

A HULLADÉK, MINT MÁSODNYERSANYAG ÉS MINT KIMERÍTHETETLEN MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁS

THE WASTE AS SECOND MATERIAL AND AS AN INEXHAUSTIBLE SOURCE OF RENEWABLE ENERGY

Bodnár István*

ABSTRACT

This paper presents the waste as second material and as an inexhaustible source of renewable energy. The wastes, depending on their composition, are suitable for the redemption of raw materials and fossil energy sources. However, their energy content depends on their origin and on time, and this change can be expressed with a mathematical equation. The thermic treatment processes, which transform the waste into big synthesis gas with energy content, make it possible to use them as an energy source. We may apply a different technical circular process, which will influence the energetics efficiency indicators significantly. The plasma technology and the burning of the synthesis gas in a gas engine seem to be the most efficient solution.

1. BEVEZETÉS

A hulladékok megújuló energiaforrásként való kezelése teljesen új fogalmat teremthet a hulladékgazdálkodásban. Bizonyos hulladékok energiatartalma megközelelti, sőt meg is haladja a fosszilis energiahordozók energiatartalmát mindemellett, velük ellentétben a hulladékok sosem fognak kimerülni. Napjaink pazarló életvitelének köszönhetően óriási hulladékpotenciállal rendelkezünk. Egy átlagos magyar ember naponta 1 kg hulladékot „termel”, amelynek legnagyobb része csomagolási hulladék. Az iparból naponta átlagosan 1,2 kg ehhez hasonló összetételű hulladék származik egy lakosra vonatkoztatva. Ezzel az Európai Unió középmezőnyébe tartozunk. Eddig úgy tekintettünk a hulladéokra, mint egy haszontalan ömlesztett anyaghalmoz, amitől minél hamarabb és minél egyszerűbben meg kell szabadulnunk. Ezért a legnagyobb részét vagy hulladéklerakókba, vagy hulladékégetőkbe szállítjuk, és ott ártalmatlanítjuk. A hulladék eredeti definíciója így fogalmaz: „a hulladék az ember mindennapi élete, munkája, gazdasági tevékenysége során keletkező, a keletkezés helyén feleslegessé vált, ott közvetlenül fel nem használha-

tó, különböző minőségű és halmazállapotú anyag, termék, maradvány, tárgy, leválasztott szennyezőanyag, szennyezett kitermelt föld, amelyet tulajdonosuk sem közvetlenül felhasználni, sem értékesíteni nem tud, és amelynek kezeléséről külön kell gondoskodni” [1].

Eszerint a hulladék egy teljesen felesleges anyaghalmoz, amivel nem lehet mit kezdeni. De mindannyian ismerjük azt a régi mondást, miszerint ami az egyik ember számára haszontalan, az egy másik számára valódi kincs. Mivel a hulladékok legnagyobb része újrahasznosítható ezért ezt a definíciót célszerűen módosítani kell. A hulladék hivatalos fogalma ettől rövidebb. A hulladékról szóló 2012. évi CLXXXV. törvény (2. § (1) bekezdésének 23. pontja) a következő módon definiálja a hulladékot: *bármely anyag vagy tárgy, amelyről birtokosa megválnik, megválni szándékozik vagy megválni köteles* [2];

Természetesen a jogszabály származási helyük, és veszélyességük szerint megkülönbözteti a hulladékokat, mint például biohulladék, háztartási hulladék, vagy éppen építési-bontási hulladék, azonban ezek definíciói sem tartalmazzák azt a pluszt, amit maga a hulladék jelenthet bizonyos iparágakban. Célszerűnek tartanám a hulladék fogalmának kiegészítését, mégpedig úgy, hogy csak azokat az anyagokat és tárgyakat tartalmazza, amelyeket a jelenleg ismert hulladékkezelési technológiák egyikével sem tudunk hasznosítani. Azok a komponensek, amelyek alkalmasak hasznosításra, kerüljenek ki a hulladék fogalomköréből és két új fogalom bevezetésével adjunk nekik új értelmet. Ennek megfelelően a hulladék új fogalma: *bármilyen olyan anyag vagy tárgy, amelyről birtokosa megválnik, megválni szándékozik vagy megválni köteles, és ami az ismert hulladékkezelési technológiák egyikével sem hasznosítható.*

Az anyagában hasznosítható komponensek csoportjának értelmezéséhez vezessük be a másodnyersanyag definícióját: *bármilyen olyan anyag vagy tárgy, amelyről birtokosa megválnik, megválni szándékozik vagy megválni köteles, és ami feldolgozás útján alkalmas anyagában történő hasznosításra.*

Az energiatermelésre alkalmas komponenscsoportokat pedig a másod-energiához néven definiáljuk: *bármilyen olyan anyag vagy tárgy, amelyről birtokosa*

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépek Tanszéke

megválnak, megválni szándékozik vagy megválni köteles, és amely közvetlenül, vagy átalakítást követően energiatermelés céljából hasznosítható.

