



Hőbányászat települési szilárd hulladéklerakókból

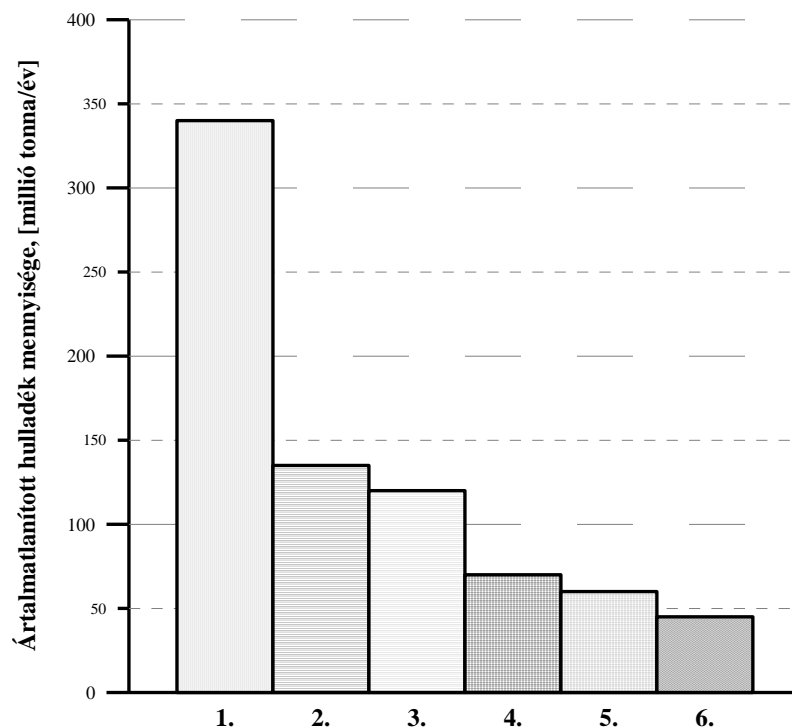
X. Fazola-napok,
„Hulladék mint nyersanyag”
szakmai-tudományos konferencia,
Miskolc, MAB székház, 2016. szeptember 16.

Magyar Tamás, PhD hallgató
Dr. habil. Faitli József, egyetemi docens

Miskolci Egyetem,
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

Szakirodalmi áttekintés – A hulladékgazdálkodás jelenlegi helyzete

- ❑ 1,3 Mrd tonna TSZH/év (2012) → 2,2 Mrd tonna TSZH/év (előrejelzés 2025-re).
- ❑ 1,2 kg/fő/nap TSZH (2012) → 1,42 kg/fő/nap (előrejelzés 2025-re).
- ❑ A begyűjtött TSZH közel 95 %-a kerül deponálásra (KURNIAWAN ET AL., 2006).



Jelmagyarázat:

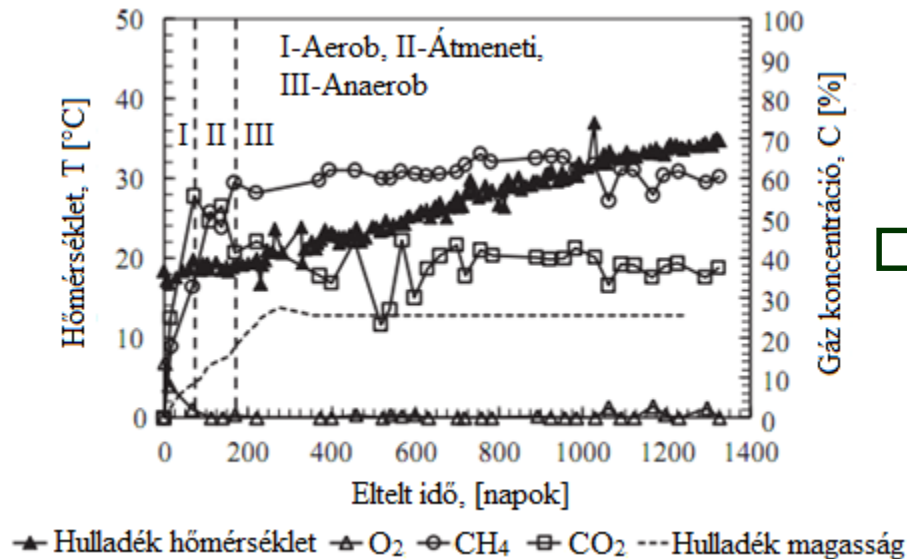
- 1. Lerakással történő ártalmatlanítás (védelemmel ellátott hulladéklerakó)**
- Újrafeldolgozással hasznosított hulladék
- Energiahasznosítással történő égetéssel hasznosított hulladék
- 4. Lerakással történő ártalmatlanítás (műszaki védelem nélküli hulladéklerakó)**
- Komposztálás
- Egyéb

1. ábra: A TSZH ártalmatlanítási lehetőségeinek aránya világviszonylatban (HOORNWEG és BHADA-TATA, 2012 alapján).

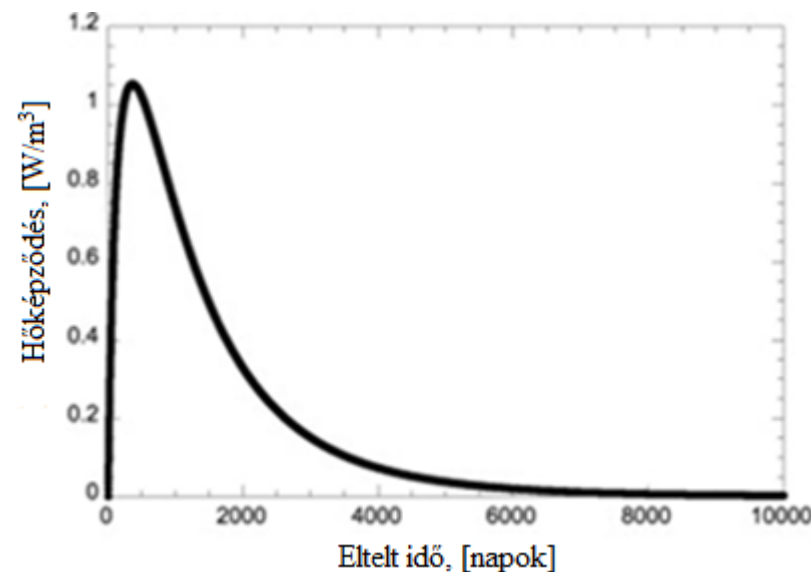
Szakirodalmi áttekintés – A TSZH-okban lejátszódó bomlási folyamatok

A lebomlási folyamatok eredményeként keletkező úgynevezett „melléktermékek”:

- Csurgalékvíz
- Biogáz
- Hő



2. ábra: Hő- és gázképződés egy TSZH lerakóban
(COCCIA ET AL., 2013).



