



TELEPÜLÉSI SZILÁRDHULLADÉK LERAKÓK HŐGAZDÁLKODÁSÁNAK MEGALAPOZÁSA

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Készítette:

Magyar Tamás

okl. környezetmérnök

Tudományos témavezető:

Dr. habil. Faitli József

egyetemi docens

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője:

Dr. habil. Dobróka Mihály *egyetemi tanár, az MTA doktora*

1. BEVEZETÉS, A KUTATÓMUNKA CÉLJA

Annak ellenére, hogy a hulladékgyártó hierarchiája szerint a lerakással történő ártalmatlanítás a legkevésbé preferált megoldás, Magyarországon jelenleg még évente közel 2,9 millió tonna, – szerves anyagokat is tartalmazó – vegyesen gyűjtött települési szilárdhulladék (a továbbiakban: hulladék) kerül a közszolgáltatás keretén belül elszállításra, amelynek mintegy 78 %-át deponálják (KSH, 2012). A korszerű lerakókban a képződő depóniagáz energetikai hasznosításának technológiája megoldott. Ezen túlmenően, a nagy tömegben jelenlévő hulladékokban a lebomlási folyamatok következtében jelentős hő keletkezik, amely az anyag felmelegedését okozza. A nagy mennyiségben keletkező hő hasznosítás nélkül tulajdonképpen a depónia környezetét fűti. Szakirodalom kutatást végeztem az említett témában és úgy találtam, hogy Magyarországon, illetve Európában a depóniákban keletkező hőt még nem hasznosítják, azonban Amerikában már elkezdődtek az erre irányuló kutatások, viszont az ipari alkalmazásig még nem jutottak el. Magyarországon az alapötlet, amely szerint egy még fel nem töltött hulladéklerakóba, vagy más műtárgyba könnyű hőcserélő csővezetékkel fektetni, amely alkalmas hőkinyerésre Szamek-tól (2012) származik. Később ez az ötlet vezetett a „Depóniahő-hasznosítási technológia kidolgozása - KMR_12-1-2012-0128” című projekt sikeres megvalósításához, amelyhez a doktori kutatómunkám szorosan kapcsolódik. A projekt konzorciumi tagjai az .A.S.A. Magyarország Kft. (konzorciumvezető), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint az MTA Talajtani és Agrokémiai Intézete voltak.

A tudományos kutatómunka kezdeti célja a lerakóba építhető hőcserélő rendszer fő műszaki jellemzőinek, kialakítási lehetőségeinek, stb. a meghatározása, azaz az új téma szakmai megalapozása volt. A kutatómunkám során megszerzett ismeretek azonban a célkitűzések kiterjesztését eredményezték, amely kibővült a hulladéklerakók hőgazdálkodásának megalapozásával, mivel számos hőgazdálkodási opció közül lehet választani, amelyek tervezéséhez a kapott eredmények már kellő alapot adnak. A hőgazdálkodás fogalma magában foglalja az alább felsorolt lehetőségeket, attól függően, hogy a depónia üzemeltetőjének a lerakót illetően milyen további céljai vannak:

- Hő kinyerése- és hasznosítása,
- Azonos hőmérsékletű zónák létrehozása (hőmérséklet kiegyenlítése),

- A depóniagáz képződés maximalizálása,
- A lebomlás késleltetése vagy intenzifikálása,
- Az aljzatszigetelés védelme.

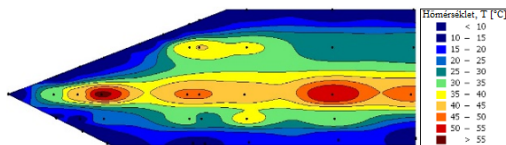
A hulladéklerakók hőgazdálkodási opcióit figyelembe véve a doktori kutatómunka célkitűzéseit az alábbiakban összegeztem:

- Első lépésként a cél egy olyan hőmérséklet- és depóniagáz monitoring rendszer kiépítése volt a gyáli regionális hulladéklerakóba, amely segítségével a depónia hosszútávú hőtani viselkedése jellemezhető.
- Tekintettel arra, hogy a hulladékok heterogenitása miatt azok fizikai- és hőtani paramétereinek az értékei jelentősen szórnak, egy adott lerakóban a deponált hulladék jellemzésére, egy arra alkalmas berendezés fejlesztése szükséges.
- Az előző ponttal összefüggésben célként tűztem ki a többfázisú diszperz rendszerek eredő hőtani tulajdonságainak mélyebb megértését, azaz, hogy a diszperz rendszert alkotó egyes fázisok fizikai-, illetve hőtani tulajdonságai hogyan befolyásolják az eredő hőtani paraméterek értékeit.
- A kutatómunka egyik legfontosabb kérdése a hőcserélő technológia kialakítása, annak eljárástechnikai- és műszaki jellemzői, tehát a mérnöki létesítmények tervezéséhez szükséges paraméterek meghatározása volt (a kinyerhető energia nagysága (E), a lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye (p_e), illetve a hőkinyerő körök hatókörnyezete (r_n)).
- Végül, egy gazdasági szempontból is elengedhetetlen kérdés: fenntartható-e az intenzív depóniagáz képződés folyamatos hőelvonás mellett is?

2. AZ ÉRTEKEZÉS TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI

A hő, a gáz és a csurgalékvíz az elsődleges melléktermékei a hulladéklerakókban lezajló bomlási folyamatoknak. A keletkező hő tulajdonképpen a hulladéklerakókban végbemenő biokémiai folyamatokból és a szerves anyagok lebomlásából származik. A keletkező hő hatására a lerakók belsejében a hőmérsékleti viszonyok megváltoznak – a hőmérséklet nő –, amely jelentős hatást fejt ki (hőterhelés) a depóniatestben lezajló bomlási folyamatokra, a depónia mechanikai-, illetve hidraulikai tulajdonságaira, valamint az aljzatszigetelő rendszer- és a környező talaj sajátságaira is.

A hulladéklerakók térbeli- és időbeli hőmérséklet-eloszlásának mérésével kapcsolatban számos publikáció található a szakirodalomban. Coccia et al. (2013) szerint a depóniatest sekély mélységeiben a mért hőmérsékletet a szezonális külső, környezeti hőmérséklet határozza meg. Yesiller et al. (2015) mérései alapján a hulladéklerakók felszínétől – az éppen aktuális magasságától – a depóniatest közepes magasságáig a hőmérséklet egyre növekvő tendenciát mutat (2.1. ábra). A maximális hőmérsékletet a depóniatest középső harmadában, a lerakó aljához, valamint az aljzatszigetelő rendszerhez viszonylag közel mérhetjük.