A három definíció kiegészíti egymást, ezért jelentős közöttük az átfedés. A hulladékgazdálkodásban zajló folyamatos kutatás és fejlesztés következtében egyre több alternatív technológia áll a rendelkezésünkre, amelyekkel hatékonyan tudjuk a hulladékainkat hasznosítani. Napjainkban olyan technológiák is ismertek, amelyekkel a korábban lerakóba került anyagok is hasznosíthatók. Bizonyos anyagkomponensek (például a csomagolási hulladékok) kémiai összetételük miatt egyaránt besorolhatók a másodnyersanyagok és a másod-energiahordozók közé. Természetesen az elsődleges célnak továbbra is az újrahasznosításnak kell lennie, és csak másodlagos legyen az energetikai célú hasznosítás, mert az újrahasznosításnak kisebb a környezetterhelése, mint az energetikai célú hasznosításnak. A háztartásokban keletkező hulladékok 100 %-ban újrahasznosíthatók, ezért ezt a csoportot célszerű kivenni a hulladék tárgyköréből. A műanyag, az üveg és a papír csomagolóeszközöket anyagukban tudjuk hasznosítani, és így másodnyersanyagként tekinthetők. Az ételmaradékok, a zöldségek és gyümölcsök héjai a fermentálás legjobb alapanyagai, így biogáz és talajjavító, műtrágyakiváltó előállítására alkalmazhatók. A szelektíven gyűjtött, illetve az ömlesztett hulladék szétválogatást követően visszavezethetők számtalan gyártási folyamatba, ennek köszönhetően igen jelentős mértékben lehet nyersanyagokat és fosszilis energiahordozókat kiváltani. Az igazi problémát jellemzően a veszélyes hulladékok, a veszélyes anyagokkal szennyezett csomagolóeszközök jelentik. Ezeket a veszélyességük miatt nem tudjuk anyagában hasznosítani, ez esetben a jogszabályok is az energetikai célú hasznosítást helyezik előtérbe.

2. HULLADÉKOK ÁTLAGOS ÖSSZETÉTELE ÉS ENERGIATARTALMA

A hulladékok összetétele a származási helytől és az évszaktól függően változik, eszerint a hulladék - fajlagos - energiatartalma a származási hely és az idő függvénye. Ennek megfelelően egy kétváltozós függvénynek tekinthető és a következő alakban írható fel (1. képlet):

$$e = e(\mathbf{k}, t) \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (1.)$$

ahol: \mathbf{k} = a származási hely koordinátái (földrajzi szélesség és hosszúság),
 t = a keletkezésének időpontja

Abban az esetben, ha a begyűjtés helyszíne állandó, azaz a hulladék származási helye egy bizonyos terület, akkor a kétváltozós függvény egyváltozósra módosul,

mert a származási koordináta független változóvá válik. Ezt a megközelítést kiindulási feltételként rögzítenünk kell. Ekkor a módosított egyenlet a következő (2. képlet):

$$e = e(t) \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (2.)$$

alakot veszi fel. A kezdeti feltétel pedig: \mathbf{k} = állandó

Ha a hulladék tömege: m , amely egy V térfogatba van zárva, amely térfogat függ az időtől $V = V(t)$, akkor az adott m tömegű hulladék energiatartalma, ami nyilvánvalóan ugyancsak függ az időtől (3. képlet):

$$E(t) = \int_m e(t) dm = \int_{V(t)} e(t) \cdot \rho dV \quad [MJ] \quad (3.)$$

alakban írható fel. Ha a $V(t)$ térfogatú hulladéktömeg Δt idő elteltével $V(t+\Delta t)$ térfogatú lesz, de a tömege továbbra is m marad és alkalmazva a tömegmegmaradás törvényét, akkor a hulladék energiatartalmának a teljes idő szerinti (szubsztanciális) megváltozása (4. képlet):

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} e(t) \cdot \rho dV = \int_{V(t)} \frac{\partial e(t)}{\partial t} \cdot \rho dV + \int_{A(t)} e(t) \cdot \rho \cdot (\mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}) \quad (4.)$$

összefüggéssel írható fel. A d/dt differenciáloperátor a $V(t)$ térfogattal együttmozgó koordinátarendszerben vett időbeli teljes (szubsztanciális) deriváltat jelenti, amely egy lokális és egy konvektív tagból áll (5. képlet):

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \quad (5.)$$

A 4. képletben szereplő felületi integrálnak a Gauss-tétel segítségével történő átalakítása után a hulladék energiatartalmának szubsztanciális deriváltja egy másik kifejezéssel is felírható (6. képlet):

$$\frac{dE(t)}{dt} = \int_{V(t)} \left[\left(\frac{de(t)}{dt} + e(t) \cdot \text{div } \mathbf{v} \right) \cdot \rho \right] dV \quad (6.)$$

A függvény teljes idő szerinti deriváltja megadja a hulladék energiatartalmának időbeli változását. A lokális tag a hulladék energiatartalmának naptári idő szerinti változását, a konvektív pedig az átalakítási és a kezelési műveletek (beleértve a logisztikai, a mechanikai és a kémiai műveleteket is, amelyeken a hulladék a begyűjtését követően átesik) idő szerinti megváltozását fejezi ki. - Mindkét tag lehet pozitív és negatív is. - A függvény felvételével tervezhetőbbé válik a hulladékok

energetikai célú hasznosítására szolgáló erőművek teljesítményének és kapacitásának meghatározása. Ezzel nem csak költségmegtakarítást érhetünk el, hanem hatékonyabb lehet az erőforrás felhasználás és javulhat az erőmű kihasználtsága, mindemellett növekedhet a létesítmény nettó villamos- és hőhatásfoka, amely szintén gazdasági előnyhöz juttathatja az erőművet.

