

**„Hulladékból konnektorba”
A települési szilárd hulladék energetikai
hasznosításának lehetőségei**



**Magyar Mérnöki Kamara
Kiadványsorozata 58.**

**„Hulladékból konnektorba”
A települési szilárd hulladék energetikai
hasznosításának lehetőségei**

**MMK FAP azonosító:
2020/112-ENT**

Budapest, 2020. szeptember 28.

A sorozat szerkesztője:
NAGY GYULA
a Magyar Mérnöki Kamara elnöke

Készült a Magyar Mérnöki Kamara Energetikai Tagozatának gondozásában, a 2020. évi Feladat Alapú Pályázatok pénzügyi keretéből.

A kiadvány a Magyar Mérnöki Kamara tulajdona. Másolása, teljes terjedelmében való közzététele csak a Kamara engedélyével lehetséges. Minden jog fenntartva.

Szerző:
Molnár Szabolcs

Lektorálta:
Bánhidny János

Kiadó:
Magyar Mérnöki Kamara
1117 Budapest, Szerémi út 4.
info@mmk.hu, www.mmk.hu

TARTALOMJEGYZÉK

1. Vezetői összefoglaló.....	11
2. Bevezetés	13
3. A hulladékgazdálkodás régen és ma, avagy a hulladékgazdálkodás kialakulása..	16
4. A hulladékégetésről	26
4.1. A hulladékégetés elméleti alapjai.....	28
4.2. Energia felszabadítás	36
4.3. Az égetés technológiai folyamata.....	47
4.3.1. A begyűjtött hulladékról	47
4.3.2. A hulladékégetés előnyei és hátrányai	52
4.3.3. Az égetés fejlődése	55
4.3.4. Az égetőberendezések	56
4.3.5. A rostélytípusok	58
4.3.6. Tűztér kialakítás	62
4.4. Az égetőművek felépítése	63
4.5. Az égetőmű telephelyének kiválasztása	69
5. Az energiakiadási lehetőségek	78
5.1. A kapcsolt energiatermelésről	79
5.2. A hőenergia kiadásáról és annak hasznosításáról a távhőhálózatokban	89
5.3. Fejlesztési lehetőségek.....	91
6. Környezetvédelmi kérdések.....	98
6.1. A füstgáztisztításról.....	99
6.2. A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiség meghatározása	110
6.3. A salak és pernye, illetve egyéb füstgáztisztítási maradék kezelés	114
7. A fenntartható hulladékgazdálkodás.....	119
7.1. Az energetikai hulladékhasznosítás szerepe a körforgásos gazdaságban	121
7.2. Hulladékégetés a világban	123
7.3. A hulladékégetés hazánkban	127
8. Konklúzió	131
9. Mellékletek	139

9.1. Nagyvárosok hulladékmennyiségének növekedése.....	139
9.2. A korábban alkalmazott rostélytípusok.....	150
9.3. A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiség meghatározása elemi analízis alapján	154
9.4. Égetési és termikus kezelési eljárások összefoglalása	160
10. Irodalomjegyzék.....	163

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. A hulladékgazdálkodás.....	20
2. ábra. A hulladékpiramis	22
3. ábra. A műanyag hulladékok hasznosítási szintjei.....	24
4. ábra. Hulladéktelep Kairóban [34]	25
5. ábra. Hulladékégető Notthinghamben (1874) [60].....	26
6. ábra. Az első hulladékégető erőmű Hamburgban (1895)[38]	26
7. ábra. Hulladékhasznosító mű, Koppenhága [47] [58]	27
8. ábra. A hulladékok energetikai hasznosításainak lehetőségei.....	27
9. ábra. Nagyvárosi hulladékok átlagos összetétele [26]	28
10. ábra. Tanner-féle diagram	31
11. ábra. A különböző jövedelmű családok hulladék összetételének összehasonlítása.....	33
12. ábra. A fűtőérték éves változása [26].....	35
13. ábra. A tüzelőanyagok elemi összetétele.....	38
14. ábra. Egy főre jutó GDP és a keletkező települési szilárd hulladék kapcsolata [28].....	48
15. ábra. Ideális geometriájú hulladék begyűjtési terület.....	49
16. ábra. Alacsonypadlós hulladékgyűjtő járművek [59] [48]	50
17. ábra. A KUKA-s autó [50]	51
18. ábra. A hulladékégetés anyagmérlege száraz és félszáraz füstgáztisztítás mellett	53
19. ábra. A központi és egyedi kibocsátás összevetése [30]	54
20. ábra. Az égetés fejlődése.....	56
21. ábra. Forgó dobos égetőmű [35].....	57
22. ábra. Az égetési technológiák összehasonlítása	58
23. ábra. A mozgó rostély kiegészítő zónái.....	60
24. ábra. Előtoló rostély fényképe [57].....	61
25. ábra. Visszatoló rostély	61
26. ábra. Henger rostély [26]	62
27. ábra. Hulladékégetőmű általános felépítése vízszintes huzamú kazánnal [26]	67
28. ábra. A műszaki, gazdasági / társadalmi és a környezetvédelmi kérdések halmazai.....	69
29. ábra. Szemétszállító lovas kocsik Budapesten [54]	78
30. ábra. Az energiahordozók fejlődése a városok energiaellátásában [40].....	79
31. ábra. Villamos-energia fogyasztási csúcsponatok regionális elhelyezkedése [24]	81
32. ábra. Hulladékégetőmű általános kapcsolási sémája [26]	84
33. ábra. Növelt villamos energia kiadás lehetősége	85
34. ábra. Nagyvárosok éves tartamdiagramjának jellege [26].....	87
35. ábra. Elvi hulladékégetőmű hősémája [26]	88

36. ábra. Fűtőműves változat [31]	90
37. ábra. Fűtőerőműves változat [31]	90
38. ábra. Olaszországi égetőművek energetikai paraméterei [25] [27].....	92
39. ábra. A svéd Giirstad fűtőerőmű hőkapcsolása és adatai [10]	94
40. ábra. Hulladékhasznosító mű hagyományos körfolyamata és gázturbina összekapcsolása [25] [27]	96
41. ábra. A hulladéktüzelés légszennyező hatásai [26]	98
42. ábra. A dioxinok és a furánok keletkezése	101
43. ábra. Száraz füstgáztisztítás [31 és 56 alapján]	103
44. ábra. Félszáraz füstgáztisztítás [31 és 56 alapján]	105
45. ábra. Mosás kétfokozatú Venturi mosóval és szennyvízbepárlással [31 és 56 alapján].....	107
46. ábra. A fővárosi hulladékhasznosító mű füstgáztisztítása [8]	109
47. ábra. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű füstgáztisztítási hatékonysága [9]	110
48. ábra. Az égéshez elméletileg szükséges levegő mennyisége és a fűtőérték közötti összefüggés szilárd hulladékoknál	111
49. ábra. A salak kezelés.....	115
50. ábra. A maradékanyag kezelés fejlesztési lehetőségei [29] [35]	116
51. ábra. Az Európai Unió „2030”-as célkitűzése [18]	122
52. ábra. Salak hasznosítása másodnyersanyagként: térkő, építőblokk alapanyagaként, útépítésben, talajjavító anyagként.....	124
53. ábra. Hulladékégetőművek számának növekedése Kínában.....	125
54. ábra. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű keresztmetszete	128
55. ábra. Megvalósítás döntés-előkészítés folyamata [26]	129
56. ábra. A termelési folyamat.....	133
57. ábra. A „jéghegy effektus” [13].....	134
58. ábra. Az isztambuli lakosság száma és keletkező hulladék összefüggése.....	139
59. ábra. A logaritmizált értékek diagramja az isztambuli adatokkal.....	144
60. ábra. Delhi lakosság száma és keletkező hulladék összefüggése.....	148
61. ábra. Szingapúr lakosság száma és keletkező hulladék összefüggése.....	149
62. ábra. Forgó rostély	150
63. ábra. Kosár rostély	151
64. ábra. Álló rostély	152
65. ábra. Lépcsős rostély.....	153
66. ábra. Vándor rostély	153
67. ábra. Lengő rostély.....	154
68. ábra. Nomogram szilárd és folyékony tüzelőanyagok fajlagos elméleti égési levegő- és füstgázmennyiségének meghatározására [22]	157
69. ábra. „Üres” nomogram a tervezéshez.....	159

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat. Magyarországon található települési szilárd hulladékban lévő műanyag frakció százalékban kifejezett aránya [64].....	22
2. táblázat. A kommunális hulladékban megjelenő műanyag hulladék összetétele	23
3. táblázat. Fűtőérték korreláció Lengyel példákra [26]	34
4. táblázat. A levegő összetétele a sztöchiometriai számításokban	37
5. táblázat. Az elemi analízis adatai - példa.....	41
6. táblázat. A fűtőérték átszámításához használt alapadatok.....	45
7. táblázat. A fűtőérték átszámítási eredmények	46
8. táblázat. A hulladékégetés előnyei és hátrányai	55
9. táblázat. Értékelési szempontok a terület kiválasztásnál	71
10. táblázat. Az előzetesen kiválasztott területek értékelése.....	72
11. táblázat. Távhőtrendek a világban 1850-2050 [3]	80
12. táblázat. Lengyelországi égetők paraméterei.....	89
13. táblázat. Az egyes fejlesztési lehetőségek összehasonlítása.....	95
14. táblázat. A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiségek meghatározandó mennyiségei	113
15. táblázat. A böblingeni égetőmű kibocsátási értékei, napi középértékek	114
16. táblázat. Károsanyag kibocsátási határértékek a 29/2014. (XI.28.) FM	117
17. táblázat. Kibocsátási határértékek a mintavételi időszak átlagában	118
18. táblázat. Fém alapanyagok előállításának energiaigénye [33].....	123
19. táblázat. Reppie hulladékégető (Etiópia) műszaki paraméterei	126
20. táblázat. Európai nagyvárosok, a hulladéktüzelésből villamos energiával kapcsolatos előállított hőenergia részarányai [9].....	127
21. táblázat. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű főbb adatai.....	128
22. táblázat. Az FKF Nonprofit Zrt. 2018-ban kezelt hulladékmennyisége [6]	129
23. táblázat. Az isztambuli hulladékmennyiségek	143

1. Vezetői összefoglaló

Napjainkban globális problémává nőtte ki magát a szemét keletkezése, ezzel párhuzamosan a képződő hulladékok kezelésének módja. Ha másként nem, a médiában bemutatott elrettentő illegális hulladéklerakások képei kapcsán mindenki hallott a keletkező hulladékok kezelésének problémájáról, amellyel kapcsolatban sokszor hangzanak el a hulladékgazdálkodás, a szelektív gyűjtés, a hulladékpiramis, a települési szilárd hulladék (TSZH), a hulladékégetés, az energetikai hasznosítás, sőt, újabban a körforgásos gazdaság fogalmak.

A Szerző, Molnár Szabolcs frissen elkészült könyvében nagyon nagyléptékű és igen alapos munkával a hulladékgazdálkodás egy rögzített vonalán vezet végig bennünket, kitérve a szakterület párhuzamos megoldásaira is, hatalmas ismeretanyag könnyed kezeléséről és feldolgozásáról téve tanúbizonyságot.

A vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék eltüzelése útján történő energetikai hasznosítását, beleértve a tüzelési termékek kezelését, bemutató könyvvel egy széles célközönséget megszólító írásművet tart a kezében a Tisztelt Olvasó.

Ez a könyv egyaránt érdeklődésre tarthat számot a témában járatos szakemberek, a hulladékhasznosítás kérdései iránt általában érdeklődők, a környezetvédelmi aktivisták és azon laikusoknak körében is, akik szeretnének eligazodni az égetéssel történő hasznosítás tárgyilagos támogatóinak és zsigeri ellenzőinek vitájában, valamennyi érdeklődő csoportot az általa érthető nyelven kísérve végig a hulladéktól a konnektorig – és teszem hozzá a radiátorig – vezető hosszú úton.

A szakemberek számára fejezetenként tervezési segédleteket, tervezéshez szükséges jellemző fajlagos értékeket ad meg, számos gyakorlati, tudományos igényű példaszámítást mutat be, de a könyvben nagyon hasznos ökölszámok is megjelennek. A szöveget helyenként kedvcsináló olvasmányok és a hulladékégetés témájából vett érdekes történetek színesítik. Ilyen a hulladéktól a konnektorig, radiátorig vezető út egyik állomása a kuka, amellyel kapcsolatban megtudhatjuk, honnan származik a közismert kukásautó elnevezés, sőt, megismerhetjük a Szerző által nevesített „homo recyclicus” történelmi szerepét is.

Nem szűkölködik a könyv a világ minden táján megvalósult és üzemelő égetőművek nagyszámú példájának és a hazai egyetlen példának, a HUHA-Hulladékhasznosító Műnek, a bemutatásában. Ez utóbbi egyes szám fájóan utal a mindmáig meg nem valósult második hazai égetőmű, a HUHA2 hiányára.

A Szerző a realitás talajáról ismerteti mondanivalóját, nyoma sincs a bemutatott technológia kritika nélküli dicséretének. Ezt a szemléletet tükrözi a műből vett következő idézet is: *„Sem a hulladékgazdálkodásban, sem az energetikában – és egyéb más mérnöki területeken sem – nem szabad hiú ábrándokba kergetni magunkat.”*

Ennek nem mond ellent, hogy a mű elkészítését nem a választott téma iránti egyszerű érdeklődés, hanem a szinte minden fejezetből kiérezhető szenvedélyes, de tárgyilagos elkötelezettség, és az ismeretek átadásának, a jót tenni akarásnak a vágya, szeretete motiválja.

Molnár Szabolcs könyvét forgatni, élvezettel olvasni és tanulmányozni kell, mert mindenkinek nyújt új ismereteket.

Csak kívánhatjuk, hogy a fiatal energetikus-nemzedék minél több tagja hasonlóan magas színvonalú munkákkal jelentkezzen, mint Molnár Szabolcs mérnök kollégám.

Budapest, 2020. szeptember 16.

Orbán Tibor
okl. gépészmérnök,
okl. energetikai szakmérnök

2. Bevezetés

Energia és hulladék. E két szó első olvasásra talán különösen hangzik egymás mellett, azonban szoros kapcsolatban álló fogalmak!

„Energia”

Napjainkban egyre fontosabbá válik a fejlődés fenntarthatóságának biztosítása, ennek egyik előfeltétele a megfelelő mennyiségű és minőségű energia rendelkezésre állása.

Magyarország energetikailag – sajnos – igen mostoha körülmények között van. Energiahordozókban a hagyományos készleteink alapján a világ legszegényebb országai közé tartozunk, ugyanakkor az egy főre jutó felhasznált energia mennyisége a világátlag körüli. Így hazánkban (is) elengedhetetlenül fontos és sürgős annak a kérdésnek a vizsgálata, milyen lesz az energiahelyzetünk a következő évtizedekben, milyen forrásokból, hogyan tudjuk növekvő igényeinket fedezni?

Mint energetikusnak feladatom, sőt kötelességem is, hogy hozzájáruljak a fenntarthatóság biztosításához az energetikában, a szakmámban, valamint Magyarország rövid, közép és hosszú távú energiaellátásában. Szükség van alternatív energiahordozók (fel)kutatására, a nem „szokványos” energiahordozók alkalmazására. Jelen jegyzet a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék erőművi égetésében rejlő lehetőségeket mutatja be.

„Hulladék”

A túlnépesedés, az urbanizációs hatás, a folyamatosan termelődő (és folyamatosan megújuló) hulladékok kezelésének kihívásai a mérnököket megoldandó feladatok elé állítják. Mindennapi tevékenységünk során hulladékot termelünk, mely a mindennapjaink részévé vált. A hulladékok újratermelődése miatt – elsősorban a települések hulladékairól – azok elhelyezéséről, ártalmatlanításáról vagy hasznosításáról gondoskodnunk kell. A hulladékok energetikai célú feldolgozásában rengeteg kiaknázatlan lehetőség van. A vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladékok, vagy a megfelelően előkezelt szennyvíziszap hulladékhasznosító művekben történő elégetése nagyban hozzájárul hosszú távú céljaink megvalósításához és ahhoz, hogy emisszió mentes városokat alakítsunk ki.

A hulladékégetési technológiák és jellemzőik pontos ismerete alapfeltétele bármilyen munkának elkezdésének. Érdekesnek találom kiemelni, hogy az égetési tudományterület a technikák fejlődése révén folytonos kihívást jelent a hulladékok energetikai hasznosításával foglalkozó szakembereknek, mérnököknek.

A „Hulladékból konnektorba” című segédlet elkészítésének célja kettős volt. Egyrészt szakmai jegyzetnek is készült, másrészt hiánypótló mérnöki segédletnek. Ajánlható minden olyan mérnöknek, akik az energetikai célú hulladékégetéssel foglalkoznak, vagy szeretnék foglalkozni, illetve az ismereteiket ebben a témában szeretnék bővíteni. A segédlet – a terjedelmi korlátokat figyelembe véve – komplex ismereteket kíván nyújtani az erőműként működő hulladékhasznosító művekről, melynek fókuszában a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék hasznosító művekben történő égetése áll.

A jövő számos kihívást tartogat a mérnökök számára. Kutatni és fejleszteni kell a különböző energiahordozókat. A települési szilárd hulladékok égetésében rejlő energetikai potenciált nem szabad veszni hagyni. Jelen jegyzet feladata, hogy pontos és korszerű ismereteket, aktuális és megbízható információkat közöljön a mérnököknek ezen témakörben.

A jegyzet hat fejezeten keresztül (3-8. fejezetek) mutatja be a szilárd hulladékot égető erőművek fontosabb ismereteit. Kifejezett célja jelen írásnak, hogy az e témában tevékenykedő mérnököknek egyfajta segédletként szolgáljon a munkájuk során. Ezért a 4-8. fejezetek végén tervezési, műszaki segédleteket találunk. E segédrészekben a gyakorló mérnökök számára az adott fejezetekben található legfontosabb adatokat, paramétereket gyűjtöttem ki, illetve a tervezéshez szükséges alapvető információkat, átlag- és jellemző értékeket foglaltam össze. Így a mérnöki számításokhoz olyan segédadatok, mutatószámok állnak a fejezetek végén a mérnökök rendelkezésére, melyeket gyakorló tervezőmérnökként a praxisomban én magam is alkalmaztam, illetve amelyekre a tapasztalatom révén szert tettem.

A 9. fejezetben található mellékletben, tudományos részletességgel mutatom be a tervezéshez szükséges szakmai számításokat.

Ahhoz, hogy a munkákban – legyen szó bármilyen mérnöki területről – eredményesek és sikeresek legyünk, szeretnünk kell azt, amivel foglalkozunk. Azért, hogy kedvet csináljak a hulladékégetés témájához, és bemutassam, hogy mennyire komplex és sokoldalú tudományág a hulladékok energetikai hasznosítása, a szövegben kedvcsináló olvasmányokat, a hulladékégetés témájából érdekes történeteket helyeztem el. Ezeket *dőlt betűvel* lehet megtalálni a szövegben, és ***ponttal vannak elválasztva a szövegtörzstől.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindenkinek, aki segítségével hozzájárult e könyv megszületéséhez. Külön köszönöm Bánhidny Jánosnak, aki a kezdetek óta segítette a pályámat és Orbán Tibornak, aki szakmai attitűdjével mindig motivál arra, hogy én magam is fejlődjek. Megtanultam Dr. Kiss Tibortól, hogy az alapos és

mélyreható szakmai tudás megléte alapvető bárminemű munka megkezdésének., amiért köszönetemet fejezem ki. Hálás köszönettel tartozom az ábrák elkészítéséhez nyújtott segítségért Boros Brigitta, Berta Viktor, Joó Sándor és Káldi Tamás kollégáimnak.

A végén és nem utolsó sorban szeretném megköszönni a családom végtelen türelmét és kitartását.

Mindenkinek hasznos időtöltést és eredményes munkát kívánok a hulladékégetés csodálatos tudományában!

Szekszárd, 2020. szeptembere

A szerző

3. A hulladékgazdálkodás régen és ma, avagy a hulladékgazdálkodás kialakulása

Manapság igen népszerű a környezetvédelemről, a környezettudatosságról beszélni. A különböző sajtóorgánumok hasábjain szinte minden nap találhatunk különböző írásokat a fenntartható fejlődéssel kapcsolatban. Nincs ez másképp a környezetvédelem egyik szűkebb szakterületének, a hulladékgazdálkodásnak a szemszögéből sem. Ma „trendi” hulladékmentesen élni. Blogbejegyzések születnek e témában, a közösségi médiában is egyre nagyobb teret hódítanak a környezettudatos, fenntartható, és a hulladékminimalizálásra irányt mutató „szak” cikkek. Gyakran olvashatjuk a médiumokban ezt a kérdést: *Hogyan alakítsunk ki „zero waste” életkörülményeket?* Mérnöki szempontból kötelességünk megvizsgálni, hogy mi van mögötte? Mi a realitás? Előbbre viszi-e a hulladékgazdálkodási problémákat, illetve a hulladék keletkezése során az élénk állított megoldandó feladatokat könnyebbé teszi-e, ha az egyes emberek a mindennapi életük során törekednek a maradékanyagok minimalizálására? Igen, de ez csak a jéghegy csúcsa, vagy úgy is mondhatjuk, hogy ez csak a piramis teteje.

Véleményem szerint a műszaki tudományokban, a mérnöki területeken felmerülő kérdéseket a realitásokon, a tényeken alapuló vizsgálatok fogják előbbre vinni, és a felmerülő problémákat megoldani. Sem a hulladékgazdálkodásban, sem az energetikában – és egyéb más mérnöki területeken sem – nem szabad hiú ábrándokba kergetni magunkat. A jövő tekintetében is különböző célkitűzéseket olvashatunk, különböző sarokszámokkal találkozhatunk - mint például a megújuló energiaforrásokból származó energiahányad, vagy a deponált hulladékok maximális aránya –, amelyek megfogalmazzák számunkra az elérendő célokat. Az eltérő célértékek azonban felvetik annak kérdését, hogy a kitűzött értékek tudományosan kellően megalapozottak-e, illetve a célkitűzések figyelembe veszik-e a szigorú realitásokat? [28]

Az eddig olvasható szakaszban számos kérdést tettünk fel, melyekre nem adtunk egzakt választ. Egy összefoglaló kérdést kell még azonban feltennünk, amelyre adandó válaszunkban részletesen kifejtve foglaljuk össze és adunk feleletet az eddigi kérdésekre.

Problémákat generál a hulladékgazdálkodás, vagy csak megoldandó feladatok elé állít minket?

A válaszunkat Marc Sutton gondolatai foglalják össze: *„A hulladék létrehozása nem feltétlenül rossz dolog. Az a helytelen, ha nem kezdünk vele semmit.”* Kijelenthetjük, hogy jelenleg a folyamatainkban - legyen szó akár termelési folyamatokról, vagy

lakossági életvitelről – keletkeznek hulladékok. Azonban a hulladék mindig is jelen volt a társadalmak életében.

A történelemben visszatekintve, a hulladék feldolgozásának a kérdése, minden társadalmat – még az ősi társadalmat is – foglalkoztatta. Az emberiség történelme során a technológiai fejlődésünkkel együtt, az energiafogyasztás és a környezetszennyezés kapcsolata mindvégig együtt haladt egy képzeletbeli időskálán. Maga a környezetszennyezés és a hulladékfelhasználás, hulladékkezelés szorosan együtt haladt, ami érthető is, hiszen a hulladékkezelés témaköre a környezetvédelem szerves része.

A történelem előtti ember (200 – 250 000 évvel ez előtt) volt az első „Homo Recyclicus”¹: azokat az anyagfrakciókat, amelyeket a neandervölgyi ősember felhasznált, csaknem teljesen hasznosította is. A nem fogyasztható maradékot elásta vagy a meleget adó tábortűzébe vetette. [21]



„Homo recyclicus” Már a neandervölgyi ősember is alkalmazta a hulladékégetést energiaszükségletének fedezésére. [42]

Hozzávetőleg 10 000 évvel ezelőtt, a neolitikum² kezdetén végbement első technológiai forradalomnak a mezőgazdaság kialakulását vehetjük, mely alapjaiban megváltoztatta az ember és a természet kapcsolatát. [20] Az ember az egyszerű gyűjtögető életmódról áttért a földművelő, termelő életmódra és ettől kezdve képes volt az élelmezésükre szelektált növényfajtákat termelni. Birtokba vette tehát a napenergiából a növények által előállított anyagok nagy részét, elkezdte kiaknázni a természet adta lehetőségeket. A korai mezőgazdaság kialakulása alapvetően meghatározta, és érdemben megváltoztatta az ősi társadalmak berendezkedését és életvitelét. A törzsi közösségek át tudtak térni az addigi gyűjtögető, halászó, vadászó életmódról egy kezdetleges termelő életmódra, ami biztosította számukra, hogy hosszabb ideig ugyanazon helyen tudjanak életvitelszerűen tartózkodni. Ez azt jelentette, hogy korábban addig tudtak egy-egy területen élni, amíg az biztosította számukra a



10 000 évvel ezelőtt már alkalmaztak korabeli ásó eszközöket. Ezzel a hulladékot is el tudták ásni. [45]

¹ A szerző által elnevezett és kitalált fogalom.

² Az újkőkor vagy csiszoltkő-kor(szak) (idegen nevén neolitikum) a kőkorszak utolsó része. Az újkőkorszak a földművelés kialakulásával kezdődik és a fém alapú eszközök elterjedésével ér véget a rézkorban, a bronzkorban, illetve a vaskorban.

fennmaradáshoz szükséges táplálékot. Vagyis amikor lehalászták, levadászták az adott területet, akkor a törzsnek el kellett hagynia azt, a közösségeknek el kellett vándorolnia. A szelektált növényfajták termelésével megkezdődött az ember által szervezett ökoszisztémák kora, mely – az energiafelhasználásunkhoz hasonlóan – a környezetünkhöz való viszonyunkat is nagymértékben megváltoztatta. Amíg a természetes ökoszisztémákban az elhalt szerves anyag formájában lévő hulladékot a lebontók leépítik, addig az ember által szervezett ökoszisztémákban a hulladék összegyűlik, ami alapjaiban véve határozza meg a hulladékgazdálkodást. Az emberi közösségek feladatul kapták a tudatos hulladékgazdálkodás megszervezését!

A kínaiak működtettek először - már az ókorban - kidolgozott hulladékgyűjtési rendszert. A hulladékgazdálkodási kérdések megoldására a jogalkotásban is megszülettek az első ilyen témájú paragrafusok.

A legelső ismert hulladék-lerakással foglalkozó városi rendelet i.e. 500 környékén született Athénban. Ez a rendelet a szemetet szétdobálókkal szemben büntetést helyezett kilátásba, illetve a városi hulladék lerakására a várostól mintegy 1,5 km távolságban jelölte ki a helyet.

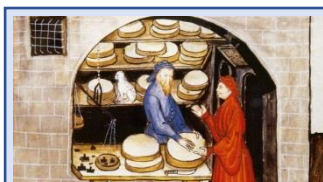
A római jogban is jelentek meg a környezetvédelemmel (levegőtisztaság védelemmel) kapcsolatos jogszabályok. A sajtókészítő műhelyek elhelyezését lokalizációhoz kötötte. Úgy kellett telepíteni azokat, hogy füstjükkel a többi házat ne szennyezzék. (Látni fogjuk, hogy az emissziós pontforrások lokalizációja ma is napirenden lévő kérdés (19. ábra)). Az ókori Róma városa népsűrűségét tekintve a mai metropoliszok elődjének tekinthető, olyan szempontból mindenképpen, hogy megjelentek az első városüzemeltetési feladatok. I. sz. 200-ban tisztasági



A levegőtisztaság a környezetszennyezés (környezet terhelés) első megnyilvánulása volt. Tüzelőanyagok fűtésre és főzésre történő felhasználása révén kezdetét vette a belső terek légszennyezése. Ennek bizonyítéka, hogy a több ezer évvel ezelőtt lakott barlangok falaira vastag koromréteg települt, ami alapján feltételezhető, hogy a barlanglakók légzését nehezítette, s az ember szemét is bántotta a keletkező füst. Az első emberi lakóhelyeken általában nem oldották meg a füst elvezetését, melynek az életvitel szempontjából praktikus oka volt: a szűnyogok elleni védelem! [43]



Az athéni törvények jogszabályokban rögzítették a hulladék elhelyezésének szabályait. [61]



A Római jog szabályozta a sajtókészítő műhelyek elhelyezését. [52]

egységeket kellett szervezni Rómában. Kétfős csapatok az utcákat járva kocsijukba dobták a felszedett szemetet. [46]

Tudománytörténeti érdekes olvasmányok a hulladékgazdálkodással kapcsolatban

A kínaiaknál a folyékony szerves hulladékkal - a fekáliával - történő trágyázás már évezredekkel ezelőtt is lényeges része volt a mezőgazdasági termelésnek. Az ország keleti részén fekvő hordalékos síkságok talajának termékenységét kb. 4000 éve így tartják fenn. Kína több részén ma is követik ezt a hagyományt. Han Suyin írja, hogy „Chengtu városában még a 20. században is (1949-ig) a város leggazdagabbjai közé tartoztak azok a családok, amelyeknek a tulajdonában volt a városi csatorna, s így a csatornában összegyűlt ürüléket eladhatták vidéken”.



Az ókori kínai szennyvízcsatorna. [53]

A tea elterjedésének egyik magyarázatául szolgálhat a folyékony hulladékkal való trágyázás. A szerves hulladék elfertőzhette a talajvizet, mely az ivóvíz forrásaként szolgált. A nyert ivóvizet fel kellett forralni higiéniai okok miatt. A forralással történt fertőtlenítéssel a vízben található ízanyagok is távoztak és íztelen lett az ivóvíz. Az íz fokozására teafűvel ízesítették az ivóvizet, mely a tea, teázás kialakulásához és elterjedéséhez vezetett. [23]



Teafű [44]

Egy másik, tudománytörténeti szempontból érdekes történet is bemutatja, hogy a (folyékony) hulladékok hozzájárultak a történelem alakulásához.

A Francia udvar egyik leghíresebb uralkodójánál (XIV. Lajosnál – a „Napkirálynál”) az udvari öltözködés egyik érdekességét lehet megfigyelni: a piros cipősarkot. A barokk öltözködést kutató neves történészek sem tudják pontosan, hogy hogyan alakult ki a piros cipősarok, miért került bele az akkori divatba. Az egyik

lehetséges magyarázat szorosan illeszkedik a hulladékgazdálkodáshoz. A monda szerint a fiatal XIV. Lajos egy báli mulatság után haza felé menet elment egy mészárszék előtt és a mészárszékből kifolyó véres folyékony hulladékba belelépett és az vörösre festette a cipő sarkát! Másnap elterjedt az udvarban, hogy a piros cipősarok a divat, mert a király is ilyet hord! Vagyis napjainkban divatos kifejezéssel mondhatjuk, hogy a Napkirály a mai értelemben véve igazi „influenster” volt.



XIV. Lajos és a piros cipősarok [51]

1. ábra. A hulladékgazdálkodás idővonala

* * *

Napjainkban komplex műszaki megoldások alakultak ki, legyen szó hulladékgazdálkodásról vagy energiagazdálkodásról.

Az integrált energiagazdálkodás azt célozza, hogy minden esetben a leghatékonyabb megoldást találjuk meg a szóban forgó probléma megoldására. Az energiagazdálkodás, energiahatékonyság tehát nem korlátozódhat a már megtermelt energiával való gazdálkodásra, hanem szükség esetén már a természeti erőforrások kitermelésénél vagy a gyártási folyamatok területén módosítást kell tenni a komplex probléma kezelésére. Ugyanezt az elvet kell követni az integrált hulladékgazdálkodás kialakításánál is. Már a termékek gyártásánál és az azt követő használatba vételénél is gondosan és jól megtervezetten kell eljárunk. Ehhez szorosan kapcsolódnak a termékintegrált- és a termelésintegrált környezetvédelem fogalmai. Kitűzendő célként kell megjelenjen a mérnökök előtt, hogy a környezetvédelmi szempontokat már a gyártástechnológiai folyamatok kialakításakor a termelési folyamat szerves részének tekintsék. Az ilyen gyártási eljárásokat nevezzük termelésintegrált környezetvédelemnek. E módszer célja, hogy a termelés során csak az elkerülhetetlenül szükséges minimális mértékben keletkezzen maradékanyag, vagyis hulladék. Azt is el kell fogadnunk, hogy a gyártási folyamatoknál keletkeznek melléktermékek, maradványanyagok, amelyek az anyag körfolyamatainak természetes velejárói.

A termékintegrált környezetvédelem célja, hogy a termékek környezetvédelmi szempontjait a termelési folyamatok megtervezésénél figyelembe vegye. Célja, hogy a gyártandó terméket úgy alakítsuk ki, hogy a használati életciklusát követően, a hulladékká válásakor a szükséges előkezelés után az anyagi komponenseiket – fa, fém, műanyag stb. – a lehető legnagyobb arányban vissza lehessen vezetni a termelési

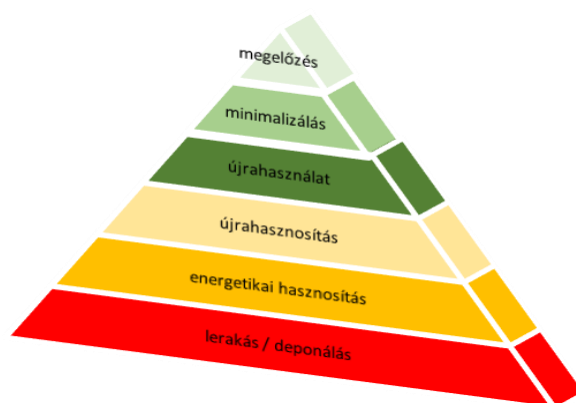
folyamatba. Így értékes másodnyersanyagként az egyes anyagfrakciókat nem számúzzuk a körforgásos gazdaságból.

Belátható tehát, hogy szinte minden tevékenységünk „eredményeképp” hulladék fog keletkezni. Megfogalmazódott a hulladék definíciója is: olyan anyagáram, olyan maradvány anyag, mely anyagárammal a tulajdonosa nem akar, nem szándékozik, vagy nem tud mit kezdeni. Azzal a kitétellel fogadjuk el a hulladék definícióját, hogy nem mindent lehet fogalmi határok közé szorítani. Ilyen például maga az energetika definíciója. Mit jelent az, hogy energetika? Klasszikus értelmezésben az „energetika a hő- és villamosenergia átalakításának tudománya”, de szintén kiegészítéssel kell élni. Ennél ma már sokkal több, sokkal komplexebb jelentése van az energetika definíciójának. Ahogy korábban is írtam, a környezetvédelem ma már az energetika szerves része.

A települések és az ipartelepek hulladéka folyamatosan termelődik újra. A fejlettebb országokban a hulladékok keletkezésének mennyisége ugyan csökkenő tendenciát mutat, azonban a fejlődő országokban – részben a népesség számának növekedése miatt – a megvált, elhasznált termékek bővülő újratermelődéséről, vagyis a hulladék mennyiségének növekedéséről beszélhetünk. A periodikus újratermelődés miatt a települések hulladékának elhelyezése, ártalmatlanítása vagy hasznosítása egyre fontosabb feladat.

Tömören megfogalmazva a lényegét: a hulladékká vált anyagáramokkal kezdenünk kell valamit, kezelni kell azokat. A kezelésnek több lehetősége van, ezek közül az egyik alternatíva a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék termo-fizikai átalakítása aerob körülmények között, vagyis égetése.

Nagyon fontosnak vélem kiemelni, hogy nem az energetikai célú hasznosítás a legcélszerűbb megoldás! A munkámban többször említett fenntarthatóság miatt, a napjainkban kialakult integrált, hierarchikus hulladékkezelési rendszer szerint kell lehetőleg eljárni. Az ajánlott hulladéksorsot az EU Hulladék Keret Irányelvének nevezett 2008/98/EK irányelv [5] szerint kell kialakítani (2. ábra).



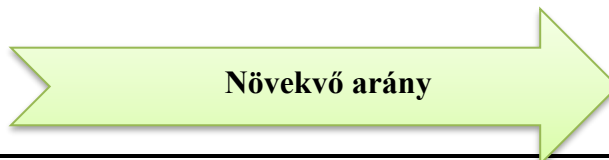
2. ábra. A hulladékpiramis

A hulladéksors piramisából következik, hogy természetesen a „meg nem termelt” hulladék a legjobb hulladék, azonban utópisztikus elképzelés lenne olyan technikákban, technológiákban és olyan termelési folyamatokban gondolkodni, amelyek egyáltalán nem termelnek hulladékot. A hulladékhasznosítási prioritások, az egyes hulladékkezelési eljárások alkalmazása a gyakorlatban országonként különböző.

Az EU Hulladék Keret Irányelvének megfelelően a hulladékpiramist a műanyag hulladékok hasznosítási szintjén keresztül mutatom be. Miért pont a műanyag hulladék anyagáramát elemzem? A válasz a lakosságtól gyűjtött települési hulladékok összetételében és annak változásában rejlik. Összességében elmondható, hogy a szemét minőségváltozásában ma Magyarországon a papír mennyisége csökken (talán a környezettudatosabb magatartásunknak köszönhetően – szelektív hulladékgyűjtés), a bioanyagok mennyiségében a változás elhanyagolható, viszont a műanyagok aránya folyamatosan növekszik (1. táblázat).

1. táblázat. Magyarországon található települési szilárd hulladékban lévő műanyag frakció százalékban kifejezett aránya [64]

	1980	1990	1998	2006	2013	2020 ³
műanyag hulladék százalékos mennyisége, [%]	4,5	4,6	9,3	13,0	16,7	17,0



A polimer anyagfrakció mennyiségi és minőségi alakulása nagyon dinamikusan változó szegmense a kommunális hulladékok összetételének, mindemellett a hulladékégetésnek az egyik legtöbbet támadott területe. Energetikusként azonban meg kell állapítsam, hogy a háztartási hulladékok szintetikus polimer tartalma a

³ 2013-ig tényadatokat, a 2020-as évre előzetesen becsült adatot mutat a táblázat.

szemét égetése során – kalorikus szempontból – kifejezetten előnyös. A műanyagszemét átlagos fűtőértéke ugyanis 34 MJ/kg feletti, mely jóval meghaladja a szelektálás nélküli városi hulladék fűtőértékét.

További értékes következtetésre jutunk, ha megvizsgáljuk a háztartási hulladékban található műanyagok összetételét (2. táblázat). A kommunális hulladékban található műanyag fajtáinak százalékos eloszlása közelítőleg azonos a gyártásban elfoglalt arányaikkal. [12]

2. táblázat. A kommunális hulladékban megjelenő műanyag hulladék összetétele

	<i>műanyag fajtája</i>	<i>arány [%]</i>
<i>hőre lágyuló</i>	LDPE, HDPE ⁴ kis- és nagy sűrűségű polietilén	30-35
	PVC poli(vinil-klorid)	20-25
	PP polipropilén	8-10
	PS polisztirol	6-8
	PU poliuretán	8-10
	GFRP ⁵ üvegszál erősítésű műanyag	6-8
	PA poliamid, (nylon)	2-3
<i>hőre nem lágyuló</i>	UP ⁶ telítetlen poliészter	1-2
	PF ⁷ fenol-formaldehid gyanta	3-4
	EP ⁸ epoxigyanta, epoxi	1-2

A műanyagok újrahasznosításának igen sokféle nézőpontja lehetséges. Talán mindenekelőtt a környezeti szennyezés, a környezetvédelem, a hulladékkezelés szempontjait említem első helyen. Azonban a polimer hulladékok újrahasznosításával az anyagmegtakarítás, a kőolaj (mint nyersanyag) kímélése is jelentős előny. Továbbá energia-megtakarítás is elérhető, hiszen a szintetikus polimer gyártási technológiában a másodnyersanyag előállításakor kevesebb energiát használunk el, mint primer alapanyag gyártásakor.

A felsorolt szempontok arra ösztönöztek, hogy az EU-s irányelveknek [5] megfelelően a polimer hulladékok újrahasznosítási szintjeivel mutassam be a hulladékpiramist. Egy „létra” segítségével demonstrálok a hulladékkezelési hierarchiát, ahol a latorja azt a demonstrációs célt szolgálja, hogy a lépcsőfokokon felfelé haladva egyre jobban biztosítjuk a fenntartható fejlődést a hulladékká vált műanyag termékek további sorsát illetően.

⁴ LDPE = Low-Density Polyethylene

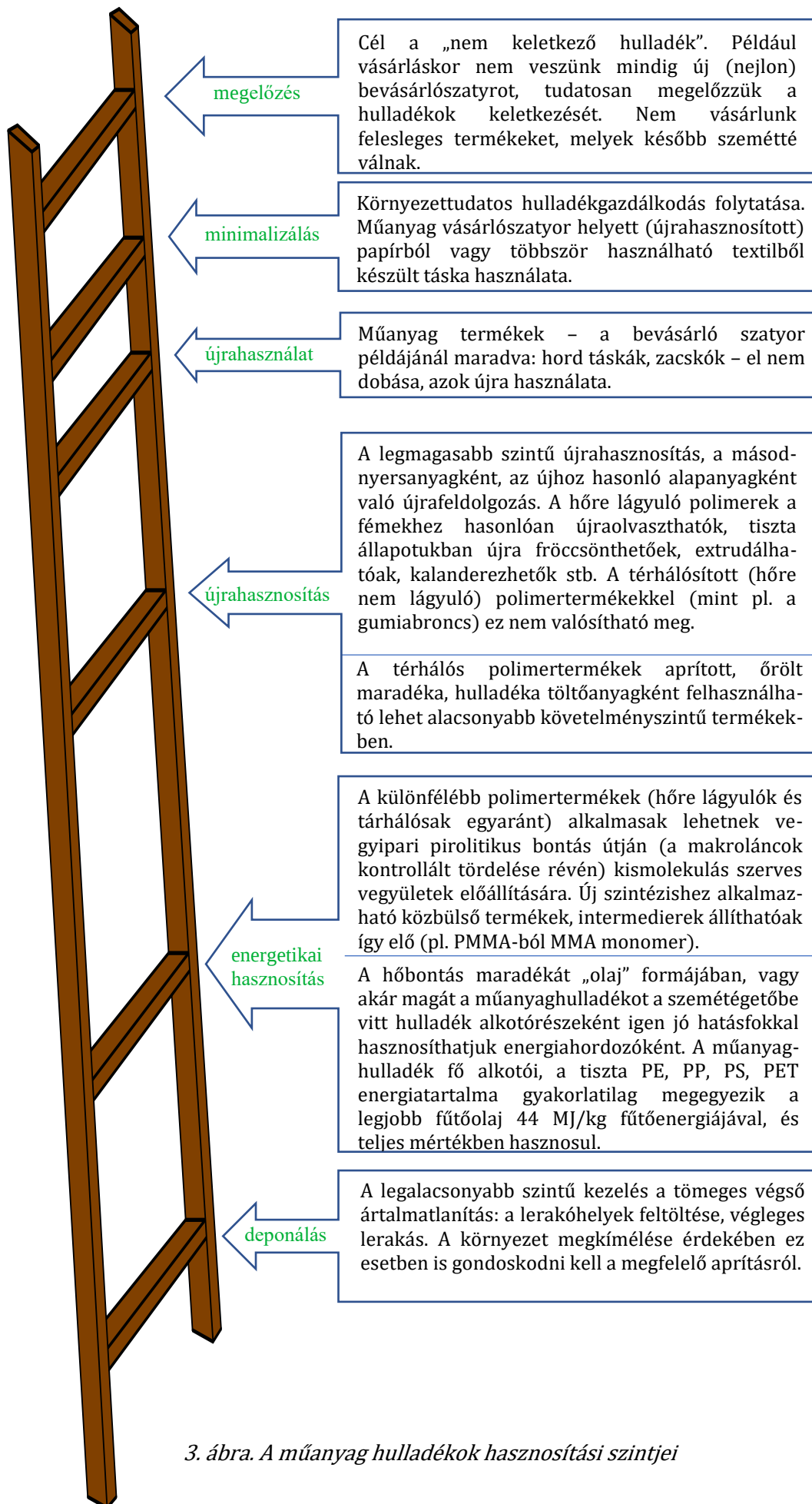
HDPE = High-Density Polyethylene (más néven kemény polietilén, röviden: KPE)

⁵ GFRP = Glass Fiber Reinforced Plastic

⁶ UP = Unsaturated Polyester

⁷ PF = Phenol formaldehyde

⁸ EP = Ethylene Propylene



3. ábra. A műanyag hulladékok hasznosítási szintjei

Magyarországon a környezet védelmének általános szabályairól szóló 1995. évi LIII. törvény alapelvei között ki is emeli, hogy törekednünk kell a leghatékonyabb megoldás és az elérhető legjobb technika alkalmazására. [1] Az említett - legjobb elérhető technológiát – a nemzetközi szakirodalmakban a BAT (Best Available Technology) mozaikszóval szokták rövidíteni. Definíció szerint az a technológia, amely elfogadható műszaki és gazdasági feltételek mellett gyakorlatban alkalmazható és a leghatékonyabb a környezet egészének magas szintű védelme szempontjából. Fontos kihangsúlyozni, hogy a BAT elv a környezetvédelmi technológiákban – kiváltképp a hulladékkezelési technológiákban – a műszaki, gazdasági szempontok figyelembevételén túl, az „észszerűen elérhető legjobb” eljárás kialakítására helyezi a hangsúlyt.

A kialakítandó legjobb eljárás megválasztásának példáját egy elrettentő metropolisz gyakorlati példáján keresztül tudom bemutatni. Egyiptom fővárosában - a közel 20 milliós világvárosban - egészen különleges hulladékfeldolgozási „eljárás” alakult ki. Kairó egyik elővárosában, Mansiat Nasszerben nyomorúságos körülmények között élnek a „hulladéktelepi emberek” („garbage people”), akik olyan polgárai az egyiptomi közösségnek, akik a hulladékban, illetve a hulladékból élnek: amit gyűjtenek, azt felhasználják vagy eladják. Található a szemétben élelmiszer, műanyag, papír, textília, fém, üveg és mintegy 60%-uk biohulladék. A szemét 80%-át újrahasznosítják, míg a fel nem használt maradékot részben feleltetik az utcán élő sertésekkel vagy elégetik tüzelőként. [34] Kairó szemetének közel egyharmadát dolgozzák fel a szemétguberálók. Érezhető, hogy ha csak az újrahasznosítás hatásfokát nézzük a fent említett kairói példának, akkor kimagasló értéknek vehetjük a 80%-ot (4. ábra). Azonban nyilván nem ez az észszerűen elérhető legjobb technika, a fenntarthatóságot nem ilyen megközelítésben kell biztosítani.

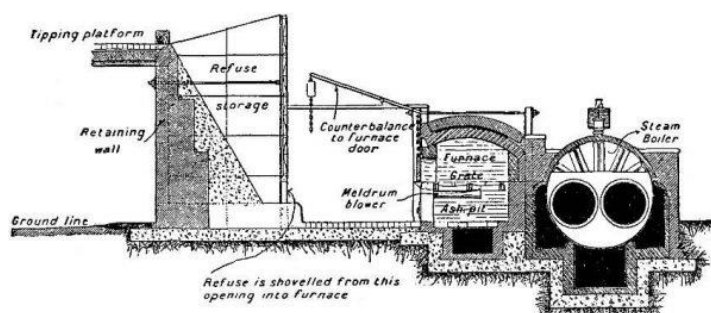


4. ábra. Hulladéktelep Kairóban [34]

4. A hulladékégetésről

Az előző fejezetben láthattuk, hogy a hulladékká vált maradékanyagok égetése az emberiség egész történelmét végigköveti.

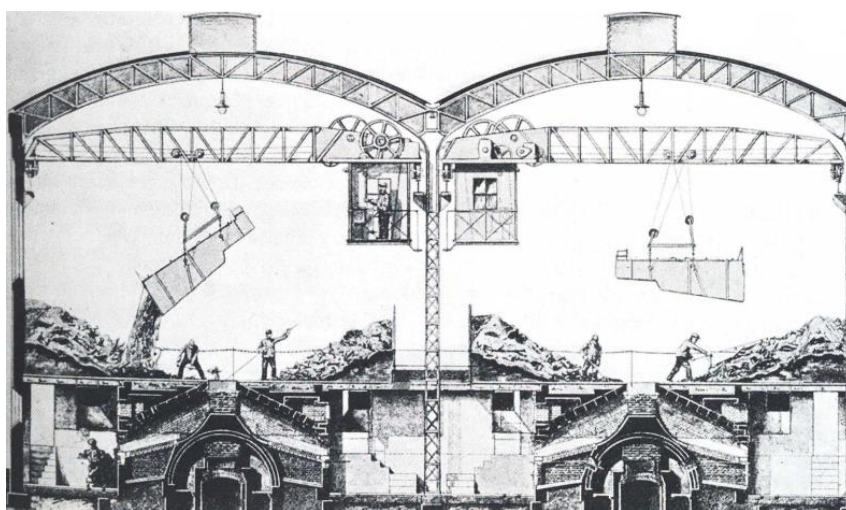
A már bemutatott „homo recyclicustól” kezdve, az ipari forradalmakat – melyet a gőzgép megjelenése és fejlődése miatt energetikusként energetikai forradalomnak titulálók – követően az első hulladékégető kazán Angliában, Nottingham-ben létesült 1874-ben (5. ábra). A létesítményt az Alliot & Co. Ltd. építette. [38]



5. ábra. Hulladékégető Nottingham-ben (1874) [60]

Az első angliai hulladékégető mű műszaki paraméterei még a mai korban, a mostani technológiai fejlettségünk mellett is figyelemre méltóak. 8-10 tonna hulladékot tudtak elégetni naponta. Az égőtér boltíves kialakítású volt a megfelelő égés biztosítására. A tűztér pedig álló ráccsal rendelkezett, melyben 700 – 900 °C közötti égetési hőmérséklet alakult ki. Az égető üzemeltetője külön figyelmet fordított az alacsony por és szag emisszióra. Ez az égető egészen 1903-ig volt üzemben.

Az első olyan erőművi méretű hulladékégető, mely már gőzbázison a városi távhőellátásnak szolgáltatott energiát, a XIX. század végén – 1895-ben – Hamburgban állt üzembe (6. ábra).



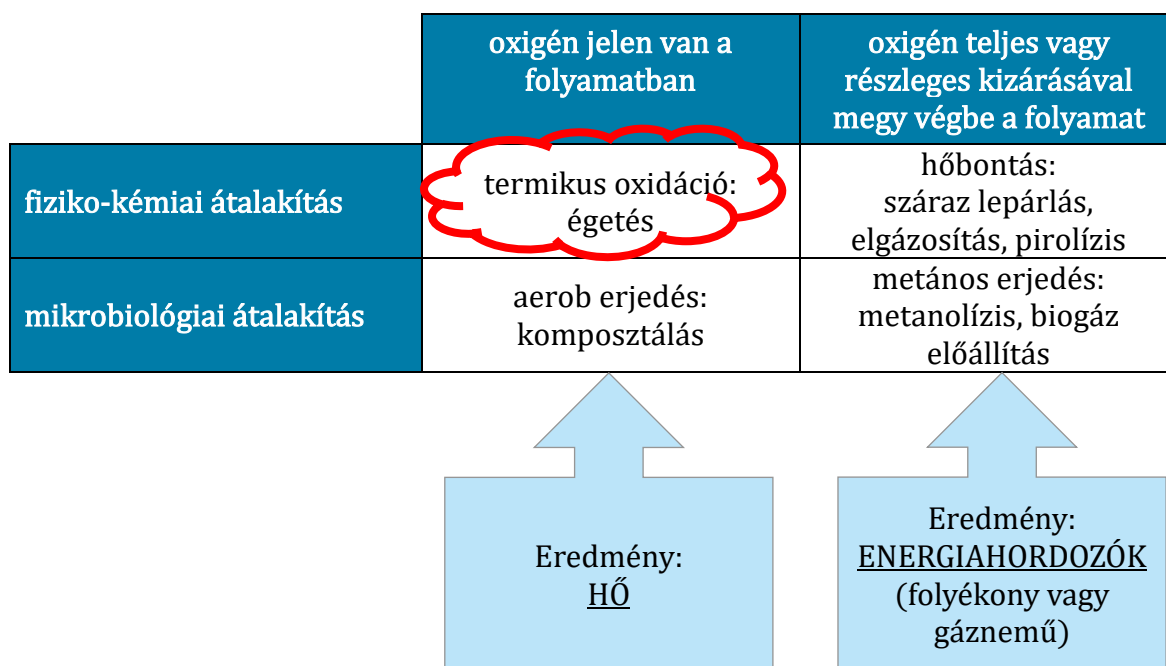
6. ábra. Az első hulladékégető erőmű Hamburgban (1895)[38]

A fejlődés – alig több, mint 100 év alatt – szinte felfoghatatlan. Ma már a komplex tervezési igényeknek és a rendszerszemléletű tervezésnek köszönhetően, multifunkciós égetőműveket létesítenek. Ennek egyik legszemléletesebb példája a nemrég Dánia fővárosában üzembe helyezett égetőmű, melynek kialakítása olyan, hogy a hasznosítómű tetején sípályát alakítottak ki, ezzel is növelve az ilyen típusú hulladékkezelés társadalmi elfogadottságát (7. ábra).



7. ábra. Hulladékhasznosító mű, Koppenhága [47] [58]

Szándékosan kerültem eddig a hulladékégetésre az „energetikai hasznosítás” kifejezést. A települési hulladékok energetikai hasznosításának több útja lehetséges. A szemét elégetése a gőztermelésre, s ennek bázisán a hőhasznosításra, a hőellátásra, a villamosenergia-termelésre vagy a kapcsolt energiatermelésre ad lehetőséget. Energetikai hasznosítási lehetőség a biogáztermelés és ehhez kapcsolódva gázmotorok, gázturbinák és gáz/gőzerőművek alkalmazása is. A 8. ábrában foglaltam össze az energetikai hulladékhasznosítási lehetőségeket, melyből kitűnik, hogy a hulladékok energetikai hasznosítása nem csak annak elégetését jelenti.



8. ábra. A hulladékok energetikai hasznosításainak lehetőségei

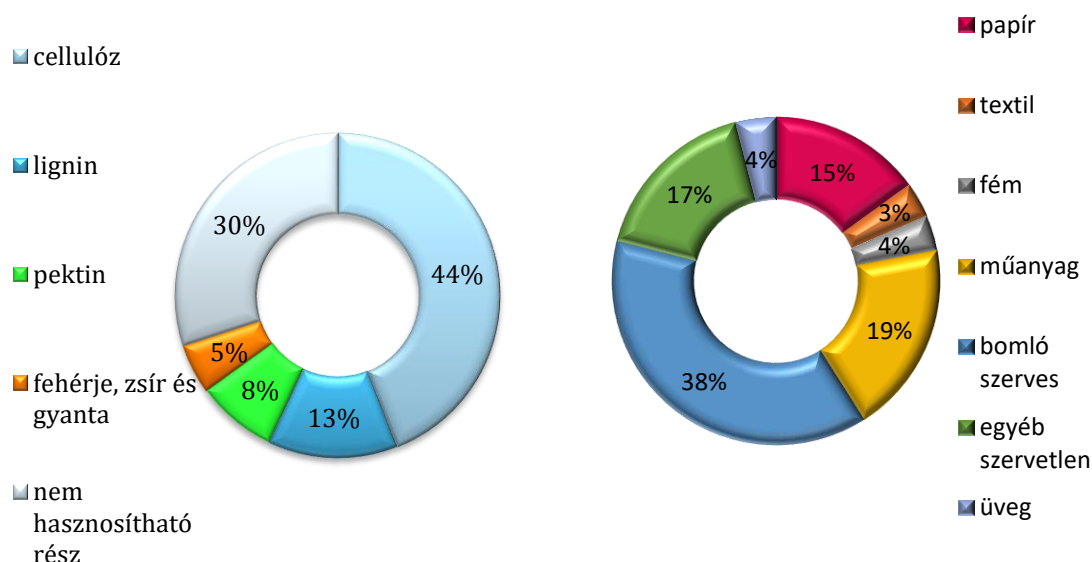
Amennyiben az oxigén jelen van a folyamatban, úgy az eredmény hőenergia lesz, amennyiben az oxigént kizárjuk, úgy folyékony vagy gáznemű energiahordozót, illetve a pirolízis esetében még kokszot is nyerünk.

Szeretnénk kihangsúlyozni, hogy jelen írásban a termikus oxidációs eljárásokra – az égetőművek kialakítására – fektethetjük a hangsúlyt.

4.1. A hulladékégetés elméleti alapjai

Láthattuk az eddig leírtakból, hogy a feleslegessé vált maradékanyagok kezelése mindig megoldandó feladat volt. A különböző történelmi időkben az égetés mindig is a hulladékkezelési megoldások palettáján szerepelt. Egyértelműen azt sem lehet kijelenteni, hogy időszámításunk előtt csak a hulladék „eltüntetése”, annak térfogati minimalizálása volt a cél. Hiszen a „homo recyclicus” a tábornözet táplálta a maradékanyagokkal, így egyértelműen energetikai célok is vezérelték a hulladékok elégetését. A hulladék égetésének e kettős célja napjainkra is megmaradt. Természetesen a tömeg és térfogat csökkentése mellett a hulladékban rejlő energetikai potenciált sem szabad veszni hagyni.

Fel kell tegyük azt a kérdést, hogy egyáltalán mi teszi lehetővé a hulladékok elégetését? Röviden válaszolva a kérdésre: Az anyagi és kémiai összetételük (9. ábra).



9. ábra. Nagyvárosi hulladékok átlagos összetétele [26]

A hulladékok összetételének számos csoportosítása létezik. Egy nagyon egyszerű, ám kalorikus szempontból hasznos csoportosítás szerint a hulladékok két részből állnak: erjedő, korhadó részekből, és nem erjedő, nem korhadó részekből. Az első részt

zömmel az éghető anyagok (papír, faféleségek, szerves anyagok, éghető műanyagok), a másikat nem éghető fémek, nem éghető műanyagok, ásványi anyagok, üveg, salak alkotják.