3. ábra: Hőképződés az idő függvényében
(HANSON ET AL., 2013).

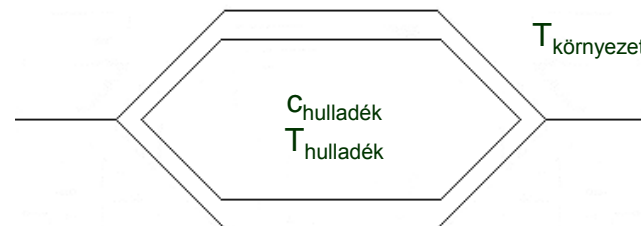
Szakirodalmi áttekintés – A kinyerhető energia nagysága (YOUNG, 1992)

YOUNG, 1992-es tanulmánya szerint az energiaképződésre vonatkozó képlet az alábbi formában írható fel:

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot c_w \cdot M(t)_i$$

Ahol:

- ❑ E: Hőképződés [MJ/m³]
- ❑ Δt_i : hőmérsékletkülönbség [K]
- ❑ c_w : hulladék hőkapacitása [MJ/m³K]
- ❑ $M(t)_i$: a felszabaduló energia azon hányada, amely a lerakó fűtésére fordítódik



4. ábra: A hőképződés természettudományos megközelítése (YOUNG, 1992).

Megállapítás:

A természettudományos megközelítés szerint a lebomlás következtében energia keletkezik, amely az anyag felmelegedését, - így a belső energia növekedését - eredményezi.

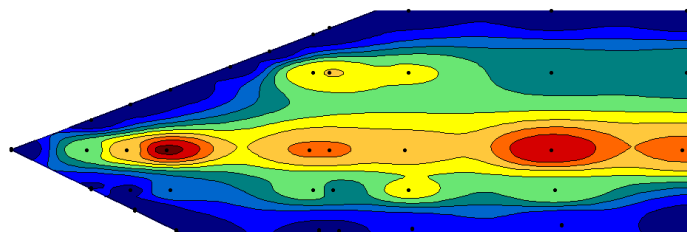
Szakirodalmi áttekintés – A kinyerhető energia nagysága (YESILLER ET AL., 2015)

YESILLER ET AL., 2015-es tanulmánya szerint az energiaképződésre vonatkozó képletét az 1 éven keresztül mért hőmérséklet-eloszlás alapján becsülte:

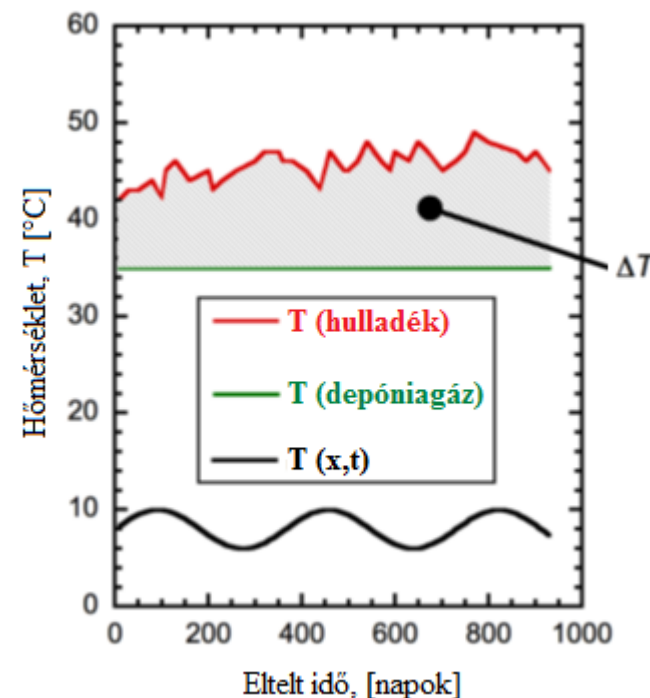
- Depóniagáz: $\Delta T_{(\text{átlag}) \text{ depógáz}} \times C_{(\text{átlag})} = \underline{5,2 \text{ MJ/m}^3}$
- Talaj: $\Delta T_{(\text{átlag}) \text{ talaj}} \times C_{(\text{átlag})} = \underline{48 \text{ MJ/m}^3}$

Ahol:

- $\Delta T_{\text{átlag}}$ – időbeli és a teljes lerakóra térbeli átlag



5. ábra: A vizsgált TSZH lerakó hőmérséklet-eloszlása (2D)
(YESILLER ET AL., 2015).



6. ábra: A kinyerhető energia becslésének elméleti háttere
(YESILLER ET AL., 2015).

Vizsgálati helyszín – gyáli regionális hulladéklerakó

- ❑ Az .A.S.A. Magyarország Kft. telephelye Gyálon található.
- ❑ A lerakóban megközelítőleg 200 000 tonna kevert TSZH kerül deponálásra évente.
- ❑ A lerakó 5 ütemre osztható fel, jelenleg a beérkező TSZH-ot az 5. ütemben deponálják.

Ütem azonosító	Befogadó kapacitás [m ³]	Deponálás kezdete
1.	377 596	1999
2.	426 322	2003
3.	593 059	2006
4.	400 000	2009
5.	423 900	2012

1. táblázat: Az egyes ütemekhez tartozó kapacitások és a deponálás időtartama.



7. ábra: A gyáli regionális hulladéklerakó látképe.