Mivel a másod-energiahordozóként hasznosítható hulladékokat tovább lehet osztályozni a származási helyük alapján, ezért az összetételük és az energiatartalmuk széles sávban mozog. A könnyebb érthetőség érdekében célszerű összehasonlítani a különböző típusú hulladékok és a fosszilis energiahordozók energiatartalmát (1. táblázat). Megfigyelhető, hogy az értéktartományok között jelentős átfedés található. Ez azt jelenti, hogy bizonyos hulladékok közvetlenül, egy az egyben alkalmasak bizonyos fosszilis energiahordozók kiváltására. Például a szilárd települési hulladék alkalmas a tőzeg, a lignit és a barnaköszén kiváltására. Az ipari szerves hulladék a barnaköszén és a fekete köszén kiváltására alkalmazható. A gumiabroncs hulladék a feketeköszén és az antracitot helyettesítheti. A biomassza fermentálása során átlagosan 40÷70 % metántartalmú biogáz keletkezik, amely a földgázt válthatja ki. Az új termikus hulladékkezelési technológiákkal pedig bármilyen típusú hulladékot át tudunk alakítani nagy energiatartalmú, gáz halmazállapotú energiahordozóvá, amely így könnyebben szállíthatóvá válik.

1. táblázat: Különböző típusú hulladékok és fosszilis energiahordozók energiatartalma [forrás: saját szerkesztés]

Hulladék és energiahordozó típusa	Energiatartalom [MJ/kg]
Települési szilárd hulladék	5,0÷16,8
Ipari szerves hulladék	14,0÷21,1
Gumiabroncs hulladék	24,83÷36,38
Biomassza	7,1÷18,92
Kőolaj	41,87÷48,15
Köszén	8,0÷32,7
Földgáz	45,6÷49,0

Példaként a szilárd települési hulladék összetételét szeretném bemutatni (2. táblázat), mert ez az a hulladéktípus, amelyet a legkönnyebben tudunk hasznosítani. Látható, hogy csak olyan összetevőket tartalmaz, amelyek teljes mértékben újrahasznosíthatók akár anyagukban, akár átalakítás nélkül. Ahhoz, hogy „újtermékek” legyenek belőlük legelső lépés, hogy szelektíven gyűjtjük be őket. Ha erre nincs lehetőség, akkor pedig az ömlesztve begyűjtött hulladékot szét kell válogatni. Ez azonban meglehetősen költséges megoldás. A szétválogatás megtörténhet kézi munkaerővel, vagy gépesítve [6]. A kézi szétválogatás előnye, hogy új munkahelyeket teremt, hátránya viszont a rossz higiéniai viszonyok,

a fertőzésveszély, a gyakori megbetegedések veszélye. Ha viszont nem szeretnénk szétválogatni az ömlesztve begyűjtött hulladékot, akkor energiatermelés céljából hasznosíthatjuk. Ez kevésbé jó megoldás, hiszen itt jelentős légszennyezőanyag kibocsátásával kell számolnunk, amely nagy mértékben terheli a környezetet. De legalább fosszilis energiahordozót vált ki és így nézve lehet, hogy egységnyi energia előállításánál csökkenhet a károsanyag-kibocsátás, ezért szükségesnek tartom életciklus elemzés felhasználásával összehasonlítani a hulladékártalmatlanító erőműveket és a hagyományos fosszilis energiahordozókat tüzelő erőműveket!

A kiválasztott hulladék egy hazai nagyvárosból származik, amelynek energiatartalma 9 MJ/kg. Összetételét és energiatartalmát tekintve ez megközelítőleg az országos átlagával megegyező. A mintavétel minden település esetében 2006 tavaszán történt [3].

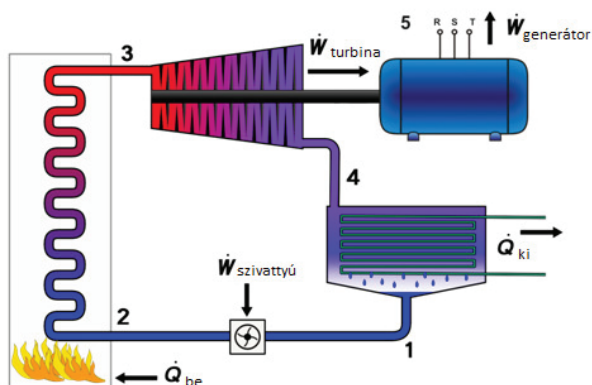
2. táblázat: Települési szilárd hulladék átlagos összetétele [3]

Alkotó	Tömeghányad [%]		
	Nagyváros	Kisváros	Országos átlag
Biológiai	11,16	13,62	13,19
Papír	13,23	6,30	7,05
Karton	2,58	1,36	2,05
Komposzt	1,18	0,97	1,07
Textil	3,02	3,87	2,88
Higiéniai	2,94	3,53	3,90
Műanyag	15,42	13,92	12,73
Egyéb éghető	3,61	9,16	3,15
Éghetetlen	2,27	16,08	5,01
Üveg	3,47	4,25	4,67
Fém	3,63	4,56	3,38
Veszélyes	0,54	1,27	0,69
Finom szemcsés	36,95	21,11	40,23

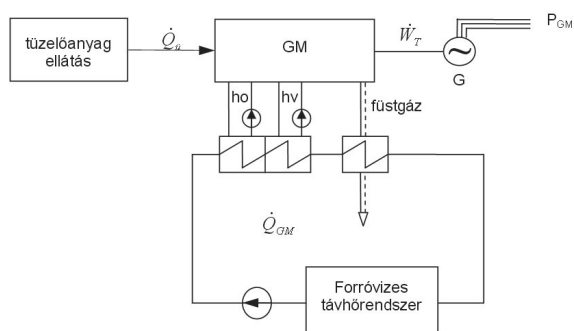
3. HULLADÉKOK ENERGIAHORDOZÓKÉNT TÖRTÉNŐ HASZNOSÍTÁSA