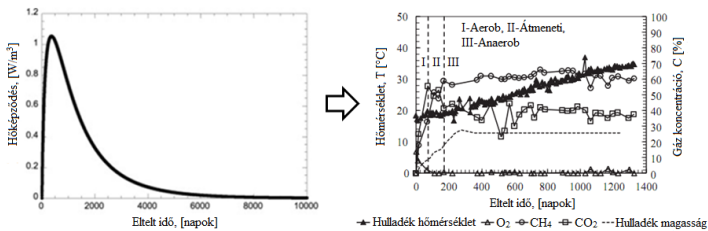


2.1. ábra: Egy tipikus hulladéklerakó hőtani profilja (Yesiller et al., 2015).

Rees (1980) megemlíti, hogy a depóniatestben mérhető maximális hőmérséklet 40 és 65 °C közé tehető a 20-60 m magas lerakókban. A Dach és Jager (1995), Rowe (1998), Gartung et al. (1999), valamint Yoshida és Rowe (2003) által készített tanulmányokban a lerakó aljzatszigeteléséhez közel eső hőmérséklet 30-50 °C között volt. A tanulmányok áttekintése alapján kijelenthető, hogy az aljzatszigetelő rendszerre hőterhelésként ható többlet hőmérsékleti tartomány 20-30 °C közötti érték, illetve, hogy a hulladék maximális hőmérsékletének a kialakulásához szükséges idő 1-től 10 évig terjed. A 10 évnél régebben lerakott hulladékok esetében a hőmérsékleti értékek csökkenése figyelhető meg. A szakirodalom kutatás alapján megállapítható, hogy a hulladéklerakókban kialakuló hőmérsékleti

értékekre számos paraméter hatással van (Hanson et al., 2006; Hanson et al., 2008), amelyek főként: a deponált hulladék összetétele (kiemelten a szerves- és szervesetlen alkotók aránya)-, valamint fizikai paraméterei (halmazsűrűség, nedvességtartalom, stb.), a külső hőmérséklet, a deponálás tömegárama, illetve a csapadék mennyisége.

Hanson et al. (2013) a különböző bomlási fázisok során a depóniatest felszínéhez közeli hulladék hőmérséklet-eloszlását vizsgálta. Vizsgálataikból arra a következtetésre jutottak, hogy a hulladék lerakását követően a hőképződés egy bizonyos csúcstértékig emelkedik az aerob lebomlási fázis során, majd azt követően csökken az anaerob fázisban (2.2. ábra).



2.2. ábra: Hő- és gázképződés egy tipikus hulladéklerakó esetében
(Hanson et al., 2013 és Coccia et al., 2013)

Young (1992) a depónián belüli hőképződést a hőmérséklet-különbségből és a hulladék fajlagos hőkapacitásából származtatta (2.1.):

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \cdot c_v \cdot M(t_i) \quad (2.1.)$$

ahol,

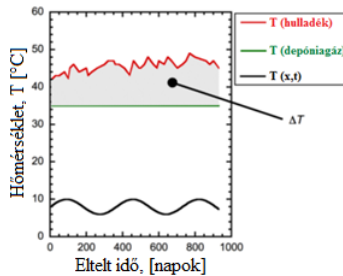
E – a hőképződés (hőképződés) [MJ/m^3],

ΔT_i – a hőmérséklet-emelkedés hatására létrejött hőmérséklet-többlet a hulladékban [K],

c_v – a hulladék hőkapacitása [$\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$],

$M(T)_i$ – a felszabaduló energia azon hányada, amely a lerakó fűtésére fordítódik [-].

A Young (1992) által alkalmazott képlet egy úgynevezett természettudományos megközelítés, amely szerint a lebomlás következtében energia keletkezik, ami az anyag felmelegedését – így a belső energia növekedését – eredményezi. Young (1992) képletét alapul véve Yesiller et al. (2015) az energiaképződésre alkalmazott képletében az 1 éven keresztül mért hőmérséklet-eloszlást vette alapul (2.3. ábra).



2.3. ábra: Az energiaképződés számításához szükséges hőmérséklet-különbség értelmezése (Yesiller et al., 2015)

A hőmérséklet-különbség meghatározásánál a lerakóban mért hőmérsékleti értékek térbeli- és időbeli átlagával számoltak. A szerzők szerint a fajlagosan kinyerhető energia a depóniagáz képződés szempontjából optimális (35 °C) hőmérsékletre történő visszahűtéssel 5,2 MJ/m³ (2.2.), míg a talajhőmérsékletre való visszahűtéssel 48 MJ/m³ (2.3.):

$$E_{\text{depóniagáz}} = \Delta T_{(\text{átlag}) \text{ depóniagáz}} \cdot c_{v(\text{átlag})} = 5,2 \text{ MJ/m}^3 \quad (2.2.)$$

$$E_{\text{talaj}} = \Delta T_{(\text{átlag}) \text{ talaj}} \cdot c_{v(\text{átlag})} = 48 \text{ MJ/m}^3 \quad (2.3.)$$

A hőképződés értékének meghatározására számos módszer létezik, ahol a számítás alapja egységnyi glükóza, egységnyi mol tartalmú gázra (oxigén vagy metán), egységnyi szervesanyag-tartalomra, vagy egységnyi tömegű-, illetve térfogatú hulladékra vonatkozhat. A szakirodalomban található értékek több mint négy nagyságrenddel is eltérnek egymástól, amelyek főként az értelmezésbeli alapvető különbségekből és a becsült paraméterek bizonytalansági fokából származtathatók. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy az eltérő hulladék gyűjtési gyakorlatok alapvetően befolyásolják a hulladék összetételét, biológiailag lebontható hányadát,

de alapvető jelentőségű a hőfejlődés szempontjából az esetleges mechanikai előkezelés megléte vagy a lerakás technológiája is.

