



TELEPÜLÉSI SZILÁRDHULLADÉK LERAKÓK HŐGAZDÁLKODÁSÁNAK MEGALAPOZÁSA

Doktori (Ph.D.) értekezés

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*

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS, A KUTATÓMUNKA CÉLJA	11
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	13
2.1. A hulladékgazdálkodás helyzetének rövid áttekintése a hulladék kezelésének szempontjából.....	13
2.2. A hulladéklebomlás folyamata	14
2.2.1. Az <i>aerob</i> lebomlási fázis.....	15
2.2.2. Az <i>anaerob</i> lebomlási fázis	15
2.3. A hulladéklerakók hőtani tulajdonságai.....	16
2.3.1. A hőmérséklet hatása a depóniagáz képződésre	16
2.3.2. Hőképződés és hőmérséklet-eloszlás a hulladéklerakókban.....	17
2.4. A hulladéklerakókból történő hőkinyerés technológiai lehetőségei	24
2.4.1. A hőszivattyús rendszerek felépítése	24
2.4.2. A hőkinyerési potenciál (HC) bevezetése	25
2.4.3. A hőkinyerési potenciál a depónia- és a hulladék paramétereinek függvényében.....	26
2.4.4. A hőkinyerő csővezeték rendszer beépítésének optimális helye.....	29
2.4.5. A hőkinyerő csővezeték rendszer kialakításának lehetséges megoldásai	29
2.5. A hulladékok hőtani tulajdonságai	31
2.5.1. A hővezetési tényező (λ)	32
2.5.2. A fajlagos hőkapacitás (c).....	32
2.5.3. A hődiffúzitás (κ)	33
2.5.4. A hulladékok hőtani paramétereinek szakirodalmi összegzése.....	33
2.6. Hővezetés többfázisú diszperz rendszerekben	34
2.7. A hulladék aerob in-situ stabilizációja, az utógondozási idő csökkentése.....	37
2.8. A szakirodalom kutatás alapján levont következtetések.....	41
3. VIZSGÁLATI- ÉS ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK	42
4. AZ IN-SITU KÍSÉRLETEK HELYSZÍNE.....	43
5. ALKALMAZOTT KÍSÉRLETI ESZKÖZÖK	44
5.1. A hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer.....	44
5.2. A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés	46
5.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés	49

5.4. A gyáli regionális hulladéklerakóba épített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia.....	50
5.4.1. A függőleges hőkinyerő kör.....	51
5.4.2. A vízszintes hőkinyerő kör.....	52
5.4.3. A csurgalékvízgyűjtő medence	54
5.4.4. Az üvegház.....	54
5.4.5. A hőközpont konténer.....	54
5.4.6. A számítógépes mérésadatgyűjtő rendszer.....	55
5.4.7. A megépített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia beüzemelése	55
6. ELVÉGZETT KÍSÉRLETEK.....	56
6.1. A hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer.....	56
6.2. A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés	56
6.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés	57
6.4. A gyáli regionális hulladéklerakóba épített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia.....	57
7. MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	59
7.1. A hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer.....	59
7.1.1. Idősebb korú (8-10 év) hulladékot tartalmazó depónia ütem hőmérséklet-eloszlása.....	59
7.1.2. Fiatalabb korú (0-6 év) hulladékot tartalmazó depónia ütem hőmérséklet-eloszlása.....	61
7.2. A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés	63
7.2.1. A hulladék fizikai paramétereinek meghatározása	63
7.2.2. A hulladék hőtani paramétereinek meghatározása.....	64
7.2.3. A hulladék fizikai- és hőtani vizsgálatainak eredményei	67
7.2.4. Soros- és párhuzamos hővezetési modell háromfázisú diszperz rendszerekre.	70
7.2.5. A hulladék egyes fázisaira jellemző sűrűség-, hővezetési tényező- és fajlagos hőkapacitás értékeinek becslése.....	72
7.2.6. A hulladék elméleti- és mért hőtani paramétereinek összehasonlítása.....	75
7.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés	79
7.3.1. Kalibrációs mérések.....	79
7.3.2. Soros- és párhuzamos hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre	82
7.3.3. A hővezetés univerzális egyenlete kétfázisú diszperz rendszerekre.....	85

7.3.4. Geopolimer-EPS kompozit szigetelő anyagok eredő hővezetési tényezőjének elméleti- és kísérleti vizsgálata	87
7.4. A gyáli regionális hulladéklerakóba épített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia	93
7.5. A hulladéklerakók hőtani modellje	99
ÖSSZEFOGLALÁS	102
SUMMARY	104
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	106
AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN ELKÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE	107
SZAKIRODALMI JEGYZÉK	115

Ábrajegyzék

2.1. ábra: A hulladék kezelési lehetőségeinek aránya (Hoornweg és Bhada-Tata, 2012 alapján)	13
2.2. ábra: A depóniagáz- és a csurgalékvíz összetevőinek alakulása az egyes lebomlási szakaszokban (Stegman és Spendlin, 1985 alapján).....	14
2.3. ábra: Egy tipikus hulladéklerakó hőtani profilja (Yesiller et al., 2016)	17
2.4. ábra: Hő- és gázképződés egy tipikus hulladéklerakó esetében (Coccia et al., 2013 és Hanson et al., 2013).....	18
2.5. ábra: Az energiaképződés számításához szükséges hőmérséklet-különbség értelmezése (Yesiller et al., 2015).....	20
2.6. ábra: A hőszivattyús rendszer felépítése (Coccia et al., 2013).....	25
2.7. ábra: A hőkinyerési potenciál (HC) értékének változása az idő függvényében (Yesiller és Hanson, 2003)	26
2.8. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a mélység függvényében (Coccia et al., 2013)	27
2.9. ábra: A HC paraméter az idő függvényében a vizsgált hulladéklerakókban (Coccia et al., 2013).....	27
2.10. ábra: Telítettség a vizsgált depóniában (Coccia et al., 2013)	29
2.11. ábra: A függőleges hőkinyerő csővezeték rendszer beépítésének egy-egy lehetséges megoldása rekultivált (a) és művelés alatt álló (b) depóniában (Coccia et al., 2013)..	30
2.12. ábra: A hagyományos (a) és a „hurkos” (b) típusú vízszintes hőcserélő csővezeték rendszer beépítésének egy-egy lehetséges megoldása (Coccia et al., 2013).....	31
2.13. ábra: Monodiszperz gömb alakú szemcséket tartalmazó durva diszperz rendszerek hővezetési tényezője a koncentráció függvényében (Kandula, 2009).....	37
2.14. ábra: A különböző levegőztetési aerob in-situ stabilizálás koncepciói (Ritzkowski és Stegmann, 2012).....	39
2.15. ábra: A szemi-aerob lerakó koncepciója (Ritzkowski és Stegmann, 2012)	40
4.1. ábra: Az .A.S.A. Magyarország Kft. gyáli hulladéklerakója.....	43
5.1. ábra: A furatok kialakítása a depóniatestben és az elkészült hőmérséklet-eloszlás mérő szonda.....	45
5.2. ábra: A hőmérséklet-monitoring kutak elhelyezkedése a gyáli regionális hulladéklerakóban.....	46
5.3. ábra: A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés sematikus rajza	47

5.4. ábra: A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés fedele ...	48
5.5. ábra: A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés doboza .	48
5.6. ábra: A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés sematikus rajza és képe	50
5.7. ábra: A hőcserélő és hőhasznosító rendszer elvi vázlata.....	51
5.8. ábra: A függőleges kutak sematikus rajza a beépített hőmérsékletmérő szenzorok helyével és jelöléseivel	52
5.9. ábra: A függőleges kutak kialakítása és feltöltése.....	52
5.10. ábra: Vízszintes hőkinyerő rendszer kialakítása.....	53
5.11. ábra: A „hurkos” és a „piskóta” típusú vízszintes hőkinyerő körök takarás előtti képe	53
5.12. ábra: Az elkészült üvegház és a gépészeti konténer	54
7.1. ábra: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút mért értékei	59
7.2. ábra: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút átlaghőmérséklet értékei évszakokra bontva a mélység függvényében	61
7.3. ábra: A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút mért értékei	62
7.4. ábra: A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút átlaghőmérséklet értékei évszakokra bontva a mélység függvényében	63
7.5. ábra: Az m0705 azonosító számú mintán a fűtés hatására kialakuló egyensúlyi hőáramsűrűség, illetve a hőmérsékletmérő szenzorok által mért értékek	65
7.6. ábra: Soros hővezetési modell háromfázisú diszperz rendszerekre (elméleti minimum)	70
7.7. ábra: Párhuzamos hővezetési modell háromfázisú diszperz rendszerekre (elméleti maximum).....	71
7.8. ábra: A folyadék fázis térfogathányada és a halmazsűrűség változásának hatása a hővezetési tényezőre és a hődiffuzivitásra agyagos talaj esetében	75
7.9. ábra: A hulladék mért- és a számított eredő hővezetési tényező értékeinek összehasonlítása.....	77
7.10. ábra: A hulladék mért- és a számított eredő fajlagos hőkapacitás értékeinek összehasonlítása.....	78
7.11. ábra: A hulladék mért- és a számított eredő hődiffuzivitás értékeinek összehasonlítása	79
7.12. ábra: Az EPS mintán a fűtés hatására kialakuló hőáramsűrűség-, illetve a hőmérsékletmérő szenzorok által mért értékek	80

7.13. ábra: Soros hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre (elméleti minimum)	82
7.14. ábra: Párhuzamos hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre (elméleti maximum).....	84
7.15. ábra: Az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatest	88
7.16. ábra: A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a laboratóriumi minták esetében.	90
7.17. ábra: A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a félüzemi I. szériás minták esetében.	91
7.18. ábra: A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a félüzemi II. szériás minták esetében.	92
7.19. ábra: A 2014/I. jelű hőkinyerési kísérlet során az „A” jelű kútban mért hőmérséklet-, valamint a kinyert hőáram értékek az idő függvényében	94
7.20. ábra: A csőhéj-modell.....	95
7.21. ábra: A továbbfejlesztett csőhéj-modell	97
7.22. ábra: Hőtani modell: kiindulási állapot	99
7.23. ábra: Hőtani modell: köztes, még nem egyensúlyi állapot.....	100
7.24. ábra: Hőtani modell: egyensúlyi állapot.....	100

Táblázatjegyzék

2.1. táblázat: A hőképződési potenciál értékeinek összehasonlítása a különböző hulladékokban a szakirodalom alapján (Yesiller et al., 2005).....	23
2.2. táblázat: Hexóz aerob- és anaerob komplex lebontásának összehasonlítása (Winter és Temper, 1987)	24
2.3. táblázat: A vizsgált hulladék hőtani paraméterei (Coccia et al., 2013)	28
2.4. táblázat: A hulladékok hőtani paraméterei a szakirodalomi adatok alapján (Megalla, 2015).....	33
4.1. táblázat: A gyáli regionális hulladéklerakó ütemeinek befogadó kapacitása, illetve a deponálás időtartama	43
6.1. táblázat: A hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérletek főbb jellemzői	58
7.1. táblázat: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút mért adatira illesztett lineáris egyenesek paraméterei	60
7.2. táblázat: A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút mért adataira illesztett exponenciális görbék paraméterei	62
7.3. táblázat: A beépített minták mért (dőlt betűvel) és a számított (normál betűvel) paraméterei (1).....	68
7.4. táblázat: A beépített minták mért (dőlt betűvel) és a számított (normál betűvel) paraméterei (2).....	69
7.5. táblázat: A hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák sűrűségeinek-, illetve hőtani paramétereinek becsült értékei	72
7.6. táblázat: A hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák becsült hővezetési tényező értékei	73
7.7. táblázat: A hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák becsült fajhő értékei	74
7.8. táblázat: A hulladék egyes fázisainak átlagos sűrűség-, hővezetési tényező-, illetve fajlagos hőkapacitás értékei.....	74
7.9. táblázat: A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel elvégzett kalibrációs mérések eredményei	81
7.10. táblázat: A hővezetés univerzális egyenlete kétfázisú diszperz rendszerekre.....	86
7.11. táblázat: Az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatestek összetételi arányai a mért hővezetési tényezők értékeivel	88
7.12. táblázat: Az iteratív számítási eljáráshoz felhasznált paraméterek és értékeik	97
7.13. táblázat: Az iteratív számítási eljárás eredménye.....	98

Jelölések listája

Latin szimbólumok

A - felület [m^2]

c_m - fajlagos hőkapacitás [J/kgK]

c_v - állandó térfogaton vett fajhő [$\text{J/m}^3\text{K}$]

C_g, C_l, C_s - az egyes fázisokhoz (gáz, folyadék, szilárd) tartozó térfogati koncentráció [-]

D - diszperzitás állapot [-]

E - energiaképződés (hőképződés) [MJ/m^3]

h - mélység [m]

HC - hőkinyerési potenciál [$^{\circ}\text{C}$]

I - Berendezésre jellemző együttható [-]

K - arányossági tényező [-]

L - hosszúság, a hő által megtett út [m]

m - tömeg [kg]

m_B - ömlesztett minta tömege [kg]

m_{sg} - száraz minta tömege [kg]

M - a felszabaduló energia azon hányada, amely a lerakó fűtésére fordítódik [-]

n_m - tömegre vonatkoztatott nedvességtartalom [-]

T - hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

U - (labortáp) feszültség [V]

p - lebomlás fajlagos hőteljesítménye [W/m^3]

p_e - effektív fajlagos hőteljesítmény [W/m^3]

P - (fűtő) teljesítmény [W]

q - hőáramsűrűség [W/m^2]

Q - egyensúlyi hőáramsűrűség [W/m^2]

r - sugár [m]

t - idő [s]

V - térfogat [m^3]

V_B - ömlesztett minta térfogata [m^3]

V_{sg} - száraz minta térfogata [m^3]

Görög szimbólumok

γ - térfogatsúly [N/m^3]

$\Delta T/\Delta t$ - felfűtési szakaszra vonatkozó meredekség [$^{\circ}\text{C/s}$]

$\varepsilon_g, \varepsilon_l, \varepsilon_s$, - az egyes fázisok (gáz, folyadék, szilárd) térfogathányada [-]

κ - hődiffuzivitás [m^2/s]

λ - hővezetési tényező [W/mK]

ρ - sűrűség [kg/m^3]

ρ_B - halmazsűrűség [kg/m^3]

ϕ - porozitás [%]

1. BEVEZETÉS, A KUTATÓMUNKA CÉLJA

Annak ellenére, hogy a hulladékgazdálkodás 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 a technológiája megoldott. Ezen túlmenően, a nagy tömegben jelenlévő hulladékban 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 csővezetékot fektetni, amely alkalmas hőkinyerésre Szamek-től (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.

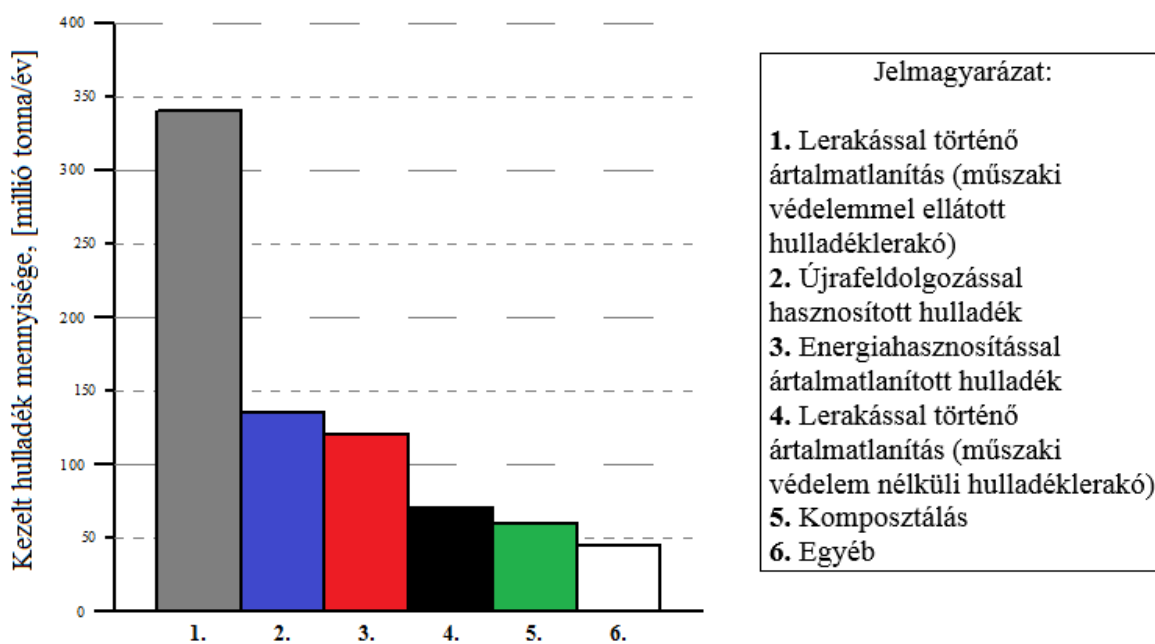
A hulladéklerakók hőgazdálkodási opcióit figyelembe véve a doktori kutatómunka célkitűzéseit az alábbiakban összegeztem:

- 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. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A hulladékgazdálkodás helyzetének rövid áttekintése a hulladék kezelésének szempontjából

Hoornweg és Bhada-Tata (2012) jelentése szerint a fejlett, gazdag országok nagyvárosaiban évente jelenleg mintegy 1,3 milliárd tonna települési szilárdhulladék keletkezik a világon. A becslések alapján 2025-re ez az érték megközelítőleg duplájára fog emelkedni (kb. 2,2 milliárd tonna). Az egy főre eső hulladék-egyenérték aránya jelenleg: 1,2 kg/fő/nap, amely 2025-re várhatóan eléri az 1,42 kg/fő/nap értéket az előrejelzések szerint. A 2.1. ábrán látható, hogy a lerakással ártalmatlanított hulladék mennyisége évente megközelítőleg 410 millió tonna, amely a műszaki védelem nélküli deponálást is magába foglalja. Összességében elmondható, hogy átlagosan, a közszolgáltatás keretében elszállított hulladék közel 95 %-a kerül deponálásra (Kurniawan et al., 2006).



2.1. ábra: A hulladék kezelési lehetőségeinek aránya

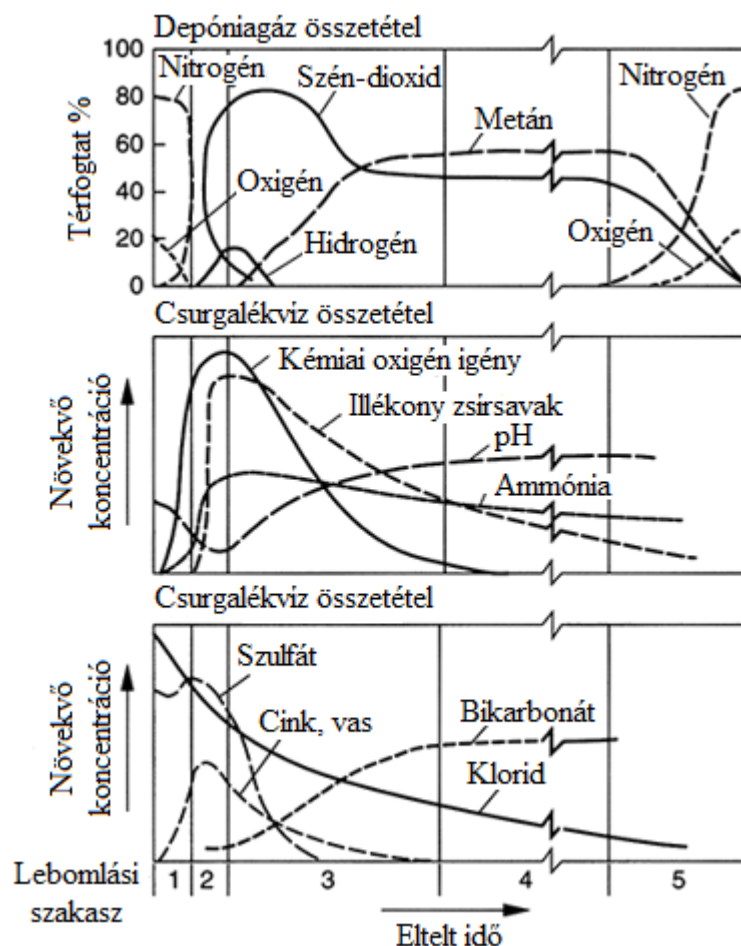
(Hoornweg és Bhada-Tata, 2012 alapján)

A magyarországi helyzetet tekintve a közszolgáltatás keretében elszállított hulladék mennyisége 2012-ben 2,89 millió tonna volt (KSH, 2012), amelyből:

- Újrafeldolgozással hasznosított hulladék: 284 ezer tonna,
- Energiahasznosítással ártalmatlanított hulladék: 326 ezer tonna,
- Energiahasznosítás nélküli égetéssel ártalmatlanított hulladék: 5 ezer tonna,
- Lerakással ártalmatlanított hulladék: 2,27 millió tonna volt.

2.2. A hulladéklebomlás folyamata

A szervesanyag-tartalmú hulladék lebomlása igen összetett és hosszú időn át tartó (min. 30 év) folyamat, amely a laboratóriumi mérések (Stegman és Spendlin, 1985) és tapasztalatok (Christensen és Kjeldsen, 1989) alapján öt jellegzetes szakaszra osztható (2.2. ábra). A stabil metánfázis utáni folyamatot Rettenberger et al. (1992) tovább finomította és újabb öt szakaszra osztotta fel.



2.2. ábra: A depóniagáz- és a csurgalékvíz összetevőinek alakulása az egyes lebomlási szakaszokban (Stegman és Spendlin, 1985 alapján)

A 2.2. ábra szemlélteti az említett öt lebomlási szakaszt, amelyek két fő lebomlási fázisra oszthatók: aerob (az 1-es szakasz, amely átlagosan 2 hétig tart, az oxigénellátottságtól függően) és anaerob (2-5 szakaszok, amelyek jellemzően több, mint 20 évet vesznek igénybe).

2.2.1. Az aerob lebomlási fázis

Az aerob lebomlási fázis egy rövid abiotikus szakasz rögtön a hulladék elhelyezése után, amikor a rendelkezésre álló oxigén (levegő) mellett a hulladékban jelenlevő, vagy kívülről származó mikroorganizmusok a szerves anyag aerob lebontását végzik. A folyamatot részben a depóniában csapdázódott levegő, a felszín közeli rétegeknél pedig az atmoszférából bejutó oxigén táplálja. Az aerob fermentáció eredménye a szén-dioxid, az ammónia és a víz, illetve az egyéb alkotórészek oxidációs termékei. A folyamat fontos tényezője a nedvesség, amely a mikroorganizmusok számára 60 %-nál optimális. A nedvesség egyaránt származhat magából a hulladékból vagy a depóniába bejutó csapadékból történő utánpótlódásból. A folyamat exoterm, amely során a lezárást követő néhány nap, illetve hét alatt a hőmérséklet elérheti a 60-70 °C-ot is. A nagy hőmérséklet gyakran öngyulladásához is vezethet. A depónia átlagos belső hőmérséklete ebben a fázisban jellemzően 40-60 °C (Szabó, 1999).

2.2.2. Az anaerob lebomlási fázis

A depóniagáz képződés körülményeit ebben a fázisban az anaerob (oxigénmentes) lebomlás jellemzi, a számára kedvező, elsősorban közepes (30-75 °C) hőmérséklet tartományban. A biogázképződés (termelés) szempontjából a legfontosabb három fő vegyületcsoport a szénhidrátok, a fehérjék és a zsírok.

Az anaerob lebomlás kezdeti szakaszában (2. szakasz) illékony zsírsavak, szén-dioxid és hidrogén keletkezik az erjesztő és acetogén baktériumok hatására. A savas kémhatású csurgalékvíz nagy koncentrációban tartalmazhat zsírsavakat, kalciumot, vasat, nehézfémeket és ammóniát. A gáz nitrogéntartalma csökken a szén-dioxid- és hidrogénképződés következtében. A redoxpotenciál csökkenésével a kezdeti magas szulfáttartalom lassan lecsökken. A keletkező szulfid kicsapja a vasat, mangánt és a nehézfém elemeket, amelyek eddig oldott állapotban voltak.

A 3. úgynevezett második közbülső anaerob szakasz a metanogén baktériumok lassú növekedésével kezdődik. A metánkoncentráció nő, mialatt a hidrogén-, a szén-dioxid- és a zsírsavak koncentrációja csökken. Tovább csökken a szulfátkoncentráció a folytatódó szulfátredukció révén. A zsírsavak átalakulása a pH és a lúgosság növekedésével jár, ami a kalcium-, a vas-, a mangán- és a nehézfémek oldhatóságának a csökkenését vonja maga után, amelyek később valószínűleg szulfidokként csapódnak ki. Továbbra is szabadul fel ammónia, ami az anaerob környezetben nem alakul át.

Az úgynevezett metán szakaszban (4. szakasz) 50-60 % metántartalomnál stabilizálódik a gázképződés, ami a zsírsavak és a hidrogén alacsony szinten történő tartását eredményezi.

Az 5. szakaszban csak az ellenálló szerves szén marad az elhelyezett hulladékban. A metántermelődés jelentősen visszaesik, koncentrációja olyan kicsi lesz, hogy nitrogén jelenik meg a gázokban a légköri diffúzió miatt. Aerob zónák és a metán képződéshez túl magas redoxpotenciálú zónák jelennek meg a felső rétegekben (Szabó, 1999).

2.3. A hulladéklerakók hőtani tulajdonságai

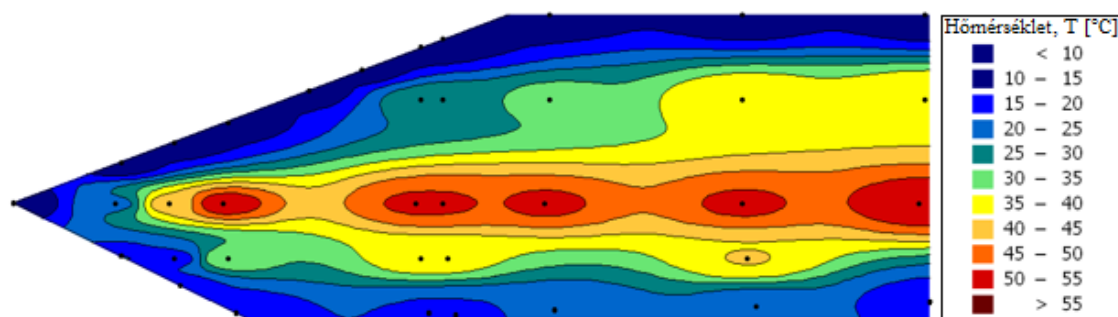
A hő, a gáz és a csurgalékvíz az elsődleges melléktermékei a hulladéklerakókban lezajló bomlási folyamatoknak. A keletkező hő tulajdonképpen a hulladéklerakókban végbemenő biokémiai folyamatokból és a szerves anyagok lebomlásából származik. A keletkező hő hatására a lerakók belsejében a hőmérsékleti 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.

2.3.1. A hőmérséklet hatása a depóniagáz képződésre

A lebomlási folyamatokban nélkülözhetetlen szerepet játszó mezofil- és termofil baktériumok számára az optimális hőmérsékleti tartomány a szakirodalom alapján 35-40 °C, azonban laboratóriumi vizsgálatok ezt a tartományt már 50-60 °C közé teszik (Tchobanoglous et al., 1993; Cecchi et al., 1993). A gázképződés maximalizálásának szempontjából az optimális hőmérséklet 34 és 41 °C közötti érték (DeWalle, 1978; Hartz et al., 1982; Mata-Alvarez és Martinez-Viturtia, 1986), habár Rees (1980) szerint az optimális gázképződéshez a 40 és 45 °C közötti hőmérséklet a legmegfelelőbb.

2.3.2. Hőképződés és hőmérséklet-eloszlás a hulladéklerakókban

A hulladéklerakók térbeli- és időbeli hőmérséklet-eloszlásának a mérésére a szakirodalomban számos példa található (Dach és Jager, 1995; Houi et al., 1997; Yoshida et al., 1997; Rowe, 1998; Lefebvre et al., 2000; Koerner, 2001; Yesiller és Hanson, 2003; Yesiller et al., 2016). A depóniatest sekély mélységeiben a mért hőmérsékletet a szezonális külső, környezeti hőmérséklet határozza meg. A hulladéklerakók felszínétől – az éppen aktuális magasságától – a depóniatest közepes magasságáig a hőmérséklet egyre növekvő tendenciát mutat (2.3. ábra). A maximális hőmérsékletet a depóniatest középső harmadában, a lerakó aljához, valamint az aljzatszigetelő rendszerhez viszonylag közel mérhetjük.

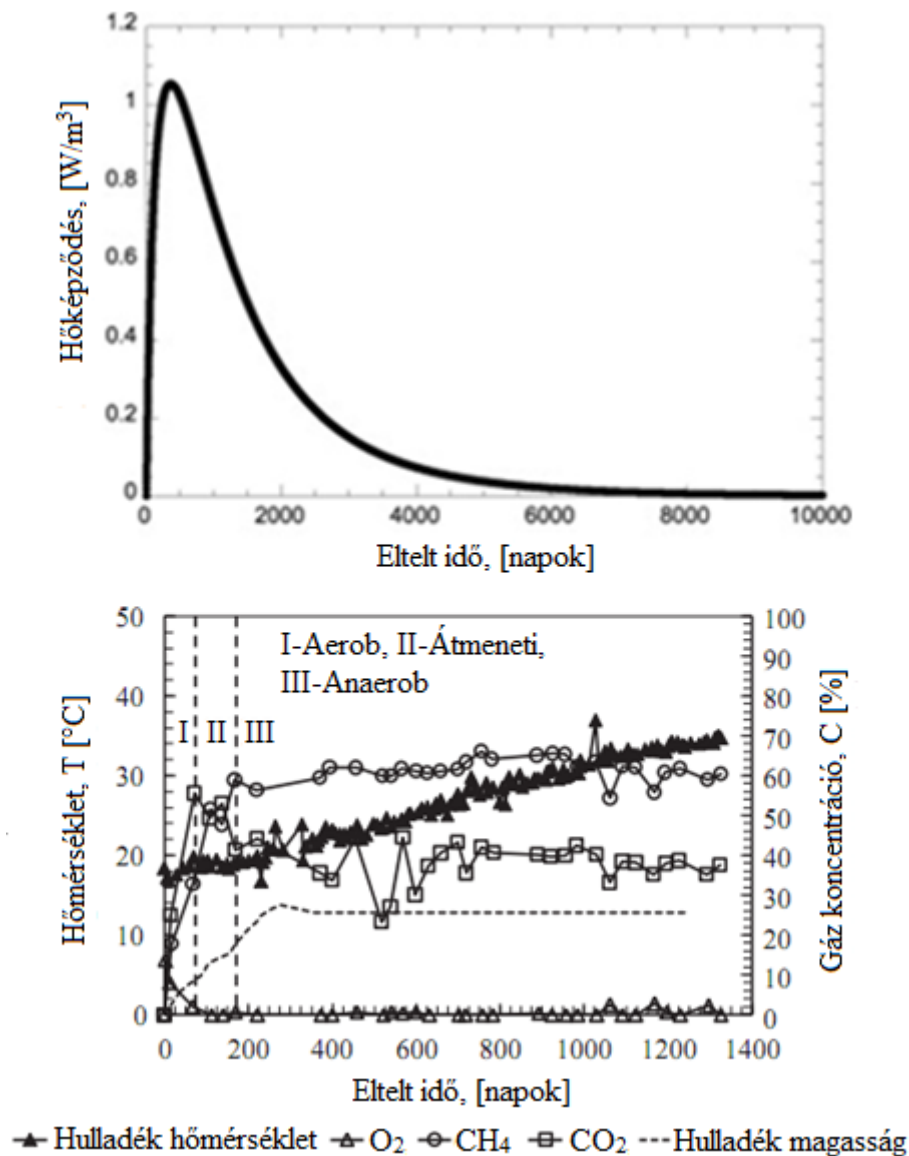


2.3. ábra: Egy tipikus hulladéklerakó hőtani profilja (Yesiller et al., 2016)

Rees (1980) megemlíti, hogy egy nagyjából 4 m vastag inert fedő réteg már képes csökkenteni a külső környezet okozta hőmérsékleti hatásokat az alatta fekvő rétegekben, tehát ezekben a rétegekben már a biokémiai lebomlásból származó hőmérsékleti hatás lesz az uralkodó. A 20-60 m magas lerakókban mérhető maximális hőmérséklet 40 és 65 °C közé tehető. Kivételként szolgál Koerner, 2001-ben megjelent tanulmánya, ahol egy 50 m magas lerakóban a 10 éven keresztül mért maximális hőmérséklet 10 és 20 °C közötti érték volt. 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 (Rowe, 1998; Koerner, 2001; Yesiller és Hanson, 2003) áttekintése alapján megállapítható, hogy az aljzatszigetelő rendszerre hőterhelésként ható többlet hőmérsékleti tartomány 20-30 °C közötti érték.

Farquhar és Rovers (1973) az aerob lebomlás során kialakuló hőmérsékletet vizsgálta a lerakott hulladék deponáláskori hőmérsékletének függvényében. Farquhar és Rovers (1973), Zanetti et al. (1997), Lefebvre et al. (2000) és 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 csúcserőig emelkedik az aerob lebomlási fázis során, majd azt követően csökken az anaerob fázisban (2.4. ábra). A mérési eredményeket a külső, környezeti hőmérséklet is befolyásolhatta, azonban ennek hatását nem vizsgálták.



2.4. ábra: Hő- és gázképződés egy tipikus hulladéklerakó esetében

(Coccia et al., 2013 és Hanson et al., 2013)

Dach és Jager (1995) mérései alapján a hulladéklerakók belsejében létrejövő maximális hőmérséklet 60-70 °C, amely a 85 °C-ot is elérheti az anaerob zónákban. Yoshida

et al. (1997) numerikus analízis segítségével próbálja meg modellezni a depóniatestben az anaerob bomlás során kialakuló hőképződés okozta hőmérséklet-növekedést.

A hőmérsékleti értékek növekedése figyelhető meg a hulladéklerakókra történő további deponálással, amely során a hőmérséklet-növekedés már a lerakástól számított pár napon belül észlelhető. 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. Houi et al., 1997-es publikációjában a depóniatestben kialakuló hőmérsékleti értékeket a lerakás idejében mért külső hőmérséklettel hozza összefüggésbe. Megállapítja, hogy a magasabb hőmérsékleten történő lerakás esetében a depóniatestben kialakuló hőmérséklet is magasabb lesz. Rowe (1998) átfogó tanulmányt készített a depóniatestben kialakuló hőmérséklet-eloszlásról, figyelembe véve a mélységet, a lerakás-, valamint a deponált hulladék azon paramétereit, amelyek hatással lehetnek a hőképződésre. A vizsgálatai szerint a hőképződés során a nedvességtartalom a legjelentősebb tényező. A kialakuló hőmérséklet-növekedés (40-60 °C közötti) összefüggésbe hozható az általában 6-20 m mélységben jelen lévő, felhalmozódott, illetve megrekedt csurgalékvíz mennyiségével. Más tanulmányok szerint azonban csurgalékvíz felhalmozódás nélkül is kialakulnak a már fentebb említett hőmérsékletek (Gartung et al., 1999; Lefebvre et al., 2000). Rees (1980) vizsgálatai szerint mérsékelt övi éghajlaton a magas nedvességtartalom (a hulladéklerakó alján teljesen telített állapot esetén) és az 1000 kg/m³ halmazsűrűséggel rendelkező hulladék a legmegfelelőbb a gázképződéshez, figyelmeztet azonban, hogy az intenzív folyadék beszívargás gátolhatja a metánképződést, valamint jelentősen visszahúthatja a depóniát.