A hulladékok energiahordozóként történő hasznosítására szolgálnak a termikus hulladékkezelési technológiák. A legegyszerűbb megoldás a hulladékok szabályozott körülmények közötti - hagyományos - elégetése. Ez esetben egy erre a célra megfelelően kialakított melegvíz-, vagy gőzkazánban, elégetjük a hulladékot és a keletkező hőt fűtési, hűtési vagy villamosenergiatermelés céljára használjuk. Mivel Rankine- Clausius-körfolyamat valósul meg, ezért a villamos hatásfok kisebb, mint 20 %, a hőhatásfok pedig átlagosan 65 %. A körfolyamat elvi sémáját az 1. ábra szemlélteti. Ezzel ellentétben az új termikus technológiák első lépésként átalakítják a hulladékot, nagy energiatartalmú haszontermékké [4]. Pirolízis esetén pirokoks, pirololaj és

pirogáz keletkezik, amelyek alkalmasak a kőszén, a kőolaj és a földgáz kiváltására. Gázosítás és plazmatechnológia esetén szintézisgáz keletkezik, amely ugyancsak alkalmas a földgáz kiváltására. A pirolízisnél keletkező pirokokszot vagy kazánban égetjük el és a már említett módon termelünk belőle energiát, vagy egy másik termikus kezelési eljárással (gázosítás, plazmatechnológia) szintén éghető gázzá alakítjuk [5]. A pirolízist ugyan olajtüzelésű erőműben, vagy dízelmotorban lehetne energiatermelésre használni, de környezetvédelmi szempontok miatt ez kevésbé tűnik jó megoldásnak. Azonban tisztítással és rektifikálással alkalmasá tehető dízel üzemanyagok kiváltására, így a közlekedésben kaphatna jelentős szerepet. A legkisebb környezeti kockázatot az ipari, vagy kenőolajként való hasznosítása jelentené. A pirogáz és a szintézisgáz gázkazánban, gázmotorban, vagy gázturbinában történő elégetésével tudunk energiát előállítani [4], [14]. A gázmotoros megoldás villamos energetikailag és környezetvédelmi szempontok szerint is hatékonyabb megoldás. Diesel- körfolyamat révén (2. ábra), a villamos hatásfok általában 40%, a hőhatásfok pedig 45% [7].



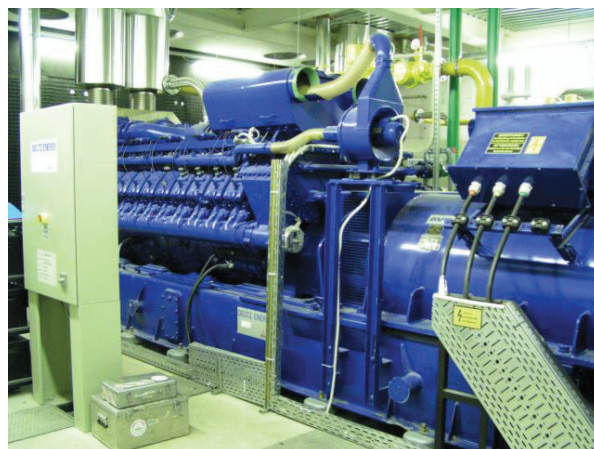
1. ábra: Gőzkazánval és gőzturbinával megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája [11]



2. ábra: Gázmotorral megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája [12]

A gázmotoros kapcsolt energiatermelés napjainkban egyre divatosabbá vált (3. ábra). Az egységeket a 2000-es évek elején telepítették a távhőt szolgáltató létesítményekben. Azonban a mai földgázárak mellett,

valamint a földgázból kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételi árának a támogatottak köréből való kikerülése óta, ezek az erőművek nem gazdaságos megoldások, nagy a megterülesi idejük [15].



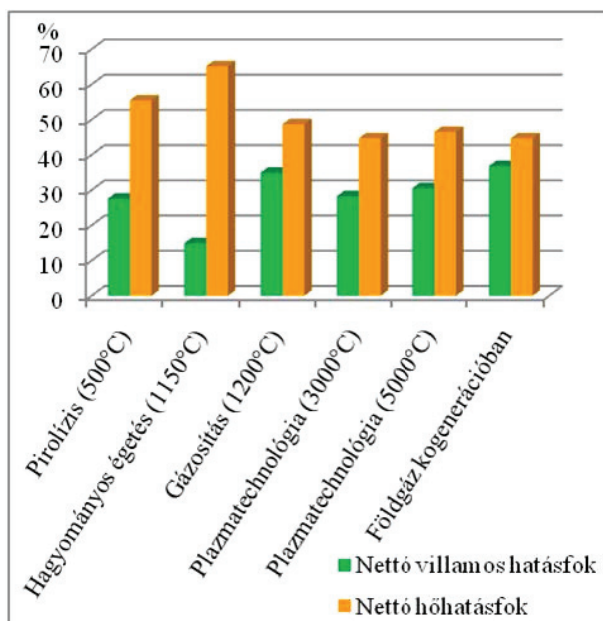
3. ábra: Földgáztüzelésű gázmotorral megvalósított kapcsolt energiatermelő egység [11]

A hulladékból termelt szintézisgázok hasznosítására energetikai hatékonyság alapján ez a technológia tűnik a legjobbnak. Ráadásul jelenleg a hulladékból kapcsoltan történő energiatermelés a támogatott körbe tartozik, ezért az így termelt villamos energiát kötelező emelt áron átvennie az áramszolgáltatónak [10], [16].