Az energia-megmaradás törvénye jól ismert a szakirodalomban. Amennyiben egy adott térfogatú anyag termikus egyensúlyban van, akkor a termikus- és mechanikai kölcsönhatások mérlege – amelyek a belső energia megváltozását okozhatják – felírható (Nánási és Bobok, 1988). Izotróp anyagokban lezajló stacionér termikus folyamatok jellemzésére a jól ismert differenciálegyenlet alkalmazható:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + p = 0 \quad (2.4.)$$

A 2.4.-es képletben p egy nem mechanikai eredetű, térfogati hőforrást jelöl. Bizonyos szilárdanyagokban és anyagokban a radioaktív bomlás vagy lassú égés következtében hő keletkezhet és valójában ez a helyzet a hulladéklerakókkal is.

A hulladékok hőtani paramétereiről viszonylag kevés információ található a szakirodalomban, az ott közölt értékek jelentősen szórnak a hulladékok heterogenitása-, valamint eltérő összetétele miatt. A szakirodalom kutatás alapján a 2.1. táblázat foglalja össze a hulladékok hőtani paramétereinek jellemző tartományait.

Hőtani paraméter	Jellemző tartomány
Hővezetési tényező, λ [W/mK]	0,1-1,5
Fajlagos hőkapacitás, c_m [J/kgK]	719-3000

2.1. táblázat: A hulladékok hőtani paramétereinek jellemző tartományai a szakirodalmi adatok alapján (Megalla, 2015)

A hulladéklerakókból történő hőkinyerés elméleti technológiai lehetőségeivel kapcsolatban a Coccia et al. (2013) által írt publikáció ad útmutatást. A cikkből kiderül, hogy a hőkinyerés valamilyen hőcserélő rendszer segítségével lehetséges, amely beépíthető művelés alatt álló-, illetve rekultivált depóniába is. A cikk szerint a hőkinyerő körök függőleges és vízszintes elrendezés formájában is kialakíthatók.

A 2. fejezetben összefoglalt szakirodalmi feldolgozásra alapozva az alábbi következtetéseket vontam le:

1. A hulladéklerakókban a lebomlási folyamatok hatására kialakuló hőmérsékletek tekintetében számos szakirodalmi példa található, azonban a hosszútávú (több éves) hőmérsékleti adatok mélység szerinti, valamilyen függvény segítségével történő jellemzésével a szakirodalom nem foglalkozik.
2. A hulladékok hőtani paramétereinek az értékei jelentősen szórnak, ezért egy adott lerakóban a deponált hulladék hőtani paramétereinek meghatározásához egy arra alkalmas berendezés segítségével elvégzett szisztematikus kísérletek szükségesek.
3. A hőképződés és a kinyerhető hőenergia tekintetében megállapítható, hogy az alkalmazott képletek természettudományos megközelítésűek, a hőképződés nagyságát a depóniában a visszahűthető hőmérséklet-különbségből és a hulladék fajlagos hőkapacitásából származtatják. Megállapítottam továbbá azt, hogy bár az izotróp anyagok vezetéssel hőtadását leíró differenciálegyenlet (2.4.) igen régóta ismert a szakirodalomban, mégsem alkalmazták még települési szilárdhulladékok termikus viselkedésének a jellemzésére.
4. A depóniákból történő hőkinyerés- és hasznosítás témakörében csak elméleti útmutatás található, annak üzemi magvalósításáról nincsenek információk.

3. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK, KÍSÉRLETI ESZKÖZÖK, ALKALMAZOTT KUTATÁSI- ÉS ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

1. A témavezetőmmel közösen egy új, a hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére alkalmas berendezést és kiértékelési protokollt fejlesztettünk, amellyel szisztematikus vizsgálatokat végeztem a gyáli regionális hulladéklerakóban. A deponált hulladék fizikai- és hőtani paramétereit vizsgáltam a nedvességtartalom, a mélység, a halmazsűrűség, valamint a hulladék jellemző korának a függvényében.
2. A „Depóniahő-hasznosítási technológia kidolgozása” című projekt szakmai partnerei az irányításunkkal 100 mérőhelyes hőmérséklet-monitoring rendszert építettek a gyáli regionális hulladéklerakóba, amellyel a depóniában kialakuló hőmérséklet-eloszlás hosszútávon vizsgálható. A hőmérsékleti trendeket függvényillesztés segítségével elemeztem.
3. Elkészítettük a hulladékok hőtani paramétereinek a meghatározására fejlesztett berendezés laboratóriumi méretű verzióját, amely segítségével kétfázisú diszperz rendszerek eredő hőtani paramétereinek a szisztematikus vizsgálatát végeztem el.
4. A projekt szakmai partnerei félüzemi hőkinyerő- és hőhasznosító rendszert építettek a gyáli regionális hulladéklerakóba. A rendszerrel tíz különféle konfigurációjú- és hőkinyerési stratégiájú kísérletet végeztünk el. Ezek közül a függőleges hőkinyerő kutakkal elvégzett kísérletek eredményeit értékeltem ki, illetve a hővezetés differenciálegyenlete (2.4.) alapján, numerikus számítási algoritmust fejlesztettem a hóforrás-, valamint a kutak hatókörnyezetének meghatározására.

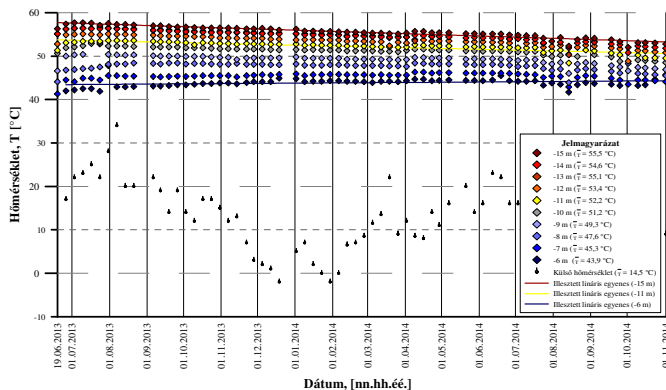
4. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, TÉZISEK

1. Megállapítottam, hogy a gyáli regionális hulladéklerakóba telepített hőmérséklet-monitoring rendszer által mért hosszútávú adatok alapján, az egyes ütemekben deponált hulladék vizsgált rétegeiben, a kialakuló hőmérsékletek tendenciája függvények segítségével jól leírható a hulladék jellemző korának, illetve a lebomlás fázisának függvényében.