A hulladékok égethetőségét számos kritérium - és azok egymásra hatása – határozza meg. Ezek az alábbiak:

- halmazállapot, (folyékony, iszapszerű, pasztás, szilárd, illetve kevert),
- kémiai összetétel elemi analízissel (szén, hidrogén, oxigén, nitrogén, kén, víz és hamu),
- összetétel gyors analízissel (fix szén, illóanyag, víz és hamu),
- fűtőérték,
- sűrűség,
- a hamu olvadási jellemzői,
- szilárd hulladékoknál szemcseméret-eloszlás, maximális darabnagyság, valamint anyagféleségek szerinti összetétel,
- folyékony és iszapszerű hulladékoknál viszkozitás, gyulladás- és lobbanáspont, valamint szilárd szennyezőanyag-tartalom és annak max. szemcsemérete, továbbá a kémhatás,
- halogénanyag-tartalom (kloridok, fluoridok, bromidok),
- nehézfém-tartalom (Pb, Cd, Hg, Cu, V stb.),
- egyéb fém-tartalom (Fe, Ca, Na stb.),
- egyéb mérgezőanyag-tartalom (PCB),
- egyéb specifikus anyagi tulajdonságok szükség szerint (pl. fertőző tulajdonság, hőmérséklet stb.),
- mennyiségi adatok (szélső határok és átlagértékek). [31]

A felsorolt kritériumok vizsgálata alapján határozzák meg, hogy égethető-e a hulladék, és ha igen milyen módon.

A hulladék „bemintázásakor” az égetés módjának meghatározása előtt szükséges labor körülmények között elemezni (elemeztetni), hogy a lakosságtól, intézményekből, kereskedelemről vagy iparból begyűjtött hulladék milyen kémiai összetevőkből és milyen főbb frakciókból áll.

Tüzeléstechnikai szempontból a fűtőérték, az éghetőanyag-tartalom, a víztartalom és a hamutartalom a legfontosabb tulajdonságok. A felsorolt tulajdonságok között erős korreláció van, azok összefüggenek egymással.

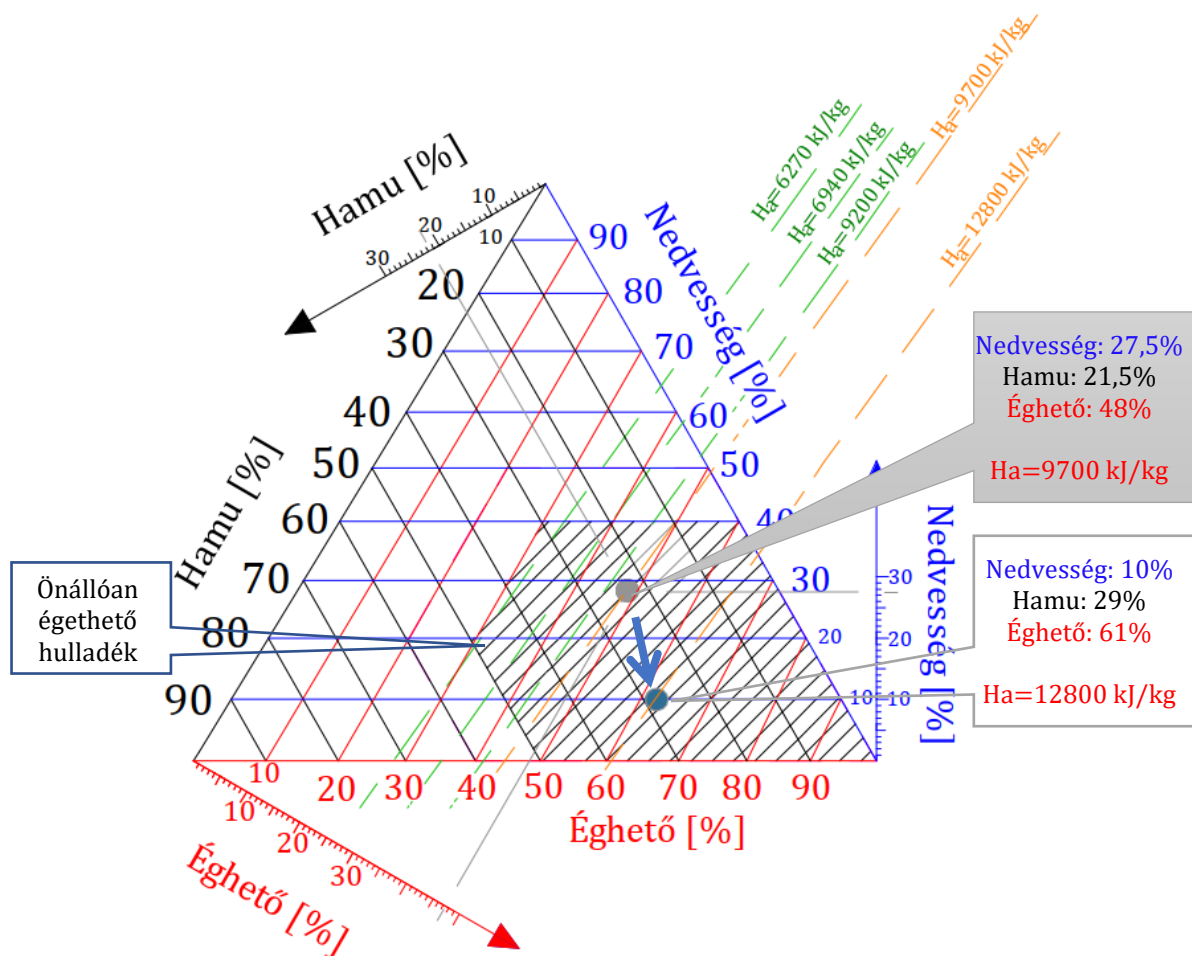
A hulladékok önálló égethetőségének az alábbi feltételeknek kell megfelelni [31]:

- legalább 30 tömegszázalék éghetőanyag-tartalom,
- legfeljebb 50 tömegszázalék hamutartalom,
- legfeljebb 40 tömegszázalék víztartalom,
- legalább kb. 6300 kJ/kg fűtőérték⁹.

Belátható, hogy a szemet összetétele szempontjából meghatározó a hamu-, a nedvesség- és az éghető tartalom. E három jellemzőt egy egyenlő oldalú háromszög oldalaira felmérve a – kalorikus energetikusok körében elterjedt – Tanner-féle diagramot kapjuk (10. ábra). Ezt a diagramot, mint egy nomogram használhatjuk. A hulladékok önálló égethetőségének kritériumait a háromszög oldalaira felmérve kapjuk a vonalkázott területet. E rész mutatja az önállóan eltűzelhető szemetet, az azon kívül eső összetételű hulladék csak támasztó tüzelés (olaj- vagy gáztámasztással) segítségével tüzelhető.

Egyszerű példán keresztül megérthetjük a Tanner-diagram használatát. Ha a bemintázás során a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladékra 27,5% nedvességtartalmat, 21,5% hamutartalmat és 48% éghető tartalmat kapunk, akkor ezeket ez eredményeket a háromszög megfelelő oldalára felmérve a diagramon belül kijelölődik egy pont. Egyrészt megállapíthatjuk, hogy a pont a vonalkázott területen belül helyezkedik el, tehát az elemzett hulladékfrakció önállóan égethető. Másrészt a diagramon leolvasható az analizált hulladék fűtőértéke is, ami jelen esetben $H_a=9700$ kJ/kg (10. ábra). Ezen fűtőérték magasnak mondható vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék esetében.

⁹ A tervezői gyakorlatban legalább 7000 kJ/kg.



10. ábra. Tanner-féle diagram

Amennyiben a hulladékot esetleg mechanikai kezeléseknek vetjük alá, és tüzeléstechnikai minőségén javítunk – például egy szitálással a biológiailag lebomló frakciókat, mely tipikusan a 70-100 mm-es szemcsefrakcióban helyezkednek el, leválasztjuk és a hulladék nedvességtartalmát ezzel jelentősen csökkentjük – akkor magasabb tüzeléstechnikai tulajdonságú hulladékot kapunk. A fenti ábrán látható második példán (zöld pont) 10% nedvességtartalmú, 29% hamutartalmú és 61% éghető anyagtartalmú hulladék esetén a fűtőértéke a hulladéktestnek $H_a=12800$ kJ/kg-ra emelkedik (10. ábra). Azt azonban meg kell állapítsuk, hogy ilyen magas fűtőértékű maradékanyag vegyesen gyűjtött hulladék esetében csak mechanikai kezelést követően érhető el.

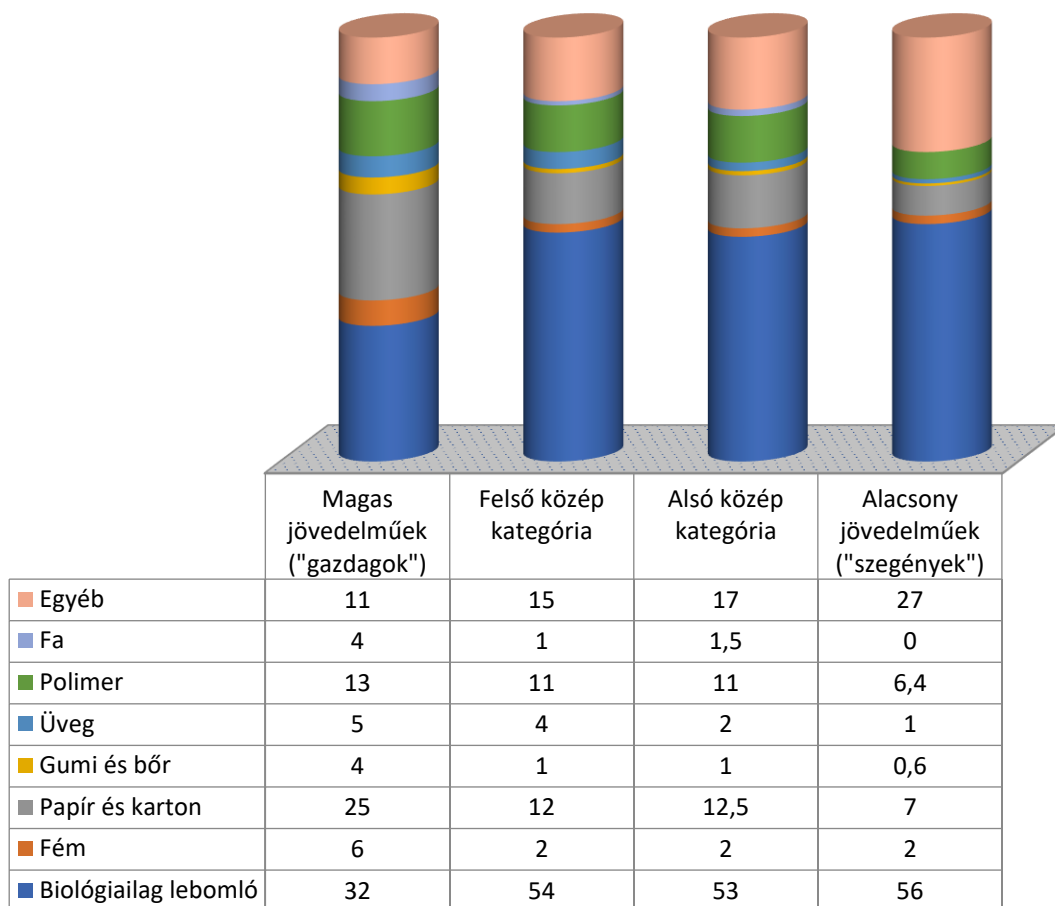
Kalorikus értelemben a hulladék minőségét annak fűtőértéke befolyásolja a legjobban. Az egységnyi tömegű hulladék elégetésekor felszabaduló energia (vagyis a fűtőérték) az egyik legfontosabb mutatószám. Viszont a fűtőértékre nagyon sok minden hatással van.

Az életszínvonal emelkedésével a fűtőérték nő. Vagyis, minél inkább fejlettebb egy ország, egy adott régió, annál magasabb a begyűjtött hulladék fűtőértéke. Az életszínvonal emelkedéséből adódó fűtőérték emelkedés a műanyag hulladékok növekvő arányának köszönhető. Ennek oka, hogy a műanyagoknak kiemelkedő a fűtőértéke a többi frakcióhoz képest. Ebben keresendő az életszínvonal és a fűtőérték arányának összefüggése. A fejlettebb régiókban magasabb a műanyag frakciók aránya, így a települési szilárd hulladék fűtőértéke is emelkedik.

A fűtőértéket jelentősen befolyásolja a begyűjtési terület társadalomban elfoglalt helye, mely alatt azt kell érteni, hogy az ország méretéhez képest és városiasodásának szempontjából mekkora az adott város, és milyen életszínvonalon él a lakosság. Minél nagyobb a város lakosságszáma, általában annál magasabb a hulladék fűtőértéke. A városban található lakótelepek, azon belül a távfűtés aránya, a szilárd útburkolati felületek aránya mind befolyásolják a fűtőértéket.

A hulladék égetési minőségére hatással van az adott ország és részterület életviszonya, mely szintén a már többször említett fűtőértékre van hatással. Ezt mikro és makrogazdasági elemzéssel is alátámasztom.

A magas életszínvonal – sajnos – sokszor felelőtlen hulladékgazdálkodási magatartással jár. Angliában (Newcastle-ban), például karácsonykor a hulladék frakciók minőségi összetételében 60%-ra nő a biohulladékok aránya, elsősorban a kidobott ételmaradékok miatt. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szegényebb - elmaradottabb - régiókban az elhasznált dolgok sokkal később kerülnek a hulladékgyűjtő edényekbe. Az anyagok életciklusait tekintve más és más a különböző életszínvonalú térségekben, mely a hulladékok összetételét is befolyásolja. A lenti diagramon a különböző jövedelmekkel rendelkező családok hulladék összetételének elemzését láthatjuk (11. ábra). [19]



11. ábra. A különböző jövedelmű családok hulladék összetételének összehasonlítása

Az ábrát tekintve láthatjuk, hogy a legnagyobb részt a biológiailag lebomló hulladékok teszik ki. A magas jövedelműeknél a legalacsonyabb a biológiailag lebomló hulladékok aránya, melynek több magyarázata lehet. A háztartásokban képződő biológiai hulladékok legnagyobb része az ételmaradékokból adódik. A magas jövedelműek körében nem elterjedt a mindennapos főzés, gyakran járnak éttermekbe étkezni ezek a családok, ezért kevesebb ételmaradékkal és élelmiszerhulladékkal kell számolni. A magas jövedelemmel rendelkező családok nagy része családi házban lakik, ahol kerti lomb és zöldhulladékkal kell számolni. Viszont jellemző ezeknél a családoknál a házi komposztálás illetve, hogy hulladékudvarokban helyezik el a kertben keletkező zöldhulladékokat. Így kevesebb biológiailag lebomló hulladékot helyeznek el a hulladékgyűjtő edénybe.

A többi anyagfrakcióból viszont (az „egyéb” kategóriát leszámítva) a magas jövedelmű családok helyezik a legtöbbet a hulladékgyűjtő edényekbe. Látható, hogy a papír, fa, polimer, üveg, gumi és fém anyagfrakciókból egyre kevesebb és kevesebb százaléknyi anyag kerül a szemétkbe ahogy csökken a családok jövedelme. A szegényebb családok a maradékanyagokat megpróbálják még felhasználni, így

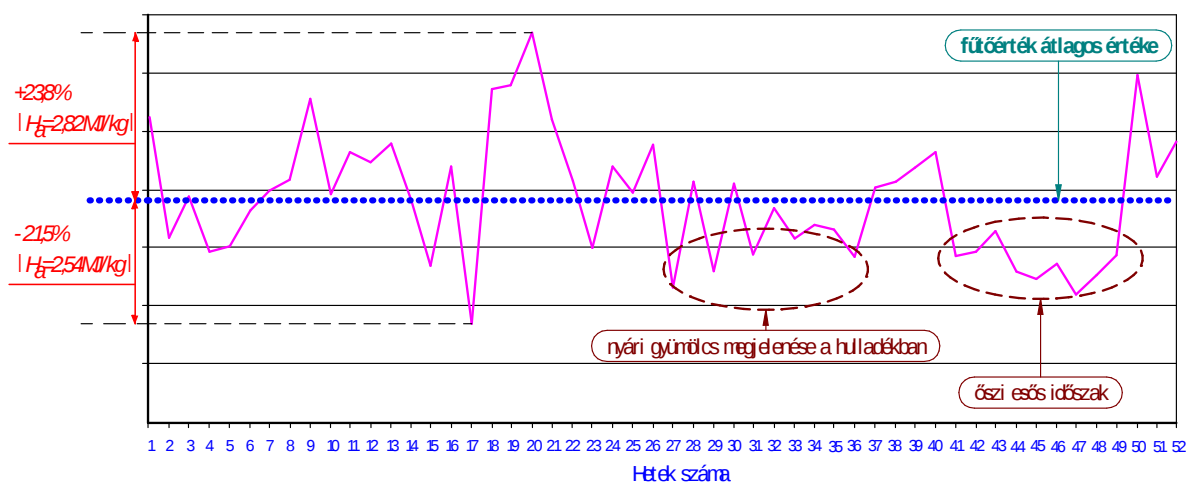
másodalapanyagként hasznosítani a háztartásokban. Így később és kevesebb mértékben kerülnek a hulladékba a maradékanyagok. Látható tehát, hogy mikro gazdasági szempontból a családok jövedelmi helyzete hogyan befolyásolja a hulladékok anyagösszetételét.

Makrogazdasági szempontból érdemes lengyelországi példákat megvizsgálni. Lengyelországban az elmúlt években számos égetőmű létesült. Az országon belül is eltéréseket tapasztalhatunk a hulladékok fűtőértékében. Azokban a városokban, ahol az ipari termelés magasabb, iparosodottabb a város, több a lakótelep ott magasabb a fűtőérték. Természetesen a lakosság száma és a termelési kultúra is befolyásolja a fűtőértéket. Többnyire elmondható, hogy minél többen laknak egy városban, annál magasabb a hulladék fűtőértéke, de ezt általánosságban nem jelenthetjük ki (3. táblázat). Megfigyelhető, hogy Poznań városa, amely inkább történelmi turista város, számos egyetemmel, hiába több mint félmillió lakosú, relatíve alacsonyabb a hulladék fűtőértéke más városokkal szemben. Konin például lakosságszámot tekintve kisebb, mint az előzőekben említett Poznań, de az ország egyik ipari központja. Itt található Lengyelország egyetlen alumínium kohója, az egyik legjelentősebb ipari központ. Ennek eredményeként sok vendégmunkás lakik a városban, magas a lakótelepen élők aránya, kevesebb a kertvárosi övezeti ingatlanok száma, így kevesebb a zöldhulladék. Vagyis a korábban leírt gondolatok értelmében megérthető, hogy Koninban relatíve miért magasabb a hulladék fűtőértéke a lakosságszámhoz képest.

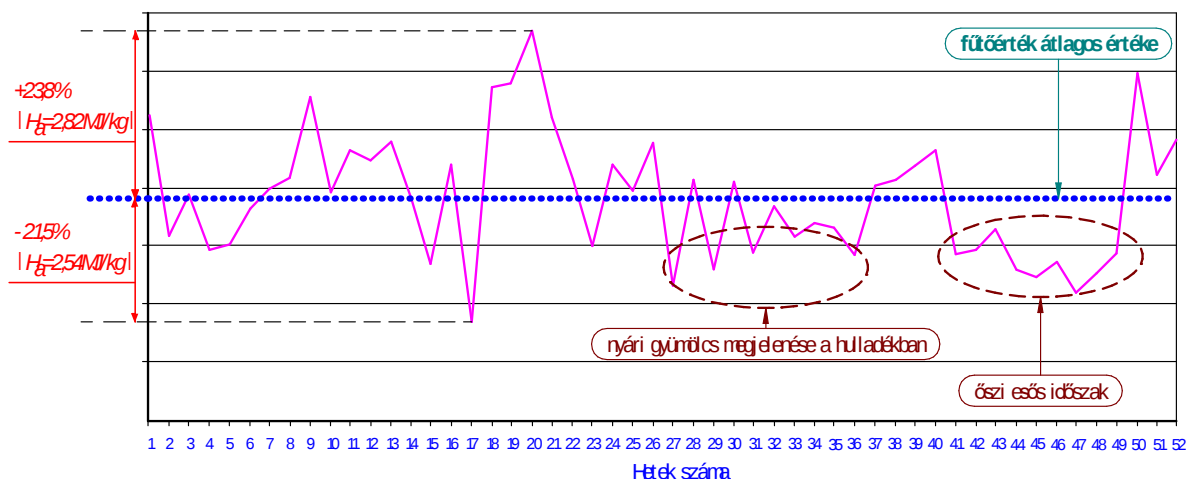
3. táblázat. Fűtőérték korreláció Lengyel példákra [26]

hulladékégető erőmű	lakosság [fő]	H _a [kJ/kg]	város szerepe a társadalmi munkamegosztásban
Krakkó	761900	8800	Lengyelország második legnagyobb városa. Közlekedési, ipari csomópont: vaskohászat, gépgyártás, elektronikai ipari tevékenység.
Bydgoszcz	358614	8500	Ipari vállalatok: vegyipar, vasúti kocsik gyártása.
Białystok	295624	7500	Kifejezetten egyetemi város. Számos történelmi emlékhellyel, turisztikai látványossággal.
Szczecin	407047	10500	Kikötő város, az ország legnagyobb hajógyára itt található. Ipari központ: halgazdaság, gyógyszeripar, söripar, élelmiszeripar, számítástechnika.
Konin	79622	8500	A lakosságához képest jelentős ipari központ: az ország egyetlen alumínium kohója itt található, folyami kikötő található a településen. A barnaszén medence legnagyobb ipari központja – 3 hőerőmű is itt található.
Poznań	544612	8400	Nyolc egyetem található itt. Kevésbé ipari város, inkább a túrizmus a meghatározó, számos látnivalóval.

A hulladék sokak szemében egy „fura anyaghalmoz”. Valóban sok tüzelőanyaghoz képest nem homogén összetételű. Számos anyagfrakció keveréke. A heterogenitásából adódóan a fűtőértéke is bizonyos határok között változik. Éppen ezért vizsgálni szükséges, hogy ez a változás milyen mértékű. Lehetővé teszi-e az egész éves égetését a hulladéknak, vagy van olyan időszak, amikor egész egyszerűen nem tüzelhető önállóan a hulladék? A feltett kérdésekre – legalábbis Európában - a válasz egyértelmű: a lakosságtól vegyesen begyűjtött települési szilárd hulladék egész évben alkalmas arra, hogy tüzelőanyagként szolgáljon. Az egész éves fűtőérték változása jól lekövethető periodikusságot mutat, melyet egy németországi (Wuppertal) égetőmű fűtőérték változásain keresztül elemzünk (



12. ábra). Jól megfigyelhető a nyári gyümölcsszezon „hatása a hulladékban”. Ebben az esetben lecsökken a hulladék fűtőértéke. Ugyanilyen nagyon jellemző az őszi esős időszak is, amikor szintén releváns fűtőérték csökkenés figyelhető meg.



12. ábra. A fűtőérték éves változása [26]

Mindezek ellenére azt is kijelenthetjük, hogy a fűtőérték eltérése az átlag értéktől mintegy plusz-mínusz 25%-on belüli (-21,5% és +23,8%). Ez a szélsőhatár érték is

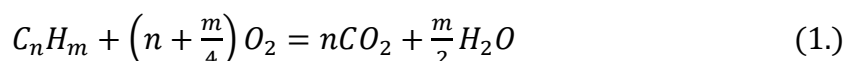
megegerősíti azt, hogy a hulladékok égetésében rejlő potenciált nem szabad elpazarolni deponálással.

Ebben a fejezetben láthattuk, hogy a hulladékok összetétele folyamatosan változik. Ezeket az ingadozásokat részint a gazdasági-társadalmi változások okozzák, részint a hulladékkezelési magatartásunk változásai, részint pedig a megváltozott anyaghasználati trendjeink generálják. Amíg az 1900-as évek elején 4000 – 5000 kJ/kg között volt a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék fűtőértéke, ma a fejlett országokban ez az érték 8000 – 10000 kJ/kg közé emelkedett. A hulladékok égethetőségét jelentősen befolyásoló paraméternek – a fűtőértéknek – a jövőben is inkább a további emelkedése várható. Ennek magyarázatául a műanyag termékek egyre terjedő térhódítása, illetve a tudatos hulladékkezelési magatartásunk is szolgálhat. Hiszen ha például – bár elsősorban ez családi házas, kertvárosi övezetre értendő – a kerti lomb és zöldhulladékokat elkülönítve gyűjtjük, és nem a hulladékgyűjtő edénybe helyezzük el, akkor csökken a hulladék biológiailag lebomló frakciója, amely egyenes arányban van a hulladék nedvességtartalmával. A csökkenő nedvességtartalom a hulladék fűtőértékének növekedését eredményezi.

Többen hozzák fel ellenérvként a hulladékégetés ellen, hogy a szelektív hulladékgyűjtés térhódításával a hulladék fűtőértéke csökkenni fog. Annak megítélésére, hogy ez mennyiben várható, vagy nem várható, a legcélszerűbb a Nyugat-Európában kialakult helyzetet figyelembe venni, ahol a szelektív hulladékgyűjtés már lényegesen előbbre tart, mint Magyarországon. A nyugat-európai országokban a vegyes, ún. maradék hulladék fűtőértéke – talán meglepő módon – az utóbbi időben, a szelektív gyűjtés ellenére inkább emelkedett, mint csökkent. Ennek oka, hogy a műanyag hányad csökkenésének a hatását a fűtőérték szempontjából ellensúlyozza, hogy – főként az étkezési kultúra változásával (több készétel, kevesebb főzés odahaza, előkészített, csomagolt zöldségek stb.) - egyidejűleg csökken a piacról származó nedvesség tartalom is a vegyes hulladékban, továbbá növekszik azon fóliás csomagolóanyag hányad, ami a szennyezettség miatt nem forgatható vissza és így bekerül a vegyes hulladékba. Ezért feltételezhető, hogy Magyarországon is a szelektív gyűjtés hatékonyságának várható és elvárt növekedése ellenére nem fog csökkenni a vegyesen gyűjtött hulladék fűtőértéke.

4.2. Energia felszabadítás

A tüzelőanyagok kötött energiáját a tüzelés folyamán alakítjuk át hővé. A tüzelőanyagok elégetésekor az éghető anyag – ami jelen esetben a települési szilárd hulladék éghető része – oxigénnel egyesül és az exoterm reakció során hő szabadul fel. Az égés folyamatát sztöchiometriai egyenletek írják le. A szén, a hidrogén és a szénhidrogének tökéletes égését leíró általános sztöchiometriai egyenlet,



A tiszta karbon (C) és a metán (CH₄) égésének sztöchiometriai egyenletei,

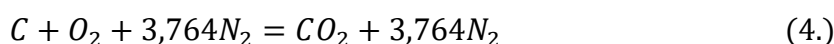


Az égetés során több olyan komponens is van, amelyek nem lépnek reakcióba a többi reagenssel. Ennek legkézenfekvőbb eleme a nitrogén. A tűz kialakulásának és fenntartásának egyik alapeleme az égést tápláló oxigén, melyet a levegőből nyerünk. Ahhoz, hogy az égetés pontos paramétereit – például az égetéshez szükséges levegőmennyiséget - ki tudjuk számítani, ismernünk kell a levegő összetételét, mely térfogatszázalékban vagy tömegszázalékban adható meg (4. táblázat).

4. táblázat. A levegő összetétele a sztöchiometriai számításokban

	térfogatszázalék	tömegszázalék
nitrogén	79 V/V% N ₂	79,8 m/m% N ₂
oxigén	21 V/V% O ₂	23,2 m/m% O ₂

A levegő jelentős mennyiségű nitrogén tartalma nem lép reakcióba az égetés során. Ennek magyarázatát a tiszta karbon égésének egyenlete adja meg. Figyelembe kell venni, hogy egy mol oxigén esetén 3,764 (79/21=3,764) mol nitrogén van jelen az égésnél,



A heterogén, több komponenst tartalmazó anyagok esetében a kémiai összetétel mellett ismerni kell, hogy a komponensek hányad részét alkotják a tüzelőanyagnak. A komponensek szerinti összetételt mol-, tömeg- vagy térfogattörtben, vagy százalékban adják meg. Szilárd halmazállapotú hulladék esetében az összetételt célszerűen tömegszázalékban érdemes megadni.

Az adott komponens tömegének és az összes komponens össztömegének a hányadosát tömegtörtnek definiáljuk,

$$w_i = \frac{m_i}{\Sigma m_{i...n}} \quad (5.)$$

ahol,

w_i – a tömegtört,

m_i – az adott komponens tömege,

$m_{i...n}$ – az összes komponens össztömege.

A tömegszázalékot a tömegtört 100-szorosa adja meg,

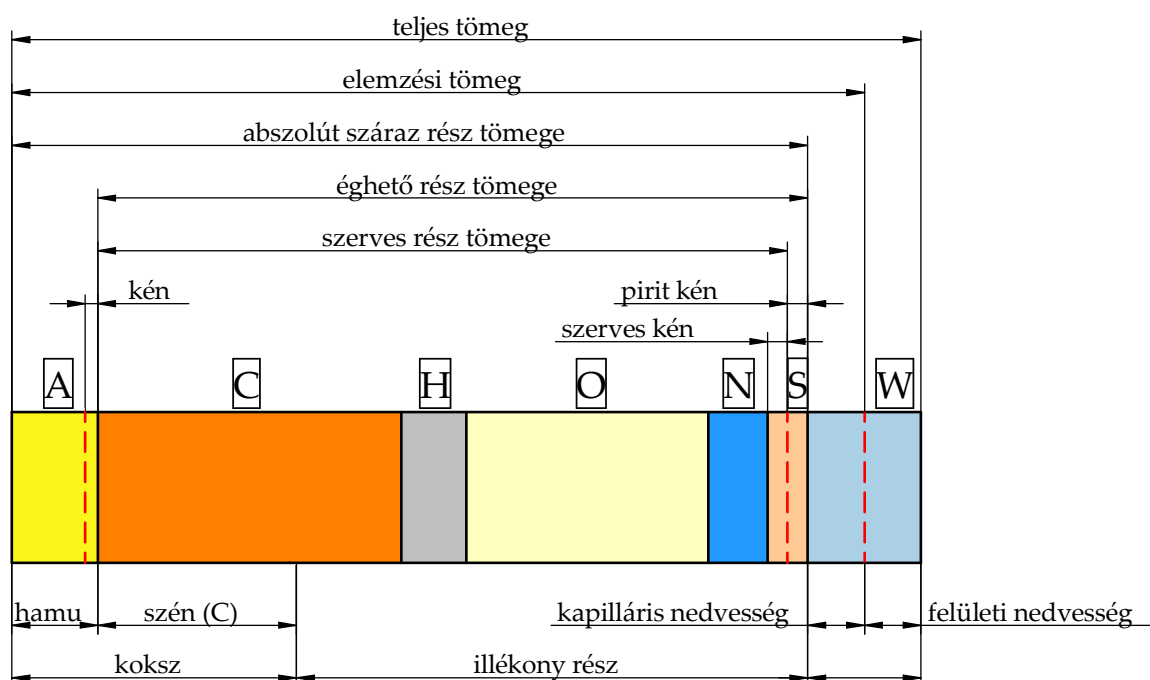
$$\frac{m}{m} \% = 100 \cdot w_i \quad (6.)$$

ahol,

$\frac{m}{m} \%$ - a tömegszázalék,

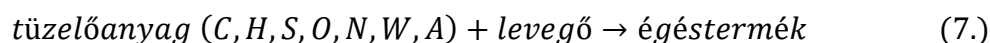
w_i – a tömegtört.

Minden tüzelőanyagnak – így a szilárd hulladéknak is - van egy elemi összetétele, mely az égés során a reakciókban részt vevő elemek összetételéről ad információt (

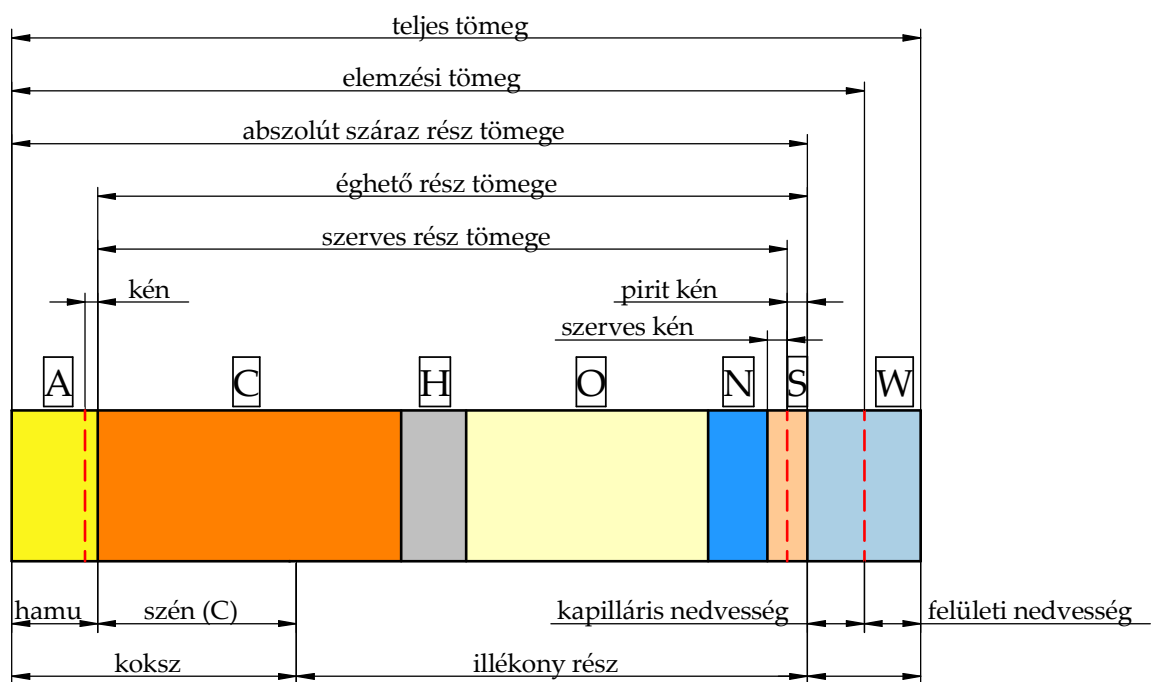


13. ábra). Mindegyik tüzelőanyag elemi összetétele, égéshője, fűtőértéke alapján minősíthető. Az elemi összetételben a következő fontos anyagok és vegyületek arányaira kapunk információt: C – szén, H – hidrogén, S – kén, O – oxigén, N – nitrogén, H_2O – víz, melyet a fenti ábrán W betűvel (az angol *wet* szóból) és a hamu, melyet „ A ” betűvel (az angol *ash* szóból) jelöltünk.

Az égési reakció tehát nem más, mint a



összefüggés szerinti reakció. Ha a tüzeléshez oxigén helyett levegőt alkalmazunk, akkor a sztöchiometriai egyenletekben egy kmol O_2 mellett megjelenik a 3,764 kmol N_2 .



13. ábra. A tüzelőanyagok elemi összetétele

A tüzelőanyagok égése akkor teljes és tökéletes, ha minden egyes tüzelőanyag-molekula reakcióba lép az oxidálószerrel és a keletkező végtermék tovább már nem oxidálható. Azonban a tüzelés során a keveredés soha nem tökéletes, ezért többlet oxigén, illetve levegő szükséges a teljes és tökéletes égéshez. Hulladéktüzeléskor a szükséges égéslevegő mennyisége 40 – 100%-kal nagyobb, mint a sztöchiometrikus égetéshez szükséges elméleti levegő mennyisége, melyet a légfelesleg tényezővel fejezünk ki,

$$\lambda = \frac{L}{L_0} \quad (8.)$$

ahol,

λ – légfelesleg tényező,

L – az égésben részt vevő levegő mennyisége [Nm^3],

L_0 – az égéshez szükséges elméleti levegő mennyisége [Nm^3].

A megválasztott légfelesleg tényező függ a tüzelés módjától is, mely a települési szilárd hulladék égetésnél leggyakrabban alkalmazott rostély tüzelésnél $\lambda=1,3 - 1,9$.

Kalorikus szempontból az elégetésre szánt hulladék halmazállapota kulcsfontosságú. A szállítás és az elégetés módját alapvetően meghatározza. Ha a széleskörű energetikai célú hulladékgazdálkodást nézem – beleértve az elgázosítási és egyéb oxigéntől elzárt technológiával történő hulladékkezelési eljárásokat – szilárd, folyékony és gáznemű tüzelőanyagok egyaránt előfordulhatnak.

A hőtechnikai számításoknál a fűtőérték és az égéshő fogalmainak pontos értelmezésére szükségünk van. Az égéshő (H_s , egyes szakirodalmakban H_f , vagy $\dot{E}$) az egységnyi tömegű, illetve gázoknál térfogategységnyi tüzelőanyag tökéletes elégetésekor felszabaduló hőmennyiség abban az esetben, ha a tüzelőanyagban lévő eredeti nedvesség és az elégetés folyamán keletkezett nedvesség az elégetés után cseppfolyós állapotban van jelen. Mértékegység J/kg, vagy J/Nm³.

A tüzeléstechnikai számítások során az eredményül kapott térfogati értékeket a műszaki gyakorlatban sok esetben normál köbméter dimenzióban adják meg. Ennek oka, hogy 1 m³ gáz kiterjedése függ a körülötte lévő légkör nyomásától. Az ipari gyakorlatban fontos bizonyos szabványokat alkalmazni, ezért határozták meg a normál köbméter mértékegységet. Kétféle normál köbméter definíció van: a levegőre és a füstgázokra megadott Nm³ 273,15 K hőmérsékleten és 101 325 Pa légköri nyomáson értendő, míg a földgáz esetében 1 gnm³ gáz mennyisége megegyezik a 288,15 K hőmérsékleten és 101 325 Pa légköri nyomáson vett 1 m³ gáz térfogatával.

A fűtőérték (H_a , esetleg szakirodalmi jelölése még a H_i vagy az F_v) a tömegegységnyi, illetve gázoknál térfogategységnyi tüzelőanyag tökéletes elégetésekor felszabaduló hőmennyiség abban az esetben, ha a tüzelőanyagban lévő eredeti nedvesség és az elégetés folyamán keletkezett nedvesség az elégetés után gőz halmazállapotban marad. Dimenziója J/kg, vagy J/Nm³, illetve J/gnm³.

Könnyen belátható, hogy az égéshő és a fűtőérték között a különbséget az eredeti nedvesség és az égéstermékéből származó nedvesség párolgáshője adja. (Ennek részletes elemzése a későbbiekben olvasható lesz.)

Hazánkban és az Európai Unió legtöbb országában a fűtőértékkel számolnak leginkább, míg az angolszász országokban és az azok technikai bázisán dolgozó országokban az égéshő mennyiségét alkalmazzák a szakmai számításoknál.

Az eltüzelendő hulladék égéshője és fűtőértéke elvileg kiszámítható a kémiai analízis alapján, amikor is az elemi analízissel megállapított egyes összetevők fűtőértékét az összetevőknek a hulladékban lévő százalékos arányának megfelelően összegezzük.

Az égéshő kiszámítása az elemi analízissel meghatározott alkotórészek alapján,

$$H_s = 33822 \cdot C + 142180 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 9251 \cdot S \quad (9.)$$

ahol,

H_s – égéshő [J/kg_{tűa.}]¹⁰,

C – összes szerves szén,

H – hidrogén tartalom,

O – oxigén tartalom,

S –kéntartalom.

A korábban példaként bemutatott Tanner-diagram adatait felhasználva konkrét számértékeket behelyettesítve kiszámíthatjuk az eltüzelendő hulladék égéshőjét. A Tanner-diagramon az éghető rész tartalma 48% volt, melyet az összes szerves szén, a hidrogén, az oxigén és a kéntartalom összege tesz ki (10. ábra).

A példában a hulladék nedvességére $n=27,5\%$ volt megadva, a hamutartalomra pedig $21,5\%$. A számításhoz felhasznált adatokat az alábbi táblázat tartalmazza (

¹⁰ Fajlagos érték, egységnyi tömegű tüzelőanyagra vonatkoztatva.

5. táblázat).

5. táblázat. Az elemi analízis adatai - példa

C – tartalom [%]	H – tartalom [%]	O – tartalom [%]	S – tartalom [%]	hamu-tartalom	nedvesség-tartalom
32,7	3,6	8,8	2,9	21,5	27,5
Éghető tartalom = =C+H+O+S=32,7%+3,6%+8,8%+2,9%=48%					

A fenti táblázatban közölt - elemi analízissel történt vizsgálat során kapott eredményeket felhasználva - adatokat behelyettesítve, megkaphatjuk a hulladék elméleti éghéshőjét,

$$H_S = 33822 \cdot C + 142180 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 9251 \cdot S =$$

$$= 33822 \cdot 0,327 + 142180 \cdot \left(0,036 - \frac{0,088}{8}\right) + 9251 \cdot 0,029 = 14882,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (10.)$$

Az éghéshő számítási egyenleteinél, a különböző szakirodalmakban eltérő konstansokat olvashatunk az elemi összetevők szorzatainál. Ennek az az oka, hogy más mértékegységben adják meg a végeredményt. Erre egy jó példa a korábban használt kcal mértékegységre történő számítás. Magyar nyelven még számos régebbi szakirodalom található, amelyekben az égéstechnikai számításoknál a végeredményt *kcal-ban* adják meg. Véleményem szerint ezek a korábbi szakirodalmak az égetés alapvető összefüggéseit a mai napig jól alkalmazhatóan írják le, használatuk nem idejét múlt. Azonban a mértékegység átváltásokra figyelemmel kell lenni. Az éghéshő kiszámítási módja, ha a végeredményt kcal-ban kapjuk,

$$H_S = 81 \cdot C + 340 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 25 \cdot S \quad (11.)$$

ahol,

H_S – éghéshő [kcal/kg_{tűa.}],

C, H, O, S – rendre: szén, hidrogén, oxigén és kén tartalom a hulladékban (tüzelőanyagban).

A fűtőérték kiszámításakor az éghéshőből le kell vonni az égés során képződött és a tüzelőanyag nedvességtartalmából származó víz elpárologtatásához szükséges hőmennyiséget, vagyis a víz párolgáshőjét ($r_{H_2O}=2257 \text{ kJ/kg}$). Mivel 1 gramm hidrogén elégeésekor 9 gramm vizet kapunk, a tüzelőanyag hidrogéntartalmát 9-cel megszorozva megkapjuk azt a vízmennyiséget, amely a hidrogén elégeésekor keletkezik,

$$H_a = H_s - (9 \cdot H + n) \cdot r_{H_2O} \quad (12.)$$

ahol,

H_a – fűtőérték [kJ/kg_{tűa}],

H_s – égéshő [kJ/kg_{tűa}],

H – hidrogén tartalom,

n – nedvességtartalom,

r_{H_2O} – víz párolgáshője $r_{H_2O}=2257$ kJ/kg.

A korábban a Tanner-diagramban megadott adatokat felhasználva a (10.) egyenletben kapott értékekből kiszámíthatjuk az eltüzelendő hulladék elméleti fűtőértékét,

$$\begin{aligned} H_a &= H_s - (9 \cdot H + n) \cdot r_{H_2O} = \\ &= 14882,573 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{tűa}}} - (9 \cdot 0,036 + 0,275) \cdot 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 13530,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{tűa}}} \end{aligned} \quad (13.)$$

Tehát az elemzett hulladék minden egyes eltüzelt kilogrammja során 13530,6 kJ energia szabadul fel. Azonban láthatjuk, hogy a Tanner-diagramon grafikus módon kapott fűtőérték lényegesen kisebb ($H_a=9700$ kJ/kg), viszont a diagramon leolvasott érték az erőművi gyakorlatot sokkal jobban közelíti. Úgy is mondhatjuk, hogy a diagramon leolvasott érték a pontosabb. A számítással kapott fűtőérték nem pontos, mert a kémiai elemzés a szén éghető részeinek alkotóit meghatározza ugyan, de nem ad arra felvilágosítást, hogy azok milyen kémiai kötések formájában vannak jelen. Emiatt az elemi összetételből számítható fűtőérték és égéshő csak rosszul közelíti meg a méréssel (kalorimetrálással) meghatározott, egyedüli megbízható értéket, mert nem veszi figyelembe a különböző kötések bomlási és képződési hőjét. Ezen túlmenően a hulladékok elemi összetétele nem tud reprezentatív átlagot megadni.

Az eddigieket összefoglalva kijelenthető, hogy a hulladék tüzelőanyag égethetőségi tulajdonságait a nedvesség- és hamutartalom alapvetően befolyásolja – természetesen az éghető tartalommal együtt. Bizonyos eljárástechnikai alkalmazásokkal a hulladék nemesíthető, vagyis energetikai minősége javítható. Például szitálással bizonyos szemcseméretű frakciók leválaszthatóak – tipikusan a biológiailag lebomló frakciók – és így a nedvessége csökken az eltüzelendő hulladéktestnek (lásd 31. oldal).

A hulladék elemi analízisének készítésekor az egyes alkotók mennyiségét tömegszázalékban szokták megadni, általában a vizsgálati állapotban lévő hulladékra. Szükséges lehet annak vizsgálata, hogy más állapotú – például szárazabb, kisebb nedvességtartalmú – hulladékra vonatkoztatva, milyen összetétellel számolhatunk. Kiszámítható például, hogy nedvességmentes hulladék esetén mekkora lehet a maximális fűtőértéke a vizsgált hulladéknak. Energetikai szempontból ez az eljárás a Carnot-körfolyamathoz való viszonyításhoz hasonló. A Carnot-körfolyamat megadja az adott körfolyamatban elérhető maximális hatásfokot. Tehát valamely hulladékállapotra megadott analízis birtokában az egyes alkotók más állapotú hulladékra vonatkozó százalékos mennyisége a megfelelő tényezőkkel való szorzás útján a lineáris összefüggések folytán mindenkor átszámítható.

Az átszámítási tényezőt a három leggyakoribb esetre írjuk fel. Az első esetben egy megadott n_1 nedvességtartalmú hulladékra számíthatjuk ki, amely nedvességtartalom eltérő az elemzett nedvességtartalomtól. Ebben az esetben az átszámítási tényező,

$$k = \frac{100-n_1}{100-n} \quad (14.)$$

A második esetben száraz, vagyis nedvességmentes hulladékra számítjuk ki a p tényezőt,

$$p = \frac{100}{100-n} \quad (15.)$$

A harmadik esetben pedig egy idealizált állapotú, hamu és nedvességmentes hulladékra, vagyis csak az égethetőre számolt frakcióra számoljuk ki a z tényezőt,

$$z = \frac{100}{100-(n+h)} \quad (16.)$$

A fenti képletekben a betűk jelentése,

n_1 – adott nedvességtartalmú hulladék [%],

n – az elemzési adatokra vonatkozó ismert nedvességtartalom [%],

h – az elemzési adatokra vonatkozó ismert hamutartalom [%].

Mind az égéshő, mind a fűtőérték átszámítható különböző állapotú hulladékokra. Az átszámítások alapja az, hogy az eltüzelandó hulladék égéshőjét a hamu és nedvességmentes rész határozza meg. Ennek megfelelően a fűtőérték átszámításával meg tudjuk határozni a nedvességmentes és hamumentes hulladék fűtőértékét. Ezen átszámításokat a k , p és z tényezőkkel tehetjük meg, az alábbi egyenletek segítségével:

n_1 nedvességtartalomra történő átszámításnál,

$$H_{a1} = k(H_a + r_{H_2O} \cdot n) - r_{H_2O} \cdot n_1 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (17.)$$

nedvességmentes, száraz hulladék tüzelőanyagra,

$$H_{a,sz} = p(H_a + r_{H_2O} \cdot n_1) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (18.)$$

hamu és nedvességmentes hulladék tüzelőanyagra,

$$H_{a,0} = z(H_a + r_{H_2O} \cdot n) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (19.)$$

amely egyenletekben,

H_a – az $n\%$ nedvességtartalomra vonatkozó fűtőérték [kJ/kg],

H_{a1} – az $n_1\%$ nedvességtartalomra vonatkozó fűtőérték [kJ/kg],

$H_{a,sz}$ – a nulla % nedvességtartalomra vonatkozó fűtőérték [kJ/kg],

k , p , és z a (14.), (15.) és (16.) egyenletek alapján kiszámítható átszámítási tényezők.

Korábban a Tanner-diagramban közölt értékek, és a grafikus úton meghatározott fűtőérték alapján kiszámolhatjuk, hogy esetlegesen olyan hulladékkezelési eljárásokkal, melyek a hulladék minőségét javítják, milyen maximális – ideális – fűtőérték érhető el a hulladék tüzelőanyagoknál.

A további számítás elvégzéséhez a fűtőérték adatát a kalorimetrálással, vagyis méréssel meghatározott, vagy a Tanner-diagram segítségével grafikus úton meghatározott módból érdemes venni. Ekkor kapunk reális, a gyakorlati mérnöki tevékenység során használható adatot. Az elemi analízisből meghatározott fűtőérték nem ad pontos értéket a hulladéktüzelésnél, a tüzelőanyag rendkívül változatos, heterogén jellege miatt, és mert a kémiai kötések jellegét nem veszi figyelembe az elemi analízis.

Mindezek alapján a további számításainkhoz a lenti táblázatban összefoglalt adatokat használjuk, a Tanner-diagramban is alkalmazott és meghatározott paraméterekkel összefüggésben (6. táblázat).

6. táblázat. A fűtőérték átszámításához használt alapadatok

n – nedvesség tartalom [%]	n ₁ – nedvességtartalmú hulladék [%] ¹¹	h – hamu- tartalom [%]	H _a – fűtőérték [kJ/kg]	r _{H₂O} – a víz párolgáshője [kJ/kg]
27,5	10	21,5	9700	2257

Első lépésben meg kell határozni a k, p, és z átszámítási tényezőket a korábban közölt (14.), (15.) és a (16.) egyenletek alapján,

$$k = \frac{100-n_1}{100-n} = \frac{100-10\%}{100-27,5\%} = 1,241 \quad (20.)$$

$$p = \frac{100}{100-n} = \frac{100}{100-27,5\%} = 1,379 \quad (21.)$$

$$z = \frac{100}{100-(n+h)} = \frac{100}{100-(27,5\%+21,5\%)} = 1,96 \quad (22.)$$

Megkaptuk az átszámítási tényezőket, így a második lépésben átszámíthatjuk az n₁ nedvességtartalmú hulladékra a fűtőértéket. 10%-ra választottuk az átszámítási nedvességtartalmat, mert a korábban ismertetett Tanner-diagramon is ez az érték került bemutatásra.

$$\begin{aligned} H_{a1} &= k(H_a + r_{H_2O} \cdot n) - r_{H_2O} \cdot n_1 = \\ &= 1,241 \cdot \left(9700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,275 \right) - 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,1 = 12582,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (23.)$$

Megkaptuk tehát, hogy ha az előkezelési eljárásokkal a hulladék nedvességtartalmát csökkentenénk n₁=10%-ra, akkor az eredeti H_a=9700 kJ/kg fűtőértéket H_a=12582,2 kJ/kg-ra tudnánk növelni. Ez a potenciális lehetőség ad energetikai alapot arra, hogy sok esetben másodtüzelőanyagot (RDF, vagy SRF anyagot) égetnek hulladékhasznosító erőművekben. Hiszen látható, hogy kalorikus szempontból nagyon meghatározó fűtőérték paraméter több, mint 30%-kal megemelkedett. Azonban nem lehet kijelenteni egyértelműen, hogy a másodtüzelőanyag égetése egyértelmű megoldás a jövő hulladékgégetésében. Hiszen a rendszerszemléletet itt is alkalmazni kell. Számos egyéb szempontot (így például az előkezelés költségeit) is figyelembe kell venni annak a kérdésnek a megválaszolásában, hogy „mit égezzünk”?

¹¹ n₁ nedvességtartalmú hulladékra kívánjuk meghatározni a fűtőértéket.

Meghatározhatjuk azt is, hogy teljesen száraz, nedvességmentes hulladékra mekkora lesz az elméleti fűtőérték.

$$H_{a,sz} = p(H_a + r_{H_2O} \cdot n_1) = 1,379 \cdot \left(9700 \frac{kJ}{kg} + 2257 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,1 \right) = 13687,5 \frac{kJ}{kg} \quad (24.)$$

Az elméletileg – maximálisan – elérhető fűtőérték mértékét is meghatározhatjuk. Amennyiben az eredetileg elemzett hulladék fűtőértékét hamu és nedvességmentes hulladékra számítjuk át akkor a

$$H_{a,0} = z(H_a + r_{H_2O} \cdot n) = 1,96 \cdot \left(9700 \frac{kJ}{kg} + 2257 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,275 \right) = 20228,5 \frac{kJ}{kg} \quad (25.)$$

fűtőértéket kapjuk.

Összefoglalva megállapíthatjuk tehát, hogy az eltüzelendő hulladék fűtőértékét ki tudjuk számítani. Meg tudjuk határozni, hogy különböző nedvességtartalmú hulladék esetén milyen fűtőérték korrelációra lehet számítani, illetve, hogy száraz és teljesen ideális (száraz és hamumentes) hulladék esetén hogyan változik a hulladék fűtőértéke (7. táblázat). [22]

7. táblázat. A fűtőérték átszámítási eredmények

H_a [kJ/kg]	H_{a1} [kJ/kg]	$H_{a,sz}$ [kJ/kg]	$H_{a,0}$ [kJ/kg]
9700	12582,2	13687,5	20228,5

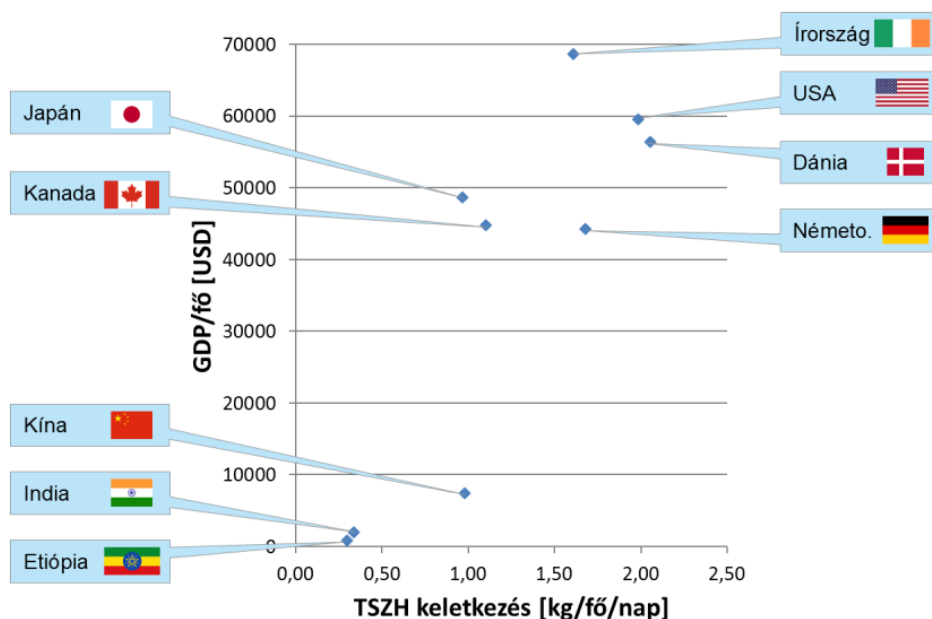
Megjegyzendő, hogy a hulladékégető műveket, illetve kazánokat fővállalkozásban építő cégek nem elsősorban az elemi analízist veszik alapul. Ennek oka, hogy nagyon nehéz az elemzés alapját képező reprezentatív minta megválasztása, ezért a hulladék évszakonkénti mintavétellel meghatározott nedvesség- és hamutartalma alapján, valamint az éghető rész frakcióinak (papír, műanyag, fa, textil stb.) a százalékos arányából és az egyes frakciók ismert fűtőértékéből, illetve a saját több évtizedes tapasztalataikból kiindulva igyekeznek meghatározni az adott projektben szóba jöhető vegyesen gyűjtött települési hulladék fűtőérték tartományát.

4.3. Az égetés technológiai folyamata

4.3.1. A begyűjtött hulladékról

Hulladékégetéssel foglalkozó szakemberként tartom magam egy szállóigévé vált mondásomhoz: *„Embert barátjáról, nemzetet hulladékáról”*. E kijelentésem arra vonatkozik, hogy minden ország lakosságának a hulladékkezelési magatartása alapvetően meghatározza az egész ország hulladékgazdálkodását. Továbbá az egyes országok gazdasági helyzete pedig definiálja a keletkező hulladék mennyiségét és minőségét is. A hulladékégetés szempontjából ez azért fontos, mert a tüzelőanyag (hulladék) folyamatos rendelkezésre állása – mennyiségi és minőségi szempontból is – alapvető bemenő paramétere az égetőműveknek.