Gartung et al. (1999) és Lefebvre et al. (2000) kiegészítő termikus méréseket végzett a depóniatest horizontális- és vertikális keresztshelvényeit figyelembe véve. A vertikális shelvényekben a legnagyobb hőmérsékleti gradiens a hulladéklerakó felszínéhez közel, a legalacsonyabb pedig a depóniatest alján figyelhető meg. A horizontális shelvényeket tekintve megállapították, hogy a legnagyobb termikus gradiens a szélekhez közel, a legalacsonyabb pedig a középponti helyek közelében található.

Pirt (1978), Rees (1980), El-Fadel et al. (1996), Zanetti et al. (1997), valamint Yoshida és Rowe (2003) a publikációikban már részletesen vizsgálták a hulladékokban, a lebomlás során létrejövő hőfejlődési potenciált. Zanetti et al. (1997) és Lefebvre et al. (2000) a hőfejlődési potenciál értékét a mérésekből kapott adathalmazra történő görbe illesztésével számította. Tchobanoglous et al. (1993), SFOE (2004), Davies (2004) és Gibbs (2004) a hulladék elégetésének módszerével származtatta a hőképződés mértékét. Yoshida és Rowe

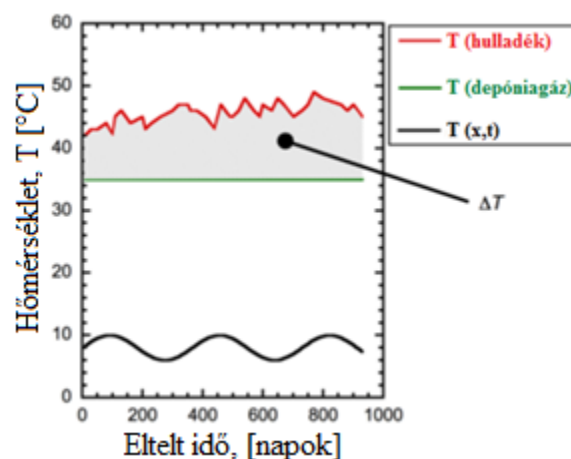
(2003), valamint Pirt (1978) mérései szerint a hőképződés mértéke nagyobb az aerob-, mint az anaerob fázisban. Young (1992) a depónián belüli hőképződést a hőmérséklet-különbségből és a hulladék fajlagos hőkapacitásából származtatta (2.1.):

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

ahol,

- E : energiaképződés (hőképződés) [MJ/m^3],
- ΔT_i : hőmérséklet-emelkedés hatására létrejött hőmérséklet-többség a hulladékban [K],
- c_v : hulladék hőkapacitása [$\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$],
- $M(T)_i$: a felszabaduló energia azon hányada, amely a lerakó fűtésére fordítódik [-].

Megállapítható, hogy 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 (2.5. ábra).



2.5. 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.):

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

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

Bizonyos tanulmányokban a kapott eredményeket módosíthatta a különböző mérő-szenzorok konfigurációja, illetve a mérés módszere (Attal et al., 1992; Townsend et al., 1996; Houi et al., 1997; Zanetti et al., 1997). A szenzorok merev, nyitott csövekben való elhelyezése során számolni kell a gáz konvekciójával, amelynek eredményeként a mért lebomlási állapothoz tartozó paraméterek nem megfelelő értékeket adnak vissza. A depóniatest mintázása során hővesztés- (a minta depótestből történő kivételéből adódóan) és hőnyerés (fűrés esetén) is felléphet.

A bomlási folyamatok eredményeként létrejövő hőképződés értékeit a 2.1. táblázat szemlélteti az aerob-, anaerob-, illetve a teljes lebomlási fázisban. A lebomlásból származó hőképződési értékek egységnyi glükózra, egységnyi mol tartalmú gázra (oxigén vagy metán), egységnyi szervesanyag-tartalomra, vagy egységnyi tömegű-, illetve térfogatú hulladékra vonatkoznak. Néhányan a vizsgálataikban a hőképződés nagyságát fokozatokra bontva is megemlítik, ugyanakkor mások abszolút értékeket használnak annak jellemzésére. A táblázatban összegzett értékek több, mint 4 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, biológiai lebontható hányadát, de alapvető jelentőségű a hőfejlődés szempontjából az esetleges mechanikai előkezelés megléte vagy a lerakás technológiája is.

Szakirodalmi forrás	Jelentett hőképződés	Egyenértékű hőképződés [MJ/m ³]	Lebomlási állapot	Analitikus megközelítés
Pirt (1978)	1520 kcal/kg glükóz (6369 kJ/kg, 1147 kJ/mol-O ₂)	-	Aerob	A glükóz aerob emésztése
Rees (1980)	25,5-től 1097 MJ/m ³ -év [arány]	-	Aerob, a víztartalomtól függően	Aerob anyagcsere
Lefebvre et al. (2000)	10·10 ³ kJ/m ³	10,0	Aerob	Hőfelhalmozódás a hulladékban
Yoshida és Rowe (2003)	460 kJ/mol-O ₂	1,161 ^a	Aerob	Biológiai lebomlás (egyenértékű glükóz)
Yoshida és Rowe (2003)	4,67 J/m ³ s [arány]	-	Aerob	Biológiai lebomlás (egyenértékű glükóz)
Pirt (1978)	0.09 kcal/kg glükóz (377 J/kg glükóz, 68 J/mol CH ₄)	-	Anaerob rothasztás	A szerves frakció teljes átalakulása CO ₂ -dá és CH ₄ -ná
Tchobanoglous et al. (1993)	5,45 GJ/t (5450 kJ/kg)	5450 ^b	Anaerob	A szerves frakció teljes átalakulása CO ₂ -dá és CH ₄ -ná
El-Fadel et al. (1996)	244,5 kcal/mol átalakult szerves anyag (755 kcal/kg glükóz, 3163 kJ/kg cellulóz)	-	Anaerob	A sztöchiometrikus biokémiai reakció reagenseinek entalpiája
El-Fadel et al. (1996)	61 kcal/mol képződött CH ₄ (256 kJ/mol-CH ₄)	1,38 ^c	Anaerob	A sztöchiometrikus biokémiai reakció termékeinek entalpiája
El-Fadel et al. (1996)	26 kcal/mol képződött CH ₄ (109 kJ/mol-CH ₄)	0,59 ^c	Anaerob	Lépcsőzetes biokémiai reakció
Zanetti et al. (1997)	900 kJ/Nm ³	180 ^c	Anaerob	A biokémiai reakció termékeinek entalpiája, a területi adatok felhasználásával

Yoshida és Rowe (2003)	43,5 kJ/mol-CH ₄	0,23 ^c	Anaerob	Biológiai lebomlás (egyenértékű glükóz)
Yoshida és Rowe (2003)	0,218 J/m ³ s [arány]	-	Anaerob	Biológiai lebomlás (egyenértékű glükóz)
Tchobanoglous et al. (1993)	11600 kJ/kg	11600	Teljes lebomlás	Közvetlen analízis és kalorimetria
SFOE (2004)	11900 kJ/kg	11900	Teljes átalakulás	Égetés közben felszabaduló energia
Davies (2004)	9200 kJ/kg	9200	Teljes átalakulás	Égetés közben felszabaduló energia
Gibbs (2004)	9500 kJ/kg	9500	Teljes átalakulás	Égetés közben felszabaduló energia

2.1. táblázat: A hőképződési potenciál értékeinek összehasonlítása a különböző hulladékokban a szakirodalom alapján (Yesiller et al., 2005)

Megjegyzés:

-: A közvetlen átalakítás nem alkalmazható megfelelő pontossággal a hulladékok összetételére és/vagy a folyamatokhoz tartozó időkorlát nem megadott a szakirodalomban elérhető adatok alapján.

^aSzámított érték, amely feltételezi, hogy a hulladék porozitása 0,4, valamint a hulladékban lévő gáz frakció oxigén tartalma 21%.

^bSzámított érték, amely a USEPA (2003) által biztosított hulladék összetétellel számol, ahol a hulladék halmazsűrűsége 1000 kg/m³, valamint a molekuláris frakciók értékei adottak a Thobanoglous et al. (1993) által készített szakirodalom alapján.

^cSzámított érték, amely az ideális gáztörvényt alkalmazza, ahol a hulladék halmazsűrűsége 1000 kg/m³, a fajlagos gázképződés 200 m³, illetve a gáz összetétele 60% CH₄.

A kutatómunka szempontjából érdekes Winter és Temper (1987) tanulmánya, amelyben egy adott szerves anyag (hexóz) aerob- és anaerob lebontását hasonlítja össze az energiaképződés szempontjából (2.2. táblázat).

Komplex aerob lebontás	Komplex anaerob lebontás
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + h\ddot{o} + m_{\text{biomassza}}$ $\Delta E = -2871 \text{ kJ/mol}$	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2 + h\ddot{o} + m_{\text{biomassza}}$ $\Delta E_{\text{anaerob}} = -404 \text{ kJ/mol}$
	Metán aerob oxidációja (égetés):
	$3CH_4 + 6O_2 \rightarrow 3CO_2 + 6H_2O + h\ddot{o}$ $\Delta E_{\text{metán oxidáció}} = -2467 \text{ kJ/mol}$
$\Delta E_{\Sigma} = -2871 \text{ kJ/mol}$	$\Delta E_{\Sigma} = -2871 \text{ kJ/mol}$

2.2. táblázat: Hexóz aerob- és anaerob komplex lebontásának összehasonlítása

(Winter és Temper, 1987)

A táblázat alapján látható, hogy 1 mol hexóz teljes lebontása mindkét úton 2871 kJ/mol hő fejlődésével jár. Azonban a két út között jelentős különbség van. Az anaerob lebontás kicsiny energia hozama azt jelenti, hogy a lebontás során lényegesen kevesebb biomassa képződik, azaz marad vissza, mint az aerob folyamat esetében. Másrészt, ha a hőkinyerés mérnöki gyakorlatát- és hatásfokát nézzük, a magas hőmérsékleten (+1000 °C) végrehajtott metán (depóniagáz) égetés sokkal jobb hatásfokú ($\eta \approx 40\%$), mint a mezofil hőmérsékletű (35-42 °C) komposztálás, vagy az aerob stabilizálás melletti hőcsere. Természetesen az energiamérlegbe a gázmotorok által termelt villamos áram-, meleg víz- és meleg füstgáz együttes energiatartalmát kell beszámítani, illetve hasznosítani.

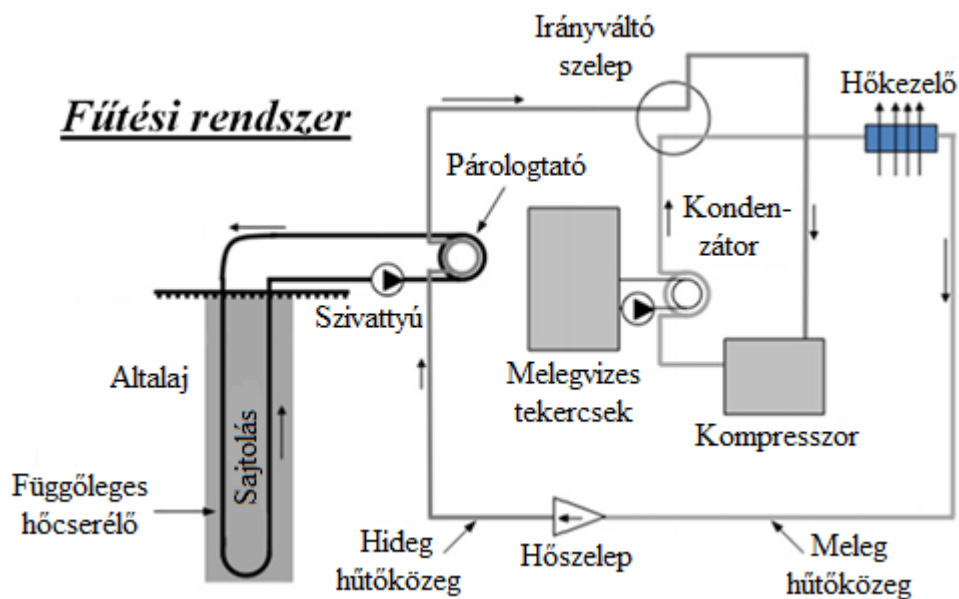
2.4. A hulladéklerakókból történő hőkinyerés technológiai lehetőségei

A közelmúltban a hulladéklerakókban képződő hő kinyerésének elméleti technológiai lehetőségeivel kapcsolatban egy igen fontos publikáció látott napvilágot Coccia et al. (2013) tollából. A cikkből kiderül, hogy az USA-ban már jelentősen előrehaladottabb állapotban van a téma, mint Európában.

2.4.1. A hőszivattyús rendszerek felépítése

Amennyiben valamilyen nagytömegű anyaghalmazból viszonylag alacsony hőmérsékletű munkaközeg segítségével nyerik ki a hőt, a másodlagos körben a munkaközeg hőmérséklete hőszivattyús rendszerrel emelhető meg. Az első hőszivattyús rendszert (GSHP

- Ground Source Heat Pump) Peter von Rittinger osztrák mérnök fejlesztette ki 1855-ben (Jontes, 1988). Ez a technológia napjainkban már igen elterjedt, amikor függőleges- vagy vízszintes hőcserélő csővezetékrendszert telepítenek a földfelszín alá. A csővezeték anyaga HDPE (nagy sűrűségű polietilén) vagy HDPB (nagy sűrűségű polibutilén). A technológia három fő részből áll: a zárt csőrendszerű hőcserélő kör, amely hőt von el vagy hőt ad le a talajba(ból), illetve a környezetbe(ből), a hőszivattyú, amelyben alacsony forráspontú munkaközeg van, illetve a hőelosztó hálózat, amely az épületeket hűti, vagy fűti (2.6. ábra). A talajba telepített hőcserélő körben fagyásálló munkaközegre van szükség.



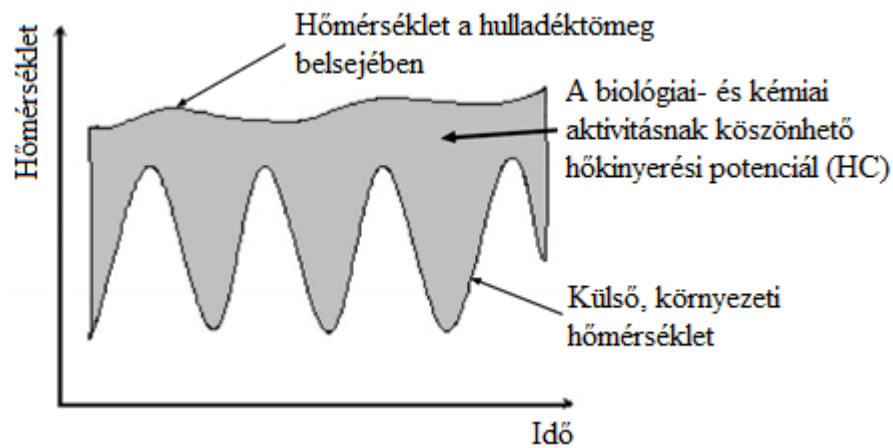
2.6. ábra: A hőszivattyús rendszer felépítése (Coccia et al., 2013)

2.4.2. A hőkinyerési potenciál (HC) bevezetése

Yesiller és Hanson (2003) bevezettek egy új paramétert, az úgynevezett hőkinyerési potenciált (HC - Heat Content). Megtévesztő az angol elnevezés, amelynek a tükörfordítása a „hőtartam” a dimenziója pedig °C. A HC paraméter referencia hőmérséklete az adott időszakban és helyen – a hulladéklerakó nélküli – jellemző környezeti hőmérséklet. A szerzők szerint a hőkinyerési potenciál az az a hőmérséklet-különbség, amennyivel a lerakó anyagtömegének hőmérséklete a környezeténél nagyobb (2.4.).

$$HC = T_{\text{depónia}} - T_{\text{környezet}} \quad (2.4.)$$

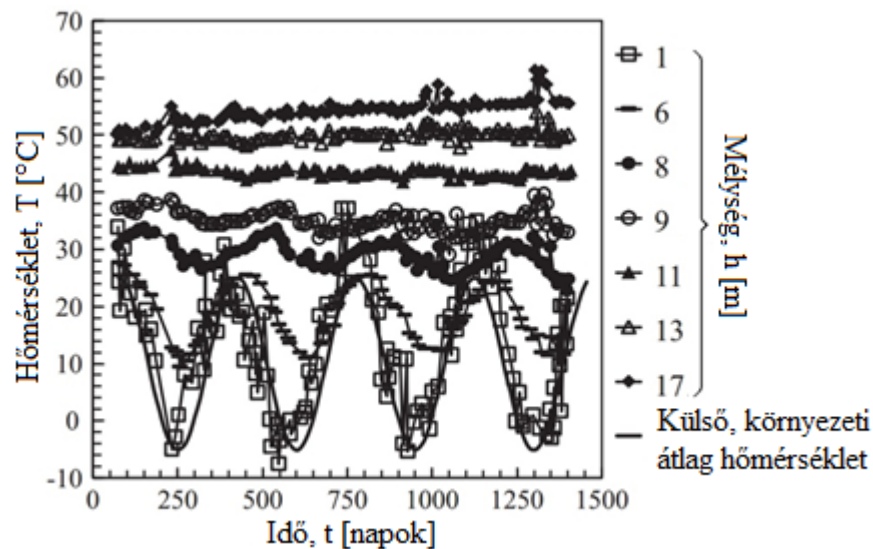
Jól jellemzi az adott hulladéklerakó hőmérsékleti viszonyainak alakulását az évek során a hőkinyerési potenciál idő szerinti változása, ami gyakorlatilag arányos a depóniatestből hőcserével kinyerhető energia mennyiségével (2.7. ábra).



2.7. ábra: A hőkinyerési potenciál (HC) értékének változása az idő függvényében
(Yesiller és Hanson, 2003)

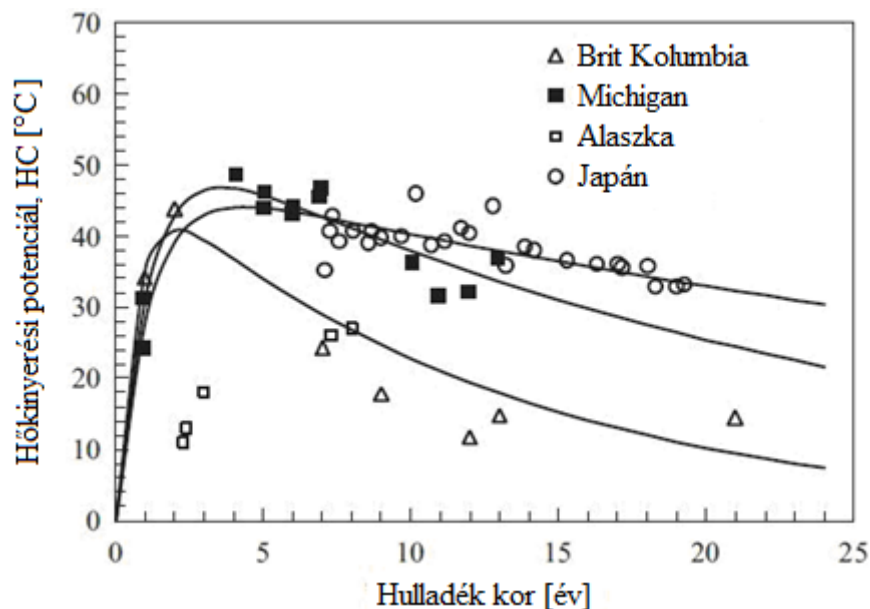
2.4.3. A hőkinyerési potenciál a depónia- és a hulladék paramétereinek függvényében

Coccia et al. (2013) éveken át tartó méréseket végeztek, mely szerint különféle észak-amerikai hulladéklerakókban hőmérséklet-eloszlást mértek és szisztematikus gáz mintavételezést végeztek. Megállapították, hogy csak a felső 1-6 m-es rétegben érvényesül az évszaknak megfelelő hőmérséklet, mélyebben a hőmérséklet állandósul és akár a 40-60 °C-ot is elérheti (2.8. ábra).



2.8. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a mélység függvényében (Coccia et al., 2013)

Coccia et al. (2013) a vizsgált depóniák hőtani jellemzésére a Yesiller és Hanson (2003) által bevezetett hőkinyerési potenciál paramétert alkalmazta. A hőkinyerési potenciál értéke akár az 50 °C-ot is elérte a vizsgált depóniákban. A hőkinyerési potenciál értékeire illesztett görbe a lerakást követően meredeken emelkedik, majd mintegy 3-5 év múlva éri el a csúcst, amelyet követően enyhén csökkenni kezd, viszont még 20-25 év múltán is számottevő (2.9. ábra).



2.9. ábra: A HC paraméter az idő függvényében a vizsgált hulladéklerakókban (Coccia et al., 2013)

A szerzők vizsgálták a hulladék lerakási jellemzőinek a hőkinyerési potenciálra, azaz a rendelkezésre álló hőkinyerési kapacitásra gyakorolt hatását. Megállapították, hogy a lerakás ideje – azaz, hogy melyik évszakban történt a lerakás – befolyásolja a HC paraméter értékét. Amennyiben melegebb évszakban történik a lerakás, akkor az időarányos HC maximum értékei nagyobbak, mint hidegebb időszakban történő lerakás esetén. Megállapították továbbá azt is, hogy a nagyobb mértékű tömegáramban történő lerakás esetén eredendően nagyobb hőmérsékleti értékek alakulnak ki. Vizsgálataikból kiderül, hogy az időjárási körülmény, kiemelten a csapadékinzintitás, jelentős hatással van a hőkinyerési potenciál értékére. A mért adatok alapján meghatározták, hogy a csapadék mennyiségével a HC értéke először növekszik, majd a vizsgált esetben 2,3 mm/nap értéknél éri el a maximumot, ami után már csökken a hőtermelőds.

Összességében elmondható, hogy a hulladékok hőtani paramétereiről még nagyon kevés információt tartalmaz a szakirodalom, azonban a következő jellemző értékekkel számoltak a kinyerhető energia tekintetében (2.3. táblázat). A hővezetési tényező a növekvő nedvességtartalommal- és a növekvő halmazsűrűséggel is arányosan növekszik.

Paraméter neve	Jellemző értéke
Térfogatsúly (γ)	5,2-9,8 kN/m ³
Hővezetési tényező (λ)	0,3-1,5 W/mK
Állandó térfogaton vett fajhő (c_v)	1000-2200 kJ/m ³ K
Hődiffuzivitás (κ)	$3 \cdot 10^{-7}$ - $7 \cdot 10^{-7}$ m ² /s
Hőtermelési kapacitás (E)	2 MJ/m ³ K

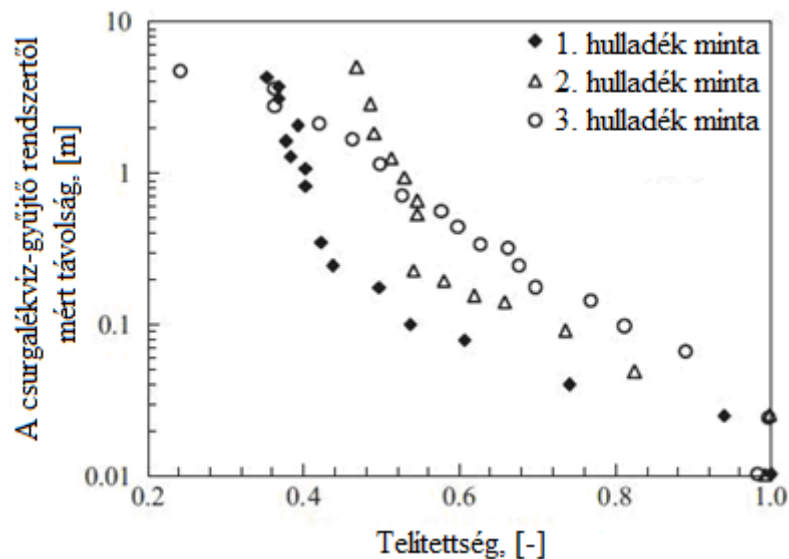
2.3. táblázat: A vizsgált hulladék hőtani paramétereit (Coccia et al., 2013)

Az összes kinyerhető hőenergia vonatkozásában kiszámították, hogy az egy éves időtartamra vetített „bruttó” értéke megközelítőleg 71-279 MJ/m³, amelyből a környezet felé távozó veszteségeket levonva 23-77 MJ/m³ marad. A kapott értékek lényegesen nagyobbak, mint az exoterm biológiai lebomlás alapján becsült-, viszont lényegesen kisebbek, mint a hulladék elégetéséből származó értékek.

A szerzők a cikkekben felhívják a figyelmet arra, hogy a depóniába telepített hőszivattyús rendszer a teljes lerakó működését befolyásolja. Egyéb vizsgálataik során megállapították, hogy a metán képződés szempontjából a közel 41 °C-os hőmérséklet az optimális. Az olyan lerakók esetén, ahol a hőmérséklet ennél kisebb, célszerű lehet a depóniatestbe geotermikus hőt vezetni és a metánképződésre optimalizálni a lerakót.

2.4.4. A hőkinyerő csővezeték rendszer beépítésének optimális helye

A hőkinyerő csővezeték rendszer beépítésének optimális helyéről a hőmérséklet-eloszlás mérés alapján kapott adatok adnak útmutatást, amely segítségével a nagyobb hőmérsékletű részek kijelölhetők. A beépítés optimális helyének kijelölése során figyelembe kell venni a hulladék telítettség értékét is. Coccia et al. (2013) vizsgálatai alapján a depónált hulladék a depónitest aljára beépített csurgalékvízgyűjtő rendszer hatékony működése esetén sem veszi el a pórusvizét, bár a telítettség a csurgalékvízgyűjtő rendszertől mért távolsággal csökken (2.10. ábra), így a depónia magasabban fekvő rétegeibe is lehet csővezeték telepíteni.



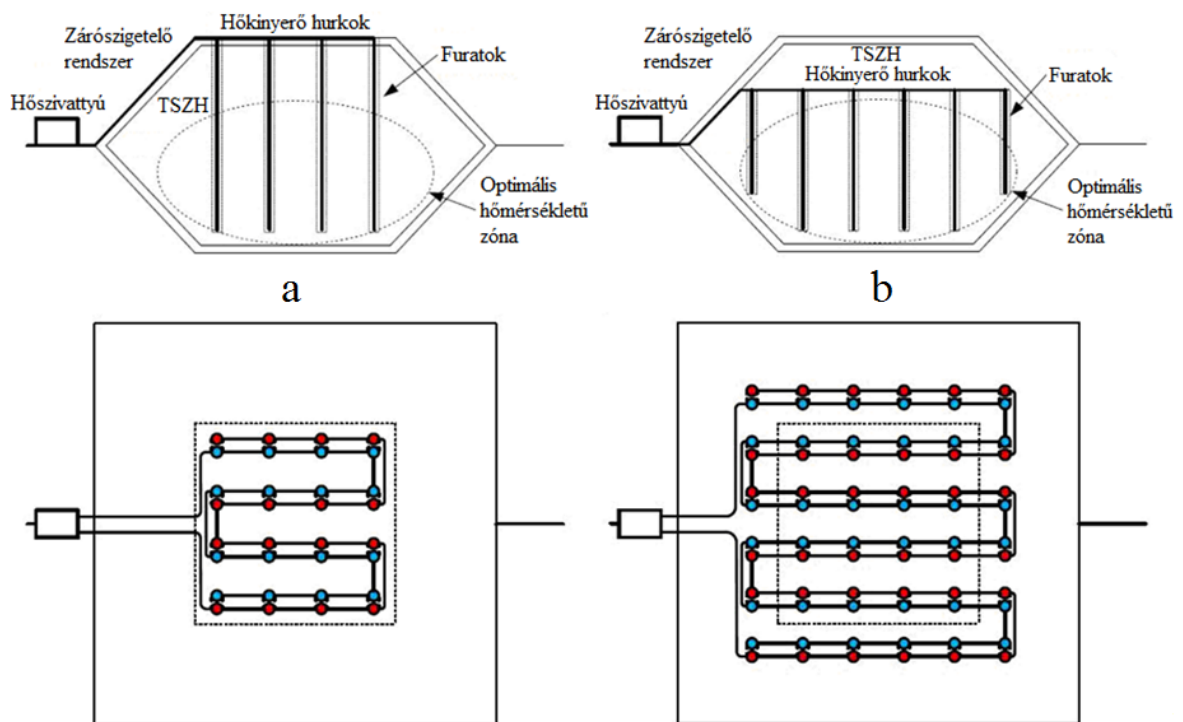
2.10. ábra: Telítettség a vizsgált depóniában (Coccia et al., 2013)

A túl nagy hőmérséklet másik káros hatása, hogy a baktériumok az intenzív biológiai aktivitás eredményeként a csurgalékvíz elvezetését is gátolhatják. A hőkinyerő csővezeték rendszer beépítésének optimális helyeként a depónia magasságát tekintve, annak középső harmada jelölhető ki.

2.4.5. A hőkinyerő csővezeték rendszer kialakításának lehetséges megoldásai

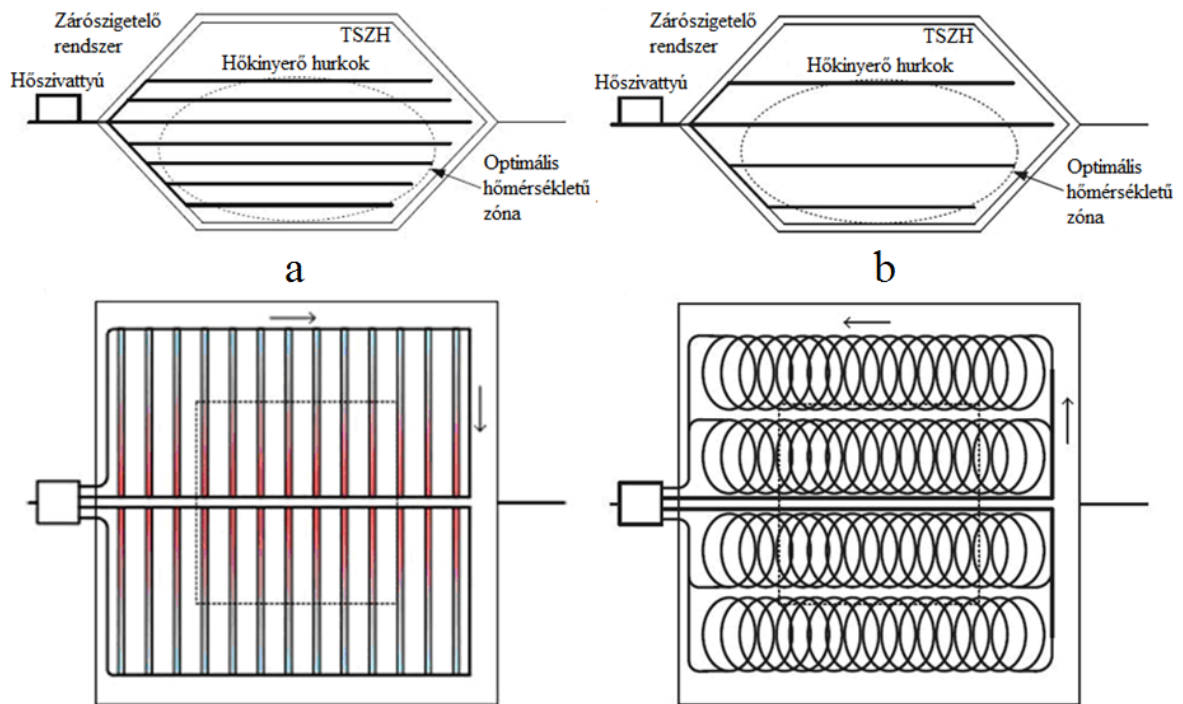
Coccia et al. (2013) a hőcserélő csővezeték kialakításával kapcsolatban is számos tanáccsal szolgálnak. Elsőként közlik a lehetséges csővezeték anyagokat, amelyek a HDPE, HDBE, illetve a réz, azonban a rezet, mint csőanyagot, az ára és a kisebb csurgalékvíz

ellenálló képessége miatt elvetik. Egy lezárt és már rekultivált lerakó esetén a függőleges, fúrólyukas csővezeték rendszer kiépítésének egy lehetséges megoldását szemlélteti a 2.11.a. ábra. A nagy magasságú- és kis alapterületű hulladéklerakók esetén a művelés közben történő beépítés során is célszerű lehet a függőleges csővezetékrendszer beépítése. A beépítést – fúrásos technológiával – megközelítőleg 75 %-os töltöttségi állapotban célszerű elvégezni (2.11.b. ábra). Ebben az esetben még nem okoz gondot a zárószigetelő rendszer. Amennyiben a lezárt lerakó zárószigetelő rendszere geomembránt tartalmaz, abban az esetben azt át kell fúrni, majd az így keletkező rést tömíteni kell.



2.11. ábra: A függőleges hőkinyerő csővezeték rendszer beépítésének egy-egy lehetséges megoldása rekultivált (a) és művelés alatt álló (b) depóniában (Coccia et al., 2013)

A hulladéklerakók művelése közben a hagyományos és az úgynevezett „hurkos” típusú vízszintes elrendezésű csővezeték rendszer beépítésének egy-egy lehetséges megoldását mutatja 2.12. ábra.



2.12. ábra: A hagyományos (a) és a „hurkos” (b) típusú vízszintes hőcserélő csővezeték rendszer beépítésének egy-egy lehetséges megoldása (Coccia et al., 2013)

A „hurkos” típusú csővezeték rendszer kb. 20-30 %-kal nagyobb teljesítményű, azonban a cső szükséglete közel kétszer akkora, mint a hagyományos csőrendszer esetén. A vízszintes beépítés nagy hátránya, hogy a lerakó művelése során a már telepített ágak megsérülhetnek. Ezt homok rétegbe való ágyazással csökkenteni lehet, azonban ez szintén többlet költséget jelent.

2.5. A hulladékok hőtani tulajdonságai

A hulladékok hőtani tulajdonságainak vizsgálata előtt célszerű tisztázni a hővezetés, illetve a hőátadás jelenségét, amely alapelve, hogy a hőmérséklet homogén eloszlása termikus egyensúlyt eredményez, az inhomogén hőmérséklet-eloszlás hatására a belső energia árama alakul ki (Nánási és Bobok, 1988). A későbbi kísérletek során elsősorban a hulladékokban (többfázisú diszperz rendszer) kialakuló hővezetés-, illetve a folyadékok áramlásával járó konvekció (hőcserélési vizsgálatok) szerepe lesz jelentős.

A hulladékok hőtani jellemzésének szempontjából két fő paraméter jöhet szóba: a hővezetési tényező (λ) és fajlagos hőkapacitás (c_m). A hődiffuzivitás (κ) az említett két fő hőtani paraméterből és a vizsgált anyag – ebben az esetben hulladék – halmazsűrűségéből egyszerűen származtatható (2.5.):

$$\kappa = \frac{\lambda}{c_m \cdot \rho_B} \quad (2.5.)$$

2.5.1. A hővezetési tényező (λ)

A hővezetési tényező megadja, hogy időegység alatt mekkora hő halad át egységnyi vastagságú, az áramlásra merőlegesen egységnyi felületű anyagon, egységnyi hőmérsékletkülönbség hatására. Mértékegysége: W/mK, szokásos jele: λ .