A hőmérséklet tendencia jellemzéséhez az alkalmazott függvényeket az egyes depónia ütemek -6, -11, és -15 m mély rétegeiben mért adataira illeszttem, amelyek a depóniatest tetejének-, közepének-, illetve aljának feleltethetők meg.

a. A mért adatok alapján az idősebb korú (8-10 év) hulladékot tartalmazó depónia ütem (anaerob lebomlási fázis) hőmérséklet-eloszlását tekintve állandósult állapot figyelhető meg az egyes rétegekben, amelyek lineáris egyenesekkel (4.1. ábra) jellemezhetők. Az illesztett lineáris egyenesek (a hőmérséklet (Y) az idő (x) függvényében) általános alakban a következőképpen írható fel (4.1.):

$$Y = A \cdot x + B \quad (4.1.)$$



4.1. ábra: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút mért értékei az egyes vizsgálati rétegekben kialakult átlaghőmérsékletekkel, illetve az illesztett lineáris egyenesekkel.

Az illesztett lineáris egyenesek paramétereit a 4.1. táblázat foglalja össze.

Illesztés helye [m]	A [-]	B [°C]	R ²
-6	0,0017	43,4375	0,7946
-11	-0,0061	53,7300	0,6813
-15	-0,0088	57,7052	0,8966

4.1. táblázat: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút mért adataira illesztett lineáris egyenesek paramétereit

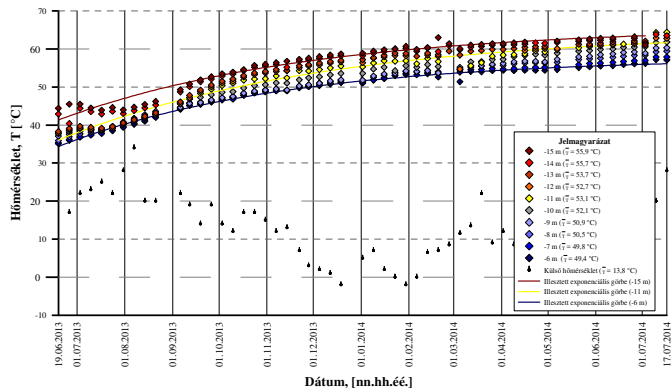
- b. A mért adatok alapján a fiatalabb korú (0-6 év) hulladékot tartalmazó depónia ütem (aerob- és anaerob lebomlási fázis, mélység függő) hőmérséklet-eloszlását tekintve felmelegedési tendencia figyelhető meg az egyes rétegekben, amelyek exponenciális görbékkel jellemezhetők (4.2. ábra). Az illesztett exponenciális görbék általános alakban a következőképpen írhatók fel (4.2.):

$$Y = T \cdot (1 - A \cdot e^{-Bx}) \quad (4.2.)$$

ahol,

T – maximális hőmérsékleti érték a megfigyelt időszakban [°C],

A, B – a görbére jellemző konstansok [-].



4.2. ábra: A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút mért értékei az egyes vizsgálati rétegekben kialakult átlaghőmérsékletekkel, illetve az illesztett exponenciális görbékkel.

A IV/3-as monitoring kút hőmérsékleti értékeire illesztett exponenciális görbék paraméterei a 4.2. táblázatban láthatók.

Illesztés helye [m]	T [°C]	A [-]	B [-]	R ²
-6	57,7507	0,4050	0,0067	0,9920
-11	64,5383	0,4415	0,0058	0,9761
-15	65,8311	0,3721	0,0061	0,9559

4.2. táblázat: A IV/3-as hőmérséklet monitoring kút mért adataira illesztett exponenciális görbék paraméterei

- c. A kellően hosszútávú monitoring értékekre illesztett görbék alapján becsülhető a lebomlás hatására történő felmelegedéshez kapcsolódó maximális hőmérséklet, illetve a későbbi, adott hőmérsékletre történő lehüléshez szükséges időtartam is.

2. A mérési eredmények bizonyították, hogy a hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett új berendezés alkalmas a heterogén háromfázisú diszperz rendszerek eredő hővezetési tényezőjének (λ) a mérésére, a kidolgozott módszer szerint.

A berendezés vízszintes felületéhez képest a hőáramsűrűség-mérő szenzorok felülete elhanyagolható, így párhuzamos hőáram vektorok alakulnak ki a mért keresztmetszetben. A „kvázi” egyensúlyi állapotot elérve (a napi hőmérséklet ingás miatt nem lehet teljes egyensúlyi állapotot megvalósítani) a mért keresztmetszeten átáramló hő és az létrehozó hőmérsékletkülönbség – amikor a bemenő-, illetve a kimenő hőáramsűrűség megegyezik – meghatározható (4.3. ábra). A hő által megtett út ismert, mivel az a hőáramsűrűség-mérő szenzorok közötti távolság. A hővezetési tényező az alábbi egyenlet segítségével a mért adatokból egyszerűen számítható (4.3.):

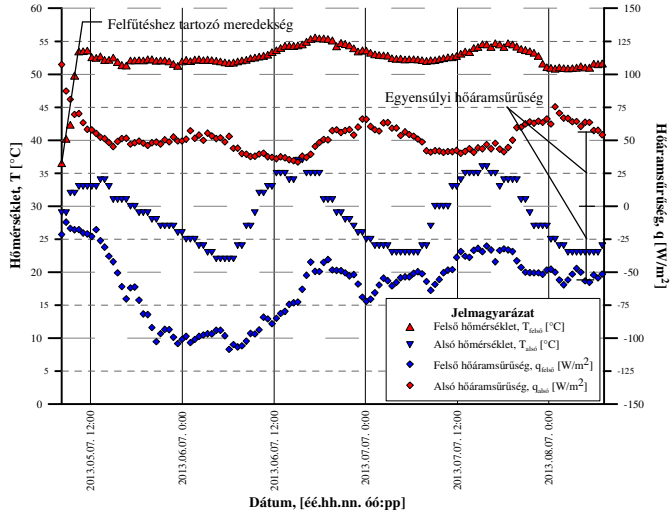
$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{\Delta T} \quad (4.3.)$$

ahol,

Q – az egyensúlyi hőáramsűrűség [W/m²],

ΔT – a hőmérséklet-különbség [°C],

L – a hő által megtett út, azaz a beépített minta magassága [m].



