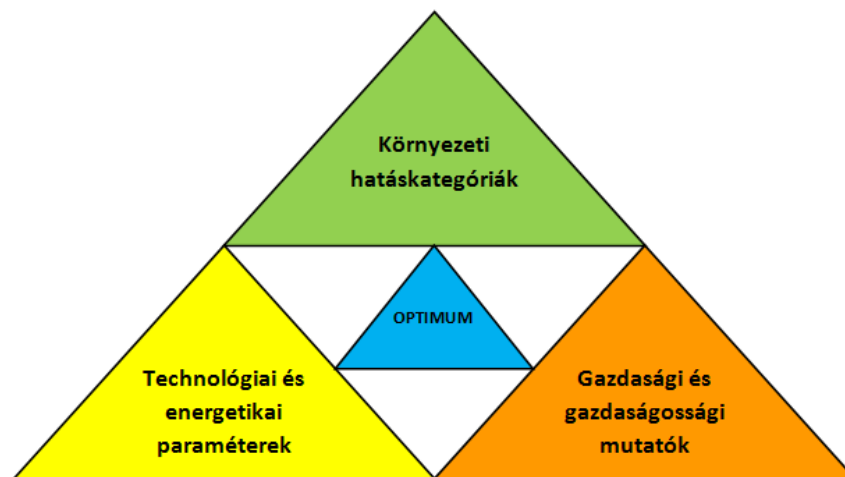
### **1. Bevezetés**

A hulladékok ártalmatlanítására szolgáló technológiák közül, az optimális keresésének és megtalálásának folyamata során számos olyan kérdés merül fel, amelyek megválaszolása kellő körültekintést, technológiai jártasságot és rendszerszintű gondolkodást igényel. Számos módszer áll rendelkezésünkre, amelyek elősegíthetik, vagy a bonyolultságuk miatt akár meg is nehezíthetik ezt a folyamatot. A rendelkezésre álló modellek és módszerek

legnagyobb hiányossága, hogy külön-külön tárgyalják a környezetvédelmi, az energetikai és a gazdasági kérdésköröket, ezért vált szükségessé egy egységes tárgyalásmód bevezetése. A háromszögmodell egy új irányvonalat jelenthet a hulladékgazdálkodásban és a környezetmenedzsmentben, elsősorban a döntéshozatali folyamat során.

## 2. A háromszögmodell, mint döntéstámogató- döntéshozó módszer

A háromszögmodell (1. ábra) egy olyan döntéstámogató- döntéshozó módszer, amely lehetővé teszi a különböző technológiák értékelését három tudományterületi megközelítés szempontjából. Az első, és talán egyben a legfontosabb értékelési szempont a technológiák környezetre gyakorolt hatásának vizsgálata, amely életciklus-elemzéssel valósítható meg. Az így kapott adatok a környezetvédelmi hatáskategóriák csoportjába tartoznak. A második értékelési szempontcsoport a tömegalapú paramétereket és az energetikai hatékonyságmutatókat összegzi. Nem csak a nettó villamos- és hő hatékonyságot, hanem a fajlagos kinyerhető hasznos energiamennyiségeket és azok arányait is figyelembe kell venni. Ezek a mutatók együttesen határozzák meg egy technológia energetikai hatékonyságát és hasznosságát. A tömegalapú paraméterek, amik összhangban vannak az energetikai hatékonysági mutatókkal, megmutatják, hogy a feladásra került hulladék tömege milyen mértékben csökkent, illetve mekkora a füstgázkibocsátás mértéke egységnyi tömegű hulladékra vonatkoztatva. A harmadik tudományterület a gazdasági és gazdaságossági mutatók értékeit szolgáltatják. Célszerű életciklus-költség és költség-haszonelemzést végezni, amelyek eredményeként megfogalmazható a technológiák gazdasági hasznossága. E három szempontrendszer teljesen lefedi a technológiák elé állított megfelelőségi kritériumokat.



1. ábra. A háromszögmodell elvi sémája

A háromszögmodell gyakorlati alkalmazása, lehetőséget ad az ugyanazon funkciót ellátó, de működési elvükben eltérő technológiák prioritási sorrendjének a felállításához. A modell sajátossága, hogy több egymástól független módszer egyidejűleg történő alkalmazá-

sával is megvalósítható az optimumkeresési eljárás. Négy módszert dolgoztam ki, amik közül kettőt szeretnék ismertetni. Az első módszer esetén a technológiákat egymáshoz viszonyítva értékelem, míg a második módszer esetén a technológiákra kapott értékeket a referencia erőmű értékeivel hasonlítom össze. Mivel a vizsgált technológiák elsődleges végterméke a nagy energiatartalmú szintézisgáz, amivel földgázt szeretnék kiváltani, ezért referencia erőműnek a földgáz üzemű gázmotoros erőművet tekintem. Az értékeléshez egy pontozási rendszert kellett kidolgoznom (1. táblázat), amely a hármas számrendszeren alapul. Ennek megfelelően egy technológia az adott értékelési szempont szerint a '0', az '1', vagy a '2' pontszámokat kaphatja [1].