Kísérleti eszközök fejlesztése – Hőmérséklet-monitoring rendszer kiépítése

- ❑ A monitoring rendszer kiépítésének első lépéseként **10 fúrési pontot** jelöltünk ki a depónia első 4 ütemében, amelyekben a hőmérséklet **16 méteres** mélységig hosszútávon vizsgálható (1 m-es osztásközzel).
- ❑ A hőmérsékletérzékelő szenzorok elhelyezése a depótestet alkotó agresszív közegben nagy kihívást jelentett. Számos tényező mérlegelése után úgy döntöttünk, **hogy KPE csőből védőburkolatot kell a depótestbe fúrt lyukba helyezni**, amelybe a hőmérő szondák leengedhetők.

Ütem azonosító	Hőmérséklet-monitoring kutak száma	Hulladék kora
1.	2	12-16
2.	3	9-12
3.	2	6-9
4.	3	0-6

2. táblázat: A kiépített hőmérséklet-monitoring kutak száma és hulladék kora az egyes ütemekre vonatkozóan.



8. ábra: Furatok készítése a depóniában.

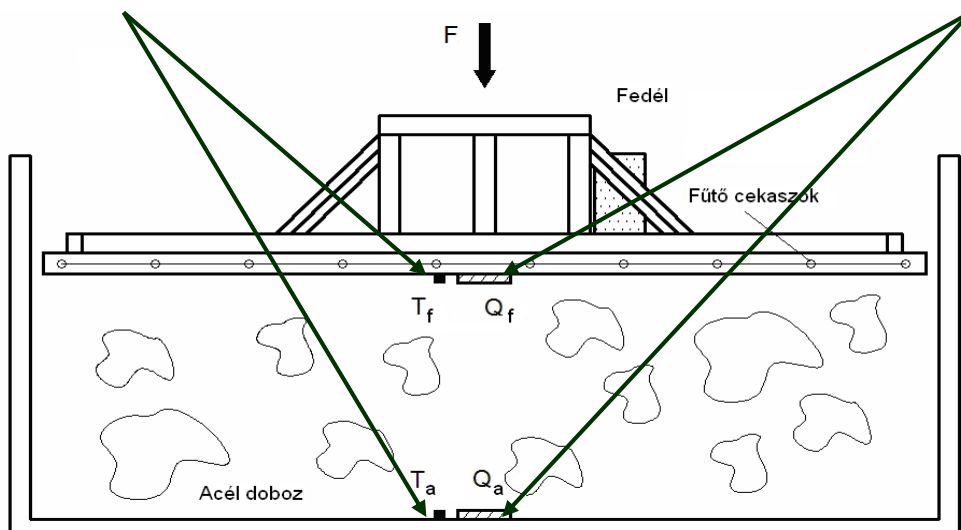
Kísérleti eszközök fejlesztése – TSZH hőtani paramétereinek vizsgálata

A berendezés segítségével mért és számított paraméterek:

- **Fizikai:** minta tömege (m), térfogata (V), nedvességtartalom (n_m), halmazsűrűség (ρ_B), száraz tömeg (m_{sg}) és térfogat (V_{sg}), folyadék- (ε_l), szilárd- (ε_s), és gáz (ε_g) fázisok térfogatarányai.
- **Hőtani:** hővezetési tényező (λ), fajhő (c), hődiffuzivitás (κ).

