TAKÁCS PÉTER
TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

TDK DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

TAKÁCS PÉTER

TDK DOLGOZAT

Háztartási hulladék termikus hasznosítása fluidizációs technológiával

Témavezető:

Szücs Botond

doktorandusz

Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Budapest, 2019

Szerzői jog © Takács Péter, 2019.

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Takács Péter* (ITDDXR), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2019. október 28.

Takács Péter

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó 2
1. Bevezetés 3
1.1. Célkitűzések 3
1.2. Áttekintés 3
2. Szakirodalmi áttekintés/Előzmények 4
2.1. Definíciók, alapfogalmak 4
2.2. Hulladékgazdálkodás 5
2.2.1. Jogszabályok, irányelvek 6
2.2.2. Hulladékgazdálkodás helyzete Magyarországon 7
2.2.3. Hulladék energetikai hasznosítása 7
2.2.3.1. Hulladékégetési technológiák 9
2.2.3.2. Hulladékégetés alkalmazása fluidágyas kazánokban 14
2.2.3.3. Klór korrózió 17
3. Minimális fluidizációs sebesség meghatározása SRF tüzelőanyag esetén 19
3.1. Elméleti összefoglaló 19
3.2. A minimális fluidizációs sebesség meghatározásának módszere 20
3.3. Hibaszámítás 27
4. Gazdasági megtérülés számítása 29
5. Összefoglalás/Eredmények értékelése 34
6. Summary 35
7. Felhasznált források 36

ELŐSZÓ

Az népesség és a jólét növekedésével kézen fogva jár a különböző folyamatokból, az emberi igények kielégítéséből származó hulladék keletkezése. Ennek növekvő mennyiségével foglalkoznunk kell, meg kell oldani a hulladékok kezelését. Fontos, hogy a hulladékkal minél kisebb behatásokat gyakoroljunk környezetünkre. A hulladéklerakók értékes területeket vesznek el a környezettől és a mezőgazdaságtól, továbbá maga a lerakott hulladék is elvesztegetett értéket képvisel. Ez a dolgozat a hulladékok újrahasznosítása és újrafeldolgozása után visszamaradt részeinek kezelésével, főleg az energetikai hasznosításával foglalkozik. A hagyományos rostélytüzelésű technológia mellett a dolgozat a fluidágyas technológia alkalmazhatóságát vizsgálja.

* * *

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

A dolgozat megírása előtt a következő célokat tűztem ki magam előtt.

Szeretnék egy átlátható egyszerű és lényegre törő áttekintést adni a hulladékgazdálkodásról, annak magyarországi helyzetéről. Ebben kitérnék a hulladékgazdálkodás alapjaira, a hulladék kezelés lehetőségeire, a hulladék energetikai hasznosításának technológiai megoldásaira, illetve szeretném feltárni a hulladékban rejlő potenciált. Továbbá ismertetném a fluidágyas technológiát és annak lehetőségeit hulladék tüzelésre vonatkozóan.

A labor mérések során az SRF hulladék kvarchomokkal történő fluidizálásához szükséges minimális gázsebesség meghatározása a célom, aminek ismerete üzemeltetés szempontjából igen fontos lehet. Az eredményekből lehetőleg egyértelmű következtetésekre szeretnék jutni a fluidizálás minőségét illetően. Célom ezt a jövőben tovább vizsgálni témavezetőmmel együtt és akár újabb dolgozatokat készíteni a témával kapcsolatban.

1.2. Áttekintés

A dolgozat két nagyobb egységre bontható. Az első rész egy áttekintő jellegű irodalomkutatás a hulladékgazdálkodással kapcsolatban. Ebben a szegmensbe kitérek a hulladékgazdálkodás alapjaira, az Európai Uniós irányelvekre, és a magyarországi helyzetére. Ismertetem a hulladék energetikai hasznosításának módozatait, a hangsúlyt a termikus hasznosításra helyezve. Az energetikai hasznosításnál külön kiemelve, részletesen írok a fluidágyas technológiáról, a hulladékalapú tüzelőanyagok ezen technológiával történő hasznosításáról. Áttekintem a világban megvalósított hulladék tüzelésű fluidágyas egységeket, jellemző teljesítményeikkel és tüzelőanyagaikkal.

A dolgozat második részében önálló labormérési feladatomat ismertetem, melyben a célom az SRF tüzelőanyag esetén előálló minimális fluidizációs gázsebesség meghatározása volt. Külön ismertetem a berendezést, melyen a méréseket végeztem, a minimális gázsebesség meghatározásának módját és a kapott eredményeket ábrák segítségével is bemutatom. Kiegészítésként gazdasági számítást végeztem egy hulladék tüzelésű buborékos fluidizációs kazánnal működő erőmű beruházásával és versenyképeségével kapcsolatban.

Végül a dolgozatot lezárva összefoglalom tapasztalataimat és gondolataimat a témával kapcsolatban.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS/ELŐZMÉNYEK

2.1. Definíciók, alapfogalmak

A **hulladék** fogalmát egyértelműen meghatározni nem könnyű feladat, tekintve, hogy számos különböző tevékenység terméke lehet, így maga a hulladék is sokféle lehet. Az Európai Parlament és A Tanács 2008/98/EK Irányelve szerint a hulladék „olyan anyag vagy tárgy, amelytől birtokosa megválik, megválni szándékozik vagy megválni köteles", illetve a hulladékkezelés olyan hasznosítási és ártalmatlanítási művelet, amely magába foglalja a hasznosítást és az ártalmatlanítást megelőző előkészítést is" [3]. Eredet szerint a hulladékot két nagy csoportba sorolhatjuk: települési (kommunális), termelési (ipari, mezőgazdasági hulladék).

Mivel ebben a dolgozatban a települési szilárd hulladékokkal foglalkozom, így fontosnak tartom a fogalom letisztázását.

A **települési hulladék** az Európai Parlament és A Tanács 2018/851 Irányelve szerint:

a) a háztartásokból származó kevert hulladék és elkülönítetten gyűjtött hulladék, beleértve a papírt és kartonpapírt, üveget, fémet, műanyagot, biohulladékot, fát, textilanyagot, csomagolóanyagot, elektromos és elektronikus berendezések hulladékait, hulladékelemeket és -akkumulátorokat, továbbá lomhulladékot, többek között a matracokat és bútorokat;
b) egyéb forrásokból származó kevert hulladék és elkülönítetten gyűjtött hulladék, amennyiben az ilyen hulladék jellegében és összetételében hasonló a háztartásokból származó hulladékhoz;

Az anyagában hasznosítható hulladék szelektív gyűjtését követően visszamaradt vegyes települési szilárd hulladékot **maradék hulladék**nak hívjuk.

A települési hulladék energetikai hasznosítása során találkozhatunk olyan rövidítésekkel, amelyek a hulladékból előállított másodlagos tüzelőanyagokra vonatkoznak. Ilyen például az RDF és az SRF.

- **RDF** (Refuse Derived Fuel)
  Az RDF - tükörfordításban hulladékból származó tüzelőanyag – nemzetközi szabvány által nem meghatározott így a pontos fogalmát nehéz definiálni. RDF alatt általánosságban a hulladék különválogatott, a kiindulási kommunális hulladéknál magasabb fűtőértékű frakciót értjük [4]. Jellemzően országoként eltérő, hogy mi alapján nevezik RDF-nek a hulladék egyes frakcióit.
- **SRF** (Solid Recovered Fuel)
  Az SRF az RDF-hez hasonlóan hulladékból ellőállított másodlagos szilárd tüzelőanyag, a nagy különbség, hogy az SRF, hogy CEN TC/343, EN 15359 szabványok és az átvételükből származó magyar MSZ EN 15359:2012 szabvány

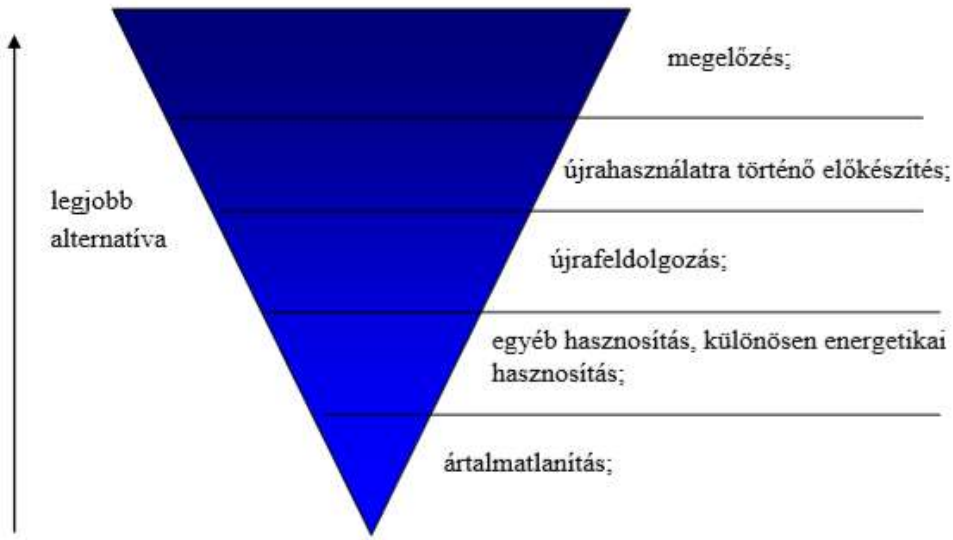
által jól meghatározott, besorolható, vizsgálható [4]. Az előbb említett szabványok szerint az SRF-et osztályozni tudják, 1-5 a minőségétől függően (2-1. ábra)

Vizsgált tulajdonság	Statisztikai mérték	Me.	Osztály				
			1	2	3	4	5
Fűtőérték(NVC)	Átlag	Mj/kg (ar)	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Vizsgált tulajdonság	Statisztikai mérték	Me.	Osztály				
			1	2	3	4	5
Klór (Cl)-tartalom	Átlag	% (d)	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3
Vizsgált tulajdonság	Statisztikai mérték	Me.	Osztály				
			1	2	3	4	5
Higany (Hg)- tartalom	Medián	mg/Mj (ar)	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50
	80. percentilis	mg/Mj (ar)	≤0,04	≤0,06	≤0,016	≤0,30	≤1,00

2-1. ábra SRF hulladék osztályozása [4]

2.2. *Hulladékgazdálkodás*

A hulladékgazdálkodás alapelvét a hulladékhierarchia rendszer (hulladék piramis) adja. Meghatározza a hulladékgazdálkodási tevékenységek elsőbbségi sorrendjét. Eszerint a legjobb megoldás a hulladékmennyiség csökkentésére a megelőzés, ha a körülmények ezt nem teszik lehetővé, az újrahasznosítás, újrafeldolgozás, végül az energetikai felhasználás (eltüzelés) és csak legutoljára a lerakás.



2-2. ábra Hulladékgazdálkodás hierarchiája [1]

Azonban megjegyezném, hogy az újrafeldolgozás korlátolt, a feldolgozással járó anyagminőség romlás miatt. Például a műanyagokat kétszer-háromszor lehet újrahasznosítani, de ugyan ez igaz az üvegekre. Továbbá a szennyezett a (például zsíros

olajos papír) anyagokat sem lehet szelektíven gyűjteni és újrafeldolgozni. Így ezekben az esetekben az energetikai hasznosítás a legjobb megoldás.

2.2.1. JOGSZABÁLYOK, IRÁNYELVEK

Az Európai Unió számos fontos irányelvet és jogszabályt adott ki a hulladékgazdálkodással kapcsolatban és ezekre építkezve erős startégiát tudott felépíteni az évek során. Ebben a pontban röviden ismertetnék pár Magyarország és ezen dolgozat szempontjából is fontos dokumentumot.

- Az Európai Parlament és a Tanács 2008/98/EK irányelve a hulladékokról és egyes irányelvek hatályon kívül helyezéséről (Hulladék-keretirányelv=HKI), illetve ennek a módosítására szolgáló 2018/851 irányelv, az egyik, ha nem a legfontosabb jogi dokumentuma az európai hulladékgazdálkodásnak. A HKI rendkívül fontos, alap definíciókat rögzít a hulladékkal és a hulladékgazdálkodással kapcsolatban, például előző pontban említett hulladékhierarchia is ebben a dokumentumban fogalmazódott meg. Továbbá két fontos elvet, a szennyező fizet elvet (PPP) és a kiterjesztett gyártói felelősség elvét (EPR) vezették be ezzel az irányelvvel.
- A 2018-as módosítás a hulladékhasznosítás terén kitűzött célokat a következő pontokkal egészítette ki
    - „2025-ig az újrahasználatra előkészített és újrafeldolgozott települési hulladék mennyiségét minimum 55 tömegszázalékra kell növelni;
    - 2030-ig az újrahasználatra előkészített és újrafeldolgozott települési hulladék mennyiségét minimum 60 tömegszázalékra kell növelni;
    - 2035-ig az újrahasználatra előkészített és újrafeldolgozott települési hulladék mennyiségét minimum 65 tömegszázalékra kell növelni." [6]
- A Tanács 1999/31/EK irányelve (lerakóirányelv) a biológiailag lebontható települési hulladékok lerakásának csökkentését irányozta elő. Kategorizálta a hulladéklerakókat, megszabta a lerakók létesítésének feltételeit, valamit megkövetelte a működés közbeni megfigyeléseket és ellenőrzéseket és a lezárást követő utógondozást is.
- A csomagolási irányelv, a 2018/852/EU irányelvvel módosított 94/62/EK irányelv a csomagoló hulladékok mennyiségének csökkentésére helyezte a hangsúlyt. Elsődlegesen a csomagolási hulladék keletkezésének megelőzésére szolgáló intézkedéseket határoz meg. Célja, hogy előre mozdítsa a csomagolási hulladék újrahasználatát, újrafeldolgozását vagy egyéb módon például energetikai céllal történő hasznosítását, ezzel segítve a körkörös gazdaságra való áttérést.