**1. táblázat.** A pontozási rendszer és a módszerek közötti különbség

Pontszám	Módszer 1	Módszer 2
0	Az alsó sávban elhelyezkedő, legkedvezőtlenebb technológiák.	A referencia erőműnél sokkal kedvezőtlenebb technológiák.
1	A középső sávban elhelyezkedő, átlagértékeket produkáló technológiák.	A referencia erőműtől maximum 10 százalékkal kedvezőtlenebb értékeket produkáló technológiák.
2	A felső sávban található, legjobb eredményeket hozó technológiák.	A referencia erőműtől kedvezőbb értékeket eredményező technológiák.

Az első módszer esetén a legkedvezőtlenebb és a legjobb technológiára kapott értékek közötti intervallumot három egyforma méretű sávra osztottam. Az alsó, egyben a legrosszabb eredményeket tartalmazó sávban elhelyezkedő technológiák '0' pontot érnek el. A középső sávban elhelyezkedő technológiák pontszáma '1', mert ez a sáv az átlagos értékeket produkálja. A felső sáv, amely a legjobb eredményeket tartalmazza '2' ponttal jutalmazza az ott található technológiákat. A második módszer esetén a referencia erőműnél jelentősen kedvezőtlenebb technológiák '0' pontot kapnak, mert az adott szempont szerint nem alkalmasak a földgáz kiváltására. Abban az esetben, ha a technológia paramétere megegyezik, vagy csak tíz százalékkal kedvezőtlenebb, mint a referencia erőműnél tapasztalható érték, akkor az ő pontszáma '1'. Az ilyen kismértékű eltérést egyrészt számítási, vagy mérési hiba is eredményezhette, másrészt pedig bizonyos intézkedések alkalmazásával a különbség csökkenthető, így ez a technológia adott esetben alkalmas, vagy alkalmassá tehető földgáz kiváltásra. A referencia értékeknél jobb eredményeket hozó technológiák pontszáma '2', mert azok közvetlenül, változtatás nélkül alkalmasak a földgáz üzemű gázmotoros erőművek kiváltására.

**3. Vizsgált termikus kezelési technológiák bemutatása**

A termikus kezelési technológiákat a tipikus reakciókörülményeik alapján szokás összehasonlítani (2. táblázat). Az első és legfontosabb reakciókörülmény az alkalmazott hőmérséklet, amely előzetes tájékoztatást ad a technológia környezetre gyakorolt hatásáról és a beruházási költségéről. Általánosságban elmondható, hogy a hőmérséklet növelésével csökkenthető a technológia környezetkockázati tényezője, de ezzel együtt arányosan növekedni fog a beruházási költség. A nagyobb hőmérséklet speciális anyagok, fémötvözetek és műszaki kerámiák alkalmazását igénylik, amelyek jelentős költségnövekménnyel járnak. A

második reakciókörmény az égéslevegő mennyisége, azaz a sztöchiometriai arány. Részenben ez a körmény mutatja meg, hogy mekkora lesz a füstgázkibocsátás mértéke. Az egy-nél nagyobb értékek esetében jelentős légfelesleggel kell számolnunk, amely így növeli közvetlenül a kibocsátott füstgáz mennyiségét, valamint közvetve - a füstgáztisztítási rendszeren keresztül - a beruházási és üzemeltetési költségeket. A harmadik reakciókörmény a segédáramok típusát foglalja magába. Az alkalmazott segédgáz befolyásolja a keletkező végtermékek összetételét, kezelhetőségét, fizikai- és kémiai tulajdonságait. Bizonyos technológiáknál külső hő bevitelre lehet szükség, amely 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. Abban az esetben, ha a keletkező végtermékek haszontermékek, célszerű megadni, hogy energiatermelés céljából történő hasznosításuk során milyen erőgépet alkalmazunk. Az erőgép típusa közvetlenül a technológiák energetikai hatékonyságát, ez pedig közvetve a gazdaságossági mutatókat, legfőképpen a megtérülési időt befolyásolja, határozza meg. 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. A háromszögmodell az eddigi kutatási eredmények alapján megfelelően kezeli a technológiai sajátosságokat az értékelési folyamat során. Kellő körütekintést biztosít a releváns információk begyűjtésére és az összehasonlíthatóságára. Azt hozzá kell tennem, hogy a modell csak annyira pontos, amennyire pontos adatokat szolgáltat egy-egy technológia.