Hulladékgazdálkodási aspektusból a fenntartható fejlődéssel kapcsolatban meg kell különböztetnünk az egész Földre vonatkoztatható általános megállapításokat, és a mi régiókra - illetve a mi hazánkra - vonatkozó szempontokat. Amíg például a fejlődő országoknál elsősorban a mennyiségi kérdések jelentik az alapproblémát, a fejletteknél viszont a minőségi kérdések állnak a fejlődés középpontjában. A fejlődő és a fejlett országok hulladékgazdálkodással kapcsolatos különbségeit az egy főre vetített, fajlagosan keletkező települési szilárd hulladék mennyiségének és az egy főre jutó GDP összehasonlításából láthatjuk (14. ábra). Ha a GDP-t abszolút értékben nézzük, akkor USA, Kína, Japán áll a képzeletbeli dobogó első három helyén. Azonban más képet kapunk, ha a GDP-t fajlagosan nézzük, vagyis levetítjük egy főre. (Ezt a paramétert láthatjuk a 14. ábra függőleges tengelyén.) Amennyiben ezt összevetjük az adott ország egy főre jutó települési szilárd hulladék keletkezésével - vízszintes tengely -, akkor a világ országait besorolhatjuk a fejlett és a fejlődő országok halmazába (Kína – mint sok másban is – kivételt jelent).



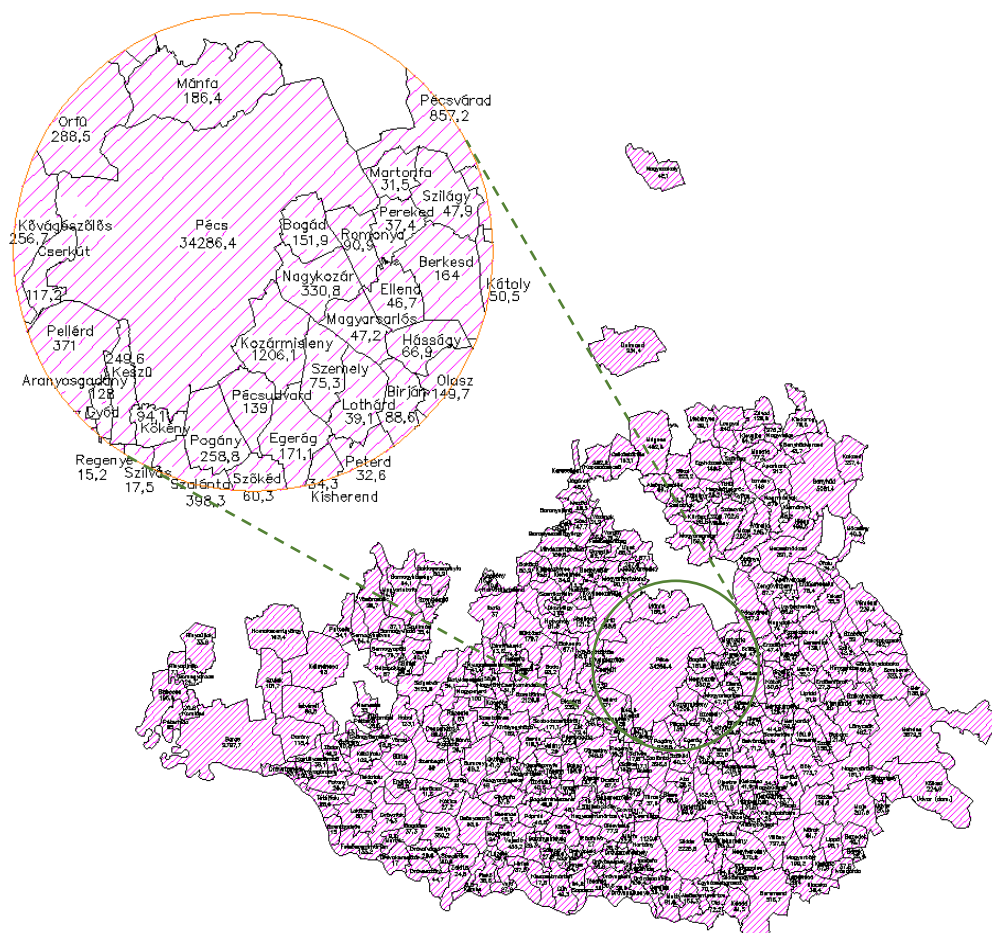
14. ábra. Egy főre jutó GDP és a keletkező települési szilárd hulladék kapcsolata [28]

A fejlődő országokban az egy főre jutó keletkező hulladék mennyisége jelentősen alacsonyabb, mint a nyugati társadalmakban. Azonban a hulladék kezelésének - ezekben a társadalmakban - elsősorban mégis a mennyiségi kérdéseit kell megoldani. Sajnálatos tapasztalat, hogy vagy egyáltalán nincs, vagy nem elégséges a hulladékfeldolgozási technológia. A hulladéklerakók nem megfelelő szigetelése miatt a környezetet komoly terhelés, sok esetben szennyezés éri. Ezen országokban a hulladékégető erőművek létesítései megoldást jelenthetnek a hulladékkezelés hiányosságából adódó problémákra. Az égetés során szinte tökéletes a higienizáció, és a hulladékmennyiség - mind térfogati, mind tömeg szempontjából - megfelelő csökkenésével lehet számolni.

A hulladékégetőmű tervezéséhez számos megalapozó információra van szükségünk. A begyűjtési terület alapvető vizsgálatra, elemzésre szorul. Pontos információkra van szükségünk a begyűjtési területről. Annak nagysága, elhelyezkedése, úthálózati minősége, geometriai kialakítása mind meghatározó egy hulladékégető erőmű tervezése során. Fontos például a begyűjtési terület geometriai kialakítása. Ha például - bár ez nagyon ritka -, de a terület alakja hosszú és keskeny, akkor hiába helyezzük el az égetőművet a geometriai középpontba, a szélső területekről történő hulladékbeszállítás költséges lesz. Ezen aspektusból a kör alakú beszállítási terület a preferált.

Az ideálshoz közelítő geometriájú területre láthatunk példát egy esetleges pécsi hulladékégető létesítéséhez (15. ábra). A baranyai megyeszékhelyen és környékén a begyűjtési terület földrajzi elhelyezkedéséből adódóan kör formájú. Ráadásul további

előnyként jelentkezik, hogy amennyiben a hulladékégetőmű telephelye is Pécssett kerülne elhelyezésre, akkor a hulladékgyűjtést végző közszolgáltató hulladékgyűjtő járműveinek is a lehető legkevesebbet kellene rakottan menniük. A gyűjtést követően az égetőműben történő ürítéshez nem kellene nagy távolságot megtennie a járműveknek.



15. ábra. Ideális geometriájú hulladék begyűjtési terület

(a számok a begyűjtött hulladék tömeg jelentik az adott körzetben ezer tonnában) [26]

Pécssett évente hozzávetőleg 85.000 tonna hulladékot gyűjtenek vegyesen a lakosságtól. Ennek mintegy 40%-a – valamivel több, mint 34.000 tonna - Pécs városából kerül begyűjtésre. (Természetesen ez logikus, hiszen a sűrűn lakott városi környezetben keletkezik a legtöbb hulladék.) Vagyis, ha az égetőmű is Pécssett kerülne elhelyezésre a gyűjtési területen a szállító járatok összes futása csökkenthető lehetne. Gondoljunk csak bele, ha a begyűjtési terület szélén lenne elhelyezve az égetőmű. Ebben az esetben a szállító járművek rakott járműfutása és az ürítés utáni – üres - járműfutása is megnőne, ami több szempontból kedvezőtlen.

A begyűjtött hulladék mennyiségének alakulását döntően befolyásolja a kiszolgált terület lakosságának a változása. Talán a tervezés egyik legnehezebben becsülhető

adata a lakosságszám változása, de ezt még is meg kell tennünk minimálisan 15 évre előre. Ezt nagyon szemléletes gyakorlati példákkal tudom bemutatni a melléklet 9.1.-es számú fejezetében.

Az égetőművek beruházása szempontjából fontos kérdés a begyűjtési terület terep- és éghajlati jellemzői. A begyűjtés módszere – többek között – a hulladék nedvességre is komoly hatással van és így a fűtőértéket is befolyásolja.

Mint minden energetikai beruházásnál – így a hulladékégetőműveknél is – rendszerszemléletű gondolkodásra van szükség. Amennyiben egy nagyváros hulladékát égetőművekben kezeljük, akkor a fejlett országok tekintetében a begyűjtés és a hulladék szállítása kizárólag aszfaltozott úton történik. Ebben az esetben alkalmazhatóak az alacsonypadlós hulladékgyűjtő járművek (16. ábra).



16. ábra. Alacsonypadlós hulladékgyűjtő járművek [59] [48]

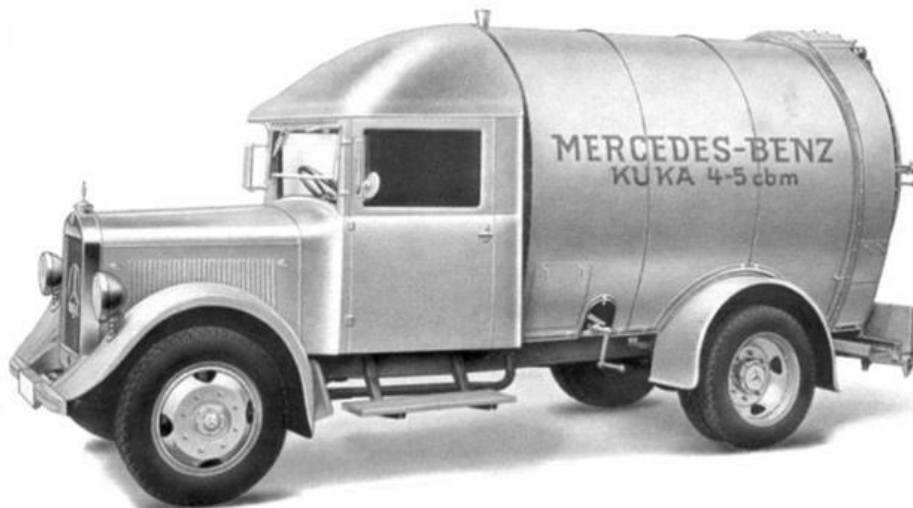
Ezen típusú hulladékgyűjtő teherautók nagyvárosokban kifejezetten előnyökkel bírnak: alacsonyabban ül a sofőr, kevesebb a baleseti szituáció, a szűk utcákban könnyebben tud manőverezni a vezető, a rakodó munkásoknak sem kell olyan magasra lépniük, ez által komfortosabbak a munkavégzési körülményeik. Azokon a helyeken, ahol égetőművekbe történik az ürítés, ott ezek nagyon ideálisan használhatóak.

* * *

Érdekesség a kukás autókról

A magyar kuka szó meglepő módon egy német vállalat nevéből eredeztethető. Johann Josef Keller és Jakob Knappich 1898-ban alapítottak egy világítási acetiléngyárat, a Keller und Knappich GmbH-t, melyet az 1920-as évektől leginkább Keller und Knappich Augsburg néven emlegettek. Ennek rövidítése a KUKA. Ez a német vállalat 1927-ben szabadalmaztatott egy olyan szemétszállító autót, mely nem egyszerűen csak szállította, hanem egyben fel is aprította a belehelyezett hulladékot. A jármű később olyan sikeres lett, hogy Európa-szerte rengeteg állt belőle üzembe, 1966-ra pedig a KUKA piacvezető lett a kommunális járművek szektorában.

Mivel ezeknek a szemeteskocsoknak az oldalán akkoriban nagy betűkkel fel volt tüntetve, hogy "KUKA", a köznyelv gyorsan KUKA-s autóknak, vagyis kukásautóknak kezdte nevezni őket. A márkanévből tehát köznév lett, és ezzel párhuzamosan az egyszerű szeméttároló edényeket is elkezdték kukaként emlegetni.



17. ábra. A KUKA-s autó [50]

A KUKA mind a mai napig egy remekül prosperáló cég, mely évtizedek óta meghatározó szereplője a robotizálási és automatizálási iparnak.

* * *

Az égetésre kerülő hulladékról elmondható, hogy mennyiségi és minőségi tulajdonságok befolyásolják az alapvető paramétereket.

A mennyiségi paraméterek:

1. A hulladék abszolút mennyisége [t/nap; t/év], (nehéz mondani ökölszámot, hogy mennyi az a minimális hulladék mennyiség, aminél már megéri égetőművet létesíteni, inkább tapasztalati számok vannak erre, kb. 100.000 t/év, az a mennyiség, aminél már releváns lehet a beruházás).
2. Éves ingadozása. A begyűjtött hulladék havi mennyisége közel állandó – a karácsonyi időszakot leszámítva. Ekkor lényegesen több hulladék kerül begyűjtésre és ilyenkor az összetétele is jelentősen változik: több a biohulladék, sokkal magasabb a csomagoló anyag frakciójának az aránya. Egyébként a hulladékégető mű mindenkor kapacitásához jól tudnak alkalmazkodni a begyűjtési járatok, ha az égetőmű mellett van még lerakási lehetőség is.
3. Várható változása – erről részletesen írtam korábban.

A minőségi paraméterek:

4. a hulladék összetétele,

5. fizikai és kémiai jellemzői. Ezeket a paramétereket is részletesen bemutattam korábban.

Amennyiben a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék (TSZH) mellett az égetőmű lom hulladékot is kíván égetni, úgy a lomot előzetesen aprítani kell és külön bunkerben célszerű tárolni. A lomok emelik az égetésre kerülő hulladék fűtőértékét. A legtöbb égetőműbe a lakossági és intézményi hulladék mellett kereskedelmi és ipari hulladék is beszállításra kerül. Ezen hulladékok – a beszállítás arányában - szintén emelik az átlagos fűtőértéket.

4.3.2. A hulladékégetés előnyei és hátrányai

Minden műszaki folyamatnak, így az égetésnek is vannak előnyei és hátrányai. Magyarországon esetében a hulladékok nagyobbik része rendezett lerakással van kezelve, azaz végleges lerakóban történik az ártalmatlanításuk. Természetesen ezek a lerakók is a megfelelő előkészítés, tervezés után létesülnek, azaz megfelelő szigeteléssel vannak ellátva. Így a talajba csurgalékvíz és egyéb szennyező anyagok migrációja nem történhet meg. A korszerű hulladéklerakók megfelelő jogszabályi előírások alapján létesülnek.

Azonban nemzetközi és hazai törekvések, jogszabályi előírások irányulnak arra, hogy a lerakott hulladékok mennyiségét csökkentsük. A lerakás alternatívája a hulladékégetés. Hiszen eltéríthető a hulladék anyagáram a lerakóktól, amennyiben az égetőművekben kezeljük, sőt termo-fizikai folyamat során energiát nyerhetünk, melyet döntően gőz bázison hasznosíthatunk.

Az égetéssel a hulladékok jelentős térfogat- és tömegcsökkenése érhető el. Az természetesen nem igaz, hogy nem marad vissza semmilyen maradékanyag (18. ábra).



18. ábra. A hulladékégetés anyagmérlege száraz és félszáraz füstgáztisztítás mellett

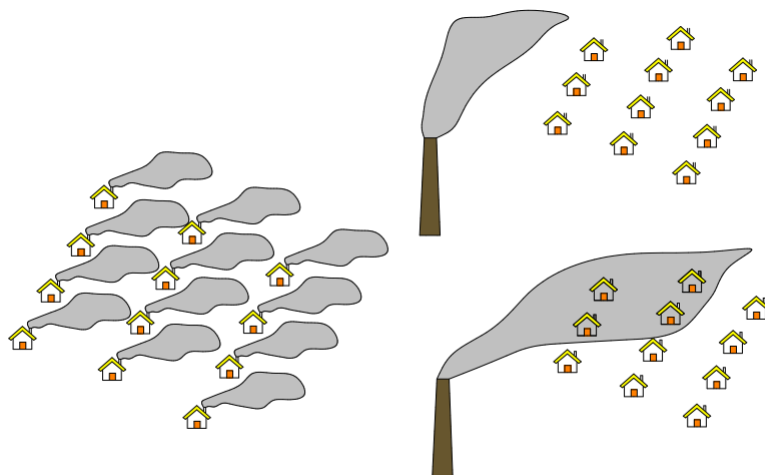
Elmondható, hogy a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék rostélytüzelése során az eredetileg beadagolt hulladék tömegének mintegy 20-25%-a marad vissza. Ez a mennyiség csökkenthető az égetési technológia megválasztásával, melyről a 6.3. fejezetben olvashatunk.

A hulladékégetés további előnyeként kell értékeljük, hogy magas fokú higiénizáció érhető el, vagyis a hulladéktest környezetkárosító hatása megszüntethető. Mivel az égetőművekben a szelektíven gyűjtött hulladékfrakció soha nem kerül feldolgozásra, így elmondható, hogy a hulladékégetés nem csökkenti a szelektíven gyűjtött hulladékok arányát.

Természetesen szükséges szembe nézzünk a hulladékégetés hátrányaival is, hiszen egy-egy technológia megfelelő megválasztásához, ismernünk kell az egyes műszaki megoldások tulajdonságait ahhoz, hogy felelős döntést tudjunk meghozni. A hulladékégetőművek egyik hátránya, hogy magas létesítési és üzemeltetési költségekkel kell számoljunk. Az égetés technológiai tulajdonságából adódóan van káros füstgáz és maradékanyag - hamu, salak - kibocsátás. Azonban azt ki kell jelentsük, hogy a hulladékégető erőművek - több más égetési technológián működő hőerőműhöz hasonlóan - nem szennyezik a környezetet, azaz nincs határértéken túlmutató füstgáz emissziójuk. Különbséget kell tegyünk a szennyezés és a terhelés definíciója között. Szennyező tevékenységről akkor beszélünk, ha egy bizonyos termékből – jelen esetben például valamely környezetkárosító anyagból, például nitrogén-oxidból – egy jogszabályban előírt koncentrációnál magasabb koncentrációjú füstgázt bocsátunk ki. Amennyiben a kibocsátott füstgáz egyes alkotóinak a koncentrációja egy adott határértéken belül van, terhelésről – és nem szennyezésről – beszélünk.

Népszerű napjainkban a decentralizált hőenergia termelés lehetőségeiről és előnyeiről olvasni, hallani a különböző médiumokban. Egy rövid elemzést végezzünk el a központi és a decentralizált kibocsátások összehasonlítása végett.

A centrális erőművi kibocsátás környezetvédelmi szempontból nagyon előnyös megoldás (19. ábra).



19. ábra. A központi és egyedi kibocsátás összevetése [30]

Az erőműveket – beleértve a hulladékégető erőműveket - megfelelő füstgáztisztító technológiával lehet ellátni, illetve a központi kéményen keresztüli kibocsátást is mérni, monitorozni lehet. Ezáltal a jogszabályokban rögzített kibocsátási határértékeket könnyen be lehet tartani, azaz a levegő terheléséről, nem pedig a szennyezéséről beszélhetünk.

További előnyként jelentkezik, hogy a fűtőerőművekben ellenőrzött fűtőanyagok kerülnek felhasználásra. Ezzel szemben a decentralális energiatermelőknél – mely napjainkban, elsősorban a lakosság körében igen elterjedt és népszerű megoldás – nem ellenőrizhető, hogy milyen fűtő- vagy tüzelőanyagot alkalmaznak a háztartásokban. A nem megfelelően kiszárított tüzelőanyag – tűzifa -, a háztartásokban keletkező hulladék (el)tüzelése során tüzeléstechnikailag idegen anyagokat juttatunk be a tűztérbe és a káros anyagok kibocsátása megnő. További hátrány, hogy a házak kéményein kilépő füstgáz nem tisztított füstgáz és a kibocsátás sincs monitorozva a legtöbb esetben.

Az erőművek létesítésének fontos szempontja a megfelelő telephely kiválasztása, azon belül a kémény lokalizációja. A kémények helyét úgy tervezik a szakemberek, hogy az uralkodó széljárást figyelembe veszik. Így a leggyakoribb széljárás során a kéményeken kilépő füstgáz nem terheli a lakott területeket. Ellentétben a decentralális

kibocsátók, vagyis a lakossági kémények mindenféle széljárás során – legyen szó az uralkodó széljárásról, vagy attól ellentétes irányú szélről – terhelik a szomszédos ingatlanokat. [30]

További hátrányként jelentkezik, hogy a hulladékégetők társadalmi elfogadottsága negatív jelleget mutat, érezhető egy harsány „égetőellenesség”.

A hulladékégetés tulajdonságainak összefoglaló táblázatát lentebb láthatjuk (8. táblázat).

8. táblázat. A hulladékégetés előnyei és hátrányai

	előnyök	hátrányok
„Hulladékból konnektorba”	+ jelentős térfogat (80% - 90%) és tömeg csökkenés (70% - 80%) + nagy mértékben csökkenti a végleges lerakásra (deponálásra) kerülő hulladékok mennyiségét + magas fokú higiénizáció + A hulladékégetés a lerakás alternatívája, és nem csökkenti a szelektíven gyűjtött hulladékok arányát, mennyiségét! + energiatermeléssel párosul	– magas létesítési és üzemeltetési költségek – káros füstgáz és maradékanyag (hamu, salak) kibocsátással kell számolni – társadalmi elfogadottsága negatív jelleget mutat

4.3.3. Az égetés fejlődése

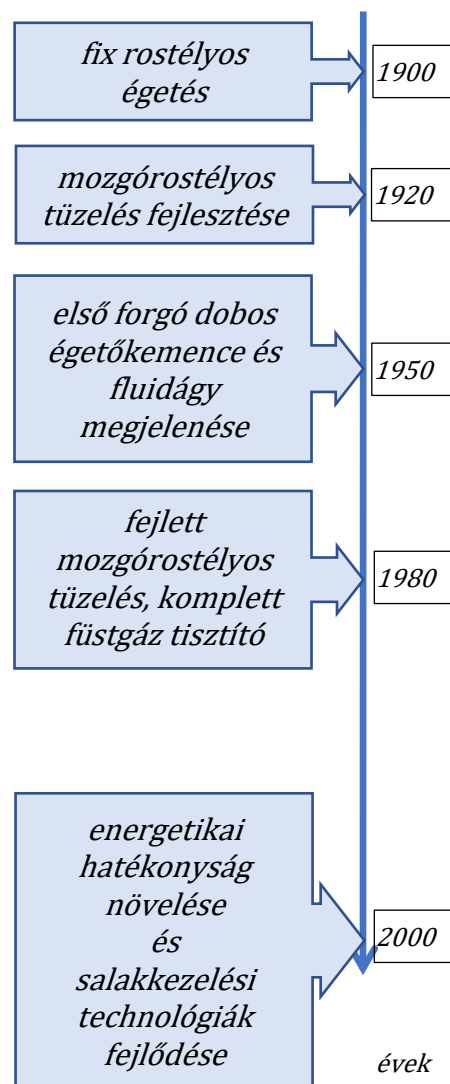
A technika történetében – ahogy már írtam – a neandervölgyi ősember az el nem használt maradékanyagainak (hulladékainak) kezelésére alkalmazta a hulladéktüzelést. Vagyis a hulladékok energetikai hasznosítása onnan származtatható. A folyamatos ipari fejlődés, az energetikai (ipari) forradalmak bebizonyították az emberiségnek, hogy szükség van a „nem szokványos” – mai szóhasználattal élve – alternatív tüzelőanyagok felhasználására. A világ eljutott oda, hogy 1900. körül több, mint 210 hulladékégetőmű volt Angliában, melyből 14 volt csak Londonban.

A XIX. század második felétől nőtt meg úgy a városokban élő tömegek száma, és ezzel együtt a városok túlszűfolttsága is, hogy a köztisztasági problémák kezelése nem tűrt tovább halasztást. Így a hulladék kazánokban történő elégetése az égetési technológiák fejlesztését kívánta.

Kezdetben a tüzelési technikák fejlesztése volt a jellemző, majd a 80-as évektől kezdve a környezetvédelmi kérdések előtérbe kerülésével, elsősorban az emissziók csökkentésére irányultak a fejlesztések.

A tüzeléstechnikai fejlesztéseknek (rostélykialakítás, primer- és szekunderlevegő, tűztér geometria) azért volt kiemelt jelentősége, mert a hulladék egy „fura” anyagáram. Elég heterogén, és időszakosan is változik a minősége. Például a nyári gyümölcsszezon, vagy az őszi esős időszak jelentősen növeli a hulladék nedvességét, csökkentve ezzel a fűtőértékét. Ezért kiemelten fontos a tüzelés folyamatos szabályozhatóságának (hulladék- levegőmennyiség, tűztérhőmérséklet stb.) biztosítása.

A környezetvédelmi témák kiemelt kezelése miatt az 1980-as évektől a füstgáztisztítási technológiák fejlesztése kezdődött meg, majd a 2000-es években a salakkezelés technológiák és az egyéb energiahatékonysági beruházások jellemezték a hulladékégető erőművek fejlesztését (20. ábra).



20. ábra. Az égetés fejlődése

4.3.4. Az égetőberendezések

Alapvetően az erőműves hulladékégetésnél kétféle tüzelési mód jöhet szóba:

- rostélyos tüzelés,
- fluidágyas tüzelés.

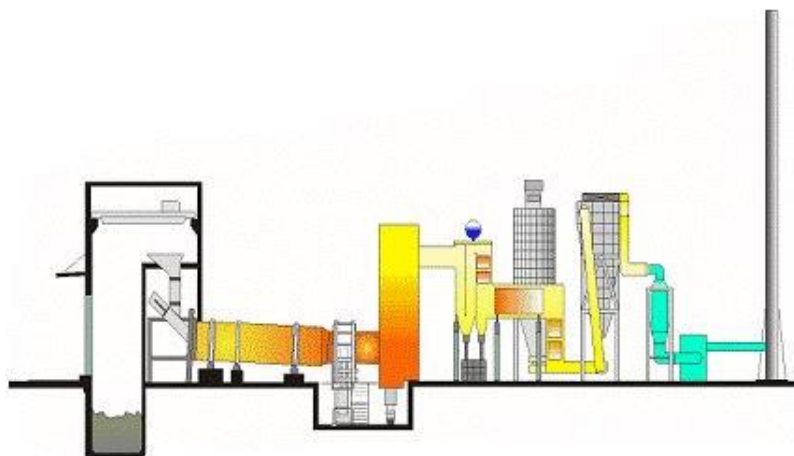
A fluidágyas tüzelés lényege, hogy inert anyagokkal - például homokágy létrehozásával – kevert hulladékot levegővel fluidizálják. A tűztér alján kialakított fúvókákon keresztül lebegő ágyat hoznak létre. A fluidizációs technológia számos előnyös paramétert hordoz magában: alacsonyabb füstgáz kibocsátás, magasabb tüzeléstechnikai hatékonyság, stabilabb égés.

Viszont nagy hátránya, hogy a hulladék előkezelése mindenképp szükséges, mert a vegyesen gyűjtött TSZH-ban, a fém tartalom (ón, alumínium) – és egyes polimer típusok - ráolvadnak a levegőbefúvást biztosító fúvókákra és eltömítik azokat. Így

ezeket az anyagfrakciókat le kell választani a hulladéktestből. Jelenleg még kisebb mértékben vannak alkalmazásban. Az európai égetők kevesebb, mint 10%-a, Japánban körülbelül 15%-a működik fluidizációs technológiával.

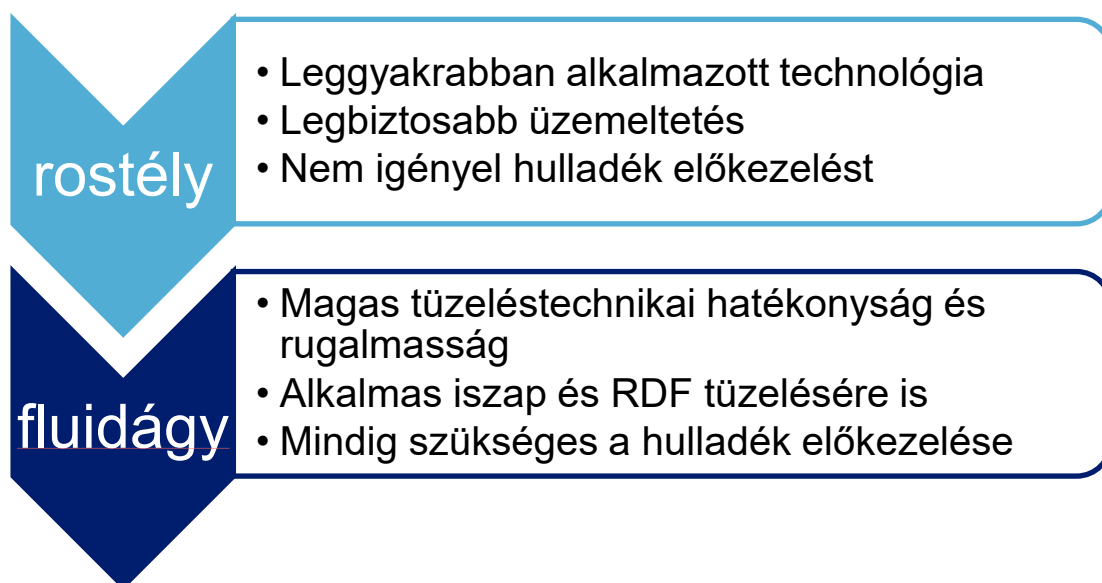
A fluidágyas technológiát előnyösen alkalmazzák szennyvíziszap égetésére és a vegyes hulladékból kiválasztott, nagyobb fűtőértékű frakciónak (döntően papír és műanyag), az úgynevezett RDF-nek a tüzelésére.

Jelen anyag nem foglalkozik veszélyes hulladékok égetésével, de azért megemlítjük, hogy a veszélyes hulladékok égetésének egyik elterjedt és bevált módja a forgó kemencés égetés. Kialakítást tekintve a lényege egy kissé ferde tengelyű forgó dob. A hulladékot a kemencén keresztül forgatással szállítják, a kemence forgó mozgása biztosítja a hulladéktest előre haladását. Ezen technológiával hosszú égetési fázis, hosszú idejű „bent tartás” alakítható ki, így a teljes higiénizálódás biztosított, mellyel veszélyes hulladékot, illetve kémiai veszélyes, vegyi hulladékot is lehet égetni. A kiégés a dobban megy végbe, mely dob forgási sebessége változtatható. A henger kialakítású dob – melynek hossza 3-4-szerese a belső átmérőjének - lényege, hogy a falzatának termikus tehetetlensége biztosítja a dob igen jó hőmérsékleti stabilitását. Hátránya, hogy többlet levegő igénye van és hogy a kapacitása korlátozott. A tökéletes kiégés biztosításához minden esetben szükséges utóégető kamra alkalmazása.



21. ábra. Forgó dobos égetőmű [35]

Jelenleg az erőműves hulladékégetésnél a rostélytüzelés a leggyakrabban alkalmazott technológia. A nagyszámú rostélytüzelésű égetőmű biztonságos üzemeltetést tesz lehetővé, hiszen az évek során hosszú üzemeltetési tapasztalat alakult ki. Az égetési technológiák összehasonlítását a következő ábra mutatja (20. ábra).



22. ábra. Az égetési technológiák összehasonlítása

4.3.5. A rostélytípusok

A rostélyok kizárólag szilárd hulladékok, esetünkben települési hulladékok égetésére alkalmasak.

A legrégebbi módszer az álló rostélyos tüzelés. Előnyeként kell kezeljük, hogy egyszerű technológia. Rögzített fémrács alatt egy hamutartó található. Viszont a hátránya, hogy alacsony tüzeléstechnikai hatásfoka van, és nagyon magasak a károsanyag emissziói.

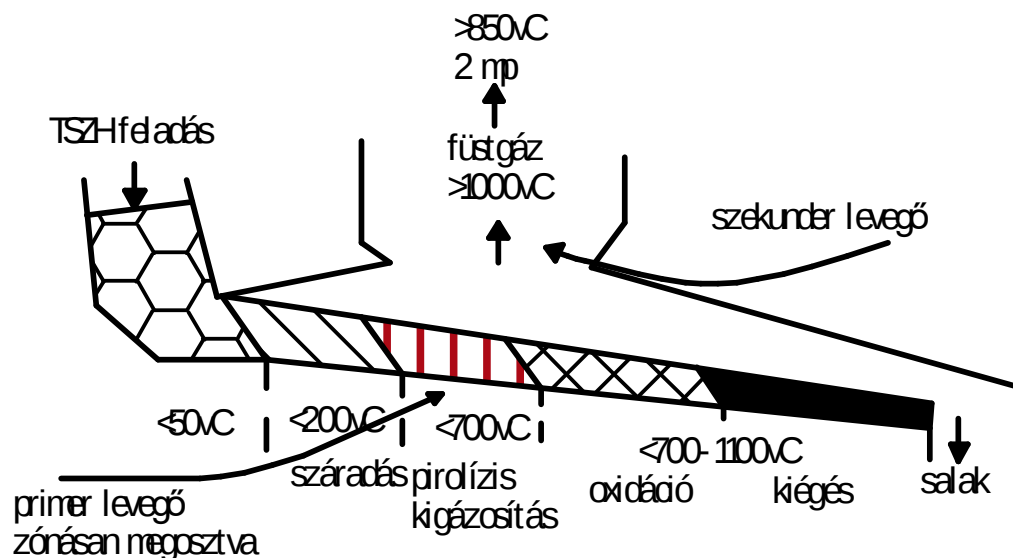
A legáltalánosabb technológia – és mindent összevetve a legüzembiztosabb is – a mozgórostélyos hulladéktüzelési technológia. Japánban a több, mint 1800 égető közül 84% mozgórostélyos technológiával éget, de Európában még ennél is magasabb az arányuk, 91%. Mivel a legtöbb égetőmű ilyen típusú, ezért nagy üzemviteli tapasztalat áll rendelkezésre, ami biztossá teszi a technológiát.

A mozgórostélyok alkalmazásának előnye, hogy az égetést homogénebbé teszi, így egyenletesebb, stabilabb tüzelés alakítható ki. Erre azért is van szükség, mert nagyon sokfajta anyagtípus kerül elégetésre a hulladékokkal, annak heterogén összetétele miatt. Kalorikus szempontokból alapvetően – és kissé nagyvonalúan fogalmazva – a rostélynak három fő feladat van:

- 1.) biztosítsa az égéságy megfelelő levegőellátását,
- 2.) elvégezze a hulladék szárítási, kigázosítási, égetési és kiégetési zónákon való egyenletes átszállítását,
- 3.) biztosítsa a hulladék állandó keveredését.

Az égési levegőt két zónában – primer és szekunder – fűjják be, ezzel biztosítják a teljes oxidációt és a tökéletes kiégést. A primer égési levegő a tűztér alján a mozgó rostélyok felől érkezik – szabályozható zónás megosztásban -, míg a szekunder levegőt a tűztér felső részében – általában két oldalról – fűjják be. A szűkített keresztmetszetnek a tűztérben az a feladata, hogy turbulenssé tegye a füstgáz áramlását. A turbulens füstgázáramlás során az áramlás instacionáriussá válik, azaz az áramlás sebessége nemcsak időben, hanem a térben is ingadozik. Ez azt jelenti, hogy a tűztér egy-egy pontjában az áramlás során a fő sebességi irányra merőleges sebességkomponens is létrejön. Ez a merőleges sebességkomponens keveri össze a füstgázt és biztosítja azt, hogy minden egyes füstgáz részecske érintkezzen oxigénnel. Így az éghető gázok – elsősorban a szén-monoxid – tökéletes kiégése biztosítható. [55] Gyakorlatban ez annyit jelent, hogy az égési gázok jó átkeveredésének és ezen keresztül a jó kiégés biztosítására a rostélytüzeléses berendezésekben a szekunder levegő befúvás magasságában a tűzteret némileg beszűkítik.

A rostély „útján” több zóna alakul ki, melyek között elsősorban hőmérsékleti különbségek alakulnak ki. A hulladék beadagolásnál 50 °C körüli a hőmérséklet. Előrébb haladva, körülbelül 200 °C-ig, a szárítás következik be, amely zónában a hulladék kiszáradása, a nedvesség távozása történik. A hulladék szárítását a láng és a falazat hőszugárzása, illetve a felmelegített levegő és a forró füstgázok végzik. A redukáló közegben a hulladékokból eltávozó gázok már 250...350 °C tartományban meggyulladnak. A harmadik zónában, hozzávetőleg 700 °C –ig a pirolízis, kigázosítás történik. A nagy széntartalmú maradékok gyulladási hőmérséklete körülbelül 750...800 °C. A gyulladási hőmérsékletre felhevített és a levegővel jól keveredő gázosodási termékek az oxidációs szakaszban meggyulladnak, az égés megindul. A negyedik zónában 700-1100 °C között az oxidáció és a teljes égetés történik. Ebben a szakaszban van a legtöbb égési levegőre szükség. Sok esetben az égési levegőt 100-150 °C-ra előmelegítik, és így kedvezően alakítják a gyulladási és égési viszonyokat. A rostély végén pedig távozik az éghetetlen maradék, a salak. Amennyiben a rostély végén a tüzelőanyag kiégése még nem tökéletes, akkor a hulladék rostélyon való áthaladásának sebességét csökkenteni kell, az aláfúvást pedig növelni.



23. ábra. A mozgó rostély kiégési zónái

A megfelelő rostélytípus megválasztása a stabil tüzelés egyik alappillére.

Napjainkban egyre jobban elterjedtek - és az újonnan létesülő erőművekben már inkább ezeket a fajta rostélyokat alkalmazzák - a vissza- és előtoló rostélyok, melyek népszerűségének oka, hogy napjainkban egyre heterogénebb a hulladék összetétele, vagyis egyre sokszínűbb és egyre többfajta hulladékot helyezünk a gyűjtőedényekbe. A visszatoló és előtoló rostélyoknál a bolygatás, és a tüztérbe érkező hulladék tüzelőanyag gyulladása optimálisabb. A toló rostélyok mellett még - bár kisebb mértékben, de - alkalmazzák a henger rostélyokat is. Ezért ez a két típusú rostély kerül bemutatásra. A korábban alkalmazott, de ma már korszerűtlen rostélytípusok a 9.2 mellékletben kerülnek bemutatásra.

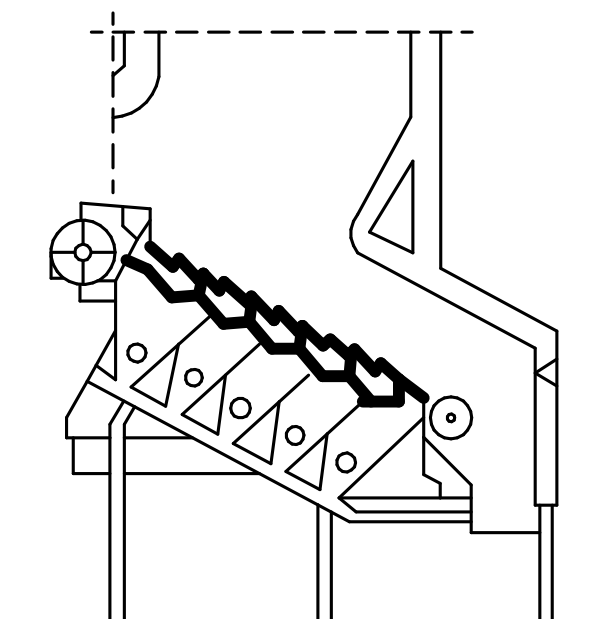
Előtoló rostély: Ferdén kialakított rostély. Az előtoló rostély felülete különálló rostélypálcákból áll, amelyek levegőbefúvó résekkel rendelkeznek. A rostélypálcák a rostély hosszában képeznek egyenes vonalú pálcasorokat. Ezen pálcasorok közül minden második rögzített, illetve mozgatott. A mozgó pálcasorok, az izzó réteg fölé mindig friss hulladékot tolnak. A rostélypálcák keresztirányú, vízzel hűtött öntöttvas tartógerendákon helyezkednek el.



24. ábra. Előtoló rostély fényképe [57]

A **visszatoló rostély** működésénél minden második pálcasor visszatoló mozgást végez, szemben a lejtőn lefelé haladó égésanyaggal. Az ellenáramú égetés elvén működik, lényegében úgy, hogy a frissen érkező hulladék alá állandóan izzó részeket tol, megkönnyítve a gyulladást. A visszatolás folyamatos bolygatást, átforgatást és egyenletes kiégést biztosít. Alapvetően a hulladék begyűjtása lehet kényszergyűjtással (póttüzeléssel), felsőgyűjtással (falazatról sugárzással), alsógyűjtással (forró levegővel) és visszagyűjtással (izzó égéságy segítségével). A visszatoló rostély alkalmazása nagyban segíti a gyulladást. Az alulról érkező levegő alsógyűjtást, míg az izzó égéságy visszagyűjtást biztosít a hulladéktestnek.

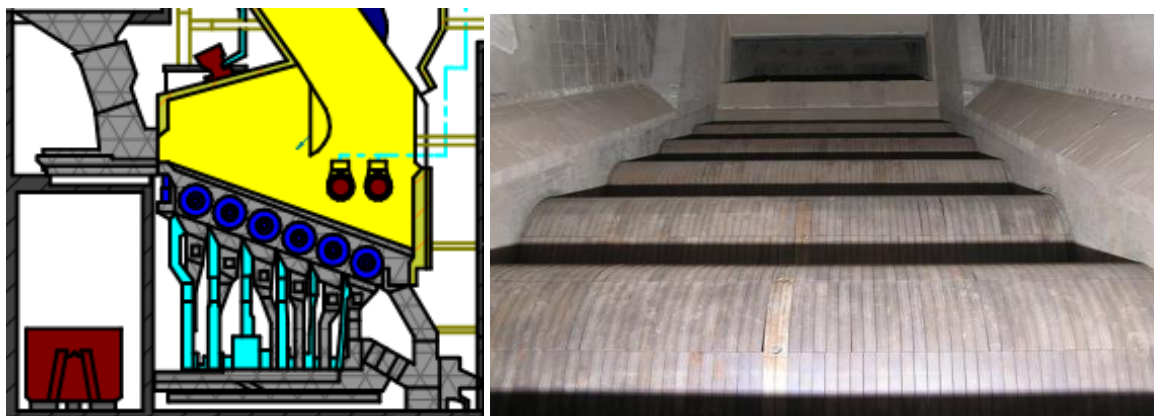
A rostélypálcák kopás- és hőálló, nagy krómtartalmú acél öntvények. Óránként 7 – 80 visszatolással működnek. Az égési levegő a rostélypálcák belsején átáramolva – hűtve azokat - a pálcafejek oldalrésein keresztül jut az égéságyba.



25. ábra. Visszatoló rostély

A **henger rostély** előnyei közül kiemelkedik, hogy a hengerek fordulatszámának változtatásával az alapanyag áram áthaladási sebessége változtatható és az előrehaladó hulladék a hengerek bolygató hatása révén egyenletes, jó kiégés érhető el. Ezen felül a hengerek alapanyaga szürkeöntvény, mely rendkívül alaktartó és a rostélypálca szegmensek szélei szorosan illeszkednek egymáshoz, így a salakáthullás minimalizálható. A rostélyt primer levegő hűti, mely levegő egyúttal az égéshez szükséges levegőt is jelenti. Minden egyes hengerhez külön csappantyúval ellátott levegőcsatornán át, alulról jut a levegő. Ezen kialakítással minden egyes hengerhez jutó levegő külön-külön szabályozható is egyúttal. A hulladék áthaladásának sebességét a hengerrostélyok fordulatszámának változtatásával lehet elérni. A hengerek szokásos átmérője 1,5 méter. A hengerek optimális száma 5-6 darab. A hengerek közötti hulladék áthaladás úgy fellazítja a hulladékot, hogy már a második hengeren stabil alaptűz alakul ki. A hengerek óránkénti fordulatszáma 0,5 – 10 között változtatható.

Általában 12 000 kJ/kg átlagos hulladék fűtőértékig még elégséges levegőhűtésű rostélypálcákat alkalmazni. Ennél nagyobb fűtőérték esetében azonban vízhűtésű rostélyok alkalmazása szükséges, ahol a rostélypálcákat is áramló víz hűti. Itt jegyzendő meg, hogy a hengerrostélyok – a vízhűtés megvalósíthatatlansága miatt – csak az említett értéknél kisebb fűtőértékű hulladékok égetésére alkalmasak.



26. ábra. Henger rostély [26]

4.3.6. Tűztér kialakítás

A hulladékégetés „kulcseménye” a tűztérben zajlik le. A folyamat egyszerűen leírva: az égéstérben a füstgázok keverednek a levegővel és elégnek.

A szekunderlevegőt a tűztér felett elhelyezett befúvóréseken keresztül juttatják az égéstérbe, a legszűkebb keresztmetszetű rész közelében. Az égést tápláló levegő arányáról általánosságban az mondható el, hogy a szekunder levegő mennyisége az összlevegő mennyiségnek a 20-30%-a. A helyesen kialakított tűztérboltozattal és

megfelelő égéslevegő befúvásával el tudjuk kerülni a redukáló füstgázpásmák kialakulását és elő tudjuk segíteni a száradási és begyújtási folyamatot, ami igen precíziós feladat a hulladékégetés során.

Gondoskodni kell arról, hogy a tüzelés elindításakor, az egész üzemelés folyamán és a leállás során a füstgáz hőmérséklete a szekunder levegő bevezetéstől számított 2 mp tartózkodási idő után minimum 850 °C legyen. Ezen minimális tartózkodási idő és hőmérséklet biztosításának célja, hogy a veszélyes dioxin és furán vegyületek maradéktalanul lebontásra kerüljenek.

Az üzemelés során - megfelelő fűtőértékű hulladék ($H_a > 7000$ kJ/kg) tüzelése mellett – a hulladéktüzelés önmagában biztosítja az említett 850 °C-ot, azonban begyújtáskor és leálláskor is biztosítani kell a 850 °C-ot, ezért ún. póttüzelésként szükséges földgáz- vagy olaj égőket a tűztérbe beépíteni.

A póttüzelés biztosításának másik feladata, hogy úgynevezett teljesítmény tüzelést biztosítson. A szemét fűtőértékének a csökkenésekor előfordulhat olyan eset, hogy nem képes önmagától elérni az égetés a szükséges tűztérhőmérsékletet, ezért támogató tüzelést kell biztosítani a hulladékáramnak. A tűztér hőmérsékletére a kazán 2 másodperc tartózkodási időnek megfelelő magasságában, a 850 °C-os hőmérsékleti minimum reteszfeltétel, vagyis amennyiben a tűztér hőmérséklete a kívánt érték alá csökkenne, úgy automatikusan indulnak a gázégők. Üzemeltetési gyakorlatokat elemezve elmondható, hogy az éves gázfelhasználás, az összes tüzelő alapanyagra vonatkoztatva annak 2-3% -a, azaz egy jól megtervezett égetőműben az égetés alapanyagát 97-98%-ban a kommunális hulladék adja.

4.4. Az égetőművek felépítése

Az általánosan elterjedt rostélytüzelésű energiatermelő hulladékégetőművek technológiai rendszere az alábbi főbb egységekből áll:

- hulladék fogadás és tárolás,
- tüzelés és gőztermelés,
- energiatermelés és értékesítés,
- füstgáztisztítás,
- füstgáztisztítási maradékanyag és rostélysalak kezelése.

Ezeket végighaladva igyekszem bemutatni a technológiát.

A hulladék szállítását végző célgépeket a hulladékégetőművek teherportájánál mérlegelik. Ha a hulladék – mint tüzelőanyag – útját nézzük, a teherautók mérlegelésével kezdődik meg az égetőműben az energia felszabadítása. Ma már a

különböző informatikai, automatizálási megoldásoknak köszönhetően a mérlegelési folyamatot gyorsítani lehet. Mivel általában ugyanazok a hulladékszállító teherautók hajtanak be az erőmű telephelyére, ezért az üres tömegüket ismerjük, illetve egy informatikai adatbázisba felvihetjük. Így egy rendszámfelismerő rendszer segítségével, egy hídmérlegre állva, a rakott tömeget megmérve, az üres és a rakott tehergépjármű tömegének a különbségéből a beszállított hulladék tömege regisztrálható. Sok esetben a teljes beléptetés, a mérlegelés teljes folyamata automatizálható. Mágneskártya segítségével egy sorompó nyitható, a rendszámfelismerést, a mérlegelést egy rendszer önmaga elvégezve a beléptetéshez személynélre sincs szükség.

A célgépek egy rámpáról közvetlenül a tároló bunkerba ürítik a hulladékot. A tároló bunkerek többes feladatot látnak el. Egyrészt a beszállítási és az égetési munkafázisok közötti kapacitáseltérések, torlódások kiegyenlítését, másrészt a tárolt anyag bizonyos fokú összekeveredését, homogenizálását szolgálja.

Általánosságban elmondható, hogy a bunkerekbe történő hulladék ürítése gravitációs módon történik. Ezért a szállítójárművek rámpára felhajtva „emelkednek ki” a behajtási térszinttől. A tárolótér kapacitását az égetőmű égetési paramétereire kell illeszteni, de az üzembiztonság érdekében minimum 3-5 napos feldolgozási teljesítménynek megfelelő hulladékmennyiség tárolásához elegendő bunkertérfogat szükséges. A bunker térfogatának még egy minimális követelménye van. A hulladék gyakorlatilag bármilyen anyagot tartalmazhat. Belekerülhet egy kisebb gázpalack is, amelynek robbanását ki kell bírnia. Természetesen egy második világháborús bomba robbanását nem kell kibírnia, de egy kisebb robbanás által előidézett nyomáshullámot el kell viselnie.

A tároló bunkerekbe való ürítő helyek számát úgy kell kialakítani, hogy lehetőleg a hulladékszállító járműveknek az ürítés során ne kelljen várakozniuk. Ez azért is fontos, mert a legtöbb esetben lökésszerűen érkeznek be a célgépek az égetőművekbe. Jellemzően délelőtt 9-11 óra, illetve délután 13-15 óra között lehet számítani a hulladékgyűjtő járatok beérkezésére. A hulladékgyűjtés hatékonyságát rontja, ha a gyűjtőjárműveknek sokat kell várakoznia az égetőművek telephelyén, mert az állásidejük megnő a teherautóknak.

A bunker fenékszintjét tekintve lehetnek az égetőművek bunkerei magas bunkerek – melyek fenékszintje a külső terepszinthez képest magasabban van –, illetve a mélybunkerek, melyek süllyesztett bunkerek. Az utóbbi típust elsősorban a nagyobb tárolókapacitású égetőműveknél alkalmazzák. A süllyesztett bunker alkalmazásával a földmunka mennyisége megnő – így a beruházási költség is.

A tervezési megoldások tudatos átgondolásával, rendkívül sok rendszerfunkció kialakítható. A rámpák alatt például raktározásra alkalmas helyiségek alakíthatók ki. Ezen megoldással például a telephely méretét is le tudjuk csökkenteni, és a lehető legkevesebb zöldfelületet sajátítjuk ki a természettől.

Manapság már többnyire teljesen zárt, és akár depressziós nyomásviszonyt kialakítva tervezik az üritő tereket. Ennek oka, hogy a környezetet, az égetőmű közvetlen szomszédsági területeit védjük a felszabaduló por, zaj, bűz és egyéb terhelő emisszióktól. Természetesen a környezeti tudatosságunkat a tervezés során is alkalmazhatjuk. Akár felülvilágítók kialakításával az üritő térben természetes megvilágítást alakíthatunk ki, csökkentve így a villamos energia felhasználásunkat és így az ökológiai lábnyomunkat.

A hulladék bunkerek nyomásviszonya minden esetben depressziós, azaz a bunkertér enyhe szívás alatt áll. Így az ürités során keletkező pormennyiség és a tárolás során felszabaduló (elsősorban hidrogén-szulfid és ammónia) bűzös gázok nem kerülnek ki a környezetbe. A bunkerből elszívott levegőt használják az égéshez primer levegőként.

A nagyobb kapacitású égetőkben alkalmaznak osztott bunkerokat is, melyek alkalmasak lomhulladék égetésére is. A lomhulladék előkezelésre, darabolásra, aprításra szorul, ezért a tárolásáról külön kell gondoskodni. Ez csak abban az esetben éri meg, ha megfelelő mennyiségű lomhulladék begyűjtésére van lehetőség.

Az esetleges bunkertüzek elkerülése végett, mindenképpen szükséges tűzoltó berendezéssel (vízágyúkkal) ellátni a bunkereket.

A hulladékgyűjtő járművek közvetlen bunkertérbe ürítését követően, a folyamatban a kazántérbe adagolás következik. Erről szilárd hulladék esetén polipmarkolók gondoskodnak. A markoló kanalak emelése / süllyesztése drótkötelekkel, a nyitása / zárása drótkötelekkel vagy hidraulikus működtetéssel történik. A polipmarkolókat úgy célszerű méretezni, hogy egyszerre közel egy szállítójárműnyi adagot tudjon felemelni. A polipmarkolókat általában mérleggel szerelik fel, így mérni és az adatokat rögzíteni tudják, pontos adatokat szerezve az egyes kazánba adagolt hulladék mennyiségéről. A markolók nem csak a hulladék kazánba adagolásáról gondoskodnak, hanem egyúttal szedik el, homogenizálják és keverik a hulladékot. A keverés során a markolót kezelő személyzet számára lehetőséget biztosítanak a vizuális vizsgálatra is. Általában elmondható, hogy a markolók félautomata üzemben működnek. A keverés, homogenizálás az operátor kézi irányításával történik, míg a garatba adagolást már koordináta rendszerű beadagoló automatika segíti.

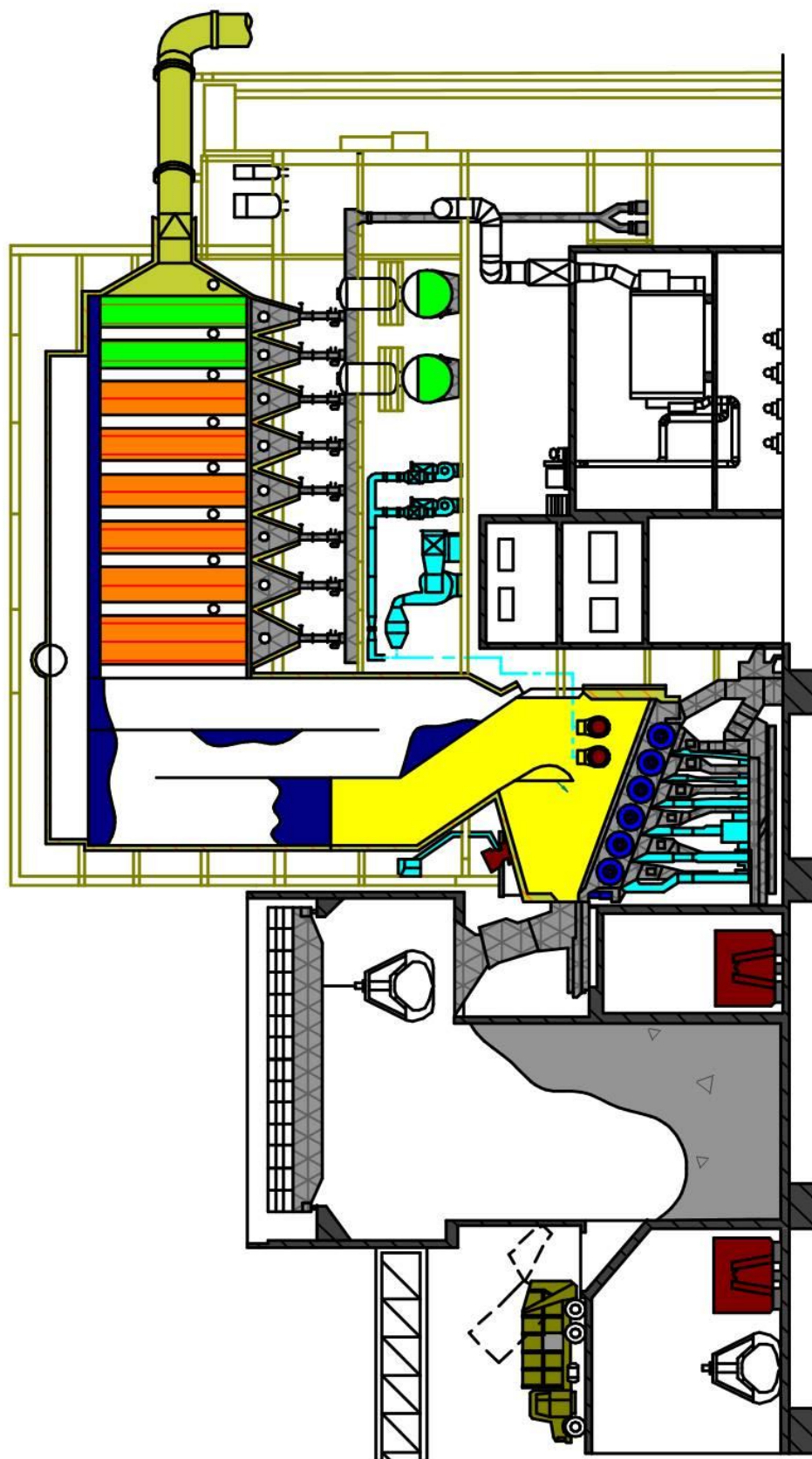
A hulladékadagoló markolóból minimálisan kettő darab szükséges, még a kisebb – esetleg egy kazános – égetőműveknél is. Ennek egyik oka, hogy az esetleges kötélszakadás, vagy esetleges egyéb okú meghibásodás esetén is rendelkezésre álljon legalább egy darab markoló. Másrészt normál üzemben is a feladatmegosztás szerint az egyik markoló homogenizál, keveri a hulladékot, a másik pedig a garatba történő beadagolást végzi.

Az operátorok kezelő fülkéjének légnyomását – a bunkerrel ellentétes nyomásviszonyúra – nyomott légállapotúra tervezik. Ennek az a célja, hogy a fülkében dolgozó személyzetet védjük a hulladéktestből felszabaduló káros emisszióktól – szag, bűz, zaj, por.

A garatban a hulladék gravitációs úton csúszik le az adagoló asztalra, ahonnan egy hidraulikus adagoló dugattyú nyomja be a tűztérbe.