2.2.2. Hulladékgazdálkodás helyzete Magyarországon

Magyarországnak mint az Európai Unió tagjának meg kell felelnie a hulladékgazdálkodással kapcsolatos uniós jogszabályoknak és előírásoknak. Ennek érdekében a magyar hulladékgazdálkodási jogi szabályozást át kellett dolgozni, és ennek eredményeként született meg a 2012. évi CLXXXV. törvény a hulladékról, vagyis a hulladékgazdálkodási törvény (Ht). A Ht. bevezetésével új alapelvként jelent meg például a kiterjesztett gyártói felelősség elve, vagyis a gyártónak technológiailag meg kell felelnie a megelőzés és hulladékgazdálkodás követelményeinek, emellett meg kell terveznie a termékből keletkező hulladék visszavételé, hasznosítását és ártalmatlanítását.

Hazánkban képződő települési hulladék éves szintje jelenleg nagyjából 3,8 millió tonna, amelyből a lerakott hulladék mennyisége 2,2 millió tonna évente. A Rákospalotán működő Fővárosi Hulladékhasznosító Műben (HUHA) mintegy 400 ezer tonna kommunális hulladék kerül elégetésre évente, az anyagában hasznosított hulladék mennyisége pedig 1,1 millió tonna évente. A lerakott hulladék - amellett, hogy értékes területeket vesz el a mezőgazdaságtól és a természettől is - jelentős elvesztett értékkel bír, amit éves szinten 20-50 milliárd forintra becsülnek [2].

Az országban több kisebb nem települési hulladékot hasznosító hulladék égetőmű található, amik főleg termelési és veszélyes hulladékot égetnek, ilyen például a Mátrai Erőmű 300 000 t/év kapacitással, a Duna-Dráva Cementmű 30 000t/év kapacitással, vagy a Győri Hulladékégető, ami évente 8000 tonna ipari és kórházi veszélyes hulladékot hasznosít. [5]

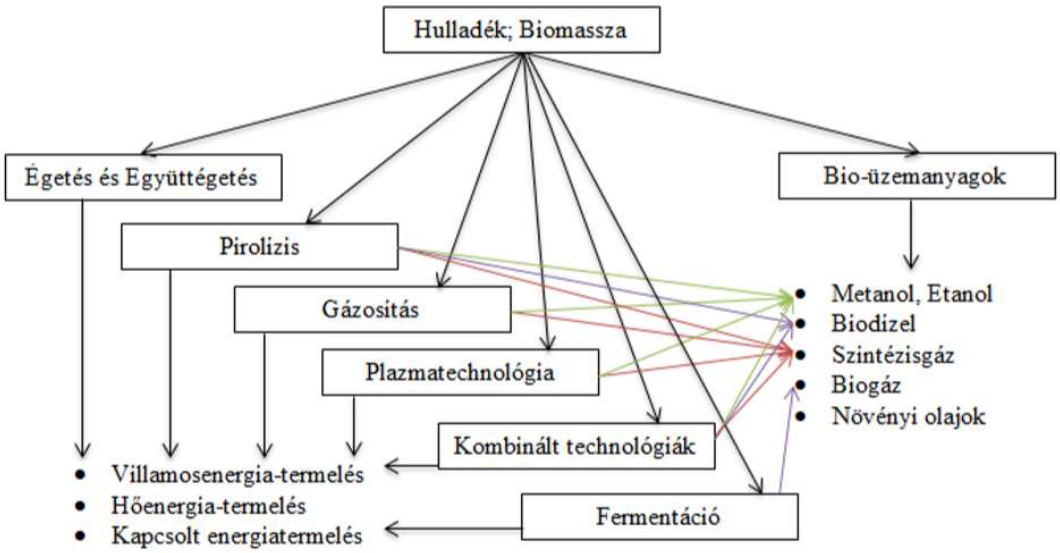
Kizárólag SRF-et vagy RDF-et hasznosító energetikai létesítmény Magyarországon még nem található, azonban több helyen is alkalmaznak SRF és RDF segédtüzelést. A jövőre nézve több terv született ilyen egységek létesítésére, például a Mátrai Erőmű Zrt (ME Zrt) egy 31,5 MW-os RDF tüzelésű egységet tervez üzembe helyezni.

Ahogy korábban említettem, hulladéktüzelés esetén együttégetést jellemzően a széntüzelésű erőművek és a cementgyárak alkalmaznak. Magyarországon példa erre a ME (Zrt) ami éves szinte nagyjából 37-45 ezer tonna RDF-et hasznosít. Előnyük abból származik, hogy ezzel a módszerrel csökkenthetik a széndioxid-kvótára fordított költségeiket. Cement gyárak közül a Duna-Dráva Cement Kft 2 gyárában (Vác és Beremend) is hasznosít RDF-et, összesen 49-58 ezer t/év mennyiségben.

2.2.3. Hulladék energetikai hasznosítása

Ebben a dolgozatban a hulladék energetikai hasznosítására helyeződik a hangsúly, és azon belül is települési szilárd hulladék égetésre. Energetikai célú hasznosításon a villamosenergia- és hőenergia-termelést érjük, illetve ide tartozik még a mechanikai energia előállítás is. Az első kettő erőművi hasznosításnál, az utóbbi a járműveknél bioüzemanyag használatnál jellemző. Hulladékok termikus hasznosítására sokféle

módszer létezik (lásd 2-3 ábra), viszont ezen folyamatok részletes ismertetésére ez a dolgozat nem tér ki, de említés szintjén fontosnak tartom ezek ismeretét.



2-3. ábra: Hulladék energetikai célú hasznosításának lehetőségei [8]

A hulladékok termikus hasznosítása terén a leggyakoribb a **hagyományos égetés**, amikor a hulladék eltüzelése során felszabaduló hőt hasznosítjuk hő- és/vagy villamos energia formájába. A folyamat során az éghető hulladék komponensek a levegő oxigénjével reakcióba lépve oxidálódnak, és különböző gázok és vízgőz keverékeként, füstgázként távoznak. A hulladék égetéssel kapcsolatos kibocsátási értékekre szigorú előírások vonatkoznak, amelynek a rendkívül fejlett és színvonalas füstgáztisztítási eljárásokkal tudnak megfelelni, így a tévhittel ellentétben a hulladékégetők meglehetősen tiszta technológiának számítanak.

A visszamaradt éghetetlen salakot és pernyét a füstgázból és a kazánból eltávolítják és megfelelő körülmények között lerakják tárolják. Ez a visszamaradt szilárd rész töredéke az eredeti tüzelőanyagként használt hulladéknak, így a lerakás helyigénye is lényegesen csökken.

Az égetés speciális változata az **együttégetés**, ami jellemzően cementgyárakban, vagy szénerőművekben fordul elő. Cementgyártás során régóta alkalmaznak hulladék bekeverést a magasabb hőmérsékletet elérése érdekében.

A másodlagos tüzelőanyagok cementgyári felhasználása több okból adódóan is előnyös:

- a cementgyárak már létező létesítmények, a technológiai adott, külön beruházási költséggel csak a hulladék tárolók, adagolók és az emisszió mérő berendezések járnak, amit a gyárak általában saját erőforrásaikból fedeznek,
- az így felhasznált hulladék nem kerül lerakásra, sőt a cementgyártás során a keletkező salak és pernye beépül a cementklinkerbe, így a kezelés és a szilárd részek füstgázból történő leválasztása is megoldott,

- ez a hasznosítási módszer kevésbé költséges, mint az anyagában történő hasznosítási eljárások,
- a tüzelőanyag költségeit is csökkenteni tudják így a felhasználók,
- több mint 30 éve alkalmazzák a technológiát, így megfelelően fejlett és a környezetvédelmi elvárásoknak is megfelel. [11]

Az együttégetést szén tüzelésű erőművekben is alkalmazzák, hasonló megfontolásokból, mint a cementgyárak esetében. Ennek a módszernek kettős előnye, hogy a légszennyezés csökkentése mellett a fosszilis energiahordozók fogyásának sebessé-gét is lassítja hazánkban a Mátrai Erőműben alkalmaznak együttégetést, ahol a hul-ladékot a szénnel rétegenként egymásra terítik, majd homogenizálva, futószalagon a szénőrlő malomba juttatják.

Magyarországon hulladék együttégetést alkalmaznak még például a Bakonyi Erőmű Zrt. ajkai erőművében, ahol biomassza és széntüzelés mellett -környezetvédelmi engedélyük alapján- 81 000t/év SRF/RDF tüzelőanyag hasznosít-ható [4], illetve a Hamburger Hungária Kft. dunaújvárosi fűtőerőművében RDF tüzelőanyagot (főleg saját papírhulladékukat) is alkalmaznak a szén, biomassza és biogáz mellett.

Az újabb termikus technológiák, mint a pirolízis és elgázosítás által lehetőségünk nyílik, hogy a szilárd hulladékból, biomasszából gázhalmazállapotú energiahordozót állítsunk elő. Pirolízis esetén a gáz fázis mellett éghető karbonban dús pirokoksz és piroolaj is keletkezik, amit a hagyományos fosszilis energiahordozókat használó erőművekben, energiatermelés céljából használhatnak. Elgázosítás során égetésnél is tapasztalt szilárd melléktermékként hamu és salak jelenik meg.

Jelenleg legmodernebb technológia a plazmatechnológia, amelynél a szilárd fázis az üvegesedett salak, ami a környezetre nézve teljesen inert, és építőipari hasznosításra kiváló. A plazmatechnológia a hulladék teljes ártalmatlanítását elvégzi, miközben energiát nyer vissza, egyetlen hátránya, hogy működtetésé villamos energiát igényel, ezáltal csökkentve a hatékonyságát.

2.2.3.1. Hulladékégetési technológiák

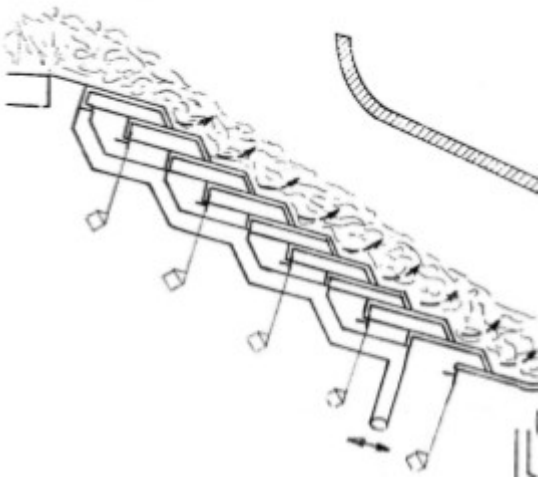
A hulladékégetésnek számos előnye van a lerakással szemben. Csökken a hulladék térfogata és tömege, az elégetett hulladékból 600-650 kWh/t energia kinyerhető, míg a lerakott hulladék esteében legtöbbször nincs energetikai hasznosítás, ahol mégis előfordul, ott a depóniagázt gázmotorral hasznosítják 75kWh/t kinyerhető fajlagos energiával. Égetés során az égéstermék nagy része szén-dioxid, viszont ez klíma-semlegesnek tekinthető, míg a lerakott hulladékból a lebomlás folyamán nagy mennyiségben keletkezhet metán, és emellett széndioxid. Ráadásul az égetés során a hulladék lebomlása percekben mérhető, míg a lerakott hulladék csak évtizedek alatt bomlik le. Ezt mind figyelembe véve kijelenthetjük, hogy hulladékot égetni mindig jobban megéri, mint lerakni. [11]

Ebben a részben a hulladékégetés során alkalmazott technológiákat mutatnám be röviden. Mind a maradék hulladék égetésére, mind a magasabb fűtőértékű másodlagos hulladékok energetikai hasznosítására két technológia jöhet szóba, a rostély tüzelés és a nagyobb teljesítmények esetén fluidágyas égetés.