2. táblázat. A vizsgált termikus ártalmatlanítási technológiák és a földgázüzemű gázmotoros referencia erőmű reakciókörményei

Eljárás	T [°C]	Égéslevegő	Segédáramok	Keletkező végtermékek	Erőgép
Pirolízis	500	$\lambda = 0$ endoterm	-	pirogáz, piroolaj, pirokoksz	gázmotor és kondenzációs gőzturbina
Hagyományos égetés	1150	$\lambda = 1,5$ exoterm	levegő, földgáz póttüzelés	füstgáz (<5% éghető), salak, hamu, pernye	kondenzációs gőzturbina
Gázosítás	1200	$\lambda = 0,55$ parciális oxidáció	levegő	szintézisgáz, salak, hamu	gázmotor
Plazma-technológia	3000	$\lambda = 0,55$ parciális oxidáció	vízgőz	szintézisgáz, üvegesedett salak	gázmotor
Plazma-technológia	5000	$\lambda = 0,55$ parciális oxidáció	O <sub>2</sub> és CO <sub>2</sub> keverék	szintézisgáz, üvegesedett salak	gázmotor
Földgázüzemű gázmotoros erőmű	650	$\lambda = 1,5$ exoterm	levegő	füstgáz (<3% CH <sub>4</sub> tartalom)	gázmotor

#### 4. Termikus kezelési technológiák értékelése háromszögmodell alkalmazásával

A termikus ártalmatlanítási technológiák háromszögmodell szerinti kiértékelése során, első lépésként csoportosítottam a vizsgálati szempontrendszer alapján a kapott eredményeket. Külön-külön táblázatba foglaltam a környezeti hatáskategóriák értékeit, a technológiai és energetikai hatékonysági paramétereket, valamint a gazdasági- és gazdaságossági mutatókat. Második lépésként mindkét módszer alapján kategóriánként összehasonlítottam a technológiákra kapott eredményeket és pontoztam őket. Végül összeadtam a pontszámokat először kategóriánként, azt követően összegeztem a kategóriacsoportokat és levontam a következtetéseket.

##### 4.1. Környezeti hatáskategóriák szerinti értékelés

A módszer az életciklus-elemzésen alapul (LCA, Life Cycle Assessment). Az életciklus-elemzés lehetőséget ad egy termék, technológia, vagy szolgáltatás teljes élettartamára vonatkozóan számszerűen megadni annak környezetre gyakorolt hatását. A definíció alapján kiemelten fontos tényező a rendszerhatár, amely lehatárolja a vizsgálat tárgyát a külső környezettől. Csak akkor biztosított a technológiák releváns összehasonlíthatósága, ha a rendszerhatár, a funkcionális egység és adott esetben az üzemállapot megegyezik. Éppen ezért minden technológia esetén a rendszerhatár a létesítmény „kapujától- kapujáig” tart. Ekkor ugyan technológiai szintű vizsgálat helyett létesítményszintű vizsgálatot végzünk, de ettől függetlenül az eredmények nem fognak változni, mert a létesítményben csak egy technológia üzemel a hozzá szervesen kapcsolódó kiszolgáló egységekkel együtt [6]. A funkcionális egység az a vonatkoztatási alap, amelyre vetítve meghatározzuk a környezeti hatáskategóriák értékeit. Jelen esetben 1 kg hulladékra vonatkozóan végzem el az elemzést. Az üzemi állapot meghatározása és azonossága azért is fontos, mert különböző üzemállapotokban más lesz a technológiák kibocsátási értékei és az energetikai hatékonysági paraméterek is változhatnak, ezért normál, állandósult üzemviteli állapotot tekintettem. Az ismert 11 környezeti hatáskategória közül, a napjainkban legfontosabbnak tartott 5 kategóriát emeltem ki. A környezetvédelem legfontosabb témakörét az üvegházhatást, és az ózonréteg elvékonyodását okozó gázok kibocsátásának csökkentési lehetőségei képezik, ezért is emeltem ki ezt a két kategóriát. Kiemelten fontosnak tartom az emberi egészségre káros anyagok kibocsátásának csökkentését, amely a hulladékok energetikai célú hasznosítása során igen lényeges kérdés. Ezen kívül még két olyan kategóriát, nevezetesen a savasodást és az eutrofizációt választottam, amelyek jelentős befolyást gyakorolnak a környezetünkre. Az alkalmazott vizsgálati módszer jellemző paramétereit a 3. és a 4. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. A rendszerhatár, az alkalmazott értékelési módszer és jellemző paramétereit

Rendszerhatár	Hatásvizsgálati módszer	Vizsgált hatáskategóriák
A hulladék feladásától a keletkezett termékek energiatermelés céljából történő kezeléséig.	<b>Értékelési módszer:</b> CML 2001, 2010. novemberi	HTP GWP ODP
	<b>Funkcionális egység:</b> 1 kg veszélyes hulladék	AP EP