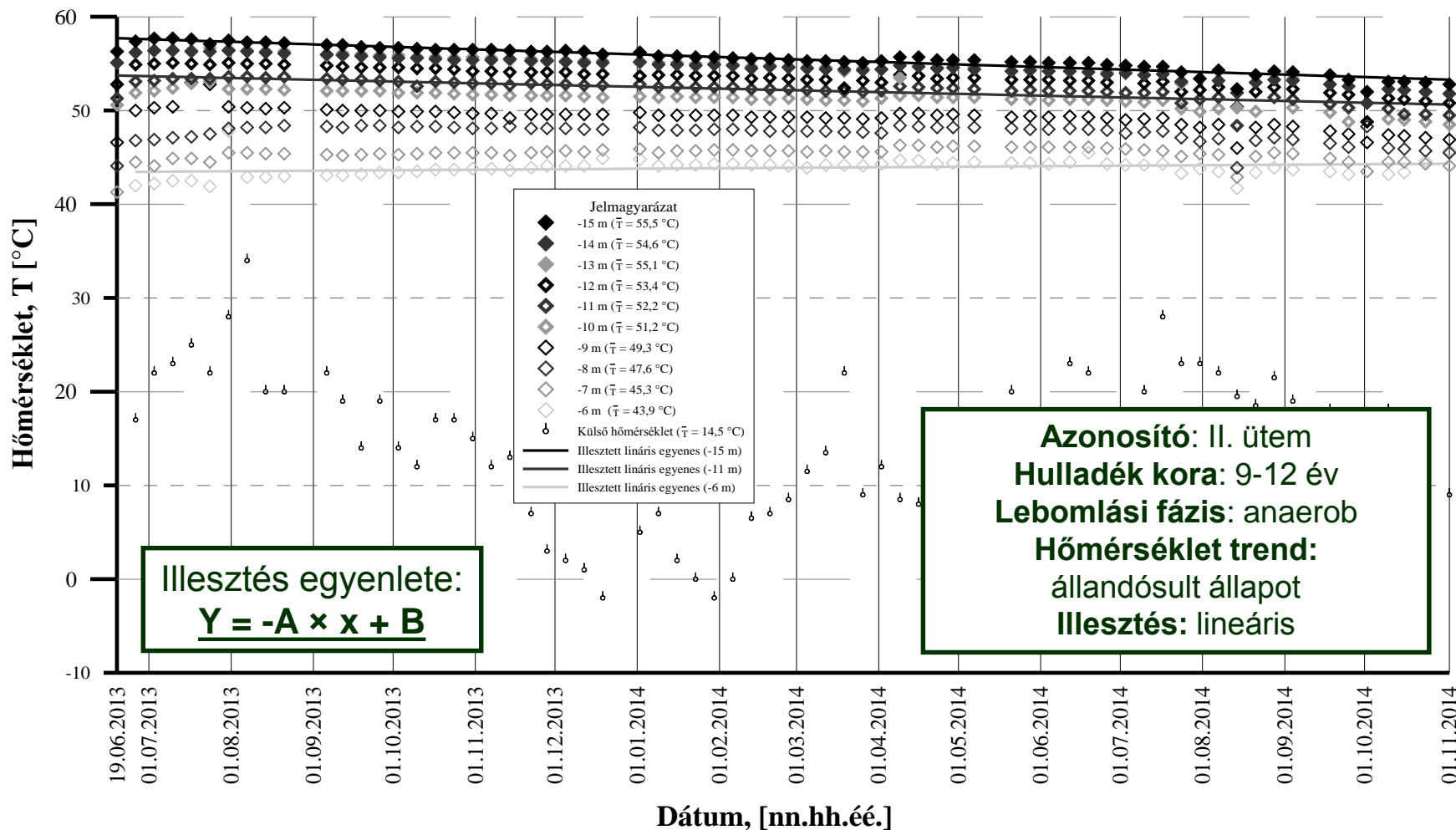
Hőmérsékletmérő szenzorok

Hőáramsűrűség mérő szenzorok



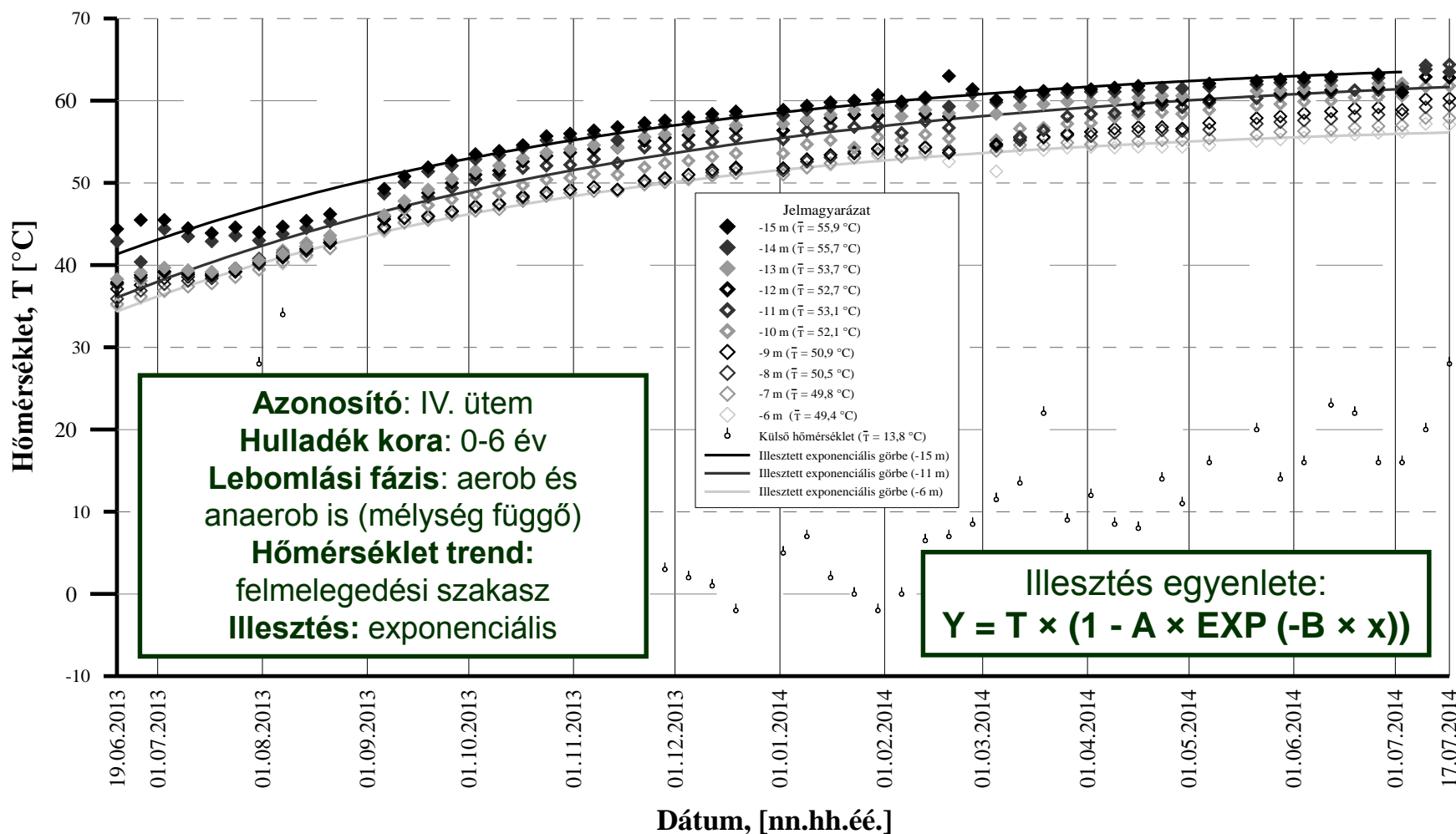
9. ábra: A TSZH hőtani paramétereinek mérésére kifejlesztett mérőberendezés.

Eredmények – Hőmérséklet-eloszlás (idősebb hulladék esetében)



10. ábra: Hőmérséklet monitoring eredmények a II/2-es kút esetében.