Rostély tüzelés kialakításai:

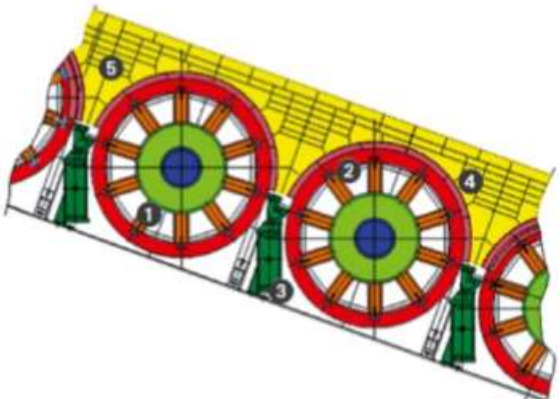
Hulladéktüzelésre jellemzően különféle mozgórostélyokat alkalmaznak. Ezek közül párat bemutatnék:

- **Előtoló rostély (2-4. ábra)**. Egymásra rakott lépcsők 8-15 fokos lejtéssel. Minden második lépcsősor mozgatható, amelyekkel a tüzelőanyagot az égés sebességéhez igazítva mozgatja a rostély vége felé, miközben az átkeverődik. Hűtésére alkalmazható levegő- és vízhűtés is, de 12 MJ/kg fűtőérték felett az előbbi alkalmazása nem ajánlott. A rostély pálya hossza általában 9-11 m



2-4. ábra Előtoló Rostély vázlata. [15]

- **Visszatoló rostély** kialakításnál a rostély elemek a hulladékárammal ellentétesen, a kazán homlokfala felé mozognak, a hulladékot összenyomva keverik át. A rostély felülete ferde, lejtése miatt a hulladék lefele csúszik.
- **Forgó rostély(2-5 ábra).** A kommunális vegyes hulladékok égetésére leggyakrabban alkalmazott megoldás. Hagyományos rostélyoknál az inhomogén összetételű tüzelőanyagoknál előfordulhat, hogy az a rostély felületén nem egyenletesen oszlik el, így az égés is változó minőségű lesz. Ennek a problémának a megoldására fejlesztették ki a forgó rostélyt, amelynél lassan forgó henger rostélyok keverik és mozgatják a tüzelőanyagot égése során így egyenletes kiégést biztosítanak széles tüzelőanyag minőség tartományban. A hengerek átmérője 1,5 m, hosszuk 2-8 m is lehet. A tüzelőanyag minőségétől



2-5. ábra Forgó rostély keresztmetszete. [12]

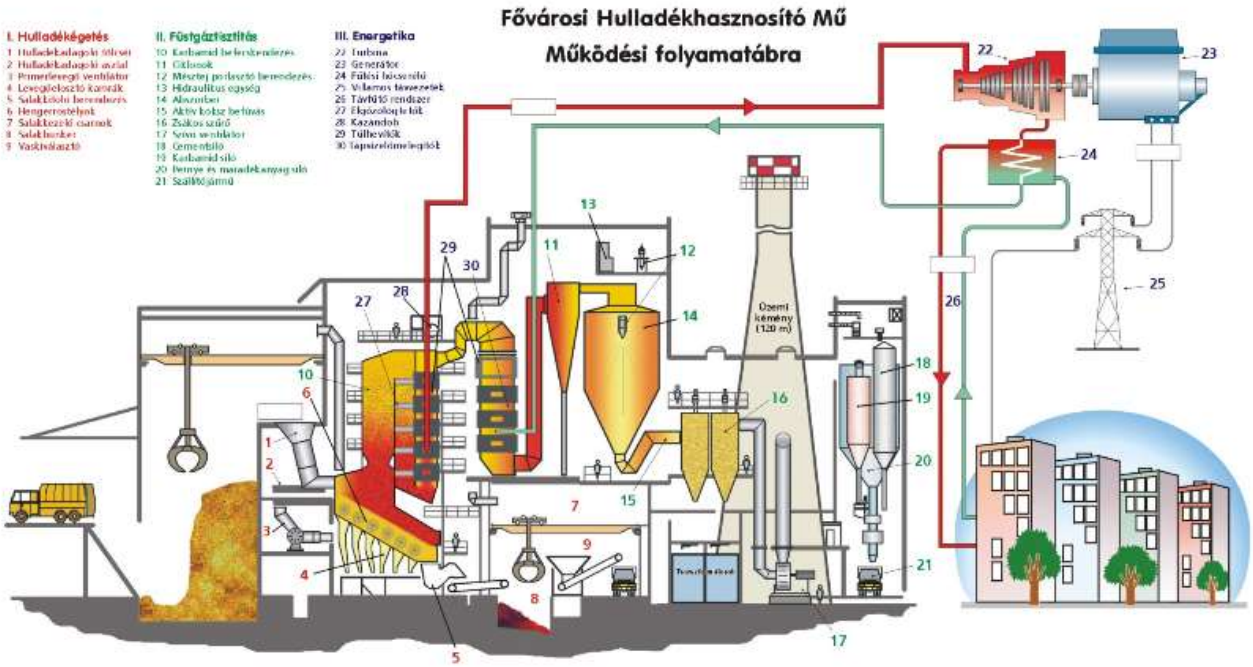
függően 6-7 db hengert alkalmaznak és a hengersornak 20-30 fok lejtést adnak. [12]

Azt, hogy éppen melyik rostély kialakítást érdemes alkalmazni, a hulladék tömegárama és a rostély hőterhelése határozza meg. Az ilyen méretezési feladatokra egy példa a következő táblázat (2-6 ábra).

	Hulladék áram	Mennyiségi terhelés	Hőterhelés
	t/h	kg/m²s	MW/m²
Előtoló rostély	2-20 (40)	0,075-0,09	0,7-0,95 (1,0)
Ellentoló rostély	1,5-8 (30)	0,05-0,085	0,6-0,75 (1,0)
Lengő ellentoló rostély			0,6-1,2
Visszatoló rostély	2,5-50		0,7-1,1
Hengerrostély	8-40	0,07-0,09	0,7-0,9

2-6. ábra: Hulladéktüzelésre alkalmazott rostélyok jellemző üzemi értékei. [12]

Magyarországon az egyetlen a hulladékégetőműben (2-7.ábra) forgó rostélyos tüzelést alkalmaznak. A rostély sor 30° -os lejtésű, hat darab forgó hengerből áll. A hengerek fordulatszáma külön-külön szabályozható. A cementégetőművekben hulladék együttégetésére is szinte kivétel nélkül rostély tüzelést használnak.



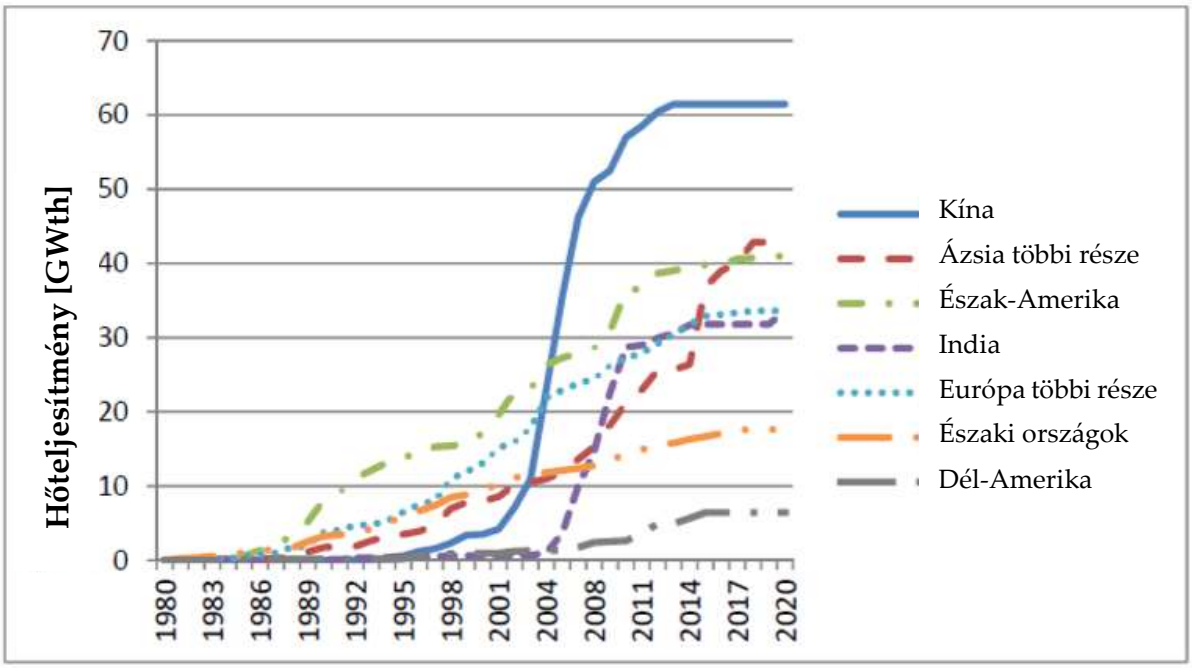
2-7. ábra Egy hulladékhasznosító mű technológiai felépítése a HUHA példáján. [16]

Fluid tüzelés:

Mostanában a rostély tüzelés mellett egyre gyakrabban alkalmaznak fluid kazánokat a megfelelően előkészített inert anyagoktól mentes egyenletes eloszlásúnak mondható hulladékok elégetésére. Ezek általában a feldolgozásra alkalmatlan műanyagok, csomagoló anyagok és egyéb értéktelen hulladékok. A tűztérbe adagolás előtt a hulladékot megfelelő minőségűre aprítják. Vegyes sűrűségű tüzelőanyagok esetében cirkulációs fluid kazán alkalmazását ajánlják.

A fluidizációs kazánok működését röviden ismertetném. A kazánban a tüzelőanyagon kívül egy ágyanyag található, ez általában kvarchomok. Ebbe kerül beadagolásra a tüzelőanyag és az egészet alulról levegővel fújatják úgy, hogy az lebegve folyadékhoz hasonló mozgást végezzen. Az ágy anyagra azért van szükség, mert a fluidizációt létrehozó gázáram az indokoltnál nagyobb légfeleslegtényezővel járna, így az ágy anyag ennek a csökkentésére szolgál.

A fluidizációs kazánok alkalmazásának hirtelen növekedését jól szemlélteti a következő 2-8. ábra. Látható, hogy a beépített teljesítményben az ezredforduló környékén indult el egy jelentős növekedés, főleg Kínában és Indiában.

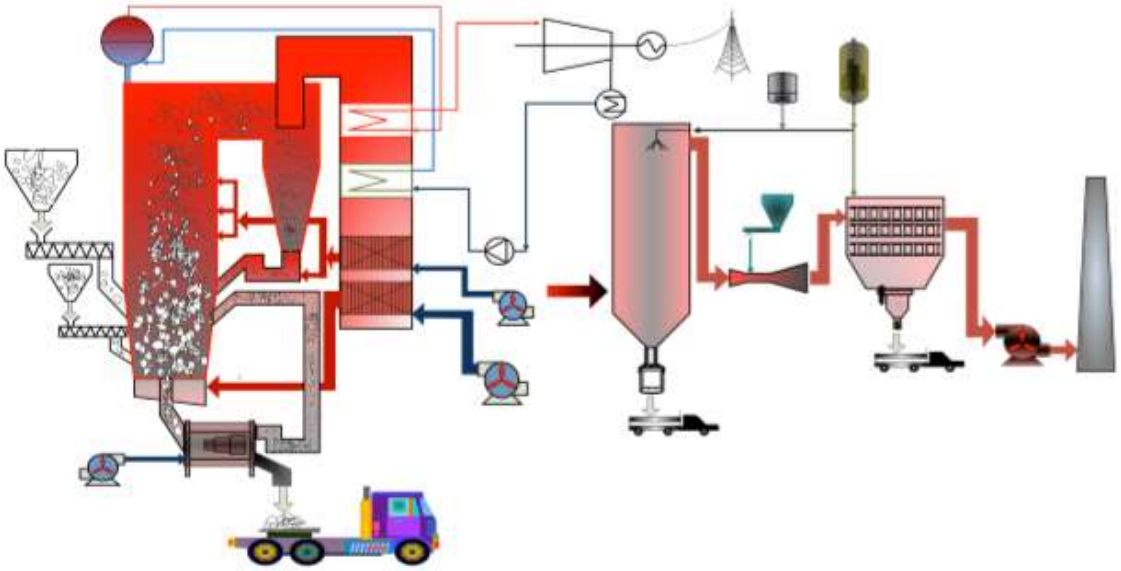


2-8. ábra A fluid kazánok beépített kapacitásának alakulása régiókra osztva. [17]

Cirkulációs fluidkazánok (CFB) esetében növelik a gáz sebességet addig, amíg pneumatikus szemcse elragadás alakul ki. Ekkor a kazánból a gázáram kihordja a fluidágy és a még elégelten tüzelőanyag szemcsék egy részét, majd ezeket egy porleválasztó ciklon segítségével eltávolítják a füstgázból és visszajuttatják a ka-

zánban. Hulladéktüzelés alkalmazásánál csak nagy egységteljesítménynél gazdaságos a cirkulációs fluid kazán technológia alkalmazása. Egy ilyen települési szilárd hulladékot égető CFB rendszer vázlatát a 2-9.-es ábra szemlélteti.

A fluid tüzelés nagy előnye, hogy intenzív keveredés érhető el vele, ezáltal az ágyban egyenletesebb a hőmérséklet eloszlás és a tüzelőanyag kiégése, valamit nagy hőátadási felületet biztosít és folytonos üzemben működhet. Legnagyobb



2-9. ábra Települési szilárd hulladéktüzelésű CFB rendszer vázlata [14]

hátránya viszont, hogy a kazánban lévő sok szemcsés anyag a fallal ütközve intenzív eróziót okoz, illetve ezen anyagok esetleges kihordása miatt porleválasztás szükséges. [13]

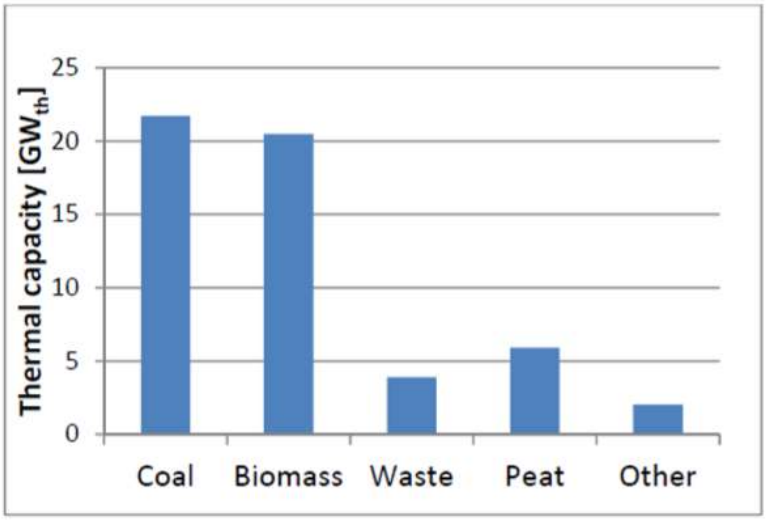
2.2.3.2. Hulladékégetés alkalmazása fluidágyas kazánokban

Ebben a részben röviden áttekinteném a világban és hazánkban hulladék hasznosításra alkalmazott fluidágyas technológia megvalósításait. Habár a hulladék hasznosító erőművek és fűtőművek túlnyomó része valamilyen rostély tüzeléses, a fluidágyas kazánok aránya egyre növekszik.