Rees, 1980-as vizsgálataiban megállapította, hogy a hulladékok hővezetési tényezője közel azonos a fűrészporéval, amely számszerűleg 0,08 W/mK, 25 °C-on mérve. Lefebvre et al. (2000) a modell fejlesztéseik során egy átlagos hővezetési tényezőt határoztak meg, amely 0,1 W/mK-re adódott. Neusinger et al. (2005) a hulladékokra 1 W/mK-es hővezetési tényezőt javasol. A hőátadás modellezésére Hanson et al. (2006) a 0,23 W/mK-es hővezetési tényezőt alkalmazta egy alaszcai lerakó esetében. Gholamifard et al. (2008) a 0,4 W/mK-es hővezetési tényezőt adta meg az anaerob bomlási fázis metánképződési szakaszának jellemzésére, amelyet később egy francia hulladéklerakót vizsgálva tovább pontosított (0,6-0,8 W/mK). Hanson et al. (2000) laboratóriumi és in-situ vizsgálatokat is végzett a hulladékok hővezetési tényezőjének meghatározása érdekében. A tűszondás módszer segítségével meghatározott hővezetési tényező értékek (0,01-0,7 W/mK) a hulladék összetétele és heterogenitása miatt jelentősen szórnak. Megállapították, hogy a vizsgált hulladék minta hővezetési tényezője elég alacsony, amely megközelíti a jól szigetelő levegőjét. A mért alacsony hővezetési tényező értékeket a hulladék mintában rekedt, nagy térfogathányadban jelen lévő levegővel magyarázták. A szakirodalmi áttekintés alapján kijelenthető, hogy a hulladékok hővezetési tényezője a 0,1-1,5 W/mK tartományba esik.

2.5.2. A fajlagos hőkapacitás (c)

A fajlagos hőkapacitás, megadja azt a hő mennyiséget, amelyet egységnyi tömegű anyaggal kell közölni ahhoz, hogy a hőmérséklete egy kelvinnel megemelkedjék. Mértékegysége: J/kgK, szokásos jele: c_m .

Rees (1980) a mérései alapján megállapította, hogy a hulladékok fajlagos hőkapacitása a – hővezetési tényezőhöz hasonlóan – a fűrészporéhoz hasonló. Houi et al. (1997) és Zanetti et al. (1997) szerint a hulladékok fajlagos hőkapacitása 2200 J/kgK és 2170 J/kgK. Yoshida et al. (1997) a hulladékokban lejátszódó hőátadási jelenség modellezése

során a fajlagos hőkapacitás értékét 3300 J/kgK értékben határozta meg, amelyet a hulladék egyes anyagkategóriáinak elméleti, fajlagos hőkapacitás értékeiből számított. Lefebvre et al. (2000) in-situ vizsgálatok segítségével határozta meg a hulladék fajlagos hőkapacitását. A vizsgált hulladék minta egy 10 m mély furatból származott, a mért értékek 1900-3000 J/kgK között változtak. Hanson et al. (2006) a hőátadás modellezéséhez végzett vizsgálatokat egy alaszki hulladéklerakóban, ahol igen alacsony fajlagos hőkapacitás értéket határozott meg (719 J/kgK). Megállapította, hogy a fajlagos hőkapacitás értéke a depóniában található hulladék anyagkategóriáinak mennyiségétől függ, amely így elméleti úton is megbecsülhető. A szakirodalmi áttekintés alapján kijelenthető, hogy a hulladékok fajlagos hőkapacitás értéke a 719-3000 J/kgK tartományba esik.

2.5.3. A hődiffuzivitás (κ)

A hődiffuzivitásról általánosságban elmondható, hogy a magas hődiffuzivitással jellemezhető anyagok rövidebb idő alatt képesek a hőmérséklet-változásra, ellenben az alacsony hődiffuzivitással rendelkező anyagokkal. A hulladékok hődiffuzivitás értékének meghatározásával kevesen foglalkoznak a szakirodalomban, azonban az értéke a két fő hőtani paraméter mellett a hulladék halmazsűrűségét ismerve meghatározható.

2.5.4. A hulladékok hőtani paramétereinek szakirodalmi összegzése

A hulladékok hővezetési tényező- és fajlagos hőkapacitás értékeinek szakirodalmi összegzése a 2.4. táblázatban látható.

Szakirodalmi forrás	Hővezetési tényező, λ [W/mK]	Fajlagos hőkapacitás, c [J/kgK]
Houi et al. (1997)	0,10	1900-3000
Yoshida et al. (1997)	0,53	3300
Zanetti et al. (1997)	0,0445	2200
Lefebvre et al. (2000)	0,10	1900-3000
Hanson et al. (2006)	0,30	719
Hanson et al. (2008)	0,6–1,5	1200-2200
Rowe et al. (2010)	0,35–0,96	1940-2360
Bonany et al. (2013)	0,67	1400

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

2.6. Hővezetés többfázisú diszperz rendszerekben

A hővezetés jelensége a többfázisú diszperz rendszerekben igen összetett folyamat. A termodinamika alapjait figyelembe véve egy adott rendszer (anyaghalmoz) belső energiájának a megváltozása a következő négy típusú energiacsere következményeként jöhet létre:

- Hőátadás, amit a hőmérséklet és az entrópia;
- Mechanikai energia, vagy más néven a térfogatváltozási munka, amit a nyomás és a térfogat;
- Kémiai energia, amit a vegyérték és a reakcióba lépő anyagok moláris mennyisége; illetve,
- A felületi energia, amit a felületi feszültség és a fázisok közötti felület jellemeznek.

Egyensúlyi állapotban a különféle energiatípusokat jellemző paraméter párok egyike alapvetően meghatározza az egyensúlyi állapotot. Roth (2012) szerint, létezik egy olyan termodinamikai potenciál, amelynek a jellemzői a rendszer méretével egyenesen arányosak, illetve amelynek egyensúlyi állapotban szélső értéke (minimuma) van. Egy többfázisú diszperz rendszer eredő hővezetési tényezőjének vizsgálata során az uralkodó energiacsere típusokat kell figyelembe venni. Egy folytonos egyfázisú anyag belső energiája megegyezik az anyag mikroszkopikus építőelemeinek molekuláris szintű kinetikus energiáinak összegével. A magasabb hőmérséklettel rendelkező atomok, molekulák nagyobb kinetikus energiával rendelkeznek – tehát gyorsabban és nagyobb amplitúdóval rezegnek –, amit a szomszédos molekulák felé képesek átadni. Gyakorlatilag ez az a mechanizmus, amely segítségével a hő az anyagban terjed a magasabb hőmérsékletű részek felől az alacsonyabb hőmérsékletű részek felé. Többfázisú rendszer esetén a hőterjedés a fázishatárokon lévő molekulák között hasonlóan – oszcilláló energiacsere segítségével – megy végbe, mint az előzőleg említett esetben. A különböző anyagok hőtani viselkedése jelentősen függ a fázisváltástól, azaz a halmazállapot megváltozásától. Az eredő hőtani paraméterek a diszperz anyagban lejátszódó mikrofolyamatokat – így a fázisváltást, a rejtett hőt a gőz fázisban és az érzékelhető hőt a folyadék fázisban – is magukban foglalják.

Az energiamegmaradás 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:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + p = 0 \quad (2.6.)$$

A 2.6. képletben p egy nem mechanikai eredetű, térfogati hőforrást jelöl. Bizonyos sziklákban és anyagokban a radioaktív bomlás vagy lassú égés következtében hő keletkezhet és valójában ez a helyzet a hulladéklerakókkal is. Annak ellenére, hogy a 2.6. egyenlet igen régóta ismert a szakirodalomban, a vizsgálataim alapján azt állítom, hogy még nem alkalmazták települési szilárdhulladékok termikus viselkedésének a jellemzésére.

A többfázisú diszperz rendszerekre vonatkozó szakirodalmat áttekintve megállapítható, hogy Maxwell (1865) volt az első, aki nagyon kis koncentrációban jelen lévő monodiszperz szemcséket tartalmazó kétfázisú keverékek eredő hővezetési tényezőjét vizsgálta. A vizsgálatai során feltételezte, hogy a szemcsék között nincs érintkezés, így azok között nem jönnek létre hőhidak. Később Rayleigh (1892), illetve Zehner és Schundler (1970) fejlesztették tovább a Maxwell (1865) által megalkotott modellt. Zehner és Schundler (1970) az egyszerűsített modell alapján feltételezte, hogy a diszperz rész azonos méretű gömb alakú szemcsékből áll. A számításaikhoz az alábbi jelöléseket alkalmazták:

- B : a szemcse alaktényezője,
- λ_e : a durva diszperz rendszer effektív (átlagos) hővezetési tényezője [W/mK],
- λ_2 : a szilárd diszperz rész hővezetési tényezője [W/mK],
- λ_1 : a diszperziós közeg (szilárd, folyadék vagy gáz) hővezetési tényezője [W/mK],
- C : térfogati koncentráció [-],
- k : λ_2/λ_1 a szilárd fázis és a közeg hővezetési tényezőjének az aránya.

Amennyiben a hő áramlása a fázisok elhelyezkedését tekintve sorban megy végbe, akkor az úgynevezett minimális hővezetési tényező a következőképp írható fel (2.7.):

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_1} = \frac{k}{C + (1 - C) \cdot k} \quad (2.7.)$$

A hővezetés szempontjából a két fázis párhuzamos elhelyezkedése esetén az úgynevezett maximális hővezetési tényezőhöz tartozó egyenlet az alábbi formában írható fel (2.8.):

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_1} = (1 - C) + C \cdot k \quad (2.8.)$$

Maxwell (1865) egészen kis koncentrációkra felírt összefüggése (2.9.) a következő volt:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_1} = \frac{k + 2 - 2 \cdot C \cdot (1 - k)}{k + 2 - C \cdot (1 - k)} \quad (2.9.)$$

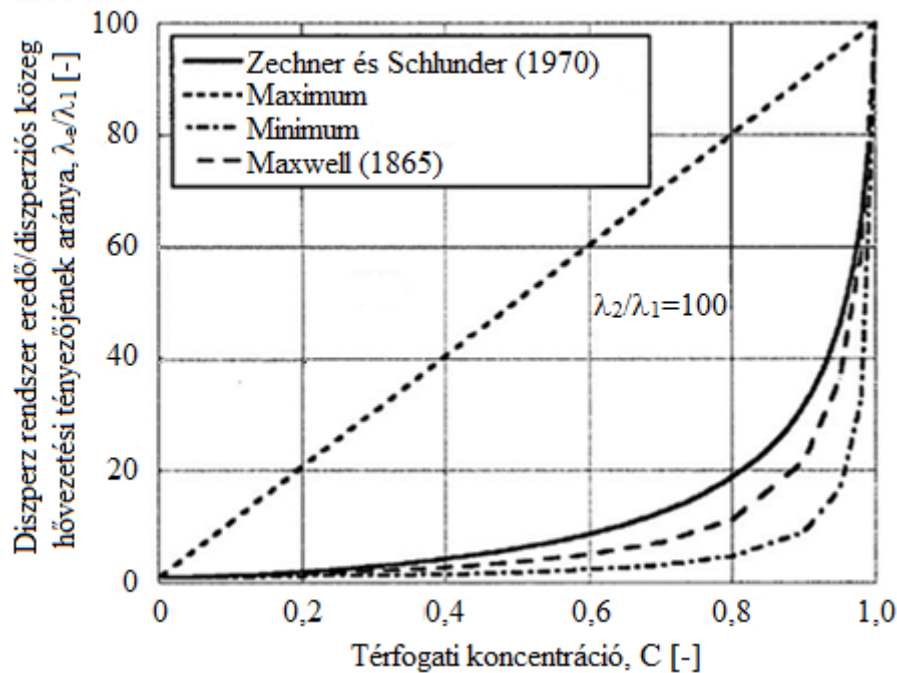
Zehner és Schlunder (1970) nagyobb koncentrációk esetére továbbfejlesztették a modelleket, amelyekben már a szemcse alakját is figyelembe vették (2.10.):

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_1} = 1 - \sqrt{1 - \psi} + \frac{2 \cdot \sqrt{1 - \psi}}{1 - \xi \cdot B} \left[\frac{(1 - \xi) \cdot B}{(1 - \xi \cdot B)^2} \cdot \ln \left(\frac{1}{\xi \cdot B} \right) - \left(\frac{B + 1}{2} \right) - \frac{B - 1}{1 - \xi \cdot B} \right] \quad (2.10.)$$

ahol,

$$\psi = 1 - \left[\frac{B \cdot (3 - 4 \cdot B) + B^2 + 2 \cdot \ln B}{(B - 1)^3} \right]^2 \text{ és } \xi = \frac{1}{k} \quad (2.11.)$$

Az említett modellek alapján a kétfázisú durva diszperz rendszer eredő hővezetési tényezője a teljes koncentrációt figyelembe véve a 2.13. ábrán látható, abban az esetben, amikor a szilárd diszperz rész hővezetési tényezője százszorosa ($\lambda_2/\lambda_1=100$) a diszperziós közeg hővezetési tényezőjének.



2.13. ábra: Monodiszperz gömb alakú szemcséket tartalmazó durva diszperz rendszerek hővezetési tényezője a koncentráció függvényében (Kandula, 2009)

2.7. A hulladék aerob in-situ stabilizációja, az utógondozási idő csökkentése

Az utóbbi években a hulladéklerakók utógondozása során az ellenőrzött- és fenntartható biostabilizáció szerepe egyre inkább megkerülhetetlenné vált. A bezárt lerakók rekultivációja, a jogi szabályozásnak megfelelő utógondozása – főként a hosszútávú csurgalékvíz- és gázképződés miatt – rendkívül nagy költségekkel jár. A hulladéklerakók utógondozásának időtartama Magyarországon és a nemzetközi gyakorlatban is 30 év. Jelen kutatási munkát tekintve az említett problémakör szintén megkerülhetetlen lesz, ezért mindenképpen foglalkozni kell a hulladék stabilizációjának gyorsításával, az utógondozási idő csökkentésével. A kapcsolódó szakirodalom alapján, a hulladék stabilizációja, illetve az utógondozási idő csökkentése a gyakorlatban leginkább az alábbi két módszerrel valósítható meg:

- A lerakó aerob in-situ stabilizálásával, illetve
- A depónia vízháztartásának szabályozásával.

A hulladéklerakók aerob in-situ stabilizálását abban az esetben célszerű alkalmazni, ha a depóniában már nincs hasznosítható mennyiségben metán, ugyanakkor az még mindig jelentős környezeti veszélyt jelent (Heyer et al., 2005; Ritzkowski et al., 2006). Ezzel

szemben, a hulladéklerakók utólagos nedvesítése, a vízháztartás szabályozása elsősorban akkor alkalmazandó, ha a depóniában még jelentős mennyiségű hasznosítható metángáz van jelen, valamint a lerakó aljzat- és zárószigetelő rendszerrel is rendelkezik (Szabó és Szabó, 2012).

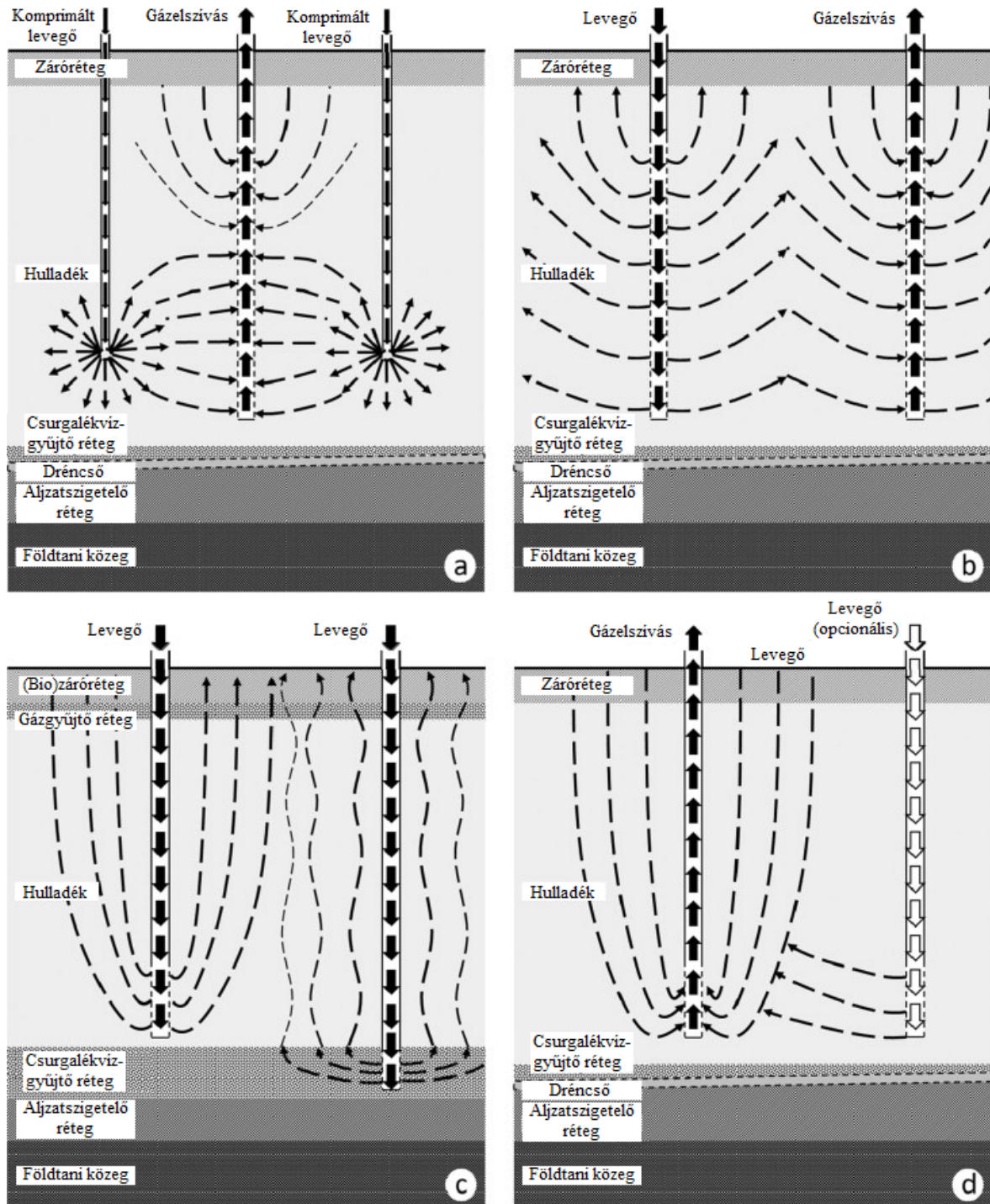
Az átlegegőztetési aerob in-situ stabilizálás a szerves anyag degradációjának oxidatív módszerrel történő felgyorsítása, amely igen előnyös alternatívát kínál az utógondozási idő csökkentésére (Hrad és Huber-Humer, 2017). Az aerob stabilizálás előkészítő műveletként is alkalmazható a hulladék bányászatát megelőzően (Raga és Cossu, 2014; Raga et al., 2015), de akár a gázgyűjtő- és kezelő rendszerrel nem rendelkező idősebb hulladéklerakók kármentesítésére is megoldást jelenthet (Hrad et al., 2013; Ritzkowski et al., 2006). Amennyiben az átlegegőztetés során a csurgalékvizet a depóniába visszajuttatjuk, a hulladék stabilizációja felgyorsítható, a csurgalékvíz környezetre veszélyt jelentő komponenseinek a koncentrációja csökkenthető (El-Fadel et al., 2013). Továbbá a klímaváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport megállapította, hogy a hulladéklerakók levegőztetéssel történő aerob stabilizációja megfelelő stratégiát jelent az üvegházhatást okozó gázok csökkentésére a hulladékágazatban (Ritzkowski és Stegmann, 2010). Az átlegegőztetéssel történő aerob stabilizáció tulajdonképpen egy rövid, szabályozható időtartamú beavatkozás, amely célja a deponált hulladék nemcsak jelenkori, hanem hosszútávú emisszióinak csökkentése (Heyer et al., 2005), azaz:

- A szénforgalom-, illetve a mineralizációs folyamatok arányainak növelése,
- A hulladék biostabilizált állapotának elérése,
- A csurgalékvíz minőségének javítása,
- A gázképződési potenciál csökkentése,
- A depónia konszolidációjának felgyorsítása, valamint
- Az aktuális metánkibocsátás mérséklése.

Műszaki- és üzemeltetési szempontból is különböző aerob stabilizációs technológiákról beszélhetünk, amelyeket részletesen Ritzkowski és Stegmann (2012) ismertet:

- Lökésszerű nyomáshullámok melletti (3-7 bar), részben oxigénnel dúsítva történő aerob stabilizálás (2.14.a. ábra),
- Nyomás és szívás együttes alkalmazása melletti stabilizálás (2.14.b. ábra),
- Alacsony nyomás (0,1-0,5 mbar) melletti átlegegőztetés (2.14.c. ábra),
- Elszívással történő aerob stabilizálás (2.14.d. ábra).

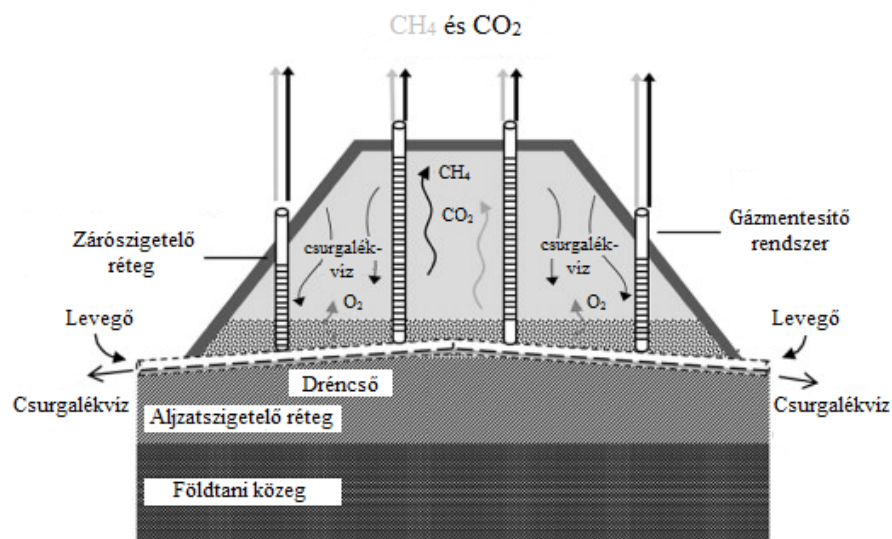
Az alacsony nyomás melletti átlegeőztetési technológián belül megkülönböztethetünk gázelszívással történő aktív átlegeőztetést, levegő ventilációjával történő passzív átlegeőztetést, illetve energiatakarékos, hosszútávú átlegeőztetést.



2.14. ábra: A különböző levegőztetési aerob in-situ stabilizálás koncepciói

(Ritzkowski és Stegmann, 2012)

Az felsorolt stabilizálási technológiák esetében a levegőztetés kútrendszer alkalmazásával valósul meg. A levegőt betápláló kutak szűrőzése a depónia mélyebb részein, a csurgalékvízgyűjtő réteg felett történik, elősegítve a depóniatest minél jobb átlegegőztetését, valamint gátolva a felszínközeli levegő cirkulációját (Szabó és Szabó, 2012). Abban az esetben, ha kellő vastagságú a csurgalékvízgyűjtő réteg és az hatékonyan működik, azaz a felső része telítetlen, akkor a levegő betáplálás történhet a csurgalékvízgyűjtő rétegben is (szemi-aerob koncepció). A szemi-aerob lerakó koncepcióját a 2.15. ábra mutatja.



2.15. ábra: A szemi-aerob lerakó koncepciója
(Ritzkowski és Stegmann, 2012)

Az elmúlt évtizedben az átlegegőztetéses aerob in-situ stabilizálás laboratóriumi- és félüzemi megvalósításával foglalkozó publikációk száma jelentősen megnőtt. Az említett tanulmányok többségében a szerzők az átlegegőztetés hatását vizsgálják a hulladék szilárd-, folyékony- és gáz fázisainak esetében (Brandstätter et al., 2015; Hrad et al., 2013; Ritzkowski et al., 2016). A technológia ipari alkalmazására Európában (Heyer et al., 2005; Hrad et al., 2013; Ritzkowski et al., 2016), Észak-Amerikában (Beatty et al., 2009), valamint Ázsiában (Liu et al., 2015; Matsuto et al., 2015) is számos példa található. A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítható, hogy a technológia széleskörű alkalmazásának ellenére, a leginkább egy jól definiált, általánosan elfogadott kritérium rendszer hiányzik, amely segítségével a hulladékstabilizáció sikeressége jellemezhető. Ritzkowski és Stegmann (2013) a hulladék stabilizációjának sikerességére a tapasztalataik alapján már 6 kritériumot definiáltak, amelyekhez tartozóan a célértékeket is megadták. Az említett 6 kritérium

többségét a szénmérleg alapján fogalmazták meg. A leírtak tükrében tehát, a jövőt tekintve az alábbi kérdések megválaszolása nélkülözhetetlen:

- Pontosan mennyi időt vesz igénybe egy adott hulladéklerakó aerob stabilizálása, illetve hogyan, milyen paraméterek alapján becsülhető annak időtartama előzetesen?
- Melyek a valós célértékek a hulladéklerakók biostabilizálásának tekintetében és hogyan lehet azokat hitelesíteni?

A válaszok minden bizonnyal döntő jelentőséggel bírnak majd, hiszen azok közvetlenül kapcsolódnak az aerob stabilizáció-, ezáltal a hulladéklerakók utógondozásának költségeihez.

2.8. A szakirodalom kutatás alapján levont következtetések

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 vezetékes hőátadását leíró differenciálegyenlet (2.6.) 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 méretű magvalósításáról nincsenek információk.

3. VIZSGÁLATI- ÉS ÉRTÉKELESI MÓDSZEREK

Az általam végzett kutatómunka a hazai- és nemzetközi szakirodalom tanulmányozását, az értekezésben szereplő kísérleti- és vizsgálati módszerek fejlesztését, laboratóriumi kísérleti vizsgálatokat, a kapott eredmények kiértékelését, valamint következtetések levonását foglalja magába.

Az értekezésben foglalt tudományos eredményeim szisztematikus laboratóriumi- és in-situ kísérleteken alapulnak, amelyeket a Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetben, illetve az .A.S.A. Magyarország Kft. gyáli telephelyén végeztem el.

Az 1. fejezetben megfogalmazott célkitűzésekkel összhangban az alábbi kísérleti berendezések és a hozzájuk tartozó kiértékelési módszerek fejlesztésében vettem részt:

- Hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer (5.1. és 7.1. fejezetek),
- A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés (5.2. és 7.2. fejezetek),
- A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés (5.3. és 7.3. fejezetek),
- Félüzemi hőkinyerő- és hőhasznosító rendszer (5.4. és 7.4. fejezetek).

4. AZ IN-SITU KÍSÉRLETEK HELYSZÍNE

A depónia hőmérséklet-eloszlásának vizsgálatát, a hulladékok hőtani paramétereinek meghatározását, illetve a félüzemi hőkinyerési- és hasznosítási vizsgálatokat az .A.S.A. Magyarország Kft. gyáli regionális hulladéklerakó telephelyén végeztük el (4.1. ábra). A telep 4 km-re fekszik Budapest határától, Gyál és Felsőpakony között, közvetlenül az M0-ás autópálya mellett. A telephelyen a környező településekről éves szinten megközelítőleg 100-130 ezer tonna vegyesen gyűjtött települési szilárdhulladék kerül lerakásra.



4.1. ábra: Az .A.S.A. Magyarország Kft. gyáli hulladéklerakója

A depónián jelenleg öt lerakási ütem található, amelyek közül az első négy ütemben végeztünk vizsgálatokat. Az egyes ütemek befogadó kapacitását, illetve a deponálás időtartamát a 4.1. táblázat tartalmazza.

Ütem azonosító	Befogadó kapacitás [m ³]	A lerakás időtartama
I.	377 596	1999-2003
II.	426 322	2003-2006
III.	593 059	2006-2009
IV.	400 000	2009-
V.	423 900	2012-

4.1. táblázat: A gyáli regionális hulladéklerakó ütemeinek befogadó kapacitása, illetve a deponálás időtartama

5. ALKALMAZOTT KÍSÉRLETI ESZKÖZÖK

5.1. A hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer

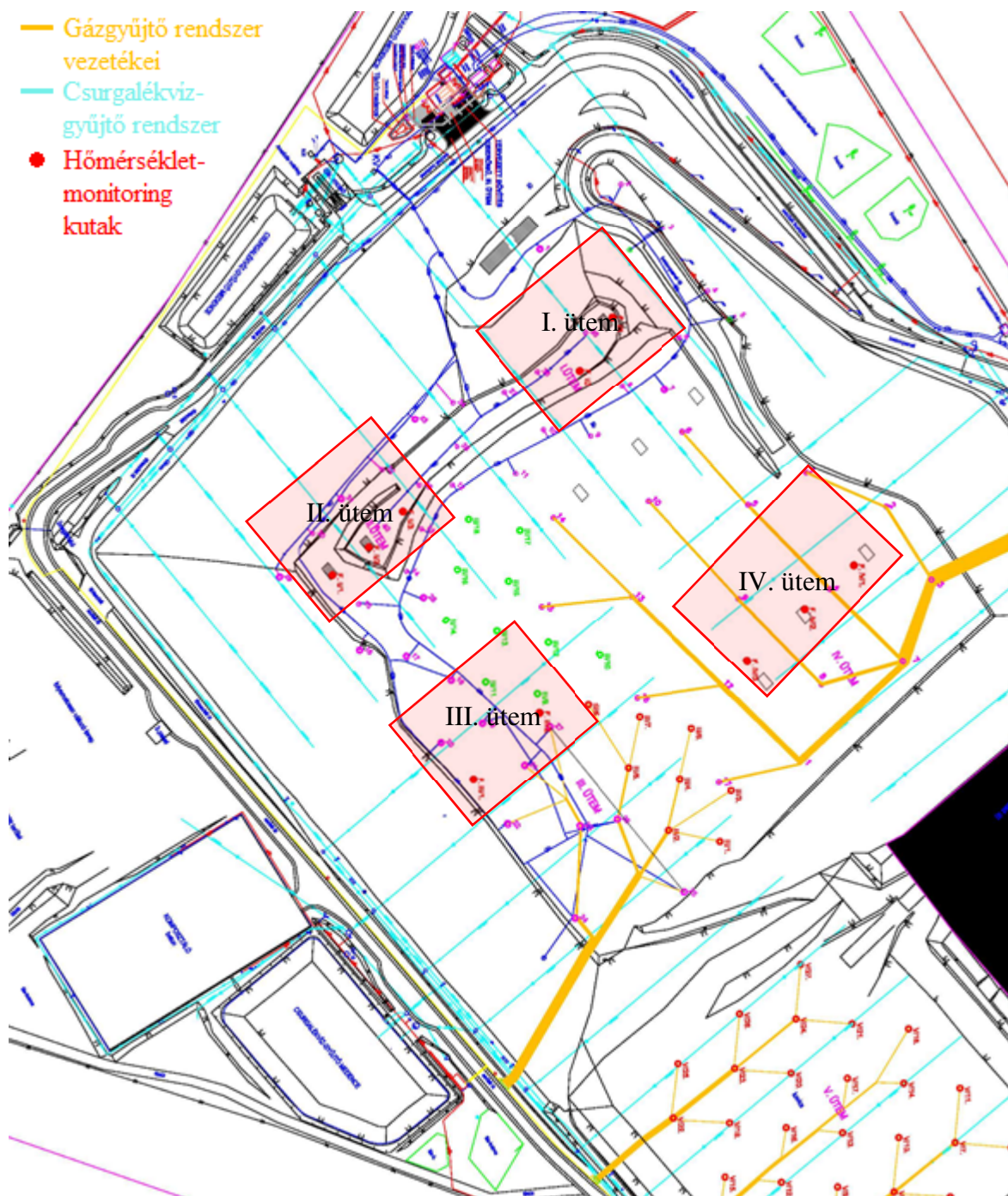
A kutatási munka első célkitűzése egy olyan hőmérséklet-eloszlás mérő rendszer fejlesztése volt, amellyel 10 pontban, legalább 16 m-es mélységig a hőmérséklet hosszútávon megfigyelhető. Az első lépés a hőmérséklet-érzékelő kiválasztása volt. A feladat igen nehéz, mivel a lebomló hulladék és a keletkező csurgalékvíz igen agresszív közeg, valamint a nagy mélységben elhelyezett érzékelő jelét ki kell olvasni, továbbá a lerakón nem áll rendelkezésre áramforrás. Mindezek alapján a választás a National Semiconductor gyár LM35CN típusú hőmérsékletmérő szenzorára esett. A szenzort úgy kalibrálták, hogy 10 mV feszültségváltozás 1 °C-nak feleljen meg 0,1 Ω kimenő elektromos impedancia ($I_{ki} < 1$ mA) mellett. Ebben az esetben speciális leolvasóra nincs szükség, elegendő egy digitális multiméter, mert a mért feszültség megfelel a hőmérséklet számszerű értékének. A tápellátásra egy normál 9 V-os elem is alkalmas. A szenzor mérési tartománya -40 °C és +110 °C közötti, amelynek pontosságát a gyártó $\pm 1-1,5$ °C-ban garantálja.

Nagy kihívást jelentett a hőmérséklet-érzékelő szenzorok elhelyezése a depóniatestet alkotó agresszív közegben. Számos tényező mérlegelése után a megoldást a KPE csőből készült védőburkolat jelentette, amely a depóniatestbe fúrt lyukba helyezhető, ebbe már a hőmérő szondák is leengedhetők. A furatban létrejövő hőtranszport károsan befolyásolhatja a mérést, ezért a hőérzékelőket egy tömszelencével ellátott műanyag házba szereltük, amelyek külső átmérője jól illeszkedett a KPE cső belsejéhez. A savas csurgalékvíz miatt is szükség volt az érzékelők megfelelő védelmére. A tömszelencével szerelt műanyag ház megfelelő védelmet biztosít, a hőtehetetlensége pedig azért nem jelentett problémát, mert a lerakó belsejében a hőmérséklet lassan változik, bőven van idő arra, hogy az érzékelő átvegye a környezete hőmérsékletét (5.1. ábra).



5.1. ábra: A furatok kialakítása a depóniatestben és az elkészült hőmérséklet-eloszlás mérő szonda

Minden egyes fúráshoz 10 mérőhelyes hőmérő rendszert terveztünk. A depónia I. és III. ütemébe 2-2, míg II. és IV. ütembe 3-3 vizsgáló kutat alakítottunk ki, amelyekbe a szondákat telepítettük. A hőmérséklet-monitoring kutak elhelyezkedését szemlélteti az 5.2. ábra.