A hulladék elégetése az égetőmű „lelkében” a rostélyokon történik. Korábban a rostélyok és magának a hulladékégetésnek a folyamata részletesen bemutatásra került, így ezt e helyütt – még egyszer – nem részletezem. A kapacitás és égetési teljesítményekről azonban említést kell tennünk. A rostélyok termikus terhelhetősége 2000 – 4500 MJ/m²h közötti tartományban van. A szükséges rostélyfelületet az óránként elégetendő hulladékmennyiség és a fajlagos rostélyterhelés hányadosa adja. TSZH-nál az átlagos fajlagos rostélyterhelés 150 – 400 kg/m². Ez annyi kg tüzelőanyagot jelent, amennyi 1 m² rostélyfelületen 1 óra alatt a legjobb hatásfokkal tüzelhető el.

Az égetési kapacitásokat tekintve ez összességében azt jelenti, hogy egy erőművi méretű hulladékhasznosító mű évi százezer és kettőmillió tonna közötti hulladékot tud elégetni, mely kapacitásmaximumra a világ legnagyobb, Shenzenben (Kína) található égetőmű a példa.



27. ábra. Hulladékégetőmű általános felépítése vízszintes huzamú kazánnal [26]

Mint sok más műszaki megoldás esetén, teljesen általános, generálisan mindenhol alkalmazható megoldásról a hulladékégetés tervezése során sem beszélhetünk. A megfelelő égetőberendezés megválasztása során is számos tényezőt kell mérlegelnünk. Tüzeléstechnikai szempontból nem elhanyagolhatók a hulladék egyéb fizikai és kémiai tulajdonságai sem, mint például a szemcseméret, korrozív hatás, gyulladás- és lobbanáspont, viszkozitás. Ezek pontos ismerete a berendezés kialakításán túl különösen lényeges az előkezelő és betápláló folyamatok műszaki megoldása szempontjából. Például a folyékony és iszapszerű hulladékok tűztérbe adagolásának műszaki megoldását alapvetően befolyásolja az anyag hőmérsékletfüggő viszkozitása. Ez a porlaszthatóságra, a szivattyúzhatóságra van befolyással. A gyulladás- és lobbanáspont ismerete az égési folyamat szabályozása szempontjából a különböző folyékony hulladékoknál alapvető jelentőségű. A korrozív tulajdonságú hulladékok égetésekor különösen fontos a megfelelő konstrukciós anyagok – mint például a kemencefal, és a fűtőfelületek anyagának - megválasztása. A toxikus tulajdonságok meghatározzák a berendezés kialakításának és üzemeltetésének munkavédelmi, biztonságtechnikai szempontjait. A halogéntartalom és az alkáliföldfém-, illetve nehézfém-tartalom egyrészt a belső korróziós kérdések, másrészt a másodlagos környezetszennyezési kérdések – füstgáztisztítás, maradékanyag-elhelyezés – megítélésében játszik szerepet. Azt nagyon fontos kiemelni, hogy a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék esetén ezek az anyagféleségek igen kis mennyiségben találhatók meg. A termelési hulladékoknál már sokkal jellemzőbb – a származásától függően – a magasabb kén- és klórtartalom. A tüzelőberendezés helyes megválasztásához a hulladék darabosságának, szemcseméret-eloszlásának ismerete szükséges, mely a hulladék beadagolását végző berendezés kialakítását is befolyásolja. [31]

A tüzelőberendezésben felszabaduló hő gőztermelésre történő hasznosítása a rostély fölött kialakított kazánban történik. A kazánok szinte kivétel nélkül egy dobos rendszerűek, membránfalas felépítésűek és természetes cirkulációval rendelkeznek. A kazánhuzamok elhelyezkedése szempontjából függőleges és vízszintes huzamú kazánokról beszélhetünk. A vízszintes huzamú kazánoknál az első három függőleges huzam „üres” és a fűtőfelületek mind a vízszintes huzamban helyezkednek el. A függőleges huzamú kazánok általában három vagy négy huzamból állnak, az első huzam minden esetben üres, azaz besugárzott tűztérként működik. A fűtőfelületek kapcsolása (sorrendje) a huzamokban általában a következő: elgőzölögtető, túlhevítő, tápvíz-előmelegítő (eco). A primer levegő előmelegítése nem füstgázzal, hanem gőzkaloriferrel történik, ezért nincs levegő-előmelegítő (luvo) a kazánokban.

A túlhevített gőz paraméterei az égetőművek döntő többségében 40 bar és 400 °C. Azért nem választanak magasabb paramétereket, mert 400 °C gőzhőmérséklet felett a

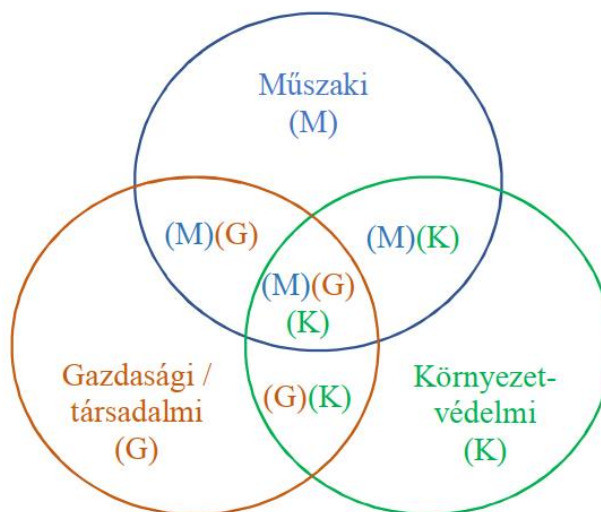
túlhevítőkön rendkívül intenzív füstgázoldali klór korrózió lép fel. A korrózió elkerülését, illetve csökkentését szolgálja az is, hogy az első konvektív hőcserélő felületet oda építik be, ahol a füstgáz már – sugárzás útján – legalább 650 °C-ra lehűl. A korrózió mellett jelentős veszélyt jelent még a csőfelületekre az elsalakosodás. Ezért vannak beépítve a csőkötegek közé úgynevezett koromfúvók, melyek többnyire gőzösek. A kazánokat hőtechnikailag úgy méretezik, hogy a távozó füstgázok hőmérséklete – átlagos elpiszkolódás mellett – 200 °C körüli.

A kazánokhoz kapcsolódó füstgáztisztítást és a salak és füstgáztisztítási maradékanyag kezelést külön fejezetben tárgyaljuk.

Meghatározó kérdés még az üzemidő-karbantartás idejének aránya is. A régebben üzembe állított égetők többnyire 7500 h/év üzemidővel működnek. Természetesen ettől eltérő üzemidőkkel is találkozhatunk. A modern égetők, melyek pár éve üzemelnek, vagy ez után lesznek üzembe állítva, már a rendelkezésükre álló üzemviteli tapasztalatokat felhasználva nagyobb üzemviteli biztonságot hordoznak magukban. Ez azt jelenti, hogy az új égetőművek esetében már 8000 h/év üzemi működéssel számolhatunk.

4.5. Az égetőmű telephelyének kiválasztása

Az égetőmű ideális telephelyének megválasztása nagyon nehéz és összetett feladat. Számos kritériumot kell vizsgálni és mélyrehatóan elemezni (28. ábra).



28. ábra. A műszaki, gazdasági / társadalmi és a környezetvédelmi kérdések halmazai

A műszaki halmaz elemeibe tartoznak az olyan műszaki, tudományos kérdések, amelyeknek sem gazdasági/társadalmi, sem természeti/környezeti vonatkozása nincs.

Az (M)(G) részhalmazban a műszaki és a gazdaság/társadalom halmazok közös elemei vannak. Ezek jelentik az energetikai, műszaki témakör gazdasági és társadalmi hatásait, illetve a gazdasági és műszaki kérdések kapcsolatait.

Az (M)(K) részhalmaz a műszaki és a természeti környezet közös elemeit tartalmazza. Ebben a körben tárgyalhatjuk az égetőművek létesítésének és üzemeltetésének környezeti hatásait, melyek szinte soha nem hagyhatóak figyelmen kívül. [10]

Az (M)(G)(K) részhalmaz nyújtja az égetőművek telephely kiválasztásának legtágabb tárgyalásmódját. Ebben a kiterjedt értelmezésben az égetőművek létesítését, a műszaki, gazdasági/társadalmi és környezeti aspektusok összefüggéseivel együtt tanulmányozhatjuk. Ezt a tárgyalási módot „rendszerszemléletű” vizsgálati módnak is nevezhetjük.

A hulladékégetés GYELV (SWOT)¹² elemzésének elkészítése során, a gyengeségek elemzésekor mindenképpen figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a hulladék égetése negatív társadalmi elfogadottságot mutat. Tehát azokkal a társadalmi szempontokkal is számolni kell, hogy milyen települési környezetbe helyezzük el az égetőművet.

Természetesen tudományosan megalapozott tanulmányokra alapozva kell a megfelelő telephelyet megválasztani. A legfontosabb kritériumokat a lenti táblázatban foglaltam össze (9. táblázat).

¹² **GY**engeségek, **E**rősségek, **L**ehetőségek, **V**eszélyek – **S**trengths, **W**eakness, **O**pportunities, **T**hreats

9. táblázat. Értékelési szempontok a terület kiválasztásnál

kritériumok	magyarázat
jogszabályi rendelkezések	Természetvédelmi terület, Natura2000 stb.
önkormányzati jóváhagyás	Az illetékes hatóságok, önkormányzatok előírásainak betartása.
nyilvános elfogadás	Az égetőművet előnyös kereskedelmi vagy ipari területen vagy más szilárd hulladékkezelő létesítmények szomszédságában elhelyezni. A közvetlen környezetében ne legyen lakóterület.
földtulajdon	Az önkormányzati földtulajdont előnyben kell részesíteni, ha ilyen földterület nem áll rendelkezésre, akkor a földterületeket ki kell sajátítani.
szállítás távolsága a forrástól a gyárig	Az égetőművet célszerű a begyűjtési terület geometria közepén elhelyezni, illetve a tüzelőanyag beszállításának a lehető legrövidebb útvonalat biztosítani.
távolság a hulladéklerakóig	A keletkező salak elhelyezésének lehetőségei.
szállítás az üzembe	Esetleges autópályán történő beszállítás lehetősége.
hűtés rendelkezésre állása	Ipari hűtővíz rendelkezésre állása. Hőhasznosító gőzkazánnal ellátott – külső gőzszolgáltatást nem nyújtó – korszerű hulladékégetőmű becsült, átlagos vízigénye füstgázmosás nélkül az alábbiakból adódik: ○ póttápvíz: a frissgőz mennyiségének kb. 1-7%-a, ○ technológiai célokra: kondenzációs rendszer póthűtővíz igénye, egyéb hűtővizek stb. átlagosan 1,5 – 2,5 m³/t hulladék fajlagos vízigény vehető figyelembe a technológiai kialakítás módjától függő mértékben.
kapcsolat a villamos-energia rendszerhez	A villamos távvezeték kiépítésének lehetősége, a kiépítés költségének minimalizálása, szállítási veszteségek figyelembe vétele.
távhőrendszerhez való csatlakozás	A megtermelt hőenergia értékesítésének lehetősége: távhőkiadás és az esetleges ipari fogyasztóhoz való csatlakozás (pl. patyolat/mosoda).
elérhető infrastruktúra	Szennyvíz csatorna, kommunális ivóvíz (mert irodák is lesznek az égetőműben), milyen a közművesítés helyzete az adott területen.
meteorológiai viszonyok	A füstgáz és egyéb emissziók (pl. zaj) terjedésének figyelembe vétele.
terület nagysága, bővítési lehetőségek	Mekkora a rendelkezésre álló terület. Hozzávetőlegesen a napi feldolgozási kapacitás, a hulladék egy tonnájára nézve a létesítmény teljesítményének függvényében 40-100 m ² , de általában minimum 2 ha.

Az előzetes tanulmányok figyelembevételével, az előzetes kiválasztásnál – általában - 3-5 telephely kerül kiválasztásra, mely alkalmas lehet égetőmű létesítésére. Ezen előzetesen kiválasztott helyszínek közül:

- környezetvédelmi kérdések,
- tervezési kérdések,
- politikai és jogi kérdések,
- pénzügyi, gazdasági kérdések kerülnek értékelésre.

Az egyes kérdéseket 1-től 5-ig terjedő skálán osztályozni, majd az egyes pontszámokat összesíteni, majd az összesített pontszámokat súlyozni kell. A környezetvédelmi kérdések 1,5-szeres, a tervezési kérdések 2-es, a politikai és jogi kérdések 1,5-szeres, a pénzügyi és gazdasági kérdések 1-es súlyozást kapnak (10. táblázat).

10. táblázat. Az előzetesen kiválasztott területek értékelése

értékelési szempontok	1. helyszín	2. helyszín	3. helyszín
környezetvédelmi kérdések			
Árvízi terület-e?	3 ¹³	4	4
geológiai korlátozások	3	3	4
hidrogeológiai és talajkorlátozások	5	5	5
turisztikai / rekreációs terület	5	5	5
ökológiai, történelmi értékű védett területeken	5	5	5
összesített pontszám (A)	21	22	23
összesített súlyozott pontszám- X 1,5 (α)	31,5	33	34,5
tervezés			
elegendő földterület nagysága			
meglévő infrastrukturális kapcsolatok			
lakott területektől való távolság			
főútvonaltól való távolság			
szállítás távolsága a „forrástól” az üzemig			
a végső elhelyezéstől való távolság (salak lerakása)			
ipari fogyasztóhoz való közelség (opció)			
fűtőérték (általában mindenhol ugyanaz)			
közelség a fogyasztókhoz (távhő/villamos hálózat)			
összesített pontszám (B)	33	34	34
összesített súlyozott pontszám- X 2 (β)	66	68	68
politikai és jogi kérdések			
jogszabályi rendelkezések betartása			
önkormányzati jóváhagyás			
helyi hatóságok jóváhagyása			
nyilvános jóváhagyás (közmeghallgatás)			
közterület / tulajdoni viszonyok			
összesített pontszám (C)	16	21	15
összesített súlyozott pontszám- X 1,5 (γ)	24	31,5	22,5
pénzügyi és gazdasági kérdések			
maradék anyag (salak) lerakóra szállítási költsége			
az égető üzembeállítás költsége			
energiaértékesítés bevételi lehetősége			
összesített pontszám (D)	16	21	15
összesített súlyozott pontszám- X 1 (δ)	24	31,5	22,5
végső pontszám = (A)+(B)+(C)+(D)	78	84	83
végső súlyozott pontszám = (α)+(β)+(γ)+(δ)	129,5	139,5	134

A legmagasabb pontszámot elérő 2. helyszínt kell választani.

¹³ Osztályozás 1-5-ig terjedő skálán.

A fenti táblázatban egy példát láthatunk az előzetesen kiválasztott területek értékelésére, mely lehetőséget ad a végső helyszín kiválasztására. Részletesen nézzük meg a környezetvédelmi kérdések értékelését. Az **árvízi területek** kérdésének a lényege, hogy beazonosításra kerüljenek azon területek, ahol jelentős potenciális árvízi kockázat áll fenn, illetve előfordulása valószínűsíthető. Ha például az előzetesen kiválasztott 1. helyszín esetén az az információ áll rendelkezésünkre, hogy árvízi szempontból közepes előfordulási valószínűségű terhelési terület, 100 éves gyakoriságú (1%-os) árvízi eseménnyel. A 2. és 3. helyszín esetén pedig árvíz szempontjából ugyanúgy alacsony előfordulási valószínűségű terhelési területről beszélünk, de az 1000 éves időperiódus esetén 0,1%-os árvízi esemény van meghatározva, akkor a 2. és 3. helyszín esetén magasabb pontszámmal kell értékelnünk. Vagyis a 2. és a 3. helyszín – árvízi szempontból – ideálisabb terület.

Geológiai korlátozások szempontjából a Föld felszíne és felszín alatti rétegei természetes állapotának, továbbá saját, illetve más környezeti elemekkel együttes folyamatainak a terület felhasználását, vagy kizáró kockázatát osztályozzuk. Vizsgálni kell, hogy az esetleges ásványvagyon veszélyben van-e, illetve amennyiben szükséges mélyfúrásos kutatás, az okoz-e valamiféle környezetkárosodást? A mi gyakorló példánk szerint, a geológiai kérdések elemzése során azt az eredményt kaptuk, hogy az 1. és a 2. helyszínen cölöp alapozásra van szükség, míg a 3. helyszín kimondottan ipari területen fekszik. Így a 3-as számú helyszínen mélyítjük a legkevésbé az ökológiai lábnyomunkat. A cölöp alapozás szükségessége miatt az 1. és 2. helyszín értékelésénél 3-as osztályzatot tudunk adni, a 3. helyszínen 4-esre tudjuk értékelni a geológiai kérdéseket.

A **hidrogeológiai és talajkorlátozások** értékelési szempontnál figyelembe kell venni a földtani szempontokat. Kerülni kell a megcsúszásra hajlamos területeket, nem szabad elzárni a felszíni vízfolyásokat. Kerülni kell a lejtős tömegmozgásokat, szeletes földcsuszamlást, a rogyásokat. A gyakorló példánkban az előzetes vizsgálatok azt állapították meg, hogy mind a három terület relatív kis dőlésű. Mozgások, belső elválási felületek, torlódások ritkán jönnek létre, kialakulásainak a valószínűsége rendkívül csekély. Így mind a három előzetesen kiválasztott helyszín ezen kérdésre 5-ös osztályzatot kap.

Turisztikai szempontok figyelembevételére szempontjából elsősorban azt szükséges vizsgálni, hogy kiemelten **rekreációs területre** történne-e a beruházás? Turisták által kedvelt-e a terület? Preferálni kell a mezőgazdasági művelésre, és a turizmus fejlesztésére alkalmas területeket. A példánkban megállapításra került, hogy mind a három terület mezőgazdasági művelésre alkalmas. Területfejlesztés szempontjából turizmus fejlesztése nincs kilátásban, turisták ezekre a területekre

történő utazási motivációja rendkívül alacsony. Ezért mind a három helyszín a maximális 5-ös osztályzatot kapja.

Elemezni kell, hogy országos jelentőségű, egyedi jogszabállyal védett **természeti, ökológiai, történelmi értékű védett területre** történik-e az építkezés, esetleg a közeljövőben - területrendezési terv - terveznek-e ilyen irányú fejlesztéseket a területre. A példa területek egyike sem védett természeti terület, így szintén mind a három terület 5-ös osztályzatot kap (10. táblázat).

A felsorolt szempontok ötfokú osztályozással történő ellátása után, az osztályzatokat összegezni kell - így kapjuk rendre A, B, C, D értékeket. A különböző kérdéscsoportokat a megfelelő súlyokkal ellátni - ezek adják az α , β , γ , δ számértékeket. Az értékelési szempontok tárgyköreinek végső súlyozott pontszámának az összege ($\alpha + \beta + \gamma + \delta$) adja meg azt a számot, ami alapján ki lehet választani a legideálisabb telephelyet. [36]

Természetesen itt sem beszélhetünk minden szempontot kielégítő, tökéletes telephelyről. A kiválasztott területnek vannak előnyei és hátrányai. Azonban a bemutatott területkiválasztási metódus alkalmas a komplex szempontrendszer szerinti, műszaki, gazdasági / társadalmi, környezetvédelmi tárgykörök elemzésére. A felsorolt szempontrendszer súlyokkal történő ellátása lehetővé teszi az egyes kérdéskörök prioritizálását és a rendszerszemléletű területkiválasztást.

* * *

Tervezési, műszaki segédlet

1.) A hulladékégető berendezések területigénye:

- Hozzávetőlegesen a napi feldolgozási kapacitás a hulladék egy tonnájára nézve a létesítmény teljesítményének függvényében 40-100 m², de általában minimum 2 ha.

2.) Hőhasznosító gőzkazánnal ellátott – külső gőzszolgáltatást nem nyújtó – korszerű hulladékégetőmű becsült, átlagos vízigénye füstgázmosás nélkül az alábbiakból adódik:

- póttápvíz: a frissgőz mennyiségének körülbelül 1-7%-a,
- technológiai célokra: kondenzációs rendszer póthűtővíz igénye, egyéb hűtővizek stb. átlagosan 1,5 – 2,5 m³/t hulladék fajlagos vízigény vehető figyelembe a technológiai kialakítás módjától függő mértékben.

- 3.) Az üzemidő megválasztásánál törekedni kell a tartalékkapacitások biztosítására. Több égetőegységet célszerű telepíteni, bár az utóbbi időben – az üzembiztonság növekedésével – nem ritka az egykazános megoldás sem. Mivel ezeket az égetőműveket minimálisan 35 év üzemeltetési időtartamra tervezik, mindenkor gondoskodni kell az esetleges bővítési lehetőségekről.
- 4.) Az átlagos fajlagos energiafelhasználás 35 – 50 kWh/t hulladék, ami különösen kisebb teljesítményű berendezéseknél elérheti füstgázmosással együtt a 80 – 100 kWh/t értéket is. Nagyobb berendezéseknél az égetőmű önfogyasztása a termelésnek 18-20%-át teszi ki. A fajlagos vízigény – hőhasznosítás nélkül – 1,5 – 2,5 m³/t hulladék a salakhűtés és a füstgáztisztítás módjától függően. Ez kedvezőtlen esetben 100%-al nagyobb is lehet.
- 5.) A szilárd kommunális hulladék fűtőértéke jelenleg Közép-Európában 6000 – 11000 kJ/kg értéktartományban mozog:
- hazánkban ez az érték 6500 – 9500 kJ/kg között van,
 - lomhulladék esetében 10500 – 16800 kJ/kg értékkel lehet számolni,
 - háztartásihoz hasonló hulladékok esetében 7600 - 12600 kJ/kg közé tehető a fűtőérték,
 - zöldhulladék válogatás utáni maradéka 6300 – 10500 kJ/kg,
 - az éghető anyag tartalom: 30 – 50% (átlagérték hozzávetőleg 40%),
 - víztartalom: 20 – 40% (átlagérték körülbelül 30%),
 - hamutartalom: 20 – 40% (átlagérték körülbelül 30%).
- 6.) Termelési hulladékok lehetnek igen nagy körülbelül 40-45000 kJ/kg fűtőértékűek, de lehetnek olyan kicsik is, hogy még az önálló égethetőség határértékét sem érhetik el. Víztartalmuk szokásosan 5 – 80 tömeg%, hamutartalmuk 10 – 95 tömeg%.
- 7.) A szilárd kommunális hulladékok térfogattömege körülbelül 0,1 – 0,3 t/m³ között van. Termelési hulladékoknál ez az értéktartomány lényegesen szélesebb, 0,1 – 1,2 t/m³.
- 8.) Az üzembiztonság szempontjából biztosítani kell minimum 3 – 5 napos feldolgozási teljesítménynek megfelelő hulladékmennyiség tárolását. A tárolóbunker térfogatát az égetőmű óránkénti teljesítményéhez, az üzemidejéhez és a hulladék sűrűségéhez kell illeszteni.
- 9.) A bunkerekben az ürítő helyek számát, az óránként érkező járművek átlagos számából és az egyes járművek átlagos ürítési idejéből adódóan kell meghatározni. Nagyvárosokban használt átlagos méretű céljárművek

- ürítési idejének Variopress hulladékgyűjtő jármű esetén 4-5 perc, Rotopress technológia esetén 8-10 perc kinyomási idővel számolhatunk.
- 10.) Nagy mértékű lökésszerű forgalomnál célszerű többsávos utat tervezni a rámpára való felhajtáshoz.
- 11.) A szemétszállító járművek ürítő helyei felett minimálisan féltető kialakítása szükséges a csurgalékvíz keletkezésének megakadályozása végett. Napjainkban a teljesen zárt ürítő terek kialakítására kell törekedni, melyek nyomásviszonya depressziós. Így a környezet bűz- és por emisszióját csökkenteni tudjuk. Hulladékgyűjtő járművek nagyrészt nappal ürítenek, ezért a zárt ürítő tereket felülvilágítókkal célszerű ellátni, így is hozzájárulni a hatékony működéshez.
- 12.) A bunkerekben a téli időszakban az esetleges fagyások elkerülése végett, fűtést célszerű tervezni.
- 13.) Földbe süllyesztett bunker esetében többlet földmunka igényrel kell számolni, mely a beruházási költséget megemeli.
- 14.) Minimálisan két híddaru kialakítása szükséges a bunkerekben.
- 15.) A bunker szellőztetését depressziós rendszerűre, a híddaruk kezelőfülkéjét pedig túlnyomásos rendszerűre kell tervezni.
- 16.) A tűztér-hőmérséklet szabályozásának lehetőségei változatlan hulladékfeladás mellett a következők:
- A többletlevégő mennyiségének és hőmérsékletének - kis fűtőértékű anyagoknál kedvező az égéslevégő előmelegítése - változtatása. A többletlevégő mennyiségének növelésével csökken a tűztér-hőmérséklet, viszont nő a füstgáz mennyisége is.
 - Hőelvonás közvetlenül a tűztérbe épített besugárzott fűtőfelületekkel (membránfalakkal) - leginkább kommunális hulladékégetőknél alkalmazzák.
 - Hőmérséklet-csökkentés kis fűtőértékű hulladékok, vagy víz betáplálásával.
 - A hőmérséklet-növelés nagyobb fűtőértékű hulladék adagolásával vagy póttüzelés alkalmazásával lehetséges.
 - Az égetési folyamat megbontásával, elkülönített égésterekben. Ekkor az első szakaszban lényegében egy csökkentett hőmérsékleten végbemenő hőbontási folyamat játszódik le levegőszegény - oxigén szegény - körülmények között. A második szakaszban a hőbontás során nyert égethető termékeket is légfelesleg mellett tökéletesen kiégetik. Ennél a megoldásnál csupán a második égéster hőmérsékletét kell szabályozni.

- 17.) A hulladékégető berendezésekben a szükséges égéslevegő mennyisége átlagosan 40-100%-kal nagyobb, mint a sztöchiometriai égéshez szükséges elméleti levegő mennyisége.
- 18.) A rostélytüzelő berendezéseknél a szokásos légfelesleg-tényező 1,3 – 1,9; a forgó dobkemencéknél 2 – 2,5 nagyságrendű. Az örvényágyas kemencék ezzel szemben általában 1,1 – 1,3-as légfelesleg-tényezővel üzemeltethetők.
- 19.) Abban az esetben, ha a füstgáz tökéletes elégetése a tűztérben nem valósítható meg, úgynevezett utóégetőtér hozzákapcsolása szükséges – ahol ez lehetséges. Például forgó dobkemencéknél ez bevett módszer.
- 20.) A tűztéren belüli áramlási sebességet úgy kell tervezni és megválasztani, hogy 3-5 m/s alatt maradjon.
- 21.) Aláfűvósos üzemben ügyelni kell, hogy a tűztérben ne lépjen fel túlnyomás.
- 22.) TSZH-nál az átlagos fajlagos rostélyterhelés 150 – 400 kg/m². Ez annyi kilogramm tüzelőanyagot jelent, amennyi 1 m² rostélyfelületen 1 óra alatt a legjobb hatásfokkal tüzelhető el.
- 23.) A kazánok tűzterét és első huzamát úgy kell méretezni – beleértve a membránfalat burkoló tűzálló falazat magasságának meghatározását -, hogy a füstgázok hőmérséklete a szekunderlevegő betáplálástól számított minimum 2 másodpercen keresztül 850 °C felett legyen.

5. Az energiakiadási lehetőségek

„1904. november 9-én, a Székesfőváros mérnöki hivatala, tisztelettel javasolja, hogy a szemét kezelésében követett eddigi eljárásokkal szemben – főképpen a higiéniai előnyei és tökéletessége miatt – szemétegető telep elhatározni méltóztassék a tekintetes székesfővárosi tanács.” [63]

Az indoklás több mint 115 évvel ezelőtt született. A tanulmányban az is elhangzik, hogy a központi égető felállítása után a szállítási távolság csökkenése miatt kevesebb lóra és abrakra lesz szükség a budapesti szemétszállításban.



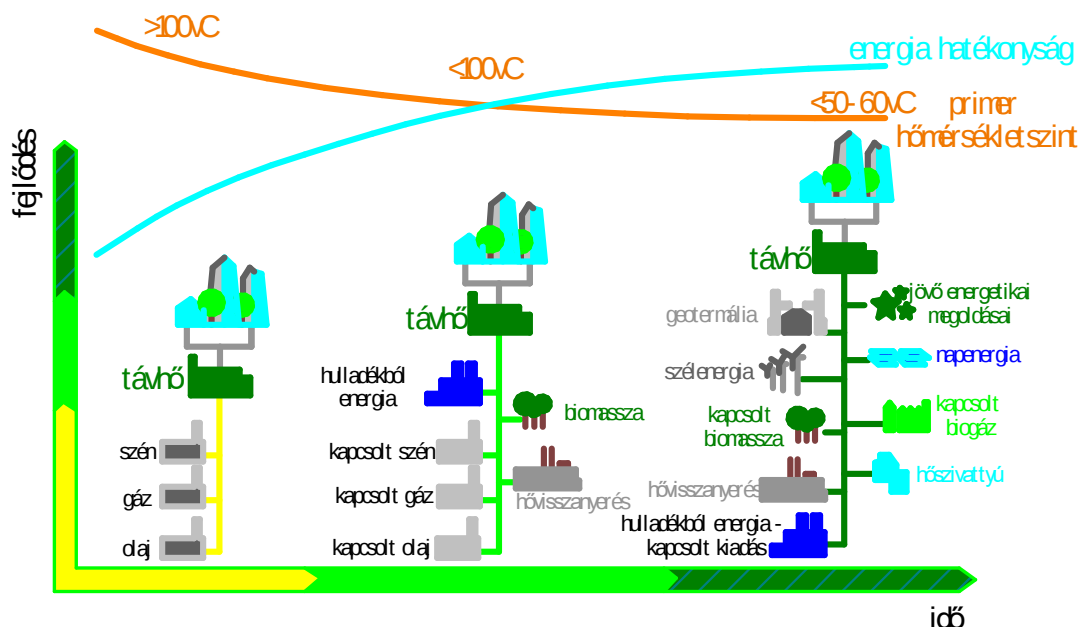
29. ábra. Szemétszállító lovas kocsi Budapesten [54]

Fodor István (Etienne de Fodor) Budapesti Általános Villamossági Rt. igazgatója, már az 1911-ben megjelent könyvében felhívta a figyelmet a hulladék elégetésében rejlő lehetőségekre. [17]

Ahogy a városokban élők száma folyamatosan növekedett, egyre újabb és újabb energiahordozókat kellett az energiaátalakítási portfólióba állítani. Szükség volt az energiahordozók tárházát bővíteni, mert folyamatosan nőttek a mennyiségi igények. A minőségi fejlődést az energiahatékonyság növekedése, és a távfűtésnél a primer hőmérséklet szint csökkenése biztosította. Kissé szatirikusan megfogalmazva egyes távhőrendszerekben ma már a használati melegvíz igények által elének állított minimális hőmérsékleti igények kielégítése okoz problémát, olyan alacsony előremenő hőmérséklettel tudnak üzemelni a távhőrendszerek (30. ábra).

Ma a szigorodó környezetvédelmi előírások és az energetikával szemben állított követelmények miatt a városok nagyobb többségének az energiaellátása távhő rendszerek üzemeltetése nélkül elképzelhetetlen – gondoljunk csak bele a centrális –

decentrális füstgáz kibocsátásának korábban leírt gondolatára. Mind a gazdasági, mind a műszaki, mind a környezetvédelmi, illetve a rendelkezésünkre álló hulladékkezelési technológiákra való tekintettel, a hulladékégető erőművekben előállított villamos energia és távhő szerepének lehetőséget kell biztosítsunk a városok energia ellátásban.



30. ábra. Az energiahordozók fejlődése a városok energiaellátásában [40]

5.1. A kapcsolt energiatermelésről

A városok távhőellátásának fejlődését „generációkra” oszthatjuk. Ma már a negyedik generációs távhő rendszerekről beszélhetünk. Az egyes generációk fejlődését mindig más cél motiválta. Az 1800-as évek közepén – az első generációs távhő rendszereknél – a társadalmi motivációt a távhő által biztosított kényelem és biztonságos energiaellátás jelentette. Az 1930-as években megjelentek a második generációs rendszerek, melyek fejlődési irányát a világtörténelem alakulása rajzolta ki. A társadalmakban igény jelentkezett az olcsó energiára, és felismerték, hogy az energia sincs ingyen. Így a költségek csökkentése és a centralizált energiatermelés okozta tüzelőanyag megtakarítási lehetőségek jelentették a fő fejlődési irányt. Az 1980-as évektől az olajválságot követően az energiamegtakarítási igények tovább fokozódtak. A folyamatosan, megfelelő mennyiségben és minőségben rendelkezésre álló, és folyamatosan növekvő energiaigények indították el a harmadik generációs távhő rendszerek fejlődését. Napjainkban pedig, ahogyan a rendszerszintű energetikában sem, így a távhőellátásban sem kerülhetjük meg a környezetvédelmi kérdéseket. A negyedik generációs rendszerekben már a klímavédelemmel kapcsolatos igények

jelentik a fő társadalmi motivációt. Továbbá az Európai Bizottság „a stabil és alkalmazkodóképes energiaunió és az előretekinthető éghajlat-politika keretstratégiája” címet viselő közleményében az energiahatékonyságot, mint energiaforrást jelöli meg. [16] A negyedik generációs távhő ellátásban is megjelenik a veszteségfeltárásra, csökkentésre irányuló célkitűzés.

Hulladékégetés szempontjából azt a fontos megállapítást tehetjük, hogy mindegyik generációs távhőrendszerben megjelenik a hulladék, mint tüzelőanyag (11. táblázat). Tehát mindig jelen volt, és a jelen tudásunk alapján kijelenthetjük, hogy jelen is lesz a modern távhőrendszereknél a szemét eltüzelése, mint energiaforrás.

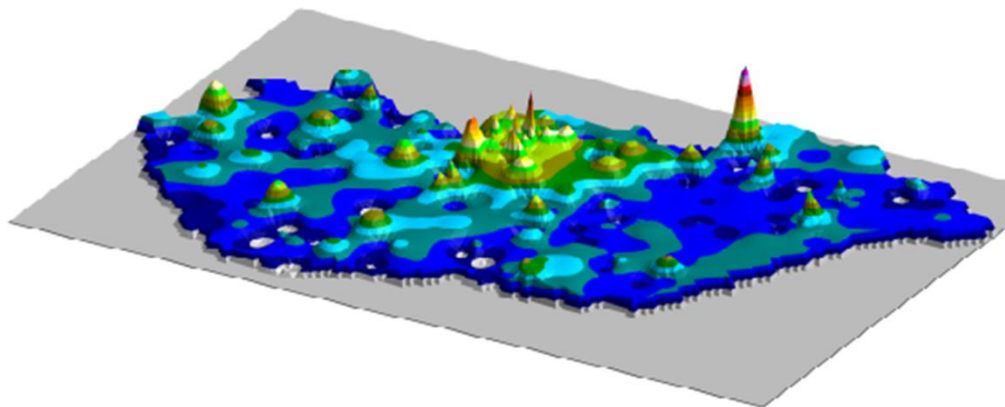
11. táblázat. Távhőtrendek a világban 1850-2050 [3]

1G: 1850-1930	2G: 1930-1980	3G: 1980-2020	4G: 2020-2050
hőhordozó közeg: >200 °C gőz	hőhordozó közeg: +100 °C forróvíz	hőhordozó közeg: <100 °C melegvíz	hőhordozó közeg <50-70 °C melegvíz
hőforrások: széntüzelésű gőz- kazánok, szén- és hulladéktüzelésű fűtőerőművek	hőforrások: szén- olaj- és hulladéktüzelésű fűtőerőművek, fűtőművek	hőforrások: diverzifikált tüzelőanyag bázisú kapcsolt energiatermelés, különbféle zöldenergiák, hulladék, hulladékhők	hőforrások: diverzifikált tüzelőanyag bázisú kapcsolt energiatermelés, különbféle zöldenergiák, hulladék, hulladékhők, Jövő energia-forrásai
hőtárolók	hőtárolók	hőtárolók	szezonális hőtárolás
hőszállítás: helyszínen szigetelt acélcsövek	hőszállítás: helyszínen szigetelt acélcsövek	hőszállítás: előre hőszigetelt acélcsövek	hőszállítás: előre hőszigetelt acélcsövek, műanyagcsövek
hőleadók: >90 °C- os radiátorok	hőleadók: max.90 °C- os radiátorok	hőleadók: +70 °C- os radiátorok	hőleadók: <40 °C-os radiátorok
mérés: felhasznált gőzmennyiség	mérés: áramlásmérők, hőmennyiségmérők, éves vagy havi leolvasás, esetenként költségmegosztók	mérés: hőmennyiség- mérők, gyakori távleolvasás	mérés: fogyasztó központú okos mérés

A sűrűn lakott városokban a távhőellátásnak kiemelten fontos szerepe van, illetve fontos szerep fog jutni. A hulladékégetés bázisán alapuló hőenergia termelés – mint energetikai potenciál – azért kiemelkedő, mert például Budapesten jelenleg a legnagyobb mennyiségben – mint kb. 50%-ban megújuló energiaforrás -, a TSZH áll rendelkezésre.

A hulladék helyi energiaforrás? Igen, ezt elmondhatjuk a hulladékról, mivel az a lakosságtól, vagy az ipar szereplőitől kerül begyűjtésre. Ráadásul a kereslet és kínálat

találkozásának eredményeként az energiára jelentkező igény is területileg eltérően jelentkezik. A nagy lélekszámú városok közelében, vagy az ipari központok közelében nagyobb mennyiségű energiaigény jelentkezik. Nincs ez másképp Magyarországon sem. A főváros térségében és a nagyobb ipari gyárak által állított energiaigény miatt a villamos energia felhasználása területileg igen heterogén eloszlást mutat (31. ábra).



31. ábra. Villamos energia fogyasztási csúcspontok regionális elhelyezkedése [24]

A települési hulladékok hasznosításának több útja lehetséges. A szemet elégetése a gőztermelésre és ennek bázisán a hőhasznosításra, a hőellátásra, a villamosenergia-termelésre vagy a kapcsolt energiatermelésre ad lehetőséget. Megállapítható tehát, hogy a hulladékégetés előnye – energia piaci szempontból – kettős. Egyrészt a nagyvárosokban, sűrűn lakott ipari területen áll rendelkezésünkre a megfelelő mennyiségben a hulladék, másrészt a tüzelés során felszabadított villamos- és/vagy hőenergiára is ezekben a régióban jelentkezik az igény.

A hulladék tüzelőanyagban kémiaiilag kötött energia hőtartalmának hulladékhasznosító műben történő elégetése során gőzt és villamos energiát nyerhetünk.

A kapcsolt energiatermelés – villamos energia és hasznos hőenergia egyazon technológiai folyamatban és berendezés csoportban való együttes előállítása – végigkíséri a távhőrendszerek generációinak fejlődését. Kezdetben hagyományos erőművekben, majd hulladék tüzelőanyagra alapozott erőművekben is elterjedtek a kapcsolt energiatermelés technológiái. Az erőművi mérethez illeszkedő (táv)hőigények megjelenésével lehetőség nyílt a kondenzációs körfolyamat energetikai hatásfokát lényegesen meghaladó hatásfok elérésére. A hulladék tüzelőanyag tulajdonságai által korlátozott, viszonylag alacsony kezdő gőzparaméterek és a relatíve jelentős villamos önfogyasztás mellett a kondenzációs termelés hatásfoka nem sokkal haladja meg a 20%-ot, ez a kapcsolt hőtermelés révén - az ellátott hőigény nagyságától függően - akár 65-75%-ra is növelhető.

A kapcsolt termelés elvételes-kondenzációs-, illetve ellennyomású technológiával is megvalósítható. Mivel a hulladékhasznosító művel szemben alapvető igény a viszonylag folyamatos hulladékáram feldolgozása, ellennyomású technológia alkalmazása csak szintén folyamatos és állandó hőigény (pl. technológiai gőzigény) esetén javasolható, de bizonyos szükséghűtő kapacitás létesítése nagy valószínűséggel ilyenkor sem kerülhető meg.

A hulladékégető művek a leggyakoribb esetekben a füstgázok hőenergiáját, gőztermelés közbeiktatásával, (elvételes-)kondenzációs, vagy ellennyomású gőzturbinával villamos energia és távhő előállítására hasznosítják.

Az energiaátalakítás során a kazánban az alábbi gyakorlati „ökölszámokkal” számolhatunk, melyek pontos értékei természetesen erőművenként változnak:

- az elégett tüzelőanyag hőtartalmának kb. 70 – 80%-át lehet gőztermelésre hasznosítani,
- a füstgázokkal távozó hőveszteség nagysága 16 – 30%,
- a salak kiégetlen alkotóival távozó hőveszteség mértéke 1,5 – 3%,
- a salak kihordott hőveszteség ugyancsak 1,5 – 3%,
- a kazán sugárzási veszteségeinek nagysága 1 -2%.

A hulladékégetés bázisán átalakított energia hasznosításának ráadásul energiahatékonysági előírása is van. Az Európai Parlament és a Tanács 2008/98/EK (Hulladék Keret Irányelv) irányelve a hulladékégető művekkel szemben - a szakmában csak „R1” képletnek hívtat –energiahatékonysági előírást támaszt.

$$\text{Energiahatékonyság} = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (26.)$$

ahol,

E_p - éves hőenergia- és/vagy elektromosenergia-termelés. Kiszámítása: az energia megtermelt elektromos áram formájában szorozva 2,6-del és a kereskedelmi használatra előállított hőenergia szorozva 1,1-del (GJ/év),

E_f - a rendszer éves energia inputja a gőz termeléséhez hozzájáruló tüzelőanyagokból (GJ/év),

E_w - a kezelt hulladék energiatartalma éves szinten a hulladék nettó fűtőértékével számítva (GJ/év),

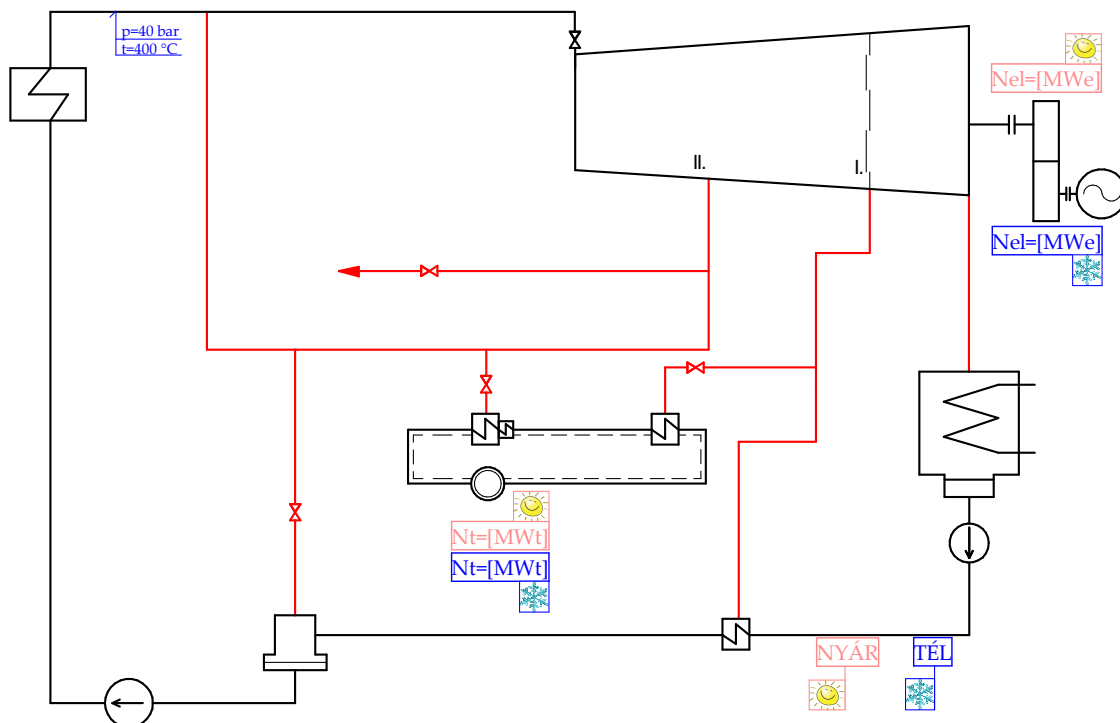
E_i - éves bevitt energia az E_w és az E_f kivételével (GJ/év),

0,97 - a fenékhamu (salak) és a sugárzás miatt bekövetkező energiaveszteség-faktor. [4]

Az R1 képlet értelmében csak azok az égetőművek számítanak hulladékhasznosítónak, ahol az energetikai hatékonyság meghaladja az új égetőműveknél a 65%-ot, a meglévőknél a 60%-ot (2008. december 31. az új és a régi között a választó vonal). Az ennél alacsonyabb energiahatékonyságú égetők „csak” ártalmatlanítók.

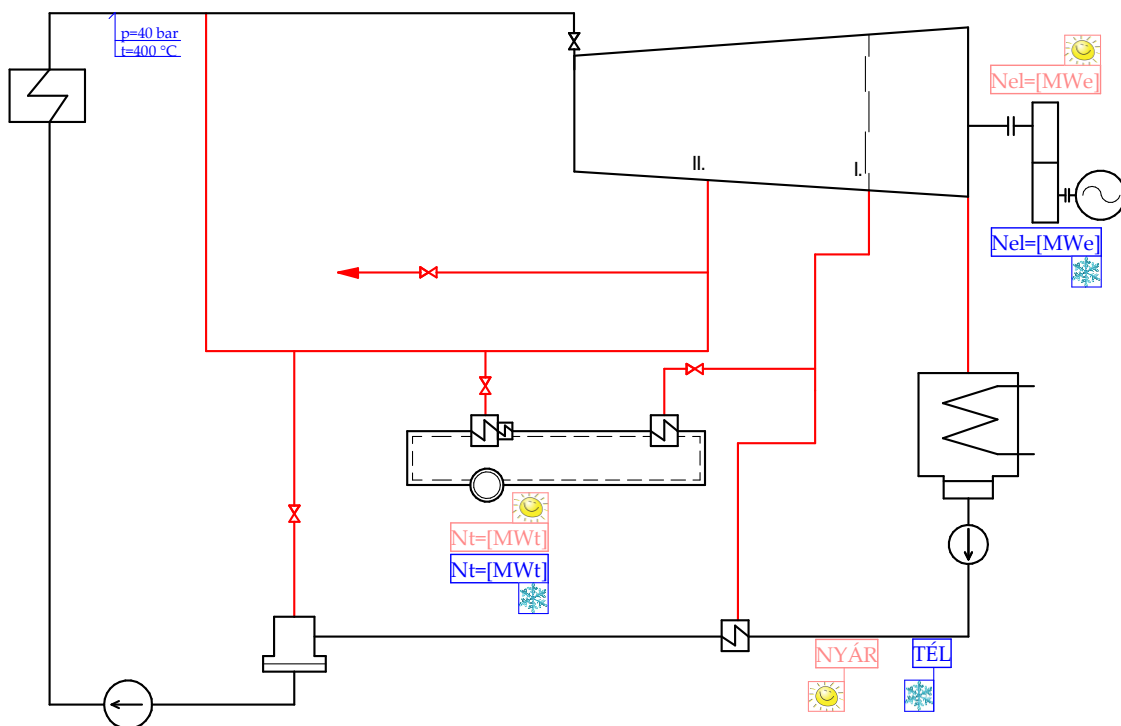
Azoknál az égetőműveknél, ahol nem lehet jelentős energiaigényű hőfelhasználáshoz kapcsolni - lakossági távhő, illetve ipari hőfelhasználó - és így a távhőszolgáltatás aránya kicsi és nyáron gyakorlatilag csak kondenzációban lehet villamos energiát termelni, az összen energetikai hatásfok nem lehet magasabb 30%-nál. Vagyis a lehetőségekhez képest szükség van kapcsolt energiatermelés megvalósításához a hulladékégető erőműveknél. Németországban a 66 vegyes hulladék égetőműből 60 darab hő- és villamos energiát szolgáltat és csak 6 égetőmű van, amelyik nem ad ki kapcsoltan energiát. [6]

Az égetőművek tervezési szempontjainak egyik nagyon fontos tervezési szempontja az égetés során felszabaduló energia hasznosítása. A lenti ábrán egy égetőmű általános kapcsolási vázlat látható (



32. ábra). Az elvételes-kondenzációs körfolyamat során termelt hő forróvízes távhőrendszerben hasznosul.

Általánosságban elmondható, hogy a turbináról két elvételen, illetve megcsapoláson veszik ki a gőzt, mellyel egy-egy hőcserélőt fűtenek. Az első megcsapolás a csúcsigényeket fedezi (lenti ábrán II.-es jelű), míg a második megcsapolás (elvétel) az „alap – általános” terhelést szolgálja ki (lenti ábrán I.-es jelű). Ennek a kialakításnak az oka egyszerű. Az első megcsapolásnál még magasabb az entalpiája a gőznek, és így az elvételkor magasabb hőtechnikai igényeket (nagyobb előremenő hőmérséklet) tud kiszolgálni. Természetesen amennyiben a II.-es megcsapoláson nagyobb tömegáramú gőzt vesznek el, úgy a turbina hátrébb levő részein kevesebb tömegáramú gőz tud tovább munkát végezni.

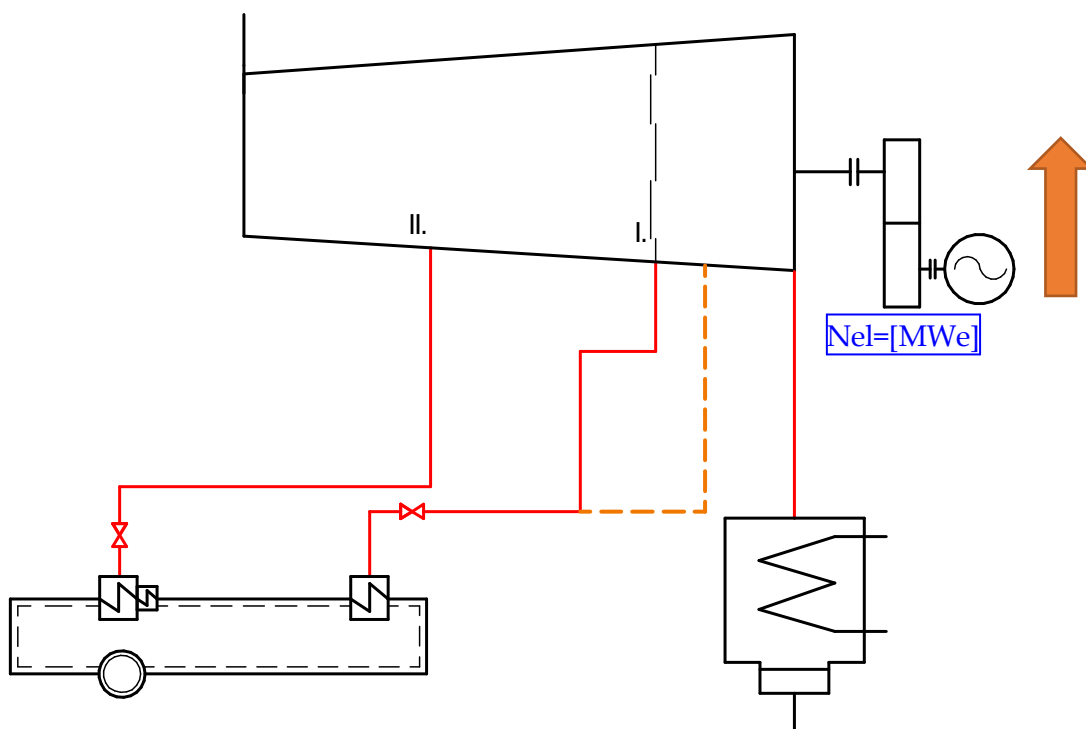


32. ábra. Hulladékégetőmű általános kapcsolási sémája [26]

A csúcshőteljesítmény-igények rövidebb ideig jelentkeznek, míg az általános – alap – igényekre jóval hosszabb ideig, sokkal több nap időtartamban van szükség. Azonban ezeket a hőigényeket, az alacsonyabb entalpiával rendelkező gőz is ki tudja elégíteni, így elegendő az I.-es számú megcsapolásról elvett gőz hőtechnikai kapacitása.

Jelen írás – többek között terjedelmi korlátok miatt is – megpróbál általános megoldásokat bemutatni. Természetesen minden egyes projekt más és más, mindenhol lehetnek – és az ipari gyakorlatban vannak is – egyedi, eltérő megoldások. Az egyik legáltalánosabb, energetikai variálási lehetőség, vagy úgy is mondható, hogy energetikai tartalék, az egyes megcsapolások helyes pozíciójának megválasztása. Elsősorban idősebb égetőművek rekonstrukciója során elterjedt

megoldás, hogy a hátsó – I.-es számú – megcsapolást hátrébb viszik egy turbina csere során. Ezzel a megoldással a turbinán nagyobb tömegáramú gőz tud tovább expandálni és munkát végezni, és a kiadott villamos energia aránya nagyobb lesz (33. ábra).



33. ábra. Növelt villamos energia kiadás lehetősége

Az alapos és részletes megértés és bemutatás miatt egy hőséma is közlésre kerül, melynek adatai nem egy működő égetőmű paraméterei, hanem egy, a tervezőasztalon létező hulladékhasznosító égetőmű paraméterei. Az értékek egy 100.000 tonna/év hulladékégetési kapacitású égetőműnek megfelelő hőtechnikai adatok, melyek mértéküket tekintve helyes, pontos adatok. A bemutatott hősémán jelöltem mind a nyári hónapokhoz, mind pedig a téli időszakhoz tartozó meghatározó hőtechnikai paramétereket, melyek rendre: a tömegáram, a nyomás, az entalpia és a hőmérséklet (35. ábra).

A kapott értékekből kiadódik a távhőellátás részére kiadható hőenergia, mely a hidegebb téli hónapokban a fűtési és HMV igények kielégítését egyaránt szolgálja, míg a melegebb nyári időszakban csak a melegvíz-igényeket fedezi. A kiadható energiák fűtési szezonban és az azon kívüli mennyiségeit a hőcserélő előtti és utáni entalpiák és tömegáramok szorzatának a különbségei adják meg.

A lenti egyenletekben a téli, majd a nyári időszakban kiadható hőteljesítmény kiszámítási módját és értékeit láthatjuk,

$$Nt_{tél} = (\dot{m}_1 - h_1) - (\dot{m}_2 - h_2) =$$

$$\left(253,7 \frac{kg}{h} - 438,15 \frac{kJ}{kg}\right) - \left(253,7 \frac{kg}{h} - 263,27 \frac{kJ}{kg}\right) = 55783,56 \frac{kJ}{h} = 15,5 MW_t \quad (27.)$$

$$Nt_{nyár} = (\dot{m}_1 - h_1) - (\dot{m}_2 - h_2) =$$

$$\left(22,26 \frac{kg}{h} - 365,08 \frac{kJ}{kg}\right) - \left(22,26 \frac{kg}{h} - 187,21 \frac{kJ}{kg}\right) = 3959,4 \frac{kJ}{h} = 1,1 MW_t \quad (28.)$$

ahol,

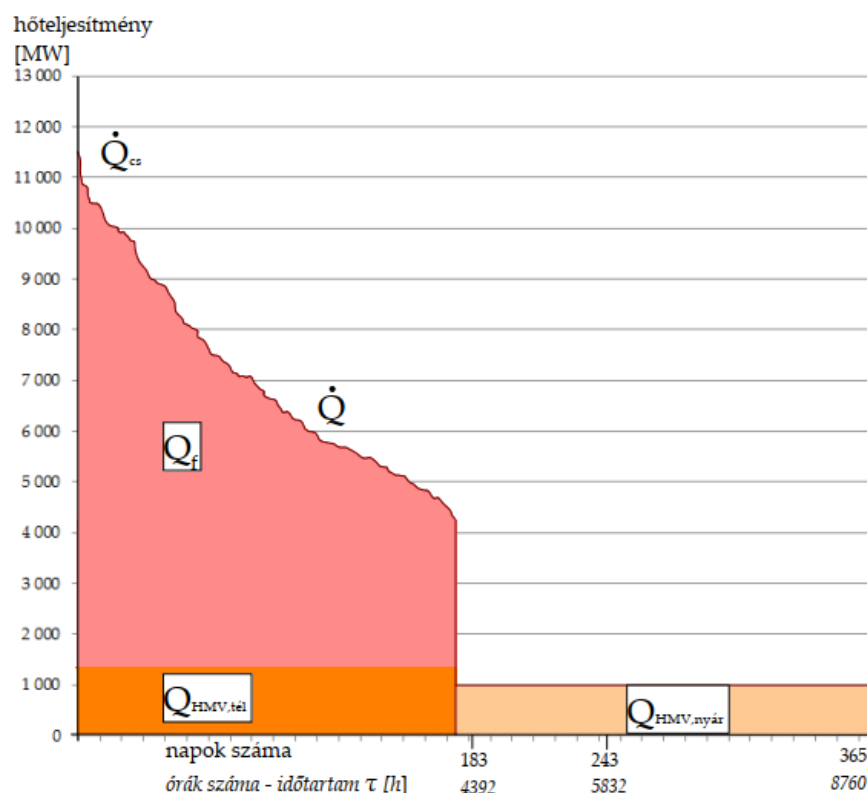
$Nt_{nyár}$ – a nyári időszakban kiadható hőteljesítmény [MW_t],

$Nt_{tél}$ – a fűtési időszakban kiadható hőteljesítmény [MW_t],

$\dot{m}$ - tömegáram $\left[\frac{kg}{h}\right]$,

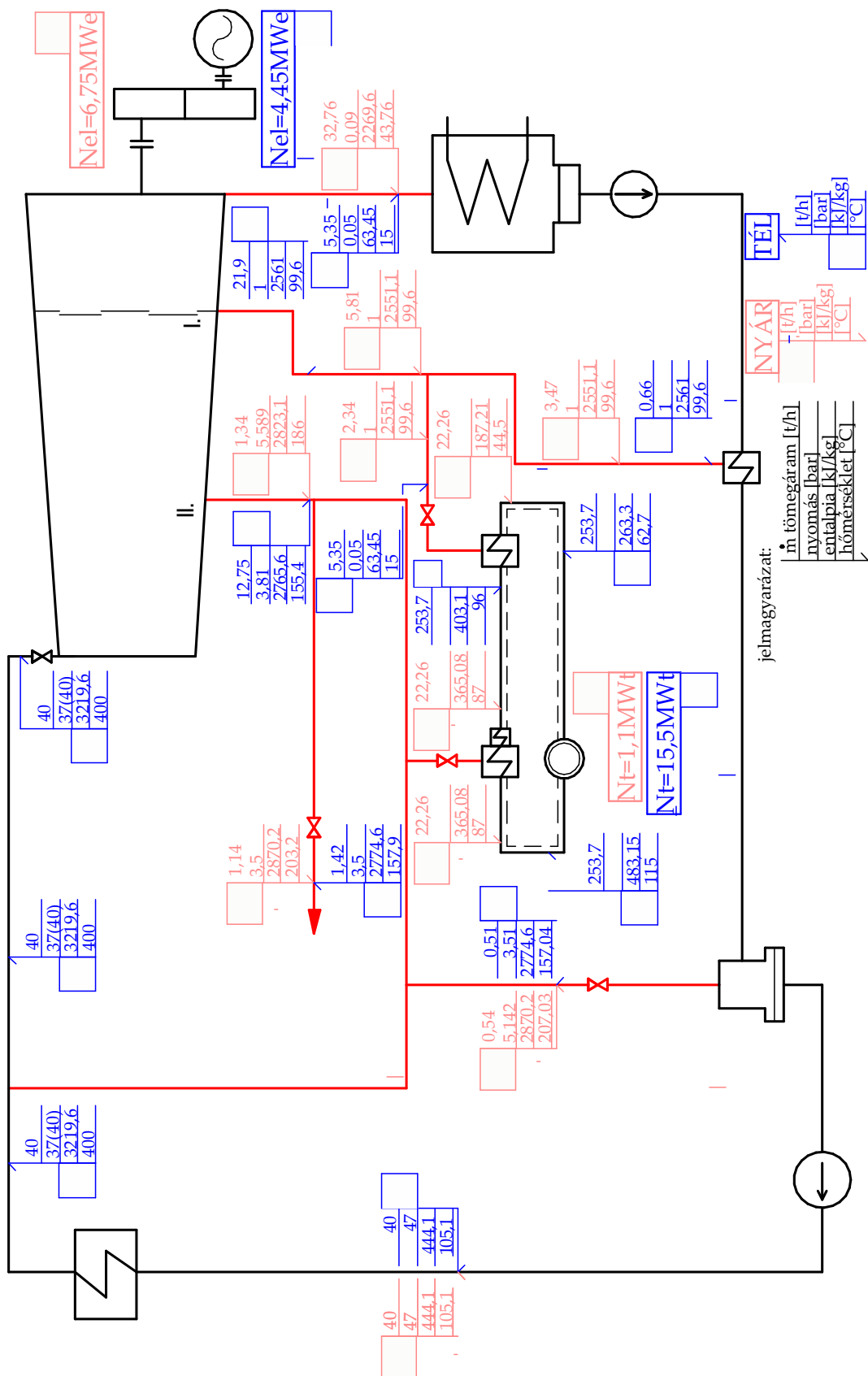
h - entalpia $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$.