Eredmények – Hőmérséklet-eloszlás (friss hulladék esetében)

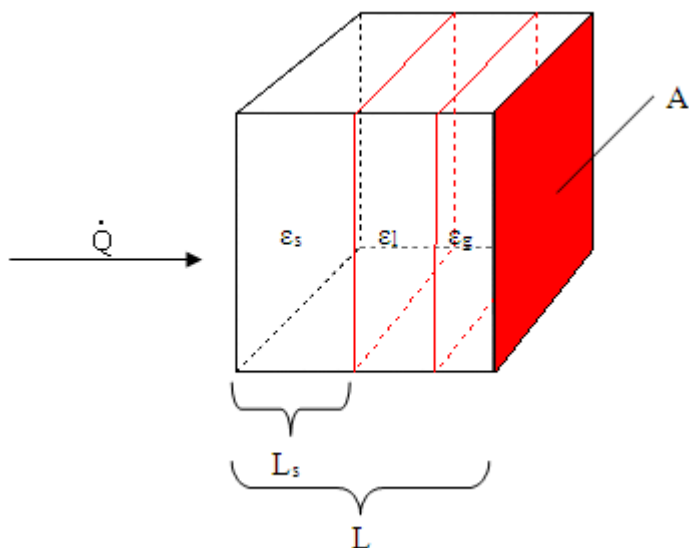


11. ábra: Hőmérséklet monitoring eredmények a IV/3-as kút esetében.

Eredmények – TSZH hőtani paramétereinek vizsgálata (λ_Σ 3 fázis-ra)

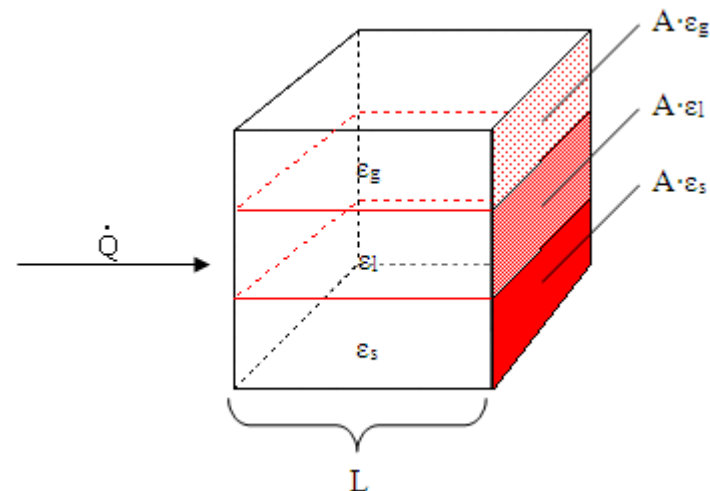
A térfogathányadok (koncentrációk) összege: $\varepsilon_s + \varepsilon_l + \varepsilon_g = 1$

Soros elrendezés: **elméleti minimum** a λ -ra vonatkozóan.



$$\lambda_\Sigma = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_l \cdot \lambda_g}{\varepsilon_s \cdot \lambda_l \cdot \lambda_g + \varepsilon_l \cdot \lambda_s \cdot \lambda_g + \varepsilon_g \cdot \lambda_s \cdot \lambda_l}$$

Párhuzamos elrendezés: **elméleti maximum** a λ -ra vonatkozóan.



$$\lambda_\Sigma = \lambda_s \cdot \varepsilon_s + \lambda_l \cdot \varepsilon_l + \lambda_g \cdot \varepsilon_g$$

12. ábra: A soros- és párhuzamos hővezetés elméleti háttere 3 fázis esetében.

Eredmények – TSZH hőtani paramétereinek becslése (3 fázisra)

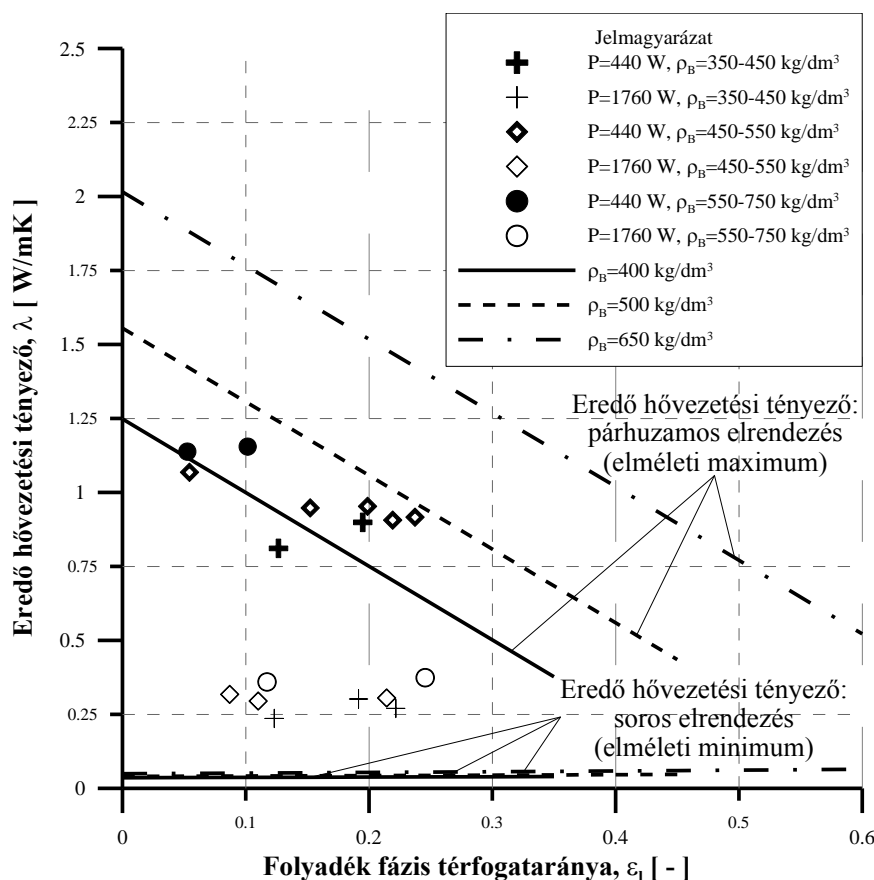
Fázis	Sűrűség [kg/dm ³]	Hővezetési tényező [W/mK]	Fajhő [J/gK]
Folyadék (víz)	$\rho_l = 1$	$\lambda_l = 0,6$	$c_l = 4,181$
Gáz (levegő)	$\rho_g = 0,0012$	$\lambda_g = 0,025$	$c_g = 1,012$
Szilárd (TSZH)	$\rho_s = 1,297$	$\lambda_s = 3,99$	$c_s = 1,8$

3. táblázat: Az egyes fázisok eredő hőtani jellemzőinek becslése.