4.3. ábra: Az m0705 azonosító számú mintán a fűtés hatására kialakuló egyensúlyi hőáramsűrűség, illetve a hőmérsékletmérő szenzorok által mért értékek

3. A mérési eredmények bizonyították, hogy a hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett új berendezés alkalmas a heterogén háromfázisú diszperz rendszerek eredő fajlagos hőkapacitásának (c_m) a becslésére, a kidolgozott módszer szerint.

A fejlesztett kísérleti berendezés nem alkalmazható közvetlenül a fajlagos hőkapacitás mérésére, mert a betáplált hőnek csak egy része áramlik a hulladék mintába, a hő nem mérhető része magát a berendezést, illetve a környezetet melegíti. A mérések alapján azonban meghatároztam, hogy a rendszerbe betáplált hőnek mindig kb. az 1/2,95-öd része (33,8 %-a) fordítódott a beépített minta melegítésére, amely érték a berendezésre jellemző gépállandó. A berendezésre vonatkozó gépállandó ismeretében – a kidolgozott módszer szerint – a fajlagos hőkapacitás a következőképpen számítható (4.4.):

$$c_m = \frac{P \cdot I}{m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}} \quad (4.4.)$$

ahol,

P – a fűtőtéljesítmény [W],

I – a gépállandó [-],

m – a beépített minta tömege [kg],

$\Delta T/\Delta t$ – a felfűtési szakaszra vonatkozó meredekség (4.3. ábra)
[°C/s].

- 4. Bizonyítottam, hogy a kétfázisú diszperz rendszerek eredő hővezetési tényezőjének a meghatározására felírható egy univerzális egyenlet (4.5.) az úgynevezett D-diszperzitás állapot paraméter segítségével. Az egyenlet $D=1$ esetén a soros-, míg $D=0$ esetén a párhuzamos hővezetési modellhez tartozó eredő hővezetési tényező képletét adja vissza. A felírt univerzális egyenlet, valamint a diszperz anyagok hőtani tulajdonságaira fejlesztett berendezéssel elvégzett mérések alapján megállapítottam, hogy a vizsgált kétfázisú geopolimer-EPS kompozit szigetelő anyagok diszperzitás állapota **0,8**; amely a soros hővezetési modellhez, azaz az elméleti minimum értékéhez esik közelebb.**

Kétfázisú diszperz rendszerekben adott hőmérséklet-különbség hatására a hőnek a különböző fázisokon kell keresztül haladnia. Az nyilvánvaló, hogy az anyag diszpergáltsági állapota – amelyet főként a szemcseméret-, a szemcsealak-, és a szemcse-sűrűség-eloszlás, illetve alapvetően a koncentráció jellemez – erősen befolyásolja az eredő hővezetési tényező értékét. Mindezek eredő hatása egy D-diszperzitás állapot paraméterrel jellemezhető és az eredő hővezetési tényező a 4.5. egyenlettel számítható (s és g jelöli a két komponens paramétereit) (4.4. ábra).

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_s \cdot \left\{ \frac{K}{[K \cdot \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)] \cdot [\varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K]} \right\}^D \cdot [\varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot K] \quad (4.5.)$$

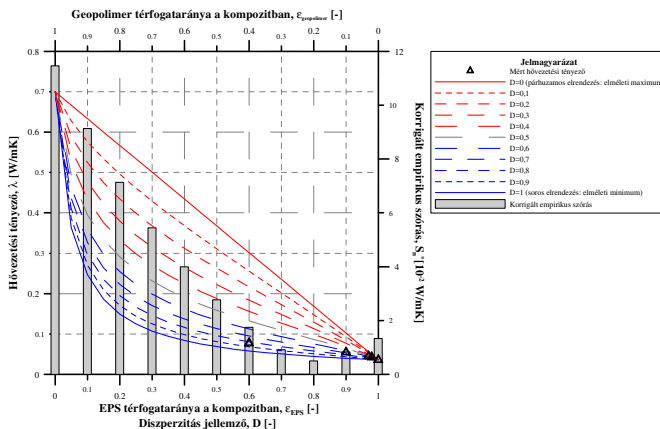
ahol,

K – az arányossági tényező, amely megmutatja, hogy λ_s értéke hány szorosa, illetve hányad része λ_g értékének,

D – a diszperzitás jellemző ($D=1$ esetén a soros-, $D=0$ esetén a párhuzamos hővezetési modellhez tartozó eredő hővezetési tényező képletét kapjuk vissza),

λ_s – az s fázis hővezetési tényezője [W/mK],

ε_s – az s fázis térfogathányada [-].



4.4. ábra: A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a laboratóriumi minták esetében

5. Az izotróp anyagok vezetéses hőátadását leíró differenciálegyenlet (2.4.) alkalmazható a kommunális hulladéklerakóba épített függőleges elrendezésű (hengersizmetrikus) hőkútra. A numerikus megoldás érdekében elhanyagoltam a függőleges tengely menti hőmérséklet-változást, feltételeztem, hogy az x-y sík tetszőleges pontjában a z függőleges tengely mentén állandó a hőmérséklet. Bevezettem továbbá az r_n („native”) paramétert, ami annak a hengernek a sugarát jelöli, amely sugártól kezdve már nem történik hőelvonás. A p-hőforrás paramétert elneveztem a „lebomlás fajlagos hőteljesítményének”, ami arra utal, hogy a lebomlás munkavégző potenciálja ekkora és ennek következtében

melegszik fel az anyag. Ez a szemlélet teljesen eltér a szakirodalomban alkalmazott hőkapacitás alapú szemlélettől. Új iterációs eljárást dolgoztam ki a differenciálegyenlet numerikus megoldására, ami alapján meghatároztam a 2014/I. jelű mérés adataira a lebomlás fajlagos hőteljesítményét ($p=0,53 \text{ W/m}^3$) és a hőkút hatókörnyezetét ($r_n=6 \text{ m}$) a vizsgált kb. 4 éves hulladékra vonatkozóan.