4. táblázat. A vizsgálati hatáskategóriák értelmezése

Hatáskategória megnevezése	Hatáskategóriák értelmezése	Mértékegység
Humán Toxicitási Potenciál (HTP)	Az emberi szervezetre mérgező hatású anyagokra vonatkozó, maximálisan megengedett koncentráció mértéke.	kg DCB-egyenérték
Globális Felmelegedési Potenciál (GWP)	A különböző üvegházhatású gázok (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , és az FCKW) globális felmelegedéshez való hozzájárulása.	kg CO <sub>2</sub> -egyenérték
Ózonréteg Elvékonyodási Potenciál (ODP)	Az ózonréteg elvékonyodását okozó gázok kibocsátásának mértéke a triklór-fluor-metánhoz viszonyítva (R11).	kg R11-egyenérték
Savasodási Potenciál (AP)	A légkörbe kerülő SO <sub>2</sub> és NO <sub>2</sub> oxidáció során kénsavvá, illetve nitrogénsavvá alakulnak át, így csökken annak pH-ja.	kg SO <sub>2</sub> -egyenérték
Eutrofizációs Potenciál (EP)	A foszfor és a nitrogén kibocsátás által okozott eutrofizáció mértéke.	kg Foszfat-egyenérték

Az elemzési eredményeken (5. táblázat) megfigyelhető, hogy a kisebb hőmérsékletartományokban végzett technológiák kedvezőtlenebb eredményeket hoztak. Kiugróan nagy értékek tapasztalhatók a hagyományos égetésnél, főleg az emberi szervezetre gyakorolt toxikus hatás (HTP) tekintetében és a többi kategória esetén a pirolízisnél. E technológiák környezetkockázati tényezője a hőmérséklet célszerű növelésével csökkenthető. A legkedvezőbb eredményeket a plazmatechnológiák szolgáltatták. Az 5000 °C hőmérsékleten végzett plazmatechnológia négy kategória (GWP, ODP, AP és EP) esetében még a referencia erőműnél is jobb eredményeket hozott [8]. Az életciklus-elemzési eredmények alapján azt a következtetést vontam le, hogy a hulladékok plazmatechnológiával történő energiatermeléssel egybekötött ártalmatlanítása nem csak környezetbarát megoldás, hanem környezetvédelmi szempontból alkalmas földgáz üzemű gázmotoros erőművek kiváltására. Ezt az állítást a technológiákra kapott pontok és a technológiai rangsor (6. táblázat) is megerősíti. Mindkét módszer a plazmatechnológiát helyezi a piramis csúcsára. A gázosítási technológia a középmezőnyben a hagyományos égetés és a pirolízis az alsó mezőnyben végzett.

5. táblázat. Termikus kezelési eljárások és a földgáz üzemű gázmotoros referencia erőmű környezeti hatáskategóriáinak értékei

Termikus ártalmatlanítási eljárások megnevezése	Környezeti hatáskategóriák [kg -hatás egyenérték- / 1 kg hulladék]				
	HTP	GWP	ODP	AP	EP
Hagyományos égetés (1150°C)	4,184	1,038	1,47E-4	0,380	9,90E-2
Pirolízis (500°C)	0,463	1,106	2,3E-3	0,270	4,84E-2
Gázosítás (1200°C)	0,495	0,865	3,58E-11	0,157	4,08E-2
Plazmatechnológia (3000°C)	1,52E-2	0,346	1,67E-08	1,85E-3	2,37E-4
Plazmatechnológia (5000°C)	1,31E-3	0,182	6,37E-10	1,95E-4	2,56E-4
Földgázüzemű gázmotoros erőmű	6,64E-4	0,980	6,41E-10	2,09E-3	2,89E-4

6. táblázat. Technológiákra kapott pontok és a rangos környezeti hatáskategóriák szempontjából

Technológia	Pontszám		Rangsor	
	módszer 1	módszer 2	módszer 1	módszer 2
Hagyományos égetés (1150°C)	0	0	5	3
Pirolízis (500°C)	1	0	4	3
Gázosítás (1200°C)	4	4	3	2
Plazmatechnológia (3000°C)	7	4	2	2
Plazmatechnológia (5000°C)	10	7	1	1