A termikus hulladékkezelési technológiáknál nem csak azt célszerű megvizsgálni, hogy milyen villamos teljesítményű hulladékhasznosító üzemeltetést kell építeni adott hulladék-kapacitás esetén, és nem is csak azt, hogy milyen hatékonysággal tudjuk a hulladékot energiává alakítani, hanem azt is, hogy egységnyi tömegű hulladékból mekkora mennyiségű a kinyerhető hasznos energiamennyiség. Az energetikai hatékonyság százalékos értéke gyakran félrevezető, mert csak azt mutatja meg, hogy a bevitt energia hány százaléka nyerhető ki, és hasznosítható (3. táblázat, 4. ábra).

3. táblázat: A vizsgált technológiák nettó villamos-, hő- és eredő hatásfoka [forrás: saját számítás]

Technológia	η_n villamos [%]	η_n hő [%]	η_n eredő [%]
Pirolízis (500 °C)	27,60	55,50	83,10
Hagyományos égetés (1150 °C)	14,93	65,17	80,10
Gázosítás (1200 °C)	34,96	48,72	83,68
Plazmatechnológia (3000 °C)	28,31	44,74	73,05
Plazmatechnológia (5000 °C)	30,55	46,47	77,02
Földgáz kogenerációban	36,80	44,70	81,50



4. ábra: A vizsgált technológiák nettó villamos- és hőhatásfoka [forrás: saját számítás]

Ezzel ellentétben az egységnyi tömegű hulladékból termelt hasznos energiamennyiség, azt mutatja meg, hogy egységnyi tömegű hulladékból ténylegesen mekkora mennyiségű hasznos energiát kaphatunk. Erre mutat példát a 4. és az 5. táblázat. Előfordulhat, hogy egy technológiának kisebb a százalékosan kifejezett nettó villamos hatékonysága, de egy kg tömegű hulladékból ennek ellenére is több energiát tudunk kinyerni és hasznosítani, mint egy másik nagyobb hatásfokú technológiánál [8]. Erre a plazmatechnológia a legjobb példa. A nettó hatásfoka ugyan kisebb, mint a gázosítási technológiának, de a fajlagos energiamutatója nagyobb. Ugyanez figyelhető meg a referencia erőművel való összehasonlításnál is. Ennek oka a technológiai sajátosságokban és az alkalmazott segédgázokban rejlik.

4. táblázat: Egységnyi tömegű hulladékból termelt nettó, hasznosítható villamosenergia-mennyiség [forrás: saját számítás]

Technológia	Villamos energia	
	[MJ _e]	[kWh _e]
Pirolízis (500 °C)	6,28	1,74
Hagyományos égetés (1150 °C)	1,92	0,53
Gázosítás (1200 °C)	7,56	2,10
Plazmatechnológia (3000 °C)	18,35	5,10
Plazmatechnológia (5000 °C)	47,31	13,14
Földgáz kogenerációban	18,53	5,15

Mivel a pirolízisnél nem alkalmaztunk segédgázt, mert a pirolízis az oxigén teljes kizárása mellett lejátszódó hőbontási folyamat, ezért a keletkező pirogáz éghető gázokban dús gázelegy. A pirokoks nagy szén-

tartalmú szilárd maradék, a pirolaj pedig szénhidrogén származék, amelyek így alternatív energiahordozó.

5. táblázat: Egységnyi tömegű hulladékból termelt nettó, hasznosítható hőenergia-mennyiség [forrás: saját számítás]

Technológia	Hőenergia	
	[MJ _e]	[kWh _e]
Pirolízis (500 °C)	8,97	2,49
Hagyományos égetés (1150 °C)	7,20	2,00
Gázosítás (1200 °C)	10,80	3,00
Plazmatechnológia (3000 °C)	29,48	8,19
Plazmatechnológia (5000 °C)	85,16	23,66
Földgáz kogenerációban	23,82	6,62

A gázosításnál ugyan levegő volt a gázosító közeg, de a mennyisége közel harmada a tökéletes égéshez szükséges mennyiségnek. A plazmatechnológiák esetén pedig vízgőz (3000 °C hőmérsékleten), valamint oxigén és szén-dioxid (5000 °C hőmérsékleten) megfelelő arányú keveréke volt a gázosító közeg. A gázosító közeg szerepe a keletkező szintézisgáz energiatartalmában jelentkezik. A helyesen megválasztott segédgáz akár 60 százalékkal is növelheti a gáztermék energiatartalmát, ezért minden esetben célszerű megvizsgálni az ártalmatlanítani kívánt hulladékot, és a kémiai összetétele alapján kell kiválasztani a segédgázt, valamint meghatározni annak szükséges mennyiségét az energiamaximum elérésének érdekében [9].

Annak ellenére, hogy a plazmatechnológiával üzemelő hulladékhasznosító erőművek villamos hatásfokai kisebbek, mint a referencia erőműé, egységnyi tömegű hulladékból megközelítőleg ugyanannyi, vagy több energiát lehet velük előállítani. Ezek alapján a plazmatechnológiával üzemelő hulladékhasznosító erőművek alkalmasak a földgáz üzemű gázmotoros erőművek kiváltására energetikai hatékonyság szempontjából.