Szabványos hulladék kategória	Mért tömeg hányad [%]	Becsült sűrűség [kg/dm ³]	Becsült hővezetési tényező [W/mK]	Becsült fajhő [J/gK]
1. Biológiailag lebomló	21,6	0,7	0,15	2,721
2. Papír	12,7	1,1	0,05	1,34
3. Karton	4,7	1,1	0,21	1,34
4. Kompozit	2,1	1,1	0,2	2,19
5. Textil	3,6	0,25	0,06	1,29
6. Higiéniai	4,4	1	0,155	1,48
7. Műanyag	19,9	1,15	0,25	1,67
8. Éghető egyéb	2,9	1,2	0,2	2,19
9. Üveg	3,6	2,7	0,87	0,837
10. Fém	3,6	4	91,92	0,483
11. Nem éghető egyéb	4,4	2,5	1,59	0,858
12. Veszélyes	0,7	3,5	56,22	1,1
Finom (< 20 mm)	15,7	1,5	0,16	2,112
Szilárd fázis eredője:	100 %	1,297	3,99	1,8

4. táblázat: A szilárd fázis hőtani jellemzőinek becslése a szabványos (MSZ 21420/28 és 29) hulladékösszetételi vizsgálat eredményei alapján.

Eredmények – TSZH hőtani paramétereinek vizsgálata (λ_Σ)



13. ábra: A mért és a számított hővezetési tényezők.

Szaturáció határértéke:

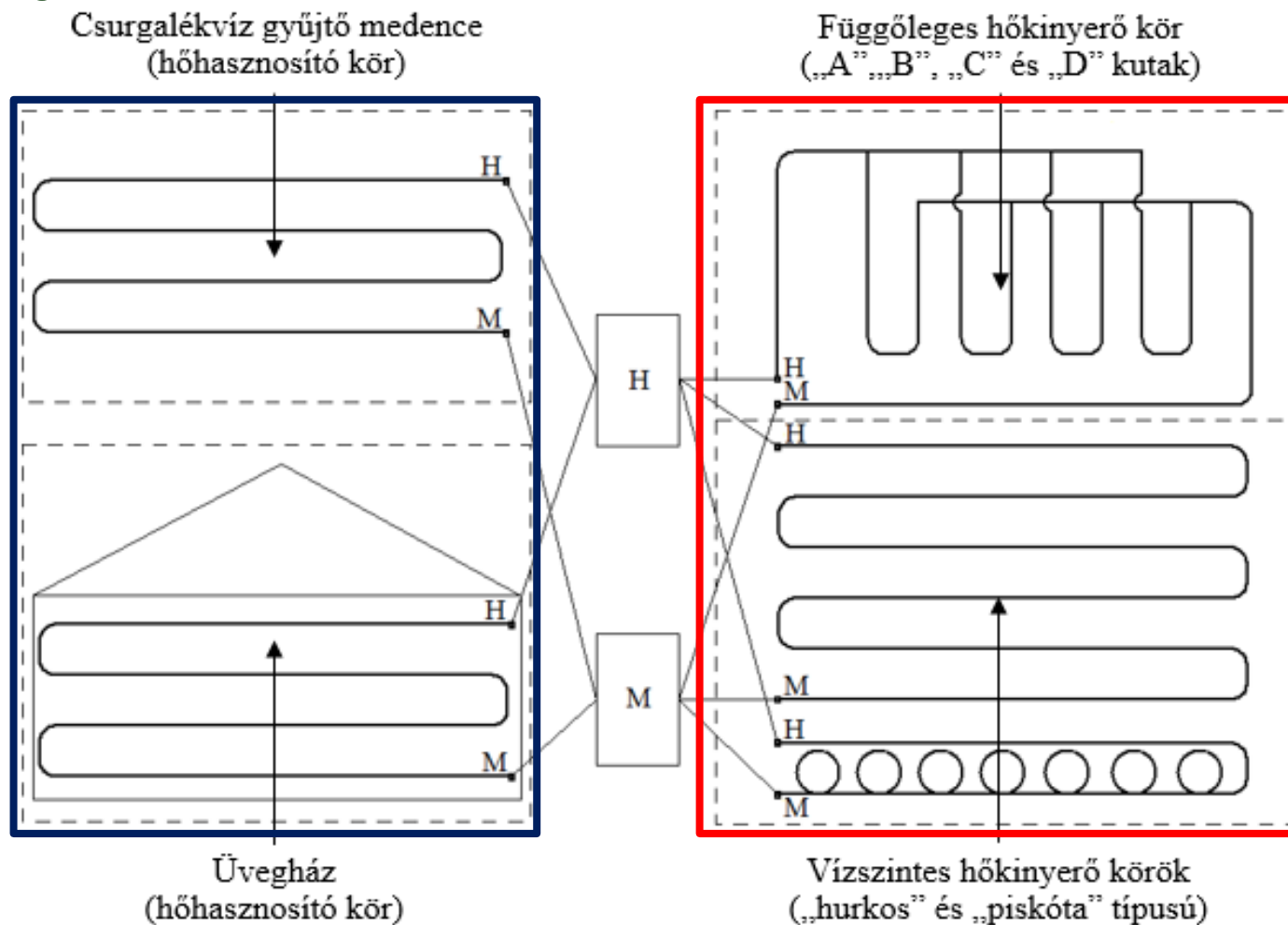
$$\epsilon_1 = \frac{\rho_B}{\rho_1}$$

Amennyiben ϵ_1 értéke meghaladja a szaturáció határértékét, úgy abban az esetben csak 2 fázisú rendszerről (szilárd-folyadék) beszélünk.

Szakirodalmi forrás	Hővezetési tényező, λ [W/mK]	Fajlagos hőkapacitás, c [J/kgK]
HOUJ 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
FAITLI et al. (2015)	0,24-1,15	900-2100

5. táblázat: A TSZH hőtani paramétereinek a szakirodalom alapján.

A megépített technológia – Hőkinyerő- és hőhasznosító körök



14. ábra: A hőkinyerő- és hőhasznosító technológia elvi vázlata (H - hideg, előremenő csőág; M - meleg, visszatérő csőág).