#### 4.2. Technológiai és energetikai hatékonysági paraméterek szerinti értékelés

A hulladékok energetikai célú hasznosítása során kiemelten fontos tényezők az energetikai hatékonyságot jellemző paraméterek (7. és 8. táblázat). A legelterjedtebb mérőszámok a nettó hatásfokok ( $\eta$ ), az egységnyi tömegű hulladékból termelhető hasznos energiamennyiségek ( $e$ ), valamint a fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelési mutatók ( $\sigma$ ). E kategóriába soroltam a tömegalapú paramétereket is, mint a hulladék tömegcsökkenésének ( $\Delta m_{\text{hull}}$ ) és a füstgáz kibocsátásának ( $K_{fg}$ ) mértékét [4]. E két paraméter mellett, hogy a technológiát jellemzi, meghatározza a technológia hatékonyságát is, mert az energiatermelési mutatók arányosak a hulladék tömegének csökkenésével. A hatásfok megmutatja a technológia energetikai átalakítási hatékonyságát, az egységnyi tömegű hulladékból termelt hasznos energiamennyiség pedig, azt, hogy az egységnyi tömegű hulladékból ténylegesen mekkora mennyiségű hasznos energiát kaphatunk. A tömegalapú paraméterekből szintén egy átalakítási hatékonyságot fogalmazhatunk meg (származtatható a technológia tömegmérlege).

7. táblázat. Egységnyi tömegű hulladékból termelt hasznosítható energiamennyiség ( $e$ ), valamint a nettó villamos- és hőhatásfok ( $\eta$ )

Eljárás	Villamos energia		Hőenergia	
	$e_{ne}$	$\eta_{ne}$	$e_{nth}$	$\eta_{nth}$
	[kWh <sub>e</sub> /kg hull.]	[%]	[kWh <sub>th</sub> /kg hull.]	[%]
Hagyományos égetés (1150°C)	0,53	14,93	2,00	65,17
Pirolízis (500°C)	1,74	27,60	2,49	55,50
Gázosítás (1200°C)	2,10	34,96	3,00	48,72
Plazmatechnológia (3000°C)	5,10	28,31	8,19	44,74
Plazmatechnológia (5000°C)	13,14	30,55	23,66	46,47
Földgázüzemű gázmotoros erőmű	5,15	36,80	6,62	44,70

**Megjegyzés:**  
 $e_{ne}$ : egységnyi tömegű hulladékból termelhető hasznos (nettó) villamos energia mennyiség,  $e_{nth}$ : egységnyi tömegű hulladékból termelhető hasznos (nettó) hőenergia mennyiség,  $\eta_{ne}$ : nettó villamos hatásfok és  $\eta_{nth}$ : nettó hőhatásfok

8. táblázat. A fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelési mutató ( $\sigma$ ) és a tömegalapú paraméterek értékek

Eljárás	$\sigma_{\eta}$	$\sigma_e$	$\Delta m_{\text{hull}}$	$K_{\text{fg}}$
	[-]		[kg/kg hulladék]	
Hagyományos égetés (1150°C)	0,23	0,26	0,88	0,96
Pirolízis (500°C)	0,49	0,69	0,72	0,87
Gázosítás (1200°C)	0,72	0,70	0,72	0,83
Plazmatechnológia (3000°C)	0,63	0,62	0,80	1,23
Plazmatechnológia (5000°C)	0,66	0,56	0,83	1,14
Földgázüzemű gázmotoros erőmű	0,82	0,78	1,00	1,15
<b>Megjegyzés:</b>				
$\sigma_{\eta}$ : fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelési mutató a hatásfokok alapján				
$\sigma_e$ : fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelési mutató az egységnyi tömegű hulladékból termelhető hasznos energiamentiség alapján				
$\Delta m_{\text{hull}}$ : hulladék tömegcsökkenés mértéke és $K_{\text{fg}}$ : füstgázkibocsátás mértéke				

Abban az esetben, ha az egységnyi tömegű hulladékból termelhető hasznos energiamentiségeket elosztjuk a feladott hulladék fűtőértékének és a nettó hatásfok szorzatának értékével, akkor megkapjuk az energiasűrűség növekményt. A vizsgált technológiák esetében átlagosan 15 %-os az energiasűrűség növekedés. A nettó villamos hatásfok tekintetében a gázosításra kapott eredmény a legkedvezőbb. A plazmatechnológia gyengébben szerepelt, de ennek ellenére is egységnyi tömegű hulladékból ennél a technológiánál lehet a legtöbb hasznos energiát előállítani, még a referencia erőműhöz viszonyítva is. Az energiasűrűség növekedés mértéke is itt volt a legnagyobb (35 %). Minden vizsgált technológia villamos hatásfoka kisebb, mint a referencia erőműé, de a hőhatásfokok kedvezőbb helyzetet mutatnak. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a termikus kezelési technológiáknál először a hulladékot át kell alakítani nagy energiatartalmú szintézisgázzá, amely a hatásfok csökkenésének fő oka [7]. Ha figyelembe vennénk a földgáz üzemű gázmotoros erőműnél a földgáz kitermelésének, szállításának és tárolásának hatásfokcsökkentő hatását, akkor a nettó villamos hatásfok 30 % alá csökkenne [5]. A technológiai és energetikai hatékonyság paraméterek alapján a gázosítási és a plazmatechnológia alkalmas a földgáz üzemű gázmotoros erőmű kiváltására. A pontszámok (9. táblázat) is ezt az állítást támasztják alá. Mind két technológia a piramis csúcsán, vagy annak közelében helyezkedik el.