4. „HULLADÉKBÓL ENERGIÁT” TECHNOLÓGIÁK ÉLETCIKLUS-ELEMZÉSE

Az életciklus-elemzést világszerte több évtizede sikerrel alkalmazzák döntéstámogató módszerként. Magyarországon az utóbbi évben ismerték el fontosságát. Elsősorban az energiaiparban és a gyártóiparban alkalmazzák termékek, technológiák és szolgáltatások értékelésére [13]. De egyre nagyobb szerepet kap a hulladékgazdálkodásban is. A hulladékok energetikai célú hasznosítására szolgálók (WtE, Waste to Energy: hulladékból energiát) technológiák életciklus-elemzése lehetőséget ad arra, hogy megbecsüljük és számszerűsítsük a technológiák környezetre gyakorolt hatását. Az elemzéssel kapott környezeti hatáskategóriák értékeinek felhasználásával a különböző technológiák összehasonlíthatóvá

válnak és így az adott hulladékáramra vonatkozóan kiválasztásra kerülhet a lehetséges legjobb technológia környezetvédelmi szempontból. A vizsgálati környezeti hatáskategóriák megnevezéseit és az elemzés jellemezőit a 6. táblázat foglalja össze. Az értékelést az MSZ EN ISO 14040:2006 szabvány alapján életciklus-elemző szoftver segítségével végeztem el. Minden technológiát normál üzemi körülmények között (stacionárius állapot) vizsgáltam. Mivel az új termikus technológiák haszonterméke az éghető szintézisgáz, amivel földgázt szeretnék kiváltani, ezért referenciaértékként az földgázüzemű gázmotoros erőművet tekintettem. Az így kapott eredményeket a 7. és a 8. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: A vizsgálati környezeti hatáskategóriák, a rendszerhatár, az értékelési módszer, és a funkcionális egység [forrás: saját szerkesztés]

Környezeti hatáskategóriák		
Rövid jel	Megnevezés	Mértékegység
HTP	Humán Toxicitási Potenciál	kg DCB-egyenérték
GWP	Globális felmelegedési Potenciál	kg CO ₂ -egyenérték
ODP	Ózonréteg elvékonyodás	kg R11-egyenérték
AP	Savasodási Potenciál	kg SO ₂ -egyenérték
EP	Eutrofizációs Potenciál	kg Foszfát-egyenérték
POCP	Fotokémiai Ózonképződési Potenciál	kg Etilén-egyenérték
Rendszerhatár A hulladék erőműben történő feladásától a keletkező végtermékek kezeléséig.		Értékelési módszer: CML 2001, 2010. novemberi Funkcionális egység: 1 kWh villamos energia

7. táblázat: Vizsgált technológiák környezeti hatáskategória értékei [forrás: saját számítás]

Technológia	HTP	GWP	ODP
Pirolízis (500 °C)	1,83E-01	4,37E-01	9,08E-04
Hagyományos égetés (1150 °C)	9,88E-01	2,45E-01	3,47E-05
Gázosítás (1200 °C)	9,71E-02	1,70E-01	7,02E-12
Plazmatechnológia (3000 °C)	1,14E-03	2,60E-02	1,26E-09
Plazmatechnológia (5000 °C)	3,56E-05	4,95E-03	1,73E-11
Földgáz kogenerációban	5,64E-05	8,33E-02	5,45E-11

A kapott eredményeken megfigyelhető, hogy a kisebb hőmérsékleten végzett pirolízis kiugróan magas értéket képvisel a globális felmelegedésre gyakorolt hatás (GWP), az ózonréteg elvékonyodását (ODP) és a savasodást okozó gázok kibocsátásának (AP) tekintetében egyaránt. A földgázüzemű gázmotoros erőműhöz viszonyítva is gyengén teljesít. A hőmérséklet növelésével ezek az értékek csökkenthetően. Kivételt az emberi szervezetre gyakorolt toxikus hatás (HTP), az eutrofizációs potenciál (EP) és a fotokémiai ózonképződési potenciál (POCP) jelent, ahol a legrosszabb értéket a hagyományos égetéses technológia eredményezte. Ez utóbbi hatáskategória kivételével, ahol a referenciaérték a legrosszabb, a vizsgált pirolízis és a hagyományos égetéses technológiák környezetvédelmi szempontból nem alkalmas a földgáz üzemű gázmotoros erőmű kiváltására.

8. táblázat: Vizsgált technológiák környezeti hatáskategória értékei [forrás: saját számítás]

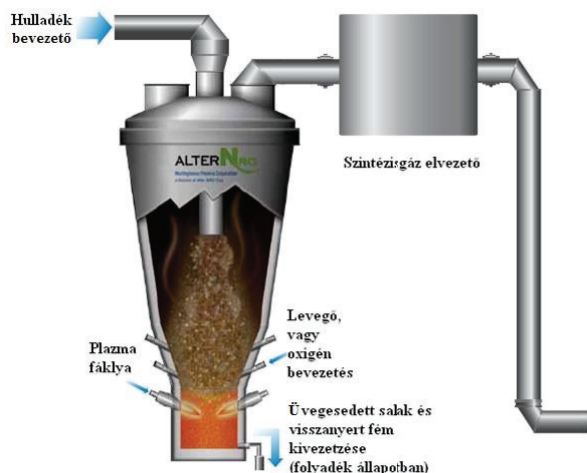
Technológia	AP	EP	POCP
Pirolízis (500 °C)	1,07E-01	1,91E-02	3,39
Hagyományos égetés (1150 °C)	8,97E-02	2,34E-02	7,19
Gázosítás (1200 °C)	3,08E-02	8,00E-03	2,88E-02
Plazmatechnológia (3000 °C)	1,39E-04	1,78E-05	2,51E-02
Plazmatechnológia (5000 °C)	5,30E-06	6,96E-06	2,31E-03
Földgáz kogenerációban	1,78E-04	2,46E-05	8,73

A gázosítási technológiára kapott értékek jellemzően a referencia értékekhez közel helyezkednek el. A legkedvezőbb eredményeket a plazmatechnológiát alkalmazó hulladékhasznosító erőműveknél tapasztaltam. A 5000 °C hőmérsékleten végzett plazmatechnológia minden környezeti hatáskategória tekintetében jobb, mint a földgázüzemű gázmotoros erőmű. Ezek alapján elmondható, hogy a hulladékok plazmatechnológiával történő energetikai célú hasznosítása környezetvédelmi szempontból alkalmas a földgázüzemű gázmotoros erőmű kiváltására.