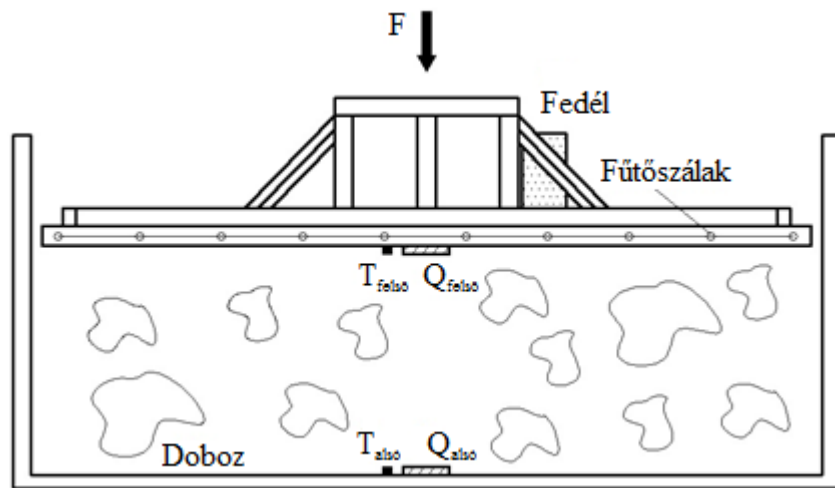


5.2. ábra: A hőmérséklet-monitoring kutak elhelyezkedése a gyáli regionális hulladéklerakóban

5.2. A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés

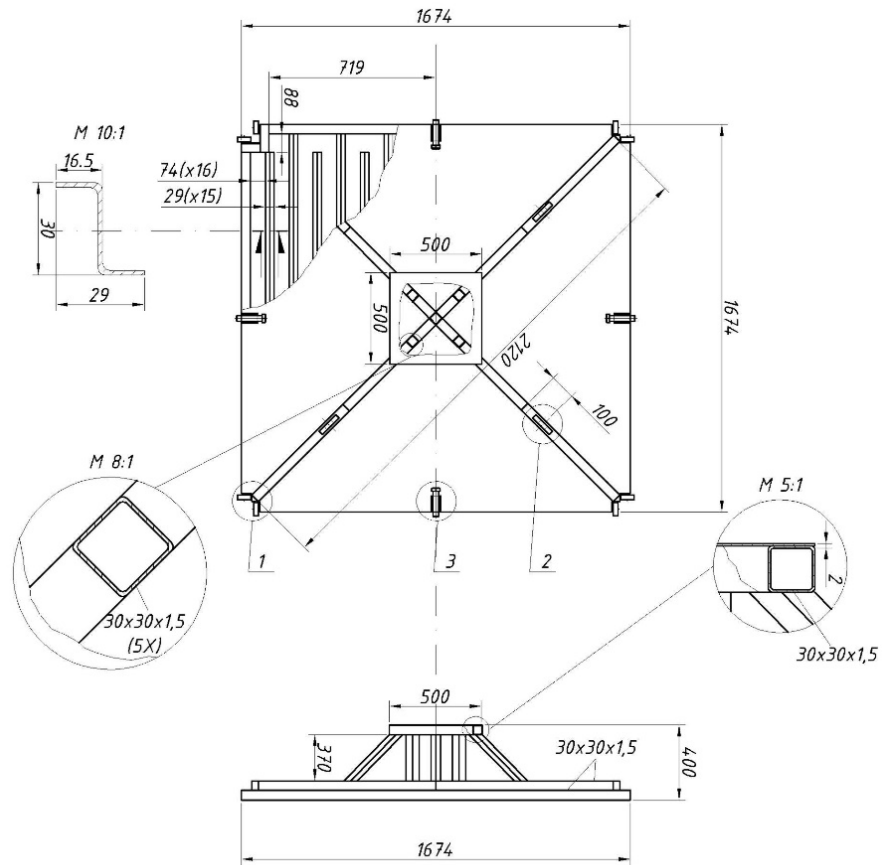
A berendezés megtervezésekor elsősorban a hővezetési tényező mérése volt a cél, a többi paraméter mérése párhuzamosan- vagy kiegészítő méréssel valósítható meg. A hővezetési tényező mérésére alapvetően három különféle alapelv szerint van lehetőség. Az

első a tökéletest megközelítő teljes hőszigetelés, amikor hőszigetelés útján tudjuk a hőárammérő szenzoron keresztül haladó hőfluxust behatárolni, úgy hogy a hőáram fluxus vektorok egymással párhuzamosak, a szenzorra pedig merőlegesek legyenek. A második alapelv szerint az oldalirányú hőveszteséget kell pótolni egy szabályozott segéd fűtőrendszer által. A harmadik módszer szerint olyan geometriájú mérőberendezést kell építeni, amiben a teljes hőáramnak csak egy belső, jól meghatározott keresztmetszetét mérjük. A belső mért keresztmetszet lényegesen kisebb, mint a teljes keresztmetszet, így a mért keresztmetszetben a hőáram vonalak párhuzamosak, az oldalirányú veszteségek pedig nem befolyásolják a mérést. A Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében megépített in-situ mérőberendezés a harmadik elven alapul, a berendezés vázlata az 5.3. ábrán látható.

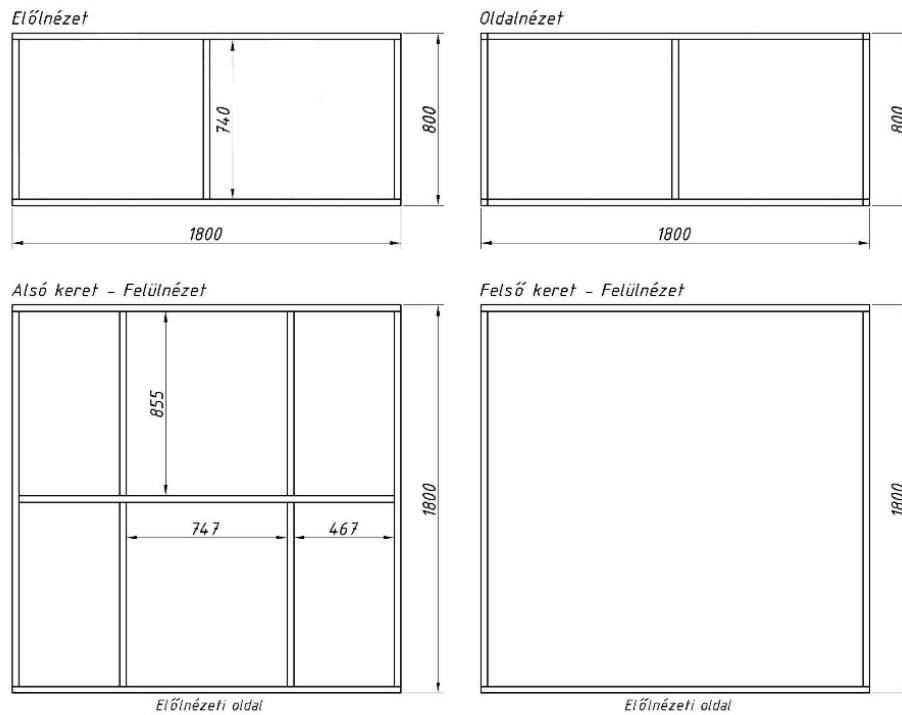


5.3. ábra: A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés sematikus rajza

A berendezés két fontos része a fűtéssel ellátott fedél (5.4. ábra) és az acél doboz (5.5. ábra).



5.4. ábra: A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés fedele

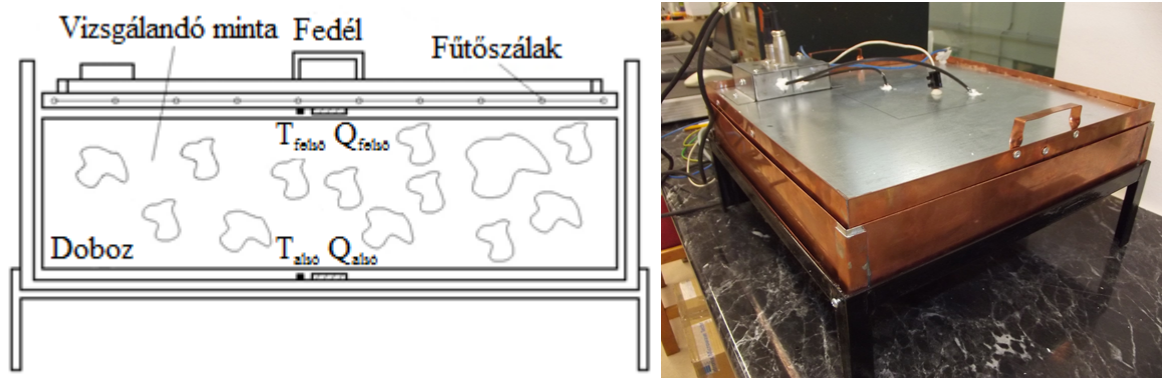


5.5. ábra: A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés doboza

A berendezés fedélébe khantál ellenálláshuzalból és kerámia szigetelőgyűrűkből kialakított fűtőegységet építettünk be. A beépített négy fűtőszál egyenletesen lefedi a teljes $1,8 \times 1,8$ m-es felületet. A fűtőszálak kapcsolásától függően a berendezés két teljesítmény szinten fűthető (440 W és 1760 W). A fűtőrendszert közvetlenül a 230 V effektív feszültségű – megfelelő érintésvédelemmel ellátott – hálózatra kell kapcsolni, így a fűtőteliesség egy-egy mérés során közel állandónak tekinthető. A hőáram mérésére 2 db AHLBORN FQA018C, 100×100 mm területű, 2 mm vastag hőárammérő lapot alkalmaztunk. A hőárammérő lap nagyszámú sorba kapcsolt hőelemet tartalmaz, a kimenő mV nagyságrendű feszültség jel közvetlenül a felületegységen áthaladó hőmennyiséggel arányos. A hőárammérő lapok gyárilag kalibráltak ($9,4 \text{ W/m}^2 - 1 \text{ mV}$). Egy hőárammérő lapot a fedél közepére és egy másikat az acél doboz aljának a közepére helyeztünk el. Mindkét hőárammérő lapot 2 mm-es acéllemezből készült burkolattal láttuk el az erős mechanikai behatások elleni védelem céljából. A hőmérséklet mérését 2 db National Semiconductor gyártmányú LM35 CN típusú integrált hőmérséklet-érzékelő szenzor segítségével valósítottunk meg, mind a fedélben, mind a doboz aljában (közvetlenül a hőárammérő lapok mellett). Az 5-30 V tartományban működőképes TO92 (plastic) tokozású szenzor $10 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ kimenő jelet ad 0,1 ohm kimenő impedancia mellett ($I_{ki} < 1 \text{ mA}$), ezért a kapcsolódó jelvezeték ellenállása nem befolyásolja a mérést. A szenzor $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ és $+150 \text{ }^\circ\text{C}$ tartomány átfogására alkalmas. Kimenete lineáris, a mérési hiba kisebb, mint $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés

A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés működési (5.6. ábra) elve megegyezik az előző fejezetben bemutatott berendezéssel. A berendezés fedele és a nyitott doboz a jobb hőátadás biztosítása érdekében ebben az esetben vörösrézről került kialakításra. A réz hővezetési tényezője 399 W/mK , ami egy nagyságrenddel jobb, mint a hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére alkalmazott acélból kialakított berendezésnél. A fedélbe szintén khantál ellenálláshuzalból és kerámia szigetelőgyűrűkből kialakított fűtőegység került beépítésre. A fedél felülete 400×400 mm, a berendezés maximális magassága 60 mm.



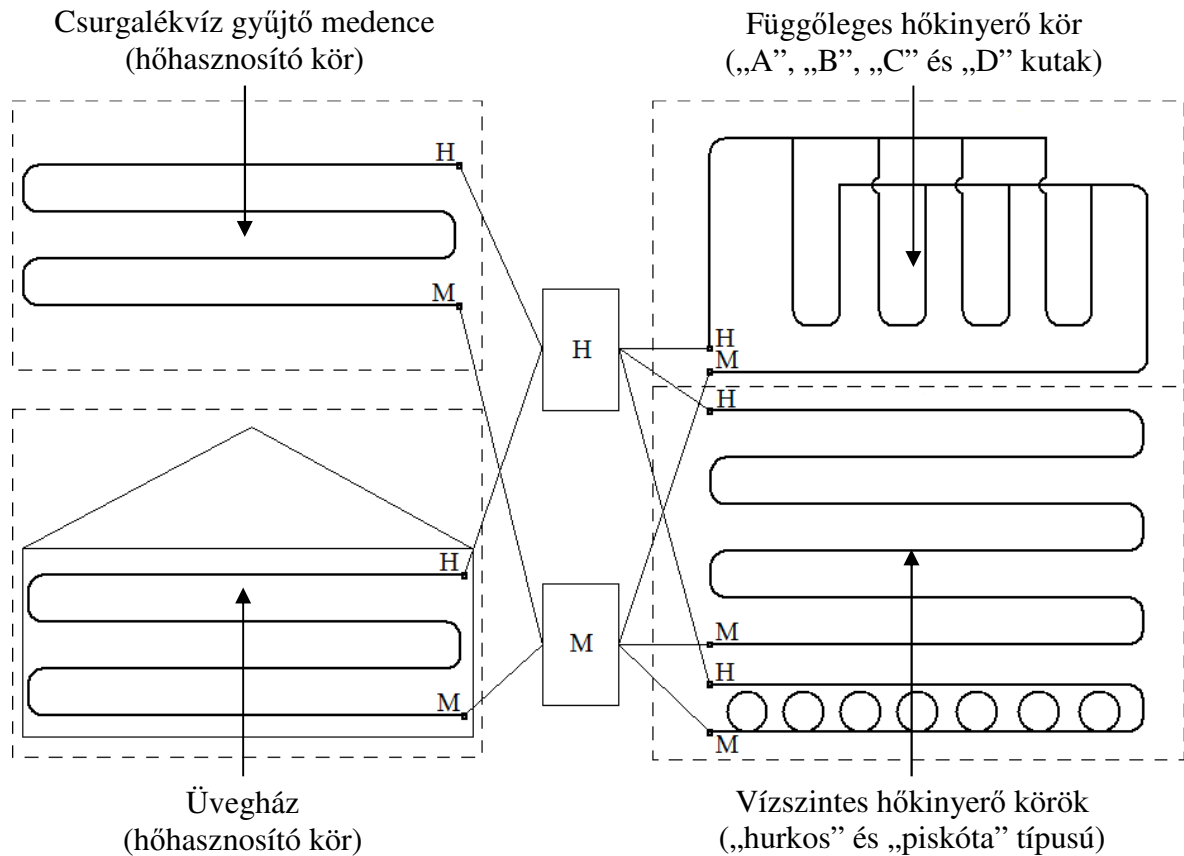
5.6. ábra: A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés sematikus rajza és képe

A fűtőszálak elektromos táplálása nem közvetlenül a 230 V effektív feszültségű hálózatról, hanem 0-80 V közötti változtatható feszültségű laboratóriumi tápegységről nyerhető, így a berendezés rugalmasan igazítható az eltérő tulajdonságú anyagok vizsgálatához.

5.4. A gyáli regionális hulladéklerakóba épített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia

A Depónahő-hasznosítási technológia kidolgozása (DHH) című projekt keretében az alábbi (5.7. ábra) fő technológiai rendszereket építettük ki:

- I. Hőkinyerő rendszer, művelés alatt álló depóniába (vízszintes hőkinyerő)
 - a. „hurkos” típusú hőcserélő (4×40 m) alapterületen
 - b. „piskóta” típusú hőcserélő (16×40 m) alapterületen
- II. Hőkinyerő rendszer, lezárt vagy feltöltött depóniába (függőleges hőkinyerő) (4 db hőkinyerő kút és 1 gázmonitoring kút)
- Összekötő, hőszigetelt csővezetékrendszer, szerelvényekkel
- Gépészeti berendezések (gerincvezetékek, szivattyúk, szerelvények, stb.) fém konténer házban.
- I. Hőhasznosító rendszer (üvegház – téli üzem)
- II. Hőhasznosító rendszer (csurgalékvíz medence – nyári üzem)
- Számítógépes- és manuális mérésadatgyűjtő rendszer

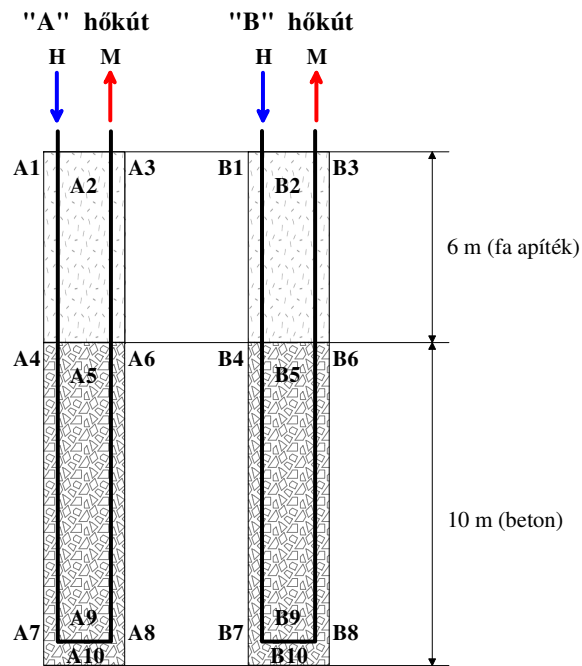


5.7. ábra: A hőcserélő és hőhasznosító rendszer elvi vázlata
(H - hideg, előremenő csőág; M - meleg, visszatérő csőág)

A csőrendszert 63 mm-es külső átmérőjű, 3,8 mm falvastagságú HDPE műanyag csövekből alakítottuk ki, amelyet a tűzcsaphálózatból nyert vízzel töltöttünk fel.

5.4.1. A függőleges hőkinyerő kör

A függőleges kutakat a III. depónia ütembe telepítettük. A 4 db kút egymással és a hőközponttal úgynevezett Tichelmann-rendszer szerint kapcsoltuk össze, amely lényege, hogy a párhuzamosan kapcsolt csővezetékek mindegyikének azonos a csőhossza, ezért a kialakuló hőcserélő közeg térfogatáram is azonos lesz. A függőleges hőkinyerő kör teljes csőhossza 630 m. A függőleges kutak közül az első két kút csővezetékein és a csöveket rögzítő vashálón hőmérsékletmérő szenzorokat építettünk be. A mért hőmérséklet adatokat a konténer-hőközpontban található számítógép rögzíti. A kutak alsó szakaszait betonnal, a felsőket pedig fa aprítékkal töltöttük fel a jobb hővezetés-, a hőszigetelés-, illetve a mechanikai stabilitás biztosításának érdekében (5.8. és 5.9. ábra).



5.8. ábra: A függőleges kutak sematikus rajza a beépített hőmérsékletmérő szenzorok helyével és jelöléseivel
(H - hideg, előremenő csőág; M - meleg, visszatérő csőág)

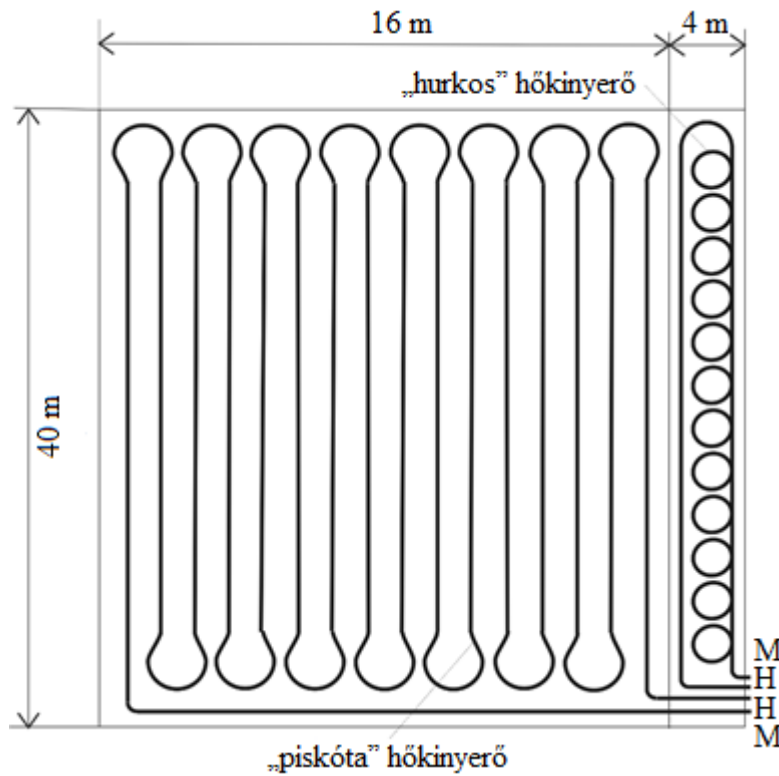


5.9. ábra: A függőleges kutak kialakítása és feltöltése

5.4.2. A vízszintes hőkinyerő kör

A vízszintes hőkinyerő mező két hőcserélő kört tartalmaz, amelyeknek a kialakítása eltérő. Az egyik hőkinyerő mezőt a csővezetékől hurkokat képezve alakítottuk ki („hurkos” típusú), míg a másik mezőben a csővezeték párhuzamosan fut oda-vissza (ún. „piskóta” típusú) (5.10. és 5.11. ábra). A mező alapterülete 800 m². A mező a még feltöltetlen V. ütem területén található. Mindkét kör külön csővezetéken halad a hőközpont konténerhez. A

tervek alapján a „hurkos” típusú hőkinyerő kör kialakításához 490 m, míg a „piskóta” típusú hőkinyerő körhöz 950 m csővezetékot használtunk fel.



5.10. ábra: Vízszintes hőkinyerő rendszer kialakítása
(H - hideg, előremenő csőág; M - meleg, visszatérő csőág)



5.11. ábra: A „hurkos” és a „piskóta” típusú vízszintes hőkinyerő körök takarás előtti képe

5.4.3. A csurgalékvízgyűjtő medence

A hőhasznosító rendszer egyik eleme a lerakó egyik csurgalékvízgyűjtő medencéje, amiben a vízfelszín alatt 20 cm mélységben fut a 305 méter hosszúságú „piskóta” alakú csővezeték.

5.4.4. Az üvegház

A hőhasznosító rendszer másik eleme az üvegház (5.12. ábra). A konténer hőközpontba érkező meleg fűtőközeget az üvegházba is lehet vezetni. Az üvegház alapterülete $3,8 \times 8,3 \text{ m} = 31,5 \text{ m}^2$. A lábazati fal 15 cm széles, melyre kívülről 10 cm XPS hőszigetelés került. Az üvegház szerkezetét tekintve fa, melyre 16 mm-es polikarbonát borítás került. A tetőgerinc magassága 3,54 m. A hőcserélő felületének nagysága $50,68 \text{ m}^2$.



5.12. ábra: Az elkészült üvegház és a gépészeti konténer

5.4.5. A hőközpont konténer

A hőkinyerő rendszerekből a felmelegedett hőcserélő közeg a hőközpontba jut. A hőelosztás az üvegház és a csurgalékvíz medence közvetlen közelébe telepített konténer hőközpontban történik. A hőközpontban mérésre kerül az egyes hőcserélőkről érkező- és az egyes felhasználási helyekre kiadott munkaközeg térfogatárama és hőmérséklete. Az

adatokat egy központi adatgyűjtő segítségével regisztráltuk. A rendszer tágulási tartállyal rendelkező zárt fűtési rendszer. Minden fűtési kör mennyiség szabályozó szeleppel ellátott, a mérési adatok alapján a keringetett összes vízmennyiség és az egyes ágak egymáshoz viszonyított vízmennyisége is szabályozható.

5.4.6. A számítógépes mérésadatgyűjtő rendszer

A konténerbe telepített számítógépes mérésadatgyűjtő rendszer számos mérési adatot tárol el automatikusan, 5 perces időközönként. A nagyszámú paraméter azonosítására két-, illetve hárombetűs jelölési rendszert dolgoztunk ki. A rögzített paraméterek főcsoportokra bontva:

- „A” - jelű függőleges kút hőmérsékletei különböző mélységekben,
- „B” - jelű függőleges kút hőmérsékletei különböző mélységekben,
- Depónián elhelyezett műszerdoboz hőmérséklete (mérési elektronika számára),
- A konténer hőmérsékleti adatai,
- A fűtőközeg hőmérsékleti adatai,
- Az üvegház hőmérsékleti adatai,
- A fűtőközeg keringési adatai,
- A csurgalékvízgyűjtő medence hőmérsékleti adatai.

5.4.7. A megépített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia beüzemelése

A kivitelezési munkálatok 2014. augusztus 1-jére fejeződtek be. A rendszer feltöltése 2014 augusztusában történt. A rendszer légtelenítése nehéz feladatnak bizonyult, mivel a beépített szivattyúkat gyárilag feltöltött állapotra méretezték, amikor a munkaközeget csak körbe kell jártniuk a rendszerben, tehát nem képesek 40 m magas emelőmagasságra szállítani. Éppen ezért, a terveknek megfelelően, a depónia rézsűjére került a csővezeték rendszer legmagasabb pontja, ahová csapokat építettünk be. A csapokon keresztül 2014. augusztus 21-én sikeresen feltöltöttük a rendszert, a szivattyúk a légtelenített csőrendszerben már gond nélkül körbejárták a munkaközeget (vizet), majd ezt követően kezdtük el a félüzemi kísérleteket.

6. ELVÉGZETT KÍSÉRLETEK

6.1. A hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer

Az 5.1. fejezetben már részletesen ismertettem a lerakóba beépített hőmérséklet-eloszlás monitoring rendszert, amely 10 mérőhelyre telepített 100 hőmérsékletmérő szenzorból áll. A hőmérséklet-monitoring kutak adataiból egy közel 3 éves időtartamra vonatkozó adatbázist készítettem. Az adatbázis létrehozása során az első lépés az adatok rendezése, rendszerezése volt, majd második lépésként a hibás mérési adatokat szűrtem ki. A mérési hibák oka főként a csatlakozók korrodálódása volt, amelyeket a további korrodálódás elkerülése érdekében az .A.S.A. Magyarország Kft. szakemberei rendszeres időközönként tisztítottak.

Az elkészült adatbázisból az egyes hőmérséklet-monitoring kutakra – és így az ütemekre is – jellemző ábrákat készítettem. Minden egyes hőmérséklet-monitoring kút esetében két ábrát készítettem el. Az első ábra az idő függvényében szemlélteti az egyes mélységekhez tartozó hőmérsékleti értékeket, jelölve a külső hőmérsékletet is (7.1. és 7.3. ábrák). A második ábrán (7.2. és 7.4. ábrák) átlaghőmérséklet értékeket évszakokra bontva ábrázoltam a mélység függvényében.

Az adatbázis létrehozása és az ábrák elkészítése után, a következő lépés a kiértékelés volt, amely során a cél a hőmérséklet-monitoring kutak által mért különböző hőmérsékleti tendenciák jellemzése, például valamilyen illeszkedő görbe segítségével. A kellően hosszútávú monitoring értékekre illesztett görbék alapján becsülhető a lebomlás hatására történő felmelegedéshez kapcsolódó maximális hőmérséklet, illetve a későbbi, adott hőmérsékletre történő lehűléshez szükséges időtartam is.

6.2. A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés

A kísérleti berendezés segítségével 2013-ban egy szisztematikus kísérletsorozatot végeztünk el a gyáli regionális hulladéklerakó telepen. Az elvégzett 25 mérésből 17 mérés volt abban az értelemben sikeres, hogy a mért értékekből a hőtani paraméterek számíthatók. Néhány esetben, például áramszünet vagy szoftverhiba miatt, a mérés sikertelen volt. A kísérletsorozat alatt az alábbi három paramétert változtattuk szisztematikusán: a fűtési teljesítményt (440 W vagy 1760 W), a deponált hulladék korát (a hulladéklerakó egyes ütemeit figyelembe véve), illetve a hulladék minta mélységét a depóniában.

6.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés

A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel első lépésben ismert hővezetési tényezőjű anyagokon végeztem kalibrációs méréseket (OSB lap, EPS lemez). A kalibrációs méréseket követően többfázisú mono- és polidiszperz rendszerek eredő hőtani paramétereit vizsgáltam. A kísérleti berendezés segítségével az „Innovatív, környezetbarát szigetelőanyag piacorientált kutatás-fejlesztése polisztirol másodnyersanyag hasznosításával - PIAC_13-1-2013-0124” című projekt keretében sikerült összefüggést megállapítani a kétfázisú geopolimer-EPS kompozit anyagok eredő hővezetési tényezője, valamint a kompozit mintába adagolt EPS térfogataránya között. A mért eredő hővezetési tényezők értékeit az elméleti soros-, illetve párhuzamos hővezetési modellekkel összevetve, kidolgoztam a hővezetés univerzális egyenletét kétfázisú diszperz rendszerekre. Az univerzális egyenlet segítségével a vizsgált kétfázisú diszperz anyagrendszerek diszperzitás állapotát is jellemeztem.

6.4. A gyáli regionális hulladéklerakóba épített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia

A hőcserélő rendszer üzembe helyezését követően elkezdjük a szisztematikus félüzemi hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérleteket. A félüzemi hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérletek során mindhárom hőkinyerő- és mindkét hőhasznosító rendszer közös üzemének vizsgálatát elvégeztük, amely összesen hat kapcsolási elrendezést jelent. A fő cél a kinyerhető energia nagyságának és az adott hőcserélők ható környezetének – ahonnan kinyerhető a hő – a meghatározása volt, mert ezek alapján lehet a rendszer fő műszaki- és gazdasági jellemzőit megtervezni. További fontos kérdés volt a hőkinyerés időzítésének a vizsgálata, mivel számos stratégia szerint választhatjuk meg és állíthatjuk be a hőcserélő közeg térfogatáramát, azaz a hőkinyerés intenzitását és a hőkinyerési- és regenerációs szakaszok időtartamát. Mindezek érdekében 10 különféle hőkinyerési- és hőhasznosítási félüzemi kísérletet végeztünk el. Az egyes kísérletek főbb jellemzőit a 6.1. táblázat foglalja össze.

Mérés jele	Hőkinyerő→hőhasznosító	A hőkinyerés stratégiája	Időtartam
2014/I.	Függőleges→csurgalékvízgyűjtő medence	intenzív hőkinyerés, hosszú regeneráció	2014.08.21.- 2014.09.15.
2014/II.	Függőleges→üvegház	alacsony intenzitással stacionér állapot elérése	2014.09.17.- 2014.10.13.
2014/III.	„Hurkos”→csurgalékvízgyűjtő medence	szakaszos működés, változó intenzitás	2014.11.01.- 2014.11.25.
2014/IV.	„Piskóta”→üvegház	szakaszos működés, változó intenzitás	2014.11.26.- 2014.12.11.
2014/V.	Függőleges→üvegház	intenzív hőkinyerés	2014.12.12.- 2014.12.20.
2015/I.	„Piskóta” a csurgalékvízgyűjtő medence	kis intenzitás, folyamatos üzem	2015.06.01.- 2015.06.08.
2015/II.	Függőleges→csurgalékvízgyűjtő medence	kis intenzitás, napi váltásban a kinyerés és regeneráció	2015.06.09.- 2015.06.19.
2015/III.	„Piskóta”→csurgalékvízgyűjtő medence	mérsékelt intenzitás, hosszú aktív és passzív szakasz	2015.06.19.- 2015.07.07.
2015/IV.	Függőleges→üvegház	mérsékelt intenzitás, rövidebb aktív és passzív szakasz	2015.07.08.- 2015.07.16.
2015/V.	„Piskóta”→csurgalékvízgyűjtő medence	változó intenzitás, hosszú aktív és passzív szakasz	2015.07.17.- 2015.07.31.

6.1. táblázat: A hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérletek főbb jellemzői

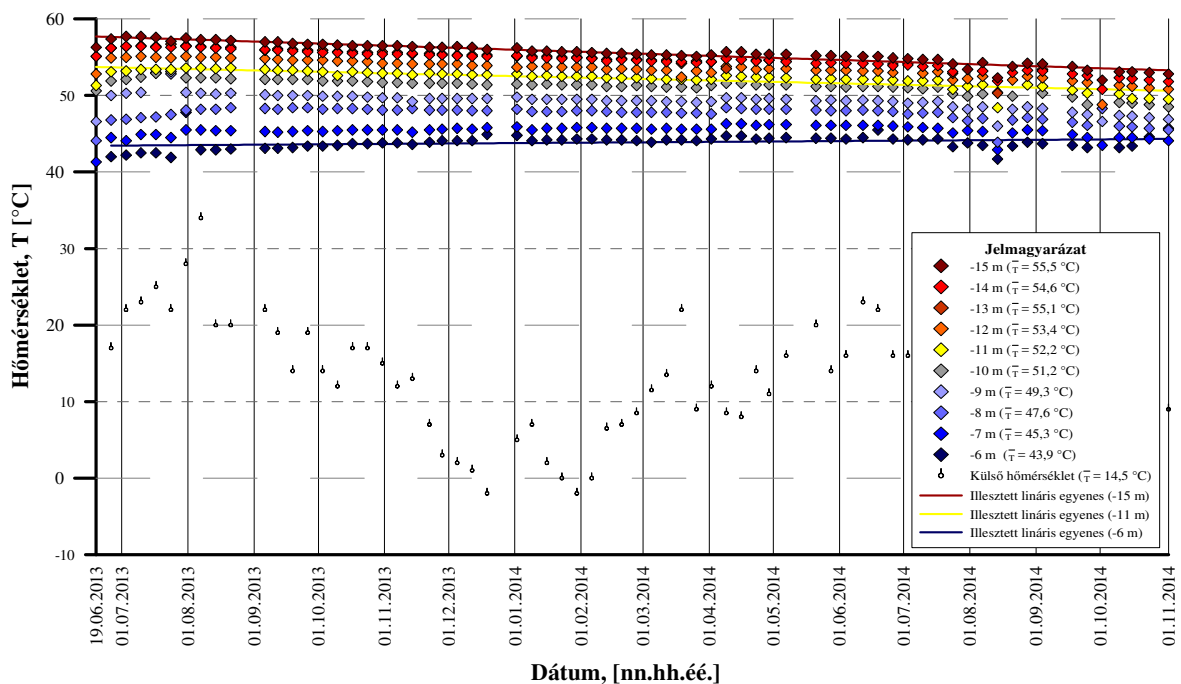
7. MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

7.1. A hőmérséklet-eloszlás és depóniagáz monitoring rendszer

A hőmérséklet-monitoring kutakban mért adatok alapvetően kétféle tendenciát mutatnak, amelyeket a 7.1.1. és 7.1.2. fejezetekben egy-egy példán keresztül mutatok be.

7.1.1. Idősebb korú (8-10 év) hulladékot tartalmazó depónia ütem hőmérséklet-eloszlása

Ahhoz, hogy megtudjuk, hogy a depónia belsejében a hulladék lebomlási folyamata mely fázisban jár, a hőmérséklet-eloszlás hosszútávú vizsgálata is szükséges. Példaként a II. ütem 2-es kútjának mért adatait ismertetem. A 7.1. ábrán jól látható, hogy a mért hőmérsékleti értékek trendje a vizsgálati időtartam alatt jelentősen nem változik. Szintén megfigyelhető, hogy a külső, környezeti hőmérséklet nincs hatással a depónia belsejében kialakuló hőmérsékletre. A monitoring eredményekből kitűnik, hogy a legmagasabb hőmérsékleti értékeket az aljzatszigetelő rendszerhez közel, a felszíntől számított legmélyebb vizsgálati rétegben, azaz -15 m-en kaptuk. A 7.1. ábrán minden egyes vizsgálati mélység esetében kiszámítottam az átlaghőmérséklet értékét is. Ebben az esetben is megállapítható, hogy az átlaghőmérséklet értéke a mélységgel nő.



7.1. ábra: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút mért értékei

A II. ütem feltöltése, azaz a hulladék deponálása 2003-ban kezdődött, majd 2006-ig tartott, tehát az ütemre jellemző hulladék kora a vizsgálati időtartam alatt 8 és 10 év közötti. Figyelembe véve a hulladék korát kijelenthető, hogy az aerob lebomlási fázis ebben az ütemben már régen befejeződött, a hulladék anaerob lebomlási fázisban van, amely, mint ismeretes, akár évtizedekig is eltarthat. A 7.1. ábra mért hőmérsékleti értékei egy jellemzően állandósult állapotra engednek következtetni, amely a megfigyelt időszakban lineáris egyenesekkel jellemezhető. A lineáris egyeneseket az alábbi mélységek adataira illesztettem: -6 m, -11 m, -15 m, amelyek a depóniatest tetejének-, közepének-, illetve aljának feleltethetők meg.