9. táblázat. Technológiákra kapott pontok és a rangos technológiai és energetikai paraméterek szempontjából

Technológia	Pontszám		Rangsor	
	módszer 1	módszer 2	módszer 1	módszer 2
Hagyományos égetés (1150°C)	8	4	3	2
Pirolízis (500°C)	5	4	4	2
Gázosítás (1200°C)	9	6	2	1
Plazmatechnológia (3000°C)	9	6	2	1
Plazmatechnológia (5000°C)	11	6	1	1



### 4.3. Gazdasági és gazdaságossági mutatók szerinti értékelés

A számítási módszer az életciklus-költség és a költséghaszon-elemzésen alapul. A legfontosabb vizsgálandó mutatók a fajlagos beruházási költségek, a megtérülési idő, valamint a villamos energia előállítási költsége (10. táblázat) [3]. A fajlagos beruházási költség kétféle vonatkoztatási alagra határozható meg. A rendszert tervezhetjük adott hulladék feldolgozó kapacitásra, vagy villamos teljesítményre. Megfigyelhető, hogy ha hulladék kapacitásra tervezünk a legolcsóbb technológia a pirolízis, és a plazmatechnológia a legdrágább. A hagyományos égetés a középmezőnyben végzett. Villamos teljesítményre tervezve a legolcsóbb technológia továbbra is a pirolízis marad, de ez esetben a hagyományos égetés lesz a legdrágább. Ennél a vonatkoztatási alapnál a plazmatechnológia a középkategóriában helyezkedik el. Napjainkban a hulladékártalmatlanító technológiákat minden esetben hulladékkapacitásra tervezzük, ezért nem terjedtek még el a plazmatechnológiájú rendszerek. A jelen gazdasági helyzetben egyetlen vállalat sem tudja felvállalni ezt a beruházási többletköltséget, annak ellenére sem, hogy a plazmatechnológia megtérülési ideje közel fele annyi, mint a hagyományos égetéses technológiának, mindemellett a villamos energia előállítási költsége is itt a legkedvezőbb [2].

10. táblázat. A technológiák gazdasági- és gazdaságossági mutatói

Technológiák	Fajlagos beruházási költség		Megtérülési idő	Villamos energia előállítási költség
	[eFt/kg hulladék]	[eFt/kW elektromos]	[év]	[Ft/kWhe]
Hagyományos égetés (1150 °C)	1 729	3 263,58	10,37	8,16
Pirolízis (500 °C)	735	422,41	2,34	2,46
Gázosítás (1200 °C)	2 325	1 107,14	5,75	2,13
Plazmatechnológia (3000 °C)	6 081	1 192,35	7,11	0,86
Plazmatechnológia (5000 °C)	11 685	889,27	5,76	0,77
Földgáz üzemű gázmotoros erőmű	1 475	286,50	8,59	25,13

Az életciklus-költség és az költséghaszon-elemzési eredmények alapján, mindkét értékelési módszer szerint a pirolízis a legkedvezőbb technológia és a hagyományos égetés rendelkezik a legkedvezőtlenebb értékekkel (11. táblázat). A technológiai rangsorban a második helyen a gázosítás végzett. A technológiákat egymáshoz képest értékelve a plazmatechnológiák a piramis harmadik és negyedik lépcsőfokán helyezkednek el. A referencia erőműhöz viszonyítva a gázosítással megosztva a másodikkak a prioritási sorrendben. A gazdasági- és gazdasági mutatók tekintetében a kisebb hőmérsékletű technológiák, mint a pirolízis és a gázosítás alkalmasak a földgáz üzemű gázmotoros erőművek kiváltására. Annak ellenére, hogy a plazmatechnológia hulladékcapacitásra vonatkozó fajlagos beruházási költsége jelentősen nagyobb, mint a többi technológiáé, a megtérülési idő és a villamos energia előállításának költségét tekintve mégis alkalmas alternatív erőműként történő üze-

meltetése. Mivel a hőmérséklet csökkentésével a fajlagos beruházási költségek csökkenthető, célszerű elgondolkozni azon, hogy szükséges-e ilyen nagy hőmérsékletet alkalmazni.