Kína mint az egyik legnépesebb és leggyorsabban fejlődő ország komoly fejlesztéseket tett az utóbbi évtizedekben energiatermelés terén. Mivel legnagyobb arányban mindig is szenet használtak, így a fluidagyas kazánok is régóta működnek náluk, amik jól alkalmazhatóak a rossz minőségű szenük eltüzelésére. Azt, hogy ez a technológia hulladék eltüzelésére is kiválóan alkalmas '90-es ismerték fel, amikoris 1998-ban meg kezdte működését az első lakossági szilárd hulladékot égető, cirkulációs fluidágyas erőművük Hangcsou városában. A létesítmény kapacitása 150t/nap volt és hulladék mellett szenet is használtak tüzelőanyagként. Erre azért volt szükség, hogy a kompen-

zálják a hulladék magas nedvesség tartalmát és tartani tudják a kazán magas hőmérsékletét. 2002-ben három új CFB kazánnal, összesen 800 t/nap kapacitással bővítették. 2012-ig 47 ilyen kazán állt üzembe Kínában összesen 40170 t/nap kapacitással, ezek közül a legnagyobb 2012-ben kezdte működését Cixiben 800 t/nap kapacitással. Úgy tervezték, hogy igen alacsony, akár 4,2 MJ/kg fűtőértékű hulladékkal is, melléktüzelés alkalmazása nélkül is tudjon működni. [14]

A távol-keleti kitekintő után saját kontinensünkön, Európában folytatom a technológia bemutatását. Az Unió klímapolitikában betöltött vezető szerepe miatt a széntüzelésű kapacitások közel egyenlőek a hulladékot és biomasszát égető kazánok kapacitásaival (lásd 2-10. ábra). Széntüzelésű fluid kazánokból 118 db van és 332 kazánban égetnek biomasszát vagy hulladékot. Az előbbi összesen 22 GWth, míg az utóbbi 24 GWth beépített termikus teljesítményt képvisel. [17]



2-10. ábra: Fluidágya kazánok beépített teljesítményének tüzelőanyag szerinti megoszlása Európában. [17]

Európán belül Keleten a széntüzelés dominál, míg az északi országokban a biomasszsa égetését alkalmazzák nagyobb arányban. Hulladékhasznosító fluidágyas kazánok Keleten jelentéktelen arányban szerepelnek, Nyugaton és Délen 20%-ot közelítik. [17]

Szomszédunkban, Ausztriában már találunk példát fluid kazánok települési szilárd hulladék égetés céljából történő alkalmazására. Ilyen tüzelőberendezések Niklasdorfban, Linzben, illetve Bécsben működnek. Közülük a legújabb Linzben 2011-ben állt üzembe 66 MW névleges teljesítménnyel, ezzel jelenleg a legnagyobb a három közül, a kisebbek 40-40 MW beépített teljesítménnyel rendelkeznek. MSW mellett főleg szennyvíziszapot és faaprítékot tüzelnek ezekben a kazánokban, egyik sem kizárólag lakossági hulladékot alkalmaz.

Tisztán RDF tüzelésű kazánok nagyszámban fordulnak elő Olaszországban, bár mindegyik kis egységteljesítményt képvisel. A jelenleg is üzemelő egységeket táblázatba foglalva a 2-11. ábra összegzi.

Tulajdonos/ Telephely	Működésbelépés éve	Típus (gyártó)	Kapacitás	Tüzelőanyag
AGSM	1992	BFBC	21,8 MWe	RDF
Verona		(Thyssen)		
Tossilo	1994	FICFBC	2 Mwe	RDF
Macomer		(Ebara)		
Veolia	1999	BFBC	5,7 MWe	RDF
Pietransanta		(Kvaerner)		
HERA	1999	BFBC	6,5 MWe	RDF
Ravenna		(EPI)		
Cartiere Burgo	1999	BFBC	3,2 MWe	Papíriszap
Mantova		(EPI)		
Scarlino Energia	1999	BFBC	19,5 MWe	RDF
Scarlino		(EX-Dorr Oliver)		
Sicet	1999	FICFBC	20 MWe	Fa, Fakéreg
Ospitale di Cadore		(AE Energietechnik)		
Lomellina Energia	2000	CFBC	15 MWe	RDF
Parona 1		(Foster Wheeler)		
Cartiere Burgo	2001	BFBC	7 MWe	Papíriszap, hulladék fa
Verzuolo		(EPI)		
A2A	2002	BFBC	11,5 MWe	RDF
Bergamo		(EPI)		
Marcegaglia	2002	BFBC	14 MWe	Faforgács
Cutro		(Fortum)		
Marcegaglia	2003	BFBC	12,3 MWe	RDF
Massafra		(EPI)		
Biomasse Italia	2003	CFBC	40 MWe	Biomassza
Strongoli		(SES Tlmace)		
A2A	2003	BFBC	8,7 MWe	RDF
Corteolona		(Kvaerner)		
ENEL Produzione	2005	CFBC	340 MWe	Szén, Biomasz-sza
Sulcis		(Alstom)		
Ecologia Oggi	2005	BFBC	17,2 MWe	RDF
Gioia Tauro		(Kvaerner)		
Lomellina Energia	2007	CFBC	17 MWe	RDF
Parona 2		(Foster Wheeler)		
IG	2013	BFBC	18,7 MWe	Eukaliptusz fa hulladék
Enna		(EPI)		
Marcegaglia	2015	BFBC	14 MWe	RDF
Manfredonia		(Ansaldo)		

2-11. ábra Jelenleg Olaszországban működő FBC kazánok (2016-os adat). BFBC: buborékos fluidágyas kazán; CFBC: cirkulációs fluidágyas kazán; FICFBC: gyors keringtetésű cirkulációs fluidágyas kazán. [17]

A többi országtól Olaszország abban tér el jelentősen, hogy a legrégebben üzemelő fluidizációs kazánjaik már tisztán hulladék, RDF tüzelésűek voltak és csak később épült különböző biomasszát, vagy szenet égető létesítmény. A 12 RDF-et hasznosító kazán összesen 151,2 MWe beépített villamos teljesítményt képvisel, így egy létesítmény villamos teljesítménye átlagosan 12,6 MWe, ami meglehetősen kis méretű. A legnagyobb egyben a legrégebbi is, 1992-ben lépet üzembe és 21,8 MWe kapacitással rendelkezik, míg a legnagyobb szenes, biomasszás egység egyedül 340 MWe villamos teljesítménnyel rendelkezik. Ez a nagy eltérés jól mutatja a tüzelőanyagok közti különbségeket. [17]

2.2.3.3. Klór korrózió

A kazánok füstgáz oldali korrózióját a füstgázban lévő különböző vegyületek okozzák. Ezek a kazán szerkezetére, fűtőfelületeire, csövekre, túlhevítőkre, illetve a tűztér határoló felületeire lerakódva reakcióba lépnek a felületek védőrétegével. A jelenség kialakulását és lefolyását befolyásolja a felületek és a füstgáz hőmérséklete, a lerakódások összetétele, a felületi hőmérséklet gradiens és a hőmérséklet ingadozások előfordulása. [9]

A klór korrózió jelensége egyre gyakrabban okoz problémát a villamosenergia- és gőztermelés területén. A probléma forrása a biomassza, hulladék és egyéb magas klór-, alkáli- és alkáliföldfémtartalmú tüzelőanyagok növekvő arányú alkalmazása. Magas hőmérsékleten a tüzelőanyagból az előbb felsorolt anyagok gáz fázisban távoznak, majd a fal felületeken lerakódásokba deponálnak. A klórhőmérséklettől függően más formában jelenik meg, 600 °C felett HCl (sósav), az alatt pedig Cl_2(

A klór korróziónak 4 formáját különböztetik meg, az első három a felületek védőrétegének tönkremenetelével vagy annak hiánya következtében, az utolsó elemi klór hatására következik be:

1) Vas(II)klorid tiszta csőfelületen képződése. Új vagy frissen megtisztított berendezések üzembe helyezésekor, a fémfelületek 300 °C feletti hőmérséklete esetén a füstgázból a klór kondenzálódik a hidegebb fűtőfelületeken, így vaskloridok keletkezhetnek. Ezekből további reakciókkal a cső védőrétegét károsító klórtartalmú gázok keletkeznek.
2) Vas(II)klorid képződés oxigénszegény környezetben. Szénmonoxid hatására megsérült védőréteg alatti vasat, vaskarbidot a klór korrodálja, és a képződött vas-klorid illóvá válhat, ezzel anyagfogyást eredményezve.
3) Eutektikus klorid olvadék általi korrózió. Előfordulnak olyan eutektikumok, amelyeknek alacsonyabb (200 °C feletti) az olvadáspontjuk és gyors korróziót okozhatnak.

4) A lerakódásokba deponálódott kloridok a hidegebb csőfelület felé diffundálva kondenzálódnak és a füstgáz kéndioxid tartalmával szulfátokká alakulhatnak, így gázfázisú HCl, vagy nagyon agresszív Cl_2 keletkezhet. A szulfátképződéssel kialakul egy körfolyamat, amelyben folyamatosan újraképződött klór zárt korróziós folyamatot alkot, így a korrózió sebessége független a klór koncentrációtól. [9]

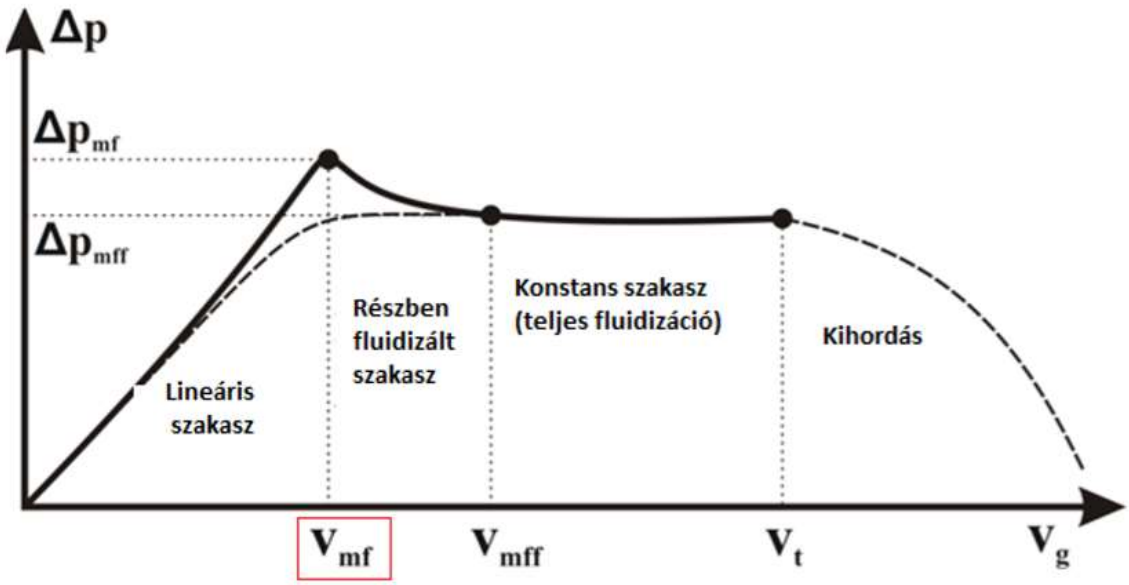
A klór korrózió ellen legjobb védelmet a korrózióálló szerkezeti anyagok alkalmazása jelenti, viszont ez igen költséges. A korrózió mérséklésére jól alkalmazható a védő falazatok kialakítása, vagy a szénmonoxid keletkezésének minimalizálása is. Ha szulfát képződés nem a lerakódásokban, hanem még gázfázisban történik, azzal csökkenthető a klórtartalmú lerakódások mennyisége. Egy új megoldásnak számít a kén recirkuláció a klór korrózió megakadályozására, ahol a füstgáztisztításból származó kénsavat visszavezetik a kazánban, hogy ott a füstgázban lévő klórral szulfátokat alkosson. Ezt a technológiát nagyméretben a göteborgi hulladékégetőben már tesztelték is. [10].