Természetesen az április 15-e és október 15-e közötti időszakban fűtési távhőigény nem merül fel, így a téli időszakban a kiadható hőenergia mennyisége lényegesen nagyobb. Az erőművi tervezési gyakorlatban a hőhasznosítási kapcsolással a hőigények folyamatos változásához alkalmazkodni lehet: a nyári hónapokban magasabb a villamosenergia-termelés részaránya, míg a téli hónapokban a távhőhálózatba kiadott energia részaránya magasabb. A rendszer kapcsolásának gyakori megoldása, hogy a városi távhőszolgáltató hőcserélőinek az elvételes kondenzációs turbina megcsapolásáról érkező gőzre mindig elsőbbsége van, vagyis amennyiben igény jelentkezik a távhőszolgáltató részéről, akkor az legyen elsődlegesen kielégítve.



34. ábra. Nagyvárosok éves tartamdiagramjának jellege [26]

A téli időszakban a távhőszolgáltató részéről HMV és fűtési igények vannak, míg a nyári időszakban csak HMV igények kielégítéséről kell gondoskodni (34. ábra). Viszont a kiadható energia mennyisége rendelkezésre áll. Természetesen érdemes a karbantartási leállást erre az időszakra tervezni. További előremutató lehetőség, ha ipari fogyasztónak van lehetőség a megtermelt energiát kiadni, így állandó gőzigényről tudunk gondoskodni. Ilyen lehetőség, ha például egy patyolatot kapcsolunk a hulladékégetőműhöz, mely akár 60 – 80 t/h gőztömegáramot is le tud kötni egész évben. Így biztosítva az egész éves állandó gőzigényt, a megtermelt energia állandó hasznosítását.



35. ábra. Elvi hulladékégetőmű hősémája [26]

Lengyelország a közelmúltban hat új égetőművet állított üzembe. Ezen égetőművek mindegyike kapcsolatosan ad ki energiát, így hasznosítva a hulladékégetés során megtermelt gőzt. A lenti táblázatban foglaltam össze az égetők legfontosabb paramétereit, melyeken jól látszik, hogy milyen mértékben adnak ki hő- és villamos energiát az erőművek (12. táblázat).

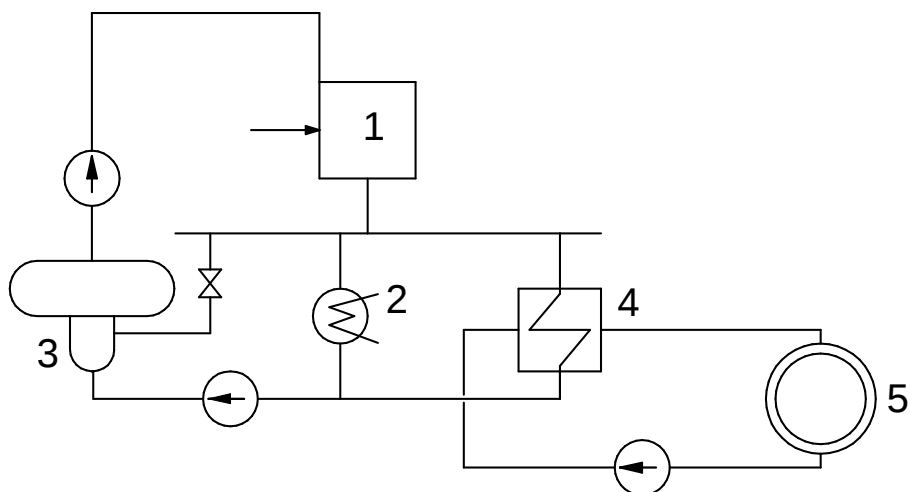
12. táblázat. Lengyelországi égetők paraméterei

	Bydgoszcz	Krakow	Bialystok	Szczecin	Konin	Poznan
kapacitás [t/év] – elégetett hull. mennyisége	180.000	220.000	120.000	150.000	94.000	210.000
kazán kapacitás [t/h] rostélyteljesítmény	2 x 11,5	2 x 14,1	1 x 15,5	2 x 10	1 x 12,05	2 x 13,5
éves üzemórák száma [h]	7800	8100	8050	7500	7800	7800
fűtőérték [MJ/kg]	8,5	8,8	7,5	10,5	8,5	8,4
kiadott hőenergia [MW _{th}]	27,7	35	17,5	32	15,5	34
kiadott villamos energia [MW _e]	15	16,2	8,68	14,1	6,77	15

5.2. A hőenergia kiadásáról és annak hasznosításáról a távhőhálózatokban

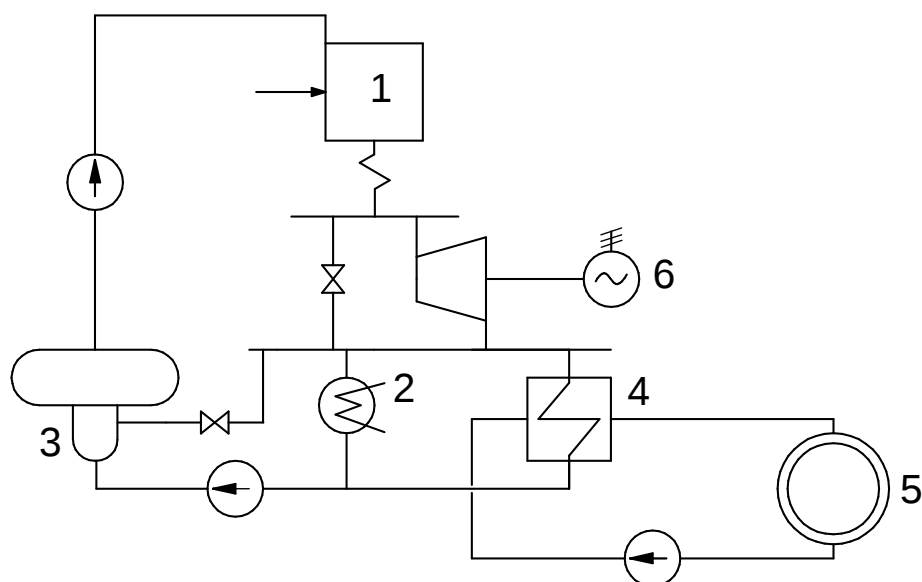
A hőhasznosítás lehetősége és módja a hulladék mennyiségének, jellemzőinek, valamint a helyi hőértékesítési feltételeknek ismeretében határozható meg. A nagyteljesítményű kommunális és ipari hulladékégetők felszabaduló hőenergiájának hasznosítására a következő főbb kapcsolási rendszerek terjedtek el. [31]

Fűtőműves változat: A termelt kisnyomású gőzt távhőszolgáltatásra vagy ipari gőzszolgáltatásra hasznosítják. (Jellegzetes gőzparaméterek: hőmérséklet 200...250 °C, nyomás 1,5...2 MPa.) A fogyasztók napi és éves hőigénye ingadozik, ezért a hulladékégető egységeket általában a hagyományos tüzelésű kazánokkal párhuzamosan kapcsolatosan üzemeltetik. Így az alapterhelést a hulladékégető mű szolgáltatja. A gőzértékesítés az ipari üzemek és az infrastrukturális létesítmények felé kiegyenlítettébb éves hőfogyasztást jelent, mint a távfűtés. Olyan létesítményeket kell választani, amelyek az év folyamán megközelítőleg egyenletes hőmennyiséget igényelnek. Ilyen üzemek például a vágóhidak, hűtőházak, tejüzemek, kórházak, patyolatok, vegyipari üzemek stb.. Legkedvezőbb megoldás, ha a hulladékégető művet olyan helyre lehet telepíteni, ahol vagy már létezik, vagy tervbe van véve a távhőellátást szolgáló fűtőmű (36. ábra).



36. ábra. Fűtőműves változat [31]
1. égetőberendezés kazánnal, 2. kondenzátor, 3. tápvíz-előkészítés,
4. hőcserélő, 5. távhőhálózat

Fűtőerőműves változat: Az előző megoldáshoz hasonló, azzal a kiegészítéssel, hogy a hulladékégető műben ellennyomásos turbina is létesül. A termelt gőzt először az ellennyomásos turbinában expandáltatva villamosenergia-termelésre hasznosítják, majd a távozó gőzt távhőhálózatba vagy hőcserélőbe vezetik. Az így termelt villamos energia fedezi az égetőmű önfogyasztását. Ennél a megoldásnál is célszerű a hulladékégető művet a hagyományos tüzelésű fűtőerőművel párhuzamosan kapcsolva üzemeltetni. Az ellennyomásos rendszer megvalósításának gazdaságossági feltétele, hogy legalább 10...15 t/h gőztermelés folyamatosan biztosított legyen.



37. ábra. Fűtőerőműves változat [31]
1. égetőberendezés kazánnal, 2. kondenzátor, 3. tápvíz-előkészítés,
4. hőcserélő, 5. távhőhálózat, 6. turbina generátorral

Kondenzációs erőműves változat: A hulladékégetők telepítési helyének kiválasztását döntően befolyásolják a szállítási költségek. Előfordulhat, hogy a termelt gőzt nem lehet a közelben levő erőműnek vagy hőfogyasztónak átadni. Ebben az esetben a hőhasznosítás egyedüli módja kondenzációs turbina felhasználása, azaz a gőz kizárólagosan villamosenergia-termelésre való hasznosítása. Ez a megoldás biztosítja a legnagyobb mennyiségű villamos energiát, azonban a nagyobb beruházási költségek és a nagy fajlagos hőfogyasztás miatt ez a változat hőhasznosítás szempontjából nem igazán kedvező. Ökölszámként megjegyezhető, hogy 1 tonna, 8000 kJ/kg fűtőértékű hulladékból max. 350...450 kWh villamos energia termelhető.

Azonban van arra is példa, amikor nincs más műszaki lehetőség, csak kondenzációs erőműves változat létesítése. Afrikában megépült az első hulladékhasznosító mű, Etiópia fővárosában, Addisz-Abeba-ban. Mivel az ország földrajzi fekvéséből következően nincs szükség távhő kiadására, így ebben az esetben csak villamosenergia kiadás történik.

Fűtőerőműves változat elvételes kondenzációs turbinával: Ez a megoldás lehetővé teszi, hogy a hulladékégető mű gőztermelése a hőfogyasztók változó igényéhez illeszthető legyen. Ezt a változatot rugalmasan lehet, mind kisebb, mind nagyobb hőfogyasztói körzet esetében alkalmazni.

Tekintettel az egyes változatok megvalósításának gazdasági vonzataira – hacsak lehetséges – a fűtőerőműves változatot, ellennyomású vagy elvételes kondenzációs turbinával kell előnyben részesíteni. A hulladékégetőben termelt gőz optimális hasznosítása nem a kondenzációs villamosenergia-termeléssel, hanem a nagyobb távhőrendszerekhez való illesztéssel érhető el. Így megfelelően biztosítható a folyamatos, alapterhelés jellegű gőzkiadás.

5.3. Fejlesztési lehetőségek

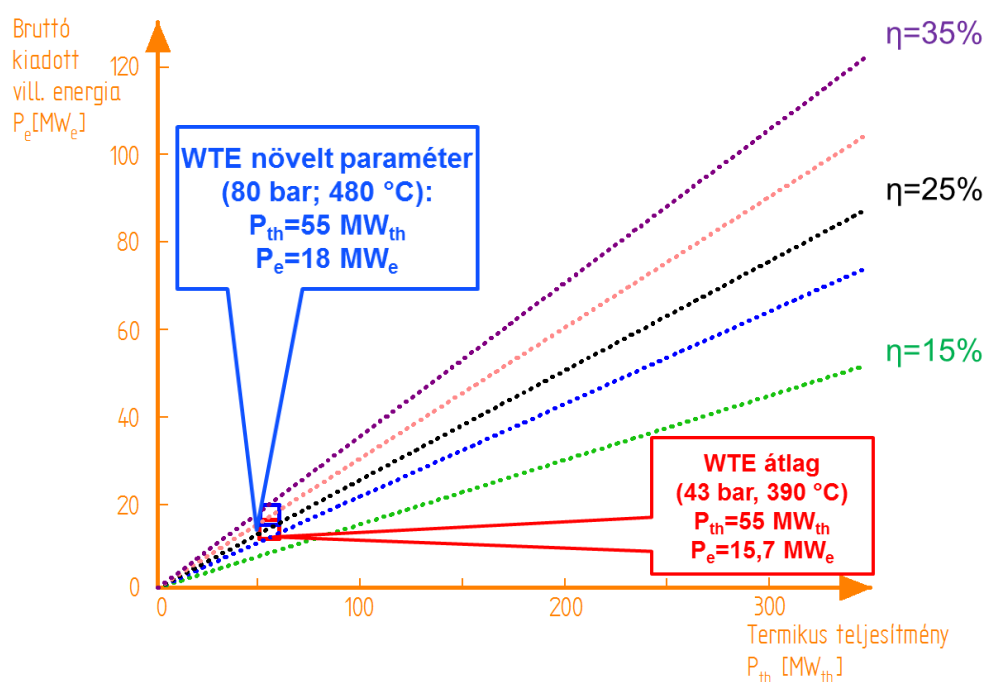
A jövő műszaki fejlesztési irányai kettősek. Egyrészt a fejlődő országokban a mennyiségi kérdések határozzák meg a fejlesztéseket. Ez alatt azt értem, hogy a hulladék növekvő mennyiségének a kezelési kérdései jelentik a problémákat. Erre – is – példa a már korábban említett első afrikai égetőmű Etiópiában. Az ország népességnövekedése szinte felfoghatatlan. Etiópia népessége 1960 óta megnégyesződött. Így ezekben a régiókban elsősorban a hulladékkezelés mennyiségi kérdései állítják megoldandó feladatok elé a mérnököket.

Más a helyzet a fejlett országokban. Ott elsősorban a minőségi kérdések határozzák meg a fejlesztési irányokat. Kijelenthető, hogy Nyugat-Európában a jelenlegi hulladékkezelési trendeknek megfelelően, elegendő égetési kapacitás áll a

rendelkezésre. Természetesen ez nem azt jelenti, hogy ezekben az országokban nem történik K+F tevékenység a hulladékégetőkben. Itt elsősorban a környezetvédelmi, energiahatékonysági kérdések irányában történnek fejlesztések.

Érdekes és nagymértékben előremutató fejlesztési irányt mutatnak be olaszországi példákon keresztül. Olaszország élen jár az Európai Unióban a hulladékégetés terén. Az európai nagyvárosok közül Brescia városa rendelkezik a legnagyobb égetési aránnyal. Ez alatt azt kell érteni, hogy itt a városban kiadott távhőnek a 70%-a hulladékégetésből származik.

Általánosságban az mondható el, hogy – korábban említett okok miatt – leggyakrabban a gőzkazánokban 40 bar és 400 °C-os túlhevítési paramétereken történik a gőz előállítása. Ebben az esetben az olaszországi égetők, átlagban 24-25%-os termikus körfolyamat-hatásfokot érnek el. [25] Olaszországban előremutató kísérletek – reménytelen eredményekkel – folynak a növelt paraméterű égetőművi körfolyamatok kialakítására. Ebben az esetben 80 bar-os és 480 °C-os hőmérsékletű gőzparaméterekkel „dolgoznak”, így a körfolyamat termikus hatásfoka 30%-ra emelkedik. Ezen megoldás elsősorban energiahatékonyság szempontjából szolgáltat eredményeket, illetve több villamos energiát tudnak kiadni a növelt gőzparaméterű körfolyamattal (38. ábra), de rizikót jelent a túlhevítők füstgázoldali korróziója szempontjából.



38. ábra. Olaszországi égetőművek energetikai paramétereit¹⁴ [25] [27]

¹⁴ WTE = Waste to energy. Az erőművi hulladékégetés nemzetközi mozaikszava.

A szemétegető erőművek általában csak hulladékot tüzelnek, kis mennyiségű földgázt vagy olajat csupán támasztó tüzelésre használnak. Amennyiben olyan helyzet áll fenn, hogy a helyi hőigényeket a szemétegető fűtőerőmű önállóan nem tudja kielégíteni, ilyenkor célszerű lehet a hulladékégetést más tüzelőanyag felhasználásával kombinálni.

További lehetőségként – és napjainkban szintén fejlesztési lehetőségként – áll rendelkezésünkre a szemétegető erőmű és a gázturbina kombinációja (39. ábra).

A giirstadt-i fűtőerőmű - Linköping, Svédország - hulladékégető kazánjának tüzelőhő felhasználása 73 MW, a gázturbináé 75 MW [10]. Így az együttes tüzelőhőfelhasználás,

$$Q_{\ddot{u}} = Q_{WTE} + Q_{GT} = 73 \text{ MW} + 75 \text{ MW} = 148 \text{ MW} \quad (29.)$$

ahol,

$Q_{\ddot{u}}$ - a befektetett összes tüzelőanyag mennyisége [MW].

A szemétegető kazán 18 bar nyomású és 207 °C hőmérsékletű telített gőzt fejleszt. A gázturbina hőhasznosítója ezt a gőzt és a saját termelésű gőzt együtt hevíti túl 430 °C hőmérsékletig. A hulladékégető ellennyomású gőzturbinája és a gázturbina is – egyenként - $P=25 \text{ MW}$ villamos teljesítményt ad vonalra a villamoshálózatnak. Az összes kiadott villamos teljesítmény a két turbina teljesítményének az összege lesz,

$$\Sigma P = P_{et} + P_{gt} = 25 \text{ MW} + 25 \text{ MW} = 50 \text{ MW} \quad (30.)$$

ahol,

ΣP – összes kiadott villamos teljesítmény [MW],

P_{et} – az ellennyomású turbina által kiadott villamos teljesítmény [MW],

P_{gt} – a gázturbina által kiadott villamos teljesítmény [MW].

A gőz- és gázturbinás egység villamos generátora közös. A fűtőerőmű kiadott hőteljesítménye $Q_f = 85 \text{ MW}$. A fenti adatok alapján meghatározhatjuk a kombinált tüzelésű fűtőerőmű energetikai hatásfokát,

$$\eta = \frac{\Sigma P + \dot{Q}_f}{\Sigma \dot{Q}_{t\ddot{u}}} = \frac{50 \text{ MW} + 85 \text{ MW}}{148 \text{ MW}} = 0,912 \xrightarrow{\cdot 100\%} 91,2\% \quad (31.)$$

ahol,

η – energetikai hatásfok,

$\dot{Q}_f$ - a fűtőerőmű kiadott hőteljesítménye [MW],

ΣP - összes kiadott villamos teljesítmény [MW],

$\Sigma \dot{Q}_{tü}$ - a befektetett összes tüzelőanyag mennyisége [MW].

Tehát a kombinált tüzelésű fűtőerőmű mennyiségi hatásfoka *91,2%*.

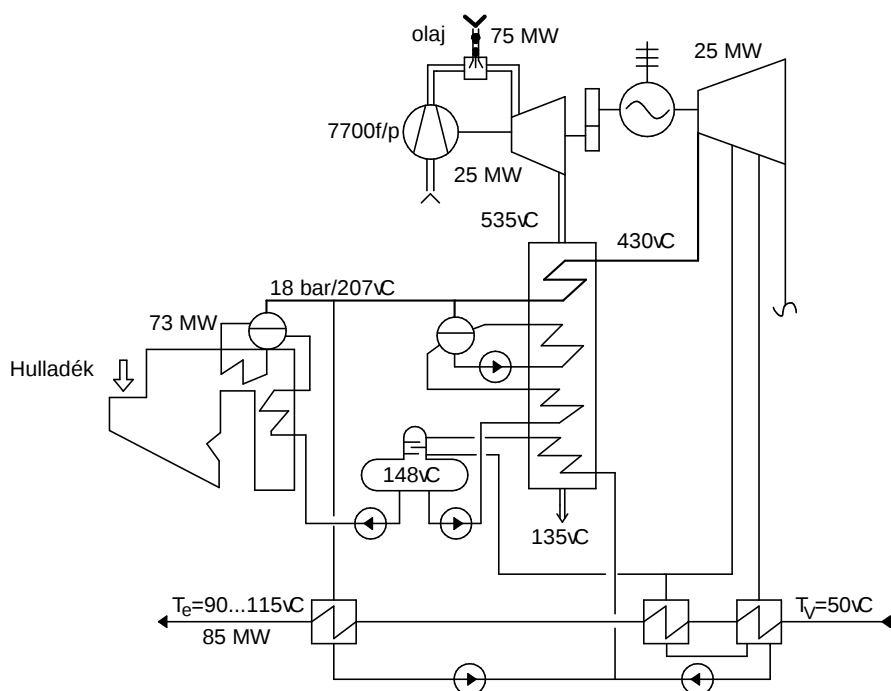
A megadott adatok alapján kiszámíthatunk egy másik fontos energetikai mutatót, a fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelés mutatószámát, mely megadja, a kapcsolt energiatermelésből származó villamos és hasznos hőenergia arányát. Betűjele: σ ,

$$\sigma = \frac{\Sigma P}{\dot{Q}_f} = \frac{50 \text{ MW}}{85 \text{ MW}} = 0,588 \xrightarrow{100\%} 58,5\% \quad (32.)$$

ahol,

σ - fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelés mutatószáma.

A kapott energetikai mutatószámok mindkét esetben nagyon magas energetikai hatékonyságot jelentenek. A gőzkörfolyamat összekapcsolása gázturbinával azokon a helyeken jelentheti a jövő megoldásait, ahol egy önálló hulladékégetőmű megvalósításához nem áll rendelkezésre elegendő hulladék.



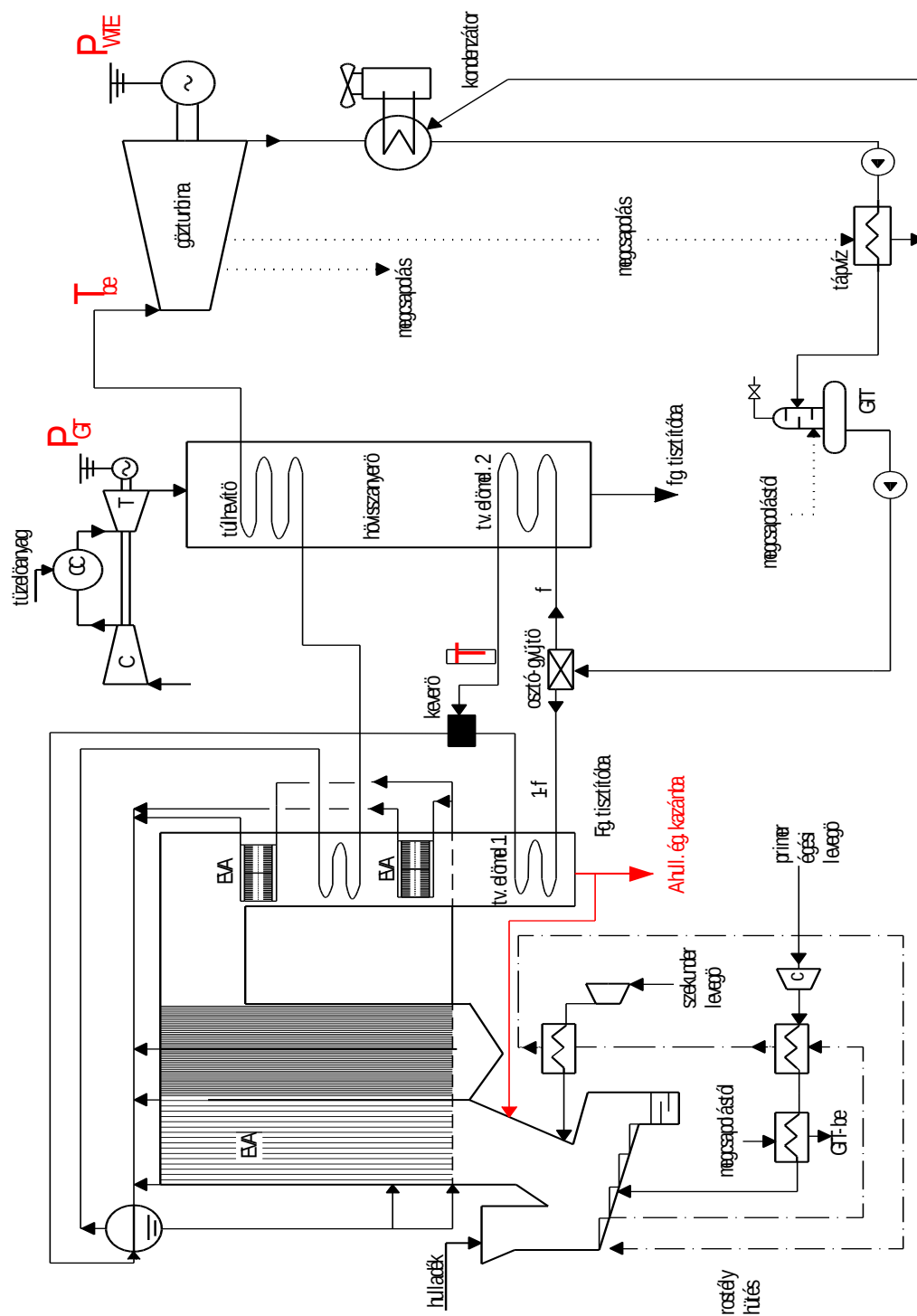
39. ábra. A svéd Giirstad fűtőerőmű hőkapcsolása és adatai [10]

A növelt paraméterű körfolyamat és a gázturbinás egység gőzkörfolyamattal történő összekapcsolására zajlanak fejlesztések – szintén Olaszországban. A jövőbe mutató megoldás szerint a szemétegető kazán 80 bar nyomású gőzt fejleszt. A gázturbina hőhasznosítója ezt a gőzt és a saját termelésű gőzt együtt hevíti túl 480°C-ig. Ezzel a kombinációval a körfolyamat hatásfoka 35-43%-os tartományban van, ami magasabb, mint a referencia – „hagyományos” – hulladékégetőművek hasonló adata.

A kiadható villamos teljesítményeket mutatja a táblázat (13. táblázat). Látható az egyes megoldásoknál, hogyan növekszik a kiadható villamos energia mennyisége.

13. táblázat. Az egyes fejlesztési lehetőségek összehasonlítása

	gőzparaméterek [bar / °C]	kiadható villamos energia [MW]
normál paraméterű körfolyamat	43 / 390	14,9
növelt paraméterű körfolyamat	80 / 480	17
gőz- és gázturbina összekapcsolása, növelt paraméterű körfolyamat	80 / 480	44,9 – 54,2



40. ábra. Hulladékhasznosítómű hagyományos körfolyamata és gázturbina összekapcsolása [25] [27]

A fejlesztések egyik fő célja a folyamatos rendelkezésre állás biztosítása és az előállított energia minél biztosabb piaci értékesítése. Ezért a villamos energia részarányának növelése a kitűzött cél.

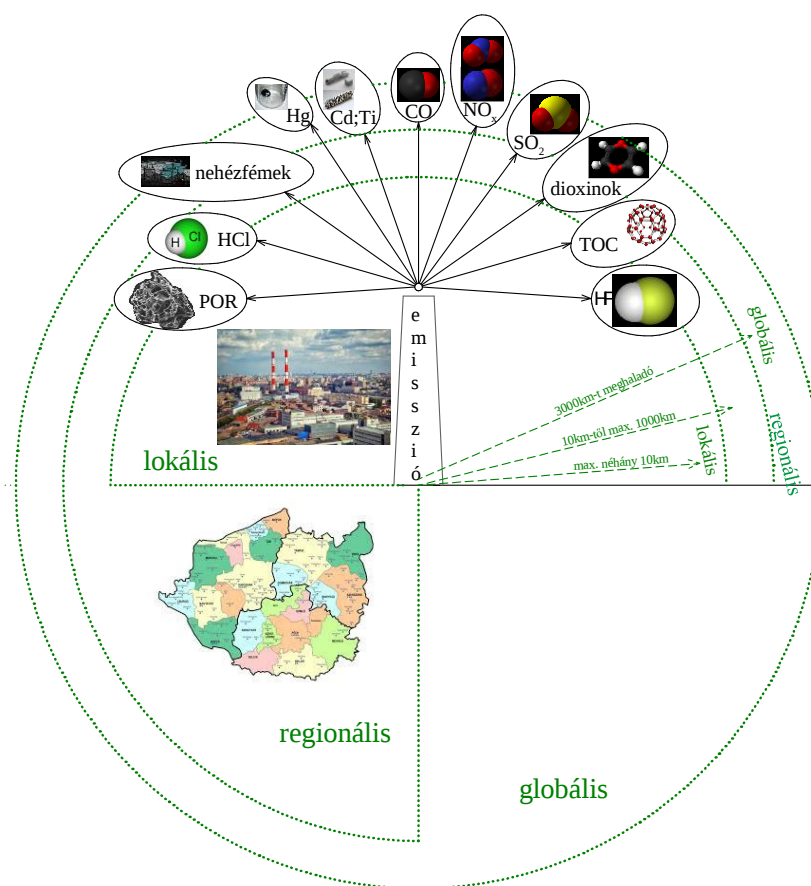
Tervezési, műszaki segédlet

- 1.) A TSZH égetésekor 150 – 200 t/nap kapacitás felett a hőhasznosítás – gazdasági előnyök miatt (is) – feltétlenül ajánlott
- 2.) Különböző egyedi ipari hulladékégetőknél a mintegy 15 – 20 GJ/h hőteljesítmény felett ugyancsak mindenképpen előnyös a hőenergia hasznosításának megoldása.
- 3.) A hulladékégető berendezésekkel szemben a következő fontosabb követelményeket kell a tervezés során figyelembe venni:
 - Eleget kell tenni a tüzelőberendezés, a kazán és a füstgáztisztító rendszer tervezésénél és később az üzemeltetésnél a hatályos 29/2014. (XI.28.) FM rendeletben foglalt emissziós követelményeknek (lásd később), valamint az égetési maradékanyag (salak, pernye) alábbi max. éghető anyag tartalmának:
 - $TOC < 3$ tömeg%
 - izzítási veszteség < 5 tömeg%.
- 4.) Egy tonna hulladékból maximálisan 350...450 kWh villamos energia termelhető.

6. Környezetvédelmi kérdések

Természetesen az eddig leírtakból nem következik az, hogy a hulladék erőművekben való elégetése minden hulladékkezelési megoldással szemben prioritást élvez. Gyakorló tervezőmérnökként tudom, hogy szinte soha nincs olyan, hogy „legjobb megoldás”. Nincs ez másképp a hulladékégetéssel sem. Vannak előnyei a hulladékégetésnek, de szembe kell nézzünk a hátrányaival is. A negatív tulajdonságait azonban nem kell teljes mértékben elfogadni – kezelni kell azokat. Én úgy fogalmaznék, hogy nem feltétlenül hátrányként kell kezelni a negatív tulajdonságokat, inkább mérnöki kihívásoknak fogjuk fel, mely megoldandó feladatokat állít elénk.

Meg kell említeni, hogy a hulladékégetés egyik legtöbbet támadott területe az égetés során keletkező káros anyagok kibocsátása. A hulladékok tüzelése által gerjesztett légszennyező hatásokat a lenti ábra foglalja össze (41. ábra). A kibocsátott égéstermékek kiterjedésüket tekintve lokális, regionális és globális szennyeződést okozhatnak.



41. ábra. A hulladéktüzelés légszennyező hatásai [26]

A mérnökök – elsősorban a tervezők – felelőssége a jól megtervezett égetőművek kialakítása. A dioxinok és furánok a legtoxikusabb környezetszennyező anyagok közé tartoznak, melyek számtalan technológiai folyamat során, így a hulladékok elégetése

során is keletkeznek. A tüzelés helyes kialakításával, a tűztér megfelelő konstrukciójával az említett toxikus anyagok keletkezése jelentéktelen mértékűre csökkenthető. A tervezés során úgy kell kialakítani a kazánt, hogy minimálisan két másodpercen keresztül az áramló füstgáz hőmérséklete 850 °C felett legyen.

Napjainkra a füstgázok tisztításának technológiai teljes mértékben kiforrottak. A füstgázban található szilárd részecskék - por, pernye - leválasztásáról ciklonokkal, szűrőkkel, elektrofilterekkel gondoskodni tudunk. Különböző szorpciós eljárásokkal - száraz-, félszáraz- és nedves eljárásokkal - az egyéb káros anyagok leválaszthatók és a kéményen át távozó kibocsátott füstgázok, a vonatkozó jogszabályokban előírt szigorú határértékeket teljesíteni tudják.

6.1. A füstgáztisztításról

Szükség van-e egyáltalán füstgáztisztításra? Talán első olvasásra furcsa a kérdés. A válaszom egyértelműen igen, de bővebben kifejtem, hogy az egyértelmű válaszomnak mi az oka.

Több pályakezdő mérnök – vagy még hallgató – tette már fel nekem a kérdést, hogy nem lehetne-e olyan hulladékélelőkezelési technológiákat alkalmazni, amelyek arra lennének hivatottak, hogy azokat a frakciókat kivegyék a hulladékáramból, melyek elégetése során káros füstgázok keletkeznek?

A kérdés felvetése olyan szempontból jogos, hogy az lenne az ideális megoldás, hogy ha le tudnánk választani azokat - az égetési szempontból káros frakciókat - a hulladékáramból, melyek elégetésével káros füstgázfrakciók szabadulnak fel. Ez az elv a hulladékhierarchiával szorosan összefügg, hiszen a hulladékpiramis értelmében is a hulladék minimalizálása a legfontosabb – és egyben leghatékonyabb – hulladékkezelési eljárás.

Azonban én a hulladékot égetési szempontból szándékosan „fura anyagáramnak” definiálok. Ennek oka a rendkívül heterogén anyagösszetétele.

Azt, hogy miért nem tudjuk elkerülni az égetési technológiákban a káros anyagok keletkezését a hulladékban a dioxinok és furánok keletkezésének példáján lehet a legkönnyebben megérteni. Az említett két káros anyag azért is jó példa, mert talán a két legkárosabb füstgázösszetevőről van szó, és a hulladékégetéssel szembeni kritikusok a PCDD és PCDF¹⁵ füstgázösszetevők károsító hatásait hozzák fel legtöbbször ellenérvként a hulladékégetéssel szemben.

¹⁵ PCDD = poliklór-dibenzodioxin, PCDF = poliklór-dibenzofurán

A dioxinok és a furánok valóban rendkívül negatív hatású környezetkárosító tulajdonsággal rendelkeznek. Rendkívül mérgező, toxikus, mutagén-, teratogén¹⁶ és rákkeltő vegyi anyagok. A keletkezésük vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék esetében elkerülhetetlen, mert minden olyan anyag égetésénél keletkezik, ahol klórforrás található, illetve szénhidrogén jelen van (PVC, illetve alkáli-kloridot tartalmazó anyagfrakciók).

* * *

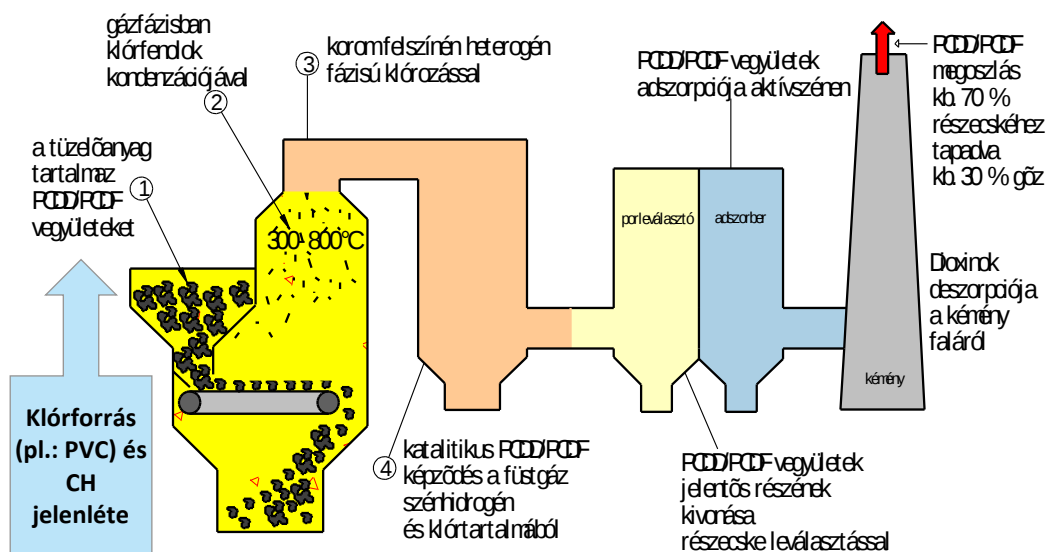
A „fejlődésünkkel”, az anyaghasználati szokásaink átalakításával a hulladék anyagösszetétele is átalakult. Amíg pár évtizeddel ezelőtt például újságpapírt raktak a háziasszonyok a hulladékgyűjtő edény aljába, ma már, higiéniai okokból – a fejlettebb országokban – szinte minden háztartásban műanyag szemetes zacskóba helyezik a hulladékot. Az urbanizációs hatások miatt a maradékanyagok nedvessége is megnőtt. Egyrészt a pazarló életmód miatt sokkal több ételmaradékot helyezünk a szemeteseinkbe, illetve amíg régen a háztáji gazdaságokban az ételmaradékok nagy részét hasznosították, ma már erre nincs lehetőség. Így a biológiai frakció aránya is megnőtt a hulladékban.

* * *

Az égetés technológiai folyamatát nézve, két helyütt keletkezik dioxin és furán (

42. ábra). Közvetlenül az égetésnél - a gázfázisban a klórfenolok kondenzációjával és a korom felszínén heterogén fázisú klórozással -, illetve a hőcserélőben és az égetés folyamatában a füstgáz lassú lehűtésekor a már elbomlott PCDD/PCDF vegyületek újraképződésénél, melyet „de Novo szintézisnek” nevezünk.

¹⁶ mutagén = genetikai károsodást okozó, teratogén = fejlődési rendellenességet okozó.



42. ábra. A dioxinok és a furánok keletkezése

Füstgáztisztítási szempontból kedvező tulajdonság, hogy a dioxinok 850 °C felett termikusan bomlanak és 1200 °C felett nem képződnek. Ezért kell a tüztérben folyamatosan biztosítani a minimálisan előírt 2 másodperc tartózkodási idő melletti 850 °C-os tüztér hőmérsékletet. Onnantól, hogy az első hulladék „darabka” megjelenik a tüztérben - például a rostélyokon -, akkor a tüztérnek már minimálisan 850 °C-osnak kell lennie és fordítva is: a hulladék tüzelés leállításánál is a minimálisan előírt tüztérhőmérsékletet tartani szükséges. Ezt a póttüzeléssel lehet biztosítani. Sajnos a dioxinok és a furánok tekintetében nem dőlhetünk hátra. Hiába biztosítjuk a megfelelő tervezéssel az előírt hőmérsékleti paramétereket, a füstgáz szilárd aeroszol részecskéihez is jelentős mértékben kötődnek, ami a hatékony porleválasztás révén távolítható el. [15] E miatt nagy fajlagos felülettel rendelkező aktív lignitkoksztot kell bejuttatni a füstgázáramba, mely a megfelelő hatékonysággal választja le, nemcsak PCDD és PCDF részecskéket, hanem a füstgázban található egyéb szerves szennyezőket és a nehézfémeket is, mint például a higanyt.

Jelenlegi fejlettségi szintünkön, a kialakult hulladékgyűjtési rendszerünk és hulladékkezelési magatartásunk szerint szükség van a csővégi technológiák alkalmazására. Vagyis, hogy a technológiához egy komplex füstgáztisztító „üzemet” kapcsoljunk. Így a keletkező káros füstgázok egy veszélyes formáját egy másik, kevésbé ártalmasnak tekintett formává alakítjuk át.

A dioxinok és a furánok mellett a már korábban említett számos szennyező komponens leválasztásáról kell gondoskodni (41. ábra). A füstgáz tisztításnál meg kell oldani a szilárd szennyezőanyagok, illetve az azokon adszorbeálódó gáz és gőz halmazállapotú komponensek leválasztását, valamint a folyadékokban elnyelődő

szennyezőanyagok eltávolítását. Emellett szükség esetén bizonyos anyagok (NO_x) redukcióval történő bontását is meg kell valósítani.

A füstgáztisztítás első lépése általában a porleválasztás, amellyel a szilárd részecskéket távolítják el. Többféle módon történhet: porleválasztó ciklon, elektrosztatikus porleválasztó vagy valamilyen szűrő alkalmazásával. A porleválasztó ciklon használata a legelterjedtebb, mert bevált, üzembiztos és relatíve kis karbantartással üzemeltethető berendezés. Működési elve a centrifugális erő hatásán alapul. A gázt érintőlegesen vezetik a berendezésbe és a szemcsék íves pályán mozogva a ciklon falára jutnak, ahol sebességük jelentősen csökken – lefékeződnek - és a gravitáció hatására a jellegzetes, fordított kúp alakú alsó részben a ciklon aljára ülepsznek. Ezzel a módszerrel hatékonyan a 10 µm-nél nagyobb méretű részecskék választathatók le. Az elektrosztatikus porleválasztás elve, hogy az elektromos térben a szennyező gáz molekulák ionizálódnak és a porszemcsékkel ütközve átadják nekik töltésüket. Ezután a polarizálódott szilárd részecskék, az elektrosztatika törvényei szerint, a megfelelő elektródán kiválasztódnak. Előnyük, hogy a 0,1 µm körüli méretű részecskék is leválaszthatók ezzel a módszerrel, azonban a berendezés beruházási költsége magas és nagy helyigényű. Legjobb porleválasztási fokot a zsákos porszűrőkkel lehet elérni. Ezek alkalmasak a 0,1-0,01 µm méretű szemcsék akár 99%-os leválasztására is. Nagy portartalmú gázok esetében a szövetszítákat alkalmazzák, szívó- vagy nyomó üzemmódban.

A porleválasztást követően kerül sor a savas komponensek (HCl, SO₂, HF) közömbösítésére és a reakciótermékek, egyéb szennyezők leválasztására.

A gyakorlatban három komplex füstgáztisztító rendszer terjedt el:

- 1.) száraz szorpció eljárások,
- 2.) félszáraz tisztítási eljárások,
- 3.) nedves tisztítási eljárások.

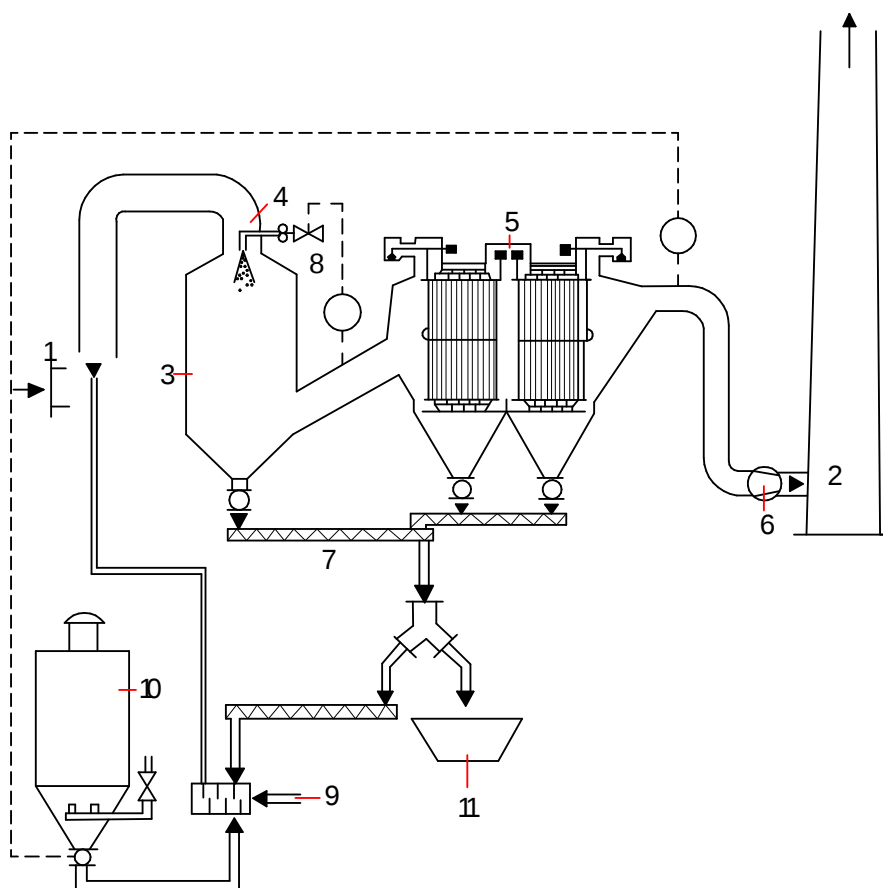
A **száraz szorpció eljárások** berendezés oldalról a legegyszerűbb technológiák. A tisztítási folyamat lényege, hogy a szennyező komponens csökkentésére szolgáló adalékanyagot szilárd halmazállapotban, száraz porként fújják be a reaktorba. A végbemenő reakció hőmérséklet-tartománya a víz harmatpont felett helyezkedik el és így maradékanyagként is száraz por keletkezik, mely a reakciótermékek és pernye keveréke.

Egy elpárologtató hűtő - kondicionáló vízbepermetezés - vízbeporlasztással csökkenti a füstgázhőmérsékletet és egyidejűleg növeli a füstgáz nedvességtartalmát (43. ábra).

Az így lecsökkentett füstgázhőmérséklet azonban még így is az adiabatikus telítési érték felett marad. A kondicionált füstgázba bázikus adalékanyag, általában mészhidrát porát fújják be, megfelelő szemcsenagyságban. Statikus keverő

segítségével a füstcsatorna keresztmetszetében finoman elkeverik, homogénen elosztatják. A megfelelő homogenizálás következtében a savas kémhatású szennyező komponensek a füstcsatornában reakcióba lépnek az adalékanyaggal. A reaktor után zsákos porszűrőben történik a reakciótermékek és többlet abszorbens leválasztása. A zsákos porszűrő feladata kettős. Egyrészt „hagyományos” filterként funkcionál, másrészt alkalmazása a szűrőszöveten képződő szilárd anyag pórusain további kémiai reakciókra ad lehetőséget.

A savas füstgázkomponensek és a bázikus adalékanyag szemcsék közötti reakciók eredményeképpen szilárd sók keletkeznek. A képződő reakcióterméket a többlet adalékanyaggal együtt mind az elektrofilterekből, mind a zsákos szövetszűrőkből mechanikusan eltávolítják. A szilárd maradékanyagként jelentkező pernye-só-adalékanyag keverék egy részét visszaforgatják, hogy a fel nem használt adalékanyag még reakcióba hozható legyen, nagyobb részét azonban ártalmatlanítani kell. A hatékony leválasztáshoz a sztöchiometrikus adalékanyag mennyiség 1,7–2,5-szörösét kell felhasználni.



43. ábra. Száraz füstgáztisztítás [31 és 56 alapján]

1. nyers füstgáz, 2. tisztított füstgáz, 3. reaktor, 4. kondicionáló vízbepermetezés,
5. elektrofilter, 6. ventilátor, 7. porgyűjtő rendszer, 8. víz, 9. sűrített levegő, 10. mészsilo,
11. száraz végtermék

A **félszáraz füstgáztisztítási eljárásnál** az adalékanyagot (általában mésztej) folyadékként juttatják be a füstgázáramba. Az előzőhöz hasonlóan ez az eljárás is a vízhatmpont feletti hőmérsékleti tartományban működik, így biztosítva azt, hogy a maradékanyagként száraz por keletkezzen. A megfelelő reakciófelület biztosítására, permetező rendszerű abszorpciós reaktorba befecskendezéssel juttatják be a bázikus szuszpenziót. A reaktorban elpárolgó vizes fázis és a savas szennyezőanyag a kristályosodó abszorbenssel reakcióba lépnek. A reakcióterméket alkalmas porleválasztóban választják le, melynek tipikus eszköze a zsákos porleválasztó. Alkalmazását – a száraz füstgáztisztítási technológiánál is ismertetett előnye – indokolja, hogy a szűrőszövetre rakódott rétegen az abszorpciós reakciók folytatódhatnak.

Fontos tervezési szempont, hogy a hőmérséklet ne csökkenjen a hatmpont alá, mert akkor a szűrő eltömődik. Amennyiben elektrosztatikus leválasztót alkalmaznak a folyamatban, akkor a hőmérséklet csökkenthető, aminek következtében a reaktorban az abszorpciós hatások növekszik.

Az abszorbens mennyiségét alapvetően a füstgáz hőmérséklete, a megkívánt leválasztási hatások és a tisztított gázban elvárt szennyezőanyag koncentrációk határozzák meg. Nagy leválasztási hatások nagy abszorbens felesleget igényel. A szöchiometrikus adalékanyag mennyiséghez képest ennek megfelelően a gyakorlatban rendszerint 1,5–2-szeres abszorbens-mennyiségre van szükség.

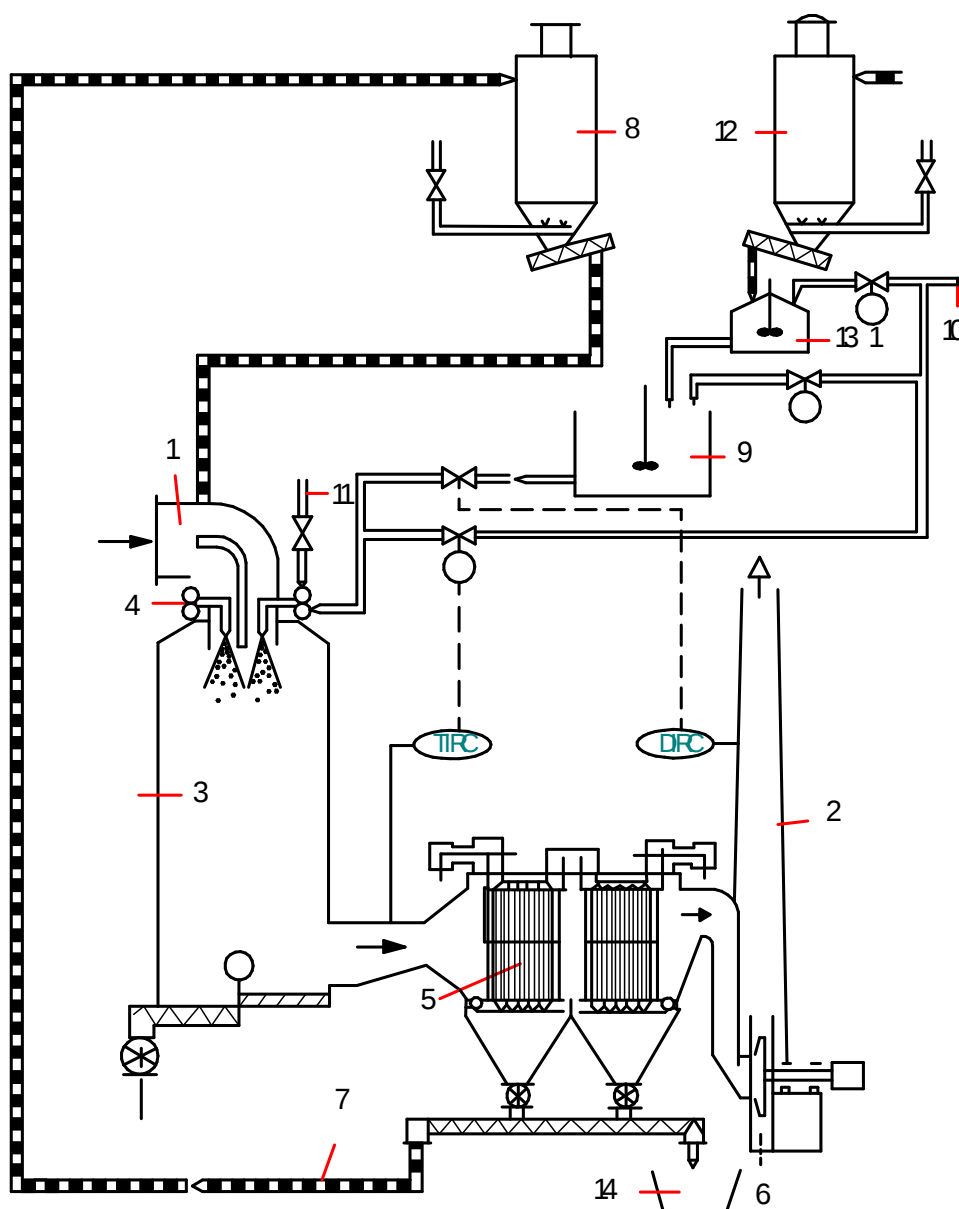
A reaktorba a füstgáz alternatív módon alulról vagy felülről áramolhat be. Az abszorbens befecskendezése többnyire egyenáramban történik. Az abszorbenst speciális porlasztón keresztül (többnyire magas fordulatszámon forgó tárcsával) juttatják be a füstgázáramba, így biztosítva a megfelelő reakciófelületet. Abszorbensként általában mésztejet használnak, ami olcsóbb, mint az előbbi száraz szorpciós eljárásoknál alkalmazott mészhidrát. A gyorsan mozgó folyadékrészecskék felületén nagy sebességgel mennek végbe a reakciók. A megszáradt reagens - például CaO - egy részét a reaktor alján távolítják el és a leválasztóból származó reakciótermék és pernye keverékkel együtt kezelik, illetve részben recirkuláltatják, visszakeverik.

Tervezési szempontból a porlasztásos reaktorok kialakításánál az alábbi tényezőkre kell nagy gondot fordítani:

- a füstgázt megfelelő áramlási sebességgel kell a reaktorba vezetni és a sebességértéket változó terhelés esetén is tartani kell,
- a gázáramot úgy kell beállítani, hogy a lerakódásokat a reaktor belső falán elkerüljék,

- nagy sebességkülönbséget kell kialakítani a füstgáz és az abszorbens részecskék között a jó anyagátadás biztosítására,
- a porlasztó készüléket úgy kell kialakítani, hogy elkerülhető legyen a korrózió, az erózió és a lerakódás.

Az eljárás eszközigénye – és így a beruházási költsége - valamivel nagyobb, mint a száraz szorpciós technikáé, viszont lényegesen kisebb, mint a nedves eljárásoké.