**11. táblázat.** Technológiákra kapott pontok és a rangos gazdasági és gazdaságossági mutatók szempontjából

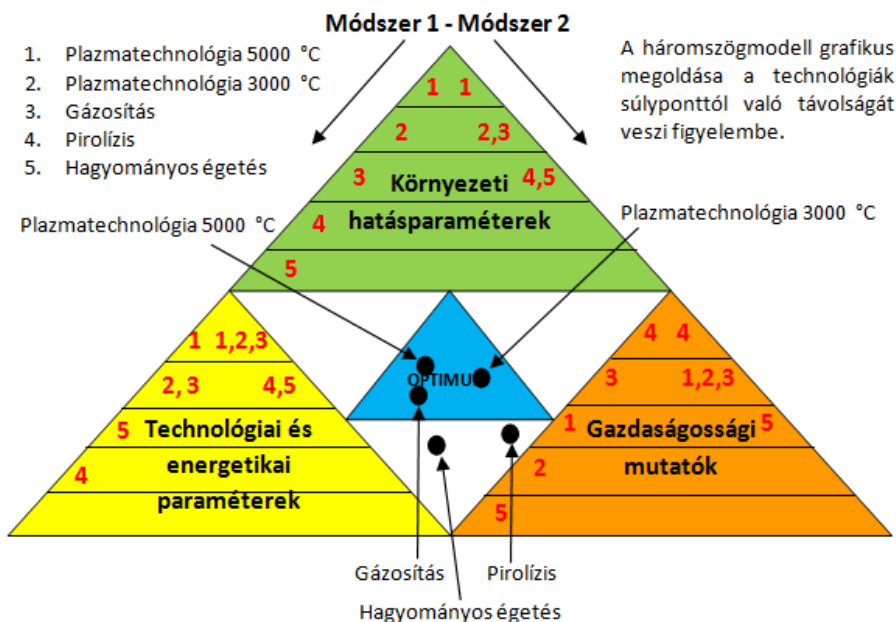
Technológia	Pontszám		Rangsor	
	módszer 1	módszer 2	módszer 1	módszer 2
Hagyományos égetés (1150°C)	2	2	5	3
Pirolízis (500°C)	9	6	1	1
Gázosítás (1200°C)	7	4	2	2
Plazmatechnológia (3000°C)	4	4	4	2
Plazmatechnológia (5000°C)	6	4	3	2

#### 4.4. Egyesített tárgyalásmód

Az egyesített tárgyalásmód összegzi a három tudományterületi megközelítést, így alkotva meg a háromszögmodellt. Mindkét értékelési módszer ugyanazt a prioritási sorrendet eredményezte (12. táblázat). Az 5000 °C hőmérsékleten végzett plazmatechnológia az optimum tartományban helyezkedik el, azonban a gazdasági- és gazdaságossági mutatók kedvezőtlenebb eredményei miatt a technológiai és energetikai paraméterekhez, valamint a környezeti hatáskategóriákhoz közelebb eső részben. A második helyen megosztva a 3000 °C hőmérsékletű plazmatechnológia és a gázosítás végzett. Ők szintén az optimum tartományban helyezkednek el. A gázosítás a kedvezőbb gazdasági és energetikai oldala miatt e két vizsgálati csoporthoz közelebb a környezeti hatáskategóriától pedig távolabb helyezkedik el. A 3000 °C hőmérsékletű plazmatechnológia energetikailag volt kedvezőtlenebb, ezért ettől a csoporttól fog távolabb, a másik kettőhöz pedig közelebb elhelyezkedni. A pirolízis és a hagyományos égetés vizsgált típusai kiesnek az optimum tartományból (2. ábra). Pirolízis esetében a hőmérséklet növelésével az energetikai hatékonyság növelhető, a környezetterhelés mértéke csökkenthető. Ezzel a lépéssel e technológia is bekerülhet az optimum tartományba. A hőmérséklet növelésével párhuzamosan a beruházási költségek növekedésével kell számolnunk, amely így ronthatja a gazdasági- és a gazdaságossági oldalt. Ennek ellenére a hőmérsékletnövelést a hatékonyságnövelés érdekében szükségesnek tartom.

**12. táblázat.** Technológiák összesített pontszáma és a háromszögmodell szerinti prioritási sorrend

Technológia	Összesített pontszám		Rangsor	
	módszer 1	módszer 2	módszer 1	módszer 2
Hagyományos égetés (1150°C)	18	10	3	3
Pirolízis (500°C)	7	6	4	4
Gázosítás (1200°C)	20	14	2	2
Plazmatechnológia (3000°C)	20	14	2	2
Plazmatechnológia (5000°C)	27	17	1	1