3. MINIMÁLIS FLUIDIZÁCIÓS SEBESSÉG MEGHATÁROZÁSA SRF TÜZELŐANYAG ESETÉN

3.1. Elméleti összefoglaló

Fluidizációs során, a fluidizációs térbe alulról levegőt vezetünk egy ventilátor vagy kompresszor segítségével, fúvókákon keresztül. A fluidizációs térben helyezkedik el a tüzelőanyag, illetve az ágyanyag (általában kvarchomok). Az ágyanyagra azért van szükség, mert a fluidizációhoz szükséges levegő, túlzottan nagymennyiségű légfelesleget hoz létre, így a kvarchomok a légfelesleg-tényezőt tüzeléstechnikailag meghatározott optimális érték közelében tartja. Amíg a ventilátor kikapcsolt állapotban van, a fluidágyban nyugalomban van a tüzelőanyag-homok keverék. A gázsebességét fokozatosan növelve, a levegő átjárja az ágyat, ahol a szemcséket a súrlódási erő tapasztja össze. Amikor a levegő sebessége kellően nagy ahhoz, hogy leküzdje a szemcsék közti összetartó erőt, az ágyanyag és a tüzelőanyag együttes keveréke lebegni kezd, a szemcsék egymáson elgördülnek, elmozdulnak, folyadékhoz hasonló mozgást végeznek. A folyadékként mozgó keveréket fluidumnak nevezzünk.

A fluidizációs folyamat gázsebességének növelésével részekre osztható, ezen részek bemutatására szolgál a 3-1. ábra.



3-1. ábra: Fluidágy nyomásesése a gázsebesség függvényében. [18]

Az ábrán a fluidágy nyomásesése látható a gázsebesség függvényében. Eszerint a fluidizációs folyamatot négy szakaszra oszthatjuk fel. Kezdetben a gázsebesség növelésére az ágy nyomásesése lineárisan változik, tovább növelve a sebességet elérünk a konstans szakaszba, ahol az ágy nyomása közel állandónak tekinthető. A lineáris és a konstans szakaszt összekötő átmenet a részben fluidizált szakasz, ahol az ágy egy ré-

sze már fluidizált állapotban van, míg a többi fix. A gázsebességet kellően megnövelve, a konstans szakasz után átlépünk a kihordás szakaszában, ahol már olyan nagysebességgel áramlik a levegő, hogy a szemcséket a fluidizációs téren kívülre hordja, így az fluidum fogyni kezd.

A dolgozat célja a minimális fluidizációs sebesség meghatározása kvarchomok és SRF keverék esetén. A minimális fluidizációs sebesség -ahogy azt a 3-1 ábra is mutatja - a lineáris és az átmeneti szakasz határához tartozó gázsebesség, vagyis az a legkisebb gázsebesség, ami a fluidizációs létrejöttéhez feltétlenül szükséges.

3.2. A minimális fluidizációs sebesség meghatározásának módszere

Az én célom az SRF lakossági hulladék fluidizálásához szükséges minimális gázsebesség meghatározása volt. Ebben segítségemre volt a konzulensem, Szücs Botond, aki doktoranduszi éveiben hideg fluidizációs berendezéseken végez különböző kísérleti méréseket.

Az általam használt berendezés a BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék Jendrassik György Hőtechnikai Laboratóriumában található. Energetikai mérések II tárgy keretén már volt alkalmam megismerni, a fő részeit a 3-2. ábra szemlélteti.

3-2. ábra: A mérési elrendezés: 1. a beszívó mérőperem; 2. radiális ventilátor; 3.fúvokák; 4. fluidizációs tér (plexi cső), 5. frekvenciaváltó (a háttérben).

Fluidizációs térként egy átlátszó plexi cső szolgál, amit meghosszabbítottak egy PVC csővel. Az alján találhatók a fúvókák, amik valójában egy plexilapba fúrt apró lyukak. Ez csatlakozik a fluidizációs térhez, megfelelő tömítéssel ellátva. A fúvókák kialakítását a 3-3. ábrán szemléltetem.

3-3. ábra: A fúvókák és tömítésük. [19]

A fúvókákon keresztül egy radiális átömlésű ventilátor áramoltatja a levegőt. A ventilátor a mérőperemen át szívja be a levegőt, így a mérőperem segítségével a levegő sebességét meg tudtam határozni. A ventilátor teljesítményét a frekvenciaváltó segítségével állítottam be és minden mérési pontban fokozatosan növeltem.

Az ágy nyomásesésének közvetlen mérésére nem volt lehetőségem, mivel a nyomásmegcsapolási pontok a fúvókák alatt helyezkedtek el. Ennek megfelelően a mérések előtt el kellett végeznem egy mérést üres fluidizációs térrel is, hogy meg tudjam határozni, a fúvókák és egyéb áramlási ellenállások nyomásesését. A nyomásesés mérésére Testo 510i differenciál nyomásmérőt használtam.

A gázsebesség mérésére beszívó mérőperemen keresztül érkezett a levegőáram a ventilátor csonkjára. A mérőperemen eső nyomást egy alkohol töltésű ferdecsöves manométerrel végeztem, mivel csak ez a műszer annyira pontos, hogy ki tudja mutatni a kezdeti kis sebességhez tartozó nyomáseséseket is. A manométerről leolvasott értékekből nyomásesést a következőképen számoltunk.

- Ferdecsöves manométer szintváltozása:

$$\Delta h = c \cdot \Delta x \tag{3.1}$$

Ahol: Δh: szintváltozás a ferdecsőben [mm]
Δx: a ferdecsöves manométerről leolvasható érték [mm]
c: a ferdecső bedöntési aránya pl. 1/50 [-]

- Ferdecsöves manométerrel mért nyomásváltozás

$$\Delta \mathrm{p} = \rho_{alkohol} \cdot g \cdot \Delta h \tag{3.2}$$

Ahol: Δh: szintváltozás a ferdecsőben [m]

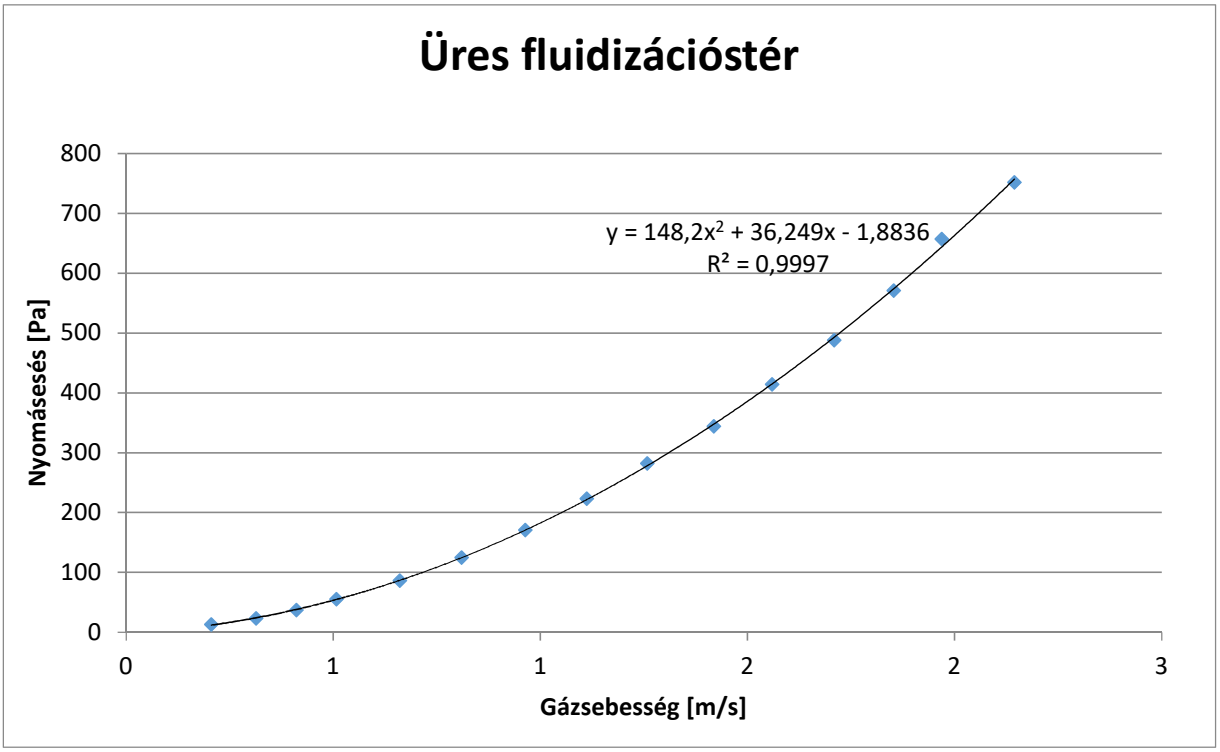
$\rho_{alkohol}$: az csőben lévő alkohol sűrűsége ($\rho_{alkohol} = 790\frac{kg}{m^3}$)
g: a gravitációs gyorsulás a földfelszínhez közel ($g = 9{,}81\frac{m}{s^2}$)
Δp: a beszívó mérőperemen eső nyomás [Pa]

A nyomásmérés eredményeiből a következő összefüggéssel határoztam meg a gázsebességet.

$$v = \frac{q}{A} = \frac{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{alkohol} \cdot g \cdot \Delta h}{\frac{p_0}{T_0 \cdot R}}}}{A} \tag{3.3}$$

Ahol: v: gázsebessége $\left[\frac{m}{s}\right]$
q: levegő térfogatáram$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
A: a fluidizációs tér keresztmetszete (hengerszimmetrikus cső D=0,192m)
α: beszívó mérőperem átfolyási szám, α = 0,6
ε: expanzió viszony, esetünkben ε = 1
d: beszívó mérőperem átmérő, d = 0,06 m
Δh: szintváltozás a ferdecsőben [m]
ρ_{alkoh} : az csőben lévő alkohol sűrűsége ($\rho_{alkohol} = 790\frac{kg}{m^3}$)
g: a gravitációs gyorsulás a földfelszínhez közel ($g = 9{,}81\frac{m}{s^2}$)
p_0: légköri nyomás a méréshelyszínén [Pa]
T_0: a méréshelyszínén mért levegő hőmérséklet [K]
R: a levegő specifikus gázállandója ($R_{lev} = 287\frac{J}{kgK}$)

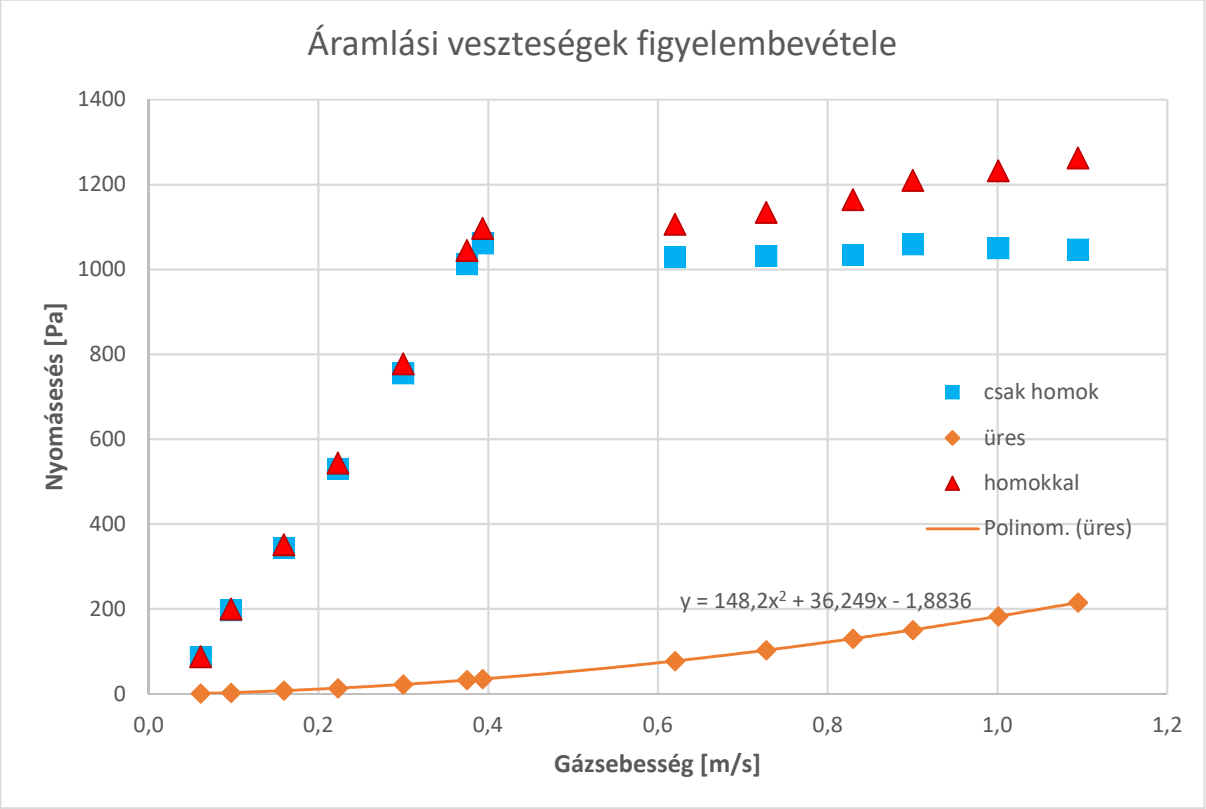
Az első mérést - ahogy már említettem - üres fluidizációs térrel végeztem el, hogy meghatározzam az áramlási veszteségeket. Ennek a mérésnek az eredményeit ábrázoló nyomásesés-gázsebesség diagram alább látható a 3-4. ábrán.