5. PLAZMATECHNOLÓGIA, MINT ENERGIA-SŰRŰSÉGNÖVELŐ MÓDSZER

A plazmatechnológia energia-sűrűsége-növelő módszerként való alkalmazása nem újdonság, 1963-as megalkotása óta az USA-ban és egyes ázsiai országokban előszeretettel alkalmazzák, jellemzően biomassza, és

települési szilárd hulladék esetén [17]. A plazmatechnológia legfontosabb egysége a plazmareaktor, amely tulajdonképpen nem más, mint egy nyomástartó edény. Egy harmadik generációs plazmareaktor (Alter NRG Corp.) elvi felépítését és működését az 5. ábra szemlélteti. A reaktor alakja rendszerint a tervező és gyártó cégtől függ, azonban minden esetben három jól elhatárolható térrészre osztható és lefelé szűkülő. A felső térrész a gázgyűjtő rész, amely térfogata a reaktor térfogatának több mint a kétharmadát teszi ki.



5. ábra: Plazmareaktor felépítése és működése [forrás: Alter NRG Corp.]

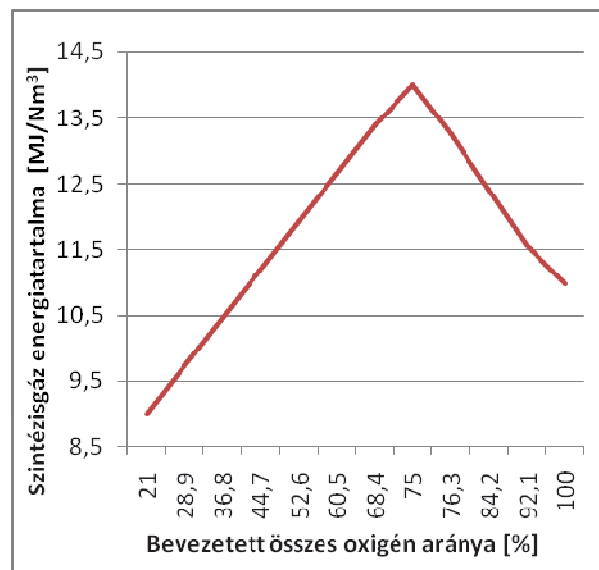
A középső rész a hulladéktér, amely fogadja a feladott hulladékot és a felszálló szintézigáz felhasználásával azt előmelegíti. A segédgáz bevezető csonkjai is itt helyezkednek el. A segédgáz előmelegítéséről a szintézigáz gondoskodik. A harmadik térrész az olvad salak gyűjtésére szolgál. A plazmafáklya, amely nem más, mint két darab villamos elektród, a salakgyűjtő rész felső részén helyezkedik el. A villamos ív hatására az ívtérben elhelyezkedő hulladék kémiai alkotórészeire bomlik és a megmaradási törvényeknek megfelelően olyan kémiai vegyületekké állnak össze, amelyek egy része gáz fázisban távozik, maradék része pedig olvadt állapotban hagyja el a reaktort. A keletkező szintézigáz hidrogénben és szén-monoxidban gazdag, amely így energiahordozóként hasznosítható. Az alkalmazott segédgáz összetétele és mennyisége az ártalmatlanítani kívánt hulladék kémiai összetételétől, első sorban annak hidrogén- és szénvegyület tartalmától függ. A segédáramok megválasztásánál az energiamaximumra kell törekedni, ez akkor következik be, ha a keletkező szintézigásznak maximális a H_2 és a CO_2 tartalma.

Végezetül szeretném megmutatni, hogy hogyan alakul annak a szintézigásznak az energiatartalma, amely szilárd települési hulladék plazmatechnológiával történő ártalmatlanítása során szabadul fel. A 9. táblázatban és a 6. ábrán szemmel látható a különbség, hogy ha a levegőt elkezdjük tiszta oxigénnel keverni, akkor egy ideig növelhető az energiatartalom, de egy ponton túl az

energiatartalom újra csökkenni kezd. Ez akkor következik be, ha túl sok az oxigén a plazmareaktorban, ugyanis ekkor az oxigénfelesleg miatt a szén-monoxid elkezd átalakulni szén-dioxiddá, ami már nem éghető, és így ballasztként fog viselkedni a szintézigásban.