2. ábra. A háromszögmodell grafikus megoldása

A technológiákat értékelhetjük a megszerzett és az adható pontok alapján is (13. táblázat). A technológia teljesítménye megmutatja, hogy a szerzhető pontok mennyi százalékát érte el. Az első értékelési módszer szerint a hagyományos égetéses technológia 50 %-os teljesítményt nyújtott. A nagyobb hőmérsékletű plazmatechnológia a kapható pontok 75 %-át szerezte meg. A legkisebb teljesítményt a pirolízis nyújtotta. A gázosítás és a kisebb hőmérsékletű plazmatechnológia egyformán teljesített. Ebből következik, hogy a két technológia a háromszögmodell alapján egymással egyenértékű. A második módszernél hasonló eredmények figyelhetők meg. Ha a technológiák részesedését tekintjük, akkor az összes kiosztott pontból a legkevesebb a pirolízisre jutott. Az első módszernél 7,61 %, a másodikonál 9,84 %. Ez az adott pontoknak kevesebb, mint a tíz százaléka. A legtöbb pontot (közel 30 %) a nagyobb hőmérsékletű plazmatechnológia kapta. A kutatási eredmények alapján a plazmatechnológia és a gázosítás tűnik a legkedvezőbb technológiának.

13. táblázat. Technológiák százalékos értékelése a megszerzett és a megszerzhető pontok alapján

Technológia	Teljesítmény [%]		Részesedés [%]	
	módszer 1	módszer 2	módszer 1	módszer 2
Hagyományos égetés (1150°C)	50,00	27,78	19,57	16,39
Pirolízis (500°C)	19,44	16,16	7,61	9,84
Gázosítás (1200°C)	55,56	38,89	21,74	22,95
Plazmatechnológia (3000°C)	55,56	38,89	21,74	22,95
Plazmatechnológia (5000°C)	75,00	47,22	29,35	27,87

## 5. Konklúziók és célkitűzések

A háromszögmodell döntéstámogató- döntéshozó módszerként történő alkalmazása a hulladékgazdálkodásban lehetőséget adott a feladott hulladékáram kezelésére szolgáló termikus technológiák közötti választásra. A modell egy optimumkeresési eljárást valósított meg, amely végeredményeként egy prioritási sorrend került felállításra. A környezetterhelési hatáskategóriák, a technológiai és energiahatékonysági paraméterek valamint a gazdasági- és gazdaságossági mutatók együttes figyelembevételével, a vizsgált technológiák közül a plazmatechnológia változtatások nélkül alkalmazható hulladékok energetikai célú hasznosítására. A gázosításra kapott eredmények szintén kedvezőek, így nem csak a hulladékgazdálkodásban, hanem az energiaiparban is használható földgáz üzemű gázmotoros erőművek kiváltására. A pirolízisnél tapasztalható kedvezőtlen környezetterhelési értékek és energetikai paraméterek a hőmérséklet célszerű növelésével javíthatóak, így a technológia létjogosultsága is kedvezőbb irányba módosítható. A kutatásom folytatásaként az emisszió csökkentése jegyében szeretnék megvizsgálni az 1200 °C hőmérsékleten végzett pirolízist és az 1600 °C hőmérsékleten végzett gázosítást. A plazmatechnológia beruházási költségének mérséklése érdekében célul tűztem ki a 2000 °C hőmérsékletű plazmagázosítás elemzését, és szeretném elvégezni az új technológiák értékelését is a háromszögmodell segítségével.

## 6. Köszönetnyilvánítás

*A kutatómunka a TÁMOP- 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projektek részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. A kutatás folytatásaként a tanulmány elkészítése a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.*

## 7. Irodalom

- [1] Mannheim, V., Bodnár, I.: *Súlyozási rendszer kidolgozása termikus ártalmatlanítási eljárások összehasonlítására vonatkozóan*. GÉP. LXIII. évf. 10 (2012) pp. 37-40.
- [2] Bodnár, I.: *Termikus hulladékkezelési technológiák gazdasági és gazdaságossági kérdései*. GÉP. LXIV. évf. 5 (2013) pp. 33-36.
- [3] Dr. Bozsik, S.: *Pénzügyi számítások*. ME, Oktatási segédlet. 2009.
- [4] Bodnár, I., Mannheim, V.: *Szerves ipari hulladékok kezelésére szolgáló technológiák vizsgálata környezetterhelési, energiahatékonysági, és gazdasági aspektusokból*. Multidiszciplináris Tudományok. ME kiadványa. 2. kötet. 1 sz. (2012) pp. 9-20.
- [5] Ósz, J.: *Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés*. BME, Oktatási segédlet. 2011.
- [6] Tóthné Dr. Szita, K.: *Környezetgazdaságtan*. ME, Oktatási segédlet. 2012.
- [7] Helsen, L., Bosmans, A.: *Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process*. Proceedings of the International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining, Houthalen-Helchteren, Belgium, pp. 133-180. 2010.
- [8] Mannheim, V., Bodnár, I.: *Hulladékkezelési eljárások környezetterhelési és energiahatékonysági vizsgálata*. Energiagazdálkodás. 54. évf. 3. sz. 2013. pp. 8-11.