Az illesztett lineáris egyenes általános alakban a következőképpen írható fel (7.1.):

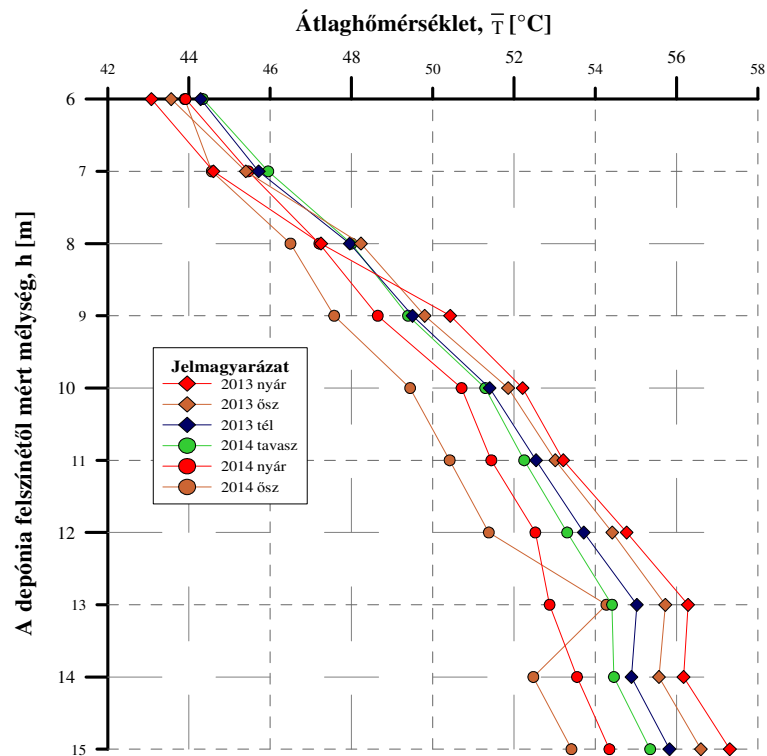
$$Y = A \cdot x + B \quad (7.1.)$$

Az illesztett lineáris egyenesek paramétereit a 7.1. 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

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

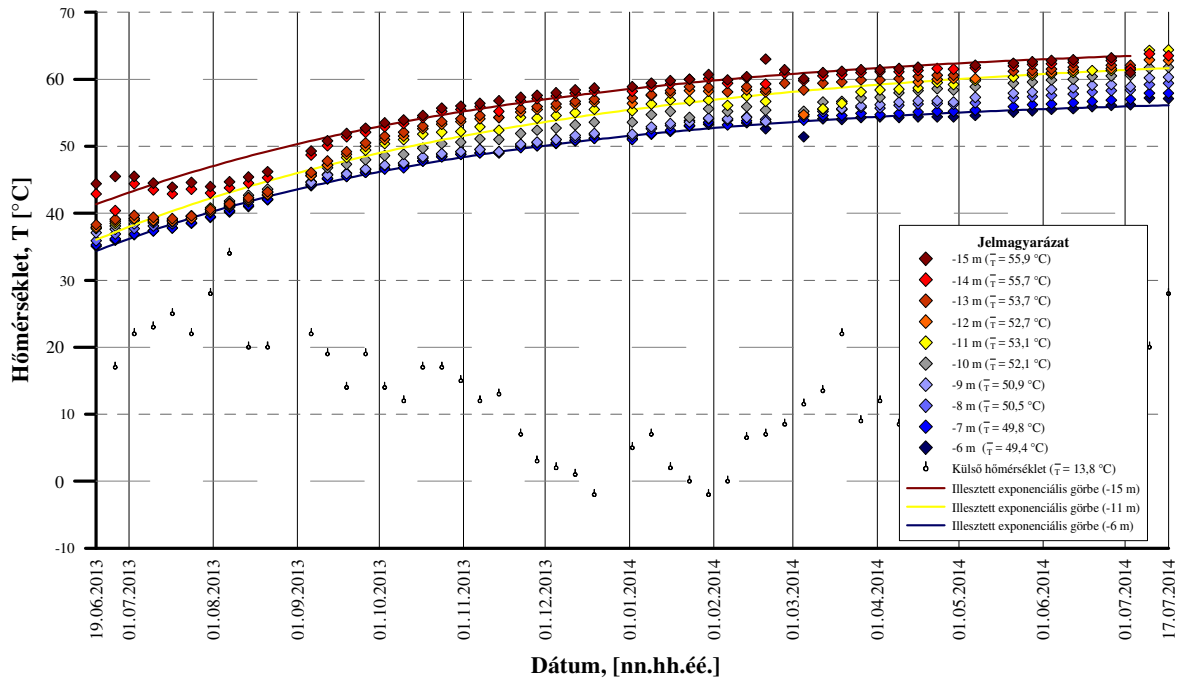
Annak érdekében, hogy átfogó képet kapjak a hőmérséklet-monitoring kutakban kialakult hőmérséklet-eloszlásról az átlaghőmérséklet értékét évszakokra bontva minden mélységre kiszámítottam. A 7.2. ábra szemlélteti a kapott eredményt, amelyen jól látható, hogy a nyári évszakban az átlaghőmérséklet értékei magasabbak, mint a téli évszakban. Az is megfigyelhető az ábrán, hogy a két évnyi vizsgálati intervallumban a 2013-as évhez képest a 2014-es év adataiból számított átlaghőmérsékleti értékek kismértékű csökkenést mutatnak.



7.2. ábra: A II/2-es hőmérséklet-monitoring kút átlaghőmérséklet értékei évszakokra bontva a mélység függvényében

7.1.2. Fiatalabb korú (0-6 év) hulladékot tartalmazó depónia ütem hőmérséklet-eloszlása

A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút esetében, a II/2-es monitoring kúthoz képest magasabb mért hőmérsékleti értékek figyelhetők meg (7.3. ábra). A mért hőmérsékleti adatok a vizsgálati időtartamban az idő függvényében növekvő trendet mutatnak. A IV. ütem jelenleg is művelés alatt áll, a hulladék kora jellemzően 0-6 év közötti. A frissen deponált hulladék egy része aerob lebomlási fázisban van, amely jellemzően a felszín közelében fordul elő. Az aerob lebomlás során nagy mennyiségű hő szabadul fel, amely hatására a hőmérséklet mért értékei emelkednek. A felszabaduló hő hatása jól látható a IV/3-as kút mért adatain, mivel a vizsgálati tartomány elején nagyjából 40 °C körüli hőmérsékleti értékek láthatók, míg a monitoring időszak végére ezek már közel 65 °C-os értékekkel jellemezhetők.



7.3. ábra: A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút mért értékei

A IV/3-as kútban mért hőmérsékleti tendencia alapján kijelenthető hogy a vizsgált depóniarész felmelegedési szakaszban van, amely exponenciális görbékkel jellemezhető. Az exponenciális görbéket azonos mélységek hőmérsékleti értékeire illesztettem, mint a II/2-es monitoring kút esetében. Az exponenciális görbék általános alakban a következőképpen írhatók fel (7.2.):

$$Y = T \cdot (1 - A \cdot e^{-Bx}) \quad (7.2.)$$

ahol, T a maximális hőmérsékleti érték a figyelt időszakban,

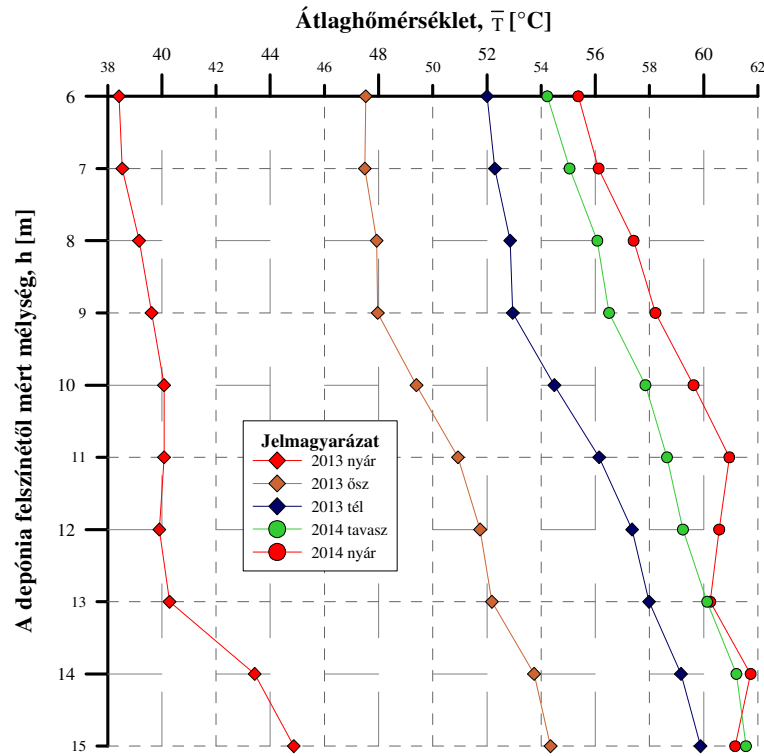
A és B pedig a görbére jellemző konstansok.

A IV/3-as monitoring kút hőmérsékleti értékeire illesztett exponenciális görbék paraméterei a 7.2. táblázatban találhatók.

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

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

Az 7.2. táblázat determinációs együtthatóinak értékei alapján kijelenthető, hogy az illesztett exponenciális görbék igen jól illeszkednek a mért hőmérsékleti adatokra. A 7.4. ábrán ugyanazt láthatjuk, mint a 7.3. ábrán, azaz, hogy a vizsgált depóniarész folyamatosan melegszik, így minden egyes évszakban magasabb átlaghőmérsékleti értékeket kapunk.



7.4. ábra: A IV/3-as hőmérséklet-monitoring kút átlaghőmérséklet értékei évszakokra bontva a mélység függvényében

7.2. A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés

7.2.1. A hulladék fizikai paramétereinek meghatározása

A hulladék makroszkopikus (eredő) hőtani tulajdonságainak meghatározásához ismerni kell a vizsgált hulladék fizikai paramétereit is, ezért a mérési eredmények értelmezése előtt célszerű tisztázni a telítetlen diszperz rendszer – ebben az esetben a hulladék – összetételét. Egy ömlesztett hulladék minta (B) tartalmaz szilárd (s)-, folyékony (l)- és gáz (g) fázisú anyagokat. A különböző fázisokhoz tartozó térfogathányadok összege egy, ezek alapján a halmazsűrűség a következőképpen számítható (7.3.):

$$\varepsilon_s + \varepsilon_l + \varepsilon_g = 1, \text{ tehát } \rho_B = \varepsilon_s \cdot \rho_s + \varepsilon_l \cdot \rho_l + \varepsilon_g \cdot \rho_g \quad (7.3.)$$

A hulladék minta tömegét (m_B), a berendezés geometriája alapján a térfogatát (V_B), illetve a nedvesség tömegének a teljes mintatömegre vonatkoztatott nedvességtartalmát (n_m) – szárítószekrényben $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tömegállandóságig szárítva – megmértük. A mért paraméterek segítségével a halmazsűrűség, illetve a száraz anyagra (szilárd- és gáz fázisok együtt) vonatkozó tömeg és térfogat meghatározható (7.4.):

$$\rho_B = \frac{m_B}{V_B} \text{ és } m_{sg} = m_B \cdot (1 - n_m), \text{ illetve } V_{sg} = V_B - \frac{m_B \cdot n_m}{\rho_l} \quad (7.4.)$$

A folyadék fázis térfogathányada és a száraz frakció sűrűsége az alábbi képletekkel írható fel (7.5.):

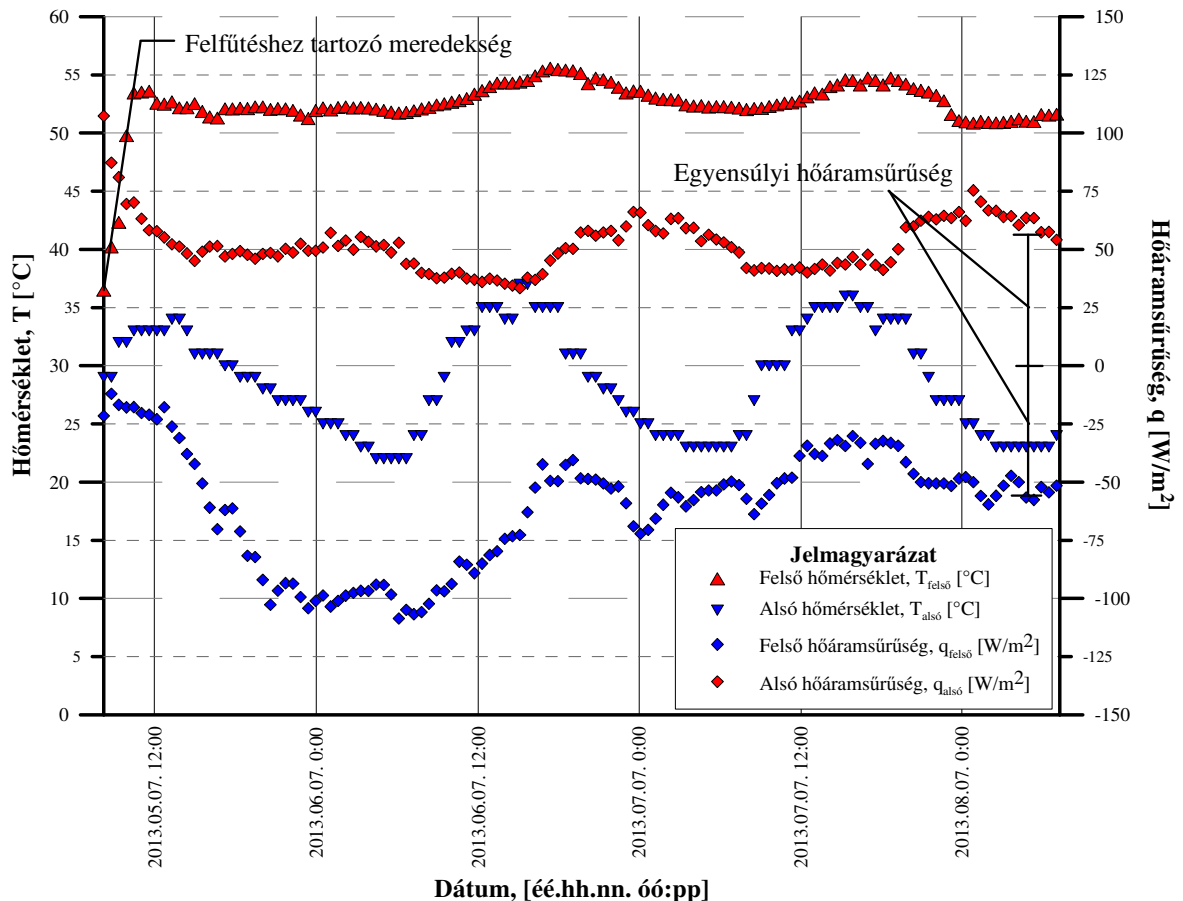
$$\varepsilon_l = \frac{m_B \cdot n_m}{\rho_l \cdot V_B} \text{ és } \rho_{sg} = \frac{m_{sg}}{V_{sg}} \quad (7.5.)$$

Ahhoz, hogy számítani lehessen a belső hőtani paramétereket, a szilárd- és a gáz fázisok térfogathányadait is ismerni kell. A hulladék minták szilárd fázisának sűrűségét nem vizsgáltuk, azonban rendelkezésre álltak az .A.S.A. Magyarország Kft. által rendszeresen és szabvány szerint készítettett, a hulladékok összetételének 2012-es eredményei. A szilárd fázis átlagos sűrűségét az elvégzett szabványos összetételi elemzések alapján meg lehet becsülni (7.5. táblázat). A szilárd- és a gáz fázis sűrűségének ismeretében a száraz részben a szilárd anyag térfogati koncentrációja (C_s), valamint a szilárd-, illetve gáz térfogathányadok meghatározhatók (7.6.):

$$C_s = \frac{\rho_{sg} - \rho_g}{\rho_s - \rho_g} \text{ és } \varepsilon_s = \frac{C_s \cdot V_{sg}}{V_B}, \text{ illetve } \varepsilon_g = \frac{(1 - C_s) \cdot V_{sg}}{V_B} \quad (7.6.)$$

7.2.2. A hulladék hőtani paramétereinek meghatározása

A kísérleti berendezéssel 2013. július 5.-én elvégzett, egy tipikus in-situ mérés eredményét szemlélteti a 7.5. ábra.



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

Egy mérés tipikusan három napig tartott, mivel a hőtani paraméterek meghatározásához közel egyensúlyi állapot elérése szükséges. Természetesen a külső, környezeti hőmérséklet folyamatosan változott – ez szintén rögzítésre került –, ezért a teljes egyensúlyi állapotot nem sikerült létrehozni a mérés ideje alatt. A külső, környezeti hőmérséklet-változás miatt a kiértékelés is igen nehéz volt. A 7.5. ábrán láthatóak a mért hőmérséklet- és hőáramsűrűség értékek az idő függvényében. A fedélben lévő hőáramsűrűség-mérő szenzor mért eredményei negatív előjelűek, amit úgy kell értelmezni, hogy a fűtés hatására a hő a berendezésben lévő hulladék minta felé áramlik. A mérőberendezés alsó, acél doboz részében található hőáramsűrűség-mérő szenzor mért értékei pozitív előjelűek, ami azt jelenti, hogy a hő a hulladék mintából a berendezés alján keresztül a környezet felé távozik. Az alkalmazott hőáramsűrűség-mérő szenzorok számos, sorba kapcsolt hőelemből állnak, amelyek kimenő feszültségének a polaritása jelzi a hőáramlás irányát. Az első észrevétel a mért hőáramsűrűség értékekkel kapcsolatosan az, hogy a mérés elején a hulladék mintából hőáramlás történik a környezet felé, aminek az oka,

hogyan a depóniából frissen vett minta a bomlási hőtől felmelegedett. A fedélben lévő hőáramsűrűség-mérő szenzor által mért értékek csak a fűtő rendszer bekapcsolása után kezdtek növekedni. Az acél doboz aljában elhelyezett hőáramsűrűség-mérő szenzor mért értékei a fűtés bekapcsolása után csökkennek, lehűlési tendenciát mutatva, aminek az oka, hogy a minta hőmérséklete meghaladta a külső, környezeti hőmérsékletet. Amint a hő a fedélben lévő hőáramsűrűség-mérő szenzoron keresztül megérkezik a mérőberendezés aljában lévő hőáramsűrűség-mérő szenzorhoz, a mért alsó hőáramsűrűség értékek elkezdtek nőni. Ahogyan már korábban említettem a fűtés alatt a teljes egyensúlyi állapot nem sikerült megvalósítani, azonban mért paraméterek alapján, amikor a minta egy úgynevezett kvázi egyensúlyi állapotot elér, az egyensúlyi hőáramsűrűség (Q) és a kialakult hőmérséklet-különbség (ΔT) meghatározható (7.5. ábra). A hő által megtett út (L) ismert, mivel az a hőáramsűrűség-mérő szenzorok közötti mért távolság. A hővezetési tényező a mért adatokból egyszerűen számítható (7.7.):

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{\Delta T} \quad (7.7.)$$

A fűtés bekapcsolása után a fedélben elhelyezett hőmérő szenzor mért értékei is emelkedni kezdenek. A 440 W-os konstans fűtési teljesítmény esetében a felső hőmérő szenzor által mért értékek az 50-60 °C-os mérési tartományban álltak be, míg 1760 W-os fűtési teljesítménynél ugyanez a tartomány már 130-140 °C közé esett. A kísérleti berendezés alsó részében elhelyezett hőmérő szenzor mért értékei a külső, környezeti hőmérséklethez közeli értékeknek adódtak, ennek oka, hogy a berendezés 20 cm-es lábakon áll, tehát a berendezés alja könnyen vissza tud hűlni a környezeti hőmérsékletre. A 7.5. ábrán látható, hogy az alsó hőmérő szenzor mért értékei követik a napi hőingást. A fedélben lévő hőmérő szenzor által mért görbe meredeksége a felfűtési szakaszt tekintve arányos a mért minta fajhőjével. A kísérleti berendezés nem alkalmazható közvetlenül a fajlagos hőkapacitás mérésére, mert a betáplált hőnek csak egy része áramlik a hulladék mintába és melegíti fel azt, a hő többi része gyakorlatilag magát a berendezést-, illetve a környezetet melegíti. A mérések alapján meghatározható, hogy a rendszerbe betáplált hőnek mindig csak a kb. 1/2,95-öd része (33,8 %-a) fordítódik a betöltött minta melegítésére, amely érték a berendezésre jellemző együttható (I). A berendezés együtthatójának ismeretében a fajlagos hőkapacitás és a hődiffuzivitás a következőképpen számítható (7.8.):

$$c_m = \frac{P \cdot I}{m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}} \text{ és } \kappa = \frac{\lambda}{\rho_B \cdot c_m} \quad (7.8.)$$

7.2.3. A hulladék fizikai- és hőtani vizsgálatainak eredményei

A 7.2.1. és 7.2.2. fejezetekben bemutatott kiértékelés alapján a mért- és a számított eredményeket a 7.3. és a 7.4. táblázat összegzi.

Mérés azonosítója	Minta forrása	Minta tömege	Beépített minta térfogata	Halmazsűrűség	Nedvességtartalom (tömegre vonatkoztatva)	Száraz tömeg	Száraz térfogat	Száraz állapot térfogat sűrűsége	Szilárd fázis aránya a száraz mintában	Folyadék fázis térfogat-hányada	Szilárd fázis térfogat-hányada	Gáz fázis térfogat-hányada
Jelölés	Depónia	m _B	V _B	ρ _B	n _m	m _{sg}	V _{sg}	ρ _{sg}	C _s	ε _l	ε _s	ε _g
Mértékegység	ütem	kg	m ³	kg/m ³	%	kg	m ³	kg/m ³	-	-	-	-
2m0814	III	450	1,28	351,56	0,35	292,5	1,1225	260,6	0,2002	0,123	0,1755	0,7014
2m0802	IV	530	1,44	368,06	0,52	254,4	1,1644	218,5	0,1677	0,1914	0,1356	0,673
m0705	III	660	1,67	395,21	0,32	448,8	1,4588	307,6	0,2365	0,1265	0,2066	0,6669
2m0729	IV	550	1,34	410,45	0,54	253	1,043	242,6	0,1863	0,2216	0,1449	0,6334
m0703	III	580	1,31	442,75	0,44	324,8	1,0548	307,9	0,2367	0,1948	0,1906	0,6146
2m0731	IV	610	1,31	465,65	0,46	329,4	1,0294	319,9	0,246	0,2142	0,1933	0,5925
m0726	IV	550	1,18	466,10	0,47	291,5	0,9215	316,3	0,2432	0,2191	0,1899	0,591
m0701	III	470	0,97	484,54	0,41	277,3	0,7773	356,7	0,2744	0,1986	0,2199	0,5815
2m0807	III	670	1,34	500,00	0,22	522,6	1,1926	438,2	0,3372	0,11	0,3001	0,5898
m0717	friss	530	1,05	504,76	0,47	280,9	0,8009	350,7	0,2697	0,2372	0,2057	0,557
m0719	IV	690	1,36	507,35	0,3	483	1,153	418,9	0,3223	0,1522	0,2733	0,5745
2m0805	IV	670	1,31	511,45	0,17	556,1	1,1961	464,9	0,3579	0,0869	0,3267	0,5863
m0628	IV	570	1,05	542,86	0,1	513	0,993	516,6	0,3977	0,0543	0,3762	0,5695
2m0809	III	750	1,28	585,94	0,2	600	1,13	530,9	0,4088	0,1172	0,3609	0,5219
m0724	IV	880	1,34	656,72	0,08	809,6	1,2696	637,7	0,4912	0,0525	0,4654	0,4821
2m0816	II	1050	1,54	681,82	0,36	672	1,162	578,3	0,4454	0,2454	0,336	0,4185
m0708	II	790	1,09	724,77	0,14	679,4	0,9794	693,7	0,5344	0,1015	0,4802	0,4183

7.3. táblázat: A beépített minták mért (dőlt betűvel) és a számított (normál betűvel) paraméterei (1)

Mérés azonosítója	Egyensúlyi hőáram-sűrűség	A hő által megtett út hossza	Hőmérséklet-különbség	Hővezetési tényező	Fűtő-teljesítmény	Felfűtési szakaszra vonatkozó meredekség	Számított fajlagos hőkapacitás	Berendezésre vonatkozó együttható	Berendezésre vonatkozó fajlagos hőkapacitás	Hődiffúzitás
Jelölés	Q	L	ΔT	λ	P	$\Delta T/\Delta t$	c_m	I	c_m	κ
Mértékegység	W/m ²	m	°C	W/mK	W	°C/s	J/gK	-	J/gK	10 ⁻⁷ m ² /s
2m0814	58	0,43	105	0,24	1760	0,0039	2,63	2,62	2,96	2,56
2m0802	64	0,482	102	0,3	1760	0,0035	3,04	3,2	2,8	2,7
m0705	45	0,559	31	0,81	440	0,00085	2,56	3,26	2,31	8,02
2m0729	70	0,448	116	0,27	1760	0,003	3,08	2,89	3,14	2,14
m0703	80	0,438	39	0,9	440	0,00077	2,85	2,89	2,9	7,13
2m0731	74	0,438	106	0,3	1760	0,0029	2,89	2,91	2,93	2,27
m0726	62	0,395	27	0,91	440	0,00079	2,92	2,88	2,99	6,67
m0701	47	0,324	16	0,95	440	0,00095	2,77	2,82	2,91	7,09
2m0807	81	0,448	123	0,29	1760	0,0035	2,32	3,09	2,21	2,54
m0717	60	0,351	23	0,92	440	0,0008	2,92	2,81	3,06	6,22
m0719	50	0,455	24	0,95	440	0,00086	2,51	3,39	2,19	7,43
2m0805	66	0,438	91	0,32	1760	0,004	2,2	3,35	1,94	2,82
m0628	76	0,351	25	1,07	440	0,001	2,04	2,64	2,28	9,66
2m0809	100	0,428	119	0,36	1760	0,0025	2,27	2,42	2,77	2,7
m0724	66	0,448	26	1,14	440	0,00084	1,99	3,34	1,75	8,71
2m0816	61	0,515	84	0,37	1760	0,0016	2,66	2,54	3,09	2,07
m0708	76	0,365	24	1,15	440	0,0008	2,13	3,06	2,05	7,47

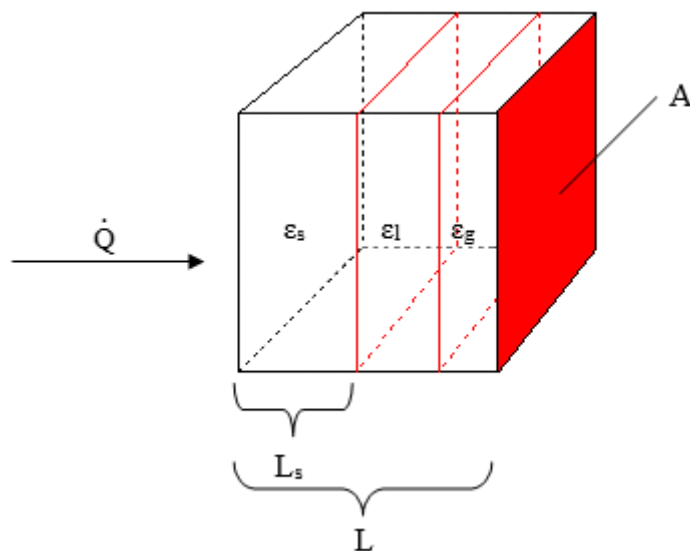
7.4. táblázat: A beépített minták mért (dőlt betűvel) és a számított (normál betűvel) paraméterei (2)

7.2.4. Soros- és párhuzamos hővezetési modell háromfázisú diszperz rendszerekre

A soros- és párhuzamos hővezetési modellek ismertetéséhez vizsgáljunk meg egy háromfázisú szilárd-folyadék-gáz diszperz rendszert. A térfogathányadok (koncentrációk) összege legyen egységnyi (7.9.), azaz:

$$\varepsilon_s + \varepsilon_l + \varepsilon_g = 1 \quad (7.9.)$$

A bemutatott rendszer leegyszerűsítve modellezhető olyan módon, hogy az összes szemcsét egy összefüggő szilárd testnek képzeljük el, amely mellett a folyadék-, illetve a gáz fázis összefüggően kitölti a maradék térrészt. A valódi diszperz rendszerhez képest ez a modell nagymértékű egyszerűsítést jelent, azonban a gyakorlatban találkozhatunk ilyen, nem diszperz anyagokkal. Hogyha a valós diszperz állapotot ilyen módon leegyszerűsítettük, illetve modelleztük, a hőáramlás irányát és a fázisok elhelyezkedését tekintve kétféle szélsőséges elrendezésről (állapotról) beszélhetünk. Amennyiben a hő áramlása a fázisok elhelyezkedését tekintve sorban (7.6. ábra) megy végbe, abban az esetben az eredő hővezetés értéke alacsony lesz, ugyanis a gáz fázis hővezetési tényezője nagyságrendekkel alacsonyabb – ez jelenti tehát az alsó korlátot –, mint a szilárd-, illetve folyadék fázisok esetében.



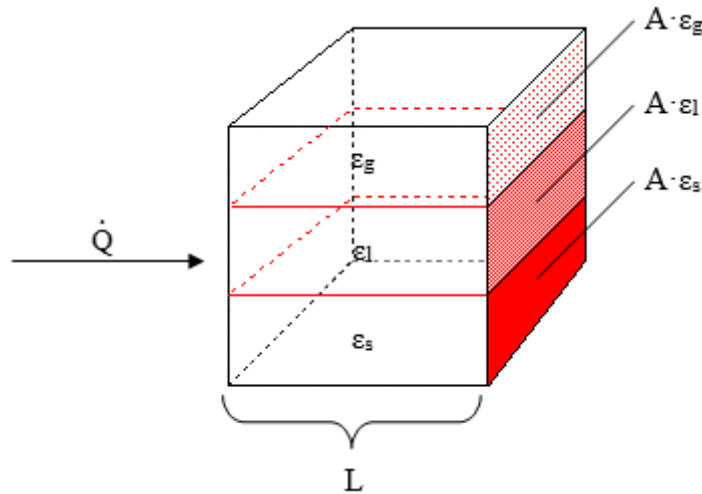
7.6. ábra: Soros hővezetési modell háromfázisú diszperz rendszerekre
(elméleti minimum)

A hőáramsűrűség és az eredő hővezetési tényező a soros hővezetési modell alapján a következőképpen alakul a háromfázisú diszperz rendszerekben (7.10.):

$$\dot{Q} = \frac{1}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i}} \cdot A \cdot \Delta T ,$$

$$\text{illetve } \lambda = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_l \cdot \lambda_g}{\varepsilon_s \cdot \lambda_l \cdot \lambda_g + \varepsilon_l \cdot \lambda_s \cdot \lambda_g + \varepsilon_g \cdot \lambda_s \cdot \lambda_l} \quad (7.10.)$$

A másik szélsőséges állapotot a párhuzamos hővezetési modell jelenti, amely esetében a legmagasabb hővezetési tényezővel rendelkező szilárd fázison keresztül könnyen áramlik a hő egy része, míg a hő másik részének a nagy ellenállást jelentő gáz-, illetve folyadék fázison kell áthaladnia (7.7. ábra). Az említett esetben tehát a hő részárámokra bomlik és egymás mellett áramlik az egyes fázisokban, amely gyakorlatilag az eredő hővezetési tényező értékét tekintve a felső korlátot jelenti.



7.7. ábra: Párhuzamos hővezetési modell háromfázisú diszperz rendszerekre
(elméleti maximum)

A hőáramsűrűség és az eredő hővezetési tényező a párhuzamos hővezetési modell alapján tehát (7.11.):

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l + \dot{Q}_g = \frac{\lambda_s}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_s \cdot \Delta T + \frac{\lambda_l}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_l \cdot \Delta T + \frac{\lambda_g}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_g \cdot \Delta T,$$

$$\text{illetve } \lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_l \cdot \varepsilon_l + \lambda_g \cdot \varepsilon_g \quad (7.11.)$$

Az eredő fajlagos hőkapacitás értéke is kiszámítható (7.12.) a háromfázisú diszperz rendszerekre, amennyiben az egyes fázisokhoz tartozó térfogathányadok és a fajlagos hőkapacitás értékek ismertek:

$$c_m = \frac{\varepsilon_l \cdot \rho_l \cdot c_{ml} + \varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot c_{ms} + \varepsilon_g \cdot \rho_g \cdot c_{mg}}{\varepsilon_l \cdot \rho_l + \varepsilon_s \cdot \rho_s + \varepsilon_g \cdot \rho_g} \quad (7.12.)$$

7.2.5. A hulladék egyes fázisaira jellemző sűrűség-, hővezetési tényező- és fajlagos hőkapacitás értékeinek becslése

A gyáli regionális hulladéklerakó üzemeltetője, az .A.S.A. Magyarország Kft. minden negyedévben kétszer végez szabványos hulladék analízist (MSZ-21420 28 és 29). A rendelkezésemre bocsátott 2012-es eredményekből (8 db analízis) a hulladék egyes anyagkategóriáinak átlagos tömegarányait kiszámítottam. Az egyes anyagkategóriák átlagos tömegarányait figyelembe véve, becslést tettem a hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák sűrűségeinek-, illetve hőtani paramétereinek értékeire (7.5. táblázat).

A hulladék anyagi összetétele (anyagkategória)	A kategória tömegaránya, Δm [%]	Sűrűség, ρ [kg/dm ³]	Hővezetési tényező, λ [W/mK]	Fajlagos hőkapacitás, c_m [J/gK]
Biológiai	21,618	0,700	0,15	2,721
Papír	12,668	1,100	0,05	1,340
Karton	4,694	1,100	0,21	1,340
Kompozit	2,135	1,100	0,20	2,190
Textil	3,583	0,250	0,06	1,290
Higiéniai	4,384	1,000	0,15	1,480
Műanyag	19,919	1,150	0,25	1,670
Egyéb éghető	2,942	1,200	0,20	2,190
Üveg	3,604	2,700	0,87	0,837
Fém	3,645	4,000	91,92	0,483
Egyéb nem éghető	4,448	2,500	1,59	0,858
Veszélyes	0,701	3,500	56,22	1,100
Finom frakció (<20 mm)	15,671	1,500	0,16	2,112
Szilárd frakció együtt	100,000	1,297	3,99	1,800

7.5. táblázat: A hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák sűrűségeinek-, illetve hőtani paramétereinek becsült értékei

Az egyes kategóriák, például a fém kategória összetételét, illetve, hogy a különböző fémek milyen arányban vannak a hulladékban nem ismertem, azonban az eddigi hulladékfeldolgozás technológiai tervezés tapasztalatai alapján becslést tettem erre. Az anyagkategóriák hővezetési tényezőjének becsült értékeit a 7.6. táblázatban közölt összetétel- és szakirodalmi adatok alapján kaptam meg.

A hulladék anyagi összetétele (anyagkategória)	Hővezetési tényező (alkategóriánként), λ [W/mK]	Hővezetési tényező (átlagolt), λ [W/mK]
Biológiai	100 % fa=0,15	0,15
Papír	100 % papír=0,05	0,05
Karton	100 % karton=0,21	0,21
Kompozit	50 % műanyag=0,25 50 % biológiai=0,15	0,20
Textil	50 % selyem=0,04 50 % lenvász=0,08	0,06
Higiéniai	50 % textil=0,06 50 % műanyag=0,25	0,16
Műanyag	50 % polietilén=0,35 50 % PVC=0,15	0,25
Egyéb éghető	50 % biológiai=0,15 50 % műanyag=0,25	0,20
Üveg	100 % üveg=0,87	0,87
Fém	93 % vas=81 7 % alumínium=237	91,92
Egyéb nem éghető	50 % beton=2,1 10 % gránit=2,8 30 % tégl=0,63 10 % aszfalt=0,7	1,59
Veszélyes	50 % műanyag=0,23 40 % vas=81 10 % alumínium=237	56,22
Finom frakció (< 20 mm)	50 % biológiai=0,15 25 % papír=0,12 25 % műanyag=0,23	0,16
Szilárd frakció együtt		3,989

7.6. táblázat: A hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák becsült hővezetési tényező értékei

A vizsgált hulladék anyagkategóriáinak becsült fajlagos hőkapacitás értékeit a 7.7. táblázatban közölt összetétel alapján számítottam.