9. táblázat: Szintézigáz energiatartalmának alakulása a segédgáz összetételének a függvényében [forrás: saját számítás]

Szintézigáz energiatartalma [MJ/kg]	Segédgáz összetétele [%]		
	Levegő	Tiszta O_2	O_2 arány
9,00	100	0	21,0
9,73	90	10	28,9
10,46	80	20	36,8
11,19	70	30	44,7
11,93	60	40	52,6
12,66	50	50	60,5
13,39	40	60	68,4
13,27	30	70	76,3
12,42	20	80	84,2
11,56	10	90	92,1
10,98	0	100	100
Optimum			
14,01	31,65	68,35	75,0



6. ábra: Szintézigáz energiatartalmának változása a segédgázzal bevezetett összes oxigén arányának függvényében [forrás: saját számítás]

Annak ellenére, hogy a technológia igen jelentős mennyiségű villamos energiát igényel a működéséhez (akár a megtermelt egyharmadát), mégis energia visszanyerési folyamat. A technológia alkalmazása a hulladékgazdálkodásban és az energetikában még várat magára, de a következő évtizedekben várható elterjedése.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A hulladék az emberi tevékenységek során keletkezik, ezért folyamatosan újratermelődik, így kimeríthetetlen, megújuló energiaforrásnak is tekinthető. Az összetételüktől függően vagy anyagukban, vagy energiahordozóként hasznosíthatók. Természetesen törekednünk kell arra, hogy a lehető legnagyobb részük újrahasznosításra kerüljön, mert azzal nem csak nyersanyagokat lehet kiváltani, hanem csökkenteni lehet a környezetkockázati tényezőjüket is. Mivel összetételük folyamatosan változik, ezért az energiatartalmuk is függ az időtől, és a helytől, amik az ismert fizikai törvényszerűségek figyelembevételével egyértelműen megfogalmazhatók. Abban az esetben, ha a származási helyüket állandónak tekintjük, a helytől való függőségüket független változóként vehetjük figyelembe, és így az energiatartalmuk már csak az idő függvénye. Energiahordozóként történő hasznosításukra szolgálnak a termikus ártalmatlanítási technológiák, amik közül környezetvédelmi szempontok és energetikai hatékonysági paraméterek alapján kiemelkedik a plazmatechnológia. Nem csak egymáshoz viszonyítva, hanem a földgázüzemű gázmotoros erőműhöz képest is kedvezőbb eredményeket kaptunk, első sorban a környezetvédelmi hatáskategóriák tekintetében. Ugyan a százalékban kifejezett villamos hatásfokok tekintetében mintegy 20 %-kal kedvezőtlenebb értékeket kaptam, ennek ellenére az egységnyi tömegű hulladékból e technológiánál lehet a legtöbb hasznos energiamennyiséget kinyerni. Ezek alapján elmondhatom, hogy a plazmatechnológia megoldást nyújthat a hulladékgazdálkodásban jelentkező problémákra.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A tanulmányban ismertetett kutató munka a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

8. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Fenntartható mezőgazdasági rendszerek és környezettechnológia. Szaktudás Kiadó Ház ZRt. 2008, aktualizálva 2010.
- [2] A hulladékról szóló 2012. évi CLXXXV. törvény.
- [3] FAITLI J., CSÖKE B., LÁSZLÓ T., GYÖRFI A., KECSKÉS Á., BURAI L., ÁGOSTON CS., BÉRES A., NAGY GY.: Települési szilárd hulladék összetételének vizsgálata. Műszaki szakértői tanulmány, Miskolci Egyetem, 2006.
- [4] HOGG R.: Energy from waste by pyrolysis and gasification the experience and performance of an

operational plant. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India, pp. 385-392. 2007.

- [5] HILL T. & DOWEN S.: Pyrolysis and gasification, Briefing (Draf 2), UK Without Incineration Network (UK WIN). Available electronically at <http://uk.org.uk>. 2010.
- [6] A hulladékgazdálkodásról szóló 2000. évi XLIII. törvény módosításáról 2012. évi XXVIII. törvény
- [7] BODNÁR I.: Vegyipari hulladékok termikus ártalmatlanításának vizsgálata és az optimális technológia kiválasztását elősegítő módszer bemutatása. A „Tudományos Próbpálya” című VI. PhD Konferencia. Elektronikus kiadvány. 2013. pp. 256-265.
- [8] MANNHEIM V., BODNÁR I.: Hulladékkezelési eljárások környezetterhelési és energiahatékonysági vizsgálata. Energiagazdálkodás. 54. évf. 3. sz. 2013. pp. 8-11.
- [9] BODNÁR I.: Növényvédőszer hulladékok termikus kezelési eljárásainak összehasonlítása. Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa. 2012. pp. 12-17.
- [10] BÜKKI G., SZEDERKÉNYI S.: EU-direktíva a kapcsolt energiatermelésről. Magyar Energetika. 9. évf. 5. szám. 2002, pp. 45-48.
- [11] GRÓF GY., KÖNCZÖL S.: Gázmotoros kapcsolt hő- és villamos-energiatermelés. Háttér tanulmány az üzemeltetési ajánlás kidolgozásához. 2008.
- [12] ŐSZ J.: Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Oktatási segédlet. 2011.
- [13] BILITEWSKY B., HÄRDTLE G., MAREK K., WEISSBACH A., BOEDDICKER H.: Waste Management. Verlag Springer, Berlin, Germany. 1994.
- [14] 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.
- [15] A megújuló energiaforrásból vagy hulladékból nyert energiával termelt villamos energia, valamint a kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételéről és átvételi áráról szóló 389/2007. (XII. 23.) Korm. rendelet módosításáról a 320/2012. (XI. 14.) Korm. rendelet.
- [16] A megújuló forrásokból előállított energia részarányának kiszámítási módszertanáról 1/2012. (I. 20.) NFM rendelet
- [17] YOUNG G. C.: Municipal solid waste to energy conversion processes: Economic, technical, and renewable comparisons. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 2010.