44. ábra. Félszáraz füstgáztisztítás [31 és 56 alapján]

1. nyers füstgáz, 2. tisztított füstgáz, 3. porlasztva szárító, 4. porlasztó, 5. elektrofilter, 6. ventilátor, 7. porszállító rendszer, 8. recirkulált anyag-siló, 9. mésztej-tároló, 10. víz, 11. sűrített levegő, 12. mészsiló, 13. mészsoldó, 14. száraz végtermék

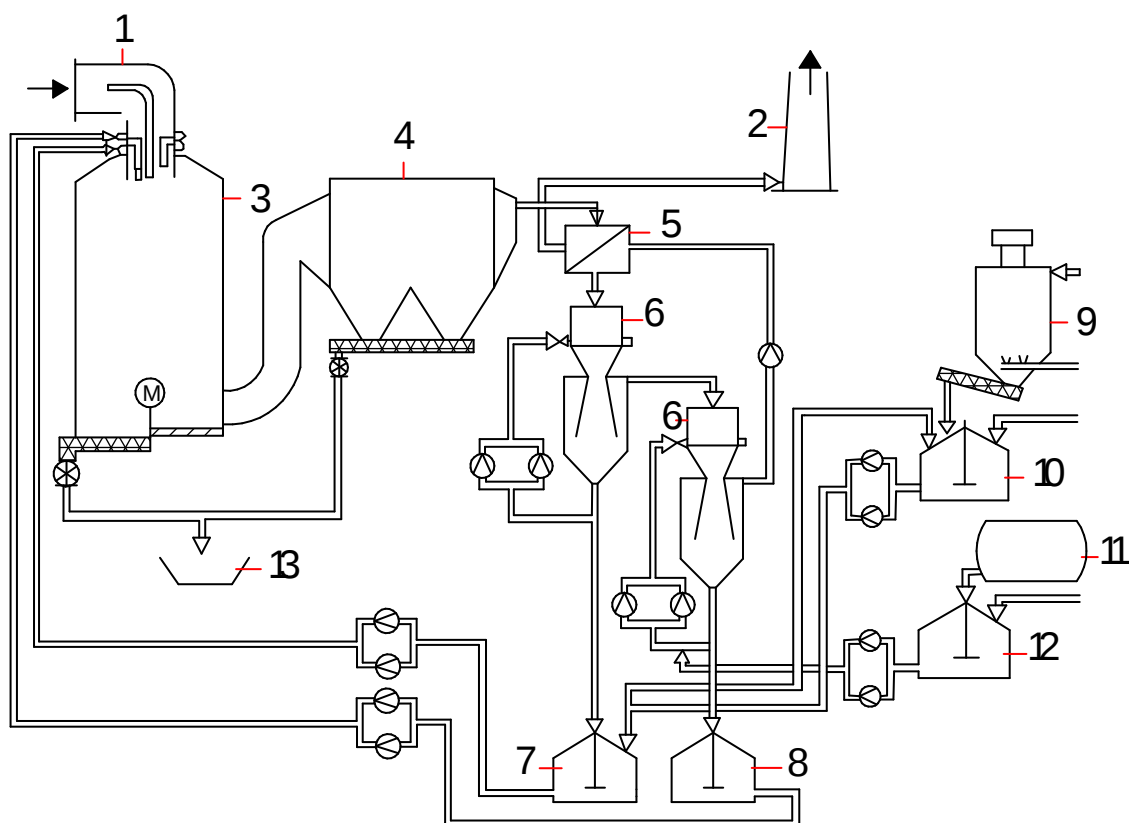
A **nedves rendszerű füstgáztisztítási eljárásoknál** kétlépcsős tisztítást valósítanak meg. Első lépésben egy elektrofilterben leválasztják a pernyét, majd a füstgázt harmatpontra hűtik az első mosófokozatba való belépéskor. Ezután egy-, két- vagy többlépcsős mosással leválasztják a szennyező komponenseket. Általában mésztejet vagy nátronlúgot alkalmaznak abszorbensként és ezeket közel sztöchiometrikus mennyiségben adagolják.

E folyamat során szilárd - 10 μm -nél kisebb méretű -, valamint gáz- és gőz szennyezőket lehet eltávolítani. A mosórendszert úgy kell kialakítani, hogy a gáz és a mosófolyadék minél intenzívebben, minél nagyobb felületen találkozzon. A szilárd részecskék a tehetetlenségi és nehézségi erő hatására, a gázok diffúzió révén kerülnek a mosófolyadékba. Mivel a tisztított gáz tartalmaz valamennyi vízrészecskét is, egy cseppleválasztó beépítése szükséges a mosó után, mellyel a gáz víztartalmát lehet csökkenteni. A füstgázmosás egyik technológiai megoldása az úgynevezett permetező mosó, ahol a szétporlasztott folyadékcseppeket – felülről - és a füstgázt – alulról - ellenáramban vezetik a berendezésbe. Másik elterjedt megoldás a Venturi mosó, ahol a füstgáz és a mosófolyadék egy irányba mozog. A gáz bejutása után egy szűk csatornába – torok - kerül, ahová a mosófolyadékot is betáplálják. A szűkebb keresztmetszetben felgyorsuló gázáram cseppekre bontja a folyadékot, ami biztosítja a megfelelő érintkezési felületet.

A folyadékban elnyelődni nem képes szennyezőanyagok leválasztása adszorpciós módszerrel történik. Adsorbensként leggyakrabban aktív szenet, aktív lignit kokszt, aktivált alumínium-oxidot, szilikagélt vagy zeolitot használnak. Az adszorbeálódott gáz vagy gőz molekula megkötődhet csupán fizikai erők révén, de kémiai kötés is létrejöhet (kémiai adszorpció). Kialakításuk szerint lehetnek nyugvó vagy mozgó ágyas adszorberek, működhetnek folyamatosan vagy szakaszosan. [15]

A nedves eljárások két nagy csoportra oszthatók:

- szennyvízkeletkezéssel, illetve
- szennyvízkeletkezés nélkül működő módszerekre.



45. ábra. Mosás kétfokozatú Venturi mosóval és szennyvízbepárlással [31 és 56 alapján]
 1. nyers füstgáz, 2. tisztított füstgáz, 3. porlasztva szárító elpárolgató, 4. szűrő,
 5. üvegcsöves hőcserélő, 6. Venturi mosó, 7. semlegesítőszer-tartály, 8. iszapgyűjtő,
 9. mészsiló, 10. mésztej-előállítás, 11. lúgtartály, 12. lúgos mosófolyadék előállítása,
 13. száraz végtermék

Manapság már a szigorú környezetvédelmi előírások – elsősorban a kén-dioxidra vonatkozó emissziós határértékek betartása - miatt napjainkban legalább kétfokozatú mosást alkalmaznak.

A különböző félszáraz és nedves füstgáztisztítási eljárásokkal a HCl és a HF koncentrációját 96–99%-kal, a kén-dioxid koncentrációját 85–95%-kal lehet csökkenteni. A nehézfém-emisszió nagy hatásfokú porleválasztással, illetve mosással kb. 90–95%-kal redukálható. A szerves szennyezők közül a dioxin és furán vegyületeknél – tekintettel arra, hogy ezek zöme a porhoz kötődik – körülbelül 99%-os leválasztási hatásfok érhető el, a PAH-vegyületek és a PCB-k leválasztási hatásfoka rendszerint 65–95%.

A füstgázok tisztítása mellett lényeges követelmény még a füstgázok nitrogén oxid (NO_x) tartalmának csökkentése, ami N_2 -vé történő redukálásukkal érhető el. Ezt a célt szolgálják az úgynevezett DENOX berendezések.

Az NO_x redukciónál az alábbi kétféle megoldást alkalmazzák:

- SNCR eljárás (szelektív nem katalitikus redukció),
- SCR (szelektív katalitikus redukció).

Az SNCR eljárásánál karbamid, vagy ammónia vizes oldatát fecskendezzük be a kazán első huzamának felső részén, ahol a füstgáz hőmérséklete 850 °C körüli. A befecskendezés általában két sorban történhet, az optimális „hőmérsékletablak” megtalálása érdekében.

Az SCR eljárásnál az utolsó füstgáztisztítási lépcső után speciális katalizátoron vezetik keresztül a füstgázt, miközben ammóniát vezetnek a katalizátor ágyra. Az SCR eljárás mind a beruházás, mind az üzemeltetés szempontjából drágább, de jobb hatásfokkal végzi a redukálást.

* * *

Magyarország egyetlen kommunális hulladékhasznosító műve a fővárosban található. Nézzük meg, hogyan történik a füstgáztisztítás a Fővárosi Hulladékhasznosító Műben.

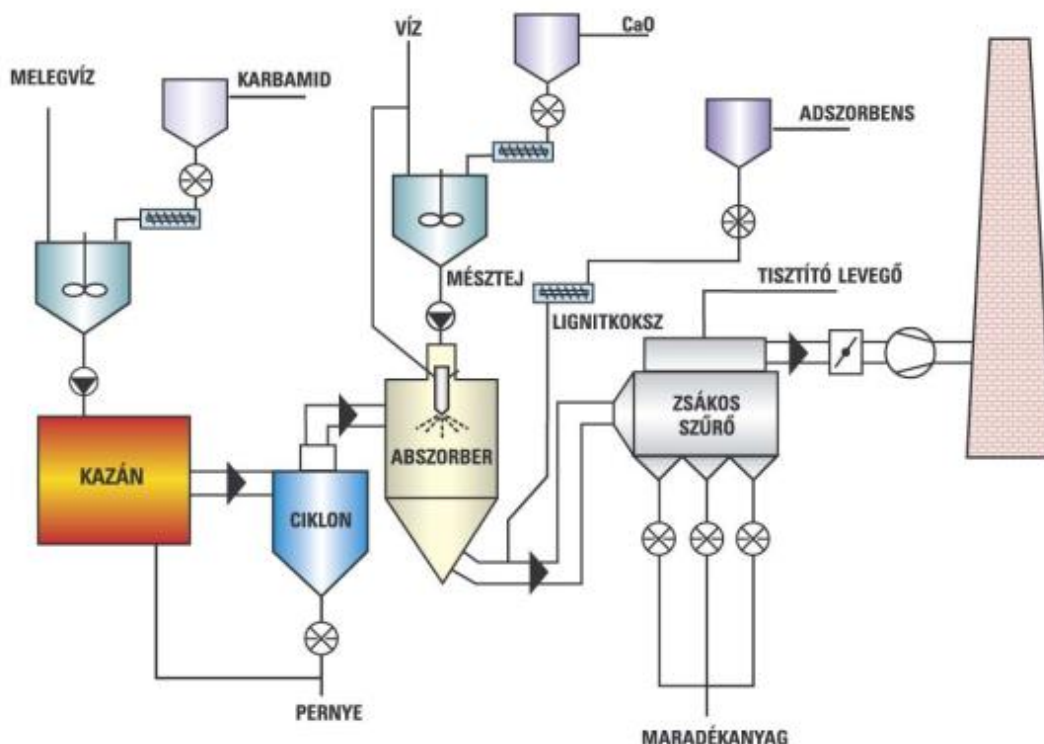
A kazántérbe az első huzam felső részén kialakított fúvókákon keresztül karbamid vizes oldatát fecskendezik be a nitrogén-oxidok csökkentésére. A karbamid mennyiségét a tisztított füstgázban mért nitrogén-oxidok mennyisége alapján szabályozzák. A karbamidot granulátum formájában szállítják a Hulladékhasznosító Műbe, ahol vízzel 40 százalékos koncentrációjú oldatot állítanak elő.

A kazánból a 220 °C-on távozó füstgáz először egy úgynevezett kettős ciklonon áramlik keresztül, melynek feladata a füstgázban található szilárd anyag, a szálló pernye elő-leválasztása. Hatásfoka körülbelül 90%. Az eljárás során a gravitációs és centrifugális erő hatására a nehezebb fajsúlyú szennyezőanyagok a berendezésben leválnak. Ezt az anyagot zárt rendszeren keresztül átmeneti tárolásra egy tartályba továbbítják.

A savas gázokat egy másik berendezésben, az abszorberben, mésztej befecskendezésével semlegesítik/közömbösítik. Az abszorberbe helyezett mésztej-adagoló berendezés 8000 fordulat/perccel forogva porlasztja be a mésztejet. A mésztej mennyiségét a tisztított füstgázban mért HCl és SO₂ koncentrációja alapján szabályozzák.

A hőmérséklet szabályozására még külön vizet is befecskendeznek, így biztosítják az abszorpció számára szükséges 140 °C körüli optimális hőmérséklettartományt. Ezt követően az abszorberből távozó füstgázba aktív lignitkokszt adagolnak az egyéb

vegyületek és gázok, mint például a dioxinok, furánok és a gőzfázisú higany megkötésére. A maradék pernyét és a közömbösítéskor keletkező sókat a zsákos szűrőkben választják le, ahol a kialakult porréteget a zsákok külső felületéről rövid idejű sűrített levegős lefúvással távolítják el.

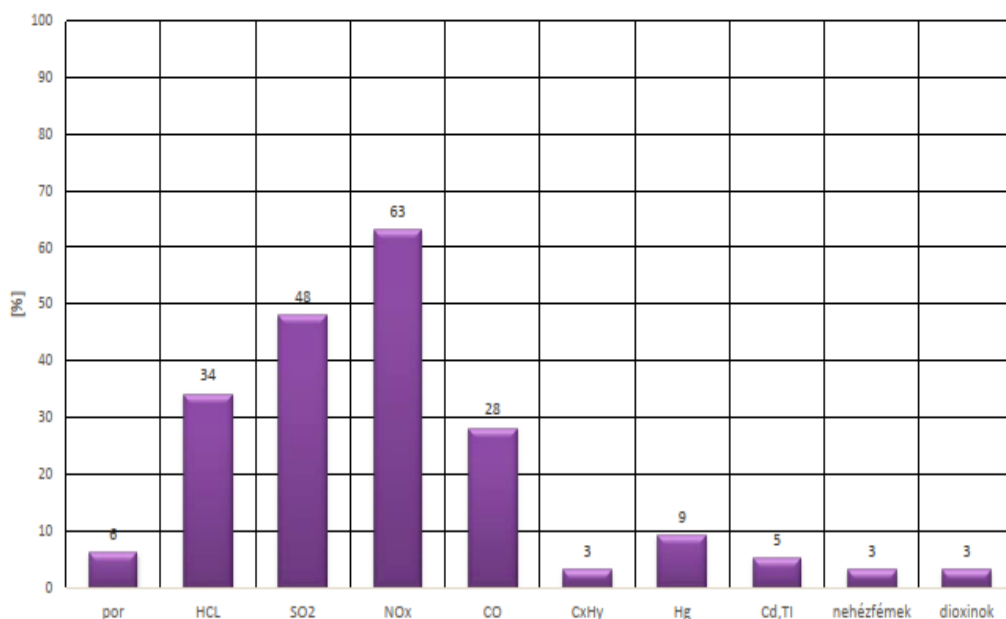


46. ábra. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű füstgáztisztítása [8]

A tisztított füstgázokat a szabályozható fordulatszámú füstgázventilátor juttatja a 120 méter magas kéménybe. Mind a 4 kazán emissziómérő monitoring rendszerrel rendelkezik.

A pernye a kazánok alatt összegyűlt kazánpernyéből és a ciklonokban leválasztott pernyéből adódik össze. Ez mechanikus és pneumatikus úton jut el a pernyesilóba. Ugyanígy jut el másik silóba a zsákos szűrőben összegyűlt füstgáztisztítási maradékanyag is. A két-két siló - pernye és maradékanyag - egyenként 290 m³ térfogatú. A maradékanyagokat száraz por formájában, zárt tartálykocsikban szállítják el a veszélyeshulladék-lerakóba. [63]

A Fővárosi Hulladékhasznosító Műben működő füstgáztisztító rendszernek az egyes szennyező komponensek leválasztási hatékonyságát – napi átlagértékek alapján – a 47. ábra mutatja. Az ábrán a 29/2014. (XI.28.) FM rendelet szerinti határértékek képezik minden szennyezőnél a 100%-ot.



47. ábra. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű füstgáztisztítási hatékonysága [9]

* * *

6.2. A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiség meghatározása

A hulladékégető erőművek tervezése során fontos feladat, hogy megállapítsuk, az égetés során mekkora mennyiségű füstgázzal kell számoljunk. Ennek meghatározása azért fontos, mert a hulladéktüzelés során keletkező füstgáz mennyisége határozza meg, hogy mekkora kapacitású füstgáztisztító berendezéssel kell majd ellátni a létesülő hulladékégető erőművet.

Az égéshez szükséges fajlagos elméleti levegőmennyiséget (L_0), valamint az égés folyamán keletkező fajlagos füstgázmennyiséget (V_0) alapvetően kétfajta módszerrel számolhatjuk ki. Az egyik a hulladék tüzelőanyag elemi analízisének az eredményeire alapuló számítás, mely történhet sztöchiometriai egyenletek alapján, vagy grafikus úton. A mérnöki tervezési gyakorlat során ennek a módszernek az alkalmazására ritkán kerül sor. Egyrészt ritkán áll rendelkezésünkre a hulladék pontos és teljes elemi analízise, másrészt mivel a hulladék nagyon heterogén anyaghalmaz, ezért a mérnöki gyakorlatban tapasztalati képletek állnak rendelkezésünkre a fajlagos elméleti levegőmennyiség és a keletkező fajlagos füstgázmennyiség meghatározására. (Az elemi analízisre épülő számítási metódust a 9.3. számú melléklet tartalmazza.)

A tervezési gyakorlatban az egységnyi tömegű hulladék elégetéséhez szükséges – légszelet nélkül – levegőmennyiség a rendelkezésünkre álló adatok függvényében

vagy a hulladék fűtőértékéből, vagy a fűtőértékéből és hamutartalmából, empirikus képletek segítségével határozható meg, [31]

$$L'_o = 0,24 \cdot \frac{H_a + 2303}{1000} \quad (33.)$$

$$L'_o = 1,01 \cdot \frac{H_a}{4184} + 0,5 \cdot \left(1,06 - \frac{h}{100}\right) \quad (34.)$$

ahol,

L'_o – fajlagos elméleti levegőmennyiség [Nm^3/kg],

H_a – fűtőérték [kJ/kg],

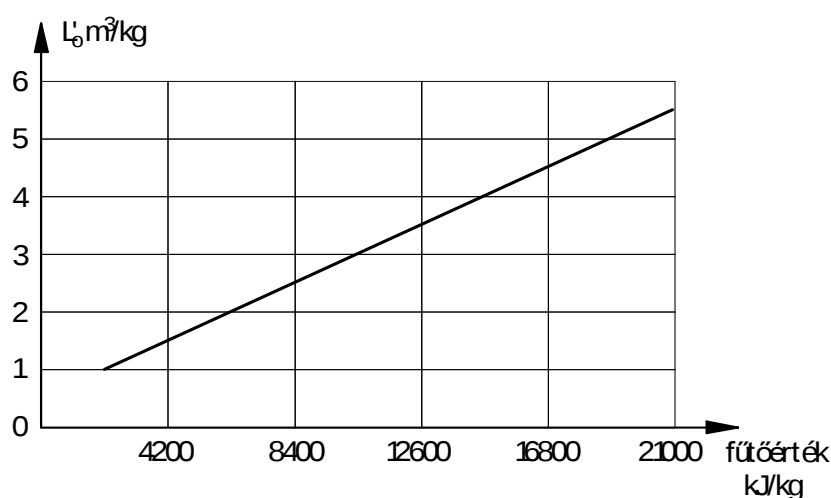
h – hamutartalom [%].

A korábban közölt adatokat felhasználva elvégezhetjük a számításokat. Az egyszerűség kedvéért csak a fűtőérték adatot felhasználva – $H_a = 9700 \text{ kJ}/\text{kg}$,

$$L'_o = 0,24 \cdot \frac{H_a + 2303}{1000} = 0,24 \cdot \frac{9700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2303}{1000} = 2,8 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (35.)$$

Megkaptuk tehát, hogy egységnyi tömegű tüzelőanyag elégetéséhez $2,8 \text{ Nm}^3$ levegőre van szükségünk.

Az elméletileg szükséges levegőmennyiség és a fűtőérték közötti összefüggést diagramról is leolvashatjuk, melyet tervezési segédletként és akár önellenőrzésre is használhatunk (48. ábra).



48. ábra. Az égéshez elméletileg szükséges levegő mennyisége és a fűtőérték közötti összefüggés szilárd hulladékoknál

Az égetés során füstgáz keletkezik. Az elméleti kapott füstgázmennyiséget megfelelő pontossággal a mérnöki tervezés során, szintén empirikus képlettel, vagy képletekkel határozhatjuk meg, [31]

$$V'_o = 1,17 + 0,22 \cdot \frac{H_a + 2303}{1000} \quad (36.)$$

$$V'_o = 0,89 \cdot \frac{H_a}{4184} + 1,65 \cdot \left(1,06 - \frac{h}{100}\right) \quad (37.)$$

ahol,

V'_o – elméleti fajlagos füstgázmennyiség [m^3/kg].

Számszerűsítve, behelyettesítve a fenti egyenletbe, megkapjuk, hogy hozzávetőleg $V'_o = 3,8 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ füstgáz keletkezik fajlagosan a megadott fűtőértékű hulladék égetése során,

$$V'_o = 1,17 + 0,22 \cdot \frac{H_a + 2303}{1000} = 1,17 + 0,22 \cdot \frac{9700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2303}{1000} = 3,8 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (38.)$$

A valóságban azonban ennél több füstgáz keletkezik, hiszen az égetés során a légfelesleg tényezővel növelt levegőmennyiséggel történik a tüzelés. A ténylegesen képződő füstgáz mennyiségének az értékét a légfelesleg tényezővel megnövelten kapjuk meg,

$$V' = V'_o + (\lambda - 1) \cdot L'_o \quad (39.)$$

ahol,

V' – tényleges fajlagos füstgázmennyiség [m^3/kg].

A rostélytüzelésekre jellemző, az ipari gyakorlatnak megfelelő $\lambda = 1,6$ -os légfelesleg tényező, ha behelyettesítjük, megkapjuk a ténylegesen képződő füstgáz mennyiségét,

$$V' = V'_o + (\lambda - 1) \cdot L'_o = 3,8 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} + (1,6 - 1) \cdot 2,8 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} = 5,48 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (40.)$$

Napjainkban Budapesten és az agglomerációjában rendelkezésünkre áll(na) évente közel 300.000 tonna vegyes háztartási hulladék, mely jelenleg deponálásra kerül (lásd még 7.3 című fejezet). Amennyiben ezt az értéket behelyettesítjük, úgy az évi névleges kapacitásra számolva megkapjuk a keletkező tényleges füstgáz mennyiségét, immáron nem fajlagosítva,

$$V'_m = V' \cdot M = 5,48 \cdot 10^3 \frac{\text{Nm}^3}{\text{t}} \cdot 300.000 \frac{\text{t}}{\text{év}} = 1644 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3 \quad (41.)$$

ahol,

V'_m – tényleges – tömegáramra számolt, évi – füstgázmennyiség $[Nm^3]$.

Az újonnan létesülő hulladékégető erőművek már évi 8000 h, vagy a feletti működési üzemórát is tudnak teljesíteni. Így üzemidőre fajlagosítva is meghatározhatjuk a keletkező füstgázmennyiséget,

$$V'_{m\tau} = \frac{V'_m}{\tau} = \frac{1644 \cdot 10^6 m^3}{8000 h} = 205500 \frac{m^3}{h} \quad (42.)$$

ahol,

$V'_{m\tau}$ – tényleges – üzemidőre számolt, évi – fajlagos füstgázmennyiség $[Nm^3/h]$.

A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiség meghatározandó értékeit a lenti táblázatban foglaltam össze (14. táblázat).

14. táblázat. A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiségek meghatározandó mennyiségei

betűjel	megnevezés
L'_o	elméleti levegőszükséglet a fűtőérték alapján
V'_o	elméleti fajlagos füstgáz mennyiség
V'	tényleges fajlagos füstgáz mennyiség
V'_m	tényleges – évi – füstgáz mennyiség
$V'_{m\tau}$	tényleges – évi – fajlagos füstgáz mennyiség

Nemcsak a jövő, de a jelen mérnökeinek is szükséges kihasználni a modern, informatika adta lehetőségeket. Ahogy már említettem, a hulladékégetés társadalmi elfogadottsága negatív, melynek oka a kibocsátott füstgázzal szembeni előítéletek. Ennek alapja sok esetben a technológia nem pontos ismerete. Erre találták ki egy rendkívül ötletes és előremutató megoldást a Stuttgart melletti Böblingenben található égető munkatársai. 30 percenként aktualizálva folyamatosan kiírják az internetre az aktuális kibocsátásaikat. Ez által mutatják a valóságot, bizalmat ébresztenek az emberekben azzal, hogy nem titkolnak semmit. Az égetőmű honlapján elérhető kibocsátási értékekhez a határértékeket is megjelenítik, így a laikusok is össze tudják hasonlítani a koncentrációs értékeket. Látható, hogy mivel az értékek a jogszabályban rögzített határértékek alatt vannak, így szennyezésről nem, csak terhelésről beszélhetünk.

15. táblázat. A böblingeni égetőmű kibocsátási értékei, napi középértékek

	1-es kazán [mg/Nm ³]	2-es kazán [mg/Nm ³]	hatáérték ¹⁷ [mg/Nm ³]
szén-monoxid (CO)	9,84	11,38	50
sósav (HCl)	0,18	0,29	10
higany (Hg)	0,0001	0	0,03
ammónia (NH ₃)	0	0,18	10
nitrogén-dioxid (NO ₂)	37,58	50,3	200
kén-dioxid (SO ₂)	1,19	0	50
por	0,5	0,11	10

6.3. A salak és pernye, illetve egyéb füstgáztisztítási maradék kezelés

A nem éghető hulladékrészek salak és pernye, valamint egyéb füstgáztisztítási maradék formájában maradnak vissza. Ezek környezetszennyező potenciáljuk miatt biztonságos lerakásra kell hogy kerüljenek. A salak a tüztérből általában vizes medencébe esik, ahol megszilárdul. A füstgázból leválasztott pernye az összes égési maradék 5-10 %-a, de egészen más tulajdonságokkal rendelkezik, mint a salak. Nagy gőz-, gáz- és nedvességmegkötő képesség jellemzi, magas lehet a kén, klorid, fluorid és nehézfém tartalma is, ezért lerakási előírása szigorúbb, csak veszélyeshulladék-lerakóban lehet elhelyezni. A pernyéhez hasonlóan veszélyes hulladéknak minősül a száraz és félszáraz eljárások során leválasztásra kerülő egyéb maradék (döntően reakció sók). A salak, mint nem veszélyes hulladék nem csak lerakásra kerül, hanem hasznosítható is.

A salakot a tüztér végén kialakított nedves rendszerű salakeltávolító hűti le és hordja ki salakbunkerba vagy egy átmeneti tárolóba. A rostélyokon áthulló maradékot – a salakmennyiség 1-3%-a – vagy közvetlenül gravitációs módon hűtőbe ejtik, vagy külön berendezés – általában szállítócsiga vagy rázóvájú – szállítja a hűtővízbe.

Elsősorban kisebb égetőművekre jellemző, hogy nem történik vasvisszanyerés a salakból. Ebben az esetben a salaktéri daru közvetlenül a szállító járműre pakolja a salakot és végleges lerakóra kerül.

Amennyiben a salakot további feldolgozás és értékesítés céljára szánják, úgy azt a bányászati eljárástechnikában is megismert technológiákkal teszik alkalmassá, hogy másodnyersanyagként fel lehessen használni és értékesíteni lehessen. Az

¹⁷ Gem. 17. BImSchV alpján [35]

eljárástechnikai folyamat rostálásból, mágneses vasleválasztásból, aprításból és osztályozásból áll (49. ábra).

A salakot jellemzően először egy kaliberrácson, majd egy dobrostán vezetik át, mielőtt a salakot a szállítószalag felett elhelyezett mágneses szeparátorok alatt vastalanítják, általában két elektromágneses szeparátort alkalmazva. Ezek



segítségével kinyerik a vas nagy részét, melyet értékesíteni lehet. A vas tartalmaz még salakszennyezőket, melyek mennyiségét további vibrációs rostálással célszerű csökkenteni.

A települési szilárd hulladékégetők fémmentesített salakját is lehet értékesíteni, elsősorban az építőiparban. Útépítéseknel, akusztikai védő dombok esetében megfelelő másodnyersanyagot jelent a kezelt égetőművi maradékanyag.

A rostálást, majd a mágneses szeparálást követően aprítják a salak maradékanyagot, utána pedig általában két vagy három frakcióra osztályozzák.

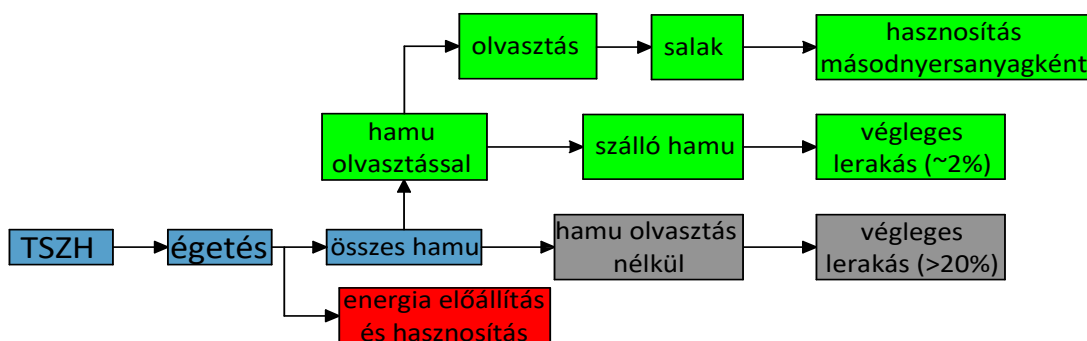
49. ábra. A salak kezelés

Meg kell azonban jegyezni, hogy a bemutatott salakfeldolgozó technológia jelentős beruházási – plusz - költséget jelent. Általában megfelelő méretű égetőművek esetén telepítik, abban az esetben, ha a salak értékesítéséből befolyt bevétel fedezi az üzem működési és működtetési költségeit. [28]

A hulladékégetési technológiák egyik kutatási iránya az égés során visszamaradt szilárd égéstermékek hasznosításának a fejlesztése.

Az égetés során alkalmazott hőmérséklet megválasztása kulcskérdés. Általános szabályként elmondható, hogy a kazán tűzterében minimálisan 850°C-ot kell tartani a bűzmentes, tökéletes égés érdekében, illetve a dioxinok és furánok keletkezésének minimalizálása miatt. A tűztérhőmérséklet felső határát a hulladékban található szervetlen részek – salak és pernye – igen nehezen meghatározható olvadási tartománya határozza meg. A fejlett országok hulladékégetőiben a hulladék hamutartalmának lágyulási-olvadási tartománya 1000-1400 °C között található, ezért a legtöbb égetőben 1000-1100 °C között van a tűztér hőmérséklete. Ebben a hőmérséklet tartományban lezajló égetés során a hamu olvasztás nélküli technológiáról beszélünk. Ezen eljárás során a végleges lerakásra kerülő salak az eredeti tömeg 20-25%-a (50. ábra).

ÉGETÉS + HAMU OLVASZTÁS



50. ábra. A maradékanyag kezelés fejlesztési lehetőségei [29] [35]

Az égetés végezhető magasabb hőmérsékleti tartományban is. Amennyiben a tüztérhőmérsékletet 1200-1700 °C érték között választjuk meg, úgy salakolvasztásos hulladékégetési technológiáról beszélünk. [31] Ebben az esetben a szilárd maradékanyagok olvadék formájában távoznak az égéstérből. Az olvasztási technológiával a végleges lerakásra kerülő szálló hamu tömegaránya 2% alatt lesz (50. ábra). Az olvadék formájában távozó salak pedig értékes másodnyersanyagként kerülhet további hasznosításra.

* * *

Tervezési, műszaki segédlet

- 1.) Tervezéskor mindenkor szükséges biztosítani a tüztérben – a 2 másodperc tartózkodási idő és minimum 850 °C feltételből visszaszámolva – a legalább 1000 °C hőmérsékletet.
- 2.) A tapasztalatok szerint a hulladékok hamutartalmának lágyulási-olvadási tartománya 1000 – 1400 °C között mozog. Ezért a hulladékégetőknél a tüztér hőmérséklete átlagosan 1000 – 1100 °C között van.
- 3.) Salakolvasztásos technológiát választva az égetést 1200 – 1700 °C hőmérséklet tartományban kell végezni.
- 4.) A veszélyes hulladékokat égető berendezések tüztér-hőmérsékletét leggyakrabban 1100 – 1400 °C között kell megválasztani.
- 5.) A TSZH égetésekor keletkező füstgáz átlagos jellemzői a következők:
 - szilárd anyag 2000-5000 mg/Nm³,
 - SO₂ 1000-3000 mg/Nm³,
 - HCl 2000-8000 mg/Nm³,
 - HF 20-100 mg/Nm³,
 - NO_x 500-1500 mg/Nm³,

6.) Füstgáztisztításnál a sztöchiometrikus adalékanyag mennyiség:

- száraz eljárásnál 1,7 – 2,5,
- félszáraz eljárásnál 1,5 – 2.

7.) Füstgáz tisztítási hatékonyság – tervezési értékek – a különböző félszáraz és nedves füstgáztisztítási eljárásokkal:

- a HCl és a HF koncentrációját 96–99%-kal,
- a kén-dioxid koncentrációját 85–95%-kal lehet csökkenteni,
- a nehézfém-emisszió nagy hatásfokú porleválasztással, illetve mosással hozzávetőleg 90–95%-kal redukálható,
- a szerves szennyezők közül a dioxin és furán vegyületeknél – tekintettel arra, hogy ezek zöme a porhoz kötődik – körülbelül 99%-os leválasztási hatásfok érhető el,
- a PAH-vegyületek és a PCB-k leválasztási hatásfoka rendszerint 65–95%.

8.) Károsanyag kibocsátási határértékek a hulladéktüzelésnél, melyeket a tervezés során figyelembe kell venni:

16. táblázat. Károsanyag kibocsátási határértékek
a 29/2014. (XI.28.) FM rendelet szerint [2]¹⁸

	kibocsátási határértékek [mg/Nm ³]	
	napi átlagok	félórás átlagok
por	10	30
HCl	10	60
SO ₂	50	200
NO _x	200	400
CO	50	100
HF	1	4
TOC	10	20

¹⁸ Valamennyi érték száraz füstgázra, 273 K hőmérsékletre, 101,3 kPa nyomásra és 11%-os oxigéntartalomra vonatkozik.

17. táblázat. Kibocsátási határértékek a mintavételi időszak átlagában
a 29/2014. (XI.28.) FM rendelet szerint [2]¹⁸

	kibocsátási határértékek [mg/Nm ³]
Cd + Tl	0,05
Hg	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0,5
dioxinok és furánok	0,1 x 10 ⁻⁶

7. A fenntartható hulladékgazdálkodás

Mind az energetikai, mind a hulladékgazdálkodási szempontokat tekintve, kihívások előtt állunk. Napjainkban egyre fontosabbá válik a fejlődés fenntarthatóságának biztosítása, melynek egyik előfeltétele a megfelelő mennyiségű és minőségű energia rendelkezésre állása. Ennek szellemében az „energia és a környezet” fogalmak szoros kapcsolatban kell álljanak, mely kihívások elé állítja az emberiséget.

Hogyan épül(jön) fel egy ország energia rendszere? Mi az ideális összetétele az energiamixnek? Mekkora szerephez jutnak a különböző erőművek? Valóban a széndioxid okolható a globális felmelegedésért? Hol van a szerepe a hulladékégetésnek az energiamixben? Ezek mind nagyon érdekes és fontos kérdések, mely kérdések körüljárására és a lehetséges válaszok keresésére érdemes időt fordítani.

Történelmi távlatokban az energetikában - ahogyan az élet más területein is - a növekedés üteme szinte felfoghatatlanná vált. Amíg a neolitikum elején élt ember naponta mintegy 15 MJ energiát használt fel, addig napjainkban az iparilag fejlett országok állampolgára ennek mintegy 70-szeresét, hozzávetőleg 1050 MJ energiát él fel. [21]

A középkor végéig, sőt egészen az első ipari forradalomig, az emberiség ezt a felhasznált energiát szinte 100%-ban megújuló energiaforrásokból állította elő. Az emberi izomerő, az állatok ereje, a vízi közlekedésben, a hajóknak szél által „meghajtott” vitorlák biztosították az energiát.

Az energia előállításának-fogyasztásának az ipari forradalommal kezdődő ugrásszerű növekedését jól példázzák a következők. Az emberi test tartósan hozzávetőleg 150-200 W teljesítményre képes. Az ipari forradalom után, az 1800-as években, a gőzgép hatásfokának 1%-ról 5%-ra emelkedésével egyetlen gép már 100 ember munkájának megfelelő, 20 kW nagyságrendű teljesítményre volt képes. Ezen a gondolatsíkon maradva megállapíthatjuk, hogy napjainkban a fejlett országok polgárai mintegy 70 „energiarabszolgát” dolgoztatnak az igényeik kiszolgálására. Az év 8760 órájában 70 ember munkájának megfelelő energiát használnak fel folyamatosan¹⁹. Mindennapi életünk energiarabszolgái a villamos energiát fogyasztó eszközök, mint például a TV, a porszívó, a mikrohullámú sütő, számítógép és még számos más eszköz. [13]

Az energetika, a környezetvédelem jelenét, jövőjét alapjaiban határozza meg az, hogy a fentiekben érzékeltetett mérhetetlen nagy fejlődés meddig tartható fenn.

¹⁹ W=175 W emberi teljesítménnyel számolva.

A rendszerszemléletű gondolkodás megköveteli tőlünk, hogy komplexen kezeljük az energetikai és hulladékgazdálkodási kérdéseket, ezért a mennyiségi és minőségi kérdéseket egyaránt vizsgálnunk kell. Az elemző vizsgálatunkat a termodinamika első két főtételenek segítségével tesszük meg. Ezek a tételek ugyanis a fenntartható fejlődést illetően véges lehetőségekről, korlátokról beszélnek.

A fejlődés gazdasági növekedést generál, amely termelőkapacitás bővüléssel jár. Az energia „termelése” során olyan energia átalakításról beszélünk, melynek során a különféle energiahordozókból a fogyasztók számára megfelelő formában felhasználható energiát állítunk elő. Ilyen energia a villamos energia, mely a primer energiahordozók célszerűen átalakított közvetítő formája. [13] [29]

A termodinamika I. főtétele - a megmaradási törvény - alapján az energiaigényünk kielégítésére szolgáló energia átalakításnak egyebek mellett az alábbi két hatása van:

- 1.) energiát és anyagot igényel a környezettől,
- 2.) növeli a környezet terhelését, csökkenti (hulladék)asszimiláló képességének tartalékait.

Tehát minden fejlődés és a fejlődés generálta növekedés még több termelést von maga után, amelynek alapanyag és energia igénye van, illetve láttuk, hogy minden folyamat végén hulladék maradékanyag fog keletkezni!

A termodinamika II. főtétele, az energia áramlásának a törvénye az entrópia törvény. Az első törvény mennyiségi korlátot jelent, a második törvény minőségi korlátokat fejez ki: Felhasználható-e a megtermelt energia?

A termodinamikai főtételek értelmezésében a környezeti és energetikai problémák a fizikai növekedéshez – például termelésnövekedéshez - köthetők. Vagyis a fenntartható fejlődés útja nem feltétlenül jelenti a fenntartható növekedést. Sőt! Meg kell vizsgálnunk tehát azt is, hogy létezik-e olyan növekedés, mely egyáltalán nem jár kapacitásnövekedéssel, ellenben hosszabb időtávon mégis növeli a teljesítőképességet, ami a gazdasági teljesítmény fejlődését eredményezi.

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy szükségünk van alternatív, nem szokványos tüzelőanyagokra, és energiaforrásokra ahhoz, hogy mérhetetlen nagy energiaigényeinket kielégítsük. A városokba tartó beköltözés, a városok lélekszáma folyamatosan növekszik. Így nemcsak a városok energiaigénye növekszik, hanem rendelkezésünkre áll egy helyi, ráadásul a hulladék nedvességtartalmának függvényében változó, de hozzávetőleg 50%-ban megújuló energiaforrás. A hulladék eltüzelése során gőzbázison energiát adhatunk ki, akár távhőellátásra, akár generátorok kapcsain keresztül villamos energiát. Azt is meg kell állapítani, hogy a

környezetvédelmi szempontok erősödésével a városok energiával történő ellátásában a távhőellátásnak növekvő szerepe kell legyen.

7.1. Az energetikai hulladékhasznosítás szerepe a körforgásos gazdaságban

A hulladéktüzelésű erőművekkel kapcsolatban, illetve azok jövőjével összefüggésben kétfrontos küzdelem folyik. Egyrészt a társadalmi elfogadottsága elég negatív, létezik egy „harsányan égetésellenes” közösség a világban. Másrészt azokon a helyeken – akár országokban, akár városokban – amelyekben hulladéktüzelésű erőművek működnek és üzemelnek, már a lakosság is támogatja a hulladéktüzelésű erőműveket.

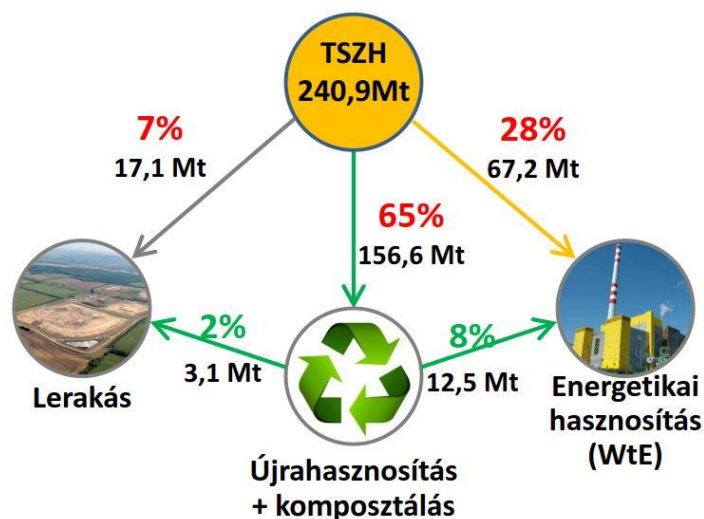
Talán ki lehet jelteni, hogy egy elég komoly fejlődés kezd kibontakozni az energetika területén. Kis túlzással, de nevezhetjük ezt a harmadik (ipari) energetikai forradalomnak. A környezetvédelem felerősödött az energetikában, igény van a „tisztá” energiára, ami nem megy egyik napról a másikra. Az átmenet viszont már elkezdődött. Az átmenet a tisztaenergia-rendszerbe nem fog úgy megvalósulni, hogy minden eszközt lecserélünk egy hasonló emissziómentesre. Ennek nincs realitása. Sőt, ugyanígy nincs realitása annak sem, hogy egyik pillanatról a másikra „zero waste”, vagyis hulladékmentesen éljük az életünket. Az átalakulás időben elhúzódó, hosszú folyamat, és mély átalakulás lesz. Az egész energetikát és a hozzá kapcsolódó környezetvédelmi rendszert érinteni fogja. Időbeli gyorsaságukat tekintve talán a legígéretesebb lehetőségek a közlekedésben vannak. Nagy potenciál – és szükség – van az épületállományok energiahatékonyságának javításában, fejlesztésében is. Itt nem csak arra kell gondolni elsősorban, hogy le kell bontani az összes épületet és helyükre passzív házakat kell építeni, hanem az épületfelújítások adta lehetőségekkel is élni kell. Ezekkel van szoros összefüggésben a távhőfejlesztési potenciál is. Aztán „ipari forradalmi” lehetőség a nehézipar, amely a világ szén-dioxid-kibocsátásának egyharmadát adja.

Az energiahatékonysági átalakulások a jogszabályi változásokban is érvényesülnek. Előremutató energiahatékonysági szabványok érvényesülnek Európában, például a hűtőgépekre, mosógépekre, vagy az épületek energiahatékonyságára irányuló követelmények. Gondoljunk csak bele, hogy Magyarországon is, 2021. január 1-jétől csak közel nulla energiaigényű épületek építhetők. Viszont a hatás az (villamos)energia igényeknél is megjelenik. Ha a gázkazánokat villamos energiát igénylő hőszivattyúkra cseréljük, akkor sokkal több villanyra lesz szükség. Nem beszélve arról, ha az útjainkon megnövekedik az elektromos meghajtású autók száma.

Ugyanakkor a hulladékhasznosító erőműveket – jelenleg Magyarországon - csak kormányzati döntésekkel lehet létesíteni, mert magánvállalkozók – érthető módon –

nem fektetnek be ezen a területen. Éppen ezért komplex, rendszerszintű stratégiákra van szükség ahhoz, hogy megfelelően alakítsuk ki az energetikai rendszereinket.

Az Európai Unió országai a fejlett országok közé sorolhatóak. 2030-ra az Unió grandiózus elhatározást tűzött ki célként maga előtt. 10% alá kívánja csökkenteni a jelenleg 30% feletti, lerakott, deponált hulladék arányát.



51. ábra. Az Európai Unió „2030”-as célkitűzése [18]

Az EU több lehetőséget vázolt fel magának, de mindegyik javaslatban a hulladékok erőművi égetésével számolnak. Egy prognosztizáció szerint a hulladékégetők az Európai Unióban 2030-ban közel 80 millió tonna ($67,2 \text{ Mt} + 12,5 \text{ Mt} = 79,7 \text{ Mt/év}$) a lakosságtól begyűjtött települési szilárd hulladékot égetnek el. Ha ehhez még hozzá vesszük a kereskedelmi és ipari hulladékot is, akkor a tényleges égetési kapacitási igény hozzávetőleg 100 Mt/év lesz.

Természetesen az elkülönítetten gyűjtött (szelektív) hulladékgyűjtést is fejleszteni kell. Ezzel párhuzamosan az anyagában hasznosítható hulladékok visszavezetése a gyártástechnológiai folyamatokban sem maradhat el, és ezek fejlesztésére irányuló célkitűzések is célként kell megjelenjenek.

A körforgásos gazdaság kialakításához rendszerszemléletben kell gondolkodjunk. Az elérhető legmagasabb arányt kell elérjük az anyagában hasznosítható hulladékfrakcióknak, hiszen nemcsak a primer energiahordozó készleteink végesek, hanem a rendelkezésünkre álló nyersanyagokkal is takarékoskodnunk kell, felhasználásukat racionalizálni szükséges. Az energetikai hatékonyságunk növelésének további lehetősége, hogy a termeléshez szükséges alapanyagokat nem elsődleges, hanem másodlagosan előállított, illetve már egyszer (fel)használt anyagokból, úgynevezett másodlagos alapanyagokból vegyük. Egyrészt így nem kell a

Földünk nem megújuló ásványi nyersanyag készleteit kiaknázni, másrészt a másodlagos alapanyagokból előállított fémtermékek gyártásának energiaigénye is jóval csekélyebb (18. táblázat). [28]

18. táblázat. Fém alapanyagok előállításának energiaigénye [33]

	elsődleges fém [GJ/t]	másodlagos fém [GJ/t]
magnézium	400	11
alumínium	270	14
réz	115	19
cink	30	10
ólom	70	18
magnézium	400	11
alumínium	270	14

A fenntartható fejlődés folyamatos biztosítása miatt – rövid és hosszú távú – célokat kell kitűzzünk magunknak az élet minden területén, így a mérnöki tudományok területén is. Kiemelten fontosnak tartom, hogy a meghatározott célok reálisan kitűzött célok, ne pedig vágyak legyenek. Hulladékgazdálkodási szempontból a hulladékpíramis által meghatározott hulladéksors példaként követendő. A hulladékkezelési hierarchia alapvető üzenete, hogy az anyagában nem hasznosítható hulladék eltérítése a lerakástól elsősorban a vegyes hulladék energetikai hasznosításával – szennyvíziszap együttégetésének a lehetőségével együtt – oldható meg. Fontos azt a tényt is megállapítanunk, hogy – sok támadással ellentétben – az égetés nem csökkenti a szelektív hulladékgyűjtés során hasznosítható anyagáramokat, hiszen az égetés során elsősorban vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladékot égetünk.

7.2. Hulladékégetés a világban

Számos statisztika áll rendelkezésünkre arról, hogy melyik országban mennyi a lerakott hulladékok aránya. Nézzünk egy nagyon érdekes példát, Dánia adatainak tükrében. Az északi országban 1% alatt van a véglegesen lerakott hulladékfrakciók aránya. Ez az érték szinte példaértékűnek tekinthető. Ugyanakkor Európai viszonylatban kirívóan magas az egy főre jutó évi hulladéktermelésük (közel 800 kg/fő/év), több mint kétszer nagyobb, mint Magyarországé (379 kg/fő/év). Ellentmondást érezhetünk az adatok tükrében, hogy magas a fajlagos hulladéktermelésük, de mégis szinte alig deponálnak hulladékot?! Az alacsony lerakott hulladékarányt égetéssel érik el, több mint 3,5 millió tonna vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladékot égetnek el.

Az előző fejezet végén található gondolatok szerint távlati célokat szükséges kijelölnünk. Hulladékgazdálkodás szempontjából ez nem más, mint hogy a minden feleslegessé vált anyagunkat anyagában valamilyen módon hasznosítsuk. Tágabb értelemben környezetvédelmi hosszú távú célkitűzés, hogy emissziómentes városokat alakítsunk ki. Azonban a hulladékpiramis példáját követve a hosszú távú céljaink elérésének első lépcsője az energetikai hasznosítás.

Ha a világ hulladékégetésének trendjét vizsgáljuk, akkor – ahogy korábban már többször említettem – kettős fejlődési irányt kell megállapítsunk. A fejlett országokban a minőségi kérdések, míg a fejlődő országokban a mennyiségi kérdések határozzák meg a fejlesztési irányokat.

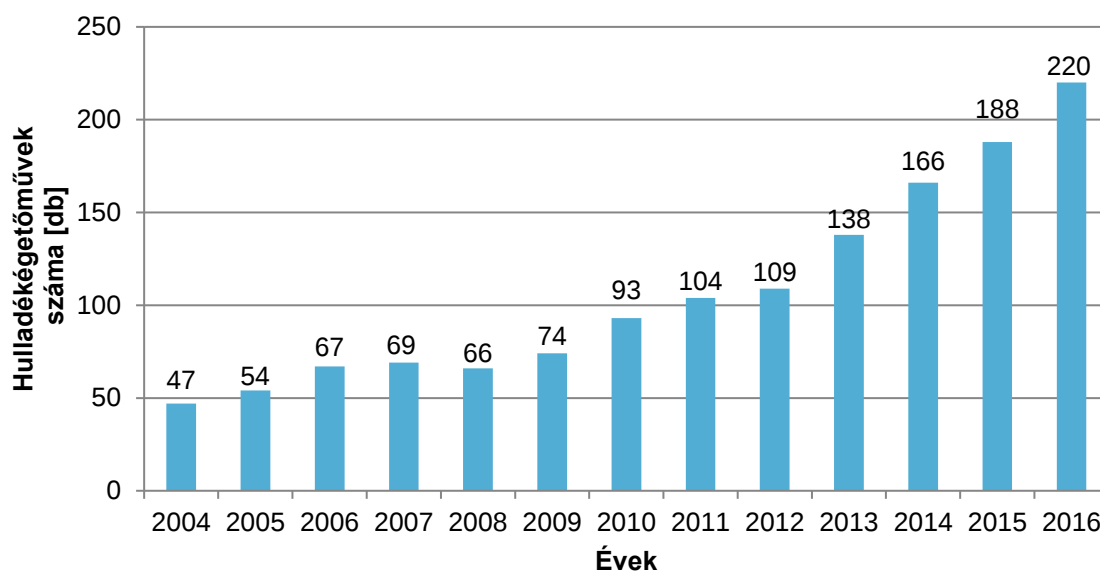
Ennek tükrében égetési szempontból az egyik legfejlettebb technológiával Japán rendelkezik. Ebben az ázsiai szigetországban található a legtöbb, több, mint 1800 folyamatos üzemű hulladékhasznosító mű. [18] Az, hogy ilyen sok égetőmű található Japánban, a földrajzi és urbanizációs helyzetükkel – is – magyarázható. Egyrészt szigetország, így az országhatárokon belül célszerű a hulladékkezelésüket megoldani, másrészt az ország lakossága metropoliszokba tömörül - több mint egy tucat, milliós nagyváros található Japánban -, így ezekben a városokban és agglomerációjukban centrálisan keletkezik nagy mennyiségű hulladék. Japánban a fejlesztések elsősorban a füstgázemissziók csökkentésére, a maradékanyagok mennyiségi mérséklésére – salakolvasztásos technikák – és minél szélesebb körű felhasználására irányulnak (52. ábra).



52. ábra. Salak hasznosítása másodnyersanyagként: térkő, építőblokk alapanyagaként, útépitésben, talajjavító anyagként

Japánban zajlik a világon a legintenzívebben az elgázosítási technikák fejlesztése. Mára már 120 elgázosító rendszerű égetőmű van az ázsiai szigetországban, melyek kapacitása már semmiképpen sem elhanyagolható, évi szinten megközelíti a 7 millió tonnát az elgázosító üzemekben feldolgozott hulladék.

A fejlődő országok égetőművi mennyiségi kapacitásokat fejlesztenek. Ezekben az országokban az égetőművek építését elsősorban a népességük növekedése, és így a hulladékok évi mennyiségének növekedése indokolja. A legdinamikusabb égetőmű építés Kínában folyik. A nagy mennyiségű hulladék keletkezése miatt Kínának beszűkülnek az alternatívái a hulladék feldolgozásának tekintetében. Egyszerűen fogalmazva olyan mennyiségű a települési szilárd hulladék mennyiségének a növekedése, hogy feldolgozási kapacitási korlátok adódnak.



53. ábra. Hulladékégetőművek számának növekedése Kínában

A fejlődő országok a hulladékkezelési teljesítőképességük növekedését az égetőművek létesítésével bővítik ki. Az afrikai kontinens is rálépett a hulladékégetés útjára. Etiópiában létesült Afrika első égetőműve, mely átlagosan 7 MJ/kg fűtőértékű települési szilárd hulladékot éget el, két tolórostélyos kazánban (19. táblázat).

19. táblázat. Reppie hulladékégető (Etiópia) műszaki paraméterei

kapacitás	420.000 t/év
kiszolgált terület népessége	4,6 millió fő felett
rostélyteljesítmény	átlagosan 14,8 kg/s
előállított gőz paraméterek	$T=420\text{ °C}$
	$p=60\text{ bar}$
	$\dot{m}=2 \times 51,4\text{ t/h}$
	$\eta_{\text{kazán, termikus}}=80,94\%$
turbina	$P=2 \times 25\text{ MW}_e$
	$P=185\text{ GWh/év}$
keletkező salak	$\sim 100.000\text{ t/év}$

Ha a szűkebb régiókat, az európai hulladékkezelési gyakorlatot nézzük, akkor két fő cél jellemzi a kontinensünket:

- 1.) a lerakásra kerülő hulladék mennyisége csökkenjen,
- 2.) minél nagyobb arányú újrahasznosítás nyersanyag és energiaforrás tekintetében.

Az első pontban megfogalmazott céllal kapcsolatban határozott célértéket fogalmazott meg az Európai Unió a tagországai számára. 2030-ra 10% alá kell csökkenteni a véglegesen deponált hulladékok arányát.

Európában 2014-ben 435 égetőmű üzemelt, 88 Mt/év hulladékhasznosítással, 38 TWh/év villamosenergia- és 88 TWh/év hőtermeléssel. [11] Nyugat-Európában azt lehet mondani, hogy a jelenleg keletkező hulladékmennyiség feldolgozására elegendő égetési kapacitás épült ki. Kelet-Európában az elmúlt időszakban jelentősen fejlődött az égetőművi kapacitás. Lengyelország a közelmúltban 6 darab égetőművet állított üzembe, Csehországban 3 új égető létesült.

A nyugati nagyvárosok hulladékkezelési gyakorlata viszonylag egységes. Nagymértékű – intenzív - szelektív gyűjtés mellett az energetikai hasznosítás alapvető eszköze a hulladékgazdálkodásnak. Németország például az energetikai rendszerét „zöldíti”, vagyis nagy volumenű dekarbonizációt hajt végre az energiatermelő rendszereiben. Ennek ellenére a hosszú távú stratégiai elképzelései szerint 2030-ig nem tervezi csökkenteni az égetőművekben elégetni kívánt hulladékok mennyiségét, 19,1 millió tonna vegyes hulladék és 5,4 millió tonna RDF tüzelőanyag elégetésével számolnak. [39] Nyugat-Európában a hőhasznosítás jellemzően kapcsolt energiatermeléssel valósul meg.

A nyugati nagyvárosokban a nagymennyiségű keletkező hulladék miatt, az égetés és a távhő kapcsolata mindvégig együtt kell, hogy „működjön” (20. táblázat). Ennek környezetvédelmi, energiahatékonysági és gazdasági okai (is) vannak.