A megépített technológia – Hőkinyerő körök



„Hurkos”

„Piskóta”



15. ábra: A hőkinyerő körök (vízszintes: balra; függőleges: jobbra).

A megépített technológia – Hőhasznosító körök



Csurgalékvíz-gyűjtő
medence

Üvegház



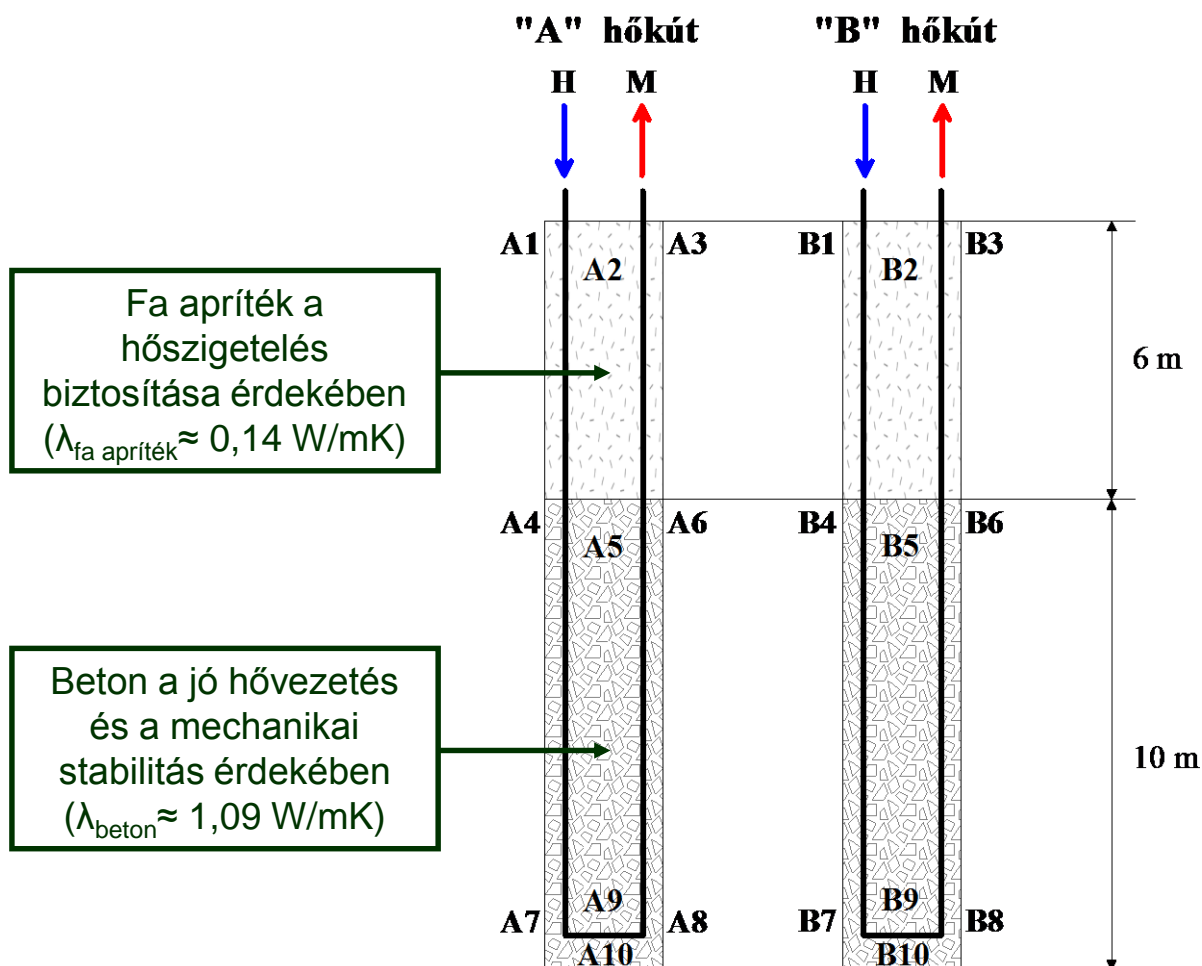
16. ábra: A hőhasznosító körök (csurgalékvíz-gyűjtő medence: balra; üvegház: jobbra).