3-4. ábra: Üres fluidizációs térrel

A mérést 15 pontban végeztem el a frekvencia szabályzót 5Hz-ről indítva 2Hz-ként lépkedtem felfele 14 Hz, majd onnantól 3 Hz-ként haladtam 44Hz. Az eredményeket Excel program segítségével ábrázoltam és a ponthalmazra másodfokú közelítő trendfüggvényt illesztettem, aminek az egyenletét, illetve az illesztés determinációs együtthatóját az ábrán a görbe mellett tüntettem fel. A trendfüggvény egyenletébe az adott mérési pont gázsebességét behelyettesítve megkapom az adott ponthoz tartozó veszteségeket, amit levonva a mért nyomásesésből megkapom tisztán az ágy nyomásesését.

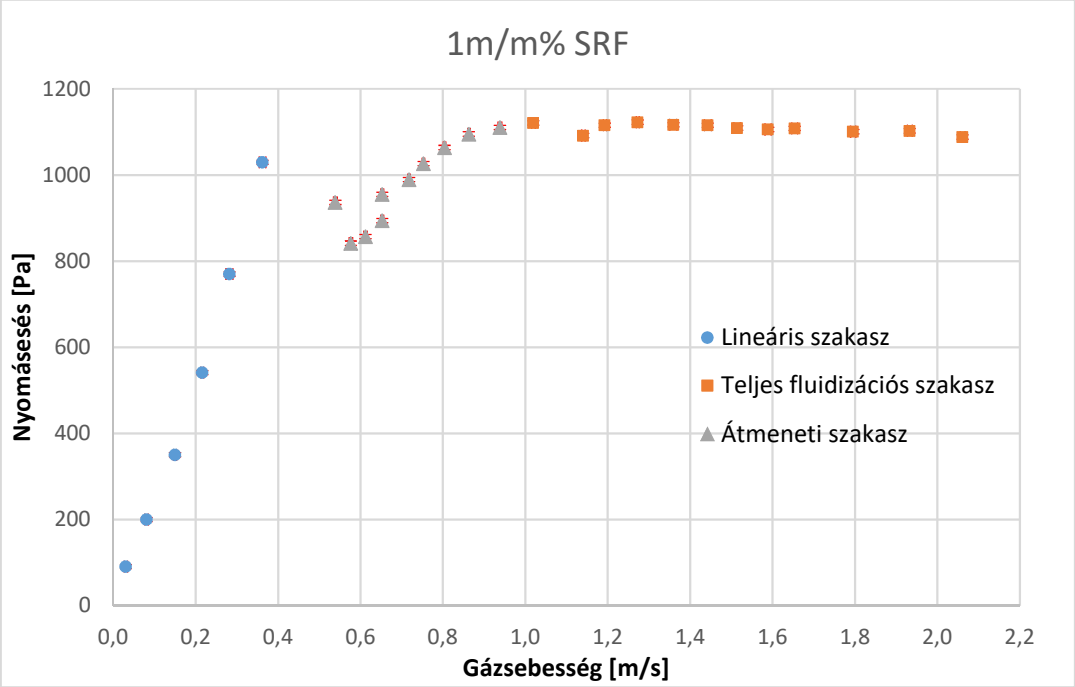
A második mérést már kvarchomokkal végeztem, de még hozzáadott SRF-nélkül. Ebben az esetben már 10 Hz-ről indultam és 5Hz-ként vettem fel egy mérési pontot. 35 Hz-hez érve az ágyban már látszottak a keletkező légbuborékok, vagyis már a részleges fluidizációs szakaszban mértem. Innentől 1 Hz-ként növeltem a ventilátor teljesítményét egészen 42 Hz-ig. A homokágyas és az üres mérés segítségével a3.-5. ábrán mutatom be az áramlási veszteségek figyelembevételét. A mérési pontokban kiszámítottam a gázsebeséget, ennek az értékét minden pontban behelyettesítettem az üres mérésnél meghatározott másodfokú polinomban és a mért nyomás értékekből minden mérési pontban kivontam, így megkaptam tisztán a homok ágy nyomásesését.



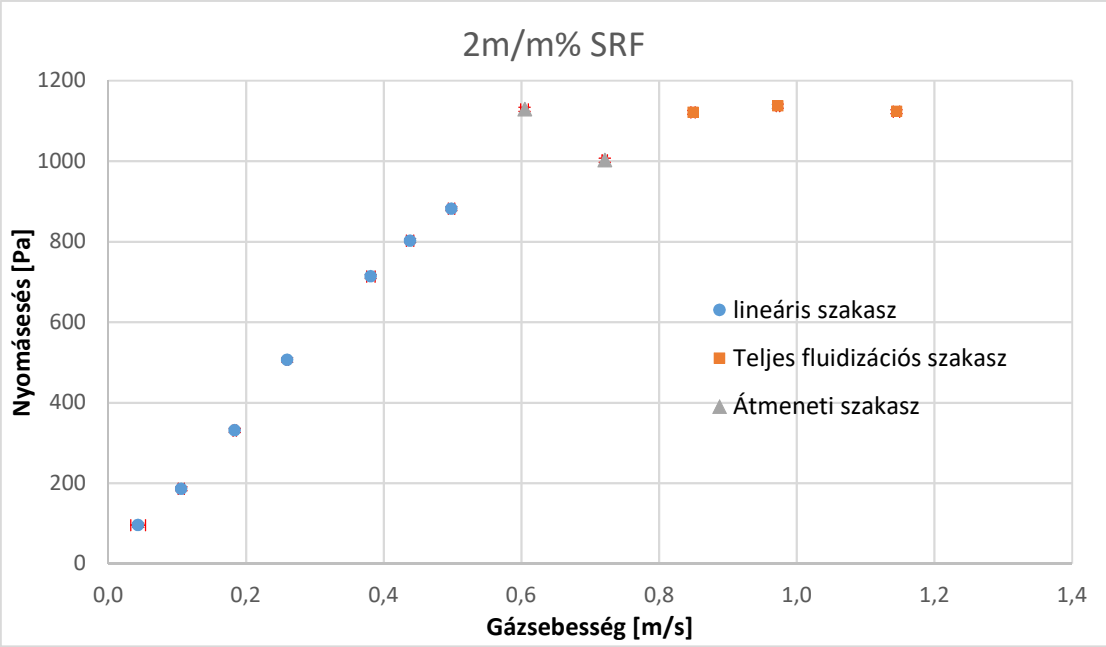
3-5. ábra: Áramlási veszteséges figyelembevétele, tisztán az ágy nyomásesésének meghatározása.

A további mérések során a SRF tüzelőanyagot kevertem az ágyhoz és az arányát folyamatosan növeltem (3-6., 3-7., 3-8. és 3-9. ábra). A mérések eredményeként azt vártam, hogy egy függvénnyel közelíthető legyen a minimális fluidizációs gázsebesség és az ágy SRF terhelésének kapcsolata.

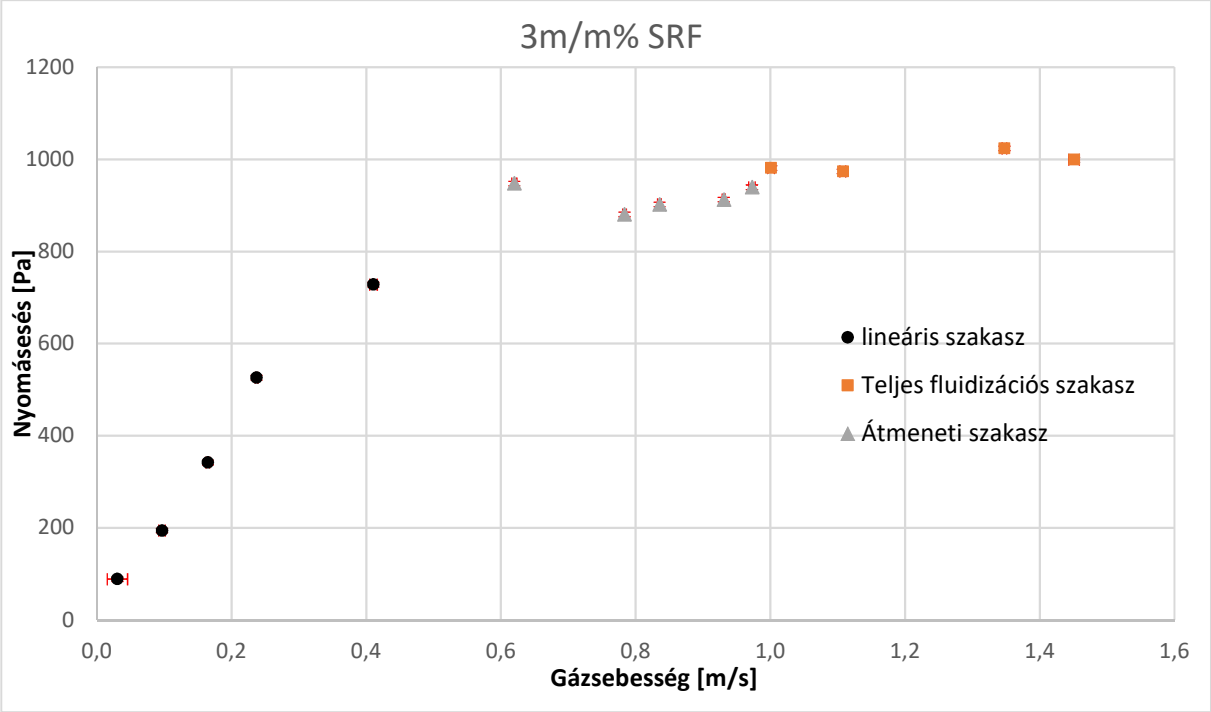
Négy különböző SRF tüzelőanyag és ágyanyag keverési arányt vizsgáltam. Az eredményeket táblázatba foglaltam és hozzájuk diagramokat készítettem. A fluidizációs jelleg görbéket 3 részre bontottuk: kezdetben lineáris szakasz, részleges fluidizációs szakasz és teljes fluidizációs szakasz.



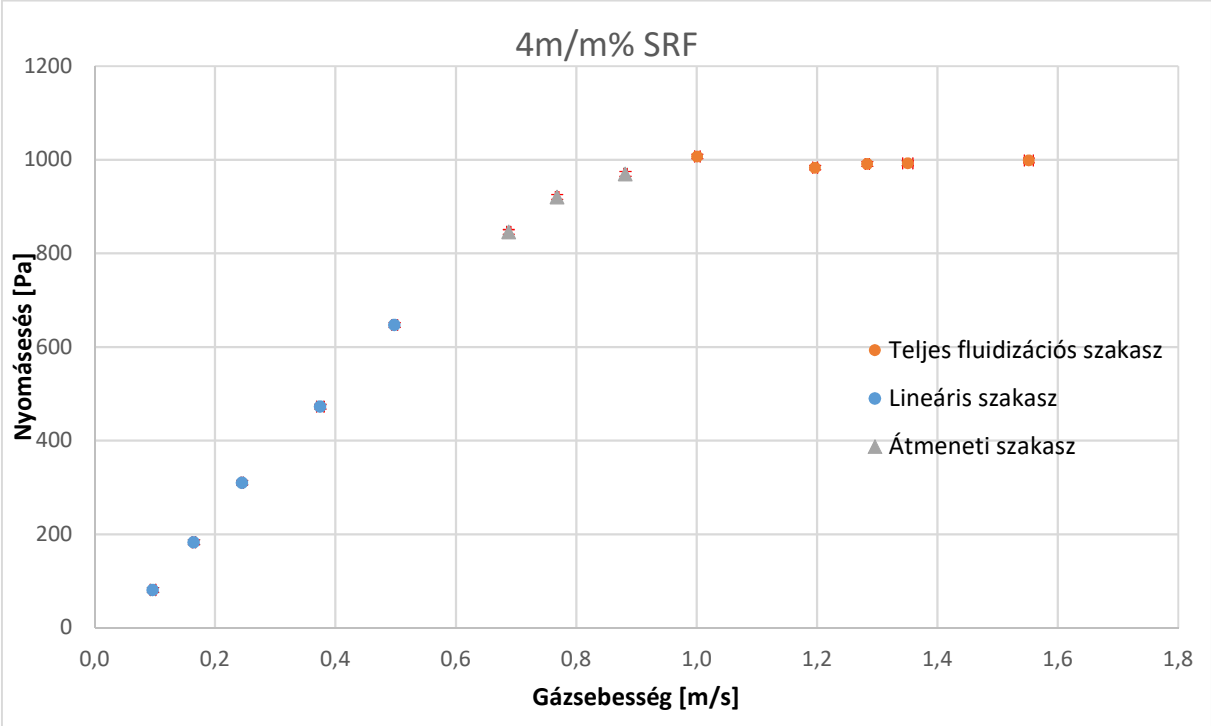
3-6. ábra: Nyomásesés-gázsebesség diagram 1% SRF tartalom esetén.



3-7. ábra: Nyomásesés-gázsebesség diagram 2% SRF tartalom esetén.



3-8. ábra: Nyomásesés-gázsebesség diagram 3% SRF tartalom esetén.