20. táblázat. Európai nagyvárosok, a hulladéktüzelésből villamos energiával kapcsoltan előállított hőenergia részarányai [9]

Brescia	70%
Malmö	60%
Párizs	50%
Oslo	50%
Koppenhága	30%
Stockholm	30%
Bécs	25%
Milánó	20%
Hamburg	20%

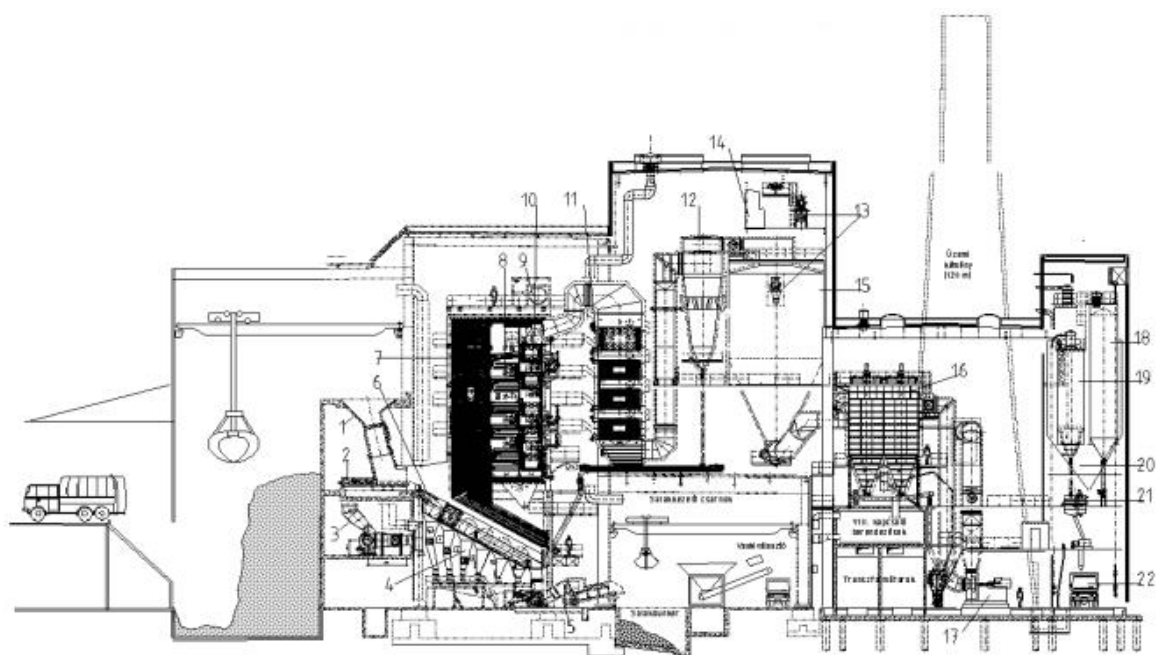
7.3. A hulladékégetés hazánkban

Magyarországon jelenleg egy települési szilárd hulladékégető üzemel, körülbelül 380.000 tonna/év hulladékhasznosítással. Ekkora mennyiségű hulladék elégetésével – figyelembe véve a távhőtermelés ma még fennálló jogi és műszaki korlátait - 155.000 MWh/év villamosenergia- és 205.000 MWh/év hőtermelést tudnak megvalósítani. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű főbb műszaki paramétereit a 21. táblázat tartalmazza és a keresztmetszetét a 54. ábra mutatja. Amennyiben hazánkban további égetőművek létesülnének, úgy ahhoz az egész ország hulladékgazdálkodását illeszteniünk kell, hiszen a hulladékkezelési stratégia összhangban kell legyen az ország gazdasági érdekeivel, a fenntartható fejlődéssel és az EU-s vonatkozó előírásoknak is meg kell felelnünk. Ennek értelmében, azon hulladékok elégetésére nem kerülhet sor, amelynek hasznosítására európai uniós kötelezettség vonatkozik. [13]

A hulladékégetés nem csökkenti az anyagában történő hasznosítás hatékonyságát, mert az égetőművek csak vegyesen gyűjtött, anyagában nem hasznosítható hulladék anyagáramot égetnek. Viszont az energetikai hasznosító kapacitást az EU kötelezettségek felett maradó teljes égethető frakcióra nemcsak, hogy érdemes lenne kiépíteni, de vétek lenne lerakással elpazarolni a települési szilárd hulladékok energetikai potenciálját.

21. táblázat. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű főbb adatai

engedélyezett égetési teljesítmény [t/év]	420.000
kazánok száma [db]	4
égetési teljesítmény kazánonként [t/h]	15
gőzteljesítmény kazánonként [t/h]	40
tüzelőberendezés	hengerrostély
gőzparaméterek [bar/°C]	40/400
kazánkonstrukció	négyhuzamú
kazán hatásfok [%]	82
füstgáztisztítás	félszáraz eljárás, SNCR denox
füstgázhőmérséklet kémény előtt [°C]	140
turbina-generátor teljesítmény [MW]	24+3



54. ábra. A Fővárosi Hulladékhasznosító Mű keresztmetszete

Magyarországon egyetlen milliós populációval rendelkező nagyváros van: a fővárosunk. Budapest helyzetét célszerű külön, és kiemelten kezelni, mert Magyarországon itt van lehetőség a legmagasabb hatásfokú energetikai hulladékkezelés – égetés – megvalósítására. Budapesten áll rendelkezésre olyan mennyiségű hulladék, ami kedvező beruházási költséget indukál, és a megtermelt hő hasznosítására is Budapesten van a legjobb lehetőség.

Egy hulladékégetőmű létesítésének magyarországi lehetőségét az alábbi megvalósítás döntés-előkészítési folyamaton keresztül kell vizsgálni (55. ábra).



55. ábra. Megvalósítás döntés-előkészítés folyamata [26]

Ahhoz, hogy koncepcionális döntést hozzunk a hulladékgazdálkodásunk ideális stratégiájának kialakításához, érdemes a GYELV analízist végeznünk, mely során mérlegeljük az egyes hulladékkezelési megoldások tulajdonságait. Ezzel összefüggésben érdemes megvizsgálni a fővárosban 2018-ban kezelt hulladékok sorsát (22. táblázat).

22. táblázat. Az FKF Nonprofit Zrt. 2018-ban kezelt hulladékmennyisége [6]

energetikai hasznosítás a Hulladékhasznosító Műben	370,8 et
szelektíven gyűjtött hulladék	59,7 et
komposztálásra beszállított hulladék	31,8 et
hulladékból készített tüzelőanyag kiszállítás	14,9 et
lerakás	365,6 et
ezen belül: vegyes települési hulladék (EWC: 20 03 01)	245,7 et
lomhulladék	34,2 et

Látható, hogy az első lépés az Európai Unió által is kitűzött cél – 2030-ra 10% alá csökkenteni a lerakott hulladék arányát –a deponálástól való eltérítés elérésének célja felé, az energetikai hasznosítás kapacitásának bővítése. Ennek egyik legkézenfekvőbb megoldása egy második budapesti hulladéktüzelésű fűtőerőmű építése és üzembe helyezése lenne. A fenti táblázat eredményeit elemezve kimondható, hogy – Budapestet és agglomerációját nézve – hozzávetőleg 300.000

t/év kapacitású második égetőmű létesítésével lehet(ne) számolni. Arra egyértelmű választ nem lehet adni, hogy mit érdemes égetni. RDF-et, vegyesen gyűjtött hulladékot, szennyvíz iszapot, vagy ezek kombinációját. Ennek a kérdésnek az eldöntésére részletekbe menő elemző vizsgálatok szükségesek.

A Budapesten létesítendő második égetőmű mellett szól, hogy a dél-budapesti hőkooperációs rendszer létrehozásával - Kelenföld, Kispest, Csepel - olyan jelentős hőfelhasználási igény alakul ki, amelynek alaphőigényét a 300.000 t/év kapacitású égetőmű ki tudná elégíteni. Ráadásul komoly előnye lenne a főváros távhőrendszerében, hogy a hulladékégetőmű jelentős földgázigényt tudna kiváltani. Továbbá a hulladékból termelt hőenergia a számítások szerint a földgáz bázison előállított távhőhöz képest lényegesen alacsonyabb fajlagos hődjával hozzájárulhat a távhő gazdaságosságának javításához. [6]

Összefoglalva: Budapesten lehetne a HUHA2 révén a hulladékból a legkisebb fajlagos beruházási költséggel a legnagyobb energiamennyiséget a legjobb hatásfokkal hasznosítani.

* * *

Tervezési, műszaki segédlet

1.) Értékcsökkenési leírás mértékének megállapításánál az egyes létesítményegységek figyelembe veendő élettartama:

- épületek, építmények: 40 év,
- erősen igénybe vett gépészeti és elektromos egységek: 15 év,
- kevésbé igénybe vett gépészeti és elektromos egységek: 20 – 25 év.

2.) A karbantartási, javítás költségeit a teljes beruházási költségek %-ban lehet jó közelítéssel becsülni:

- épületeknél, építményeknél a beruházási költségek 0,5 – 1%-a,
- villamos szerelvényeknél és berendezéseknél a beruházási költségek 1,5 – 2 %-a,
- gépészeti berendezéseknél és szerelvényeknél a beruházási költségek 3-4%-a.

3.) A hulladékégetőművek élettartamára Nyugat-Európában 35 évet kalkulálnak. Ezt követően teljes felújításra kerül sor.

8. Konklúzió

Az élőlények a természetben meghatározott törvények alapján egymással és az élettelen környezettel komplex ökológiai rendszerekben élnek. Ezeknek az ökológiai rendszereknek a fő célja, hogy stabilak legyenek, „működésük” során stabilitásra törekszenek. A gazdasági törekvések azonban gyakran az ökológiai rendszerek alapvető törvényszerűségeivel ellentétes folyamatokat indítanak el. A gazdaság – egyik, ha nem a legfontosabb – célja a hatékonyságra való törekvés. Ennek érdekében gyakran az ökológiai rendszerek bonyolultságával és összetettségével szemben egy egyszerűsített környezet megteremtésére törekedett. Mi emberek ennek az összetett rendszernek a részei vagyunk. A mai társadalmaknak ebben az igen komplex és érzékeny környezeti rendszerben kell élnie, megtalálnia a saját stabilitását.

Az ember a természetből emelkedett ki. Létrejöttek az ember alkotta közösségek – legyen szó bármilyen méretű életközösségről – melyek az eredeti ökológiai rendszerrel szemben megteremtették saját életkörülményeiket, fogyasztásukat, kialakították szokásaikat. Ez a mesterséges, művi rendszer is az ökológiai rendszer része, melynek kialakított eleme az emberi település. Ezekbe a településekbe, különösen a városokba – és ma már új fogalomként a metropoliszokba – tömörülnek az ipari szereplők. Ennek fő oka, hogy a termelésnek nagyobb hatékonyságot lehet biztosítani egy koncentrált erőforrásokkal rendelkező lokalizációban. A városokban magas szintű a termelő és lakossági infrastruktúra. A magas népsűrűségű területek – kiváltképp a városok – lettek a legfőbb piac és egyben fogyasztók is. A (sűrűn)lakott területekre vezetik a vizet, az energiát, oda viszik – akár közműveken keresztül is – a környezetből kitermelt nyersanyagokat, azokat az élelmiszereket, amelyeket a mesterséges növénytakaróból és az állatvilágból nyernek. Vagyis a természet rendszerét át kell – kellett – alakítani ahhoz, hogy a városi lakosságot ellássák. Napjainkra eljutottunk oda, hogy az élet mozgatórugói a városok lettek. A városi élet előnyeinek következtében növekszik a városi élet emisszióinak – legyen szó füstgáz, hulladék, zaj bármilyen kibocsátásról – a mértéke és hatása is. A rengeteg kiépített infrastruktúra miatt a városok rendkívül sebezhetőek lettek. Például az energiaellátottság megszakadása megbénítja az életet.

A magas fogyasztás a „másik oldalon” is jelentkezik. A városok lettek a legnagyobb hulladéktermelők. A fogyasztáshoz termékekre van szükség. A termelés maximalizálására törekszik a gazdaság, de a mindennemű termelésnek nagy a vesztesége. A természetből nyert erőforrásokat nem lehet 100%-osan átalakítani. Tehát mindenképpen keletkezik maradékanyag, ami sok esetben hulladék formájában jelenik meg. A természetes ökológiai rendszerek kiegyenlítettek, a rendelkezésre álló erőforrásokat a legnagyobb mértékben használják fel. A természetes közegekben

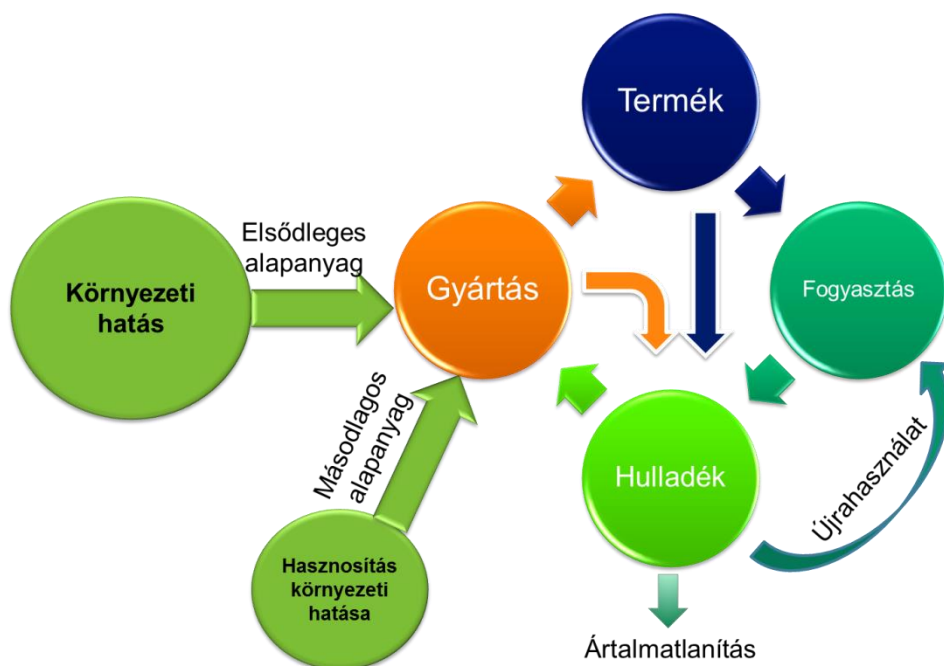
tulajdonképpen nem keletkezik hulladék. A természetes ökoszisztéma egyik szereplőjének a hulladéka, a másik szereplő számára értékes erőforrás, alapanyag. A mesterségesen létrehozott, művi rendszerek ezt a tökéletes körforgásos anyaggazdálkodást, a hulladék nélküli termelést még nem tudták megvalósítani.

A fogyasztói társadalmak fenntartásának egyik alapvető biztosítója a gazdasági növekedés magas szinten tartása, ami a környezetre nézve negatív hatással van. Gondoljunk csak bele a reklámokba. Állandóan ösztönözve vagyunk a fogyasztásra, melyek folyamatos termelést igényelnek. Ez különösen nagy terhet ró a környezetre. A fogyasztási javak gyors forgása és a tudatosan gyengébb minőségű és kevésbé tartós termékek előállítása következtében kirívóan emelkedett a nyersanyagok iránti igény. Ennek következtében mind nagyobb tömegben keletkezik hulladék. A fogyasztó társadalom a környezet pazarló társadalma lett!

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a hulladékok képződése során nemcsak „újratermelődésről” beszélünk, hanem igen nagymértékű mennyiségi növekedéssel is szembe kell nézzünk. Ezért stratégiát, átfogó intézkedési terveket kell készítsünk, hogy a stabilitásunkat megőrizzük.

A hulladékgazdálkodás bárminemű vizsgálata - stratégiai kialakítása, elemzése - rendszerszemléletet követel meg. A hulladékkezelés kialakításánál, az egyes eljárástechnikai megoldások helyes megválasztásánál minden lehetőséget vizsgálni kell. Általánosságokat, „globális igazságokat” a hulladékgazdálkodással kapcsolatban nem szabad kijelenteni.

A gyártási folyamatok inputjához alapanyagok szükségesek, melyek első- vagy másodlagos alapanyagok lehetnek. Az alapanyag előállítás környezeti hatásainak vizsgálata nagyon fontos és kiemelt szempont. Nem lehet kritika nélkül kijelenteni, hogy a másodlagos alapanyagok egyértelműen hasznosabbak, mint az elsődleges alapanyagok, ezért minden esetben szükséges azt megvizsgálni, hogy az alapanyagok környezeti hatásai mekkorák (56. ábra)?



56. ábra. A termelési folyamat

Ennek egy tipikus példája a műanyagok feldolgozása. Sok esetben a másodnyersanyag előállításához szükséges nyersanyag olyan piszkos - esetleg mikroorganizmusokkal fertőzött -, hogy a mosására szánt víz tisztítása nagyobb környezeti terhelést jelent, mint a műanyag hulladék egyéb módon történő kezelése.

Nagyon fontos szempont a hulladékgazdálkodási, hulladékkezelési magatartásunk. Természetesen cél kell legyen az anyagában hasznosítható (szelektív) hulladékgyűjtés mennyiségi és minőségi fokozása. Nem elégséges csak a szelektíven begyűjtött frakció mennyiségének fokozása, mert szükség van a megfelelő minőségű anyagfrakcióra is. Az anyagfajtánként szelektáltan gyűjtött hulladék a begyűjtést követően válogatóművekben kerül további feldolgozásra. Sajnálatos tapasztalat, hogy sok esetben 40-50% visszamaradó – végleges lerakásra kerülő – úgynevezett reject hulladék kerül ki a válogatóművekből.

A rendszerszemlélet itt is érvényesül. Meg kell tanulnunk helyesen szelektíven hulladékot gyűjteni! A helyes hulladékgyűjtési szokások kialakítását már kisiskolás korban meg kell kezdeni. Nagyon fontos, hogy helyesen – a további feldolgozást segítve – gyűjtsük fajtánként külön edényben elhelyezve a hulladékot. Ha például joghurtos dobozt úgy helyezünk a hulladékgyűjtő edénybe, hogy ételmaradékot tartalmaz, akkor az a további feldolgozási eljárást meglehetősen bonyolítja. A gazdaságos hulladékgyűjtés jelenleg megköveteli, hogy tömörítve szállítsuk a hulladékot a céljárműveinkkel. Az ételmaradékot tartalmazó joghurtos doboz a tömörítés következtében – annak ételmaradék tartalmával – elpiszkítja a többi hulladékot is. Hiába szállít a kukásautó csak műanyag frakciót, de az ételmaradékkal

szennyezett műanyag nem dolgozható fel közvetlen másodnyersanyagként. Azt tisztítani szükséges, melyhez mosóvíz, vegyszer szükséges, mellyel szennyvíz keletkezik, ami további feldolgozást igényel. Ráadásul sok esetben a mosási folyamat meleg víz használatával éri el a megfelelő hatást, így a víz hőfokának emeléséhez plusz energia befektetése szükséges. Vagyis előfordulhat olyan állapot, hogy másodlagos alapanyag hasznosításának környezeti hatása nagyobb lesz, mint az elsődleges alapanyagé.

Látható viszont, hogy egy megfelelően tudatos, és jól elsajátított – megtanult – hulladékkezelési magatartásban mekkora potenciál van. Az emberek környezettudatosságára nagy gondot kell fordítani, melynek a lényege, hogy tudással vértesszük fel őket, megtanítsuk őket a tudatos hulladékkezelési lehetőségekre. Sokszor a „jéghegy effektussal” lehet jellemezni a lakosság hulladékgazdálkodási szemléletét. Ez alatt azt értem, hogy sokszor csak addig érdekeltek - és addig érdekli - az embereket a keletkezett hulladék, amíg azt el nem helyezzük a hulladékgyűjtő edényzetben. A heti megszokott napokon jön a kukásautó, kiüríti az edényt, elviszi a szemetet és nincs információjuk róla, hogy mi történik a hulladék anyagárammal utána (57. ábra)?!

Sajnos sok esetben a felelőtlen hulladékkezeléshez vezet a „csak ne az én kertembe” (NIMBY = Not in my Backyard) hozzá állás is. Ennek lényege, hogy az illető számára mindegy, hogy hol lesz a hulladékkezelés megoldva, csak minél messzebb legyen tőle, csak az Ő érdekét ne zavarja, ne az Ő kertjében legyen a hulladék ártalmatlanítva.



57. ábra. A „jéghegy effektus”²⁰ [13]

²⁰ A képet jól megfigyelve láthatjuk, hogy ez nem is egy jéghegy, hanem egy vízben lebegő nejlon szatyor, ami napjaink egyik legnagyobb hulladékos problémája: a tengerekben, óceánokban található rengeteg műanyag.

Nagyon fontos a hulladékkezelési stratégiáink megválasztása során, hogy a realitások talaján mozogjunk, nem szabad az „aktivista” szlengeknek bedőlni. A mérnöki döntéseinket szakmai alapon kell meghozni. Ennek példája az egyszer használatos műanyagok kérdése. Sokszor lehet hallani, hogy „tiltsuk ki az egyszer használatos műanyagokat”, ami inkább szlogen, mint realitás. Természetesen sok olyan egyszer használatos műanyag van, amelyek használatának a korlátozásával – mint például a szívószálak, műanyag poharak – jelentősen csökkenthetjük az ökológiai lábnyomunkat. Azonban a mindennapjainkban használunk olyan egyszer használatos műanyagokat, melyek szinte nélkülözhetetlen eszközeink. Ilyenek például az orvostechikában használatos műanyag fecskendők. Tehát általánosságokat nagyon nehéz megfogalmazni a hulladékgazdálkodással kapcsolatban.

Magyarországon az elkülönített (szelektív) hulladékgyűjtést fejleszteni kell. Kiemelt cél az is, hogy az anyagában nem hasznosítható hulladékot eltérítsük a lerakástól. Ennek egyik lehetősége a vegyes hulladék energetikai hasznosítása. További fejlesztésre szoruló szegmense a hulladékkezelésnek, hogy a már megvalósult MBH kezelők által előállított RDF tüzelőanyagok energetikai hasznosítását meg kell oldani.

A vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék erőművekben történő égetése egy lehetőség, mellyel – véleményem szerint – élni kell. Nem szabad az anyagában nem hasznosítható hulladék anyagáramában rejlő potenciált veszni hagyni, és a hulladéktest deponálásával azt elpazarolni. Ha ezt tesszük, akkor energetikai szemszögből minden egyes kilogramm hulladék lerakásával – budapesti körülményeket nézve – 9000 kJ energiát helyezünk el végleges lerakókban.

A vegyes hulladék égetők technológiája rendelkezésünkre áll. Kidolgozott, több évtizedes üzemeltetési tapasztalat áll rendelkezésünkre, már hazai szinten is. A mérnöki megoldásaink alkalmazásával, a tudatos tervezési tevékenységünkkel, a környezetvédelmi határértékek betartásával, biztonságos technológiáról van szó.

A mérnöki felelősség hatalmas. Nem szabad felednünk, hogy csak egy bolygónk van. Erkölcsi kötelességünk a ránk bízott értékekkel helyesen gazdálkodni. A jövő generációk szükségleteit biztosítanunk kell.

Álljon itt végül útravalóul a Brundtland-bizottság „Közös jövőnk” című jelentésében megfogalmazott fenntartható fejlődés definíciója, mely a teljes mérnök társadalom számára betartandó követelmény kell legyen a munkája, tevékenysége során [49]:

„A fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely biztosítani tudja a jelen szükségleteinek kielégítését anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő generációk lehetőségeit saját szükségleteinek kielégítésére”.

Tervezési, műszaki segédlet

Összefoglalva a hulladékégető létesítmény tervezésének információigénye:

1.) A begyűjtési területről:

- a terület nagysága, méretei (x)²¹,
- a kiszolgált lakosság száma, éves ingadozása és várható változása legalább 15 éves üzemeltetési időtartam alatt (x),
- a területen található termelő létesítmények és intézmények jellege, fejlesztési irányai és azok mértéke, jellemzői (x),
- a terület terep- és éghajlati jellemzői (x).

2.) A feldolgozásra kerülő hulladékokról:

- a hulladék mennyisége, éves ingadozása és várható változása (t/d, m³/d, t/év, m³/év);
- a hulladék összetétele, fontosabb fizikai és kémiai jellemzői és ezek ingadozása, valamint a következő jellemzők várható változása:
 - kémiai összetétel,
 - hamu-, víz- és éghetőanyag tartalom,
 - halmazállapot,
 - fűtőérték,
 - a hamu olvadási jellemzői,
 - sűrűség,
 - szemcseméret és eloszlás (szilárd hulladékoknál),
 - szilárd szennyezőanyag-tartalom és maximális szemcseméret,
 - viszkozitás 20 és 100 °C-on,
 - kémhatás,
 - halogénanyag és nehézfém-tartalom,
 - egyéb mérgezőanyag-tartalom,
 - tűzveszélyességi fokozat, gyulladás- és lobbanáspont,
 - anyagfajta szerinti összetétel.

²¹ Az (x)-szel jelölt információk csak a kommunális és a regionális kiszolgálást biztosító ipari égetőknél lényegesek.

3.) A hulladékgyűjtés rendszeréről:

- az alkalmazott gyűjtőedények és szállító járművek típusa, műszaki jellemzőik, mennyiségük,
- a gyűjtési-szállítási rendszer jellemzői.

4.) A lehetséges telephelyről:

- közművesítés helyzete,
- természeti adottságok,
- építési hatósági előírások,
- a területre vonatkozó környezetvédelmi előírások,
- a maradékanyagot befogadó rendezett lerakóhely távolsága, befogadóképessége,
- a terület nagysága, bővítési lehetőségek,
- meteorológiai viszonyok.

5.) A hőhasznosítási lehetőségekről:

- a hőhasznosítás módja,
- a hőhordozó közeg jellemzői,
- az értékesíthető hőhordozó közeg mennyisége, az átvétel időbeni ütemezése,
- az átvevők távolsága, speciális kikötéseik árban vagy szállítási feltételekben.

6.) Az égetőberendezésről:

- napi, heti és éves üzemidő,
- a tüzelőberendezés teljesítménye és terhelhetősége,
- a tüzelőberendezések műszaki paraméterei,
- a hulladékok tárolási igényei,
- a hulladékok előkészítési igénye és megoldási lehetősége,
- az adagolás módja,
- az alkalmazott füstgáz tisztítás jellemzői,
- a póttüzelőanyag mennyisége, jellemzői,
- a villamosenergia-igény, vízigény és segédanyagigény (pl. vegyszerek),
- a mérő- és szabályozórendszer kialakítása,
- a szükség szerinti szennyvíztisztítás jellemzői,
- a maradékanyag tárolása és elhelyezése,
- a kapacitásbővítési lehetőségek, alternatív szükségmegoldások kiépítésének igénye.

7.) Egyéb szempontok:

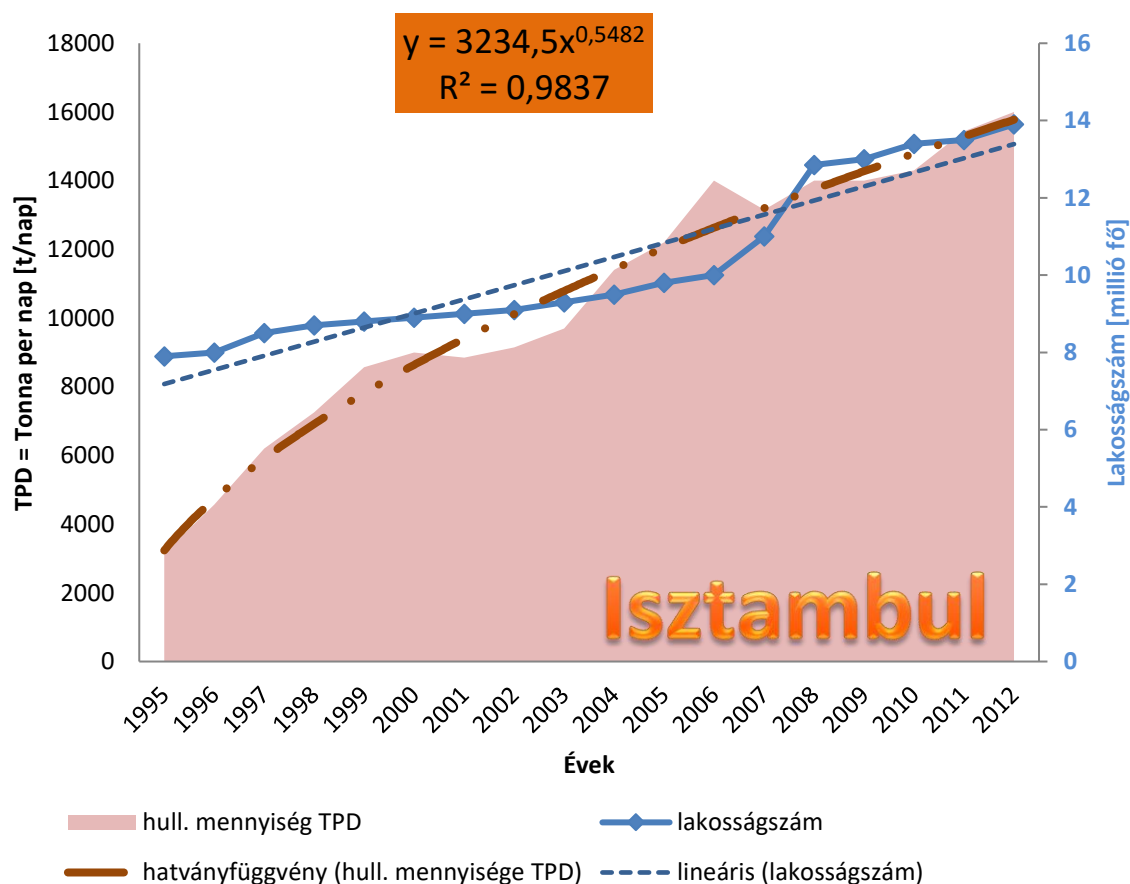
- a technológia korszerűsége, referencia-háttér, üzemeltetési tapasztalatok,
- a technológia üzembiztonsága, karbantartás és javítás lehetőségei,
- a technológia munkaerő-szükséglete, képzési lehetőségek,
- magas- és mélyépítési követelmények,
- a megvalósítás előkészítettsége (tervezési, előkészítési és beruházási időigény, kivitelező kapacitás biztosíttósága, kooperációs gyártási kérdések),
- a technológia hozzáférhetősége,
- a munkavédelmi, tűzvédelmi és egészségügyi előírások betarthatósága,
- a beruházási és üzemeltetési költségek, devizaigény.

9. Mellékletek

9.1. Nagyvárosok hulladékmennyiségének növekedése

A 4.3.1. fejezetben ismertetésre került, hogy az égetőművek beruházásának döntés előkészítésénél a városok és agglomerációjának népességváltozását minimálisan 15 évre előre célszerű prognosztizálni. Ezt egy nagyon szemléletes – és gyakorlati – példával tudom bemutatni. Isztambulban fog üzemelni Európa legnagyobb égetőműve, mintegy évi egymillió tonna hulladék égetési kapacitásával.

A lakosságszám változása és a keletkező hulladék mennyisége közötti összefüggést ábrázoltam a lenti ábrán (58. ábra). A vízszintes tengelyen az évek vannak feltüntetve. Tegyük fel, hogy 2012-ben kezdték előkészíteni a beruházást, így az adatokat is 2012-ben elemezték. A diagramon két függőleges tengelyt ábrázoltam. A bal oldali tengelyen a keletkező települési szilárd hulladék mennyisége látható tonna per nap dimenzióban. A jobb oldali függőleges tengelyen pedig Isztambul lakosságának a száma látható millió fő mértékegységben.



58. ábra. Az isztambuli lakosság száma és keletkező hulladék összefüggése

Elemezzük részletesen a fenti ábrát (58. ábra)! A lakosságszám folyamatosan nőtt a török nagyvárosban. Ha az adatokra trendvonalat illesztünk (szaggatott **kék színű** vonal), akkor lineáris regresszió figyelhető meg, vagyis egy egyenessel közelíthető a lakosságszám növekedése. A lineáris növekedési tendencia gyakorlatilag a világ minden nagyobb városára igaz. (Jelen írás mellékletében több nagyváros – Szingapúr, Delhi – hasonló elemző diagramja megtalálható - 9.1. melléklet.) A növekedés üteme tér csak el, vagyis a trendvonal egyenesének iránytangense, vagyis a meredeksége. Általánosságban az megjegyezhető, hogy a fejlődő országokban található metropoliszok lakosságnövekedése gyorsabb, tehát ott az egyenes meredekebb. A fejlett országokban a nagyváros népességyarapodásának üteme lassabb. Ennek oka, hogy az elmaradottabb régiókban a nagyvárosokba többen költöznek be, elsősorban a jobb élet reményében. A fejlődő világban a nagyvárosi „szegényebb” élet is jobb életkörülményeket biztosít, mint a falvakban történő élet – még ha a beköltözés utáni életvitel nagyvárosi nyomornegyedekben fog történni. Ezért a városokba történő beköltözés intenzívebb a harmadik világ urbanizációjában.

Tehát megállapítható, hogy a városok populációja lineáris trendvonal mellett növekszik. A „több ember, több szemetet termel” elv alapján következik, hogy a városok lélekszámának növekedésével a keletkező hulladék mennyisége is növekszik. Azonban a mennyiségi növekedés ütemét érdemes behatóbban elemezni. A mélyreható vizsgálat szükségessége, - ahogy korábban is írtam –, hogy legalább 15 évre előre prognosztizálni tudjuk a hulladékégető erőművet kiszolgáló begyűjtési területen a gyűjtött hulladék mennyiségének alakulását. Nem volt ez másképp az isztambuli égetőmű döntés előkészítése során sem. [36]

A grafikonon a színezett terület mutatja Isztambul vegyesen gyűjtött hulladékának mennyiségét (58. ábra). Korábban említettem, hogy a hulladék keletkezésének paraméterei (minőségi és mennyiségi egyaránt) szoros összefüggésben vannak a gazdasági-társadalmi-környezetvédelmi kérdéskörrel.

Látható, hogy a hulladék mennyisége növekszik. Amennyiben – a lakosság növekedéséhez hasonlóan – erre az adatsorra is trendvonalat illesztünk, észrevehetjük, hogy annak jellege nem lineáris (58. ábra – **barna színű** pontozott vonal). A sűrűn lakott nagyvárosok - melyek lakosságszáma olyan mértékű, hogy azok elegendő hulladékot „termelnek” egy égetőmű számára – begyűjtött száraz vegyes hulladékának trendjét legjobban a **hatványfüggvény** közelíti, jellegét az írja le a legpontosabban.

A mai informatikai eszközökkel, a rendelkezésünkre álló szoftverek segítségével, excel táblázatkezelő programmal könnyen felvehetünk az évek-hulladékmennyiségek függvénypárhoz hatványfüggvény típusú trendvonalat. Az így kapott regressziós

görbe megmutatja a begyűjtött hulladékmennyiség változásának jellegét is, mely segít minket a prognosztizációban, vagyis, hogy előre megbecsüljük a rendelkezésre álló hulladék mennyiségét.

A táblázatkezelő program segítségével a trendvonal egyenletét is felvehetjük a diagramra (58. ábra). A kapott hatványfüggvény egyenlete megmutatja, hogy prognosztizálhatóan hogyan alakul egy mai nagyváros hulladékmennyisége. Ha arra vagyunk kíváncsiak, hogy 2025-ben Isztambulban mekkora hulladékmennyiség fog rendelkezésünkre állni, akkor azt a kapott hatványfüggvény egyenletének ismeretében könnyen kiszámíthatjuk,

$$y = 3234,5 \cdot x^{0,5482} \quad (43.)$$

A tényadatok 1995. óta álltak rendelkezésünkre, az volt az $x_1=1$ év – első év. 2025, $x_2=30$ évvel később van vagyis,

$$x = x_1 + x_2 = 1 + 30 = 31 \quad (44.)$$

$x=31$ értéket kell behelyettesíteni.

A meghatározott hatványfüggvényünkbe helyettesítve,

$$y = 3234,5 \cdot x^{0,5482} = 3234,5 \cdot 31^{0,5482} = 21250,6 \text{ TPD} \quad (45.)$$

megkapjuk, hogy 2025-ben – a jelenlegi növekedési tendencia mellett – 21250,6 tonna hulladék fog keletkezni naponta, vagyis ilyen tömegáramú maradékanyag kezeléséről kell gondoskodni. Természetesen a számítást további, tetszőlegesen választott évre is elvégezhetjük.

A trendvonal alakjának elemzése mélyebb matematikai vizsgálatokat követel meg. A hulladék mennyiségére illesztett regressziós görbe fogja megmutatni nekünk, hogy a jövőben mekkora hulladékmennyiségre számíthatunk.

Miért szükséges ez? Ismertetek egy általam kidolgozott számítási eljárást, amely segítségével elfogadható pontossággal prognosztizálni tudjuk, hogy a jövőben mennyi hulladék fog keletkezni egy adott régióban.

Szakmailag pontosan megfogalmazva, az a célom, hogy analitikus regressziószámítással, a tényezőváltozónak az eredményváltozóra gyakorolt hatását matematikai modell segítségével fejezzem ki. Leegyszerűsítve az előbbi – kissé bonyolult – megfogalmazást, a keletkező vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladék mennyiségét az idő függvényében ábrázolva, a korábbi évekből rendelkezésemre álló tényadatokból megbecsüljem a jövőre nézve, hogy egy adott begyűjtési területről

mekkora mennyiségű hulladékra számíthatunk. Ez a hulladékhasznosító műveknek egy alapvető információ.

A 4.3.1. fejezetben olvasható gondolatmenetet folytatva, maradjunk Isztambul példájánál és a török nagyváros adatainál (58. ábra). A korábbi évekről rendelkezésünkre álló hulladékmennyiségi adatokat a megfelelő értékpárokhoz (évekhez) rendelve, koordinátarendszerben való ábrázolásával lehetőséget teremtünk a függvény jellegének becsléséhez. Kimondhatjuk tehát, hogy a nagyvárosokban keletkező hulladék mennyiségét nem lineáris függvénykapcsolat írja le, hanem a már korábban említett hatványfüggvény.

A hatványfüggvény általános képlete,

$$y = a \cdot x^b \quad (46.)$$

Az a paramétert a gyakorlatban nem értelmezzük, a b paramétert rugalmassági - vagy egyes szakirodalmakban elaszticitási - együtthatónak is nevezzük. Azt jelenti, hogy x egy százalékos változása, y hány százalékos változását vonja maga után. Hulladékos példára „lefordítva” az évek előrehaladásával mekkora hulladékmennyiségi változásra számíthatunk. A hulladékmennyiség változás függvényének lefutása b paraméter értékétől függ. A metropoliszok hulladékmennyiségének alakulása során a b paraméter értéke zérus és egy között változik ($0 < b < 1$). Ez minden esetben úgynevezett lassú növekedésű - rugalmatlan - hatványfüggvényt fog jelenteni.

Az a és b paraméterek értékei - elméletben - a következő egyenletrendszerekből határozhatóak meg,

$$\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i^b = a \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^b)^2 \quad (47.)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i^b \cdot \ln x_i = a \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^b)^2 \cdot \ln x_i \quad (48.)$$

A fenti egyenletek, csak hosszas számítások útján fejezhetőek ki a -ra és b -re. Ezért érdemes lineárisra alakítani a hatványfüggvényt, mely logaritmizálás segítségével megtehető. Logaritmizálással a következő összefüggést kapjuk,

$$y = a \cdot x^b \rightarrow \log y = \log a + b \cdot \log x \quad (49.)$$

Az átalakítás után nem x -ek és y -ok között van lineáris kapcsolat, hanem $\log y$ -ok és $\log x$ -ek között. Vagyis egyszerűen meghatározhatjuk az a és b paramétereket, ha az eredeti változók logaritmusát képezzük és azok között lineáris kapcsolatot keresünk.

Konkrét szám adatokkal, az isztambuli égetőmű adataival számoljuk ki - alkalmazva a fenti számítási módszert - a török nagyvárosban milyen mértékű hulladéknövekedéssel számolhatunk. Megállapíthatjuk tehát azt, hogy 2025-ben, 2030-ban - és így tovább- mekkora hulladékmennyiség fog rendelkezésére állni az égetőműnek.

A rendelkezésre álló tényadatokat a lenti táblázatban foglaltam össze. Ezeket azért is neveztem tényadatoknak, mert ezek a „múlt” adatai, tehát konkrétan a valóságnak megfelelő rendelkezésünkre álló adatok (23. táblázat). A teljesség igénye miatt a táblázatban a népességadatokat is feltüntettem, de ennek az adatsornak a számítás során nem lesz szerepe.

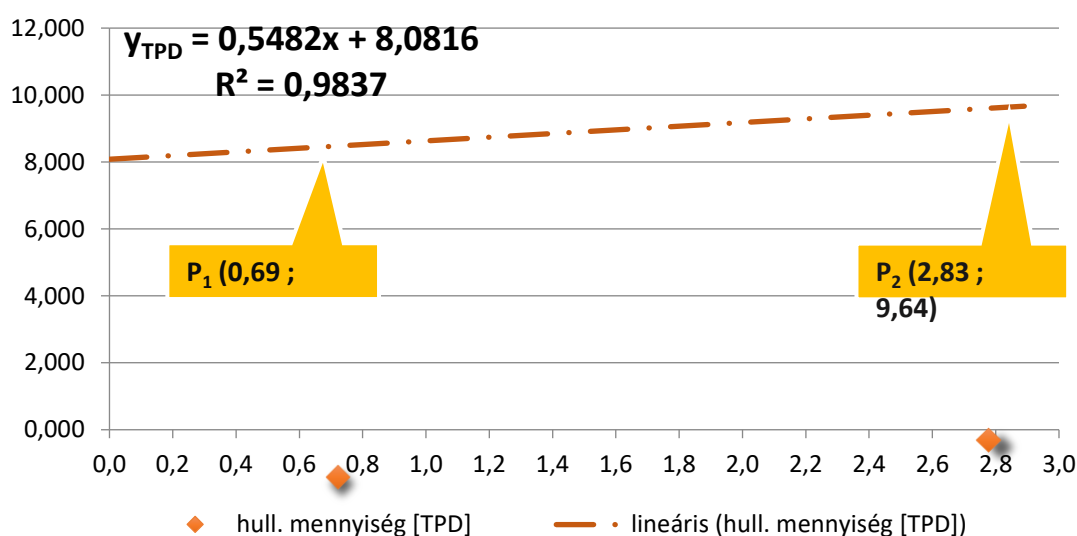
23. táblázat. Az isztambuli hulladékmennyiségek

év	lakosságszám [millió fő]	hulladékmenny. [TPD] <i>y érték</i>	x érték	log x	log y
1995	7,9	3150	1	0,000	8,055
1996	8	4570	2	0,693	8,427
1997	8,5	6200	3	1,099	8,732
1998	8,7	7250	4	1,386	8,889
1999	8,8	8570	5	1,609	9,056
2000	8,9	9000	6	1,792	9,105
2001	9	8850	7	1,946	9,088
2002	9,1	9150	8	2,079	9,122
2003	9,3	9700	9	2,197	9,180
2004	9,5	11400	10	2,303	9,341
2005	9,8	12200	11	2,398	9,409
2006	10	14000	12	2,485	9,547
2007	11	13150	13	2,565	9,484
2008	12,85	14000	14	2,639	9,547
2009	13	14000	15	2,708	9,547
2010	13,4	14300	16	2,773	9,568
2011	13,5	15433,3	17	2,833	9,644
2012	13,9	16000	18	2,890	9,680

A számítási módszerhez az x értékeket az évek jelentik. A számítás során azonban ezeket a kiinduló évtől (1995-től) kezdődően $x=1, 2, 3, \dots, 18$ értékekkel helyettesítjük. Ennek az oka, hogy arra vagyunk kíváncsiak, hogy évről évre mekkora a hulladéknövekedés mértéke. Az abszcissa tengelyre az éveket rögzítettük, de a

számítás során nem tudjuk kezelni az éveket, mint számokat, hanem azt keressük, hogy 5, 10 év múlva mekkora hulladékmennyiség áll majd rendelkezésünkre (58. ábra).

Ahogy korábban írtam, az a és b paramétereket úgy tudom meghatározni, hogy az x és y paraméterek logaritmusát meghatározom, mert a logaritmizált értékek között van lineáris kapcsolat. Emiatt a fenti táblázat 5. és 6. oszlopában az x (évek száma) és y (hulladék mennyisége) paraméterek logaritmusát rögzítettem. A $\log x$ és $\log y$ értékeket diagramban feltüntethetjük, és így láthatjuk az értékek közötti lineáris kapcsolatot (59. ábra).



59. ábra. A logaritmizált értékek diagramja az isztambuli adatokkal

A koefficiens - a és b - paraméterek meghatározásához a következő lépésben fel kell írnom a fenti egyenes egyenletét (59. ábra). Ezt az egyenes két pontjának ismeretében könnyedén megtehetem,

$$(y_2 - y_1) \cdot (x - x_1) = (x_2 - x_1) \cdot (y - y_1)$$

$$(9,64 - 8,42) \cdot (x - 0,69) = (2,83 - 0,69) \cdot (y - 8,42) \quad (50.)$$

A fenti egyenletet megoldva megkapjuk a lineáris egyenes egyenletét,

$$y = 0,548x + 8,081 \quad (51.)$$

Az egyenlet x változója adja a hatványfüggvény b paraméterét vagyis,

$$y = a \cdot x^b$$

$$y = a \cdot x^{0,548} \quad (52.)$$

Az a paraméter értékének a meghatározásához a (51.) egyenletben közölt egyenes egyenletének a konstans értékét (8,081) vissza kell transzformálni. Vagyis a logaritmizált érték inverzét kell venni,

$$e^{8,081}=3234,4 \quad (53.)$$

Így megkaptuk hulladék mennyiségi változásának regressziós függvényét, mely a következő,

$$y = 3234,4 \cdot x^{0,548} \quad (54.)$$

A kapott hatványfüggvény az előretekintés lehetőségét adja meg. A beruházás döntés-előkészítésének segíti, illetve a beruházás megvalósításának a kockázatát csökkenti, ha meg tudjuk számításával becsülni, hogy lesz-e elegendő hulladék az égetőmű üzemeltetéséhez.

A (43.) egyenletben az excel segítségével meghatározott hatványfüggvénnyel határoztuk meg Isztambul tekintetében, 2025-re vonatkozóan a rendelkezésünkre álló hulladékmennyiséget. Látható, hogy az ebben a fejezetben bemutatott módszerrel kapott algoritmus (54.) és a szoftverrel megkapott egyenlet egyforma. Így a végeredmény is azonos kell legyen, a számítási módszer pedig természetesen megegyezik a (43.) – (45.) egyenletekben bemutatott módszerrel.

A kapott regressziós függvényt grafikusan is láthatjuk, mely a hulladék mennyiségi növekedését mutatja az évek függvényében Isztambul városában (58. ábra). Az ábrán megjelenítettem a korrelációs koefficiens ($R^2=0,9837$) értékét is.

A trendvonal típusának megállapítását – egész pontosan elfogadhatóságát, „jóságát” – mérőszámmal is tudjuk vizsgálni. Így egzakt mérőszámot tudunk hozzárendelni. Vagyis a hulladék mennyiségének adatai és a trendvonal értékeinek adatai közötti kapcsolatot célszerű mérőszámmal jellemezni. Erre alkalmas mérőszám a korrelációs együttható, vagy más néven Pearson-féle²² korrelációs együttható. A nevezett együtthatót r – vagy R - betűvel jelölik, és a mérések közötti lineáris kapcsolat szorosságát méri. Amennyiben egyhez (mindegy, hogy negatív vagy pozitív esetben) közelít a Pearson-féle együttható, azt mondhatjuk, hogy a két változó – jelen esetben az évek és a keletkező hulladék között – magas korreláció van. Látható, hogy az érték nagyon közel áll $R^2=1$ értékhez, vagyis erős korrelációról beszélhetünk.

* * *

²² Karl Pearson (1857-1936): Angol matematikai statisztikus, a modern statisztika alapjainak megteremtője.

A korrelációs koefficiens számszerű kiszámítása nem túl bonyolult. Jelölje a két változóra, vagyis az évekre és a keletkező hulladékmennyiségére vett mintát,

$$\begin{aligned} x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \\ y_1, y_2, y_3, \dots, y_n \end{aligned} \quad (55.)$$

Ekkor a korrelációs koefficiens az alábbi képlettel számolható,

$$r = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (56.)^{23}$$

A kapott r érték mindig -1 és 1 értékek között van. Amennyiben a korreláció gyenge, úgy az r értékei zérushoz közelít. Ha például $r=0$ értéket kapunk, akkor az azt jelenti, hogy az adatok között nincs összefüggés. Ennek az ellenkezője, vagyis ha a két változó esetén a kapott pontok egy egyenes mentén fekszenek, akkor a korreláció értéke $r=1$ vagy $r=-1$. Amennyiben egyhez (mindegy, hogy negatív vagy pozitív esetben) közelít a Pearson-féle együttható, azt mondhatjuk, hogy a két változó – jelen esetben az évek és a keletkező hulladék között – magas korreláció van. Ha meg akarjuk vizsgálni egy tetszőleges nagyváros prognosztizálható hulladékmennyiségét, akkor az $r>0,8$ érték esetén a trendvonal megfelelő.

* * *

A „hagyományos” számítás talán bonyolultnak tűnt. Ma már, az informatika korában ezeket a számításokat számítógépes programok segítségével könnyedén elvégezhetjük. Az excel táblázatkezelő program segítségével könnyedén felvehetjük, és illeszthetjük a trendvonalat. A program maga kiszámolja a trendvonal egyenletét és a Pearson-féle kitevő értékét is.

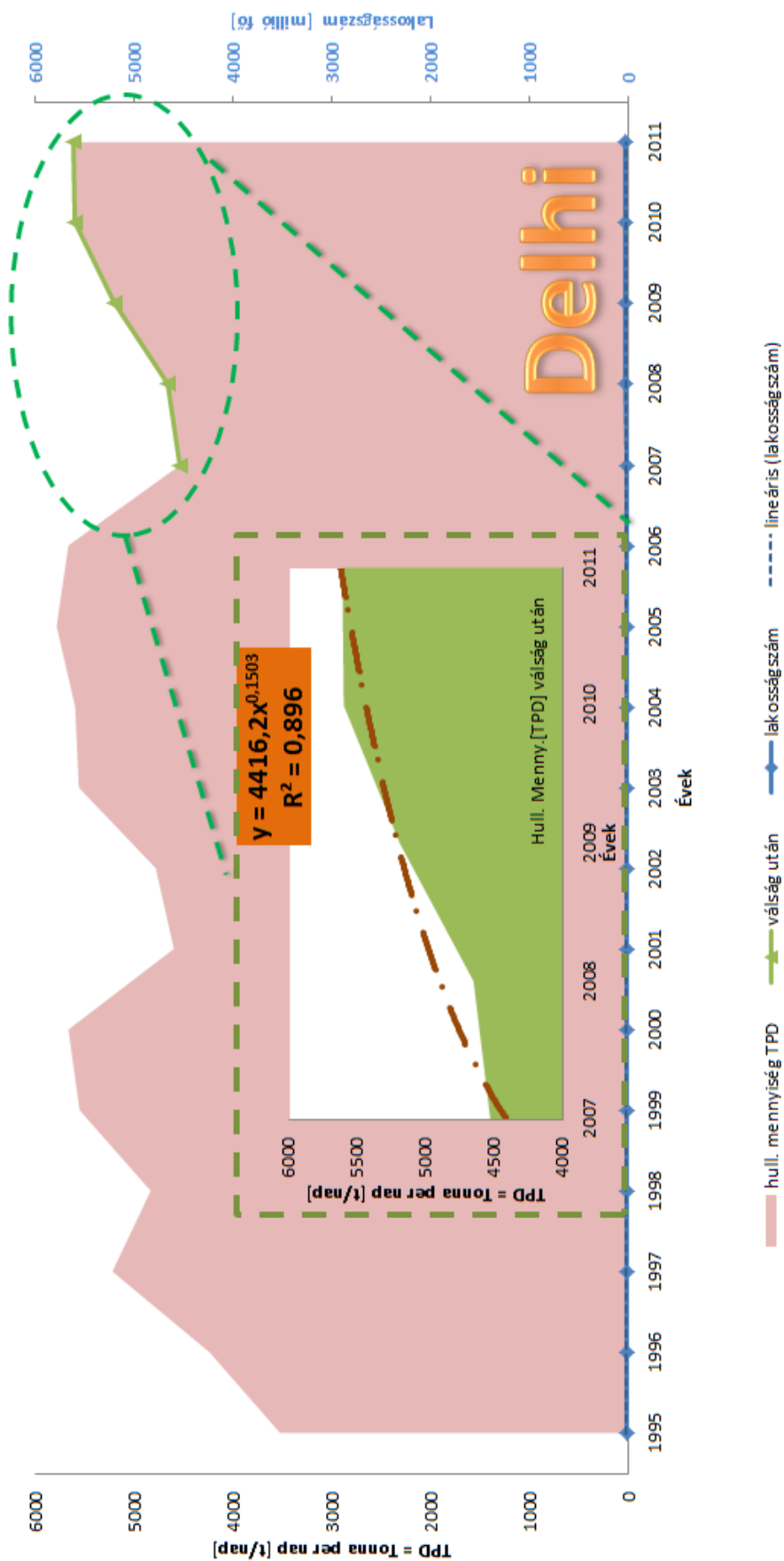
Az előbbieken részletesen bemutatásra került egy módszer, mellyel prognosztizálható számítás készíthető a hulladék mennyiségének meghatározásához. Isztambul példáján keresztül konkrét szám adatokkal végeztünk el számításokat.

Érdekességgéppen bemutatom Delhi (60. ábra) és Szingapúr hasonló módszerrel elkészített elemző ábráját (61. ábra).

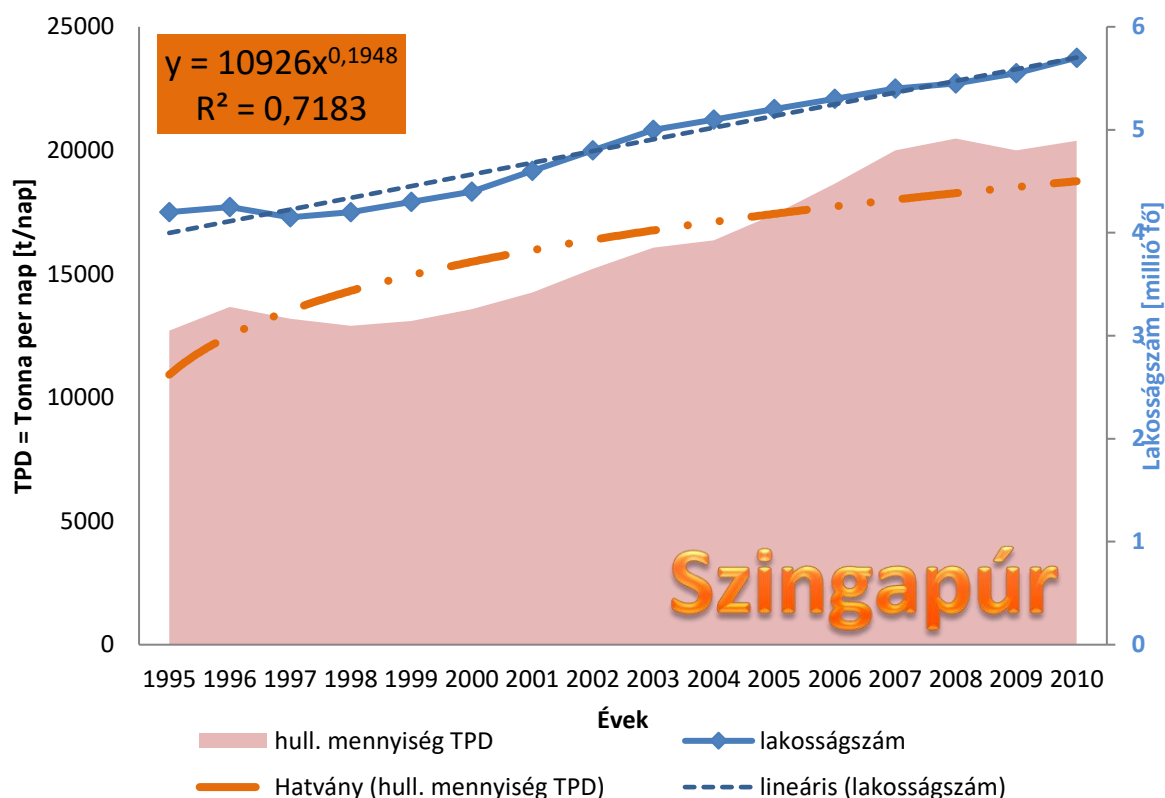
India a fejlődő országok közé tartozik. Az elmaradott országok hulladékgazdálkodását a 2008-as gazdasági világválság sokkal nagyobb mértékben befolyásolta, mint a fejlett országokét. Ezért itt az elemző ábrán 2008-tól vizsgáltam meg a hulladék

²³ Egyes esetekben – például az excel táblával történő számítás során is – r^2 érték adódik! Az alább leírtak r -re és r^2 -re is igazak.

mennyiségének trendjét, mert ekkor kapok reális képet az indiai nagyváros mennyiségi hulladékviszonyairól. Az Isztambul városára jellemző, és az ott megállapítottak, mind a lakosságszám változásának a regressziója, mind a – válság utáni „normál” – hulladék fajlagos napi mennyiségére vonatkozóan Delhi városára és Szingapúrra egyaránt igazak.



60. ábra. Delhi lakosság száma és keletkező hulladék összefüggése



61. ábra. Szingapúr lakosság száma és keletkező hulladék összefüggése

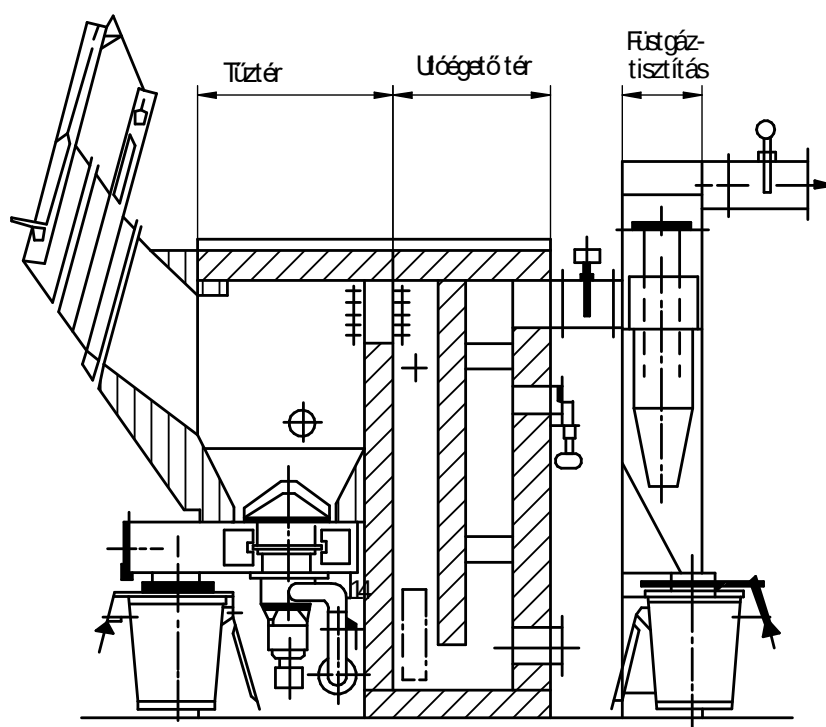
Szingapúr mennyiségi hulladékanalízisének ábráján feltűnhet, hogy a hulladékmennyiség trendvonala „laposabb”. Szingapúr kiváló példája a tudatos hulladékgazdálkodási magatartásban rejlő potenciális lehetőségeknek. Noha 1970. és 2016. között Szingapúrban a virágzó gazdaság és a rohamosan növekedő lakosságszám következtében meghétszereződött a települési szilárd hulladék mennyisége, mára már világviszonylatban is híres a köztisztaságáról a város. Egyrészt a tudatos magatartás fejlesztésének következtében nagyon jó mutatószámmal rendelkeznek a fajlagosan keletkezett hulladékok tekintetében, másrészt egy átfogó és folyamatosan fejlesztett szilárd hulladékkezelési infrastruktúrát alakítottak ki. [7]

Összefoglalva: a hulladék keletkezési mennyiségéről elmondható, hogy a lakosság létszámának növekedése és a hulladék „termelése” között kapcsolat van, de a regresszió nem lineáris. A nagyvárosok lakossága növekszik, de a fajlagosan – egy lakosra vetített – megtermelt hulladék mennyiségében csökkenés tapasztalható. A növekedés ütemét a hatványfüggvény írja le, mellyel megbecsülhető előre, hogy körülbelül milyen mértékben változik a szilárd vegyes hulladék mennyisége. Vagyis mekkora hulladék tüzelőanyaggal számolhatnak az égetőművek.

9.2. A korábban alkalmazott rostélytípusok

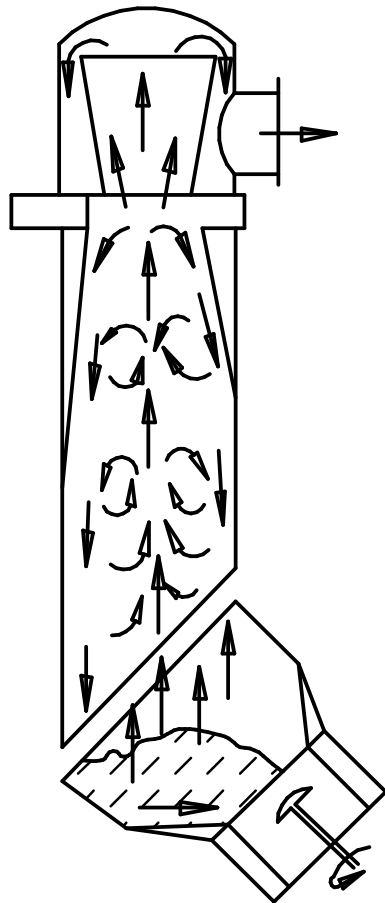
Ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra azok a rostélytípusok, melyeket ma már új építésű égetőművekben nem alkalmaznak.

Forgó rostély: A hulladék feladása a szerkezeti megoldástól függően központosan vagy a rostély szélén lehetséges. A kisteljesítményű égetőknél a hagyományos állórostélyok hátrányainak csökkentésére alkalmasak. Keverő, forgató hatásuk jó, a bolygatást viszont nem teljesítik megfelelően. Az égetés nem szabályozható megfelelően, a levegőeloszlás egyenlőtlen.



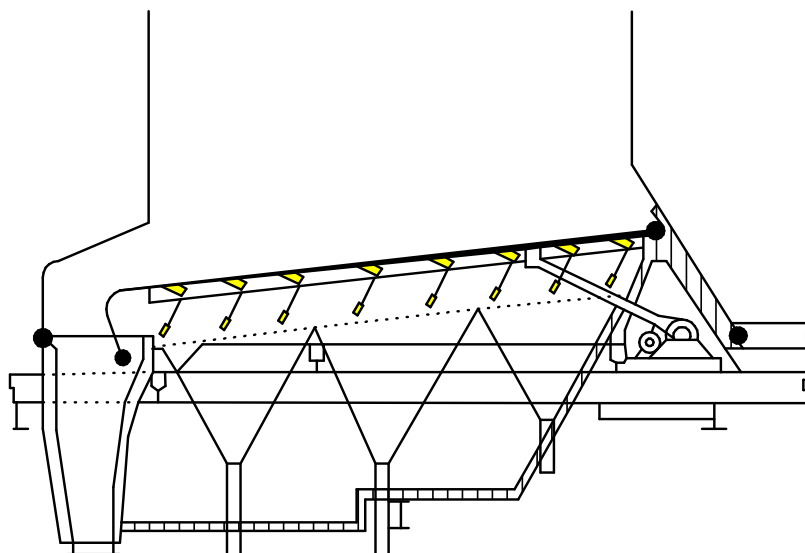
62. ábra. Forgó rostély

Kosár rostély: Kisebb teljesítményű égető berendezésekhez. Egyműszakos üzemben alkalmazandó, mert gyorsan lehet üzembe helyezni. Lényegében egy kúp formájú és a kúp tengelye körül forgó rostély. A forgató tengely ferdén van elhelyezve. Az égetési folyamat nem irányított teljesen, a levegőeloszlás egyenlőtlen, a darabos hulladék előaprítását követeli meg.



63. ábra. Kosár rostély

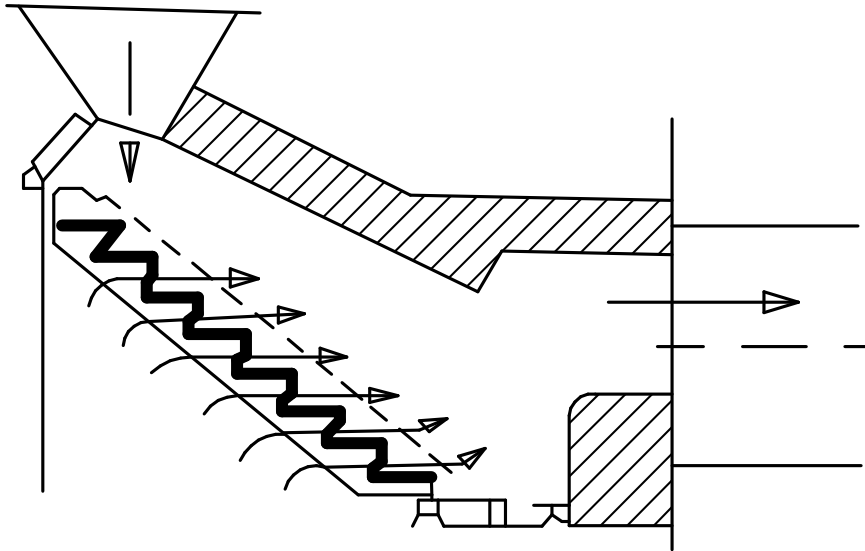
Álló rostély: Kisteljesítményű szilárd hulladékot égető kemencék legegyszerűbb változata az álló rostélyos égető. Az álló rostélyok lehetnek egyszerű sík rostélyok, valamint ferde és lépcsős rostélyok. Mindenkor utóégető kamra szükséges. A füstgázok hűtését többnyire hideg levegő befúvásával, illetve ritkábban vízbepermetézéssel oldják meg. A hamu eltávolítása szakaszos. Olyan helyen érdemes alkalmazni, ahol a hulladék elkülönített ártalmatlanítása szükséges: például kórházakban, egészségügyi intézményekben.



64. ábra. Álló rostély

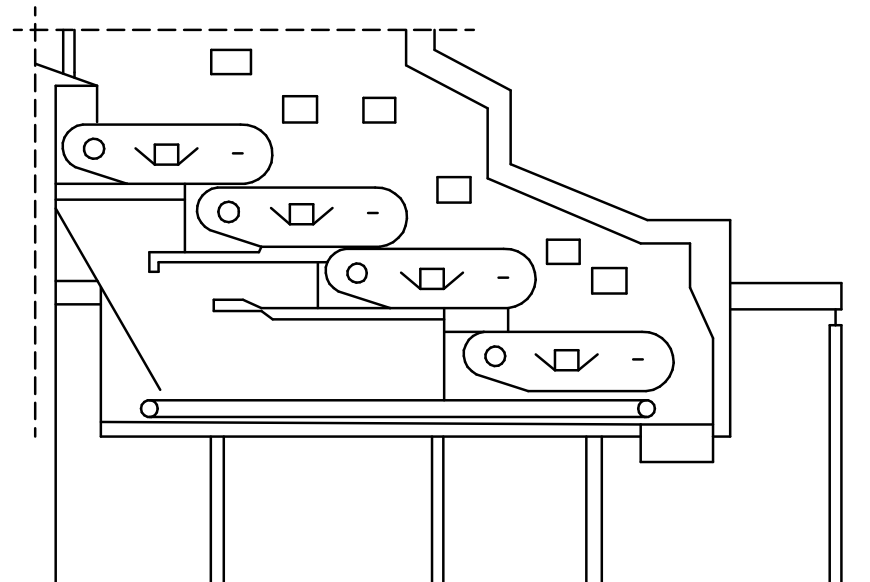
Billenő rostély: Egymás után helyezkednek el a szegmensszerűen kiképzett rostélyelemek. A billenő mozgás bolygatja és szállítja tovább a hulladékot. Az egyes rostélyelemeket a tengelyeik hidraulikus úton külön-külön mozgatják. A kibillenések száma és hossza a mindenkori égési folyamat szerint szabályozható. Elsősorban a könnyen éghető szilárd hulladékoknál alkalmazható. A szegmensek – rostélyelemek - száma 12 és 25 között változik. A levegőbefúvás zónás és általában 3 – 5 szegmens képez egy zónát.

Lépcsős rostély: A lépcsős rostélyokat általában fix, cserélhető rostélypálcák alkotják. A rostély anyaga lehet kerámia, samott vagy öntöttvas. A rostélyon lassan lefelé csúszó hulladék részben az izzó ágy alaptüze, részben felső gyújtás révén - olajégő, falazat hőszugárzása - gyullad meg. Szinte mindig a kiégető rostély szerepét betöltő síkrostéllyal - esetleg forgó rostéllyal - kapcsoltnak építik be. Hulladékégetés szempontjából több hátránya van. Az égetési folyamat nem szabályozható kellőképpen. A levegőellátás egyenlőtlen. A füstgázok tökéletes elégetése a tűztérben nem biztosítható, ezért utóégető kamrák hozzáépítése szükséges.



65. ábra. Lépcsős rostély

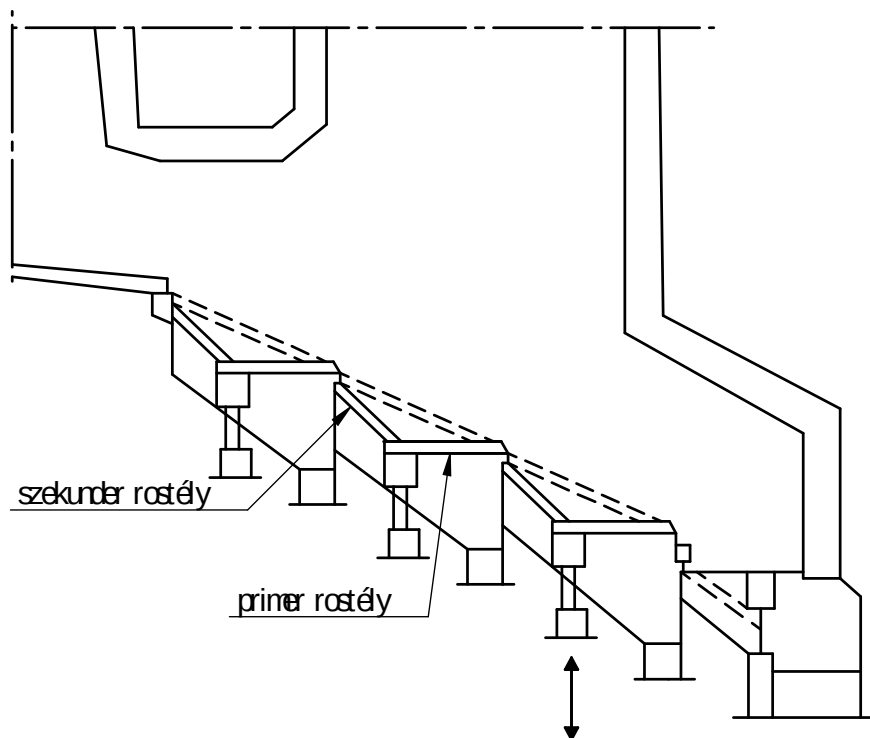
Vándor rostély: A hulladék lépcsősen elhelyezett vándorrostélyokon ég el. Általában 3-4 vándorrostélyból áll. A rostélyok vízszintes elrendezésűek, általában csak a legelső ferde dőlésszögű. Az első két rostélyon megy végbe a hulladék szárítása és begyűjtése, az utolsón a kiégése. Az egyes rostélyokon a hulladék változatlan rétegvastagságban halad, csak az egyik vándorrostélyról a másikra való áthulláskor lazul fel. A vándorrostélyok zónás levegő-aláfúvással rendelkeznek. Hulladék réteg vastagság: 0,8 – 1,5 m.



66. ábra. Vándor rostély

Lengő rostély: A többlépcsős lengőrostély 2 – 5 darab lengő rostélyelemből áll. Minden elem primer és szekunder rostélyból áll. Minden elem egyik vége

elforgathatóan rögzítve van, a másik vége szabadon mozoghat. A szekunder rostély pálcái szabad végükön, ferdén felfekszenek a primer rostélyra. A primer rostély billentésekor a szekunder rostély pálcái ide-oda csúsznak a primer rostélyon. Ez a periodikus lengő-csúszó mozgás biztosítja a hulladék bolygását és előrehaladását.



67. ábra. Lengő rostély

Az előbbi rostélytípusokhoz képest részletesebben mutatom be a henger rostélyt és az alá és fölé toló rostélyokat, mert ezeket a rostélytípusokat alkalmazzák erőművi hulladékégető berendezéseknél a leggyakrabban.

9.3. A fajlagos elméleti levegő- és füstgázmennyiség meghatározása elemi analízis alapján

Az 6.2. fejezetben a mérnöki tervezési gyakorlatban használt és alkalmazott elméleti levegő és füstgázmennyiség meghatározása lett ismertetve. A teljesség igénye miatt, illetve, hogy komplex ismereteket közöljön e jegyzet, ezért a melléklet ezen fejezetében az elemi analízis adataival kerül bemutatásra a levegő- és füstgázmennyiségek kiszámításának módszere.

A hulladék elemi összetevőinek ismeretében a sztöchiometriai egyenletek alapján határozható meg a fajlagos elméleti levegőmennyiség, valamint a hulladéktüzelés során keletkező fajlagos füstgázmennyiség.

A levegőmennyiség kiszámításhoz az elemi összetevők adatainak segítségével az alábbi egyenlet segítségével határozható meg,

$$L'_O = 8,876 \cdot C + 26,443 \cdot H + 3,325 \cdot S - 3,332 \cdot O \quad (57.)$$

ahol rendre,

L'_O – elméletileg szükséges levegő mennyisége, elemi összetétel alapján [Nm^3/kg],

C – összes szerves szén,

H – hidrogén tartalom,

S – kéntartalom,

O – oxigén tartalom.

Végezzük el a számítást a korábban közölt adatokkal: $C=32,7\%$, $H=3,6\%$, $S=2,9\%$, $O=8,8\%$,

$$L'_O = 8,876 \cdot C + 26,443 \cdot H + 3,325 \cdot S - 3,332 \cdot O =$$

$$8,876 \cdot 0,327 + 26,443 \cdot 0,036 + 3,325 \cdot 0,029 - 3,332 \cdot 0,088 = 3,65 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (58.)$$

A hulladék égése során keletkező füstgáz mennyiség meghatározásához a fent felsorolt elemi összetevőkön kívül szükség van a nitrogéntartalomra és a hulladék tüzelőanyag nedvességtartalmának ismeretére is. A hulladék nedvességtartalmát korábban $n=27,5\%$ -nak vettük fel. A nitrogén tartalomra $N=1\%$ -os értékkel számolhatunk az egyenletünkben – ennek indoklását lásd később,

$$V'_O = \underbrace{0,01853 \cdot O}_{\text{CO}_2} + \underbrace{0,00683 \cdot S}_{\text{SO}_2} + \underbrace{0,008 \cdot N}_{\text{N}_2} + \underbrace{0,0124 \cdot (9 \cdot H + n)}_{V'_{\text{OG}}} \quad (59.)$$

ahol,

V'_O – elméleti fajlagos füstgázmennyiség [Nm^3/kg],

N – nitrogén tartalom [%]²⁴,

n – nedvességtartalom [%].

²⁴ $N=1\%$ feltételezésével.

A korábban közölt adatokkal a behelyettesítést elvégezve megkapjuk az égés során keletkező füstgázmennyiséget,

$$V'_o = 0,01853 \cdot O + 0,00683 \cdot S + 0,008 \cdot N + 0,0124 \cdot (9 \cdot H + n) =$$

$$0,01853 \cdot 8,8 + 0,00683 \cdot 2,9 + 0,008 \cdot 2,95 + 0,0124 \cdot (9 \cdot 3,6 + 27,5) = 3,92 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (60.)$$

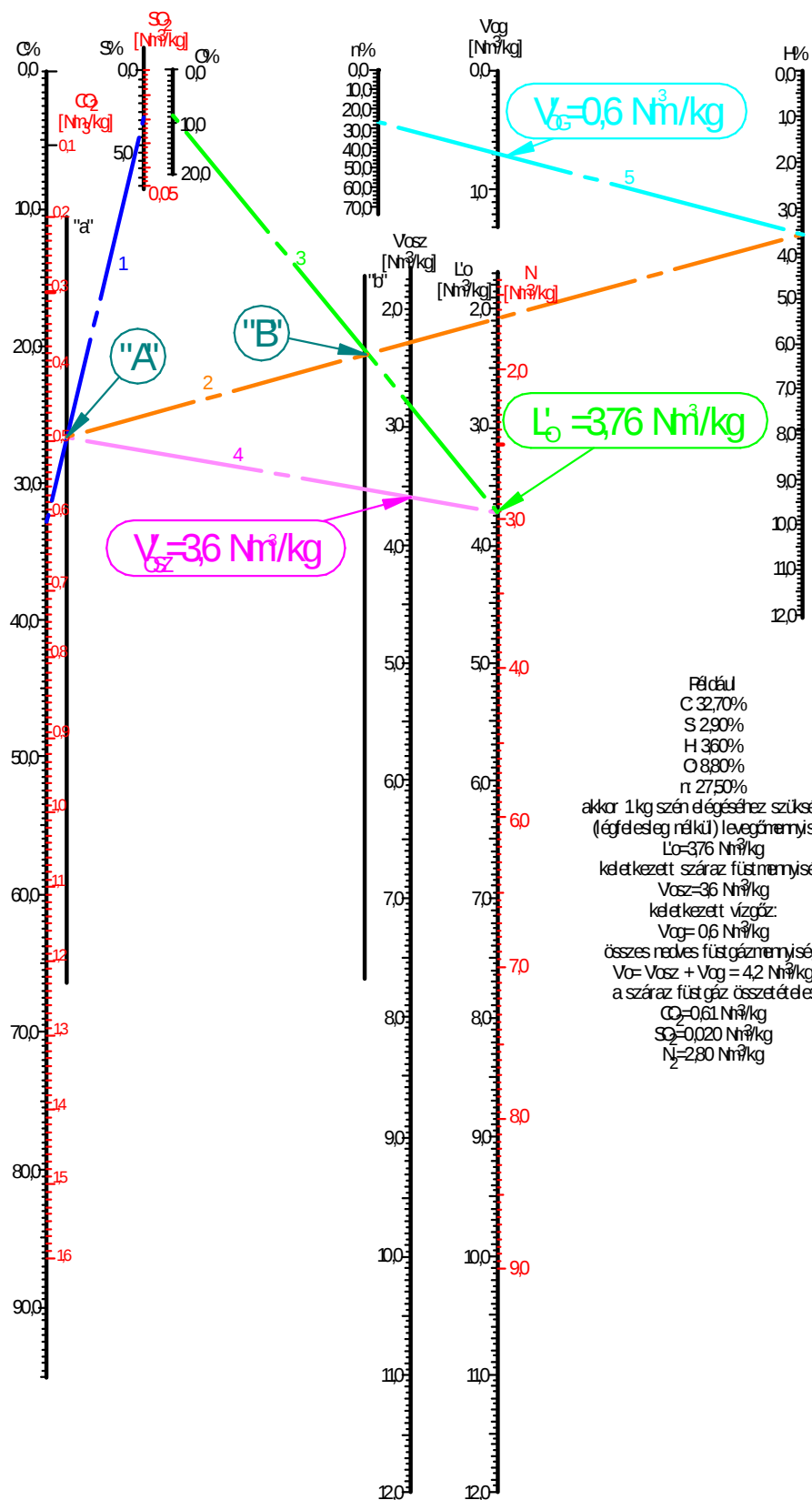
Az (57.) és (59.) egyenletek alapján való számítás igen hosszadalmas és bonyolult. Helyette sokkal gyorsabban eredményhez juthatunk, ha nomogram segítségével, grafikus úton határozzuk meg a kívánt értékeket (68. ábra). A nomogram használata annak a feltételezése mellett alkalmazható, hogy a tüzelőanyagban lévő nitrogén mennyisége állandóan 1% értéket ér el. Ez a feltételezés amellet, hogy a hulladékokra jó közelítő értéket ad, oly kicsi hibát eredményez (0,25%), amely a hibahatáron belül marad.

A nomogram használata

A „C” skálán megkeressük a karbon, az „S” skálán pedig a kén százalékos értékét. Az alapos megértés végett, alkalmazzuk a korábban már közölt elemi analízis során kapott értékeket: C=32,9%, S=2,9%. E két pontot összekötjük az **1-es egyenessel**, amely az „a” segédegyenesen kimetszi az „A” pontot.

A kapott „A” pontot össze kell kötni a **2-es egyenes** segítségével a hidrogéntartalom százalékos értékével – H=3,6%. – a „H” skálán. A **2-es egyenes** a „b” segédegyenesen kimetszi „B” pontot. Ezután az oxigén skálán – „O” skála – felkeresve az oxigéntartalomnak megfelelő pontot és ezt „B” ponttal a **3-es egyenes** segítségével összekötve, majd a **3-es egyenest** az L'o skálájáig meghosszabbítva utóbbin kimetsszük a szóban forgó hulladék szén tartalmának tökéletes elégetéséhez szükséges elméleti levegőmennyiséget – L'o=3,76 Nm³/kg.

Ha ezt a pontot a már megkapott „A” ponttal a **4-es egyenessel** összekötjük, akkor a **4-es egyenes** a V'osz skálán kimetszi a keletkező elméleti száraz füstgázmennyiség értékét - V'osz=3,6 Nm³/kg.



68. ábra. Nomogram szilárd és folyékony tüzelőanyagok fajlagos elméleti égési levegő- és füstgázmennyiségének meghatározására [22]

Végül, ha az 5-ös egyenessel összekötjük a „H” skálán, a százalékos hidrogéntartalomnak megfelelő már meghatározott pontot az „n” skálán a százalékos nedvességtartalomnak megfelelő ponttal, akkor az 5-ös egyenes a V'_{OG} skálán kimetszi az égés során keletkezett elméleti gőzmennyiséget - $V'_{OG}=0,6 \text{ Nm}^3/\text{kg}$. Az összes keletkezett füstgázmennyiséget,

$$V'_O = V'_{OSZ} + V'_{OG} \quad (61.)$$

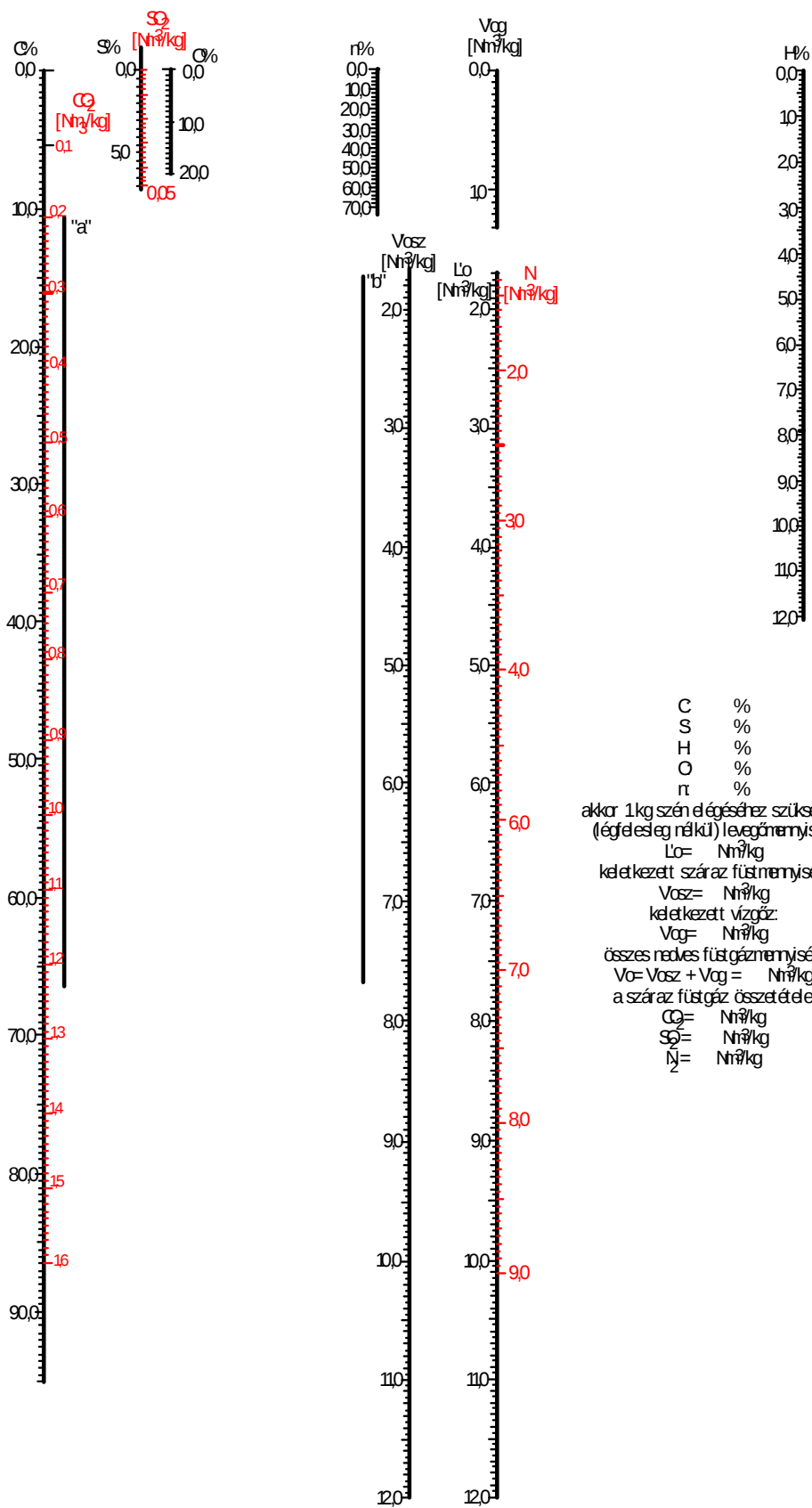
egyenlettel kapjuk meg Nm^3/kg dimenzióban,

$$V'_O = V'_{OSZ} + V'_{OG} = 3,6 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} + 0,6 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} = 4,2 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \quad (62.)$$

A számítással kapott érték - $V'_O=3,92 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ - és a grafikus módon meghatározott érték közötti különbség a leolvasási, szerkesztési pontatlanságból adódik.

A többi gáz százalékos mennyisége - CO_2 , SO_2 , N_2 - analóg módon meghatározható.

A lenti ábrán a mindennapi tervezési gyakorlatot segítve egy üres nomogram került elhelyezésre (69. ábra).



69. ábra. „Üres” nomogram a tervezéshez

9.4. Égetési és termikus kezelési eljárások összefoglalása

Technika	Kulcsfontosságú hulladék-tulajdonságok és megfelelés	Áteresztőképesség/vonal	Üzemeltetési/környezeti információ		Salak minőség	Füstgáz mennyiség	Költség információ
			Előnyök	Hátrányok/ a használat korlátozásai			
Forgódobos kemence	• folyadékok és pasztaszerű hulladékok fogadására is alkalmas • a bevíthető szilárd hulladékok köre korlátozottabb, mint a rostélynál (a tűzálló falazat károsodása miatt) • gyakran alkalmazzák veszélyes hulladéokra	<10 t/ó	• igen jól bizonyított hulladékok széles köre • jó kiegészítő – még veszélyes hulladékok esetén is	• Áteresztőképesség alacsonyabb, mint a rostélyé	• TOC <3%	6-10 000 m ³ /t bemenő hulladék	Magasabb fajlagos költség a kisebb kapacitás miatt
Forgódobos kemence (hűtőköpeny)	• Mint a forgódobos, de: • magasabb fűtőértékű hulladékok kezelése is lehetséges, a magasabb hőmérséklet-toleranciának köszönhetően • csak finom eloszlású, konzisztens hulladék. Előkezelés nélküli TSZH-hoz korlátozottan alkalmas • gyakran alkalmazzák iszapok esetében	<10 t/ó	• igen jól bizonyított magasabb égetési hőmérséklet (ha szükséges) • a tűzálló falazat hosszabb életű, mint a nem hűtött kemencénél	• áteresztőképesség alacsonyabb, mint a rostélyé	• jó kimosódási tulajdonságú üvegesített salak	6-10 000 m ³ /t hulladék bemenet	Magasabb fajlagos költség a kisebb kapacitás miatt
Nyugvó (buborékos) fluidágy	• csak finom eloszlású, konzisztens hulladék. Előkezelés nélküli TSZH-hoz korlátozottan alkalmas • gyakran alkalmazzák iszapok esetében	1-10 t/ó	• jó keveredés • jó kimosódási tulajdonságú pernye	• gondos üzemeltetés szükséges az ágy eltömődésének megakadályozására • több pernye	• TOC <3%	Relative alacsonyabb, mint a rostélynál	A füstgáztisztítás költségei alacsonyabbak lehetnek. Hulladék előkészítés költségei
Forgó fluidágy	• széles fűtőérték-tartomány (7-18 MJ/kg) • képes kezelni durván aprított TSZH-t • kombinált iszapégetés	3-22t/ó	• jó keveredés/magas turbulencia • széles alsó fűtőérték-tartomány • jó kiegészítő, száraz salak	• a TSZH aprítása szükséges • több pernye, mint a rostélynál	• TOC <3% gyakran 0,5-1%	4 000-6 000Nm ³ /t	
Cirkulációs fluidágy	• csak finom eloszlású, konzisztens hulladék. Előkezelés nélküli TSZH-hoz korlátozottan alkalmas • gyakran alkalmazzák iszapok/hulladékból előkezeléssel kinyert másodlagos tüzelőanyag esetében	3-22t/ó	• jó keveredés • nagyobb tüzelőanyag-rugalmasság, mint a nyugvó (buborékos) fluidágy • jó kimosódási tulajdonságú pernye	• ciklon szükséges az ágy anyagának megőrzéséhez • több pernye	• TOC <3%	Relative alacsonyabb, mint a rostélynál	A füstgáztisztítás költségei alacsonyabbak lehetnek. Hulladék előkészítés költségei

Technika	Kulcsfontosságú hulladék-tulajdonságok és megfelelés	Áteresztő-képesség/vonal	Üzemeltetési/környezeti információ		Salak minőség	Füstgáz mennyiség	Költség információ
			Előnyök	Hátrányok/ a használat korlátozásai			
Rázótálcsákemence	- TSZH - heterogén hulladék	1-10 t/ó	- robustus - alacsony karbantartási igény - nagy múltú - alacsony NOX szint - alacsony égetési veszteségű salak	- nagyobb hőveszteség, mint a rostélytüzelésű kemencénél - alsó fűtőérték 15 GJ/t alatt	TOC 0,5-3%	Nem szolgáltatott információt	
Pulzációs kemence	- csak magasabb fűtőértékű hulladék (alsó fűtőérték >20 GJ/t) - főleg kórházi hulladékokra használják	<7t/ó	folydékok és porok égetésére is alkalmas	a tüzelőanyag-ágy bolygatása kisebb mértékű lehet	a hulladék-típustól függ	Nem szolgáltatott információt	Magasabb fajlagos költség a kisebb kapacitás miatt
Reciprokáló és aknakemencék	- csak magasabb fűtőértékű hulladék (alsó fűtőérték >20 GJ/t) - főleg kórházi hulladékokra használják	Nem szolgáltatott információt	folydékok és porok égetésére is alkalmas	a tüzelőanyag-ágy bolygatása kisebb mértékű lehet	a hulladék-típustól függ	Nem szolgáltatott információt	Magasabb fajlagos költség a kisebb kapacitás miatt
Szórt láncrostélyű égető	- hulladék tüzelőanyag és más darabos fűtőanyag - baromfitrágya - fahulladék	Nem szolgáltatott információt	- egyszerű rostély konstrukció - kevésbé érzékeny a darabok méretére, mint a fluidágy	csak jól meghatározott, azonos anyagú áramokra	Nem szolgáltatott információt	Nem szolgáltatott információt	Nem
Gázosítás - szilárdágyas	- vegyes műanyag hulladék - egyéb hasonló konzisztens áramok - gázosítás kevésbé széles körben használt/bizonyított, mint az égetés	20 t/ó-ig	- alacsony kimosódású maradékanyag - jó kiegészítő oxigén-befűtés esetén - szintézisgáz is keletkezik - a hasznosítható fémek alacsonyabb oxidációja	- korlátozott betáplálható hulladék - nem teljes égetés - magas szakértelmet igényel - kátrány a nyers gázban befűtés - kevésbé széles körben bizonyított	- alacsony kimosódású salak - jó kiegészítő oxigén-befűtés	Kevésbé, mint az egyszerű égetésnél	Magas üzemeltetési/ karbantartási költségek

Technika	Kulcsfontosságú hulladék-tulajdonságok és megfelelésség	Áteresztő-képesség/vonal	Üzemeltetési/környezeti információ		Salak minőség	Füstgáz mennyiség	Költség információ
			Előnyök	Hátrányok/ a használat korlátozásai			
Gázosítás - áramlások	• vegyes műanyag hulladék • egyéb hasonló konzisztens áramok • nem alkalmas kezeletlen TSZH-ra • gázosítás kevésbé széles körben használt/bizonyított, mint az égetés	10 t/ó-ig	• alacsony kimosódású salak • a hasznosítható fémek alacsonyabb oxidációja	• korlátozott betáplálható hulladék • nem teljes égetés • magas szakértelmet igényel • kátrány a nyers gázban • kevésbé széles körben bizonyított	• alacsony kimosódású salak	Kevesebb, mint az egyszerű égetésnél	Magas üzemeltetési/ karbantartási költségek magas előkezelési költségek
Gázosítás - fluidágy	• vegyes műanyag hulladék • aprított TSZH • shredder maradványok • iszapok • fémekben gazdag hulladékok • egyéb hasonló konzisztens áramok • gázosítás kevésbé széles körben használt/bizonyított, mint az égetés	5-20 t/ó	• képes alacsony reaktor-hőmérsékletet használni pl. Al • hasznosításra • a fő nem éghető összetevők leválasztása • hatékonyan kombinálható salakolvasztással • a hasznosítható fémek alacsonyabb oxidációja	• korlátozott hulladékméret (<30cm) • kátrány a nyersgázban • magasabb felső fűtőértékű nyersgáz • kevésbé széles körben bizonyított	• salak olvasztással kombinálva a tüztéri hamu vitrifikálódik • hamu minőség • salak-olvasztás nélkül – nem szolgáltatott információt	Kevesebb, mint az egyszerű égetésnél	Alacsonyabb, mint egyéb gázosítóknál
Pirólízis - rövid dob	• előkezelte TSZH • sok fém tartalmú inert áram • shredder maradványok • pirólízis kevésbé széles körben használt/bizonyított, mint az égetés	~ 5 t/ó	• fémek nem oxidálódnak • nincs tüzelőenergia a fémek/inert miatt • a reaktorban a savak neutralizációja lehetséges • szintézisgáz is keletkezik	• korlátozott hulladék-típusok • a folyamatszabályozás és a gépészet kritikus • magas szakértelmet igényel • nem széles körben bizonyított • piac szükséges a szintézisgáznak	• a folyamat hőmérsékletétől függ • a keletkező maradványok további kezelést néha égetést igényel	Nagyon kevés a gáz égetéséhez szükséges alacsony légrétegesség miatt	Magas előkezelési, üzemeltetési és főkebefektetési költségek
Pirólízis – lüszepes dob		5-10 t/ó					

10. Irodalomjegyzék

- [1] 1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól
- [2] 29/2014. (XI. 28.) FM rendelete, A hulladékégetés műszaki követelményeiről, működési feltételeiről és a hulladékégetés technológiai kibocsátási határértékeiről
- [3] 4th Generation District Heating (4GDH) – Orbán Tibor: MKET 2018
- [4] Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2018/851 Irányelve a hulladékokról szóló 2008/98/EK irányelv módosításáról (2018. május 30.)
- [5] Az Európai Parlament és a Tanács 2008/98/EK irányelve (2008.11.19.)
- [6] Bánhidó János (2019). Érvek a második fővárosi hulladéktüzelésű fűtőerőmű létesítése mellett
- [7] Bánhidó János (2020). Integrált hulladékkezelés és hasznosítás Szingapúrban
- [8] Bánhidó János: Települési hulladékok energetikai hasznosítása – Lesz-e második hulladéktüzelésű fűtőerőmű Budapesten?, Energetikai Szakkollégium, BME, 2013.03.28.
- [9] Bánhidó János: Települési hulladékok energetikai hasznosításának tapasztalatai, lehetőségei, Nyíregyháza, 2017.05.09
- [10] Büki Gergely (1997): Energetika, Műegyetem kiadó, Budapest ISBN 963 420 533 X
- [11] CEWEP (2017)
- [12] Czvikovszky – Nagy – Gaál (2006). A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest ISBN 963-420-621-2
- [13] Dr. Kiss Tibor előadásain készített jegyzetek - Pécs (2017)
- [14] Dr. Makai Martina: Haszonanyagok energetikai hasznosítása az országos stratégia tükrében című előadása
- [15] dr. Örvös Mária (2010), BME
- [16] Dr. Tóth Máté (2016): Az energiajog aktuális kérdései MET Szimpózium
- [17] Etienne de Fodor (1911), Elektrizität aus Kehrlicht
- [18] ISWA (2016)
- [19] ISWA Whitebook on Energy-from-Waste (EfW) Technologies
- [20] Kovács Margit (1975). A környezetvédelem biológiai alapjai, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest ISBN 963 230 803 4
- [21] Larousse (1992): A természet enciklopédiája, Glória kiadó, Budapest ISBN 963 7495 32 0
- [22] Lévai András (1964). Hőerőművek II., Tankönyvkiadó, Budapest, nyomán
- [23] Makra László (2002). Szemelvények a környezetszennyezés történetéből, különös tekintettel a levegő szennyezésére, I. rész
- [24] MAVIR (2013)
- [25] Michele Bianchi et al. (2014). Advanced waste-to-energy steam cycles
- [26] Molnár Szabolcs (2018). Pécsi régióba telepíthető hulladékégető erőmű légszennyezési viszonyai – szakdolgozat, PTE – MIK – Környezetmérnöki tanszék

- [27] Molnár Szabolcs (2019). Az energetikai célú hulladékgazdálkodás jövője, avagy „hulladékból konnektorba” – MKET konferencia, Balatonfüred
- [28] Molnár Szabolcs (2019). Bányászati konferencia, A fenntartható hulladékgazdálkodás energetikai és bányászati összefüggései avagy „hulladékból konnektorba”
- [29] Molnár Szabolcs (2019). Nukleon XII. évf. 216, Atomenergia és fenntartható fejlődés
- [30] Molnár Szabolcs (2020). A hulladékégetés szerepe az emisszió mentes városokban, Energiagazdálkodás 61. évf. 1-2. szám
- [31] Olessák Dénes – Szabó László (1984). Energia hulladékból, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [32] Pintér Péter Mihály (2013). Anyagmozgatás III. előadás, Emelőgépek elemei
- [33] Prof. Dr. Csőke Barnabás előadásain készített jegyzetek, Pécs 2017 (PTE-MIK, Hull. Gazd. Műszaki és informatikai eszközei)
- [34] prof. Woldf Dieter Sixl (2011). Emberek a hulladékban, Egészségtudomány, LV. évfolyam, 1. szám
- [35] San Shawe Hla (2014). The Development of Waste-to-Energy Technologies around the World, Waste to Energy Workshop - QCAT
- [36] Senol Yadiz et al. (2012). Characterization of municipal solid waste in Istanbul, Turkey
- [37] Siebzehte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – 17. BImSchV
- [38] Thomas Obermeier (2017). Waste Incineration vs. Energy from Waste – then and now
- [39] Umweltbundesamt 51/2018
- [40] Upgrading the performance of district heating networks, Technical and non-technical approaches alapján a szerző munkája
- [41] Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a hulladékégetők engedélyeztetése során (2008), Budapest

Internetes források

- [42] A kép forrása: <http://www.sci-news.com/archaeology/neanderthals-start-fire-07742.html>, letöltés dátuma: 2020.06.07
- [43] A kép forrása: <https://fest-bilet.ru/hu/snaryazhenie/podzemnyi-megaliticheskii-kompleks-i-kolokolnye-peshchery-hurvata.html>, letöltés dátuma: 2020.06.07
- [44] A kép forrása: https://skolikagnes.blog.hu/2016/11/29/a_nagy_teafu_vasarlas_tortenete, letöltés dátuma: 2020.08.16
- [45] A kép forrása: <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/shovels/a-brief-history-of-the-shovel>, letöltés dátuma: 2020.06.09
- [46] <http://szelektalok.hu/a-hulladek-vazlatos-tortenete-az-okortol-napjainkig/>, letöltés dátuma: 2020.06.09
- [47] <http://www.thegoodenergy.net/en/denmark-to-build-waste-to-energy-community/>, letöltés dátuma: 2020.06.17

- [48] <https://866attylaw.com/new-york-city-truck-accident-lawyer/garbage-truck/>,
letöltés dátuma: 2020.07.10
- [49] <https://eionet.kormany.hu/a-fenntarthato-fejlodes-fogalma> (letöltés dátuma:
2020.08.12)
- [50] https://hvg.hu/cegauto/20180911_tudja_honnan_ered_a_kukasauto_neve_nem_fog_ja_kitalalni, letöltés dátuma: 2020.08.16
- [51] <https://mult-kor.hu/10-teny-a-magas-sarku-kulturtorteneterol-20150922>, letöltés
dátuma: 2020.06.10
- [52] <https://mult-kor.hu/10-teny-a-sajt-multjarol-20190612>, letöltés dátuma:
2020.07.30
- [53] https://mult-kor.hu/20140509_4000_eves_ontozorendszerre_leltek_kinaban,
letöltés dátuma: 2020.08.16
- [54] <https://nullahategy.hu/szemetkezeles-multja/>, letöltés dátuma: 2020.07.29
- [55] https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0019_aramlastani_gepek/ch02s03.html, letöltés dátuma: 2020.08.03
- [56] <https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/kornyezettechnika-eloszo/ch06s10.html>, letöltés dátuma: 2020.08.15
- [57] <https://www.exportersindia.com/rishikeshexports/power-boilers-3720988.htm>,
letöltés dátuma: 2020.08.16
- [58] <https://www.thecivilengineer.org/news-center/latest-news/item/1590-the-hi-tech-wte-plant-in-copenhagen-expected-to-open-this-summer-will-also-feature-a-ski-slope>, letöltés dátuma: 2020.06.17
- [59] <https://www.vezess.hu/haszongepjarmu/2017/12/12/uj-scania-varosi-teherautok/>, letöltés dátuma: 2020.07.10
- [60] <https://www.wiki.sanitarc.si/1874-fryer-builds-furnace-incinerator-refuse-nottingham-england/>, letöltés dátuma: 2020.06.16
- [61] https://www.wikiwand.com/hu/Mindennapi_%C3%A9let_Ath%C3%A9nban_Perikl%C3%A9sz_kor%C3%A1ban, letöltés dátuma: 2020.08.16
- [62] <https://www.worldatlas.com/articles/top-bottled-water-consuming-countries.html>, letöltés dátuma: 2020.06.30
- [63] https://www.youtube.com/watch?v=vQPSPkZZ0nQ&feature=emb_title, letöltés
dátuma: 2020.07.26
- [64] www.kormany.hu/download/a/86/11000/OHKT_felulvizsgalat_2017.pdf, letöltés
dátuma: 2020.09.16.

A sorozat keretében eddig megjelent kiadványok

2017.

- | | | |
|----|--|---|
| 1. | NÉMETH András, MILÁVECZ Richárd | Iparban használatos vízminőségek |
| 2. | DR. SZILÁGYI Zsombor, DR. SZUNYOG István | Mérések a gáziparban |
| 3. | DR. BARNA Lajos, EÖRDÖGHNÉ DR. MIKLÓS Mária, DR. SZÁNTÓ Zoltán, DR. BALLA József | A biztonságos ivóvízellátás megteremtésének tervezési eszközei |
| 4. | BORBÁS Lajos Dr. | Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben |
| 5. | BERENCSI Miklós, BEREZKY Ákos, HORVÁTH László, KOVÁCS Gergely, MIHÁLFY Krisztina | Kerékpárosbarát közlekedéstervezés |
| 6. | TÜDŐS Tibor, DR. VARJÚ György, DR. PETRI Kornél, GÁBOR András | A csillagpontkezelés legújabb külföldi és hazai eredményei (Útmutató és tervezési segédlet) |
| 7. | DR. GARBAI László, DR. JASPER Andor, VÁRADI András | Fűtési és használati melegvíz-igények kockázati elvű méretezése példákkal |
| 8. | KÁDI Ottó, DOHÁNY Máté, JÓZSA Bálint, LÁSZLÓ Csaba Tibor, JAKKEL Ottó | A közúti vasutak (villamos) tervezésével kapcsolatos kézikönyv |

2018.

- | | | |
|-----|---|---|
| 9. | BLAZSOVSZKY László | A gázfogyasztó készülékek égéstermék elvezetésével kapcsolatos szabályozások hiányosságai és ellentmondásai |
| 10. | CSORDÁS Szilveszter, FORGÁCS Lajos Dr., PÓLYA Endre ifj., RÉV Zoltán, UDVARDY Péter | Orvostechnológiai továbbképzés ismeretanyaga |
| 11. | NÁDASDY Tamás, EGYHÁZY Zita, KOVÁCS Ákos Sándor, SZECSŐ Dániel Géza | A közúti biztonsági audit (KBA) jelentések elkészítésének alkalmazási segédlete – A közúti infrastruktúra közlekedésbiztonsági kezeléséről szóló jogszabályhoz és ütügyi műszaki előíráshoz kapcsolódó értelmezési, kidolgozási és elfogadtatási javaslatrendszer |
| 12. | DR. SZILÁGYI Zsombor, HORÁNSZKY Beáta | Földgáz kereskedelem (mérnöki segédlet) |
| 13. | DR. SZILÁGYI Zsombor | Az energiahordozók jövője – kőolaj, földgáz, megújulók |
| 14. | S. VÍGH Judit, DOHÁNY Máté | Magános közlekedők baleseti súlyosságának csökkentése mobil applikáció segítségével |
| 15. | DR. BALIKÓ Sándor, DR. CSÜRÖK Tibor, NOVÁK Dániel, ORBÁN Tibor, DR. ZSEBIK Albin | Ötletlapok I. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai |
| 16. | DARABOS Zoltán, KOLTAI Henrik, SZABÓ Tamás, SZÁSZ Béla, VAJDA Sándor | Felvonók felújítása és átalakítása – Műszaki segédlet |
| 17. | TÜDŐS Tibor, KRUPPA Attila | Alapozásföldelők új tervezési elvei és kivitelezési módszerei – Tervezési segédlet és kivitelezési útmutató |
| 18. | FENYVESI Zsolt | Tűzvédelmi tervek tartalmi szabályainak átdolgozása |
| 19. | GÁBORI László Dr., BEINSCHRÓTH | Nagyméretű informatikai beruházásoknál |

	József Dr., NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás	(fejlesztéseknél) ajánlott szoftveroldali tervdokumentációk tartalmi elemeinek meghatározása (I. – II. kötet)
20.	DR. DIVÓS Ferenc	Az élő fák stabilitása – mérnöki megközelítés – Élő fák, mint teherhordó faszerkezetek
21.	DR. KARÁCSONYI Zsolt	Faanyagok tartós szilárdsága
22.	BARNA Lajos Dr., ERDEI István, JASPER Andor Dr., TAKÁCS Gyula	Segédlet épületek csatorna-berendezéseinek tervezéséhez
23.	ANTÓK Péter István, FÜZÉR Ferenc, SÁRKÖZI András	Fényvezető kábelszakaszok műszaki-minőségi ajánlás gyűjteménye
24.	JANCSÓ Béla, DR. KULCSÁR Alexandra, NÉMETH Gábor, DR. VÍMI Zoltán, DÉRI Lajos, SZIMANDEL Dezső	Vízjogi engedélyezési eljárással kapcsolatos dokumentációk és engedélyeztetéssel kapcsolatos követelmények a 2018.01.01-én hatályba lépett 41/2017. (XII.29.) BM rendelet alapján
25.	DR. TAKÁCS Bence, DR. SIKI Zoltán, DR. ÉGETŐ Csaba, BÉNYI László	Mérnökgeodéziában alkalmazott alapponthálózatok – A jó gyakorlat bemutatása mintapéldákkal
26.	DR. MÓCZÁR Balázs, LAUFER Imre, TÓTH Gergő, WOLF Ákos	Korszerű támszerkezetek tervezése
27.	HALÁSZ Györgyné Dr., CSERVENYÁK Gábor, TUCZAI Attila, VIRÁG Zoltán	Különböző funkciójú épületek klimatechnikája II.
28.	KÁDI Ottó, JÓZSA Bálint	Kerékpáros balesetek létesítmények szerinti vizsgálata
29.	GARBAI László Dr., JASPER Andor Dr., PELLER József Bendegúz	Hőteljesítménymérési tényező alkalmazása távhőrendszerek optimális szabályozásának modelljében
30.	GARBAI László Dr., SÁNTA Róbert Dr., JASPER Andor Dr.	A kompresszoros hőszivattyúk optimalizálása – Tervezés és üzemeltetés
31.	LADÁNYI Gábor Dr.	Diagnosztika a karbantartásban
32.	MÉSZÁROS János, MOLNÁR Tibor, RITZL András	KIÜRÍTÉSI ÉS MENEKÜLÉSI ÚTVONALBA ÉPÍTETT AJTÓK tervezési segédlet (2018)

2019.

33.	BLAZSOVSZKY László	Földgáz elosztóvezetékek üzemeltetése
34.	DR. SZILÁGYI Zsombor	A megújuló energiahordozók jövője Magyarországon
35.	FORGÁCS Lajos Dr., HAIDEGGER Tamás Dr., PÓLYA Endre ifj.	Új fejlesztések, innovatív megoldások az orvostechnológia terén
36.	VARRÓ Beáta, DR. KIS András	Magyarországon előforduló, épületekbe beépített faanyagokat károsító gombák vizsgálata és azonosítása DNS diagnosztikával
37.	MANNINGER Marcell, SZEPESHÁZI Attila, SCHEURING Ferenc, MOLNÁR György	Munkatér határoló szerkezetek
38.	KORSÓS András, RÁDULY Zsolt	A közterületi és belterületi térfigyelő kamerarendszerek tervezési irányelvei
39.	GERGELY Edit, DR. BEZEGH András	Módszertani útmutató az üvegházhatású gázok közvetlen és közvetett kibocsátásának számítására
40.	DR. BEZEGH András, BITE Pálné Dr., GERGELY Edit	Városi környezetvédelem (Fenntartható és okos városok)
41.	GÓDOR Balázs, DR. KÁSA László, SZÉKELY Bence	Híddaruk méretezési segédlete (2019.)

42. FÜRJES Andor Tamás, KOTSCHY András, NAGY Attila Balázs, CSOTT Róbert Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban
43. DR. KARÁCSONYI Zsolt Faanyagok tartós szilárdsága
Faanyagok szilárdságának változása az idő függvényében
44. DR. BALIKÓ Sándor, ORBÁN Tibor, VARGA Péter, DR. ZSEBIK Albin Ötletlapok II. – Energiahatékonyság növelő ötletek egyszerű energetikai és gazdasági számításai
45. PRIMUSZ Péter, PhD. Hajlékony útpályaszerkezetek méretezése talajstabilizációk figyelembevételével
46. NÉMETH Balázs, HÁMORI Sándor, KOSTYÁK Attila, VÍGH Gellért Különböző funkciójú épületek klímatechnikája III.
Segédlet ipari épületek lég- és klímatechnikai rendszereinek tervezése
47. JANCsó Béla, KAVECZKI Gergely, KÓCZÁN Gábor, LABORCZI Tamás, KNOLMÁR Marcell, RAUM László Csapadékvízgazdálkodás tervezési követelményei
Hogyan tervezzünk városi csapadékelvezető rendszereket
48. DOHÁNY Máté, SCHVANNER Norbert Kerékpárosok sebességének felülvizsgálata jelzőlámpás csomópontokban
49. JÓZSA Bálint, S. VÍGH Judit Sebességsökkentés hatásainak vizsgálata gyorsforgalmi utakon
50. DR. ZSEBIK Albin, NOVÁK Dániel Projektlapok I. – Energiahatékonyság növelő javaslatok projektlapjai
51. DR. MÓGA István Beruházási projektek szabályozási és szabvány környezete, Tervezési követelmények meghatározása
52. DR. GÁBORI László, DR. BEINSCHRÓTH József, NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás Informatikai Tervező szakmai minősítő rendszere (Informatikai szakmai terület illesztése a Mérnök Kamarai működési rendbe és rendszerekbe)
I. kötet: Konceptió és modell
II. kötet: Modell illesztése
III. kötet: Tudástár
53. VIRÁG Zoltán, GYURKOVICS Zoltán, SZAKÁL Szilárd, VIRÁG Zsolt, ORCSI Attila Országos Tűzvédelmi Szabályzat épületgépész értelmezése a szakmai gyakorlatban
Segédlet a gyakorló épületgépész mérnökök számára I.
- 2020.**
-
54. DR. KISS Jenő, CSERMELY Gábor JAVASLAT az egyszerű bejelentésű lakóépület megvalósításának – tervezés építés – módszerére
55. DR. SZILÁGYI Zsombor A hidrogén a környezetbarát energiahordozó, Hidrogén az energetikában
56. VARGA Tamás, DR. SZEDENIK Norbert, DR. KOVÁCS Károly, KRUPPA Attila, KULCSÁR Lajos, KAPITOR György, TURI Ádám A nem norma szerinti villámvédelem egységes műszaki követelményrendszerének kialakítása és javaslat a teljes villámvédelmi szabályrendszer jövőbeli egységesítésére
57. KÁDI Ottó A gyalogközlekedés közúti keresztezései
58. MOLNÁR Szabolcs „Hulladékból konnektorba” A települési szilárd hulladék energetikai hasznosításának lehetőségei
59. VÁRDAI Attila Segédlet szabadidős létesítmények tartószerkezeti tervezéséhez
60. DR. BEJÓ László Szénlábnyom-elemzés készítése a faiparban

61. JANCSÓ Béla, NÉMETH Gábor, SZIMANDEL Dezső Szakmai útmutató vízilétesítmény tervezők számára a 2020 január 1-én hatályba lépett „VIZEK keretrendszer” használatához
62. FELLEGI Zsóka, KARAFI Balázs, KOCH Edina, KOVÁCS Gábor, MURINKÓ Gergő, TÓTH Gergely József Munkagödrök és földművek víztelenítése
63. HOLÉCZY Ernő, OLÁH Róbert, DR. SIKI Zoltán, DR. TAKÁCS Bence, DR. TÓTH Zoltán, VARGA Tibor Módszertani útmutató az elavult ingatlan-nyilvántartási térképek korszerű technológiákkal végzett felújításához
64. DR. GÁBORI László, DR. MOLNÁR Bálint, NÓGRÁDI Gábor, RÁTKAY Tamás Az Informatikai Tervező tervezési segédlete
65. NÁDASDY Tamás, TOMASCHEK Tamás, PALÁSTY István, SZECSŐ Dániel Géza Dinamikus forgalomirányítás tervezői segédlete gyorsforgalmi úthálózat esetén
66. LENGYEL István Szakmai útmutató szolgalmi jogok alapításához (mérnöki segédlet)
67. NÉMETH Balázs, SZLOVÁK Krisztián, VÍGH Gellért Épületgépészeti tervezéshez praktikus, gyakorlati adatbázis
68. FÜRJES Andor Tamás, BORSINÉ Arató Éva, NAGY Attila Balázs, ILLYÉS László, BORSI Gergely Teremakusztikai méretezés gyakran előforduló szituációkban (példatár)
69. DR. BORBÁS Lajos, GONDA Zoltán Optikai feszültségvizsgálat – Kísérleti eljárás a konstrukció fejlesztésére, szerkezetek anyagfelhasználásának és teherviselésének optimalizálására