A vizsgált rendszer hengersizmetrikus, ezért célszerű egy adott r_x sugarú és h magasságú csőhéj palástján keresztül áramló hő nagyságát felírni, a hőfejlődés teljesítményének az ismeretében (4.5. ábra):

$$q_x = p \cdot (r_n^2 - r_x^2) \cdot \pi \cdot h \quad (4.6.)$$

ahol,

q_x – az adott sugárhoz tartozó hengerpalást felületén

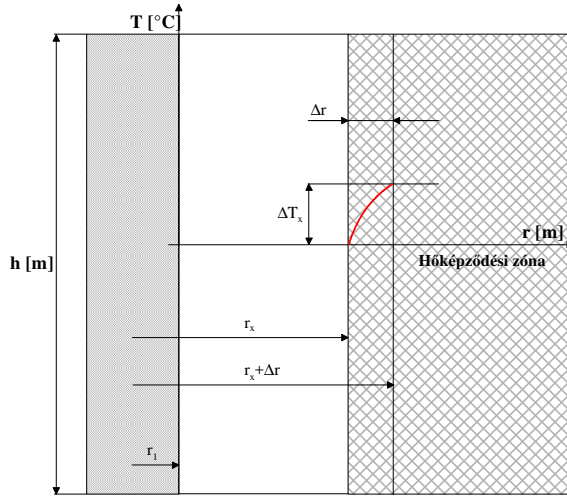
átáramló hőáram [W],

p – a lebomlás fajlagos hőteljesítménye [W/m^3],

r_n – origótól számított távolság, ahol a hőmérséklet megegyezik az eredeti, hőkinyerés nélküli hőmérséklettel [m],

r_x – az origótól számított távolság, adott hengerpalásthöz tartozó sugár [m],

h – a hengerpalást magassága (függőleges kutak magassága) [m].



4.5. ábra: A továbbfejlesztett „csőhéj-modell”

A továbbfejlesztett csőhéj-modell szerint az r_x - $r_{x+\Delta x}$ csőhéjban a sugár mentén a hőmérséklet-változás a 4.7. egyenlettel számítható.

$$q_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x}\right)} \cdot \Delta T_x \cdot h, \text{ amelyből } \Delta T_x = \frac{q_x \cdot \ln\left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h} \quad (4.7.)$$

A 4.7. egyenlet alapján egy iterációs algoritmust írtam, amely az r_1 - r_n távolságot 10 egyenlő részre osztja. A 2014/I. jelű félüzemi kísérlet adataira elvégeztem az iterációt. Az iteráció során p és r_n értékeit mindaddig változtattam, míg a számított kinyert hőáram, illetve a mag (T_1) és az úgynevezett „native” eredeti lerakó (T_n) hőmérsékletek az iterációs pontosságon belül megegyeztek a mért értékekkel. A kapott eredményt a 4.3. táblázat szemlélteti.

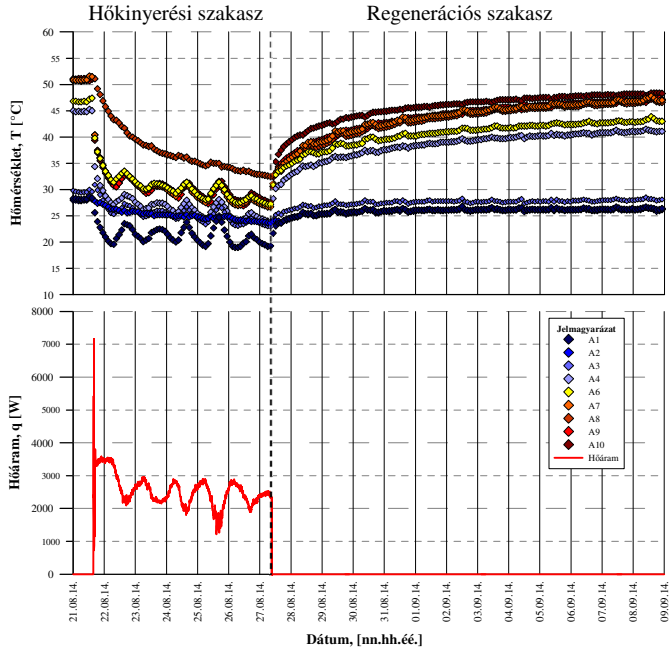
p [W/m ³]	r_n [m]	q_c [W]	r_{x0} [m]	r_{x1} [m]	r_{x2} [m]	r_{x3} [m]	r_{x4} [m]	r_{x5} [m]	r_{x6} [m]	r_{x7} [m]	r_{x8} [m]	r_{x9} [m]	r_n [m]
0,53	6	962	0,4	0,96	1,52	2,08	2,64	3,2	3,76	4,32	4,88	5,44	6
			T_{x0} [°C]	T_{x1} [°C]	T_{x2} [°C]	T_{x3} [°C]	T_{x4} [°C]	T_{x5} [°C]	T_{x6} [°C]	T_{x7} [°C]	T_{x8} [°C]	T_{x9} [°C]	T_{xn} [°C]
			34	40,2	43,3	45,4	46,9	48	48,8	49,4	49,8	50	50

4.3. táblázat: Az iteratív számítási eljárás eredménye

Az iteratív számítási eljárás a $p=0,53$ W/m³ és az $r_n=6$ m értékekhez konvergált, amely tulajdonképpen azt jelenti, hogy a hőkút egy 12 m átmérőjű és 16 m magasságú henger alakú hulladéktestből vonta el a hőt, köbméterenként 0,53 W teljesítménnyel.

6. A 2014/I. jelű félüzemi kísérlet adatai alapján megállapítottam, hogy az intenzív hőelvonás kikapcsolása után a hőkút környezetében a hőmérséklet – adott idő után – újra visszaállt az eredeti értékére. Ezért bevezettem az un. „lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye” (p_e) paramétert, amelynek értéke a vizsgált hőkútra, a vizsgált időben 0,18 W/m³. Természetesen a hőfejlődés teljesítménye 20-30 éves időtávban változó, pl. a 2.2. ábra szerinti, azonban rövidebb időszakokban ez kvázi állandónak tekinthető és p_e a kinyerhető hő számítására alkalmas paraméter.

A 4.6. ábrán látható a 2014/I. jelű kísérlet során az „A” jelű kútban a hőmérséklet változása. Az effektív hőteljesítmény fogalmának a bevezetését az indokolja, hogy a regenerációs szakaszban nem volt hőkinyerés. Ebből az is következik, hogy számos stratégia mentén lehet a hőelvételel elvégezni. Amennyiben az elvont hő pontosan megegyezik a frissen keletkezővel, akkor a hőelvonás folyamatos is lehet.