A hulladék anyagi összetétele (anyagkategória)	Fajlagos hőkapacitás (alkategóriánként), c_m [J/gK]	Fajlagos hőkapacitás (átlagolt), c_m [J/gK]
Biológiai	100 % fa=2,72	2,72
Papír	100 % papír=1,34	1,34
Karton	100 % papír=1,34	1,34
Kompozit	50 % műanyag=1,67 50 % biológiai=2,72	2,19
Textil	50 % selyem=1,25 50 % lenvászón=1,34	1,29
Higiéniai	50 % textil=1,29 50 % műanyag=1,67	1,48
Műanyag	100 % műanyag=1,67	1,67
Egyéb éghető	50 % biológiai=2,72 50 % műanyag=1,67	2,19
Üveg	100 % üveg=0,84	0,84
Fém	93 % vas=0,45 7 % alumínium=0,89	0,48
Egyéb nem éghető	50 % beton=0,88 10 % gránit=0,75 30 % tégl=0,84 10 % aszfalt=0,92	0,86
Veszélyes	50 % műanyag=1,67 40 % vas=0,45 10 % alumínium=0,89	1,10
Finom frakció (< 20 mm)	50 % biológiai=2,72 25 % papír=1,34 25 % műanyag=1,67	2,11
Szilárd frakció együtt		1,800

7.7. táblázat: A hulladék szilárd fázisát alkotó anyagkategóriák becsült fajhő értékei

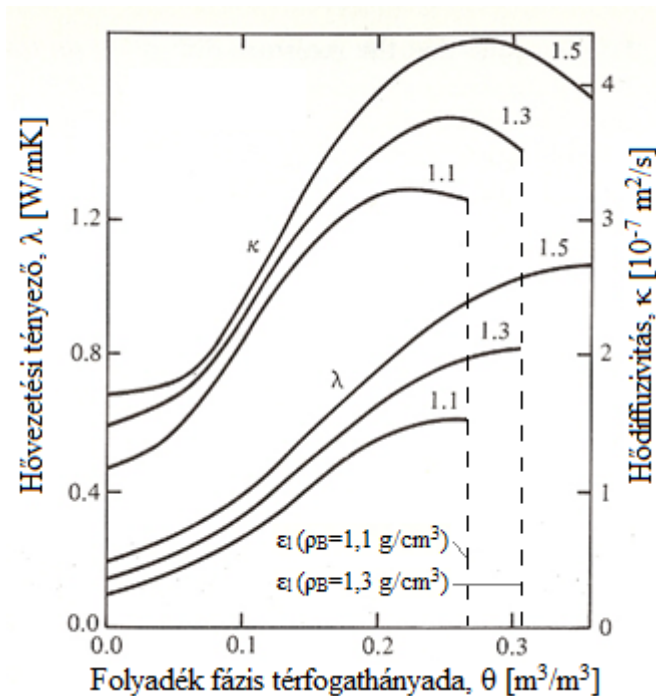
Mivel a levegő- és a víz hőtani jellemzői ismertek, a hulladék szilárd fázisára pedig becslést adtam, a 7.8. táblázatban közölt összesített adatok alapján a háromfázisú diszperz rendszer eredő hőtani paraméterei számíthatók, így a számított elméleti értékek a mért paraméterekkel már összehasonlíthatók.

Hulladékot alkotó fázisok	Sűrűség (átlag), ρ [kg/dm ³]	Hővezetési tényező (átlag), λ [W/mK]	Fajlagos hőkapacitás (átlag), c_m [J/gK]
Folyadék (víz)	$\rho_l = 1,0000$	$\lambda_l = 0,600$	$c_{ml} = 4,181$
Gáz (levegő)	$\rho_g = 0,0012$	$\lambda_g = 0,025$	$c_{mg} = 1,012$
Szilárd (hulladék)	$\rho_s = 1,2970$	$\lambda_s = 3,989$	$c_{ms} = 1,800$

7.8. táblázat: A hulladék egyes fázisainak átlagos sűrűség-, hővezetési tényező-, illetve fajlagos hőkapacitás értékei.

7.2.6. A hulladék elméleti- és mért hőtani paramétereinek összehasonlítása

Az eredmények ábrázolása előtt még egy dolgot szükséges tisztázni. A 7.8. ábrán láthatók a telítetlen talaj vizsgálatának eredményei, azaz a folyadék fázis térfogathányada- és a halmazsűrűség változásának hatása a hővezetési tényezőre és a hődiffúzitásra agyagos talaj esetében.



7.8. ábra: A folyadék fázis térfogathányada és a halmazsűrűség változásának hatása a hővezetési tényezőre és a hődiffúzitásra agyagos talaj esetében

Megjegyzés: A halmazsűrűséghez tartozó értékek g/cm^3 -ben értelmezendők
(Marschall és Holmes, 1979 alapján)

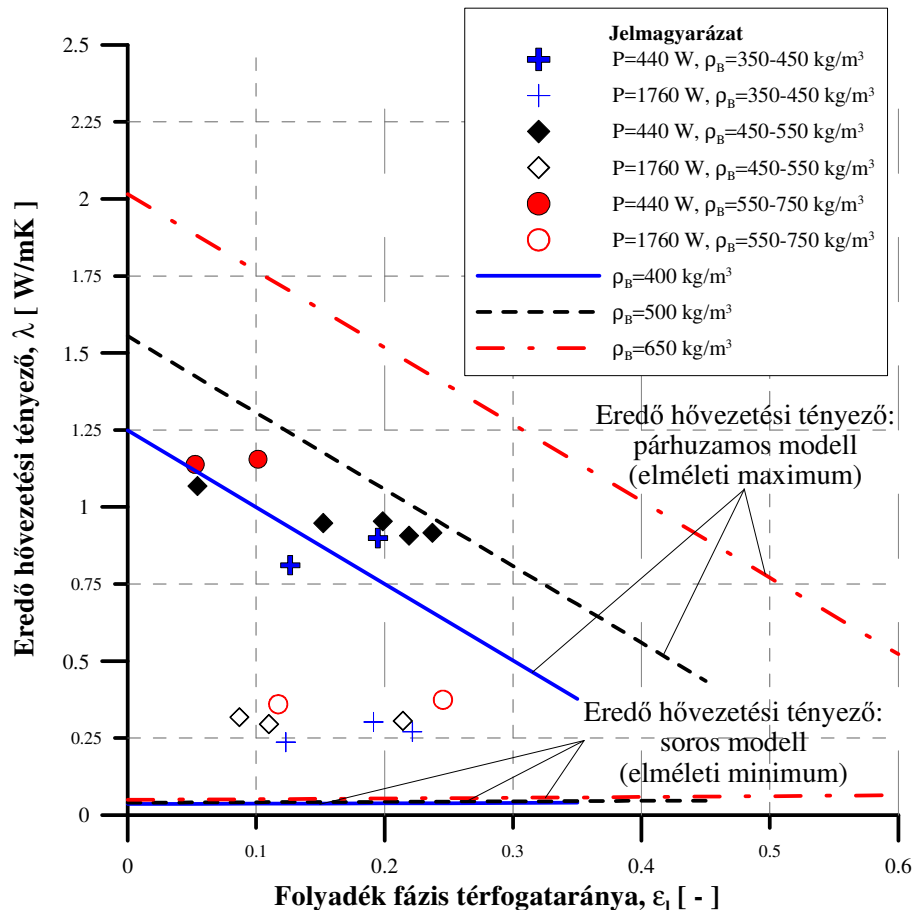
A talajok szintén háromfázisú diszperz rendszernek tekinthetők. Már említettem, hogy a három alkotó fázist tekintve (szilárd-folyadék-gáz) a szilárd fázis rendelkezik a legjobb hővezetési tulajdonsággal, amelynek eredményeképp megállapítható, hogy amennyiben a halmazsűrűség értéke nő, a hővezetési tényező értéke is nőni fog (7.8. ábra).

Háromfázisú diszperz rendszerekben az összetétel és a telítetlen porózus közeg állapota jellemezhető a halmazsűrűséggel (ρ_B) és a folyadék fázis térfogathányadával (ϵ_l), amely paraméterek ismeretében a szilárd (ϵ_s)- és a gáz fázis (ϵ_g) térfogathányada megadható (7.13.):

$$\varepsilon_s = \frac{\rho_B - \rho_g + \varepsilon_l \cdot (\rho_g - \rho_l)}{\rho_s - \rho_g} \text{ és } \varepsilon_g = 1 - \varepsilon_l - \varepsilon_s \quad (7.13.)$$

A felírt egyenletek a telítettség határáig érvényesek ($\varepsilon_l = \rho_B / \rho_l$), ugyanis, ha ε_l értéke meghaladja a telítettségi határt, abban az esetben csak kétfázisú rendszerről (szilárd-folyadék) beszélhetünk. A 7.8. ábrán jól látszik az előzőekben említett telítési határ, amely minden halmazsűrűségre más és más ε_l értéket jelent.

A 7.9. ábra szemlélteti a mért- és a számított eredő hővezetési tényezők értékeit a folyadék fázis térfogathányadának- és a halmazsűrűségnek a függvényében. Az elméleti értékek a soros-, illetve párhuzamos hővezetési modellek alapján számítottak a 400 kg/m^3 (kék színű folytonos vonal), az 500 kg/m^3 (fekete színű szaggatott vonal), és a 650 kg/m^3 (piros színű pontozott vonal) halmazsűrűség értékekre. Az ábrán jól látható, hogy a soros hővezetési modell alapján számított elméleti értékek nőnek a folyadék fázis térfogathányadának növekedésével, illetve, hogy a párhuzamos hővezetési modell esetében a helyzet fordított jellegű. Természetesen a mérések során a minták halmazsűrűség értékei változtak, így az eredmények szórnak. Ahhoz, hogy ábrázolni tudjuk a 7.9. ábrán látható eredményeket, a mért hulladék minták halmazsűrűség értékeit három osztályba soroltam. A vékony szimbólumok az 1760 W -, a vastag, illetve teli szimbólumok pedig a 440 W -os fűtőteljesítménnyel elvégzett mérésekhez tartoznak.

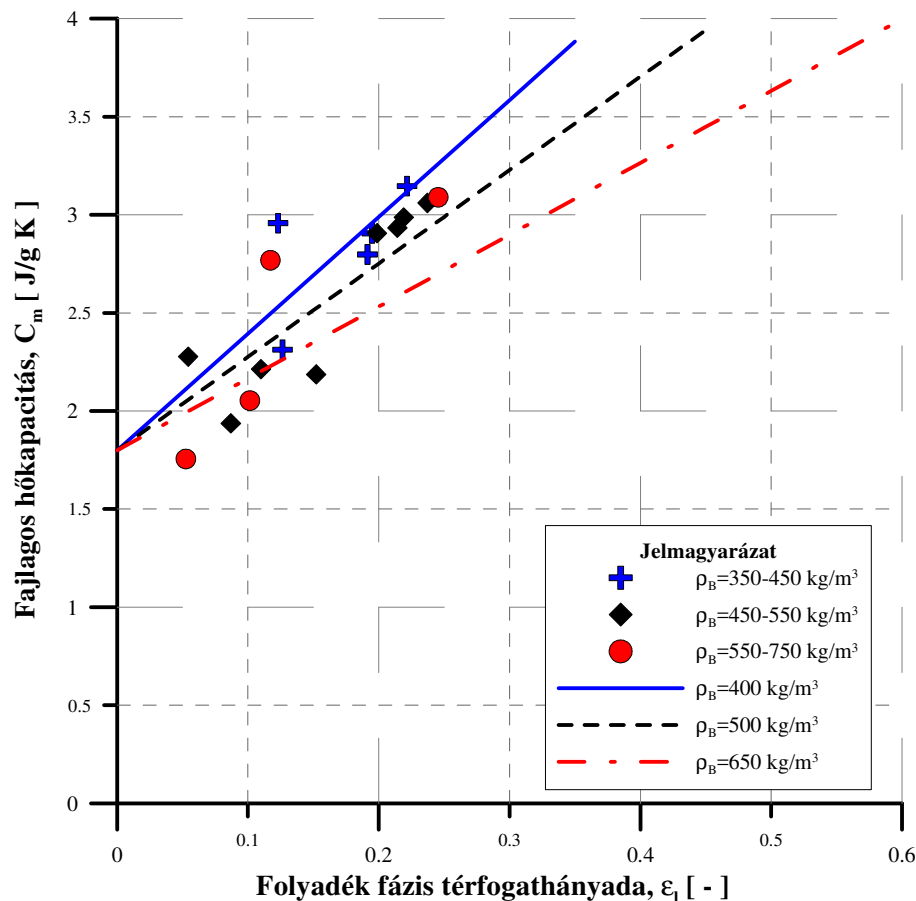


7.9. ábra: A hulladék mért- és a számított eredő hővezetési tényező értékeinek összehasonlítása

Szembetűnő különbség figyelhető meg az 1760 W-os és a 440 W-os fűtési teljesítménnyel elvégzett mérések között. Az 1760 W-os fűtőteljesítménnyel elvégzett mérések esetében a hulladék hőmérséklete jellemzően 130-140 °C közötti-, a mért hővezetési tényező értékek pedig a 0,24-0,37 W/mK tartományba estek. A 440 W-os fűtőteljesítménnyel elvégzett méréseket tekintve a hulladék jellemző hőmérséklete alacsonyabb volt (50-60 °C között), a hővezetési tényező értékek pedig a 0,81-1,15 W/mK tartományban találhatók. A két fűtőteljesítménnyel elvégzett mérési eredmények közötti különbség oka, hogy az 1760 W-os fűtőteljesítmény esetében a minta hőmérséklete meghaladta a 100 °C-os értéket, így a minta a mérés ideje alatt a nedvességtartalmának jelentős részét elvesztette.

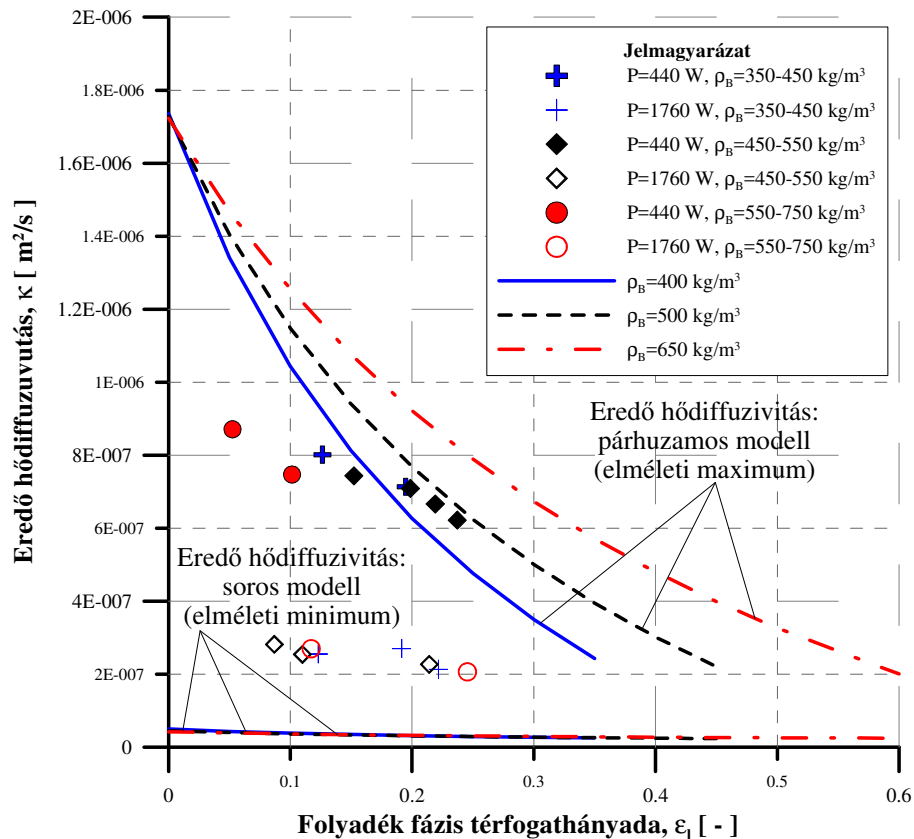
A 7.10. ábrán láthatóak a mért-, illetve a számított eredő fajlagos hőkapacitás értékek a folyadék fázis térfogathányadának- és a halmazsűrűségnek a függvényében. Az ábrán jól látható – a 7.7. táblázatban bemutatott – a hulladék szilárd fázisának becsült eredő fajlagos hőkapacitás értéke, amely gyakorlatilag az elméleti úton számolt fajlagos hőkapacitás

értékek kiinduló pontja. A 7.2.2. fejezetben ismertettem, hogy a kísérleti berendezés nem alkalmas közvetlenül a fajlagos hőkapacitás mérésére, ugyanis a betáplált hőnek csak egy része fordítódik a minta felmelegítésére. A hőveszteség arányát számszerűsíti a berendezés együtthatója. A berendezésre vonatkozó átlagos együttható ($I=1/2,95$) meghatározásával a mért fajlagos hőkapacitás értékek is korrigálhatók, illetve ábrázolhatók (7.10. ábra). A berendezés fedelében mért hőmérséklet emelkedésének kezdeti meredeksége ($\Delta T/\Delta t$), illetve a fűtőtéljesítmény az adott tömegű mintához tartozó fajlagos hőkapacitás függvénye. A felfűtés kezdeti szakaszában a fázisváltás, a rejtett- és az érzékelhető hőátadás még nem számottevő, ezért a mért hőkapacitás eredmények mind a 440 W-os-, mind az 1760 W-os fűtőtéljesítménynél egy „felhőbe” esnek.



7.10. ábra: A hulladék mért- és a számított eredő fajlagos hőkapacitás értékeinek összehasonlítása

Végül, a két görbe (hővezetési tényező és fajlagos hőkapacitás) alapján előállítható a hődiffúzivitás görbéje is (7.11. ábra).



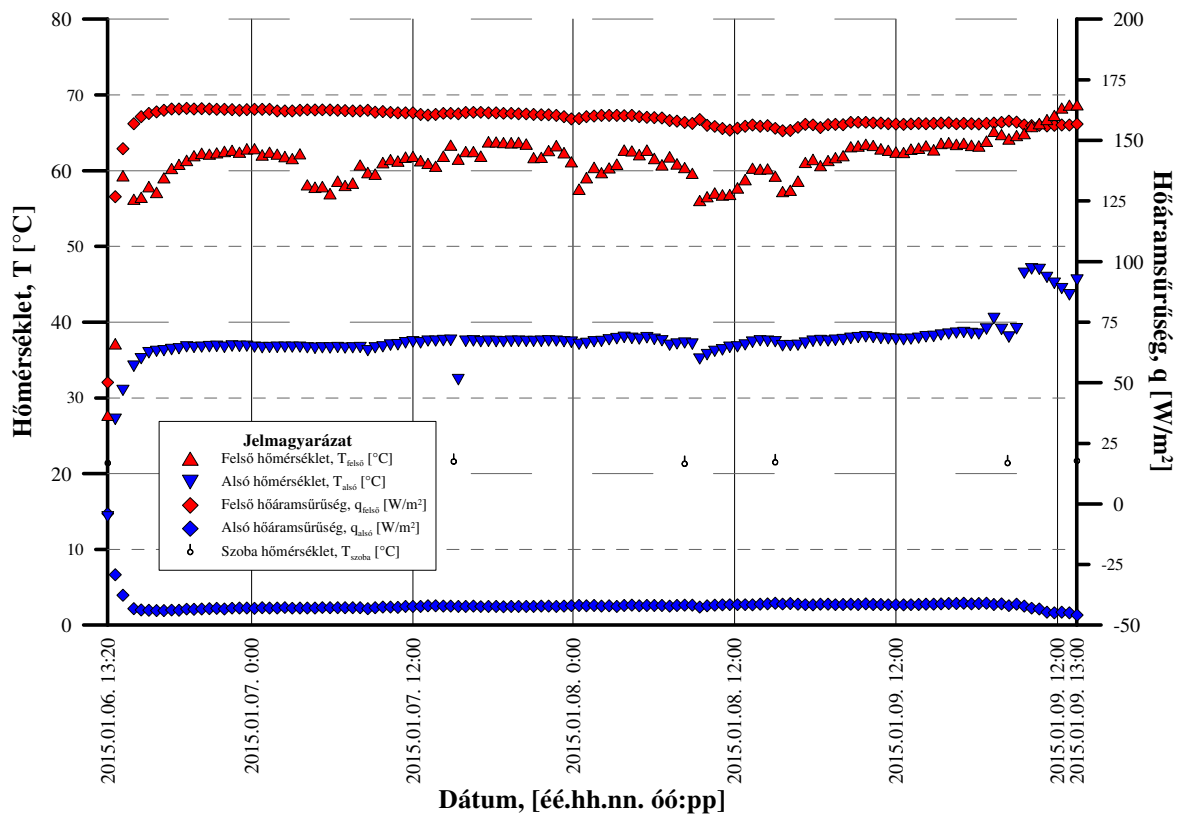
7.11. ábra: A hulladék mért- és a számított eredő hődiffuzivitás értékeinek összehasonlítása

A hődiffuzivitás a hővezetési tényező-, a halmazsűrűség- és fajlagos hőkapacitás alapján számítható, ezért a 7.9. és a 7.11. ábrák sok tekintetben hasonlóak. Lényeges különbség azonban, hogy a soros- és párhuzamos modell alapján számított eredő hővezetési tényező a folyadék fázis térfogathányadával lineáris-, míg az eredő hődiffuzivitást tekintve hiperbolikus kapcsolatban van.

7.3. A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezés

7.3.1. Kalibrációs mérések

A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel első lépésként ismert hővezetési tényezőjű anyagokon végeztem kalibrációs méréseket. A 7.12. ábra szemlélteti az expandált polisztirol (EPS) mintán elvégzett kalibrációs mérés eredményeit.



7.12. ábra: Az EPS mintán a fűtés hatására kialakuló hőáramsűrűség-, illetve a hőmérsékletmérő szenzorok által mért értékek

Mivel a berendezés kialakítása, illetve működési elve hasonló a hulladékok hőtani paramétereinek a meghatározására alkalmazott kísérleti berendezéshez, ezért a kapott adatok kiértékelése is hasonlóan történik. Az EPS minta hővezetési tényezője a mérés alapján 0,036 W/mK-re adódott, amely megegyezik a gyártó által garantált értékkel. Az egyfázisú anyagokon elvégzett kalibrációs méréseket diszperz-, illetve monodiszperz anyagokon elvégzett kalibrációs mérések követték. Az említett mérések eredményeit a 7.9. táblázatban összegeztem.

Megnevezés	Típus	Szemcseméret frakció	Minta magassága, h [m]	Halmaz- sűrűség, ρ_B [kg/m ³]	Szemcse- sűrűség, ρ [kg/m ³]	Porozitás, ϕ [%]	Labortáp- feszültség, U [V]	Hővezetési tényező, λ [W/mK]	Fajlagos hőkapacitás, c_m [J/gK]	Hődiffuzivitás, κ [10 ⁻² m ² /s]
EPS lemez	egyfázisú	-	0,0190	11,86	-	-	60	0,036	55,36	5,20
OSB lemez	egyfázisú	-	0,0115	612,75	-	-	40	0,087	5,20	1,32
Fehérvárcsurgói üveghomok	diszperz	$x < 500 \mu\text{m}$	0,0240	1174,08	2643,75	55,59	60	0,050	0,60	7,07
Fehérvárcsurgói üveghomok	monodiszperz	$80 \mu\text{m} < x < 125 \mu\text{m}$	0,0250	1342,15	2641,96	49,19	60	0,048	0,48	7,48

7.9. táblázat: A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel elvégzett kalibrációs mérések eredményei

A méréseket 40 és 60 V tápfeszültséggel végeztem el. A 40 V labortápról leadott feszültség mellett a felső hőmérő szenzor mért értékei jellemzően 40-50 °C-, a 60 V-os feszültség mellett 60-80 °C közötti tartományban álltak be.

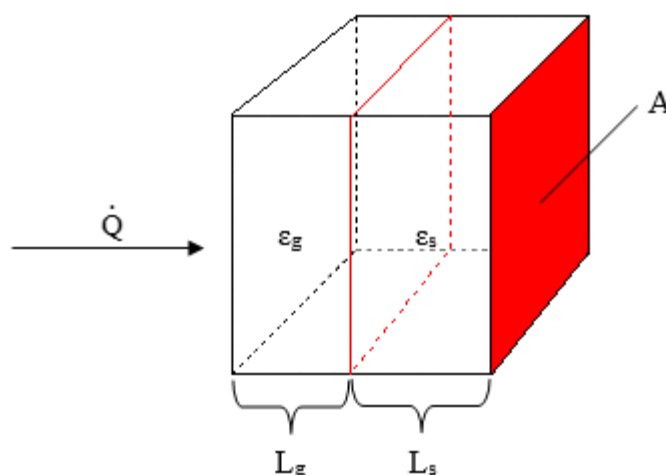
7.3.2. Soros- és párhuzamos hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre

A háromfázisú (szilárd-folyadék-gáz) diszperz rendszerek esetében bemutatott soros-, illetve párhuzamos hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerek esetében is hasonlóképpen származtatható, azonban ebben az esetben célszerű részletezni a kapott eredő hővezetési tényezőkhöz tartozó levezetéseket, amelyek segítségével megalkotható hővezetés univerzális egyenlete.

Tekintsünk tehát egy kétfázisú szilárd-gáz diszperz rendszert, ahol a szilárd fázis legyen a diszpergált fázis, a gáz fázis pedig a diszperziós közeg. A térfogathányadok (koncentrációk) összege ebben az esetben is egységnyi (7.14.):

$$\varepsilon_s + \varepsilon_g = 1 \quad (7.14.)$$

A 7.2.4. fejezetben bemutatott leegyszerűsítéseket alkalmazva az egységnyi felületen áthaladó hőáram a kétfázisú soros hővezetési modell esetében (7.13. ábra) a 7.15. képlettel számítható:



7.13. ábra: Soros hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre
(elméleti minimum)

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{L_s}{\lambda_s} + \frac{L_g}{\lambda_g}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (7.15)$$

A teljes hossza vonatkoztatott eredő hővezetési tényező a két fázis hosszára vonatkozó hővezetési tényezők összegeként írható fel (7.16.):

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{\varepsilon_s \cdot L}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_g \cdot L}{\lambda_g} \quad (7.16.)$$

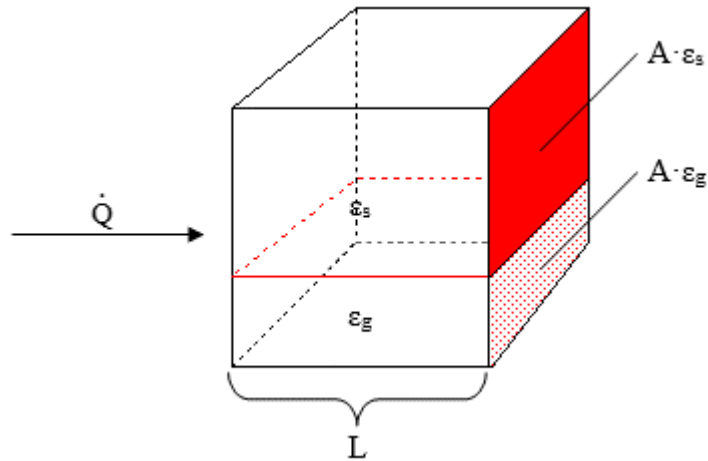
Az egyenletet L-el kiegyszerűsítve a 7.17. egyenletet kapjuk:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_g}{\lambda_g} \quad (7.17.)$$

A 7.17. egyenletet λ -ra rendezve megkapjuk az eredő hővezetési tényezőhöz tartozó képletet (7.18.), ami – hasonlóan, mint a háromfázisú diszperz rendszerek esetében – az elméleti minimumot jelenti:

$$\lambda = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_g}{\varepsilon_s \cdot \lambda_g + \varepsilon_g \cdot \lambda_s} \quad (7.18.)$$

Az egységnyi felületen áthaladó hőáram a kétfázisú párhuzamos modellt tekintve (7.14. ábra) megegyezik a két párhuzamosan elhelyezkedő fázison áthaladó rész hőáramok összegével (7.19.), ami az elméleti maximum értékét adja meg.



7.14. ábra: Párhuzamos hővezetési modell kétfázisú diszperz rendszerekre (elméleti maximum)

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_g = \frac{\lambda_s}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_s \cdot \Delta T + \frac{\lambda_g}{L} \cdot A \cdot \varepsilon_g \cdot \Delta T \quad (7.19.)$$

Az egyenletből kiemelve az $\frac{1}{L} \cdot A \cdot \Delta T$ -t, az alábbi egyenletre jutunk (7.20.):

$$\dot{Q} = \frac{1}{L} \cdot A \cdot \Delta T \cdot (\lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_g \cdot \varepsilon_g) \quad (7.20.)$$

A 7.20. egyenletből az eredő hővezetési tényezőhöz tartozó képletet a 7.21. egyenlet adja meg:

$$\lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_g \cdot \varepsilon_g \quad (7.21.)$$

Egy valós kétfázisú (szilárd-gáz) diszperz rendszerben az eredő hővezetési tényező az alsó (soros hővezetési modell)- és felső (párhuzamos hővezetési modell) korlát közé kell, hogy essen, amelyre számos paraméter hatással van. Ezek a paraméterek főként a szemcseméret-, a szemcsealak-, és a szemcsesűrűség-eloszlás, illetve alapvetően a koncentráció.

7.3.3. A hővezetés univerzális egyenlete kétfázisú diszperz rendszerekre

A szakirodalmi áttekintésben bemutattam (2.5.5 fejezet), hogy a diszperz állapotú anyagokban vezetéssel megvalósuló eredő hőátadás, röviden a hővezetés, azért nagyon bonyolult jelenség, mert számtalan belső hővezetési-, illetve a diszperz rész és diszpergáló közeg közötti határfelületeken történő hőátadási részjelenségre bontható. Valódi diszperz anyagokban a szemcsék, cseppek és buborékok száma igen nagy, a jellemzőik pedig igen változatosak lehetnek, ezért nem az volt a célom, hogy a komponensek fizikai jellemzői alapján adjak becslést az eredő hővezetésre. Ezzel szemben egy konkrét, mérhető anyagot tekintve, adott eredő diszpergáltsági állapotban szeretném magát az állapotot egy mérőszámmal jellemezni, illetve az eredő hővezetési tényező értékét mérés, valamint számítás segítségével meghatározni. A 7.10. táblázatban összefoglaltam azt a gondolatmenetet, amellyel a kétfázisú diszperz rendszerek esetében az univerzális eredő hővezetési tényező egyenletét (7.22.) vezettem le.

Kétfázisú rendszer (szilárd-gáz) eredő hővezetési tényezője soros hővezetési modell alapján	Kétfázisú rendszer (szilárd-gáz) eredő hővezetési tényezője párhuzamos hővezetési modell alapján
$\frac{1}{\lambda} = \frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_g}{\lambda_g}$	$\lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_g \cdot \varepsilon_g$
$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_s \text{ és } \lambda_g = K \cdot \lambda_s$ (ahol K az arányossági tényező, amely megmutatja, hogy λ_s értéke hány szorosa, illetve hányad része λ_g értékének)	
$\frac{1}{\lambda} = \frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{1-\varepsilon_s}{K \cdot \lambda_s}$ $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_s} \cdot \left(\varepsilon_s + \frac{1-\varepsilon_s}{K} \right)$ $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_s} \cdot \frac{K \cdot \varepsilon_s + (1-\varepsilon_s)}{K}$ $\lambda = \lambda_s \cdot \frac{K}{K \cdot \varepsilon_s + (1-\varepsilon_s)}$	$\lambda = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + (1-\varepsilon_s) \cdot K \cdot \lambda_s$ $\lambda = \lambda_s \cdot [\varepsilon_s + (1-\varepsilon_s) \cdot K]$
Célfüggvény: $\frac{K}{K \cdot \varepsilon_s + (1-\varepsilon_s)}$	Célfüggvény: $\varepsilon_s + (1-\varepsilon_s) \cdot K$
Kétfázisú rendszer (szilárd-gáz) eredő hővezetési tényezőjének univerzális egyenlete (soros- és párhuzamos hővezetési modell összekapcsolása): $\lambda = \lambda_s \cdot \left\{ \frac{K}{[K \cdot \varepsilon_s + (1-\varepsilon_s)] \cdot [\varepsilon_s + (1-\varepsilon_s) \cdot K]} \right\}^D \cdot [\varepsilon_s + (1-\varepsilon_s) \cdot K] \quad (7.22.)$ ahol D a diszperzitás jellemző, D=1 esetén a soros-, D=0 esetén a párhuzamos hővezetési modell eredő hővezetési tényezőjének képletét kapjuk vissza.	

7.10. táblázat: A hővezetés univerzális egyenlete kétfázisú diszperz rendszerekre

A 7.3.2. fejezetben, példaként szilárd-gáz diszperz rendszerre ismertettem a kétfázisú hővezetés lehetséges két szélső esetét, a soros- és párhuzamos hővezetési modelleket. A levezés érdekében K-val jelöltem a két alkotó fázis hővezetési tényezőjének hányadosát. A cél az, hogy a soros- és párhuzamos hővezetési modell alapján felírt egyenleteket egy olyan kombinált egyenletbe foglaljam össze, amely tartalmazza, az úgynevezett D-diszperzitás állandót, ami D=1 esetén a soros-, míg D=0 esetén a párhuzamos hővezetési egyenletre egyszerűsödik vissza. Ennek érdekében mindkét esetre λ/λ_s célfüggvény határozható meg, amely segítségével a 7.22. egyenlet felírható.

7.3.4. Geopolimer-EPS kompozit szigetelő anyagok eredő hővezetési tényezőjének elméleti- és kísérleti vizsgálata

A hőtani vizsgálataim középpontjában olyan pernye alapú geopolimer kompozit anyagok álltak, amelyek különböző térfogatszázalékban tartalmaznak hozzáadott expandált polisztirolt (EPS). A geopolimerek hővezetési tényezője, illetve testsűrűsége jelentősen csökkenthető expandált polisztirol gyöngyök hozzáadásával. A másod-nyersanyagokból létrehozott kompozit anyag alkalmas lehet az építőipari szigetelő anyagok jövőbeni kiváltására.

A próbatestek gyártása, illetve vizsgálata laboratóriumi- és félüzemi (I. és II. széria) méretben történt. A laboratóriumi szériás minták előállítása során örölt deponált tisztaújívárosi pernyét használtunk, mint geopolimer szilárd fázis, amelyhez NaOH és nátrium-szilikát lúgos aktiválószer kevertünk 45 m/m% arányban egy függőleges habarcskeverőben. Ezután a geopolimer pasztához adagoltuk az előaprított polisztirol szemcséket (0,5-10 mm), amely keveréket a homogenizálást követően 400×400 mm alapterületű sablonokba öntöttük, majd vibrációsán tömörítettük. Az elkészített próbatestek magassága változó volt, amelyeket a hővezetési tényező mérése során figyelembe vettem.