Hőcserélési kísérletek – Elvégzett vizsgálatok

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

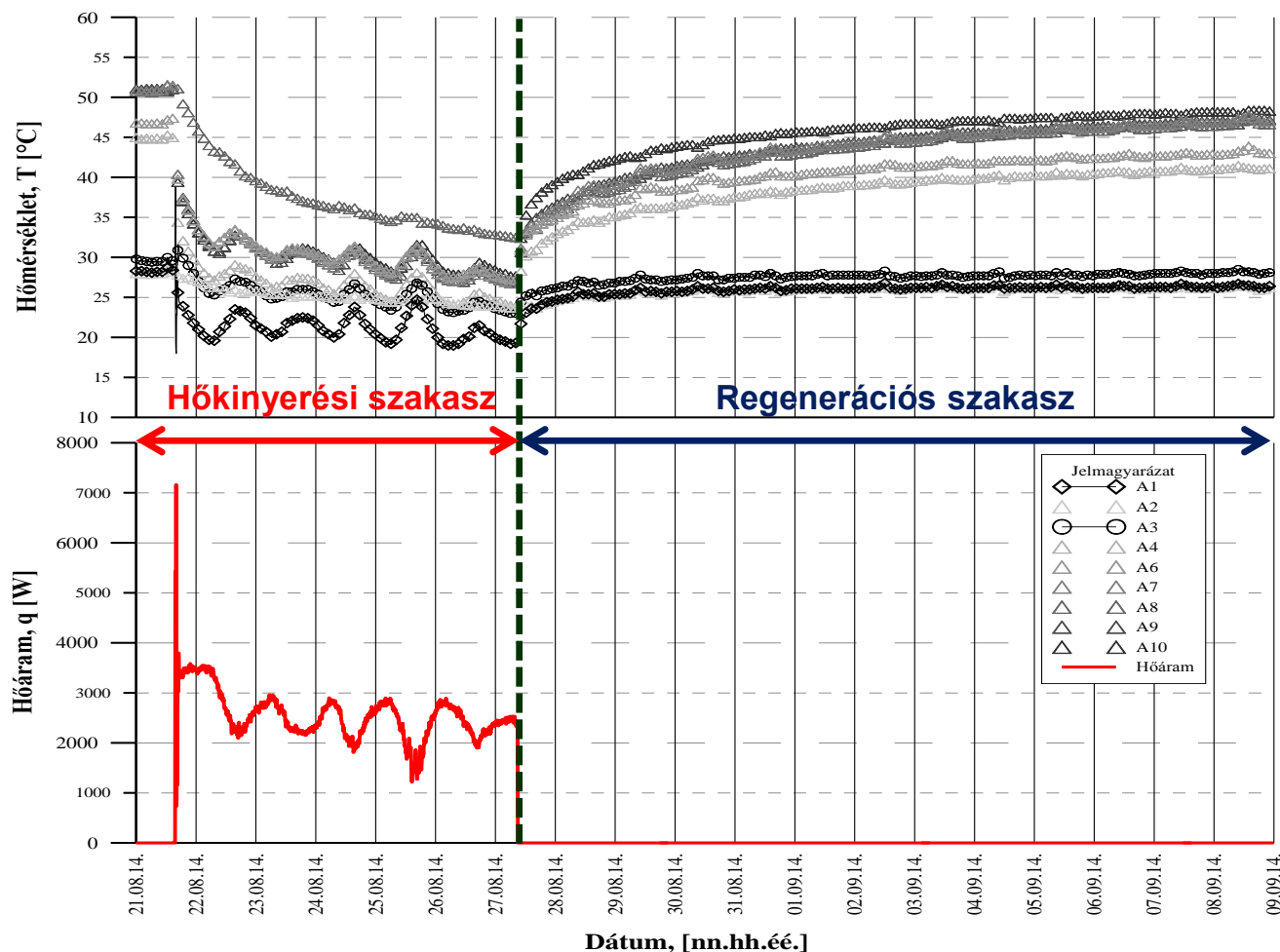
3. táblázat: Az elvégzett félüzemi méretű hőkinyerési- és hőhasznosítási vizsgálatok főbb jellemzői.

Hőcserélési kísérletek – Hőmérő szenzorok elhelyezkedése a kutakban



17. ábra: A hőmérő szenzorok elhelyezkedése függőleges hőcserélő körben („A és „B” kutak esetében).

Hőcserélési kísérletek – Hőkinyerés az „A” jelű függőleges kútból (2014/I.)



Hőkinyerési szakasz:

- ❑ 9085 perc
(≈ 6 nap)
- ❑ Átlagos hőáram:
1152 W
- ❑ Kinyert hőenergia:
0,63 GJ
- ❑ A lebomlásból
származó fajlagos
hőteljesítmény:
0,53 W/m³

Regenerációs szakasz:

- ❑ 18180 perc
(≈ 13 nap)
- ❑ A lebomlás effektív
fajlagos
hőteljesítménye:
0,18 W/m³

18. ábra: Hőkinyerés az „A” jelű függőleges kút esetében.

Hőcserélési kísérletek – „Csőháj” modell a hőfejlődés figyelembe vételével

A hővezetés differenciál egyenlete
(belső energia mérlegegyenlete):

$$q = \frac{dQ}{d\tau} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dr}$$

A hővezetés differenciál egyenletének megoldása
hengerszimmetrikus, időben állandó hőáram esetében:

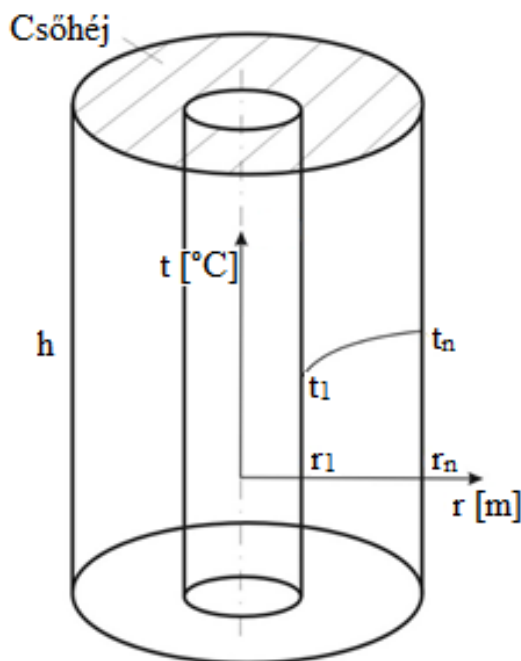
$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h}{\ln \frac{r_n}{r_1}} \cdot (t_n - t_1)$$

Azonban a vizsgált hengeren belül folyamatos
hőfejlődés van:

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

A fentiek alapján a hőáram- és hőmérséklet-eloszlás:

$$q_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\ln \left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x} \right)} \cdot \Delta t_x \cdot h \quad \Delta t_x = \frac{q_x \cdot \ln \left(\frac{r_x + \Delta r}{r_x} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot h}$$



17. ábra: A „csőháj” modell.

- ❑ Lebomlás fajlagos hőteljesítménye:

0,53 W/m³

- ❑ Lebomlás effektív fajlagos hőteljesítménye (=kinyerhető):

0,18 W/m³

- ❑ 1 éven keresztül 0,18 W/m³ fajlagos hőteljesítménnyel kinyerhető hőenergia mennyisége:

5,67 MJ

- ❑ Henger paraméterei:

- Henger magassága: **16 m**
- Iterálással meghatározott sugár: **6 m**
- Henger térfogata: **1809 m³**

Irodalomjegyzék



- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., HOUI, D. (2000): **The role of aerobic activity on refuse temperature rise. I: Landfill experimental study.** *Waste Manage. Res.*, 18(5), pp. 444–452.
- 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.
- 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., KJELSDEN, 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.
- 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.

Köszönetnyilvánítás



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 valósul meg.



Köszönöm a figyelmet!