4.6. ábra: A 2014/I. jelű hőkinyerési kísérlet során az „A” jelű kútban mért hőmérséklet-, valamint a kinyert hőáram értékek az idő függvényében

7. A 6. tézisben megfogalmazottak alapján belátható, hogy a 2.1. egyenlettel leírt modell (hőkapacitás modell), amely szerint a kinyerhető hő nagyságát a felmelegedett hulladék visszahűtésének hőmérséklet-különbsége és a hulladék fajlagos hőkapacitás alapján számítják nem ad jó becslést, mivel egy egyszeri hőelvonás után a folytatódó bomlás miatt a hulladék újra felmelegszik. A teljes lebomlás jellemzően igen hosszú idő után következik csak be. Ehelyett úgy kell gondolkodni, hogy a hőfejlődés teljesítménye hosszú ideig „kvázi” állandó, és a hulladék addig az egyensúlyi állapotig melegszik, amíg a lerakó és a környezete közötti hőmérséklet-különbség által meghatározott hőáram a környezet felé éppen a frissen keletkező hővel lesz egyenlő. Ebből az is következik, hogy lehetséges „kvázi” folyamatosan annyi hőt elvonni, hogy a hulladék csak a depóniagáz keletkezésének optimális hőmérsékletéig hűl vissza.

A folyamatos hófejlődést, illetve a hó környezetbe történő távozását, ezáltal a 7. tézisben megfogalmazottakat igazolja a Mahmood et al. (2016) által elvégzett mérések eredményei is. A szerzők egy pakisztáni depónia- és környezetének felületi hőmérsékletét vizsgálták műholdas képelemzési módszer segítségével. A hulladék lerakása előtti és utáni hosszútávú adatok alapján megállapították, hogy a lerakótól 700 m-re is kimutatható a depónia által a környezetben okozott hőmérséklet-emelkedés.

SZAKIRODALMI JEGYZÉK

- Coccia, C.J.R., Gupta, R., Morris, J. és McCartney, J.S. (2013): **Municipal solid waste landfills as geothermal heat sources.** *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 19*, pp. 463-474.
- Dach, J. és Jager, J. (1995): **Prediction of gas and temperature with the disposal of pretreated residential waste.** *Proceedings of the 5th International Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al., Eds., Vol I., CISA, Italy, pp. 665-677.
- Gartung, E., Mullner, B. és Defregger, F. (1999): **Performance of compacted clay liners at the base of municipal landfills: The Bavarian experience.** *Proc., 7th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al. eds., Vol. III, CISA, Italy, pp. 31-38.
- Hanson, J.L., Liu, W.-L. és Yesiller, N. (2008): **Analytical and Numerical Methodology for Modeling Temperatures in Landfills.** *Selected Sessions of GeoCongress 08: Geotechnics of Waste Management and Remediation*, New Orleans, Louisiana, pp. 1-8.
- Hanson, J.L., Yesiller, N., Howard, K.A., Liu, W.-L., és Cooper, S.P. (2006): **Effects of Placement Conditions on Decomposition of Municipal Solid Wastes in Cold Regions.** *Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering.*
- Hanson, J.L., Yesiller, N., Onnen, M.T., Liu, W.-L., Oettle, N.K. és Marinos, J.A. (2013): **Development of numerical model for predicting heat generation and temperatures in MSW landfills.** *Waste Management, 33 (10)*, pp. 1993-2000.
- KSH (2012): 6.5.3. **A közszolgáltatás keretében elszállított települési hulladék keletkezése (2006–).** Web: http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ur009.html
- Mahmood, K., Adila Batool, S. és Nawaz Chaudhry, M. (2016): **Studying bio-thermal effects at and around MSW dumps using Satellite Remote Sensing and GIS.** *Waste Management, 55*, pp. 118-128.
- Megalla, D. (2015): **Heat Transfer Model for an Engineered Landfill in Sainte-Sophie, Quebec, Canada.** *Master Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University*, p. 109

- Nánási, T. és Bobok, E. (1988): **Műszaki hőtan. Kézirat.** Tankönyvkiadó, Budapest. p. 156.
- Rees, J.F. (1980): **Optimisation of methane production and refuse decomposition in landfills by temperature control.** *J. Chem. Technol. Biotechnol., Society of Chemical Industry, 30(8)*, pp. 458-465.
- Rowe, R.K. (1998): **Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste.** *Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics*, Rowe, R.K., ed., Vol. I., IFAI, Atlanta, pp. 27-102.
- Szamek, Zs. (2012): **Hulladéklerakókból kinyerhető hő hasznosítása.** Szabadalom. Lajstromszám: P1300001, Benyújtás éve: 2012., Közzététel éve: 2014.
- Yesiller, N., Hanson, J.L., Kopp, K.B. és Yee, E.H. (2015): **Assessing approaches for extraction of heat from msw landfill.** In: Cossu, R., He, P., Kjeldsen, P., Matsufuji, Y., Reinhart, D. és Stegmann, R. (szerk.), *15th International Waste Management and Landfill Symposium: G13. Workshop: Heat utilization from landfills.* S. Margherita di Pula: CISA Publisher.
- Young, A. (1992): **Application of computer modelling to landfill processes.** *DoE Rep. No. CWM 039A/92*, Dept. of Environment, London.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

Idegen nyelvű könyvfejezet:

1. J., Faitli, T., Magyar, R., Romenda, A., Erdélyi és Cs., Boldizsár (2017): **Laying the Foundation for Engineering Heat Management of Waste Landfills** (Chapter 9). In: C., Norma (szerk.), *Landfills: Environmental Impacts, Assessment and Management*, Nova Science Publisher, New York, USA, pp. 1-39. (ISBN: 978-1-53612-556-6), Megjelenés alatt.

Idegen nyelvű folyóirat cikkek:

2. T., Magyar és J., Faitli (2016): **Temperature distribution measurements in the Gyál MSW landfill**. *Inżynieria Mineralna - Journal of the Polish Mineral Engineering Society* 38: (2), Paper: IM 2-2016-a22., 8 p.
3. J., Faitli, T., Magyar, A., Erdélyi és A., Murányi (2015): **Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills**. *Waste Management* 36:(1), pp. 213-221.

Magyar nyelvű folyóirat cikkek:

4. Magyar T., Faitli J. és Szabó R. (2017): **Geopolimer-EPS kompozit szigetelő anyagok eredő hővezetési tényezőjének elméleti- és kísérleti vizsgálata**. *Építőanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials*. Megjelenés alatt.
5. Magyar T., Erdélyi A., Murányi A., Kontra J., Romenda R. és Faitli J. (2016): **A települési szilárd hulladéklerakókban keletkező bomlási hő kinyerésének vizsgálata, a bioreaktorként üzemeltetett lerakó koncepciója**. *Biohulladék* 10:(1), pp. 17-24.