A félüzemi mérések két szériája ehhez képest annyival tért el, hogy a geopolimer komponens pernye összetételét a kötési idő szabályozása érdekében megváltoztattuk: az I. szériában 90 m/m% nyers visontai pernye és 10 m/m% örölt tisztaújívárosi pernye, a II. szériában pedig 80 m/m% nyers visontai pernye és 20 m/m% örölt tisztaújívárosi pernye volt az összetétel. További eltérés a laboratóriumi kísérletekhez képest, hogy a félüzemi szériák esetében a 10 V/V% geopolimer-tartalmú mintáknál a pernyéhez 47 m/m%-ban adagoltuk az aktiváló oldatot, annak érdekében, hogy a polisztirolt egyenletesebben vonja be a geopolimer paszta. A többi esetben 45 m/m%-ban tartalmazott lúgos aktiválószer a geopolimer paszta. A félüzemi kísérletek során a keverést egy 150 l térfogatú kényszerkeverővel valósítottuk meg, a sablonok mérete pedig 500×1000×100 mm, illetve 100×500×200 mm volt, amelyekből a hővezetési tényező meghatározásához, a mérőberendezésbe illeszkedő 400×400 mm-es alapterületű mintákat vágtam ki. Az elkészült próbatestek (7.15. ábra) összetevőinek arányait, illetve a mért eredő hővezetési tényező értékeit a 7.11. táblázatban adtam meg.



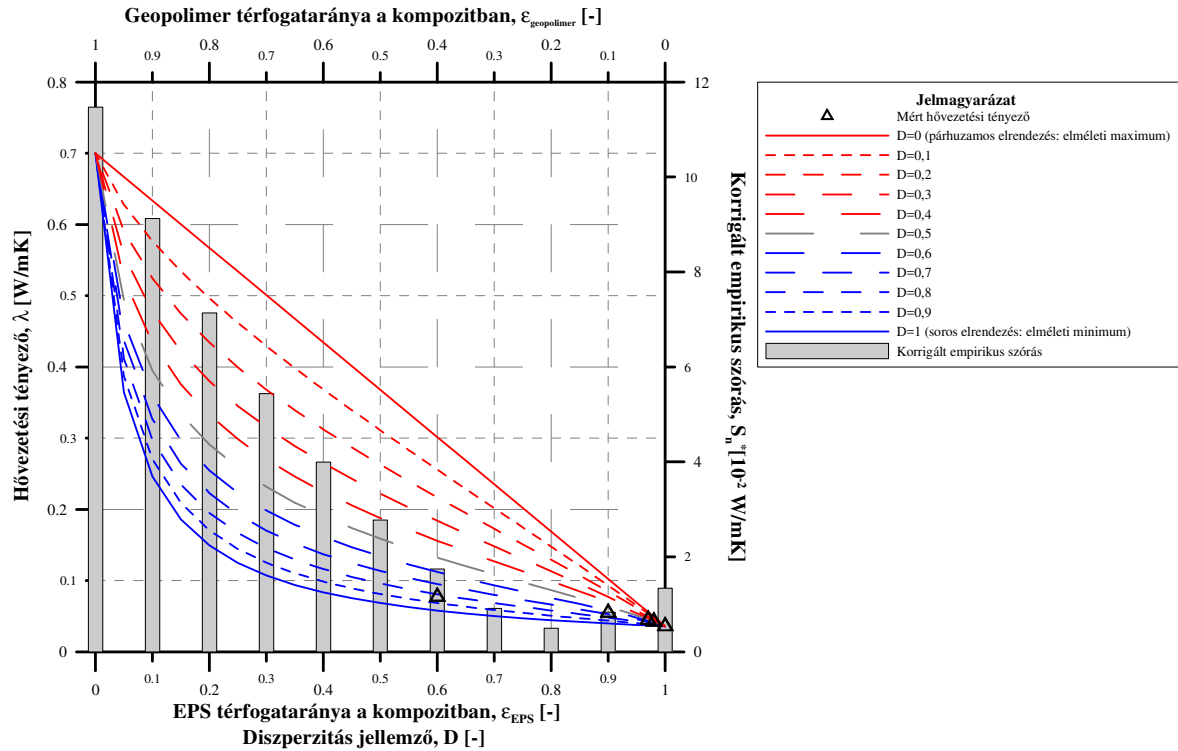
7.15. ábra: Az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatest

Összetevők, [V/V %]	Próbatestek típusa												
	Laboratóriumi					Félüzemi (I. széria)				Félüzemi (II. széria)			
EPS	100	98	97	90	60	100	98	97	60	100	98	97	60
Geopolimer	0	2	3	10	40	0	2	3	40	0	2	3	40
Mért hővezetési tényező, λ [W/mK]	0,0360	0,0426	0,0453	0,0550	0,0775	0,0360	0,0426	0,0453	0,1000	0,0360	0,0426	0,0453	0,0859

7.11. táblázat: Az elkészült geopolimer-EPS kompozit próbatestek összetételi arányai a mért hővezetési tényezők értékeivel

A hővezetési tényező méréseket tehát kétfázisú geopolimer-EPS rendszerekben végeztem el, ami szilárd-szilárd durva diszperz rendszer. A geopolimer a diszperziós közeg, amiben az EPS szemcsék diszpergálva vannak. Annak ellenére, hogy a geopolimer komponenst többféle pernye is alkotja, tekintsük a geopolimer komponenst az egyik folytonos és homogén szilárd fázisnak. A másik szilárd komponens ebben az esetben az EPS.

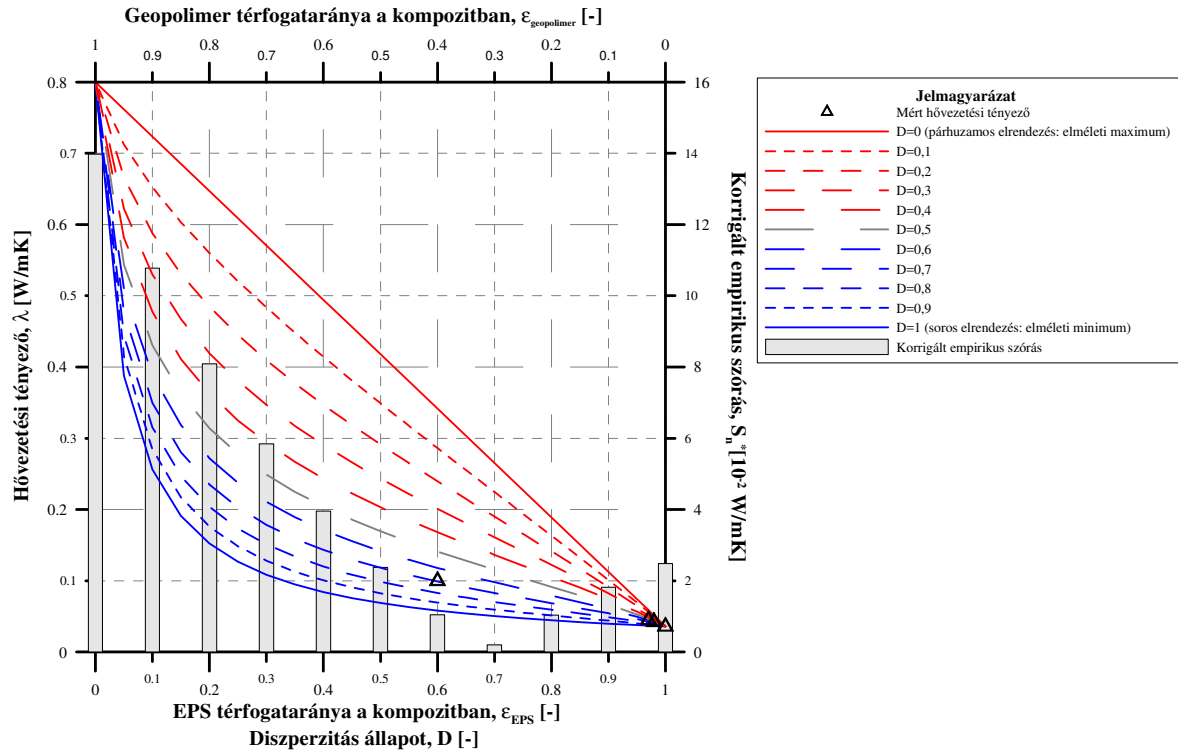
A 7.16. ábra szemlélteti a fejlesztett mérőberendezéssel meghatározott hővezetési tényezők értékeit (fekete háromszög) a geopolimer- és az EPS komponens térfogatarányainak függvényében a laboratóriumi szériás minták esetében. A mért hővezetési tényezők mellett feltüntettem az egyes diszperzitás állapotokhoz tartozóan az elméleti, eredő hővezetési tényezők görbéit is ($D=0-0,4$: piros-, $D=0,5$: szürke-, illetve $D=0,6-1$: kék színekkel jelölve), amelyeket a kétfázisú diszperz rendszerekre felírt univerzális hővezetés egyenletének (7.22.) segítségével számítottam ki. Ahogyan a 7.3.2. fejezetben részleteztem, a 7.16. ábrán piros folytonos vonallal jelölt párhuzamos hővezetési modell adja meg az eredő hővezetési tényező elméleti maximum értékeit, amely esetben az univerzális egyenletben bevezetett D -diszperzitás állapot értéke 0. Az elméleti minimum értékét a soros hővezetési modell jelenti (kék folytonos vonal), a modellhez tartozó D -diszperzitás állapot értéke ebben az esetben pedig 1. Az elméleti minimum- és maximum értékek között a vizsgált kétfázisú diszperz rendszert tekintve az egyes diszperzitás állapotoknak ($D=0,1-0,9$) megfelelően meghatározott eredő hővezetési tényezők görbéit láthatjuk szaggatott vonalakkal jelölve. A 7.16. ábra tehát a mért- és az új egyenlet (7.22.) szerinti elméleti úton meghatározott eredő hővezetési tényezők összehasonlítására alkalmas. Az elméleti számítások esetében fontos megjegyezni, hogy az adott kompozitra jellemző diszperzitás állapot (D) értékét és a tiszta, geopolimer komponens hővezetési tényezőjét numerikus iterálással határoztam meg. A tiszta EPS hővezetési tényezője a mérések alapján már ismert volt, azonban a geopolimer komponens hővezetési tényezőjének meghatározása sokkal nehezebb feladatot jelentett, ugyanis a tiszta geopolimer hővezetési tényezője leginkább az alkalmazott pernye szemcseméret-eloszlásától – részletesen a 7.3.2. fejezetben felsorolt egyéb paraméterektől –, ezáltal a tiszta, geopolimer komponens testsűrűségétől függ. Annak érdekében, hogy a laboratóriumi-, a félüzemi I. és II. szériás kompozit mintákhoz tartozó tényleges diszperzitás állapotot meg tudjam állapítani, a mért- és az egyes diszperzitás állapotok esetében elméleti úton meghatározott eredő hővezetési tényezők értékei alapján kiszámítottam a korrigált empirikus szórás értékeit is (szürke oszlopokkal szemléltettem). A kompozitra vonatkozó tényleges diszperzitás állapotot az a D érték fogja jellemezni, amely esetében a korrigált empirikus szórás értéke minimális.



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

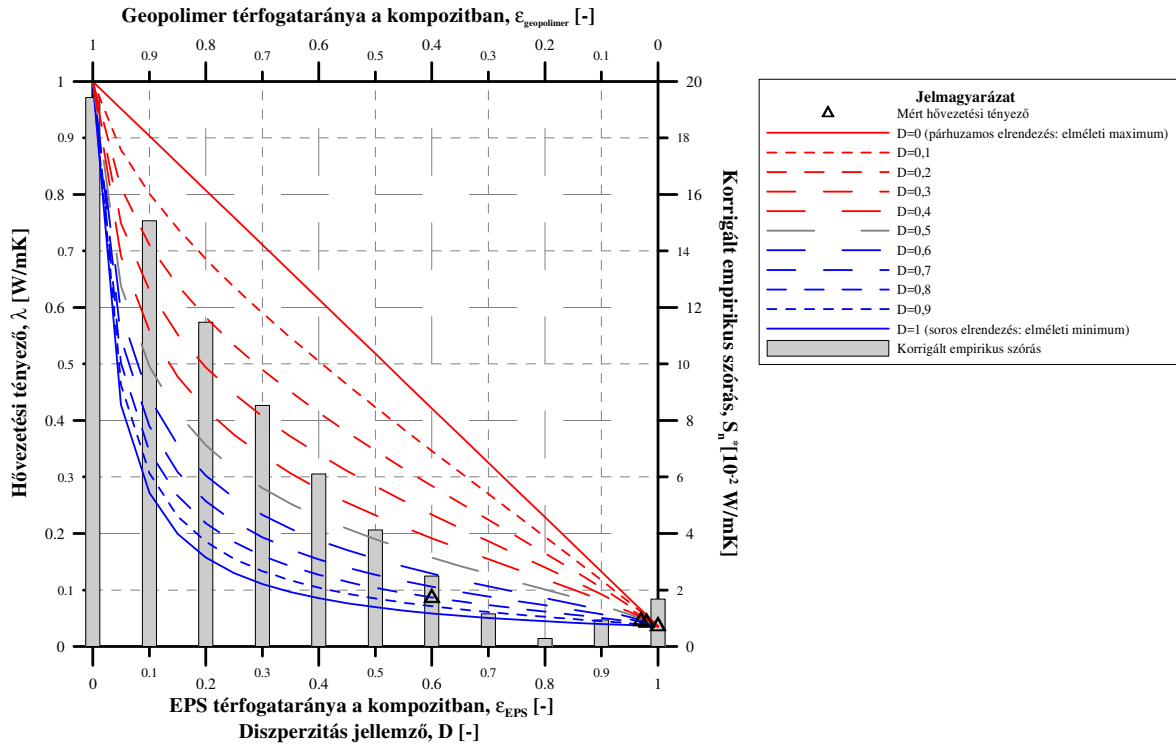
A 7.16. ábra bal oldalát tekintve az iterálással meghatározott tiszta geopolimer komponens hővezetési tényezőjét olvashatjuk le, ami a laboratóriumi szériás minták esetében $0,7 \text{ W/mK}$, ebben az esetben az EPS térfogataránya természetesen 0% . Ugyanezen ábra jobb oldalán a tiszta EPS komponens hővezetési tényezőjét láthatjuk, ami a mérések alapján $0,036 \text{ W/mK}$ értékre adódott. Egy köztes koncentrációjú keverék esetén az eredő hővezetési tényező értéke elsősorban attól függ, hogy milyen az EPS szemcsék diszpergáltsági állapota, mennyisége, illetve elhelyezkedése a geopolimer komponensben. A 7.16. ábrán az is jól látható, hogy a korrigált empirikus szórás értéke a $D=0,8$ esetében minimális, tehát a kompozit anyag diszpergáltsági állapota a soros hővezetési modellhez, azaz a kék folytonos vonallal jelölt elméleti minimum értékéhez esik közelebb.

A laboratóriumi szériás mintákhoz hasonlóan (7.16. ábra), elkészítettem a félüzemi I. és II. szériás minták ábráit is (7.17. és 7.18. ábra).



7.17. ábra: A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a félüzemi I. szériás minták esetében.

A félüzemi I. szériás mintáknál az iterálással meghatározott geopolimer komponens hővezetési tényezője 0,8 W/mK-re adódott (7.17. ábra), amely magasabb, mint a laboratóriumi szériás minták esetében. Ennél a szériánál a geopolimer komponenst alkotó pernye már 10 m/m%-ban őrölt pernyét is tartalmazott, ami a testsűrűség növekedését eredményezte. A 7.17. ábra alapján a félüzemi I. szériás kompozit mintákra jellemző diszperzitás állapot értéke 0,7-re adódott.



7.18. ábra: A mért- és az elméleti úton számított eredő hővezetési tényezők összehasonlítása a kompozitot alkotó komponensek térfogatarányának függvényében a félüzemi II. szériás minták esetében.

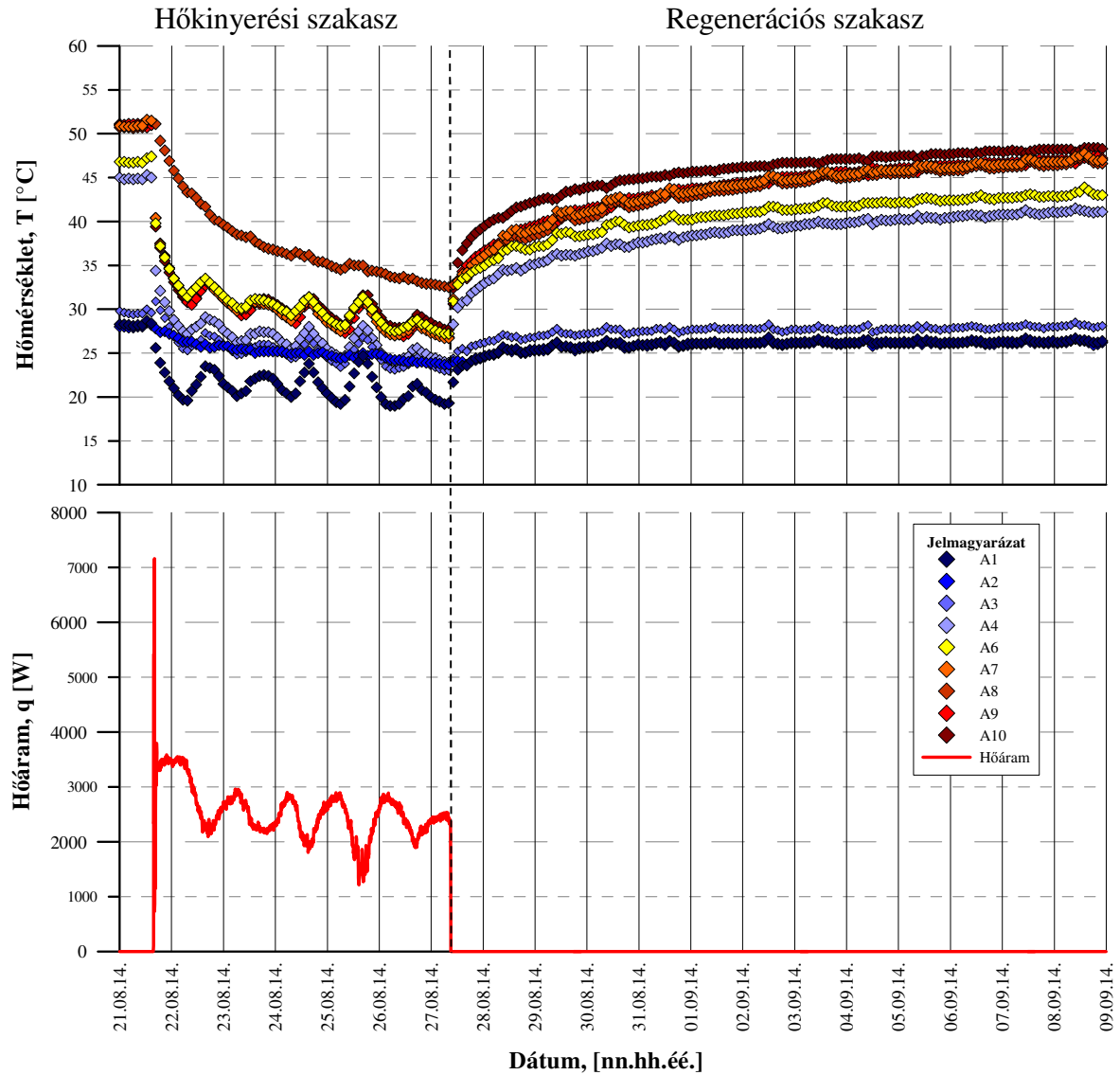
A félüzemi II. szériás minták eredményeit tekintve az iterálással meghatározott tiszta, geopolimer fázis hővezetési tényezője tovább nőtt, értéke 1 W/mK (7.18. ábra). A geopolimer komponens tovább növekvő hővezetési tényezőjének magyarázata, hogy az ebben a szériában készült próbatetek esetében az alkalmazott pernye már 20 m/m%-ban tartalmazott őrlött pernyét. A diszperzitás állapot értéke a félüzemi II. szériás mintáknál a laboratóriumi szériás mintákhoz hasonlóan 0,8.

Összegzésképpen megállapítható, hogy az elkészült próbatetekben a mért- és az elméleti, eredő hővezetési tényező meghatározására felírt univerzális egyenlet (soros- és párhuzamos hővezetési modell összekapcsolása kétfázisú diszperz rendszerekre) által kapott értékek jól korrelálnak egymással. A kidolgozott módszer és a bevezetett új egyenlet alapján a geopolimer komponens ismeretlen hővezetési tényezőjének értéke is kiszámítható, mert a mérésekre legjobban illeszkedő görbe (meghatározott D-diszperzitás állandó esetén), – amelyet a legkisebb korrigált empirikus szórás jellemez – kimetszi ezt az értéket a 0 % EPS tartalomhoz tartozóan. A várakozásoknak megfelelően, az őrlött pernye arányának növekedésével az iterálással meghatározott, tiszta geopolimer komponens hővezetési tényezőjének értéke is nő. A diszperzitás állapot tekintetében megállapítható, hogy

mindhárom széria esetében az értéke 0,8 körüli volt, tehát nagyjából azonos kevertségi állapotot sikerült elérni a próbatestek előállítása során. A kétfázisú rendszerre felírt eredő hővezetési tényező univerzális egyenletének segítségével – amennyiben ismert a két alkotó fázis hővezetési tényezője, illetve a komponensek aránya a kompozitban –, meghatározható a keverékre vonatkozó diszperzitás állapot értéke is, amellyel jellemezhető az egyik fázis másik fázisban való diszpergáltsági állapota.

7.4. A gyáli regionális hulladéklerakóba épített hőkinyerő- és hőhasznosító technológia

A következőkben a gyáli regionális hulladéklerakóban elvégzett félüzemi hőkinyerési- és hőhasznosítási kísérletek (6.4. fejezet) közül csak eggyel, a 2014/I. jelű mérés eredményeivel foglalkozom, amelyet részletesen ismertetek. A mérés 2014.08.21. és 2014.09.09. között történt, amely során a 4 db hőcserélő kutat a csurgalékvízgyűjtő medencére kapcsoltuk. A vizsgálat első 6 napjában a hőcserélő közeget állandó térfogatárammal ($\dot{V} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) keringettük az összekapcsolt hőkinyerő- és hőhasznosító rendszerekben. A 4 db hőkinyerő kutat („A”, „B”, „C” és „D”) egy úgynevezett Tichelmann-rendszer alapján kapcsoltuk össze, ezért feltételezhető, hogy a 4 kút mindegyikén a keringtetett közeg térfogatáramának a negyede haladt át. A 6 napig tartó hőkinyerést 13 nap regeneráció – a munkaközeg itt nem keringett – követte. Példaként az „A” jelű kútban a hőmérsékletmérő szenzorok által rögzített értékeket- és a számított, kinyert hőáram értékeket szemlélteti a 7.19. ábra. A „B” jelű kútban is hasonló tendenciájúak a mért adatok.



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

Az „A”- és „B” jelű kutak esetében a mért hőmérsékleti adatok alapján a kinyert, azaz a keringtetett munkaközeg által kiszállított hőáram meghatározható (7.23.), mivel a víz (keringtetett közeg) fajlagos hőkapacitása (c_m) és sűrűsége (ρ) ismert.

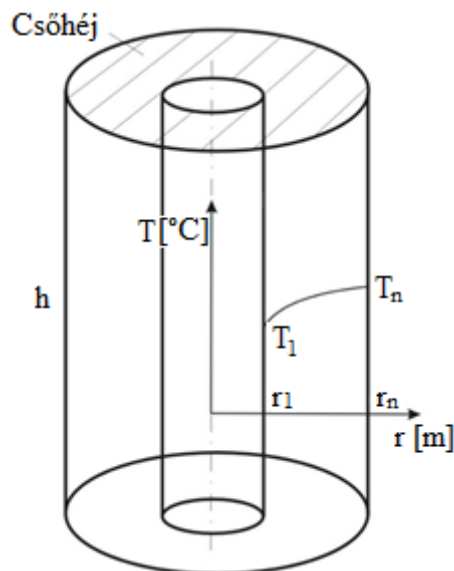
$$q_A = \frac{1}{4} \cdot V \cdot c_m \cdot \rho \cdot (T_{A3} - T_{A1}) \text{ és } q_B = \frac{1}{4} \cdot V \cdot c_m \cdot \rho \cdot (T_{B3} - T_{B1}) \quad (7.23.)$$

A hőkinyerés időtartamának ismeretében (9085 perc) a teljes, kinyert hő mennyisége is meghatározható. Amennyiben feltételezzük, hogy a mért hőáram értéke az 5 perces mérési időintervallum alatt állandó, a teljes, kinyert hő mennyisége numerikus integrálással

meghatározható. A teljes, kinyert hő mennyisége az „A” jelű kútra 0,63 GJ, míg a „B” jelű kútra 0,42 GJ. A számított hőáram adatok alapján az átlagos hőáram az „A” jelű kútra 1152 J/s, a „B” jelű kútra pedig 770 J/s.

A 7.19. ábra alapján a 2014/I. jelű kísérlet két fő szakaszra osztható fel. Az első szakasz az úgynevezett hőkinyerési szakasz. A hőkinyerési szakasz alatt a munkaközeg állandó térfogatárammal keringett a rendszerben, ennek eredményeként a kutakban mért hőmérséklet hiperbolikusan csökkent. A második szakasz a regenerációs szakasz. A regenerációs szakasz alatt – amikor a munkaközeg nem kering a rendszerben – a bomlás során képződő hő hatására a hőmérséklet exponenciálisan nőtt a visszahűtött kutak környezetében, mindaddig, amíg el nem érte a hőkinyerés előtti, azaz a kiindulási állapotot.

Annak érdekében, hogy a lebomlás során képződő hő fajlagos teljesítményét meg lehessen határozni egy megfelelő modellre van szükség. Első lépésben az úgynevezett csőhéj-modellt alkalmaztam, ahol a hőkút magja egy henger, amelynek az átmérője 0,8 m, a magassága pedig 16 m (7.20. ábra). Tételezzünk fel egy csőhéjat a mag körül, amelynek a külső sugara r_n . A henger alakú mag palástjának hőmérséklete r_1 távolságban a mérésekből ismert. Szintén a mérésekből ismert, hogy a hőmérséklet r_1 -től sugárirányban kifelé növekszik. Az origótól számított r_n távolságban a hőmérséklet megegyezik az eredeti, hőkinyerés nélküli hőmérséklettel (erre utal a „native” kifejezés és n index).



7.20. ábra: A csőhéj-modell

Feltételezve, hogy Q hőmennyiség érkezik a külső területről (a csőhéjon kívülről) és áramlik át minden r sugarú, A felülettel rendelkező hengerpaláston, a hővezetés

differenciálegyenlete a következőképpen alakul (7.24.):

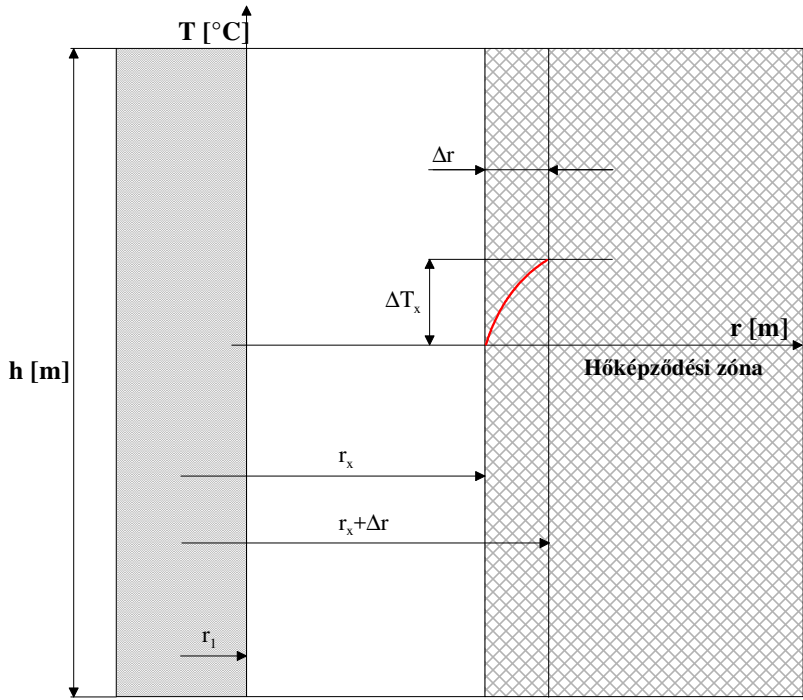
$$q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} \quad (7.24.)$$

A 7.24. egyenlet a korábbiakban már felírt, izotróp anyagok vezetékes hőátadására vonatkozó differenciál egyenletének (2.6.) hengerszimmetrikus esetre vonatkozó egyszerűsítése. A differenciálegyenlet megoldása hengerszimmetrikus, időben állandó hőáram esetére (7.25.):

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h}{\ln \frac{r_n}{r_i}} \cdot (T_n - T_i) \quad (7.25.)$$

Nyilvánvalóan a csőhéj-modell nem alkalmazható tökéletesen a jelenlegi helyzet leírására, ugyanis a hő nemcsak a csőhéjon kívülről érkezik, hanem azon belül is – magában a hulladék testben – képződik. Ezért a csőhéj-modell továbbfejlesztése (7.21. ábra) szükséges. Az említett okok miatt vegyük figyelembe a hőforrást, ahol p a lebomlás fajlagos hőteljesítménye (jele: p , mértékegysége: W/m^3). A csőhéjon belül egy adott sugár jele legyen r_x . Amennyiben a lebomlás fajlagos hőteljesítménye ismert, az r_x - r_n sugarú csőhéjon belül képződő hő mennyisége is meghatározható. Az r_x - r_n sugarú csőhéjon belül képződő hőmennyiség fog keresztül áramolni az r_x sugár által meghatározott hengerpaláston. A leírtak figyelembe vételével a q_x hőáram az alábbi képlettel számítható (7.26.):

$$q_x = p \cdot (r_n^2 - r_x^2) \cdot \pi \cdot h \quad (7.26.)$$



7.21. ábra: A továbbfejlesztett csőhéj-modell

A csőhéj-modell szintén alkalmazható az r_x - $r_{x+\Delta x}$ sugarú csőhéj leírására, ami segítségével a hőmérséklet-változás a 7.27. egyenlet szerinti:

$$q_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x}\right)} \cdot \Delta T_x \cdot h, \text{ amelyből } \Delta T_x = \frac{q_x \cdot \ln\left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h} \quad (7.27.)$$

A hőképződés figyelembe vételével a csőháj-modell már alkalmas a lerakó jellemzésére. A 2014/I. jelű félüzemi kísérlet eredményei alapján a lebomlás fajlagos hőteljesítménye meghatározható. A vizsgálat során négy hőkút dolgozott, amelyekből csak az „A” és „B” jelű kutakat láttuk el hőmérsékletmérő szenzorokkal. Ezért első lépésként az „A” jelű hőkútra a fő műszaki jellemzőket meghatároztam (7.13. táblázat).

A mag palástjának hőmérséklete, T_1 [°C]	Eredeti, hőkinyerés nélküli hőmérséklet, T_n [°C]	Kinyert hőáram, q [W]	Hővezetési tényező, λ [W/mK]
34	50	961	1,4

7.12. táblázat: Az iteratív számítási eljáráshoz felhasznált paraméterek és értékeik

A gyáli regionális hulladéklerakóban deponált hulladék hővezetési tényezőjét a bemutatott mérések során már meghatároztam (7.2.6. fejezet). A mérések alapján a gyáli regionális hulladéklerakóban deponált hulladék átlagos hővezetési tényezője 1000 kg/m^3 -es halmazsűrűség mellett $1,4 \text{ W/mK}$.

A további számításokhoz szükséges p és r_n értékét iteratív számítással határoztam meg. Az iteratív számításhoz első lépésben az r_1 - r_n távolságot 10 részre osztottam, majd a 7.27. egyenlet alapján meghatároztam ΔT_x értékét is. Az r_n és p értékeket szisztematikusan addig változtattam, amíg T_{nc} és q_c számított értékei el nem érték a vizsgálat során mért értékeket ($T_n = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ és $q = 961 \text{ W}$). A kapott eredményeket a 7.14. 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

7.13. táblázat: Az iteratív számítási eljárás eredménye

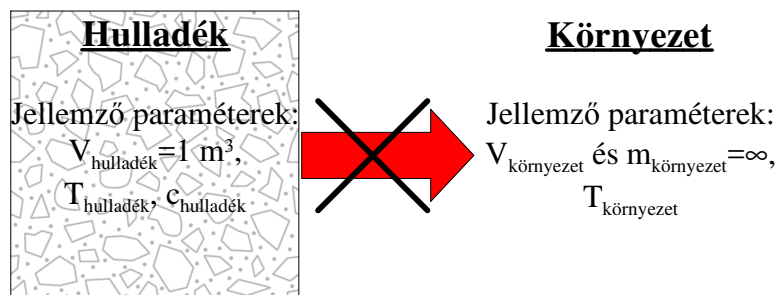
Az iteratív számítási eljárás a $p=0,53 \text{ W/m}^3$ és az $r_n=6 \text{ m}$ értékekhez konvergált, ami tulajdonképpen azt jelenti, hogy a hőkút egy 12 m átmérőjű és 16 m magasságú henger alakú hulladéktestből vonta el a hőt, köbméterenként $0,53 \text{ W}$ teljesítménnyel. A kapott eredmények könnyen ellenőrizhetők. A henger térfogata az említett magassággal és átmérővel számolva: 1809 m^3 . Figyelembe véve, hogy a lebomlásból származó fajlagos hőteljesítmény $0,53 \text{ W/m}^3$, a 2014/I. jelű vizsgálatához tartozó hőkinyerési szakasz időtartama pedig 9085 perc , a teljes elvont (akkor ennyi képződött) hő mennyisége $0,54 \text{ GJ}$ -ra adódik, ami jól közelíti a kísérlet során mért értéket. Amennyiben a munkaközeg térfogatáramát a hőcserélő rendszerben növeljük, a csőhéjhoz tartozó sugár (r_n) szintén nőni fog, tehát nagyobb térfogatú hengerből lehetséges a hőkinyerés.

A kísérlet alapján egy másik fontos következtetés, hogy az intenzív hőkinyerési szakaszt egy regenerációs szakasznak kell követnie, amikor a munkaközeg nem kering a hőcserélő rendszerben. A regenerációs szakasz alapján a lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye (p_e) is meghatározható. A vizsgálat során tehát a hőkinyerési szakasz 9085 percen át, a regenerációs szakasz pedig 18180 percen át tartott, amelyből a p_e értéke $0,18 \text{ W/m}^3$ -re adódik. A lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye $0,18 \text{ W/m}^3$, amely a hőcserélő technológia méretezéséhez nélkülözhetetlen paraméter, ugyanis ez az érték adja meg az adott

hulladéklerakó adott ütemének esetében, a deponált hulladékra jellemző hőképződés nagyságát. Ez azt is jelenti, hogy az adott esetben, $0,18 \text{ W}$ teljesítménnyel a lerakó adott köbméterét tekintve a hő folyamatosan, hosszútávon elvonható.

7.5. A hulladéklerakók hőtani modellje

A szakirodalmi összefoglalás (2. fejezet) során számos olyan publikációt ismertettem, amelyek a hulladéklerakókból kinyerhető hő nagyságával foglalkoznak. Az említett szakirodalmak mindegyikében a kinyerhető hő becslésének alapja a biokémiai folyamatok hatására bekövetkező hőmérséklet-emelkedés – tehát belső energia növekedés – miatt kialakuló hőmérséklet-különbség, illetve az adott hulladék fajlagos hőkapacitása. A jelenséget jobban megvizsgálva belátható, hogy ez a megközelítés nem ad jó becslést a lerakott hulladékból hosszútávon kinyerhető hő nagyságára. A vizsgált depóniát jellemezzük egy 1 m^3 -es hulladéktesttel. A külső környezet (atmoszféra és geoszféra) tömege- és térfogata, ezáltal hőkapacitása is végtelen az 1 m^3 -es hulladéktesthez képest. A kiindulási állapot legyen az a pillanat, amikor a lebomlás elkezdődik $p_e=0,18 \text{ W/m}^3$ állandó hőteljesítménnyel (7.22. ábra). Ebben a pillanatban a hulladéktest- és a külső, környezet hőmérséklete megegyezik, vagyis nincs kialakuló hőáram a hulladéktest és a környezete között (7.28.).