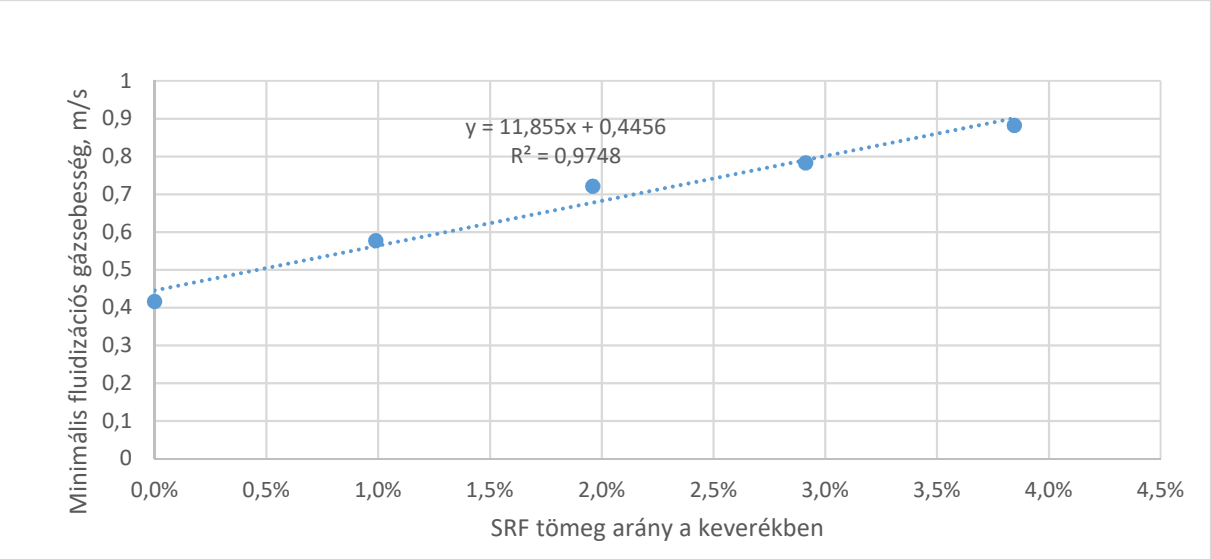


3-9. ábra: Nyomásesés-gázsebesség diagram 3% SRF tartalom esetén.

A minimális fluidizációs gázsebesség meghatározásához az átmeneti szakasz legmélyebb pontját – legkisebb nyomásesésű pontját- vettem. Az így kapott eredményeket táblázatba foglaltam, és diagramon is ábrázoltam (3-10. és 3-11. ábra).

tömeg% SRF	4	3	2	1	0
mhomok [g]	3399,8	3541,8	3630	3640	3600
mSRF [g]	135,992	106,254	72,6	36,4	0
vmf [m/s]	0,882	0,783	0,721	0,577	0,416

3-10. ábra: A mérésekhez tartozó fluidágyak összetétele és a minimális gázsebesség értéke.



3.-11. ábra: A minimális fluidizációs gázsebesség és az ágy SRF tartalmának kapcsolata

A 3-11-es ábrán jól látható, hogy a minimális fluidizációs gázsebesség értéke nagyban függ az ágy SRF tüzelőanyag terhelésétől. Ezt a kapcsolatot közelítő lineáris egyenlettel megfelelően pontosan le lehet írni.

$$y = 11{,}855x + 0{,}4456 \tag{3.4}$$

, ahol x: a fluidágy SRF tüzelőanyag tartalma tömegszázalékban.

Ennek az egyenletnek az ismeretében már meghatározhatók azok az üzemi tartományok, ahol buborékos fluidizáció esetén az ágy teljes fluidizáltsága biztosított. Ez az ismeret rendkívül hasznos lehet gyakorlati és üzemeltetési szempontból.

3.3. Hibaszámítás

A hibaszámítást a gázsebesség számításra végeztem el. Az egyes műszerek mérési hibái a 3-12. táblázatban láthatók. A ferdecsöves manométer Δh szintkülönbség hibáját a leolvasás (δΔx) hibájából származtatva:

$$\delta\Delta h = \sqrt{(c \cdot \Delta x)^2} = c \cdot \Delta x \tag{3.5}$$

$\delta\Delta p_{ágy}$[Pa]	5
$\delta\Delta x$[m]	0,001
δp_0[Pa]	100
δT_0[°C]	0,1

3-12. ábra: mérési hibák

A gázsebesség hibáját az alábbi egyenlet alapján végeztem el:

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\alpha\cdot\varepsilon\frac{d^2\cdot\pi}{4}\cdot\sqrt{2\cdot\rho_{alkohol}\cdot g\cdot R}\cdot}{2\cdot A}\right)^2\cdot\left(\left(\sqrt{\frac{T_0}{p_0\cdot\Delta h}}\cdot\delta\Delta h\right)^2+\left(-1\cdot\sqrt{\frac{\Delta h\cdot T_0}{p_0^3}}\cdot\delta p_0\right)^2+\left(\sqrt{\frac{\Delta h}{p_0\cdot T_0}}\cdot\delta T_0\right)^2\right)} \quad (3.6)$$

Az egyes mérési pontokhoz tartozó hibák értékeit a fentebb látható diagramokon ábrázoltam. Minden adatsorban az első mérési pontot leszámítva a mérési hiba értéke az 5%-os hibahatáron belül (legtöbbször 1%-nál kisebb) maradt, így a kapott értékeket megfelelően kis hiba terheli és valósnak tekinthetjük.

4. GAZDASÁGI MEGTÉRÜLÉS SZÁMÍTÁSA

Ebben a részben egy buborékos fluidizációs technológiára épülő energiatermelő egység megvalósításának gazdasági lehetőségeit, piaci versenyképességét vizsgáltam.

A gazdasági elemzést dr. Korényi Zoltán „Erőművek üzemvitele" című tárgy keretein belül bemutatott megtérülési számítások módszertanára építve annuitás számítás segítségével végeztem el. Ennél a módszernél az erőmű teljes élettartamára évenként azonos költségtételeket, azonos energiamennyiségeket feltételezünk.

A számítások menete a következő:

1. Az erőmű telephelyi és külső csatlakozási peremfeltételeinek a felmérése.
2. Az erőmű műszaki paramétereinek meghatározása.
3. Éves termelési adatok kiszámítása.
4. Beruházási költségek meghatározása.
5. Éves üzemeltetési és karbantartási költségek meghatározása.
6. Éves bevételek kiszámítása.
7. Fajlagos energiaköltségek kiszámítása.
8. Versenyképesség megítélése a fajlagos költségekkel.

A számításokhoz egy fiktív kapcsoltan villamos- és hőenergiát termelő kondenzációs erőművet vettem alapul. A hőtermelést távhő szolgáltatás céljából végzi.

A műszaki és üzemeltetési paramétereket, balamit a beruházási és üzemeltetési költségeket úgy vettem fel, hogy a valóságot közelítsék, ezek táblázatba foglalva alább láthatók. (input adatok: ____)

MŰSZAKI PARAMÉTEREK			Dim.
1.	**Villamos teljesítmény**		
	1.1 Névleges (bruttó) villamos teljesítmény	50	MW_e
	- Fajlagos villamos önfogyasztás	12,0%	%
	1.2 Villamos önfogyasztás teljesítménye	6	MW_e
	1.3 Kiadott (értékesített, nettó) teljesítmény	44	MW_e
2.	**Hőteljesítmény**		
	2.1 Beépített névleges hőteljesítmény	30	MW_{th}
	2.2 Fajlagos hő önfogyasztás	0	
	Hő-önfogyasztás hőteljesítménye	0	MW_{th}
	2.3 Kiadott (értékesített, nettó) hőteljesítmény	30	MW_{th}
3.	**Hatásfokok - nettó**		
	3.1 Villamos bruttó hatásfok	30,0%	%
	3.2 Villamos nettó hatásfok	26,4%	%
	3.3 Termikus nettó hatásfok	18,0%	%
	3.4 Összhatásfok - nettó	44,4%	%
4.	**Tüzelési (vagy reaktor) teljesítmény**	166,6667	MW_{th}
5.	**Telephely igény - fajlagos**	300	m /MW
	- Telephely össze területe	1	hektár

4-1. ábra: Műszaki paraméterek

TERMELÉSI ADATOK			Dim.
1.	**Csúcskihasználási óraszám**		
	1.1 Villamosenergia termelésre	8000	h/év
	1.2 Hőenergia termelésre (távhő)	5000	h/év
2.	**Rontó tényezők**		
	2.1 Kopás, elhasználódás (villamos energiára)	0,30%	%
	2.2 Hatásfok romlás tü. anyagra (indítás, leállítás, részterhelés)	0,10%	%
3.	**Villamosenergia termelés**		
	3.1 Termelt villamos energia	398 800	
	3.2 Önfogyasztás (vill. energia)	48 000	MWh_e/év
	3.3 Kiadott (értékesített) energia (nettó)	350 800	MWh_e/év
4.	**Hőenergia termelés**		
	4.1 Termelt hőenergia	540 000	GJ/év
	4.2 Önfogyasztás (hőenergia)	0	GJ/év
	4.3 Kiadott (értékesített) hőenergia (nettó)	540 000	GJ/év
5.	**Tüzelőanyag (fűtőanyag) felhasználás**	**1 334 668**	MWh_{th}/év
		4 804 805	GJ/év
6.	**CO2 kibocsátás (fajl.) - tü. ag. hőjére (H_u-val)**	0	kg/kWh_{th}
	6.1 Éves CO2 kibocsátás	0	t/év
7.	**Éves átlagos nettó hatásfokok**		
	7.1 Villamos éves nettó hatásfok	26,28%	%
	7.2 Termikus éves nettó hatásfok	11,24%	%
	7.3 Éves nettó összhatásfok	**37,52%**	%

4-2. ábra: Termelési adatok

Éves költségek meghatározása:

Az annuitási tényezőt (kamatos leírási tényező) a következő összefüggéssel határozta, meg:

$$\alpha = \frac{r\cdot(1+r)^n}{(1+r)^n-1} \tag{4.1}$$

Ahol: α : annuitási tényező [-], [%]

r : kamatláb (diszkonttényező) [-], [%]

n : számítási üzemidő [év]

Ez alapján a tőke költség: $C_{tőke}\ \ \alpha \cdot B_0$ (4.2)

Ahol: $C_{tőke}$: a tőkeköltségek [€/év]

B_0 : teljes beruházási költség, $B_0 = b \cdot P_{BT}$ [€]

P_{BT} : beépített villamos teljesítmény [kW]

b : fajlagos beruházási költség, $b = \frac{B_0}{P_{BT}}$ [€/kW]

Az üzemeltetés és karbantartás éves költsége: $C_{Ü+K} = \omega \cdot B_0$ (4.3)

Ahol: $C_{Ü+K}$: üzemeltetési és karbantartási költségek [€/év]

ω : üzemeltetési és karbantartási tényező [-], [%]

A tüzelőanyag éves költsége: $C_{tü} = Q_{tü} \cdot p_{tü}$ (4.4)

Ahol: $Q_{tü}$: tüzelőanyag felhasználás [MWh_{th}/év]

$p_{tü}$: fajlagos tüzelőanyagár [€/MWh_{th}]

Az éves összes költség, a fent említett költségek (és a széndioxid kvóták költsége) összege. Ezt rendszerint két részre bontjuk, állandó és változó költségek összegére.

$$C = \underbrace{C_{tőke} + C_{Ü+K}}_{\sim C_á} + \underbrace{C_{tü}\,(+C_{CO2})}_{\sim C_v} \quad (4.3)$$

Ahol: $C_á$; C_v : Állandó és változó költségek [€/év]

Fajlagos költségek meghatározása:

A fajlagos villamosenergia költség az összes költség és az értékesített villamosenergia hányadosa.

$$k = \frac{C}{E} \quad (4.4)$$

k : Fajlagos villamosenergia költség [€/MWh]

C : Éves összes költség [€/év]

E : Értékesített (nettó) villamosenergia [MWh/év]

Ezt írhatjuk úgy is hogy:

$$k = \frac{b(\alpha+\omega)}{(1-\varepsilon)\tau_{cs}} + \frac{p_{tü}}{\eta} + \frac{p_{CO2} \cdot f_{CO}}{\eta} = k_á + k_v \quad (4.5)$$

Ahol: b : fajlagos beruházási költség, $b = \frac{B_0}{P_{BT}}$ [€/kW]

α : annuitási tényező [-], [%]

ω : üzemeltetési és karbantartási tényező [-], [%]

ε : éves villamos önfogyasztás, $\varepsilon = 1 - \frac{E}{E_{br}}$

E: nettó (értékesített) villamosenergia [MWh/év]

E_{br}: bruttó (termelt) villamosenergia [MWh/év]

τ_{cs} : éves csúcskihasználási óraszám [h/év]

ptü : fajlagos tüzelőanyagár [€/MWh_{th}]

η : éves átlagos nettó hatásfok [-], [%]

p_{CO2} : CO_2 ára [€/t]

f_{CO2} : tüzelőanyagra vonatkoztatott fajlagos CO_2 kibocsátás

$k_á$: villamosenergia egységköltség állandó része[€/MWh]

k_v : villamosenergia egységköltség változó része[€/MWh]

BERUHÁZÁSI KÖLTSÉGEK			Dim.
0.1	**Főtechnológia fajlagos beruházási költsége**	**4 000**	**€/kW$_e$**
0.2	Építés időtartama	40	hónap
0.3	Építés alatti finanszírozás kamatai	4,8%	%
0.4	Tulajdonosi költségek	1,0%	%
0.5	Előre nem látható költségek	5,0%	%
1.	**Főtechnológia beruházási költség. (kerítésen belül komplett)**	**66 000**	**mill. Ft**
7.	Építés alatti finanszírozás kamatterhe	3 168	mill. Ft
8.	Tulajdonosi költségek	660	mill. Ft
9.	Előre nem látható költségek	3 300	mill. Ft
10.	Bontási költségek	0	mill. Ft
11.	**Összes beruházási költség:**	**73 128**	**mill. Ft**
	Teljes beruházás fajlagos költsége	**4 432**	**€/kW$_e$**