Megadott használati mintaoltalmak:

6. Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Jambrich R., Murányi A., Kontra J. és Várfalvi J. (2017): **Kapcsolási elrendezés depónia hő és depónia gáz hasznosítására.**
NSZO: B09B 1/00; B09B 3/00
Lajstromszám: 0004690
Ügyszám: U 15 00222
Benyújtás éve: 2015.
Benyújtás száma: U 15 00222.
Közzététel éve: 2017
Benyújtás helye: Magyarország

7. Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Jambrich R., Murányi A., Kontra J. és Várfalvi J. (2016): **Kapcsolási elrendezés vízszintes hőcserélőkkel rendelkező kommunális hulladéklerakók bomlási hőjének kinyerésére és hasznosítására.**
NSZO: B09B 1/00; B09B 3/00
Lajstromszám: 0004591
Ügyszám: U 15 00168
Benyújtás éve: 2015.
Benyújtás száma: U 15 00168.
Közzététel éve: 2016
Benyújtás helye: Magyarország

8. Faitli J., Erdélyi A., Magyar T., Jambrich R., Murányi A., Kontra J. és Várfalvi J. (2016): **Kapcsolási elrendezés függőleges elrendezésű kúttal rendelkező kommunális hulladéklerakók bomlási hőjének kinyerésére és hasznosítására.**
NSZO: B09B 1/00; B09B 3/00
Lajstromszám: 0004592
Ügyszám: U 15 00169
Benyújtás éve: 2015.
Benyújtás száma: U 15 00169.
Közzététel éve: 2016
Benyújtás helye: Magyarország

Idegen nyelvű konferencia kiadványok:

9. J., Faitli, T., Magyar, A., Erdélyi, R., Romenda (2017): **Experimental and Theoretical Determination of the Heat Power of Biochemical Decomposition in MSW Landfills**. In: J.P.A., Hettiaratchi, G., Mancini és D. Hidalgo (szerk.), *5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*. Konferencia helye, ideje: Athén, Görögország, 2017.06.21-2017.06.24. Athén: National Technical University of Athens, pp. 1-16.
10. J., Faitli, A., Erdélyi, J., Kontra, T., Magyar, J., Várfalvi és A., Murányi (2015): **Pilot Scale Decomposition Heat Extraction and Utilization System Built into the „Gyál Municipal Solid Waste Landfill”**. In: R., Cossu, P., He, P., Kjeldsen, Y., Matsufuji, D., Reinhart és R., Stegmann (szerk.), *15th International Waste Management and Landfill Symposium: G13. Workshop: Heat utilization from landfills*. Konferencia helye, ideje: S. Margherita di Pula, Olaszország, 2015.10.05-2015.10.09. S. Margherita di Pula: CISA Publisher, Paper 262. 12 p. (ISBN: 8862650213)
11. T., Magyar és J., Faitli (2015): **Temperature distribution measurements in the Gyál MSW landfill**. In: Z., Wzorek, K., Gorazda, A.K., Nowak, D., Malina, T., Sikora, J., Najman és A., Nowak (szerk.), *XIX. Waste Recycling Conference*. Konferencia helye, ideje: Krakkó, Lengyelország, Krakkó, 2015.10.22-2015.10.23., Paper O_09.
12. J., Faitli és T., Magyar (2014): **Optimizing the Operation of Municipal Solid Waste Landfills**. In: I., Gombkötő (szerk.), *18th International Conference on Waste Recycling*, Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2014.10.09-2014.10.10.2014., pp. 1-9., (ISBN: 978-615-5216-61-9)
13. J., Faitli, T., Magyar, A., Murányi és B., Kardos (2013): **Measuring the Thermal Properties of Communal Waste Landfills**. In: J., Jencárová, M., Václavíková, L., Ivanicová és K., Stefusová (szerk.), *Proceedings of 17th International Scientific Conference on Waste Recycling*, Konferencia helye, ideje: Kassa, Szlovákia, 2013.11.21-2013.11.22., 58 p., (ISBN: 978-80-970034-6-3)

Magyar nyelvű konferencia kiadványok:

14. Fajtli J., Magyar T. és Szabó R. (2016): **Geopolimer-EPS kompozit anyagok hővezetési tényezőjének mérése.** In: Kékesi, T. (szerk.), *The Publications of the MultiScience - XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference.* Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2016.04.21-2016.04.22. Miskolc: University of Miskolc, Paper A_11. (ISBN: 978-963-358-113-1).
15. Murányi A., Erdélyi A., Kontra J., Várfalvi J., Magyar T. és Fajtli J. (2015): **Települési szilárd hulladéklerakó működésének jellemzése környezeti szempontból.** In: Darvas, B., Bakonyi, G., Biró, B., Major, J., Mörtl, M., és Vehovszky, Á. (szerk.), *V. Ökotoxikológiai Konferencia: előadás és poszter kötete.* 46 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2015.11.20. Budapest: Magyar Ökotoxikológiai Társaság, pp. 25-26.
16. Magyar T., Fajtli J., Romenda R. és Erdélyi A. (2014): **A bomlási folyamatok következtében kialakuló hőmérséklet-eloszlás és hőkinyerési potenciál vizsgálata a gyáli kommunális hulladéklerakóban.** In: (szerk.: Tihanyi, L.), *The Publications of the MultiScience XXVIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference,* Konferencia helye, ideje: , 2014.04.10-2014.04.11., University of Miskolc, Paper A30. 8 p., (ISBN: 978-963-358-051-6).

Szöbeli előadások:

17. Magyar T. és Fajtli J. (2016): **Hőbányászat települési szilárd hulladéklerakókból.** *X. Fazola napok - „Hulladék, mint nyersanyag” szakmai-tudományos konferencia,* Miskolc, MAB székház (2016.09.16.)
18. Magyar T. és Fajtli J. (2015): **A települési szilárd hulladéklerakókban keletkező bomlási hő kinyerésének- és hasznosításának vizsgálata.** *„Introduction of Selective Waste Collection and Recycling in the Area of Beregovo (HUSKROUA/1001/011)” című projekt zárókonferencia,* Ukrajna, Makkosjánosi (2015.12.17.)