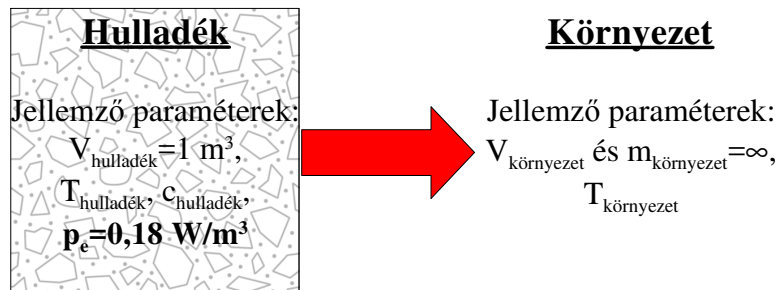
7.22. ábra: Hőtani modell: kiindulási állapot

$$T_{\text{hulladék}} = T_{\text{környezet}}, \text{ tehát } q=0 \quad (7.28.)$$

Vizsgáljunk meg egy úgynevezett köztes, még nem egyensúlyi állapotot, amely során a lebomlás folytatódik a $0,18 \text{ W}$ fajlagos hőteljesítménnyel. A folyamatos hőképződés hatására az egységnyi térfogatú hulladéktest hőmérséklete emelkedni kezd, azonban a külső környezet hőmérséklete nem változik, mert a hőkapacitása gyakorlatilag végtelen. A

hőmérséklet-különbség által meghatározott hőáram alakul ki (7.29.), amely a hulladéktestből a környezet felé áramlik (7.23. ábra).

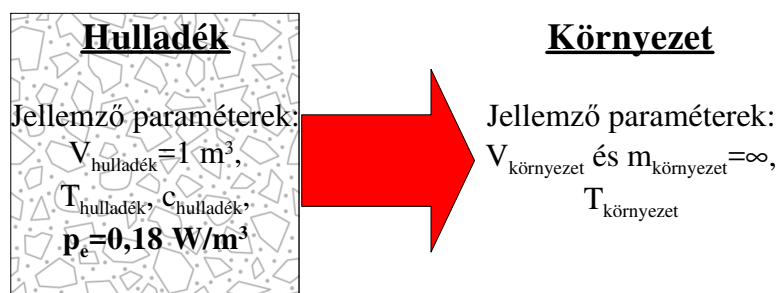
$$T_{\text{hulladék}} > T_{\text{környezet}}, \text{ tehát } q > 0 \quad (7.29.)$$



7.23. ábra: Hőtani modell: köztes, még nem egyensúlyi állapot

A 3. vizsgált állapot az egyensúlyi állapot (7.24. ábra), mindaddig, ameddig p_e értéke konstans marad. A modell rendszer akkor kerül egyensúlyi állapotba, amikor a hulladéktest és a környezet által meghatározott hőmérséklet-gradiens miatt kialakuló hőveszteség éppen a keletkezővel egyenlő (7.30.):

$$q = p_e \cdot V \quad (7.30.)$$



7.24. ábra: Hőtani modell: egyensúlyi állapot

Az egyensúlyi állapot során a hulladéktest hőmérséklete beáll egy konstans értékre (elevated temperature), azaz az összes, további képződő hő a környezet felé fog áramlani, azt fogja „fűteni”. Ettől a pillanattól fogva, ha a $0,18 \text{ W/m}^3$ hőteljesítménnyel folyamatosan képződő és a környezetbe távozó hőt valamilyen hőcserélő rendszer segítségével elvonjuk egy éven keresztül, akkor fajlagosan $5,67 \text{ MJ}$ energiát nyerhetünk ki. A kinyerhető hő nagyságának tekintetében azt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a depóniában akár

évtizedeken keresztül is folytatódhatnak a lebomlási folyamatok, amelyek során a hőképződés is folyamatos a lerakó belsejében. A leírtak alapján már érthető, hogy miért nem ad megfelelő nagyságrendi becslést a fajlagos hőkapacitás és a kialakuló hőmérséklet-különbség segítségével meghatározott, kinyerhető hőenergia mennyisége. Yesiller et al. (2015) elméleti számítások alapján meghatározta a depóniából fajlagosan kinyerhető hőenergia mennyiségét, amelynek értékére $5,2 \text{ MJ/m}^3$ -t kapott. A számítás alapja a depóniában létrejövő hőmérséklet-emelkedés – közvetve a belső energia növekedése –, így a kinyerhető energia arányos a felmelegedett hulladék mezofil hőmérsékletre történő egyszeri visszahűtésével nyert energiával. Az elvégzett szisztematikus félüzemi kísérletek alapján a hulladék a hőkinyerés, ennek következtében a mezofil hőmérsékletre történő visszahűtés után ismét felmelegszik, így ez az energiamennyiség folyamatosan kinyerhető. A folyamatos hőfejlődést, illetve a hő környezetbe történő távozását, ezáltal a hőtani modell helyességét 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. Konklúzióképpen megállapítható, hogy egyidejűleg lehetséges az optimált depóniagáz termelés ($41 \text{ }^\circ\text{C}$) és a folyamatos hőelvonás.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az értekezéshez kapcsolódó szakirodalom kutatás alapján megállapítottam, hogy a fellelhető tanulmányok jellemzően nem foglalkoznak a hulladéklerakók bomlása során képződő hőjének kinyerésével, illetve hasznosításával. A hulladékok fizikai-, hőtani paramétereinek értékei jelentősen szórnak annak heterogenitása, valamint összetétele miatt.

Az általam végzett kutatások, kísérletek fő célkitűzése a keletkező hő nagyságrendjének-, valamint az azt befolyásoló tényezőknek a vizsgálata volt. Az említettekkel összhangban további cél volt a hulladéklerakó hőtani szempontból történő jellemzése-, illetve a hőkinyerés lehetséges módjainak vizsgálata. A doktori kutatómunka során megszerzett ismeretek a célkitűzések kiterjesztését eredményezték, amely kibővült a hulladéklerakók hőgazdálkodásának megalapozásával, mivel számos hőgazdálkodási opció közül lehet választani, amelyek tervezéséhez az eredmények már kellő alapot adnak.

Az általam végzett kísérleti munka az alábbi fő szakaszokra osztható:

- Első lépésként a hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére egy kísérleti berendezést fejlesztettünk ki a témavezetőmmel, amellyel a gyáli regionális hulladéklerakóban deponált hulladék fizikai- és hőtani paramétereit vizsgáltam a nedvességtartalom, a mélység, a halmazsűrűség, valamint a hulladék korának függvényében.
- A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel párhuzamosan beépítésre került egy 100 mérőhelyes hőmérséklet-monitoring rendszer a gyáli regionális hulladéklerakóba, amellyel a depóniában kialakuló hőmérsékletek hosszútávú vizsgálatát végeztem el.
- Harmadik lépésben megépítettük a diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére alkalmas berendezést, amely segítségével kétfázisú diszperz rendszerek eredő hőtani paramétereit vizsgáltam.
- Végül a Depóniahő-hasznosítási technológia kidolgozása című projekt konzorciumi partnereivel közösen beépítettük a félüzemi hőkinyerő- és hőhasznosító rendszert, amely segítségével a kinyerhető hőenergia mennyiségét és a hőkinyerő kutak hatókörnyezetét meghatároztam.

Az általam végzett kutatások hozzájárulnak a hulladéklerakók hőgazdálkodásának megalapozásához, illetve a többfázisú diszperz rendszerek eredő hőtani tulajdonságainak mélyebb megértéséhez.

A fentiekkel összefüggésben az értekezés fő célkitűzéseinek megfelelően az alábbi fontosabb megállapítások emelhetők ki:

- A hulladékok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel elvégzett mérések alapján megállapítható, hogy a gyáli regionális hulladéklerakóban deponált hulladék hővezetési tényezőjének jellemző értéke 1000 kg/m^3 -es halmazsűrűség mellett $1,4 \text{ W/mK}$. Ezzel összefüggésben a szabványos hulladék analízis (MSZ-21420 28 és 29) alapján elméleti becslést tettem a deponált hulladék hőtani paramétereire, amelyek jól korrelálnak a mért adatokkal.
- A hőmérséklet-monitoring rendszer mért adatai alapján kijelenthető, hogy az egyes ütemekben – a deponált hulladék korának megfelelően – a bomlási folyamatok hatására létrejövő hőmérséklet igen eltérő. A művelés alatt álló (a hulladék deponálása itt zajlik) ütemben felmelegedési tendencia volt megfigyelhető a vizsgált időszakban, amely exponenciális görbékkel jellemezhető. Az idősebb korú (8-10 év) hulladékot tartalmazó depónia ütemben a hőmérsékletet tekintve egy állandósult állapot figyelhető meg, amely lineáris egyenesekkel jellemezhető. Továbbá a mérések alapján megállapítottam, hogy a legmagasabb hőmérsékleti értékek az aljzatszigetelő rendszerhez közel, a felszíntől számított legmélyebb vizsgálati rétegben alakulnak ki.
- A diszperz anyagok hőtani tulajdonságainak mérésére fejlesztett berendezéssel a többfázisú diszperz rendszereken (geopolimer-EPS kompozit) elvégzett vizsgálataim alapján, valamint a kétfázisú diszperz rendszerek esetére felírt hővezetés univerzális egyenletének segítségével sikerült összefüggést találni a hővezetési tényező-, a kompozit diszperzítás állapota-, valamint a kompozitot alkotó fázisok térfogathányada között.
- Végül a félüzemi hőkinyerési- és hőhasznosítási vizsgálatok eredményeiből meghatároztam a lebomlás fajlagos-, illetve effektív fajlagos hőtéljesítményét, valamint a kinyerhető hőenergia nagyságát. A függőleges kutakon elvégzett hőkinyerési vizsgálatok alapján a továbbfejlesztett csőháj-modell segítségével meghatároztam a kutak hatókörnyezetét is. A félüzemi hőkinyerési- és hőhasznosítási vizsgálatok további, igen fontos eredménye a hulladéklerakók hőtani modellje, amely alapján megállapítottam, hogy egyidejűleg lehetséges az optimált depóniagáz termelés ($41 \text{ }^\circ\text{C}$) és a folyamatos hőelvonás.

SUMMARY

Based on the literature review related to the thesis, it can be concluded, that the available papers are generally not dealing with the extraction and utilization of heat generated by decomposition processes from municipal solid waste landfills. The values of physical and thermal parameters of wastes significantly differ due to their heterogeneity and composition.

In my research work, the main objective of the experiments was the determination of magnitude of generated heat energy, as well as the investigation of influencing factors on it. Further aims were to characterize the municipal solid waste landfills by thermal aspects and investigate the possible technological ways of heat extraction. The knowledge acquired during the doctoral research work had resulted the extension of the objectives, which have expanded with establishing the fundament of heat management for municipal solid waste landfills, whereas a number of heat management options can be chosen and planning is feasible based on the experimental results.

My research work can be divided into the following major sections:

- As a first step, a thermal conductivity measuring device for municipal solid wastes has been developed by which the physical- and thermal properties of municipal solid waste can be determined in function of the moisture content, sampling depth, bulk density and the age of waste.
- Parallel the thermal conductivity measurements; a temperature monitoring system (containing 100 temperature sensors) has been installed into the Gyál municipal solid waste landfill. Long-term investigation of formed temperatures can be performed by the temperature monitoring system.
- In the third step, a laboratory scale version of the thermal conductivity measuring device for disperse materials has been designed. The resultant (inherent) thermal properties of two phase disperse systems can be measured by the developed device.
- Last but not least, a pilot scale decomposition heat extraction and utilization system has been built into the Gyál municipal solid waste landfill. As a result of the systematic test series the extractable heat energy was determined.

The results of my research contribute to the establish of fundament of heat management for municipal solid waste landfills giving a better understanding of the resultant (inherent) thermal properties of multi-phase disperse systems.

According to the main objectives of the thesis, the following conclusions can be highlighted:

- Based on the measurements of the thermal conductivity device, the average thermal conductivity value of the deposited waste in the Gyál MSW landfill is 1.4 W/mK in case of 1000 kg/m³ bulk density. A theoretical estimation of thermal parameters of the deposited waste were performed by standardized waste analysis (MSZ-21420-28 and 29), which correlates well with the measured data.
- According to the measured data of the temperature monitoring system the formed temperature can be significantly different – as the age of the waste – in the landfill sections due to the decomposition processes. Warming tendency was observed in under cultivation section during the investigation period which can be characterized by exponential curves. A steady state condition of temperature can be observed in old aged MSW sections (8-10 years) which can be characterized by linear lines. The highest temperature values formed near the landfill liner system which is the deepest monitored layer.
- The laboratory scale thermal conductivity measuring device for disperse systems and the universal equation of thermal conductivity for two phase disperse systems allowed to find correlation among the thermal conductivity, dispersion characteristics of the composite and the volumetric fraction of the components of the composite.
- The effective- and specific power of decomposition heat generation as well as the magnitude of extractable heat energy were determined based on the pilot scale heat extraction- and utilization experiments. Based on the measurements of heat wells, the tube shell with heat generation model was applied to determine the radius of the cylinder where heat can be extracted from. The thermal model for municipal solid waste landfills has been elaborated resulting that the production of optimized landfill gas (41 °C) and the continuous heat extraction can be performed at the same time based on the pilot scale heat extraction- and utilization experiments.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondok Dr. habil. Faitli József témavezetőmnek, hogy lehetőséget biztosított munkám sikeres elvégzéséhez és értekezésem megírásához. Köszönöm segítőkész támogatását és disszertációm alapos, valamint kritikus átnézését.

Köszönetet mondok Dr. Gombkötő Imre jelenlegi intézetigazgatónak, hogy támogatott értekezésem megírásában az intézeti háttér biztosításával, továbbá köszönetet mondok az intézetben dolgozó valamennyi munkatársnak a lelki és szakmai támogatásukért, kiemelve doktorandusz társaim segítségét. Külön köszönet illeti Dr. Murányi Attila tudományos tanácsadót.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönetet mondok családomnak és páromnak szerető támogatásukért.

A Depóniahő-hasznosítási technológia kidolgozása (KMR_12-1-2012-0128) megnevezésű projekt a Magyar Kormány támogatásával, a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség kezelésében, a Kutatási és Technológiai Innovációs Alap finanszírozásával valósult meg.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN ELKÉSZÜLT 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: Norma Chandler (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, 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, 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, A., Nowak (szerk.), *XIX. Waste Recycling Conference*. Konferencia helye, ideje: Krakó, Lengyelország, Krakó, 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, 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. Faitli 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 Faitli J. (2015): **Települési szilárd hulladéklerakó működésének jellemzése környezeti szempontból.** In: Darvas, B., Bakonyi, G., Biró, B., Major, J., Mörtl, M., 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., Faitli 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).

Szóbeli előadások:

17. Magyar T. és Faitli 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 Faitli J. (2015): **A települési szilárd hulladéklerakókban keletkező bomlási hő kinyerésének- és hasznosításának vizsgálata.** *„Introduction of Selective Waste Collection and Recycling in the Area of Beregovó (HUSKROUA/1001/011)” c. projekt zárókonferencia,* Ukrajna, Makkosjánosi (2015.12.17.)

EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

19. Kovács F., Magyar T. (2017): **Uránkészletek a világban és a hazai lehetőségek.** In: Silye L. (szerk.), *19. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia.* 273 p. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2017.03.30-2017.04.01. Kolozsvár: EMT, pp. 101-104.
20. T., Magyar, Á., Horváth, I., Gombkötő (2017): **Mechanical processing of end of life printed circuit boards for recovery of metals.** *ECOTERRA: Journal of Environmental Research and Protection* 14:(2), pp. 27-34.
21. Magyar T., Horváth Á. (2017): **Fémek nyomtatott áramkörtől történő kinyerésének kísérleti vizsgálata mechanikai eljárások alkalmazásával.** In: Kékesi T. (szerk.), *MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference.* Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2017.04.20-2017.04.21. Miskolc: Miskolci Egyetem, Paper A1_5_Magyar_Tamas. 10 p. (ISBN: 978-963-358-132-2)
22. S., Nagy, L., Bokányi, I., Gombkötő, T., Magyar (2017): **Recycling of Gallium from End-of-Life Light Emitting Diodes.** *Archives of Metallurgy and Materials* 62:(2B), pp. 1161-1166.
23. S., Nagy, L., Bokányi, I., Gombkötő, T., Magyar, B., Fekete-Soltész: **Recycling of Gallium and REE from End-of-Life Light Emitting Diodes.** In: *14th International Symposium on Novel and Nano Materials (ISNNM-2016).* Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.07.03-2016.07.08., p. 131.
24. S., Nagy, J., Faitli, I., Gombkötő, B., Csöke, T., Magyar, Cs., Jakab (2015): **Mechanical Preparation Methods for LCD Panels Originated from Used TVs and Monitors.** In: N., Calic, L., Andric, I., Miljanovic, I., Simovic (szerk.), *Proceedings of XVI. Balkan Mineral Processing Congress.* Konferencia helye, ideje: Belgrád, Szerbia, 2015.06.17-2015.06.19. Belgrade: University of Belgrade, pp. 229-235. (ISBN: 978-86-82673-10-1)
25. Bokányi L., Faitli J., Varga T., Mádainé Üveges V., Máдай F., Bruncszlik A., Magyar T. (2014): **A pátka-szűzvári fluoritos meddő eljárás technikai vizsgálata és előkészítési technológiai koncepciója.** In: Molnár J. (szerk.), *A Pátka-Szűzvár egykori fluorit- és ércelőfordulásunk újraértékelése.* Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetem, pp. 141-156. (CriticEl; 3.) (ISBN: 978-963-08-8785-4)

26. B., Csőke, L., Bokányi, J., Faitli, S., Nagy, T., Magyar, T., Varga, V., Máдай-Üveges (2014): **A possible source of indium - LCD display panels**. In: J., Földessy (szerk.), *Basic research of the strategic raw materials in Hungary*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 103-113. (CriticEL; 10.) (ISBN: 978-615-80073-5-1)
27. Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S., Mádainé Üveges V., Varga T., Magyar T. (2014): **Az elhasznált LCD kijelzők előkészítése a szakirodalomban**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 21-43. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.) (ISBN: 978-615-80073-2-0)
28. J., Faitli, T., Magyar, A., Takács (2014): **Tantalum from capacitors**. In: J., Földessy (szerk.), *Basic research of the strategic raw materials in Hungary*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 100-103. (CriticEL; 10.)(ISBN: 978-615-80073-5-1)
29. Faitli J., Magyar T. (2014): **Az LCD kijelző felépítése, működési elve**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 14-21. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.) (ISBN: 978-615-80073-2-0)
30. Faitli J., Magyar T., Nagy S. (2014): **Mintavételezés, TV és monitor szétbontása, szerkezeti anyagai**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 44-51. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.) (ISBN: 978-615-80073-2-0)
31. Faitli J., Magyar T., Nagy S., Zajzon N. (2014): **Az LCD panel szerkezete, alkatrész és elem-összetételének mérése**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 51-57. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.) (ISBN: 978-615-80073-2-0)
32. Faitli J., Magyar T., Takács A. (2014): **Tantál kondenzátor előkészítése**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 151-155. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.)(ISBN: 978-615-80073-2-0)

33. J., Faitli, T., Magyar, S., Nagy, A., Takács (2014): **Mechanical Preparation of SMD Capacitors from Waste PCBs in Order to Recover Tantalum**. In: I., Gombkötő (szerk.), *18th International Conference of Waste Recycling*. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2014.10.09-2014.10.10. Miskolc: University of Miskolc, Paper Waste. 7 p. (ISBN: 978-615-5216-61-9)
34. Magyar T., Faitli J. (2014): **Kondenzátorok mechanikai előkészítése a tantál visszanyerése céljából**. „Földtudományi Újdonságok” - 2014/6 - Előadás, Magyar Földtani és Geofozikai Intézet, Budapest.
35. Nagy S., Csőke B., Magyar T. (2014): **Mechanikai előkészítési alapvizsgálatok**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 59-68. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.)(ISBN: 978-615-80073-2-0)
36. Nagy S., Csőke B., Gombkötő I., Magyar T., Zajzon N., Lakatos K.T. (2014): **Elhasznált plazma TV mechanikai előkészítése**. In: Csőke B., Bokányi L., Faitli J., Nagy S. (szerk.), *Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében*. Miskolc: Milagrossa Kft., pp. 89-100. (CriticEL Monográfia sorozat; 7.) (ISBN: 978-615-80073-2-0)
37. S. Nagy, B., Csőke, I., Gombkötő, J., Faitli, T., Magyar, B., Oláh (2014): **Mechanical preparation of LCD TVs and monitors**. In: J., Yianatos, A., Doll, C., Gomez (szerk.), *XXVII International Mineral Processing Congress*. Konferencia helye, ideje: Santiago de Chile, Chile, 2014.10.20-2014.10.24., pp. 200-209.
38. Z., Pap, T., Magyar, Z., Molnár, K., Bohács (2014): **Some segments of the project CriticEL**. In: T., Kékesi (szerk.), *28th microCAD Nemzetközi Multidiszciplináris Tudományos Konferencia = 28th microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2014.04.10-2014.04.11. Miskolc: Miskolci Egyetem, pp. 1-7. (ISBN: 978-963-358-051-6)
39. Csőke B., Faitli J., Nagy S., Mádainé Üveges V., Magyar T. (2013): **Kritikus elemek a másodnyersanyag-forrásokban, elektronikai hulladékokban: Critical elements in secondary raw material resources, in electronic wastes**. *Bányászati és Kohászati Lapok-Bányászat* 146:(5-6), pp. 48-57.

40. J., Faitli, I., Gombkötő, T., Magyar (2013): **The examination of Hungarian gangue materials processing for the recovery of some critical elements.** In: I., Nishkov, I., Grigorova, M., Mochev (szerk.), *Proceedings of XV Balkan Mineral Processing Congress.* Konferencia helye, ideje: Szopol, Bulgária, 2013.06.12-2013.06.16. Sofia: University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski”, pp. 486-488. Vol. 2. (ISBN: 978-954-353-218-6)
41. Gombkötő I., Magyar T. (2013): **Mik azok a kritikus nyersanyagok, mi lenne velünk nélkülük?** *Szellem és Tudomány* 4:(2), pp. 58-78.
42. Magyar T. (2013): **Erőművi pernye tömedékanyagként történő vizsgálata savas környezetben: Investigation of fly ash based backfilling material in acidic environment.** In: Miskolci Egyetem, *microCAD 2013, E Section: XXVII. International Scientific Conference.* Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2013.03.21-2013.03.22. Miskolc: Miskolci Egyetem, pp. 1-7. (ISBN: 978-963-358-018-9)
43. Magyar T., Gombkötő I. (2013): **A kritikus nyersanyagokról.** *HulladékOnline* 4:(1), pp. 1-24.

SZAKIRODALMI JEGYZÉK

- Attal, A., Akunna, J., Camacho, P., Salmon, P. és Paris, I. (1992): **Anaerobic degradation of municipal wastes in landfill.** *Water Sci. Technology* 25 (7), pp. 243-253.
- Beatty, B., Benda, E., Jadeja, M., Lee, S. és Mohamed, A. (2009): **Canada's 30 year old aerobic landfill.** In: Cossu, R., Diaz, L.F., Stegmann, R. (Eds.), *Sardinia 2009 - Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*. CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, S. Margherita di Pula – Cagliari, Sardinia, Italy.
- Bonany, J.E., Van Geel, P.J., Gunay, B.H. és Isgor, B.O. (2013): **Simulating waste temperatures in an operating landfill in Québec, Canada.** *Waste Management & Research*, 31(7), pp. 692-699.
- Brandstätter, C., Laner, D. és Fellner, J. (2015): **Carbon pools and flows during lab-scale degradation of old landfilled waste under different oxygen and water regimes.** *Waste Management* 40, pp. 100-111.
- Cecchi, F., Pavan, P., Musacco, A., Mata-Alvarez, J. és Villing, G. (1993): **Digesting the organic fraction of municipal solid waste: Moving from mesophilic (37 °C) to thermophilic (55 °C) conditions.** *Waste Management Res.* 11, pp. 403-414.
- Christensen, T.H. és Kjeldsen, P. (1989): **Basic biochemical processes in landfills;** *Sanitary Landfilling* (ed.: Christensen, T.H., Cossu, R. és Stegmann, R.). Academic Press, pp. 29-48.
- 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.
- Davies, T.W. (2004): **Estimated average gross calorific values.** Univ. of Exeter, Dept. of Engineering, Exeter, U.K., Web: http://www.ex.ac.uk/~TWDavies/energy_conversion/calorific%20values%20of%20fuels.htm, November 23, 2004.
- DeWalle, F.B., Chian, E.S.K. és Hammerberg, E. (1978): **Gas production from solid waste in landfills.** *J. Environ. Eng. Div. (Am. Soc. Civ. Eng.)*, 104, (EE3), pp. 415–432.
- El-Fadel, M., Fayad, W. és Hashisho, J. (2013): **Enhanced solid waste stabilization in aerobic landfills using low aeration rates and high density compaction.** *Waste Management Res.* 31, pp. 30-40.

- El-Fadel, M., Findikakis, A. N. és Leckie, J. O. (1996): **Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in sanitary landfills**. I: Model formulation. *Waste Management Res.*, 14(5), pp. 483-504.
- Farquhar, G.J. és Rovers, F.A. (1973): **Gas production during refuse decomposition**. *Water, Air, Soil Pollut.*, 2(4), pp. 483-495.
- 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.
- Gholamifard, S., Robert, E., és Duquennoi, C. (2008): **Modeling anaerobic bioreactor landfills in methanogenic phase: long term and short term behaviors**. *Water Research*, 42(20), pp. 5061-5071.
- Gibbs, A. (2004): **Gasification as an option for municipal waste**. Cardiff Foundation of Environmental Research, Cardiff Univ. School of Engineering, Cardiff, Wales. Web: <http://www.cfer.info>, November 16, 2004.
- Hanson, J.L., Edil, T.B. és Yesiller, N. (2000): **Thermal properties of high water content materials**. *ASTM Special Technical Publication 1374, Geotechnics of high water content materials*, Edil T.B., Fox, P.J. eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., pp. 137-151.
- 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.
- Hartz, K.E., Klink, R.E. és Ham, R.K. (1982): **Temperature effects: methane generation from landfill samples**. *J. Environ. Eng. Div. (Am. Soc. Civ. Eng.)*, 108(4), pp. 629-638.
- Heyer, K.U., Hupe, K., Ritzkowski, M., Stegmann, R. (2005): **Pollutant release and pollutant reduction–impact of the aeration of landfills**. *Waste Management*, 25, pp. 353-359.

- Hoornweg, D. és Bhada-Tata, P. (2012): **What a waste - A global review of solid waste management**, Research report of World Bank, March 2012, No. 15, p. 116
- Houi, D., Paul, E. és Couturier, C. (1997): **Heat and mass transfer in landfills and biogas recovery**. *Proc. 6th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al., eds., Vol. I, CISA, Italy, pp. 101-108.
- Hrad, M., Gamperling, O. és Huber-Humer, M. (2013): **Comparison between lab- and full-scale applications of in situ aeration of an old landfill and assessment of long-term emission development after completion**. *Waste Management* 33, pp. 2061-2073.
- Hrad, M. és Huber-Humer, M. (2017): **Performance and completion assessment of an in-situ aerated municipal solid waste landfill - Final scientific documentation of an Austrian case study**. *Waste Management* 63, pp. 397-409.
- Jontes, L. (1988): **Rittinger Peter von**. In: *Österreichisches Biographisches Lexikon 1815–1950 (ÖBL)*. Vol. 9, Austrian Academy of Sciences, Vienna, ISBN: 3-7001-1483-4, p. 180
- Kandula, M. (2009): **On the effective thermal conductivity of water frost considering mass diffusion and eddy conductivity**. *Int. J. Heat Mass Transfer*.
- Koerner, G. (2001): **In situ temperature monitoring of geosynthetics used in a landfill**. *Geotechnical Fabrics Rep.* 19(4), pp. 12-13.
- 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
- Kurniawan, T.A., Lo, W.-H. és Chan, G.Y.S. (2006): **Degradation of recalcitrant compounds from stabilized landfill leachate using a combination of ozone-GAC adsorption treatment**. *J. Hazard. Mater. B137*, pp. 433-455.
- Lefebvre, X., Lanini, S. és Houi, D. (2000): **The role of aerobic activity on refuse temperature rise. I: Landfill experimental study**. *Waste Management Res.*, 18(5), pp. 444-452.
- Liu, L., Xue, Q., Zeng, G., Ma, J. és Liang, B. (2015): **Field-scale monitoring test of aeration for enhancing biodegradation in an old landfill in China**. *Environ. Prog. Sust. Energy*.
- 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.

- Marschall, T.J. és Holmes, J.W. (1979): **Soil physics**. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mata-Alvarez, J. és Martinez-Viturtia, A. (1986): **Laboratory simulation of municipal solid waste fermentation with leachate recycle**. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 36(12), pp. 547–556.
- Matsuto, T., Zhang, X., Matsuo, T. és Yamada, S. (2015): **Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill**. *Waste Management* 36, pp. 204-212.
- Maxwell, J.C. (1865): **A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field**. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Vol. 155.
- 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.
- Neusinger, R., Drach, V., Ebert, H.-P., és Fricke, J. (2005): **Computer Simulations that Illustrate the Heat Balance of Landfills**. *International Journal of Thermophysics*, 26(2), pp. 519-530.
- Pirt, S. J. (1978): **Aerobic and anaerobic microbial digestion in waste reclamation**. *J Appl. Chemistry and Biotechnology.*, 28, pp. 232-236.
- Raga, R. és Cossu, R. (2014): **Landfill aeration in the framework of a reclamation project in Northern Italy**. *Waste Management* 34, pp. 683-691.
- Raga, R., Cossu, R., Heerenklage, J., Pivato, A. és Ritzkowski, M. (2015): **Landfill aeration for emission control before and during landfill mining**. *Waste Management* 46, pp. 420-429.
- Rayleigh, L. (1892): **On the influence of obstacles in rectangular order upon the properties of a medium**. *Philosophical magazine*, Vol. 56, pp. 481-502.
- 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.
- Rettenberger, G., Mezger, H., és Urban, K.S. (1992): **Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen Leitfaden Deponiegas**. Herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg., 1. Auflage Karlsruhe, p. 141

- Rickard, W.D.A. és Riessen, V.A. (2014): **Performance of solid and cellular structured fly ash geopolymers exposed to a simulated fire.** *Cement & Concrete Composites* 48, pp. 75-82.
- Ritzkowski, M., Heyer, K.U. és Stegmann, R. (2006). **Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills.** *Waste Management* 26, pp. 356-372.
- Ritzkowski, M. és Stegmann, R. (2010): **Generating CO₂-credits through landfill in situ aeration.** *Waste Management* 30, pp. 702-706.
- Ritzkowski, M. és Stegmann, R. (2012): **Landfill aeration worldwide: concepts, indications and findings.** *Waste Management* 32, pp. 1411-1419.
- Ritzkowski, M. és Stegmann, R. (2013): **Landfill aeration within the scope of postclosure care and its completion.** *Waste Management* 33, pp. 2074-2082.
- Ritzkowski, M., Walker, B., Kuchta, K., Raga, R. és Stegmann, R. (2016): **Aeration of the teuftal landfill: field scale concept and lab scale simulation.** *Waste Management* 55, pp. 99-107.
- Roth, K. (2012): **Soil Physics.** Lecture Notes (v2.2). Institute of Environmental Physics, Heidelberg University, p 391.
- 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.
- Rowe, R.K., Hoor, A. és Pollard, A. (2010): **Numerical Examination of a Method for Reducing the Temperature of Municipal Solid Waste Landfill Liners.** *Journal of Environmental Engineering*, 136(8), pp. 794-804.
- Stegman, R. és Spendlin, H.H. (1985): **Research activities on enhancement of biochemical processes in sanitary landfills.** *Proc. of the Conf. New Directions and Research on Enhancement of Biochemical Processes in Sanitary Landfills*. University of British Columbia, Vancouver, Canada, pp. 23-28.
- Swiss Federal Office of Energy (SFOE) (2004): **Calorific value of energy resources.** Web: <http://www.energie-schweiz.ch/internet/00735/index.html?lang=en>, November 23, 2004.
- Szabó, I. (1999): **Hulladéklerakók lezárása és rekultivációja II.** Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem, Hidrogeológia- Mérnökgeológiai Intézeti Tanszék.
- Szabó, I. és Szabó, A. (2012): **Hulladéklerakók rekultivációja, utógondozása.** Miskolci Egyetem (ISBN: 978-963-661-627-4), p. 342

- Szamek, Zs. (2012): **Hulladéklerakókból kinyerhető hő hasznosítása.** Szabadalom. Lajstromszám: P1300001, Benyújtás éve: 2012., Közzététel éve: 2014.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., és Vigil, S. A. (1993): **Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues**, McGraw-Hill, New York.
- Townsend, T. G., Miller, W. L., Lee, H. J. és Earle, J. F. K. (1996): **Acceleration of landfill stabilization using leachate recycle.** *J. Environ. Eng.* 122(4), pp. 263-268.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2003): **Municipal solid waste in the United States: 2001 facts and figures executive summary**, EPA530-S-011, Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Winter, J. és Temper, U. (1987): **Mikrobiologie der anaeroben Abwasserreinigung, Abwassertechnik**, Heft1, pp. 14-21.
- Yesiller, N. és Hanson, J. L. (2003): **Analysis of temperatures at a municipal solid waste landfill.** *Proc., 9th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al., eds., CISA, Italy.
- Yesiller, N., Hanson, J.L., és Liu, W. (2005): **Heat generation in municipal solid waste landfills.** *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE 131(11)*, pp. 1330-1344.
- Yesiller, N., Hanson, J.L., Kopp, K.B. és Yee, E.H. (2015): **Assessing approaches for extraction of heat from msw landfill.** In: R., Cossu, P., He, P., Kjeldsen, Y., Matsufuji, D., Reinhart, R., Stegmann (szerk.), *15th International Waste Management and Landfill Symposium: G13. Workshop: Heat utilization from landfills.* S. Margherita di Pula: CISA Publisher.
- Yesiller, N., Hanson, J.L., Kopp, K.B. és Yee, E.H. (2016): **Heat management strategies for MSW landfills.** *Waste Management 55*, pp. 246-254.
- Yoshida, H. és Rowe, R.K. (2003): **Consideration of landfill liner temperature.** *Proc. 9th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al., eds., CISA, Italy. pp. 34-41.
- Yoshida, H., Tanaka, N. és Hozumi, H. (1997): **Theoretical study on heat transport phenomena in a sanitary landfill.** *Proc. 6th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al., eds., Vol. I, CISA, Italy, pp. 109-120.
- Young, A. (1992): **Application of computer modelling to landfill processes.** *DoE Rep. No. CWM 039A/92*, Dept. of Environment, London.

- Zanetti, M. C., Manna, L. és Genon, G. (1997): **Biogas production Evaluation by Means of Thermal Balances**. *Proc. 6th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, Christensen, T.H. et al., eds., Vol. II, CISA, Italy, pp. 523-531.
- Zehner, P. és Schlunder, E.U. (1970): **Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures** (in German), *Chemie Ingr. Tech.*, 42, pp. 933-941.