4-3. ábra: Beruházási költségek

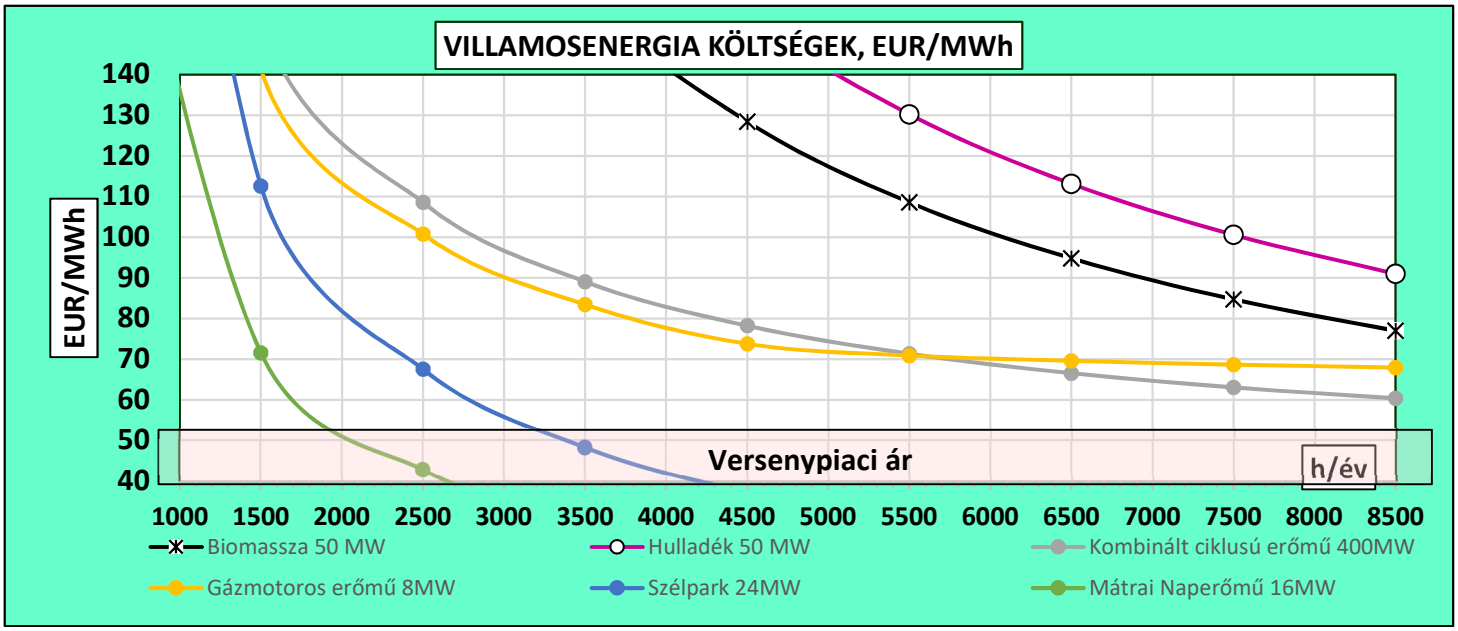
ÜZEMVITELI KÖLTSÉGEK			Dim.
0.	**Premisszák**	-	-
	0.1. EUR árfolyam	330	HUF/EUR
	0.2. Tüzelőanyag ár	5	€/MWhth
		458	Ft/GJ
	0.3. (Fajlagos hőár / fajlagos gázár) szorzó	0	-
	Fajlagos hőár	0	€/MWhth
		504	Ft/GJ
	0.4. CO2 ára	0	€/tonna
	0.5. Üzemeltetés-karbantartás [O&M] költs.	7%	%
	0.6. Földbérleti díj	50	€/ha
	0.7. Diszkontráta (kamatláb) = BUBOR+kockázat+ktsg.	5%	%
	0.8. Kalkulációs élettartam	50	év
	0.9. Annuitási tényező	0,05478	-
1.	**Tüzelőanyag költségek**	**2 202**	mill. Ft/év
2.	**CO2 vásárlási költségek**	**-**	mill. Ft/év
3.	**Üzemeltetés és karbantartás költsége**	**5 119**	mill. Ft/év
4.	**Tőkeköltségek**	**4 006**	mill. Ft/év
5.	**Földbérleti díj**	**0,017**	mill. Ft/év
	ÖSSZES ÉVES KÖLTSÉG	**11 327**	mill. Ft/év

4-4. ábra: Üzemviteli költségek

V. BEVÉTEL ÉS MARADVÁNYKÖLTSÉG			Dim.
1.	Éves bevétel hőértékesítésből	272	mill. Ft/év
2.	Maradványköltség villamos energiára	11055	mill. Ft/év
	FAJL. VILLAMOSENERGIA KÖLTSÉG	**95,5**	**€/MWhe**
	Egyszerű megtérülési idő:	**18,3**	**év**
	Kalkulációs élettartam %-ában:	37%	%

4-5. ábra: Bevétel és maradvány költség, egyszerű megtérülési idő

Az így kapott fajlagos költség értékét már össze lehet hasonlítani más technológiák fajlagos költségeivel. Ezt szemlélteti a 4-6. ábra, amin jól láthatóan a fajlagos költségek egy ilyen hulladék tüzelésű buborékos fluidizációs technológiát alkalmazó erőmű esetében a legmagasabbak. Ez a meglehetősen drága technológia eredménye.



4-6. ábra: villamosenergia költségek összehasonlítása.

Szeretném megjegyezni, hogy bár gazdasági szempontból egy ilyen erőmű létesítése nem tűnik előnyösnek, viszont a hulladékkezelésnek egy hatékony megoldása ez a módszer és állami támogatást is élvez a társadalom számára nyújtott pozitív hatásai miatt.

5. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A irodalomkutatás után elmondhatom, hogy a hulladékgazdálkodás szinte kivétel nélkül a világ minden részén fejlesztésre szorul. A hulladéklerakás aránya túl nagy, ezt csökkentenünk kell. Az energetikai hasznosítás útjában továbbra is a hulladékégetőkkel kapcsolatos negatív társadalmi megítélés áll, emiatt szükségesnek tartom az emberek magasabb szintű tájékoztatását a hulladékgazdálkodás terén. Itt jegyezném meg azt is, hogy bár a hulladék energetikai hasznosítása nem teljesen kiépített, a felhasználható hulladék mennyisége véges, a hulladékégető művek számára a beszerzése egyes esetekben problémákba ütközhet. Az égetőművek egységteljesítményét csak addig lehet növelni, amíg annak eléréséhez az észszerűség határain belül rendelkezésre áll a megfelelő mennyiségű hulladék.

A hulladék fluidágyas technológiával történő energetikai hasznosítása még relatív új technológia, széles körben nem elterjedt, viszont több ország rámutatott, hogy kiválóan alkalmazható megfelelően előválogatott inert anyagoktól mentes hulladékok esetén.

A labormérések során problémát jelentett az SRF hulladék inhomogenitása és a gömbgeometriától eltérő szemcse geometriája. Ennek ellenére sikerült megállapítani egy összefüggést a fluidágy SRF tüzelőanyag tartalma és a minimális fluidizációs gáz sebesség nagysága között. Ezek az eredmények jelentősek lehetnek üzemeltetési szempontból, és tovább növeli a fontosságukat az a tény, hogy hasonló mérésekről, illetve hulladékhoz tartozó minimális fluidizációs sebesség meghatározásáról még nem született publikáció.

Bár a gazdasági megtérülés számítás azt mutatja, hogy egy hulladék tüzelésű buborékos fluid kazános energiatermelő egység nem versenyképes a piacon található hagyományos erőművekkel, viszont ez nem fontos szempont, mivel hulladékkezelési eljárásként kiválóan alkalmazható és társadalmi előnyökkel jár, ami miatt állami támogatást is élvez.

A jövőre nézve szeretnék tovább foglalkozni a témával és segíteni témavezetőm munkáját, esetleg újabb dolgozatot készíteni belőle.

6. SUMMARY

Keywords: Fluidized bed combustor, *waste to energy, SRF, minimum fluidization velocity*

An increase in the amount of waste from human activity is the by-product of growth in population and wealth. Not only can untreated landfill waste have a negative impact on our environment, it occupies valuable areas from agriculture and nature, and landfill waste also represents a lost value. As a result, it is getting increasingly important to manage the waste we produce, which is of no value to us, and to implement a waste management system that minimizes the environmental impact.

It is clear that we need to reduce the amount of waste deposited. The waste pyramid established by the European Parliament and the Council creates a hierarchy between the various waste management procedures. On this basis, waste prevention is a top priority. The residual waste after reuse and recycling can be utilized in other ways, for example energetically. This basically means the usage of the energy that is recovered by waste combustion. The advantage of this method is that it significantly reduces the volume of waste and can be safely applied with low emissions under appropriate conditions.

In this paper I introduce the basic concepts of waste management, EU guidelines and the situation in Hungary. Among the possible solutions of waste management, I emphasize energy recovery. In addition to traditional grate firing, I investigate the feasibility of a relatively new and expensive fluidized bed technology.

In my laboratory measurements, I investigated the fluidization properties of SRF (Solid Recovered Fuel) - a standardized (MSZ/EN 15359 2012) fuel produced from waste -, on a cold fluidized bed device. Measurements with different bed-fuel ratios were used to determine the minimum fluidization gas velocity required for the mixture to enter the fluidization state. All of this was done to determine the operating ranges where full fluidity of the bed and fuel is ensured in the case of bubble fluidization. As we have seen from our measurements, the behaviour of the fluidized bed is greatly influenced by the SRF fuel load of the bed. Accurate knowledge of this correlation can be significant from a practical and operational point of view. I would like to note here that no scientific publication has yet been published on the effect of SRF fuel on minimum fluidization gas velocity.

Finally, I conducted an economic analysis using the annuity calculation method for the economic life of a purely waste-fueled fluidized bed unit. The resulting specific costs are comparable to those of other existing power plants, thus providing a better view of the feasibility of such a power plant, and of the amount of aid that may be required to raise the capital needed to build such a power plant.

7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. *Országos Hulladékgazdálkodási Terv* 2014-2020.
2. NHKV NEMZETI HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI KOORDINÁLÓ ÉS VAGYONKEZELŐ ZRT. (2017): *Országos Hulladékgazdálkodási Közszolgáltatási Terv*
3. AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS AZ EURÓPAI UNIÓ TANÁCSA (2008): *Az Európai Parlament és A Tanács 2008/98/EK Irányelve a hulladékokról és egyes irányelvek hatályon kívül helyezéséről.*
4. ZARÁNDY TAMÁS, PINTÁCSI DÁNIEL, SIMON TAMÁS ÉS ZEMPLÉNYI ZALÁN (2014): *Energetikai Monitor*. Századvég Gazdaságkutató Zrt., Strategopolis Kft, Századvég Alapítvány.
5. Humusz Szövetség honlapja
6. AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS AZ EURÓPAI UNIÓ TANÁCSA (2018*): Az Európai Parlament és A Tanács 2018/851 Irányelve a hulladékról szóló 2008/98/EK irányelv módosításáról.*
7. AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS AZ EURÓPAI UNIÓ TANÁCSA (2018): *Az Európai Parlament és Tanács (EU) 2018/852 Irányelve a csomagolásról és a csomagolási hulladékról szóló 94/62/EK irányelv módosításáról.*
8. BODNÁR ISTVÁN (2016): *Hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata energiahatékonyság, költség-haszon és életciklus-elemzési módszerekkel.* PhD értekezés
9. GERSE KÁROLY (2014): *Kazánok.* BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest
10. SWEN ANDERSON et al :Sulfur recirculation for increased electricity production in Waste-to-Energy plants
11. DR. HORNYÁK MARGIT, OLESSÁK DÉNES (2009) : *A települési szilárd hulladék hasznosításának innovatív technológiái*. Kutatási jelentés, Gazdaságtudományi Vezetéselméleti és Érdekképviseleti Egyesület
12. GERSE KÁROLY (2017): *Megújulóenergia-technológiák.* BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéke, Budapest
13. MOLNÁR ÁDÁM (2014): *Fluidágyas kazán méretezése.* Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék, Miskolc
14. QUNXING HUANG, YONG CHI AND NICKOLAS J. THEMELIS (2013): *A Rapidly Emerging WTE Technology: Circulating Fluid Bed Combustion.* Proceedings of International Thermal Treatment Technologies, San Antonio
15. DR. PENNINGER ANTAL (2009): *Tüzeléstechnika.* BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest
16. Fővárosi Közterület-fenntartó Zrt. honlapja: https://www.fkf.hu/hulladek-hasznosito-mukodese .

17. Developments In Fluidized Bed Conversion During 2011-2016: A summary from the member countries of the IEA-FBC technology collaboration progarmme. Provided by IEA-FBC TCP (2017)
18. SZÜCS BOTOND: Minimális Fluidizációs Gázsebesség Mérése. Mérési segédlet, BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest
19. SZÜCS BOTOND (2015): Hideg fluidizációs berendezés fejlesztése tüzelőanyag eloszlási vizsgálatokra. TDK dolgozat, BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest