

Pécsi Tudományegyetem
Műszaki és Informatikai Kar
Mérnöki és Smart Technológiák Intézet
Környezetmérnöki BSc képzés

**Hulladékból származtatott tüzelőanyag
cementgyári felhasználásának
optimalizációs vizsgálata**

Nagy Zoltán

2025

Pécs

1 Tartalom

1	Tartalom.....	1
2	Ábrajegyzék.....	3
3	Bevezetés	4
4	A hulladékgazdálkodás jogi háttere és gazdasági tényezői	6
4.1	A hulladékgazdálkodás és az ipar helyzete Európában	6
4.2	A hulladékgazdálkodás jogi változásai Magyarországon.....	8
4.3	Az RDF használatának gazdasági háttere a cementiparban.....	10
4.4	Cementgyártás rövid technológiája	11
4.5	A cementgyárak környezetvédelmi törekvései és céljai	13
4.6	RDF előállítása	15
4.7	Alternatív tüzelőanyagok a cementgyártásban és felhasználásuk	16
4.8	RDF hasznosítás problémái:	18
4.9	RDF Környezeti és gazdasági vonatkoztatásai	19
5	Módszertan.....	21
5.1	Kökényi telephely bemutatása	21
5.1.1	Szelektív válogatómű.....	21
5.1.2	Komposztáló telep	21
5.1.3	Hulladéklerakó.....	22
5.1.4	Mechanikai és Biológiai kezelő.....	22
5.2	Felhasznált szabványok	24
5.3	Szemcseméret-eloszlás meghatározása.....	24
5.4	Nedvességtartalom.....	26
5.5	Mintaelőkészítés analitikai vizsgálatokra	27
5.6	Hamutartalom	28
5.7	Égéshő.....	30

5.8	Nehézfém- és klórtartalom.....	33
5.9	CHNS.....	34
6	Eredmények	36
6.1	Szemcseméret eloszlás.....	36
6.2	Nedvességtartalom.....	37
6.3	Hamutartalom:	38
6.4	Égéshő és fűtőérték.....	39
6.5	Nehézfém és klór tartalom.....	41
6.6	CHNS.....	43
6.7	A 30 mm alatti és 30 mm feletti frakciók különbségei.....	45
7	Következtetések.....	50
7.1	Tüzelőanyag felhasználásának lehetőségei a cementgyártásban	50
7.2	Gazdasági és környezeti hatások	50
8	Kutatás összefoglalása	51
8.1	Javaslatok cementgyárak számára	51
8.2	Optimalizációs lehetőségek az adagolásban	51
8.3	További kutatási irányok megjelölése	52
9	Köszönetnyilvánítás.....	54
11	Irodalomjegyzék	55

2 Ábrajegyzék

1. ábra: hulladékpiramis	6
2. ábra: EU jogi-környezetvédelmi szimbólum	9
3. ábra: RDF szállítása forrás: saját kép.....	10
4. ábra: Cementgyár felülnézeti kép	12
5. ábra: ECOPlanet környezetbarát cement	14
6. ábra: Cementgyár alternatív tüzelőanyag tároló	17
7. ábra: Cementgyár klinkerégető kemence	20
8. ábra: Kökényi hulladékkezelő központ felül nézetből.....	23
9. ábra: Nyers RDF minta	25
10. ábra: Szemcseméret eloszlás vizsgálata	25
11. ábra: RDF minta nedvességtartalmának vizsgálata	26
12. ábra: Mintaelőkészítés darálással.....	28
13. ábra: Mintaelőkészítés hamutartalom méréséhez	28
14. ábra: Bombakaloriméter.....	32
15. ábra: ICP készülék	33
16. ábra: Elemanalizátor	34
17. ábra: Szemcseméret eloszlás	36
18. ábra: Nedvességtartalom.....	37
19. ábra: Hamutartalom.....	38
20. ábra: Égéshő	39
21. ábra: Száraz fűtőérték.....	40
22. ábra: Klórtartalom	41
23. ábra: Higanytartalom.....	42
24. ábra: Nitrogén tartalom	43
25. ábra: Széntartalom.....	43
26. ábra: Hidrogén tartalom	44
27. ábra: Kén tartalom.....	44
28. ábra: Szemcseméret eloszlás összehasonlítása	46
29. ábra: Nedvesség és hamu tartalom összehasonlítása	47
30. ábra: Égéshő és fűtőérték összehasonlítása.....	48
31. ábra: Klór tartalom összehasonlítása.....	48

3 Bevezetés

Napjainkban a cementgyártás az egyik legnagyobb energiaigényű iparág, amely nagy mennyiségű fosszilis tüzelőanyagot használt fel. A fosszilis tüzelőanyagok korlátozott rendelkezésre állása és az ezekkel járó folyamatos ár ingadozások miatt, egyre nagyobb a hangsúly a fenntartható tüzelőanyagok használatán. A fokozódó szén-dioxid (CO_2) kibocsátás és a környezeti szennyezés növekedése miatt egyre nagyobb hangsúlyt kaptak az alternatív tüzelőanyagok, amelyek csökkentik a gyártás költségeit és redukálják annak környezeti terhelését. Az egyik ilyen alternatíva a hulladékból származtatott tüzelőanyag (Refuse Derived Fuel, RDF), amely főként kommunális hulladékok termikusan hasznosítható részeinek különválasztásával állítható elő. Az RDF alkalmazása nemcsak a lerakásra kerülő hulladékok mennyiségét csökkenti, hanem lehetőséget kínál arra is, hogy a cementgyártásban felhasznált energia nagy része „megújuló” forrásból származzon. Alkalmazása pozitívan hat a hulladékgazdálkodásra és az energiaellátás problémájára is, ami kiemelkedően fontos a fenntartható fejlődéshez.

Az RDF minősége lényegesen változhat a szemcseméret és az előállítási technológiára feladagolt kiindulási anyag függvényében. A minőséget meghatározó tulajdonságok a nedvességtartalom, a hamutartalom, a fűtőérték, valamint a nehézfém- és a klórtartalom. Ezen a paraméterek kulcsfontosságúak a cementgyártásban történő felhasználás során, mivel jelentősen befolyásolják a kívánt energiához szükséges tüzelőanyag mennyiséget, az emissziós kibocsátásokat és a végtermék minőségét is. Kutatásom célja az RDF minőségi paramétereinek vizsgálata és hasznosítási lehetőségeinek felülvizsgálata a cementgyártásban. A vizsgálatokat különböző szemcseméret-frakciók tekintetében végeztem, amelyek megmutatták, hogy a kémiai és fizikai paraméterek jelentősen és konzisztensen eltérnek. A mintákat öt különböző frakcióra osztottam: 10 mm alatti, 10-20 mm, 20-30 mm, 30-40 mm és 40 mm feletti tartományokra. Az így kapott mintákat külön vizsgáltam meg, hogy részletesen és precízen megfigyeltem a tömeg-eloszlást, nedvességtartalmat, hamutartalmat, fűtőértéket, valamint a nehézfém- és klórtartalmat.

Jelenleg az RDF cementgyártás során történő felhasználásának egyik legnagyobb problémája az, hogy nagyon nehezen szabályozható. Ennek az az oka, hogy hulladékból készül, amelynek a paraméterei folyamatosan változnak, így egy konzisztens paraméterekkel rendelkező tüzelőanyag előállítása nem biztosítható az RDF szabvány

alapján. A jobb hasznosíthatóság érdekében prioritást élvez a tüzelőanyagellátás könnyebb és pontosabb szabályozhatósága, valamint a gyártási folyamat hatékonyságának növelése. Kutatásommal erre a problémára kívánok egy megvalósítható megoldási javaslatot tenni, amely pozitívan hat mind a hulladékgazdálkodóra, mint előállítókra, valamint a cementgyárakra, mint hasznosítókra is. A megállapított eredmények alapján javaslatot teszünk az RDF két fő frakcióra bontott felhasználására, mint az üzemeltetés során használható korrekciós anyagok. Céлом, hogy a kutatás eredményei alapján olyan gyakorlati terveket dolgozzak ki, melyekkel a cementgyárak jelentős gazdasági és környezeti előnyökre tehetnek szert az RDF tüzelőanyag felhasználásával. A cementgyártás jelenleg az egyik legenergiaigényesebb iparág a világon, amely a globális CO₂ kibocsátás csaknem 8 %-ért felel. [14.]

4 A hulladékgazdálkodás jogi háttere és gazdasági tényezői

4.1 A hulladékgazdálkodás és az ipar helyzete Európában

Az Európában működő hulladékgazdálkodási rendszer alapjait jelenleg az Európai Parlament és Tanács 2008/98/EK irányelve határozza meg. Az irányelv összefoglalja a tanács javaslatait a hulladékok visszanyerésére és a hulladékokkal kapcsolatos egészségügyi helyzet javítására. Legfontosabb eleme a hulladék hierarchia, amelyet a következő ábra szemléltet.



1. ábra: hulladékpiramis

forrás: <https://korkorosgazdasag.hu/tudtad-e/mi-tortenhet-haztartasi-es-ipari-hulladekkal/>

Az elsődleges törekvés a hulladékok keletkezésének megelőzése. Ide tartoznak azok a tevékenységek, amelyek révén a hulladék keletkezése elkerülhető és a termék élettartama meghosszabbodik. Megcélozza a termelési folyamatok hatékonyságának növelését és a fogyasztói magatartás visszaszorítását. Az elmúlt években számos gazdasági ösztönzés történt ennek a megvalósítására, például a kiterjesztett gyártói felelősség alkalmazása, vagy az étkeztetésből származó műanyag csomagolóanyagok folyamatos csökkentése.

Az újrahasználat során az adott terméket többször használjuk arra, amire készítették, így elkerülve azt, hogy hulladék keletkezzen belőle. A bevásárló

központokból az egyszer használatos nejlon szatyrok kivezetése és helyette a többször használatos szövetsatyrok bevezetése kitűnően segítette a termékek újrahasználatát.

Újrafeldolgozás során a termékből hulladék lesz, majd újra termék. A szelektív hulladékok elkülönített gyűjtése, illetve az italcsomagolások betétdíja nagy mértékben ösztönözték az embereket arra, hogy a megadott termékeket megfelelően gyűjtsék, lehetővé téve ezzel a hatékony újrahasznosítást.

Számos olyan keletkezett hulladék van, amelyet már nem lehet újrahasznosítani agyagában. Ilyenkor, ha lehetséges a hulladékot energetikailag hasznosítják. Jellemzően RDF készül belőle, amelyet erőművekben, illetve cementgyárakban hasznosítanak. Ide tartoznak az energiahasznosítással kapcsolt hulladékégetők is, melyek kezeletlen hulladékokból is képesek energiát előállítani.

Amennyiben a fentiek közül egyik sem megvalósítható, gondoskodni kell a hulladék ártalmatlanításáról, amelyet jellemzően hulladéklerakókon végeznek.

2010-ben az Európai Parlament és Tanács kiadta a 2010/75/EU irányelvet, más néven az Ipari Kibocsátási Irányelvet (Industrial Emissions Directive - IED), amelynek célja, hogy az ipari tevékenységek környezeti hatásait minimalizálja az Európai Unióban. Ez a szabályozás számos cementgyárra vonatkozó fontos előírást tartalmaz, mivel a cementgyártás során nagy mennyiségű szennyező anyag kerülhetne a környezetbe. Az irányelv meghatározza a főbb légszennyező anyagokra vonatkozó kibocsátási határértékeket, mint például a kén-dioxid, a nitrogén-oxidok és a szállópor. [5.]

A legjobb elérhető technikákat (BAT) kell alkalmazni, hogy minimalizálják a kibocsátásokat és fenntarthatóbbá tegyék működésüket. A BAT referencia dokumentumai tartalmazzák a legkorszerűbb technológiai megoldásokat és üzemeltetési gyakorlatokat, amelyek elősegítik a környezetre gyakorolt hatások csökkentését és gazdaságilag is fenntarthatóak.

Az irányelv előírja a cementgyárak számára, hogy részletes kibocsátási és környezetvédelmi terveket (IPPC) kell benyújtaniuk az engedélyezési eljárások során. Ezeknek a terveknek tartalmazniuk kell megoldásokat a kibocsátások monitorozására és megfelelő kezelésére. Az engedélyezési folyamat során az illetékes hatóságoknak értékelni kell, hogy az üzemek megfelelnek-e az irányelv előírásainak és alkalmazzák-e a BAT-okat. Hatékony hulladékkezelési rendszereket kell alkalmazni, amelyek minimalizálják a hulladék keletkezést és elősegítik a hulladékok újrahasznosítását vagy

megfelelő ártalmatlanítását. Az irányelv nagy hangsúlyt fektet az energiahatékonyság növelésére is, ezért a cementgyáraknak indokolt tenni az energiafelhasználás optimalizálása érdekében, mely megvalósítására kiváló lehet a megújuló energiaforrások alkalmazása. [4.]

4.2 A hulladékgazdálkodás jogi változásai Magyarországon

Az elmúlt években Magyarországon a hulladékgazdálkodás jogi háttere jelentősen megváltozott. Az 1990-es években az ország vezetősége igyekezett megteremteni az Európai Unióhoz való csatlakozás feltételeit, amely a környezetvédelmet és azon belül a hulladékgazdálkodást is érintette. 1995-ben a LIII. törvény életbeléptetésével megalapozták az országban a modern hulladékgazdálkodást. Fő célja a hulladékok keletkezésének megelőzése, a keletkező hulladékok mennyiségének és veszélyességének jelentős csökkentése, valamint a hulladékok újrahasznosításának és ártalmatlanításának elősegítése volt. [1.]

A 2000 évi XLIII. törvény harmonizálta a magyar jogszabályokat a EU hulladékkezelési direktíváival. Az egyik legfontosabb módosítás a hulladékhierarchia bevezetése volt. 2008-ban a Hulladék Keretirányelv (2008/98/EK) életbelépésével jelentős változás történt. A hulladékhierarchia részletes magyarázata és előírásai mellett megjelent a hulladékból származtatott tüzelőanyag (RDF) alkalmazásának lehetősége is, mint alternatív energetikai hasznosítás. [2.] [4.]

2010-től már a szabályok finomításáról és bővítéséről beszélhetünk. A 2012. évi CLXXXV. törvény tovább harmonizálta a hazai jogszabályokat az EU által meghatározott irányelvekkel, valamint megjelentek az RDF gyártására és felhasználására vonatkozó eljárások. A 2014/95/EU biztonsági határozatának mellékletében, részletesen meghatározta az RDF minőségi és besorolási követelményeit, ezzel elősegítve a szabályos és biztonságos alkalmazást. Ezen jogszabályok hatására az EU céloknak megfelelően Magyarországon is növekedett a hulladékból származtatott tüzelőanyagok hasznosítása. Számos erőmű és cementgyár jelentős beruházásokat hajtott végre annak érdekében, hogy alkalmassá váljon az RDF fogadására és hasznosítására. [6.] [7.]

2020 óta egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a jogszabályt alkotók és a gazdasági szereplők is a fenntartható fejlődésre és a körkörös gazdaság elősegítésére. A 2020. évi XLIV. törvény a klímavédelemről kiemelten kezeli a körkörös gazdaság megóvását, amelynek fontos része a hulladékok energetikai hasznosítása is. Az RDF iránti kereslet és szerepe a megújuló energiaforrások között tovább nőtt. A 2021/1885/EU biztonsági határozat tovább finomította a szabályzásokat és nagyobb hangsúlyt fektetett az egészségügyi és környezetvédelmi kockázatok minimalizálására. 2023-ban, az EU kibővítette a hulladékok újrahasznosítására és energetikai hasznosítására vonatkozó előírásokat, különös tekintettel az RDF minőségi követelményeire és a környezeti hatások minimalizálásra. Ezzel a felhasználóknak módosításokat kellett végrehajtani a monitoring rendszereken, mert részletesebb és szigorúbb nyomon követésre volt szükség. A 2024-ben tovább szigorították a hulladékgazdálkodási előírásokat, nagy figyelmet fordítva az RDF-re, mint energiahordozóra. [8.]

A magyar kormány és az EU együttesen számos jogszabályt, törvényt és irányelvet fektettek le a hulladékgazdálkodás javítása érdekében. Próbálják a megfelelő jogi háttér megteremtését és gazdasági ösztönzők alkalmazását a hulladékból származtatott tüzelőanyagok népszerűsítése és használata érdekében.



2. ábra: EU jogi-környezetvédelmi szimbólum

forrás: <https://www.greendealnet.eu/What-about-the-European-Climate-Law>

4.3 Az RDF használatának gazdasági háttere a cementiparban

2003-ban az Európai Parlament és Tanács kiadta a 2003/87/EK keretirányelvet, amely az üvegházhatású gázok kibocsájtási egységeit és gazdasági tényezőit tárgyalja. Ennek kapcsán létrehozták a szén-dioxid kvóta rendszert (European Union Emissions Trading System, EU ETS), ami lehetővé teszi az üvegházhatású gázok egységeinek kereskedelmét. Az EU évente meghatározza a kibocsátási egységet (EUA-k) maximálisan, amit az ipari és energetikai szektorra osztanak ki. Ez a kibocsátási egység évről évre csökken, hogy így ösztönözzék a létesítményeket a fejlesztésre és a problémáik megoldására. A rendszerben résztvevők számára kiosztott kibocsátási egységekkel szabadon kereskedhetnek tulajdonosaik, így a cégek eladhatják felesleges egységeiket, vagy vásárolhatnak továbbiakat, ha kibocsátásuk meghaladja a rendelkezésre álló mennyiséget. Az irányelv az energiaigényes iparágakra, például az acélgyártásra, cementgyártásra és vegyiparra, valamint az energiaágazatra vonatkozik. A cementgyáraknak, folyamatosan monitorozniuk kell a levegő emissziót és az adatokat rendszeresen jelenteniük kell a hatóságoknak. Az irányelv számos alkalommal módosult a hatékonyság növelése miatt, valamint a változó gazdasági körülményekhez való alkalmazkodás érdekében. [3.]



3. ábra: RDF szállítása
forrás: saját kép

A harmadik kereskedési időszak (2013-2020) reformjai között szerepelt a kiosztási módszerek átalakítása, amely magában foglalja az aukciót és az ingyenes kiosztást, valamint a szektorális kiterjesztését. Az aukciós rendszer célja, hogy piaci alapú megoldást kínáljon a kibocsátási jogok elosztására, és bevételt generáljon, amelyet biztosítottan klímavédelmi célokra lehet felhasználni. Az árverési bevételek egy része visszakerülhet a gazdasági szereplőkhöz, amit kibocsátási rendszerük fejlesztésére fordíthatnak. Az ingyenes kvóta kiosztás egy olyan mechanizmus, amely során a szabályozó hatóságok díjmentesen osztanak ki krediteket bizonyos iparágaknak vagy vállalatoknak. Ennek az a célja, hogy megvédje a versenyképességet és elkerülje azt, hogy a vállalatok a szigorú környezetvédelmi szabályok miatt olyan országokba helyezték át a termelést, ahol sokkal kevésbé szabályozott a kibocsátás és az ellenőrzés. A negyedik kereskedési időszak (2021-2030) további szigorításokat hozott a kibocsátási korlátok csökkentésére, valamint új alapokat hozott létre az alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiák támogatása. Az irányelv piacialapú megközelítést alkalmaz, amely lehetővé teszi a vállalatok számára, hogy gazdaságosan és hatékonyan csökkentsék kibocsátásaikat. Az EU ETS folyamatos fejlesztése és revíziója biztosítja, a lehetőséget a klímavédelmi célkitűzések eléréséhez, ösztönzi az innovációt és a fenntartható gazdasági növekedést. [8.] [9.] [13.]

4.4 Cementgyártás rövid technológiája

A cementgyártás általánosságban két fő fázisra osztható: a klinkergyártására és a cement őrlésére. A folyamat kezdetén a bányában a kibányászott mészkövet és agyagot megfelelő arányban összekeverik, így készítve a premixet, amely a klinker előállításának fő alapanyaga. A premixhez számos adalékanyagot, például salakot és vas-szulfátot adnak, amit a receptnek megfelelő arányban összekevernek. Az így kapott keveréket szállítószalagon továbbítják egy malomba. A cementgyárak nagy teljesítményű görgős vagy vertikális malmokkal őrlik porrá a keveréket, amelynek eredményeként létrejön a nyersliszt. A nyerslisztet ezután csővezetéken, légárammal egy hőcserélő rendszeren vezetik át, amely ciklonokból áll. Ez a rendszer biztosítja a nyersliszt megfelelő előkészítését, és felmelegítését, mielőtt az a kemencébe jutna. A kemencében kb. 1500 °C hőmérsékletet tartanak fenn folyamatosan, amelyhez két helyen juttatnak be tüzelőanyagot: a kalcinátoron és a főégőn keresztül. Az égetést követően a forró

nyerslisztet hirtelen lehűtik, így az anyag kristályosodik és létrejön a klinker. A lehűlt klinkert ezután a receptnek megfelelő adalékanyagokkal összekeverik, majd együtt őrlik. Az őrlés eredményeként jön létre a végső termék, a cement. A cement minősége és tulajdonsága nagymértékben függ a felhasznált klinker mennyiségétől és minőségétől. A megfelelő recept mellett fontos a stabil és jól kivitelezett égetési folyamat is, amelyben nagy szerepe van az alkalmazott tüzelőanyagoknak. Jelenleg a Magyarországon található cementgyárak igyekeznek minél nagyobb arányban alternatív tüzelőanyagokat használni, melynek környezetvédelmi és gazdasági okai is vannak. A legnagyobb arányban felhasznált tüzelőanyag jelenleg az RDF.



4. ábra: Cementgyár felülnézeti kép

forrás: saját kép

4.5 A cementgyárak környezetvédelmi törekvései és céljai

A cementipar az egyik legjelentősebb ipari ágazat, amely alapvető szerepet játszik mind az infrastruktúra és az építőipar fejlődésében. A cementgyártás figyelmen kívül nem hagyható környezeti hatásokkal jár, különösen a szén-dioxid-kibocsátás és az energiafelhasználás tekintetében. Az elmúlt évtizedekben a (kiemelten az európai) cementgyárak egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a fenntarthatóságra és a körkörös gazdálkodás megvalósítására, összhangban az Európai Unió zöld megállapodásának céljaival, amelyek 2050-re teljes karbonsemlegességet kívánnak elérni.

A cementipar környezeti lábnyomának csökkentésében kulcsszerepet játszik az alternatív tüzelőanyagok használata. Az ipari és kommunális hulladékok, a biomassa, valamint a hulladékból származtatott tüzelőanyagok mind hozzájárulnak a fenntarthatóbb cementgyártáshoz. Ezek alkalmazásával csökken a fosszilis energiahordozók használata, amely jelentősen mérsékli a szén-dioxid kibocsátást. Mindemellett a hulladékhasznosítás révén csökkenthető a lerakók terhelése, elősegítve a körforgásos gazdaság kialakulását, miközben a cementgyártási folyamat magas hőmérséklete lehetővé teszi a hulladékok teljes és biztonságos elégetését minimális környezeti terheléssel.

A szén-dioxid-kibocsátás mérséklése az egyik legnagyobb kihívás a cementipar számára, mivel a gyártási folyamat során jelentős mennyiségű CO₂ keletkezik. Ez nagyon nehezen csökkenthető, hiszen a felhasznált mészkeő kötött formában tartalmaz CO₂-t, mely az égetés hatására felszabadul. Ennek csökkentésére az európai cementgyárak energiahatékonyságot növelő intézkedéseket alkalmaznak. Egyre modernebb technológiák segítségével mérséklük a klinkergyártáshoz szükséges energiafelhasználást, valamint csökkentik a klinker-cement arányt, alternatív alapanyagok, például pernye vagy kohósalak felhasználásával. A karbonmegkötési és tárolási technológiák fejlesztése mellett egyre nagyobb szerepet kap a megújuló energiaforrások, például szél, nap és vízenergia integrációja is a gyártási folyamatokba. [14.]

A Holcim Magyarország Kft. az egyik vezető szereplő az európai és hazai cementiparban, elkötelezetten törekszik a fenntartható fejlődésre. Környezetvédelmi stratégiája a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére, az alternatív tüzelőanyagok használatának növelésére és a fenntartható termékek fejlesztésére összpontosít. A vállalat célja, hogy 2030-ra tonnánként 475 kg alá csökkentse CO₂-kibocsátását, amelyet innovatív karbonmegkötési technológiák alkalmazásával akar elérni. Királyegyházi

gyárában az alternatív tüzelőanyagok részaránya évesen meghaladja a 90%-ot, ahol főként RDF-et, biomasszát és egyéb hulladékból származó anyagokat használnak a fosszilis energiahordozók kiváltására. Az ECOPlanet termékcsalád bevezetésével alacsony szén-dioxid-kibocsátású cementeket kínálnak a vásárlóknak. 2023-tól kiemelt szerepet kapott a kutatásaikban az építési és bontási hulladékok újrahasznosítására irányuló fejlesztések, melynek segítségével tovább csökkenthető az emisszió. Az energiahatékonyság növelését modern gyártóberendezések és alternatív energiaforrások alkalmazásával valósítják meg, 2040-re céljuk pedig a nettó karbonsemleges cementgyártás elérése.

Az európai cementgyárak környezetvédelmi törekvései és a Holcim Magyarország Kft. fenntarthatósági célkitűzései rámutatnak, hogy az iparág miként igyekszik alkalmazkodni a klímaváltozás kihívásaihoz. Az alternatív tüzelőanyagok széles körű alkalmazása és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése érdekében tett lépések, nemcsak a környezet védelmét szolgálják, hanem jelentős gazdasági előnyökkel is járnak. A Holcim célkitűzései összhangban állnak az európai uniós szabályozásokkal, és hozzájárulnak a cementipar fenntarthatóbb jövőjéhez. [11.] [17.]



5. ábra: ECOPlanet környezetbarát cement

forrás: <https://epiteszforum.hu/zold-uton-jar-a-lafarge--elkezdodott-az-első-hazai-zöld-cement-az-ecoplanet-forgalmazasa-1>

4.6 RDF előállítása

Az RDF (Refuse Derived Fuel), magyarul hulladékból származtatott tüzelőanyag, egy alternatív energiahordozó, tüzelőanyag, amely főként települési szilárd hulladékok feldolgozása során készül. Az első lépés a hulladékok begyűjtése, amely a feldolgozó telepre érkezése után számos leválasztási folyamaton megy keresztül. A telepen az anyag egy aprítón megy keresztül, amely kezelhetővé teszi a hulladékot a technológia számára. Eltávolítják azokat az anyagokat, amelyek nem égethetők vagy nem kívánatosak a későbbi feldolgozási szakaszokban, például a vasat és a nem mágnesezhető fémeket. Ezután egy osztályozási folyamaton megy keresztül a hulladék, ezt általában rostákkal végzik. Itt az anyag két anyagáramra oszlik. A leválasztási méret feletti anyagáram folytatja az útját az alternatív tüzelőanyag vonalon, a beállított méret alatti anyagáram pedig biológiai kezelésre kerül, majd ártalmatlanításra. Az RDF előállítás következő berendezése egy légosztályozó, amely eltávolítja a nehezebb összetevőket. Az egységes szemcseméret elérése érdekében a folyamat végén utóaprítást alkalmaznak, ami az égési folyamat optimalizálása és adagolhatósága szempontjából is fontos. Az így előállított RDF-et bálázva vagy ömlesztve juttatják el a felhasználási helyére, például cementgyárakba. [27.] [30.]

4.7 Alternatív tüzelőanyagok a cementgyártásban és felhasználásuk

Az alternatív tüzelőanyagok használata jelentősen megváltoztatta a cementgyártást. Számos előnnyel és sajnos néhány hátránnyal is jár ezeknek az anyagoknak a bevezetése. A Holcim Magyarország Kft. (Lafarge Cement Magyarország Kft. jogutódja) 2014-ben került bevezetésre ez a technológia. Alternatív tüzelőanyagok minősül az RDF, az SRF, számos gumitextília és növényi hulladékok. Ezen anyagok használata hozzájárul az iparág által kibocsátott szén-dioxid mennyiségi csökkenéséhez. A Holcim cégcsoport svájci vezetősége előírta az összes cementgyára számára, hogy 2040-ig el kell érniük a nettó karbonsemleges működést, melyben az alternatív tüzelőanyagok használatának kiemelt szerepe lesz.

A technológiai módosítás előtt főként két fő anyagot használtak a kemence felfűtésére: földgázt és petrolkokszot. Azonban ezeknek az anyagoknak a kizárólagos használata hosszú távon sem gazdaságilag, sem pedig környezetvédelmi szempontból vizsgálva nem kivitelezhető. A stabilan magas fűtőérték mellett mind a két anyag elégetése során nagy mennyiségű szén-dioxid, kén-dioxid és nitrogén-oxidok kerülhetnek a légkörbe. Mivel fosszilis tüzelőanyagokról van szó, így gazdasági szempontból sem hagyhatóak figyelmen kívül, hiszen folyamatos áremelkedés jellemzi, mely a termék árának drasztikus emelése nélkül nem kompenzálható.

Az alternatív megoldások közül napjainkban legtöbbet használt anyag az RDF mely jelenleg a legoptimálisabb megoldás, ha figyelembe vesszük a műszaki, környezetvédelmi és gazdasági szempontokat is. Fűtőértéke összetételéhez képest stabilnak mondható, de tekintve, hogy hulladékból származtatott anyagról beszélünk a technológiai igényeknek nem tesz eleget maradéktalanul. A jogi és gazdasági szabályzatok miatt az RDF nem minősül terméknek, így továbbra is hulladékról beszélünk, mely HAK kódos azonosítással kerül a felhasználási területére. Így jogilag hulladékhasznosítást végez a cementgyár, amelyért hulladékhasznosítási díj illeti meg, amelyet az RDF-et előállító hulladékgazdálkodási szervezet fizet meg. Ezzel a megoldással gazdaságilag mindkét fél jól jár, hiszen a cementgyár jóval olcsóbban juthat tüzelőanyaghoz, amely környezetvédelmi szempontból is kedvezőbb és a hulladékgazdálkodási szervezet is olcsóbban tud megszabadulni a hulladéktól és a hulladéklerakás mértékét is csökkenteni tudja vele. A Holcim királyegyházi cementgyárában, a 2023-ban energetikailag hasznosított hulladékok mennyisége 70987 tonna volt. [31.]

A 29/2014 (XI. 28.) FM rendelet értelmében a cementgyártásban kettő olyan pont létezik, ahol az alternatív tüzelőanyagok adagolása kedvező. A jogszabályban meghatározott, hogy csak abban az esetben üzemeltethető a technológia, ha a keletkező füstgáz a legkedvezőtlenebb esetben is minimum 2 másodpercig tartózkodik legalább 850 C°-on. A két beadási pont a főégő és a kalcinátor. Azonban, hogy a rendszer megfelelően működjön, célszerű meghatározott tulajdonságokkal rendelkező tüzelőanyagok használata. A főégő célja, hogy a kemencében folyamatosan biztosítani tudja a nagyságrendileg 1500C° hőmérsékletet. Ehhez azonban a főégőt ~1900C°-on kell üzemeltetni. Ennek eléréséhez itt csak magas fűtőértékű (minimum 20 MJ/Kg) anyagot használnak. A további minőségi javítás érdekében a főégő elé elhelyeztek egy FlashDryer rendszert, amely meleg légáram segítségével leválasztja a nehezebb anyagokat és szárítja a bentmaradókat, ezáltal tovább növelve a fűtőértékét. A kalcinátor táplálásához azonban elegendő alacsonyabb fűtőérték is. (minimum 15 MJ/Kg) A kalcinátorban történik meg a mészkő kalcinálódása, azaz a kalcium-karbonát átalakul kalcium-oxiddá és széndioxiddá. Az RDF kamionon érkezik a hasznosítási helyre, ahol egy tárolócsarnokba kerül, majd, amikor szükséges egy csőszalag a kalcinátor előtti beadagolási pontra szállítja. [7.] [10.] [12.] [28.] [30.]



6. ábra: Cementgyár alternatív tüzelőanyag tároló

forrás: Holcim Magyarország Kft.

4.8 RDF hasznosítás problémái:

Napjainkban az RDF használata alternatív tüzelőanyagként egy nagyon jó alternatíva a fosszilis tüzelőanyagok kiváltására, de még közel sem tökéletes. Mivel az anyagot hulladékból állítják elő, ezért a tulajdonságai kiszámíthatatlanul változnak a hulladékok minőségétől függően. Ez számos problémát felvet a hasznosíthatóság tekintetében.

Az egyik legfontosabb tényező a fűtőérték, amely folyamatosan változik akár azonos szállítmányon belül is. Ez nagyságrendileg 15-25 MJ/Kg között ingadozik. Az adagolhatóság szempontjából ez igen komoly problémát jelent a cementgyár vezérlő kezelőinek, hiszen tonnás léptékben állítható az adagolás, így akár már kis eltérés is komoly változást okozhat a kemence üzemben és a termékminőségben is.

A cementgyárak jogilag hulladék együttégetőműnek tekinthetők, így egységes környezethasználati engedéllyel (IPPC) kell rendelkezniük a működéshez. Az engedély pontosan meghatározza az alternatív tüzelőanyagok tekintetében, hogy mely HAK kódú anyagból mennyit hasznosíthat maximálisan a cementgyár napi és éves tekintetben is. Sok esetben a napi korlátozás problémát jelent, hiszen az engedélyben meghatározott napi maximális hulladék mennyiség fűtőértéke erősen ingadozhat, csökkenhet a várthoz képest. Ezért a tervezett termék gyártása megghiúsulhat, vagy fosszilis tüzelőanyag adagolásra is szükség van az eléréséhez. [12.] [29.]

4.9 RDF Környezeti és gazdasági vonatkoztatásai

Az RDF egyre nagyobb szerepet kap a fenntartható energiatermelésben és hulladékgazdálkodásban, kiemelkedően az ipari szektorban. Azzal, hogy azt a hulladékot, amely már csak energetikai hasznosításra, vagy ártalmatlanításra alkalmas, kezelik és RDF-et készítenek belőle fontos gazdasági és környezetvédelmi lépést tesz az adott létesítmény.

Gazdasági előnyei közül az egyik legfontosabb, hogy jelentősen csökkentheti a hulladékgazdálkodás költségeit. A hulladéklerakók fenntartása és üzemeltetése nagyon költséges a szigorú környezetvédelmi előírások miatt, amelyek a szennyezett anyagok biztonságos kezelését és ártalmatlanítását szabályozzák. Az RDF felhasználásával csökkenthető a hulladéklerakóba kerülő hulladékok mennyisége, ez által megtakarított összeg pedig kerülhet akár a hulladékgazdálkodás költségeinek csökkentésére. Az RDF előállítási költségeit tekintve, például az anyagok válogatása, előkészítése és feldolgozása, versenyképesek lehetnek a hagyományos energiaforrásokkal szemben, különösen akkor, ha figyelembe vesszük a hulladéklerakók hosszú távú költségeit is.

Az RDF alternatív tüzelőanyagként kínálja az energiatermelési költségek csökkentését is. Az ipari kazánok, erőművek, illetve cementgyárak számára az RDF mint helyettesítő tüzelőanyag olcsóbb alternatívát kínálhat a fosszilis tüzelőanyagokkal szemben, így segítve az energiaellátás költségeinek mérséklését. A hulladékgazdálkodási szektor fejlődése új üzleti modelleket és piaci lehetőségeket kínál, különös tekintettel a vállalatokra, amelyek elkötelezettek a környezetbarát technológiák, a fenntarthatóság és az innovációk mellett. Az RDF egy olyan lehetőség az energetikai iparágak számára, amellyel a fosszilis tüzelőanyagok felhasználását csökkenthetik, javíthatják a gazdasági és környezetvédelmi helyzetüket. [16.]



7. ábra: Cementgyár klinkerégető kemence

forrás: Holcim Magyarország Kft.

Az RDF alkalmazásának egyik legnagyobb előnye a hulladéklerakókba kerülő hulladék mennyiségének csökkentése. Felügyelt felhasználása segít elkerülni azt a problémát, hogy a hulladékok lebomlása terhelje a környezetét. Az RDF terjedésével csökkenthető a fosszilis tüzelőanyagok iránti kereslet, így az üvegházhatású gázok kibocsátása is csökkenhet. A tüzelőanyag égetése során a kibocsátott CO₂ mennyisége lényegesen kedvezőbb, mint a szén, vagy a kőolajszármazékok égetése. A hulladékok energetikai hasznosítása elősegíti a hatékony energiafelhasználást, hiszen olyan anyagokat használ, amelyek egyébként nem kerülhetnének újrahasznosításra. Az RDF előállítása segít az anyagok életciklusának meghosszabbításában. Továbbá, az RDF előállítása elősegíti a hulladékgazdálkodás magasabb szintű megvalósítását, hiszen az energetikai hasznosítás kedvezőbb megoldás a hulladékgazdálkodási hierarchiában, mint az ártalmatlanítás. Az alternatív tüzelőanyagok alkalmazásának környezetvédelmi előnyei azonban csak akkor valósulnak meg teljesen, ha a technológiák nem csak a költségek csökkentésére irányulnak, hanem az égési folyamatot is optimálisan szabályozzák, a megfelelő módszerekkel és technológiákkal.

5 Módszertan

Kutatásomat a Dél-Kom Nonprofit Kft Kökényi regionális hulladékkezelő központjában végeztem, ahol rendszeresen vettem mintát az aznap előállított RDF-ből. Közvetlenül a mintavételek után vizsgáltam az anyag szemcseméret eloszlását egy egyedileg kialakított síkrostás rázóasztal segítségével. A további méréseket szemcseméretük szerint végeztem, 10mm alatti, 10-20mm, 20-30mm, 30-40mm, 40mm feletti és nyers minta tekintetében. Megmértem a minták nedvesség-, hamu-, nehézfém-, klórtartalmát és égéshőt, valamint a fűtőértéket. Az így kapott eredményeket értékeltem és egyeztettem a további vizsgálatokról és lehetőségekről a konzulenseimmel, valamint a Holcim Magyarország Kft. illetékes kollégáival.

5.1 Kökényi telephely bemutatása

A Dél-Kom Nonprofit Kft. regionális hulladékkezelő központjában lehetőség van szelektív hulladékok gépi és kézi erővel történő válogatására, zöldhulladék komposztálására, a vegyesen gyűjtött települési szilárd hulladékok mechanikai és biológiai kezelésére, energetikailag hasznosítható tüzelőanyag készítésére és a nem hasznosítható anyagok ártalmatlanítására lerakással.

5.1.1 Szelektív válogatómű

A telephely ezen részén történik a lakossági és ipari gyűjtésből származó szelektív hulladékok gépi és kézi válogatása. A válogatócsarnok egy 4 060 m²-es területű zárt létesítmény, melyben két anyagszállító szalag és válogatókabin található, melyek párhuzamosan üzemeltethetők. A válogatómű éves kapacitása 30 000 tonna.

5.1.2 Komposztáló telep

A telephely ezen részén a szelektív gyűjtésből beáramló zöldhulladék, valamint konyhai hulladék kerül feldolgozásra. Az anyag tárolása és hasznosítása szilárd burkolattal ellátott nyílt téren történik. A zöld hulladékot mobil aprítógéppel aprítják, majd táblás eljárással komposztálják. A komposztálás során a prizmát háromnaponta forgatják forgatógéppel. A 30 napos érlelési idő után az anyagot egy dobostán átszitálják, így az apró frakciókból képződik a komposzt, amely a kiindulási anyag 45-50%-át teszi ki. Az így keletkezett végtermék értékesítésre kerül. Az előírásoknak nem megfelelő

minőségű komposztot, valamint a komposztálásra alkalmatlan anyagot a hulladéklerakón ártalmatlanítják, vagy fedőréteggént hasznosítják.

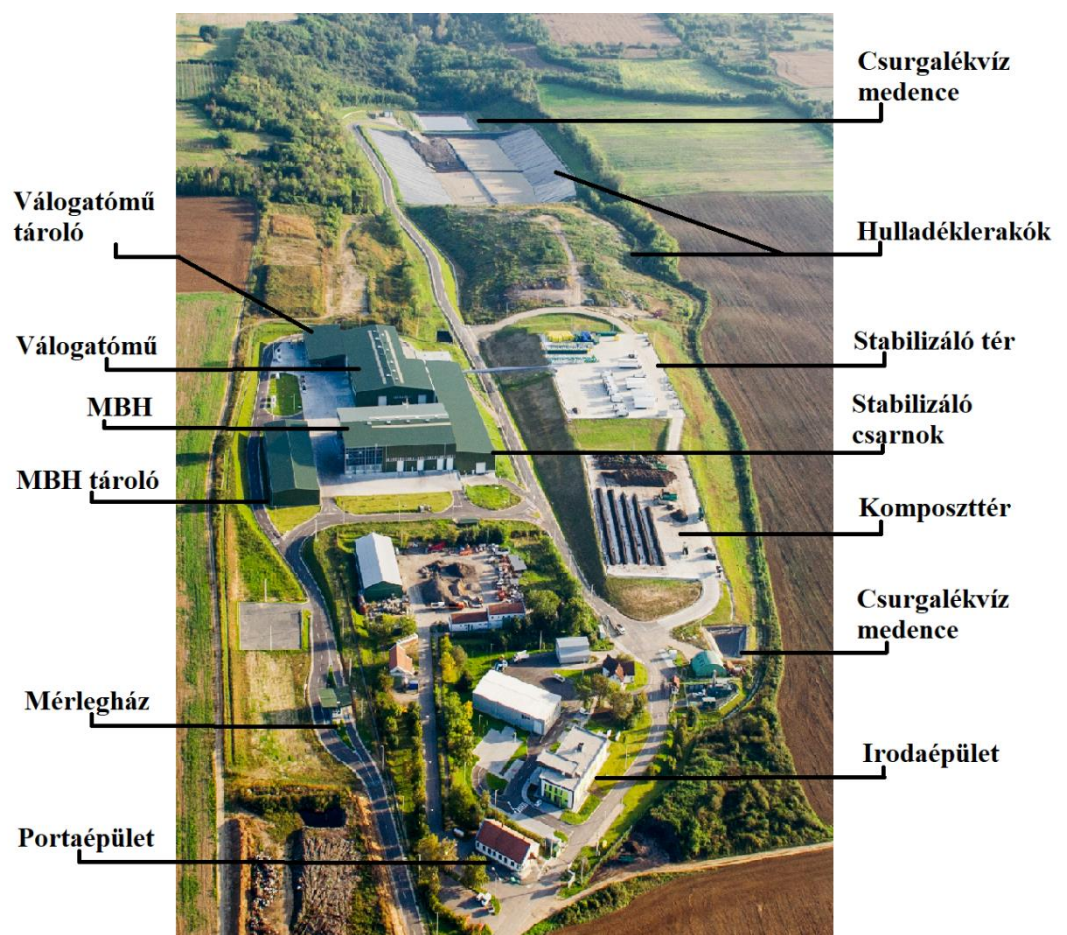
5.1.3 Hulladéklerakó

A hulladékkezelés során keletkező, nem hasznosítható maradékokat a telephelyen kialakított II/B típusú, nem veszélyes hulladéklerakóban ártalmatlanítják. Az üzemrészekben keletkező maradék hulladékot biológiai stabilizálás után a négy részre osztott völgyfeltöltéses lerakóba szállítják. A medence feltöltése után gátat alakítanak ki, így itt további hulladék helyezhető el, ezzel összesen 1 169 000 m³-re növelve a lerakó kapacitását. A lerakón belüli közlekedés az inert, illetve építési-bontási hulladékból kialakított utakon történik, melyet a lerakó feltöltésével folyamatosan alakítanak. A csurgalékvíz-elvezető rendszer a keletkező szennyvizet gyűjtőmedencékbe irányítja, majd a telephelyen található szennyvíztisztító rendszerbe vezeti, ahol mechanikai, biológiai és kémiai tisztítást végeznek rajta. Ezt követően a megtisztított szennyvizet a városi szennyvízkezelő telepre szállítják. A lerakóhoz kapcsolódóan depóniagáz gyűjtő- és kezelőrendszer, valamint a talajvíz-monitoring rendszer is kiépítésre került, ezzel biztosítva minden biztonsági és környezetvédelmi követelmény biztosítását.

5.1.4 Mechanikai és Biológiai kezelő

A lakosságtól származó szilárd települési hulladékot a telephelyre érkezéskor lemérik és a mért tömeget rögzítik, majd a szállítójármű a mechanikai kezelőcsarnok erre a célra kialakított, szilárd burkolattal ellátott részére üríti. Az anyagot rakodógépek adagolják az előaprító szalagjára, majd előválogatják és leválasztják az esetlegesen előforduló veszélyes vagy aprításra nem alkalmas anyagokat. Az előaprító berendezés 350 mm-nél kisebbre aprítja a hulladékot, majd egy mágneses fémleválasztó berendezéssel leválasztják a mágnesezhető fémek jelentős részét, amelyek gyakran más hulladékkal, csomagolóanyaggal szennyezettek. Ezek után egy forgó dobrosta leválasztja a 80 mm-nél kisebb méretű anyagokat. Megkülönböztetjük az szita alsó és felső frakciót. Az alsó frakció biológiailag lebomló anyagrészben gazdag, melyet egy szállítószalag a telephely biológiai kezelőbe szállítja. A felső frakció a mechanikai kezelőben marad, ahol az anyagból egy örvényáramú szeparátor a nem mágnesezhető fémeket választja le. A fennmaradó anyag egy légszeparátorba kerül, amely leválasztja a nehéz frakciót, és egy szalag egy tároló konténerbe szállítja. A nagyobb fajsúlyú anyagok jellemzően inert jellegűek, ezért nem jól égethetők, így hulladéklerakóban kerülnek ártalmatlanításra. A

jól égethető, könnyű frakciót RDF/SRF előállítására használják fel, így ezt további két utóaprítóval 50-60 mm-nél kisebbre aprítják, majd egy újabb fémszeparátor leválasztja a fémeket. A végtermék egy magas fűtőértékű, energetikailag hasznosítható másodlagos tüzelőanyag (RDF). A technológiai sor végén az RDF ömlesztve kerül egy puffertárolóba. Szállításához való előkészítés egy bálázó egységben bálázzák, vagy előkamrás présben tömörítik az RDF-et, majd fedett, átmeneti bálátárolóban tárolják. Napjainkban a legelterjedtebb szállítási módszer a walkingfloor technológiával ellátott kamionos szállítás, mellyel költséghatékonyan lehet nagyobb mennyiséget szállítani. A technológiai sor folyamán az átadási pontok és a kritikus helyek portalanítókkal van ellátva, valamint a teljes technológia alatt csurgalékvíz elvezető rendszer található. [15.]



8. ábra: Kökényi hulladékkezelő központ felül nézetből

forrás: Dél-Kom Nonprofit Kft

5.2 Felhasznált szabványok

A műszaki területen megszokott, hogy a legtöbb eljárást, vizsgálatot, gyártást és felhasználást szabványokkal szabályoznak. Így van ez a hulladékgazdálkodásban is, kiemelten amikor alternatív tüzelőanyagok gyártásáról, vizsgálatáról vagy használatáról beszélünk. Magyarországon jellemzően az EU szabványok hazai származtatottjait használjuk. [15.] [18.] Kutatásom során a vizsgálatokhoz én is ezen szabványok alapján dolgoztam:

- **MSZ EN 15357:2011:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Terminológia, meghatározások és leírások [19.]
- **MSZ EN 15358:2011:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Minőségirányítási rendszerek és előállítás egyedi alkalmazási követelményei.
[20.]
- **MSZ EN 15359:2012:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Jellemzések és osztályok. [21.]
- **MSZ EN 15400:2011:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Fűtőérték meghatározása [22.]
- **MSZ EN 15403:2011:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Hamutartalom meghatározása [23.]
- **MSZ EN 15413:2012:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Nedvességtartalom meghatározása szárítószekrényes módszerrel [24.]
- **MSZ EN 15414-3:2011:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Részecskeméret-eloszlás meghatározása. [25]
- **MSZ EN 15415-3:2012:** Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok.
Laboratóriumi mintaelőkészítések módszerei. [26.]

5.3 Szemcseméret-eloszlás meghatározása

A frissen elkészült RDF-ből mintát vettem a telep mechanikai kezelő épületének RDF puffertárolójából. A mintát egy rázóasztalon juttattam keresztül, amely az oldalára szerelt két vibromotor segítségével 4 szemcseméretre választotta szét az anyagot. 20mm alatti, 20-30mm, 30-40mm és 40mm feletti frakcióra. A 20mm alatti frakciót kézirostával további két frakcióra, 10mm alatti és 10-20mm közöttire választottam szét. Ezt követően egyesével lemértem egy KERN PLS 1200-3A típusú analitikai mérleggel és az

eredményeket táblázatban rögzítettem. Az így kapott tömegek és azoknak százalékos értéke adja meg az RDF szemcseméret-eloszlást.



9. ábra: Nyers RDF minta

forrás: saját kép



10. ábra: Szemcseméret eloszlás vizsgálata

forrás: saját kép

5.4 Nedvességtartalom

A nedvességtartalom az egyik legfontosabb fizikai paramétere a tüzelőanyagoknak, így az RDF-nek is, hiszen hatással van a többi paraméterre is. Abban az esetben, ha a vizsgált mintának nagyobb a nedvességtartalma, várhatóan magasabb lesz a hamutartalma és alacsonyabb a fűtőértéke. Ha alacsonyabb a nedvességtartalma, akkor várhatóan alacsonyabb lesz a hamutartalma és magasabb a fűtőértéke. A mérés elvégzéséhez reprezentatív mintákat vettem mindegyik szemcseméretből és három párhuzamos sorozatot készítettem. A mintákat papírcsónakokba tettem, melyeket üresen és a mintával is lemértem analitikai mérlegen, kivontam őket egymásból, így megkaptam a minta tömegét és feljegyeztem. Az MSZ EN 15414-3:2011 szabvány alapján, a mérlegelés után a mintákat 105 °C-on 24 órán keresztül tömegállandóságig szárítottam egy POL-EKO-APARATURA SWL 400 STD típusú szárítószekrényben, majd visszamértem a mintákat, így megkaptuk a nedvességtartalmat.



11. ábra: RDF minta nedvességtartalmának vizsgálata

forrás: saját kép

5.5 Mintaelőkészítés analitikai vizsgálatokra

Az RDF mintákat egy Retsch SM200 típusú aprítógéppel, 1 cm-es lyukméretű rostabetéttel daráltam le. A vágórotort és a betétet a gép belsejébe helyeztem és rögzíttem, majd az ajtó lezárása után a „START” gomb megnyomásával elindítottam a darálót. A mintákat a felső adagolónyíláson keresztül adagoltam, melyek az alul elhelyezkedő gyűjtőedénybe hullottak. A művelet befejezése után a „STOP” gombbal leállítottam a gépet, és kiürítettem a gyűjtőedényt minden adag után. Az így nyert mintákat légmentesen zárható edényekben tároltam, majd az égéshőt határoztam meg belőle. A hamutartalom vizsgálatához 1 mm-es frakciókra volt szükség, míg a klór- és a nehézfém-tartalom méréséhez 0,25 mm-es frakciókra. Az aprítást Retsch ZM 200 típusú darálóval végeztem. Az őrlés előtt a megfelelő alkatrészeket be kellett szerelni a gépbe. Először a gyűjtőkazettát helyeztem be, majd a tengelyre illesztettem a rotort. A rotor köré megfelelő méretű szitabetét került, végül a kazetta fedelét is rögzítettem. Működés közben egy mágneszár biztosította a megfelelő záródást. A fordulatszámot a kijelző alatti tekerőgomb segítségével, a „SPEED” beállításával állítottam be, 8500 rpm-re. Minden méréshez 4 g mintát kimértem, majd daráltam.

A darálás során a kijelzőn található zöld diagram jelezte a fordulatszám változását, mely, ha sárgára, vagy pirosra váltott, akkor a műveletet meg kellett szakítani. Ezeket a mérési zavarokat a minták műanyag-tartalma okozta, mivel a hőre lágyuló műanyagok megolvadtak és a szitára ragadtak, fokozva a súrlódást a rotor és a szitabetét között, így időnként szünetet kellett tartani. Az egyes minták darálása után, megtisztítottam a készülék alkatrészeit a keresztzennyeződés elkerülése érdekében. A darálás befejeztével a mintát a gyűjtőkazettából feliratozott műanyag gyűjtőedénybe helyeztem és lezártam. A minta előkészítéséhez az MSZ EN ISO 21646:2022 szabványt alkalmaztam (Hulladékokból kinyert szilárd tüzelőanyagok. Minta-előkészítés).



12. ábra: Mintaelőkészítés darálással

forrás: saját kép

5.6 Hamutartalom

A minták hamutartalmának segítségével meghatározhatjuk az RDF szervesanyag-tartalmát, ami különösen fontos paraméter lehet egy cementgyári együttégetés során. A méréshez az MSZ EN ISO 21656:2021 szabványt használtam (Hulladékokból kinyert szilárd tüzelőanyagok. A hamutartalom meghatározása). A szabvány szerint, a tégelyeket a mérés előtt 550°C -on, 30 percig ki kell izzítani, majd exsikkátorban lehűteni és lemérni a tömegüket. A mérés elvégzéséhez 1 g mintát mértem porcelántégelybe táramérlegen, az 1 mm szemcseméretűre előkészített mintákból. Minden mintán három párhuzamos mérést végeztem.



13. ábra: Mintaelőkészítés hamutartalom méréséhez

forrás: saját kép

A hamutartalom meghatározását egy Nabartherm típusú izzítókemencével végeztem, melyet először a főkapcsolóval bekapcsoltam, majd a kezelőpanelen beállítottam a szükséges hőmérsékleteket és fűtési időket és lépcsőket. A „T1” gombbal a hőmérsékletet, a „time1” gombbal a felfűtési, és a „time2” gombbal a fűtési időt állítottam be. A mintákat a 250°C-ra előmelegített kemencébe helyeztem 2 órára, melyből 50 perc a felfűtési idő. Ezen a hőmérsékleten minden illó komponens távozott. Két óra elteltével a hőmérsékletet 550°C-ra emeltem, és a mintákat további három órán át izzítottam, amíg csak a hamutartalom maradt. Az idő leteltével a kemence automatikusan leállt, ezután a mintákat exsikkátorban lehűtöttem és visszamértem. Így meg tudtam határozni a szervesanyagoktól mentes hamu tömegét a szabvány szerint, amely a következőképp számolható ki: [8]

$$A_{ad} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100$$

Ahol,

m_1 az üres tégely tömege

m_2 a tégely és a minta együttes tömege

m_3 a tégely és a hamu együttes tömege

5.7 Égéshő

Az égéshő az a hőmennyiség, ami a minta tökéletes elégésekor keletkezik. A méréséhez először a mintákat 10 mm alattira aprítottam, hogy megfelelő legyen a műszerhez. Egy Parr 6400 típusú Bombakalorimétert használtam. A műszer egy robusztus acélból készült, hermetikusan zárt bombát (égető kamrát) tartalmaz, amelyben a minta elég. Az égési folyamat során felszabaduló hőmennyiséget a bombát körülvevő víz hőmérsékletének emelkedéséből határozza meg a műszer. A kaloriméter további főbb komponensei közé tartozik egy pontos hőmérő rendszer és egy keverő, amely biztosítja a hőmérséklet folyamatos eloszlását.

A méréshez először be kell kapcsolni a készüléket és megnyitni a hozzá csatlakozó oxigén és a sűrített levegőt tartalmazó palackot. A kijelzőn kiválasztottam a „CALORIMETER OPERATION” menüpontot, majd a „HEATER AND PUMP” gombbal bekapcsoltam a fűtést és a pumpát. Megvártam, amíg a készülék felmelegedett a hőmérsékletállandóságig, amit a „TEMPERATURE GRAPH” gomb megnyomásával folyamatosan nyomon követtem. Miután a készülék felmelegedett, a bombát lezártam, és teszt programot futtattam a „START PRETEST” lehetőséggel, hogy ellenőrizsem a szelepeket, a hermetikus lezártaságot és az öblítést. A minta előkészítéséhez az 10 mm-re aprított frakcióból analitikai mérlegem kimértem a szükséges 1 g-ot 0,0001 pontossággal, és pasztillákat készítettem belőle egy pasztillázó prés segítségével. Minden mérési nap elején először standard mintákat mértem, melyeket kristályos benzooesavból készítettem a kalibrációhoz. A minták és standardok tömegét feljegyeztem, majd az acéltálcát a kaloriméter bombafedelének foglalatába helyeztem, és a pasztillákat csipesszel, gumikesztyűben az acéltálcába tettem. Az izzószálra pamutkanócot kötöttem, különösen figyelve a megfelelő illeszkedésre, hogy a minta begyűjtása megfelelő legyen. Ezek után a bombát lezártam és elsőként három standardot mértem. A kijelzőn az „OPERATING MODE” menüpont alatt a „Standardization” lehetőségeket választottam, a „BOMB/EE” megnyomásával beállítottam a bombafedél sorszámát, majd a „START” gombbal indítom a mérést. A készüléknek meg kell adni a standard/minta adatait, beleértve a minta nevét, a bomba azonosítóját, illetve a minta tömegét.

Minden mérés után megtisztítottam és szárazra töröltem a bomba fedelét, tartozékait és belsejét. A standard mérések után a minták méréséhez az „Operating mode” menüpontot „Determination”-re állítottam, és minden mintán három párhuzamos mérést végeztem. A mérések végén megadta a műszer a minta égéshőjét, melyet a következő metodika alapján számol ki:

$$H_c = \frac{(W \times T) - e_1 - e_2 - e_3 - (H_{cs} \times m_s)}{m}$$

Ahol,

H_c – minta égéshője [MJ/Kg]

W – a kaloriméter által használt energia ekvivalense (1 Celsius foknak amennyi J megfelel)

T – a köpenyben lévő víz hőmérsékletének emelkedése (Maximum 8,5 Celsius fok)

e_1 – a bombában maradt levegőben lévő nitrogén oxidálása során képződő salétromsav képződésekor felszabaduló hőmennyiség [J]

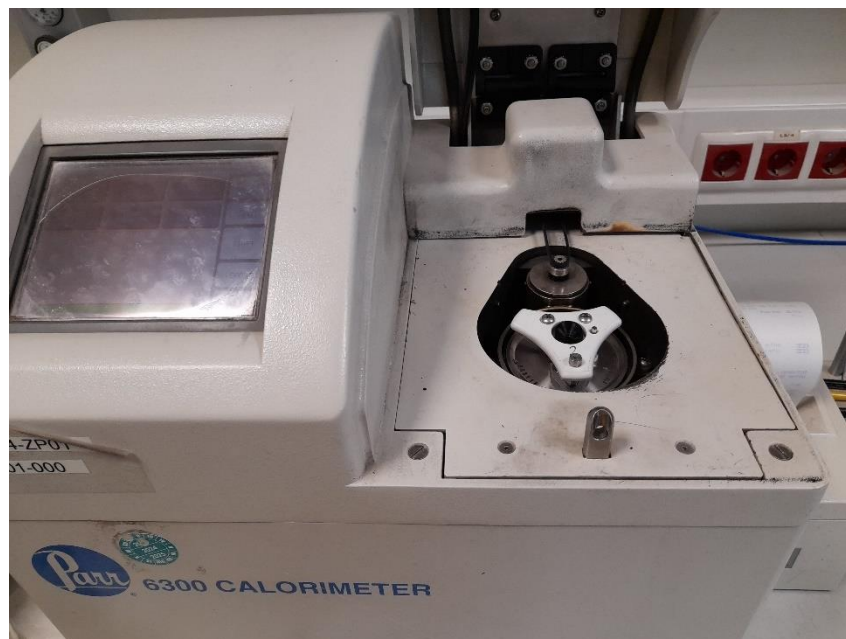
e_2 – a minta kéntartalmából keletkezett kénsav létrejötte során felszabaduló hő [J]

e_3 – az izzószál, valamint a pamutszál hőtermelése [J]

H_{cs} – a standard égéshője (26,45 MJ/Kg)

m_s – a standard tömege [g]

m – a minta tömege [g]



14. ábra: Bombakaloriméter

forrás: saját kép

A szabályos fűtőérték kiszámításához az MSZ EN 15400:2011 szabványt használtam. A szabvány alapján a száraz (Dry) fűtőértéket (J/g) állandó térfogaton mért száraz égéshőből számítottam ki az alábbi képlet alapján:

$$q_{v_{net_d}} = q_{v_{gr_d}} - 206 * w_{H_d}$$

Ahol:

- $q_{v_{gr_d}}$ – állandó térfogaton mért égéshő száraz RDF-re vonatkozóan [J/g]
- w_{H_d} – a hidrogén tömegszázalékos aránya az RDF-ben [%]

A száraz tüzelőanyag elégetésekor a 40 atmoszféra oxigénben felszabaduló hidrogén párolgáshőjét ki kell vonni a mért égéshőből, így kiszámítható a száraz fűtőérték. [15.]

A vizsgálatom során a nedves fűtőértéket nem vettem figyelembe a flashdryer technológia miatt. A nedves fűtőérték számításánál a hidrogéntartalom mellett figyelembe kell venni a minták nedvességtartalmát, így megkapjuk azt a hőmennyiséget, ami a tényleges nyers minta elégetésével keletkezik. A nedves fűtőérték jellemzően

alacsonyabb a száraz fűtőértéknél. A flashdryer képes az RDF nedvességtartalmát olyan szintre csökkenteni, hogy elegendő a szárazfűtőértékkel számolni.

5.8 Nehézfém- és klórtartalom

A minták nehézfémtartalmának megállapításához a 0,25mm-re előkészített mintákból 0,5 grammot mértem ki, majd nyílt feltárással előkészítettem a méréshez. Elszívó fülke alatt 1:3 molarányú HNO_3 és HCl elegyet, tehát királyvizet adtam a mintákhoz és homokfürdőbe helyeztem, ahol 2 órán keresztül forraltam. Az idő közben elpárolgó savat pótoltam. Az idő lejárása után a mintákat begőzöltem és $2\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}_2$ -t adtam hozzá, amely segített a szervesanyagokat oldani. A roncsolt mintákat 50ml-re hígítottam nagy tisztaságú desztillált vízzel. Ezt követően a nehézfém tartalmat egy „Agilent 5110 ICP-OES” típusú induktív csatolású plazma – optikai emissziós spektrométerrel mérjük.



15. ábra: ICP készülék

forrás: saját kép

A méréshez először a felhígított mintákat egy $0,45 \mu\text{m}$ pórusméretű fecskendőszűrőn szűrtem át az ICP-hez tartozó kémcsövekbe. Először a kalibrációs oldatokkal, majd a mintákkal töltött kémcsöveket a számozott kémcsőtartóba helyezem, amit az automata mintaadagolóba tettem. A műszer elindítást megelőzően megnyitottam az argon gázpalackot, amely a minta porlasztásához szükséges, valamint bekapcsoltam az elszívást és a hűtőegységet. A készülék számítógéppel vezérelhető, ahol a szoftverben

megadhatók a minták nevei és bemért tömegei a mintatartó kémcsövek száma alapján. A készülék automatikusan adagolja a mintákat, és mindegyikből három párhuzamos mérést végez, majd ezeket átlagolja. Az eredményeket a készülék táblázatban és grafikonon jelzi.

5.9 CHNS

A vizsgált minta szén-, hidrogén-, nitrogén-, kéntartalmának (CHNS) meghatározása elemanalízissel valósítható meg, az MSZ EN ISO 21663:2021 szabvány szerint. A szabvány részletesen ismerteti a szén (C), a hidrogén (H), a nitrogén (N) és a kén (S) műszeres meghatározásának módszereit és szabályait. A mérést egy számítógép által vezérelt „Elemeltar VarioMarco” típusú műszerrel végeztem, amely alkalmas a minta C, H, N, S-tartalmának egyidejű mérésére, illetve néhány apróbb módosítást követően Cl-tartalom mérésére.



16. ábra: Elemanalizátor

forrás: saját kép

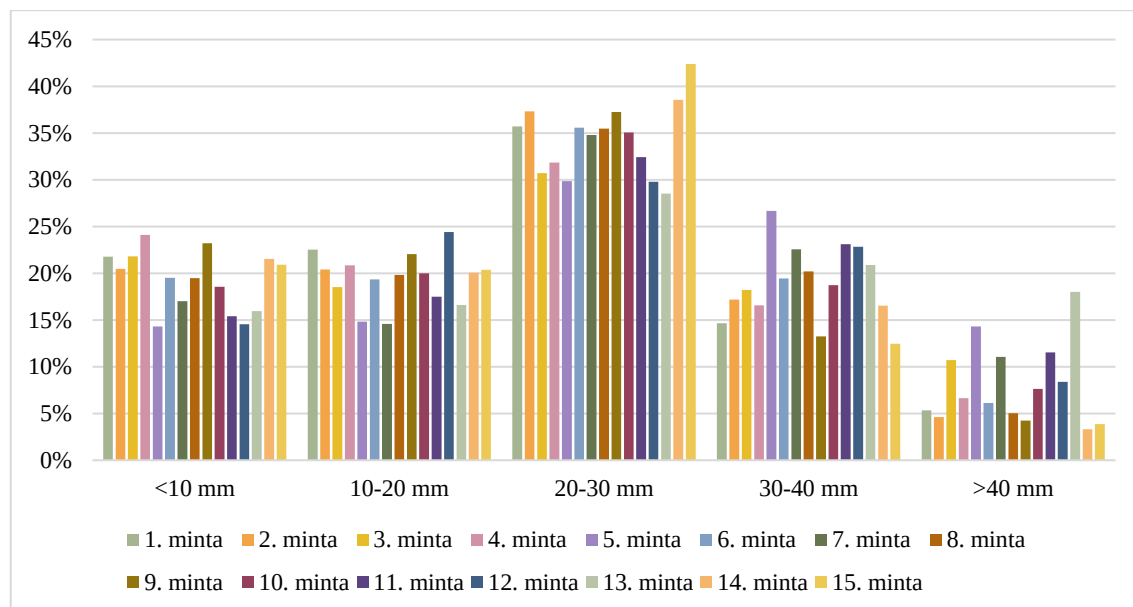
A műszer bekapcsolása, valamint a hozzátartozó hélium- és oxigénpalack megnyitása után meg kell várni a felfűtési időt. A mérés előtt minden esetben nyomáspróbát kell végezni. Elő kell készíteni a standardok és a minták beméréséhez

szükséges ónfóliákat, úgy, hogy egy formázó segítségével edény formára alakítjuk. A standardként alkalmazott szulfanilamidből analitikai mérlegen kimértem kétszer 60 mg-ot, majd a standard mérés ellenőrzéséhez további 60 mg QC-amidot. Az 1 mm-re aprított és a méréshez előkészített RDF mintákból 80-90 mg-ot mértem be, majd a tetejére néhány szem wolframport szórtam. A standarddal/mintával töltött ónfóliát egy mechanikai présbe helyeztem, majd tabletta alakúra préseltem.

Az ilyen módon előkészített mintát az elemanalizátor mintaadagolójába helyeztem, amely egyszerre 60 mintát képes fogadni. Innentől a minták a behelyezési sorrendben, automatikusan az égetőcsőbe jutnak, ahol a minta égetése történik. A műszerhez tartozó software egy excel táblázatot hoz létre, amely tartalmazza a méréshez szükséges adatokat, valamint beilleszthetők a további szükséges információk.

6 Eredmények

6.1 Szemcseméret eloszlás

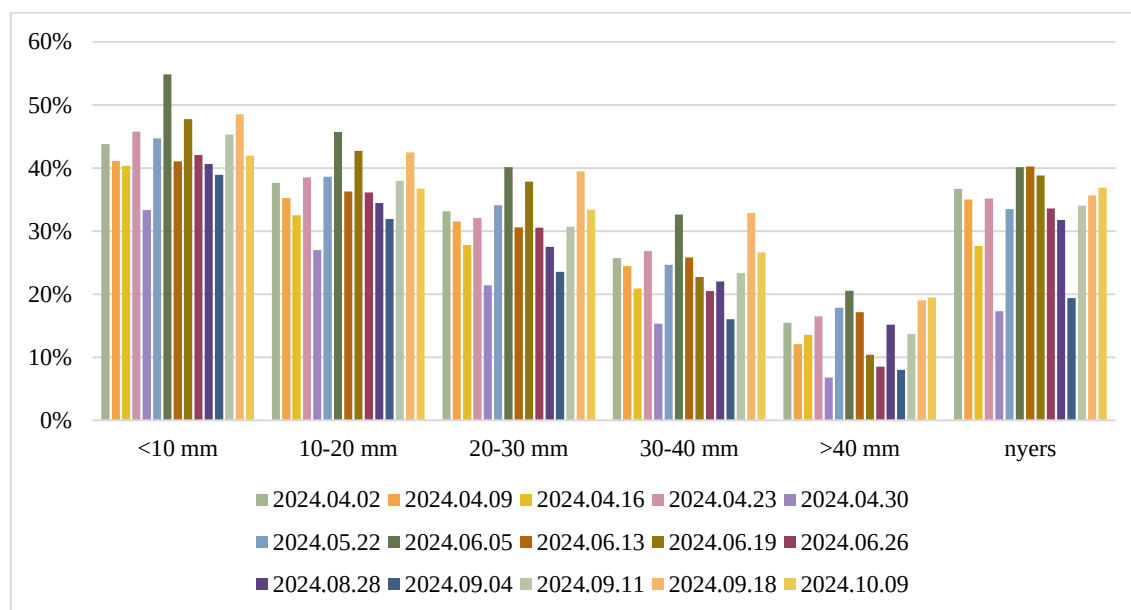


17. ábra: Szemcseméret eloszlás

forrás: saját mérés

A mintavételek során azt a megállapítást tettem, hogy a legjellemzőbb szemcseméret a 20-30 mm közötti frakció, átlagosan 34,35% értékkel. Ezt követően a 10-20 mm közötti, majd a 10mm alatti frakció volt a legjelentősebb 19,46% és 19,24% értékkel. A 30-40 mm közötti és a 40 mm feletti tartomány pedig átlagosan 18,89% és 8,07%-ra adódott. Így megállapítható, hogy a 30mm alatti frakció átlagosan 73,05%-ban a 30mm feletti frakció pedig 26,95%-ban alkotja a nyers mintát. Ezen eredmények láthatók a 17. ábrán, valamint a 12.1-es táblázatban.

6.2 Nedvességtartalom

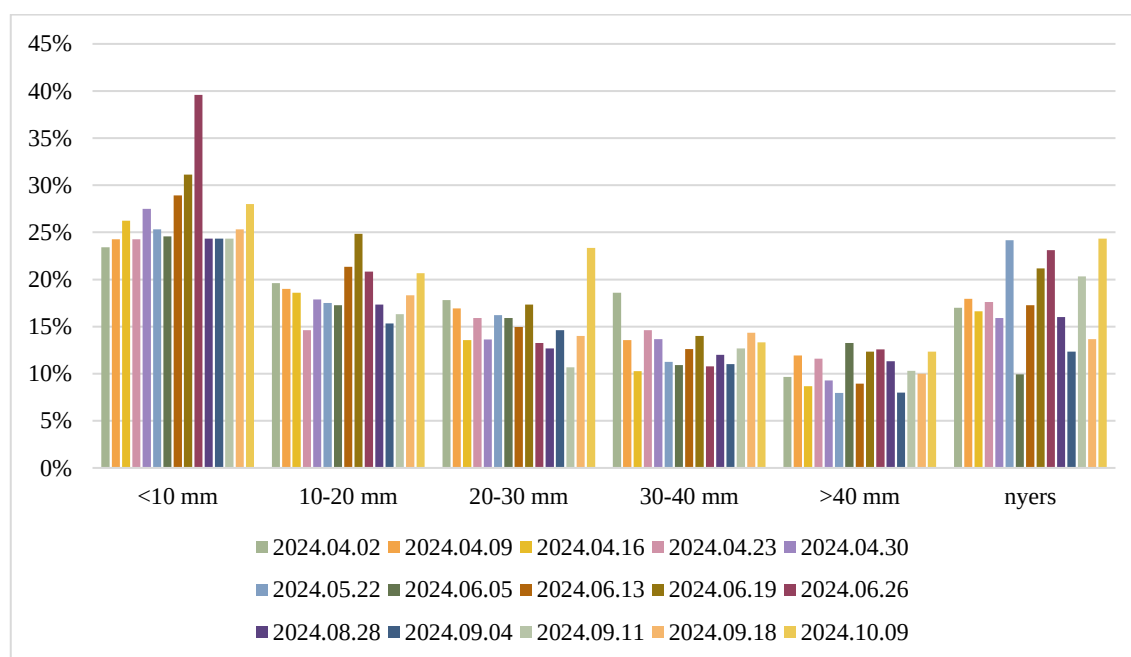


18. ábra: Nedvességtartalom

forrás: saját mérés

A 18-as ábrán szemléltettem a minták nedvességtartalma azt mutatja, hogy a szemcseméret növekedésével a nedvességtartalma csökken. A legkisebb frakció nedvességtartalma átlagban 43,3%, a legnagyobbé pedig 14,3%. Ez a különbség felhasználhatóság tekintetében rendkívül fontos, hiszen befolyásolja az égetési paramétereket. A nyers minta esetében az átlagos nedvességtartalom 33,1%-ra adódott. Az esetlegesen kiugró értékek az adott mintavétel mindegyik szemcseméreténél mutatkozott és valószínűsíthetően az időjárás, mint befolyásoló tényező jelentős az eredmények eltérésében. A mintavételek alkalmával rögzítettem az elmúlt napok időjárási tényezőit és abban az esetben amikor a mintavétel előtt jelentős csapadék volt jellemzően a minták nedvességtartalma is magasabb volt. Sok esetben már a mintavétel közben megállapíthattam a magas nedvességtartalmat. A mintavétel alatti anyagmozgatás során szemmel látható gőzt fedezhettem fel ezekben az esetekben. A mérési eredményeket a 12.2 számú táblázatban foglaltam össze.

6.3 Hamutartalom:



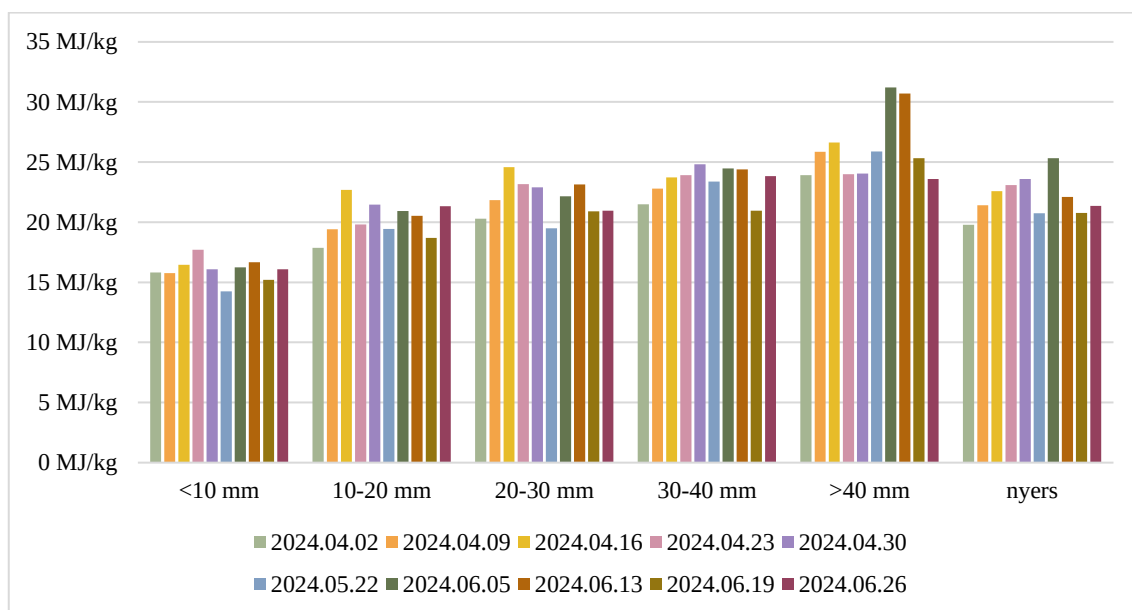
19. ábra: Hamutartalom

forrás: saját mérés

A hamutartalom vizsgálata során megállapítható volt, hogy a szemcseméret növekedésével fordított arányban csökkent a minták hamutartalma. A 10 mm alatti frakció esetében átlagosan 26,8%, a 10-20 mm közöttinél 18,6%, a 20-30 mm közöttinél 15,4%, a 30-40 mm köztinél 12,9% és a 40mm felettinél pedig 10,5% volt mérhető. Ezeket az eredményeket mutatja a 19.ábra, valamint a 12.3 táblázat.

Az eredmények alapján azt a következtetést vontam le, hogy az alacsonyabb frakciókban feltételezhetően nagyobb a szervesanyag tartalom, míg a nagyobb szemcseméretűekben kevesebb. Ezt a feltételezést később a CHNS által mért eredmények is megerősítették. Az elemzések során világossá vált, hogy a kisebb szemcseméretű frakciók magasabb a szervesanyag-tartalommal rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy ezek a frakciók több éghető anyagot tartalmaznak.

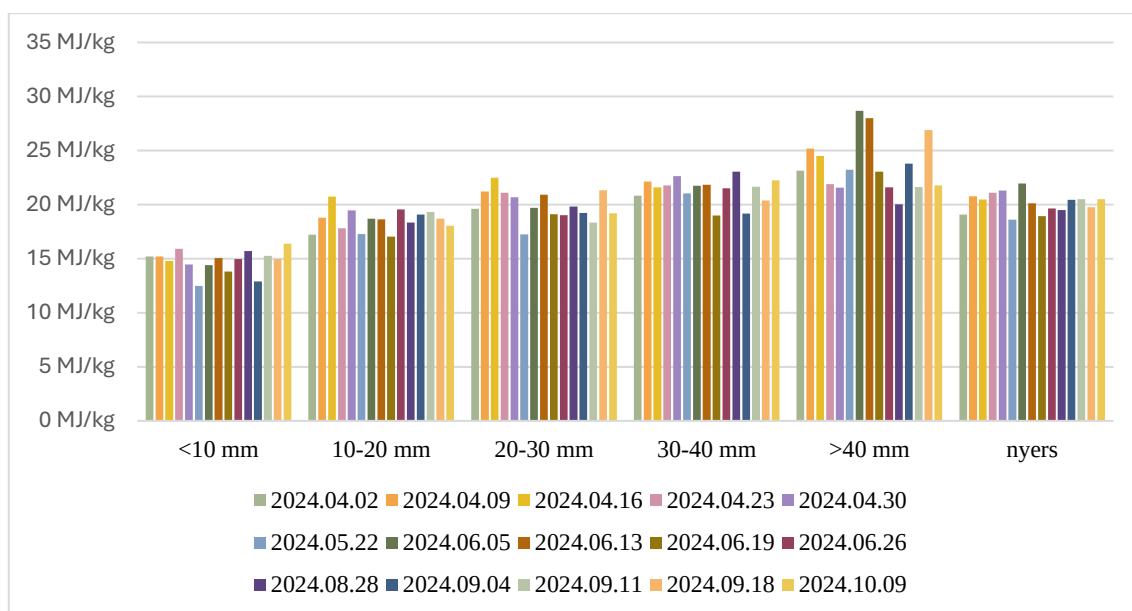
6.4 Égéshő és fűtőérték



20. ábra: Égéshő

forrás: saját mérés

Az első 10 minta esetében a kaloriméterrel mért égéshő eredmények alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a szemcseméret növekedésével egyenes arányban növekszik a minták égéshője. A nyers minták átlagosan 22,07 MJ/Kg-ra adódtak. A szemcseméret szerinti növekvő sorrendben lévő átlagok pedig 16,02 MJ/Kg; 20,21 MJ/Kg; 21,94 MJ/Kg; 23,27 MJ/Kg és 26,12 MJ/Kg. Ezt a mérést a 20. ábrán szemléltettem. A mérések után azt a megfigyelést tettem, hogy a 10 mm alatti és a 40 mm feletti frakciók között, átlagban 10,1 MJ/Kg különbség van. Ezek az eredmények alapján szükségesnek és indokoltnak láttuk az össze minta égéshőjének mérését, majd a CHNS eredményeivel korrigált fűtőérték kiszámítását is.



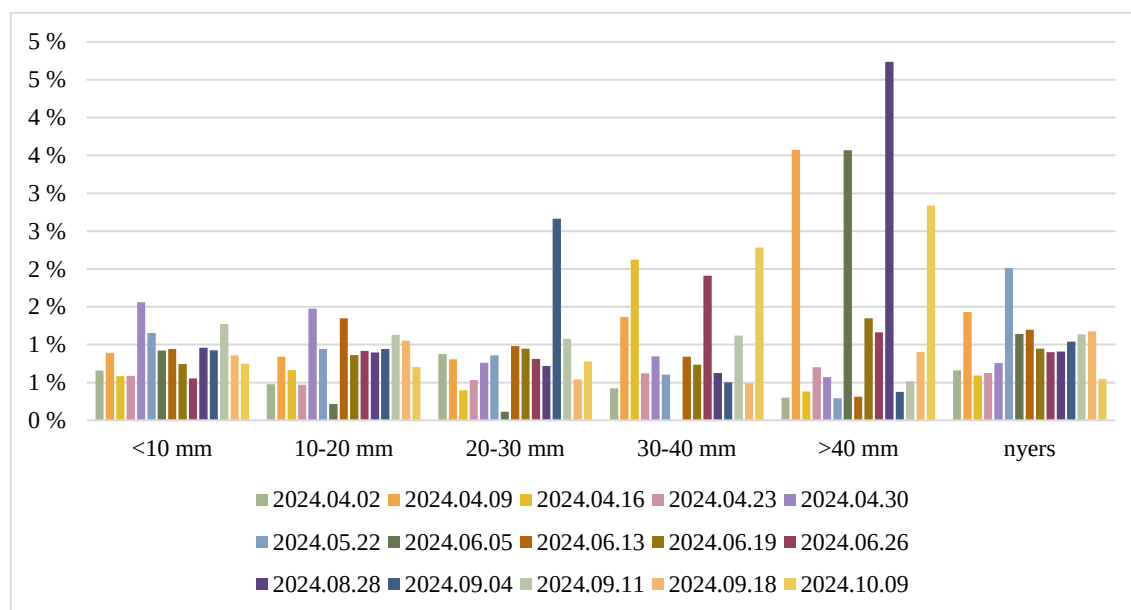
21. ábra: Száraz fűtőérték

forrás: saját mérés

A 21. ábrán bemutatott korrigált fűtőérték eredmények alátámasztják azt a feltevést, amelyet az égéshő ismerete után tettem. A száraz (Dry) fűtőérték eredmények azt mutatják, hogy a legkisebb szemcseméret esetében az érték átlagosan 14,77 MJ/Kg volt, amely minimálisan tér csak el a cementgyári felhasználáshoz szükséges minimum 15 MJ/Kg értéktől. Azonban a legnagyobb frakció átlagosan 23,66 MJ/Kg értékű lett, amely kiemelten jónak mondható az alternatív tüzelőanyagok között. Az égéshő és fűtőérték eredményeket a 12.3 és a 12.5 táblázatok foglalják össze.

Ez nagy minőségi különbséget jelent a cementgyárban történő hasznosítás során, ezért érdemes lehet a nyers RDF-et két méretcsoport szerint vizsgálni, 30 mm alatt és 30 mm felett. Ebben az esetben egy átlagosan 17,76 MJ/Kg és egy átlagosan 22,52 MJ/Kg fűtőértékű anyagot várhatunk a nyers 20,18 MJ/Kg helyett.

6.5 Nehézfém és klór tartalom

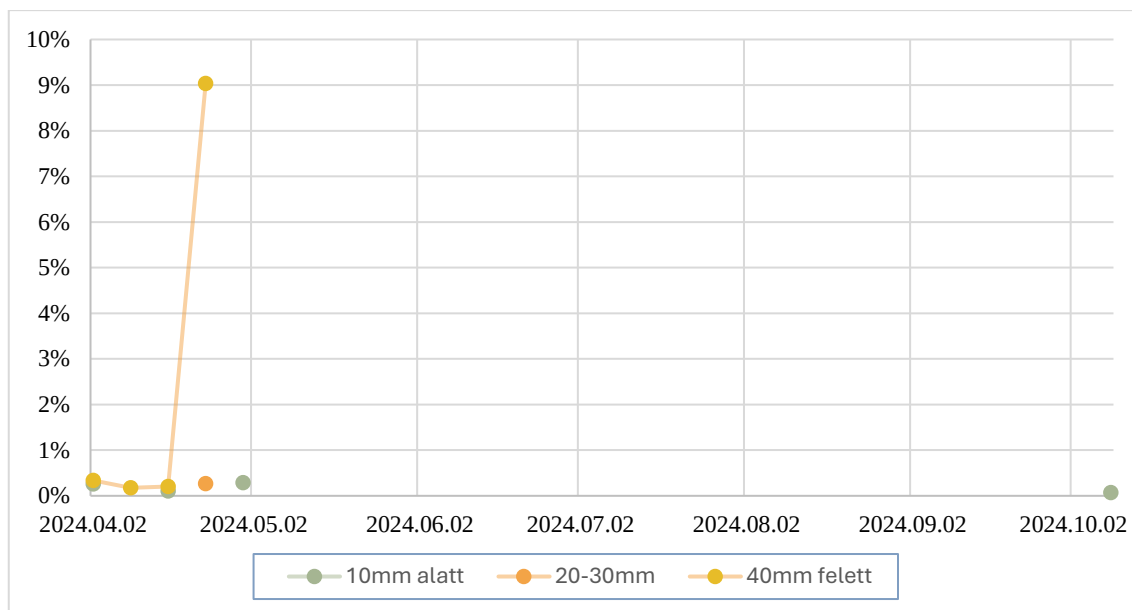


22. ábra: Klórtartalom

forrás: saját mérés

A 22 ábrán szemléltetett minták esetében az volt megfigyelhető, hogy a 30 mm feletti frakcióknál jelentősen megemelkedett a klór tartalom. A 40 mm feletti esetben ez átlagban meghaladta az 1%-os értéket, így önmagában nem lehet hasznosítani a cementgyárakban, hiszen az elégetésük során a jelenlegi technológiákkal nem lehetne biztosítani a megfelelő levegőemissziót. Feltételezésem alapján a magasabb klór tartalmat a frakció magasabb műanyag tartalma okozhatta, hiszen ebben az anyagfajtában rendkívül sok klórtartalmú alkotó található, pl:PVC. A részletes eredményeket a 12.6 táblázatban foglaltam össze.

Ez az RDF előállítása során tovább csökkenthető, ha a technológiai sorba beillesztünk optikai leválasztókat, amelyek vezérlésébe beprogramozzuk, hogy a magas klór tartalmú műanyagokat szelektálja ki az anyagáramból. Ezt a kutatásom során nem nyílt lehetőségem tesztelni, azonban mindenképpen érdemes foglalkozni a jövőben ezzel a lehetséges megoldási módszerrel.

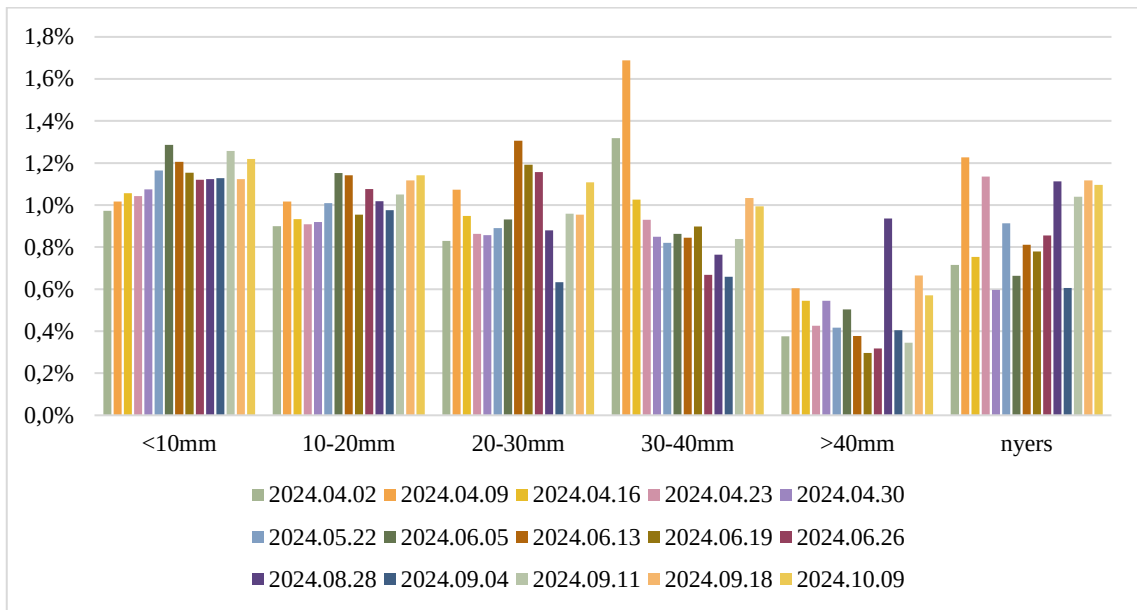


23. ábra: Higanytartalom

forrás: saját mérés

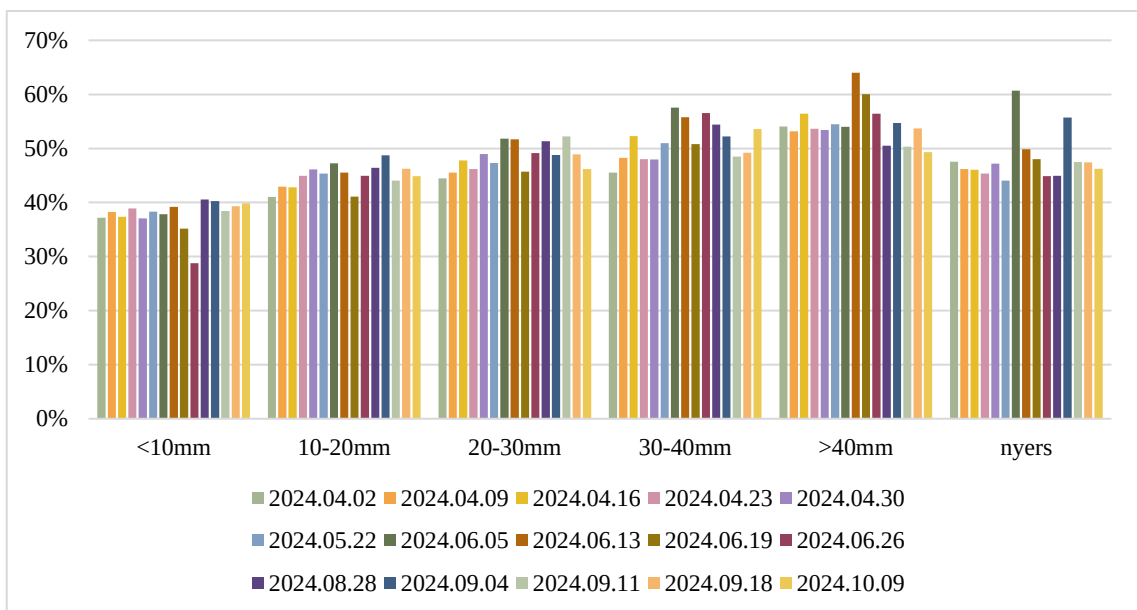
A cementgyártás szempontjából a legjelentősebb nehézfém tartalom, ami problémát tud okozni a gyártás során az a higany. Ezen paraméter eredményeit a 23. ábrán szemléltettem. Ettől függetlenül megvizsgáltam a mintákat a legtöbb nehézfém tekintetében. A higany mérések alapján a legtöbb esetben alsó méréshatár alatti higanytartalmat tudtam csak megállapítani, néhány esetben volt csak mérhető mennyiségű, de az is az alsó méréshatár közelében volt. Egy esetben azonban rendkívül nagy értéket mértem. Ez feltételezhetően egy nagyobb higanyszennyezés miatt történhetett, hiszen a nyers mintában is hasonlóan magas értéket mértem. A pontos eredményeket a 12.4 számú táblázat foglalja össze.

6.6 CHNS



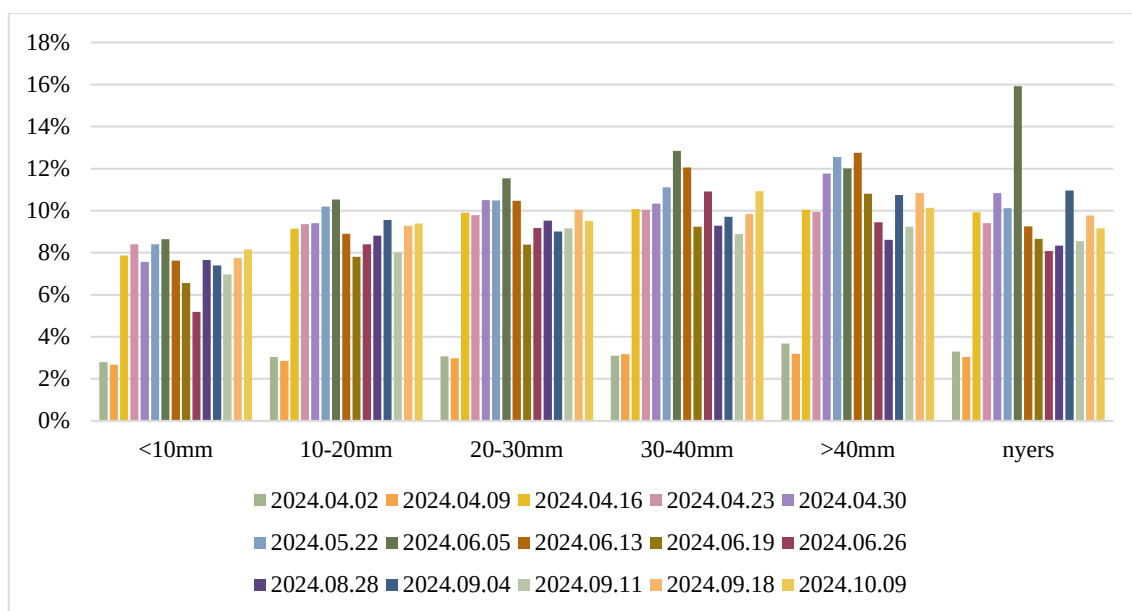
24. ábra: Nitrogén tartalom

forrás: saját mérés



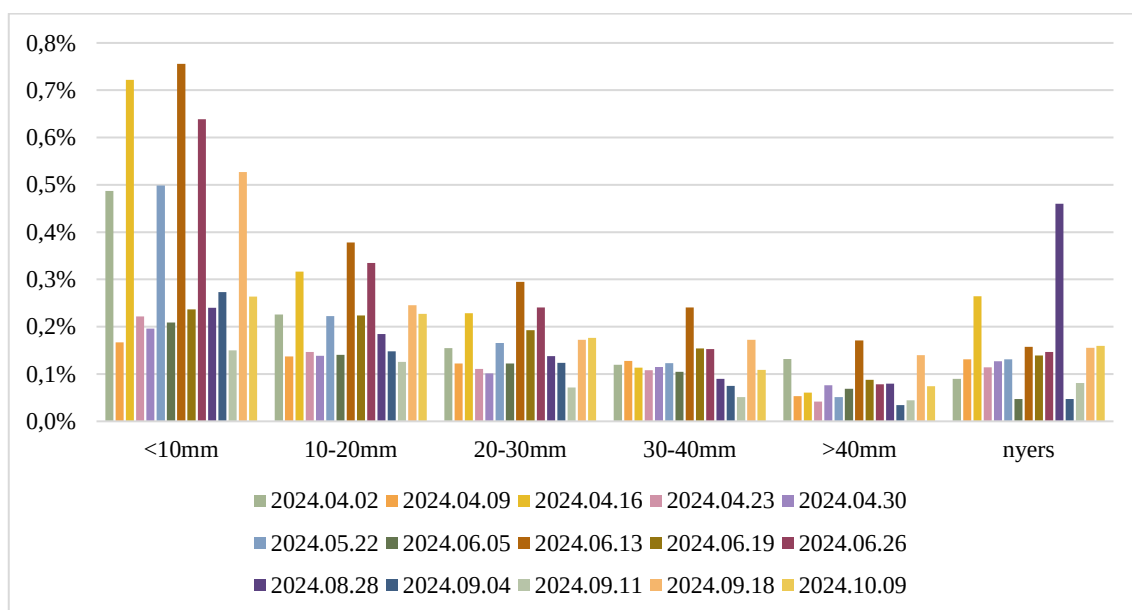
25. ábra: Széntartalom

forrás: saját mérés



26. ábra: Hidrogén tartalom

forrás: saját mérés



27. ábra: Kén tartalom

forrás: saját mérés

A CHNS vizsgálat alapján kijelenthető, hogy nitrogén tartalom esetében csökkenés mutatható ki a szemcseméret növekedésével. A 24. ábra alapján a legkisebb 10 mm alatti frakció esetében átlagosan 1,13% volt, míg a legnagyobb 40 mm feletti frakció esetében 0,49%. A nyers minta átlagban 0,89%-ra adódott.

A 25. ábrán szemléltetett széntartalom esetében lassú növekedés volt megfigyelhető a szemcseméret növekedésével. A 10 mm alatti anyag átlagosan 37,77% volt, míg a 40 mm feletti 54,55%. A nyers mintában ez az érték 48,11% volt. A továbbiakban érdemes lehetne vizsgálni a széntartalom biomassa eredetét. Amennyiben a nagyobb szemcseméretű frakcióban magasabb biomasszatartalom mutatható ki, tovább javítható lenne a CO₂ emisszió.

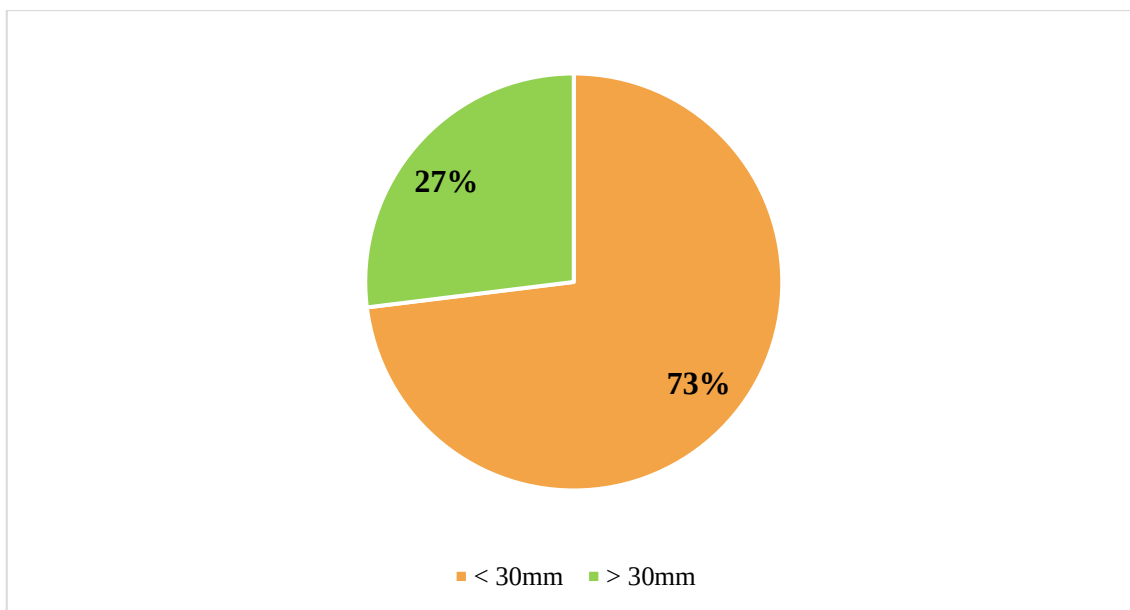
Hidrogéntartalom tekintetében is minimális növekedés jellemezte a mintákat a szemcseméret emelkedésével. Ebben az esetben 6,9%-ról 9,7%-ra változott a legkisebb és a legnagyobb frakció között. A nyers minta esetében 9% volt. Ez jól megfigyelhető a 26. ábrán. Hidrogén tartalomra a száraz fűtőérték meghatározásánál is szükség volt, amely segítségével pontosan megállapíthattam a kívánt értéket.

Kéntartalomnál megfigyelhető, hogy a 10 mm alatti frakció lényesen kiemelkedik a többi közül. Ennek értéke 0,37% volt, a többi mérettartományban folyamatos lassú csökkenés volt tapasztalható. A legnagyobb frakció esetében a kéntartalom 0,08% volt. A nyers minta esetében 0,15%-os értéket mértem. Ezt a 27. ábra szemlélteti.

Összességében elmondható, hogy a nitrogén- és kéntartalom esetében csökkenés tapasztalható a szemcseméret növekedésével. Szén- és hidrogéntartalom pedig a szemcsemérettel egyenes arányban növekszik. A részletes mérési eredményeket a 12.7 számú táblázat foglalja össze

6.7 A 30 mm alatti és 30 mm feletti frakciók különbségei

A mintavételek alapján a 30 mm alatti szemcseméret frakciók összességében nagyobb arányban fordultak elő (73,05%), míg a 30 mm feletti frakciók kisebb arányt képviseltek (26,95%). Ez azt jelzi, hogy a vizsgált minták többsége a kisebb szemcseméretű kategóriákba tartozik. Ezt a 28. ábra mutatja be.

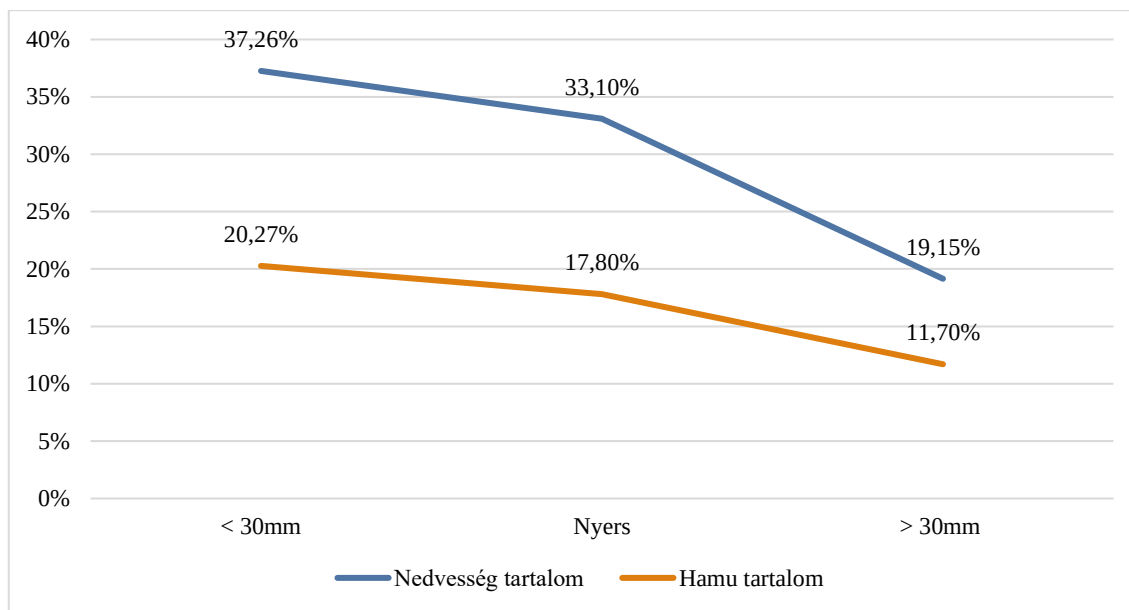


28. ábra: Szemcseméret eloszlás összehasonlítása

forrás: Saját mérés

A nedvességtartalom tekintetében azt a megállapítást tettem, hogy a 30 mm alatti tartománynak az átlagos nedvességtartalma 37,26% volt, míg a 30 mm felettinek pedig 19,15%. Az esetlegesen kiugró értékek minden szemcseméret kategóriában konzisztensen megjelentek, ami az időjárás változatosságának tulajdonítható.

A hamutartalom fordítottan arányos volt a szemcsemérettel. A kisebb szemcseméretű frakciók magasabb szervesanyag-tartalommal rendelkeznek, így több hamut termelnek az égés során. A 30 mm alatti frakció esetében ez átlagosan 20,27%-ra tehető, míg a 30mm feletti anyagnál csak 11,7%-ra. A 29. ábrán szemléltettem a minták hamutartalmának és nedvességtartalmának változását.

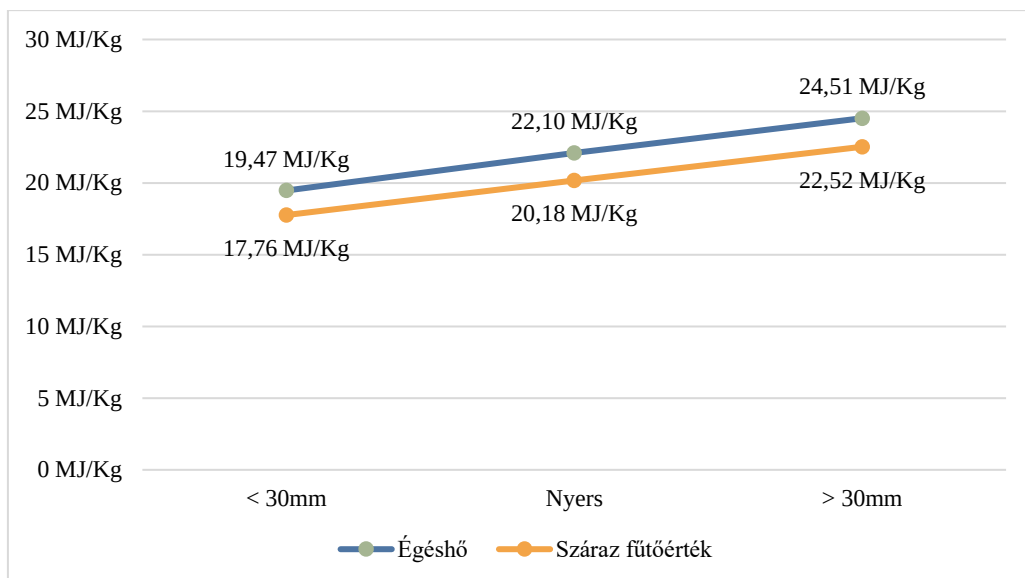


29. ábra: Nedvesség és hamu tartalom összehasonlítása

forrás: Saját mérés

Az első 10 minta égéshőjének vizsgálata alapján a szemcseméret növekedésével egyenes arányban növekedett a minták égéshője. A 30 mm alatti frakciók esetében az átlagos égéshő 16,02 MJ/kg és 20,21 MJ/kg között volt, míg a 30 mm feletti frakciók esetében 23,27 MJ/kg és 26,12 MJ/kg között. Ez jól kivehetően mutatja, hogy jelentős eltérés van a két csoport között és a legnagyobb és legkisebb frakciók átlagosan 10,1 MJ/kg különbséget jelentenek az égéshőben, ami fontos minőségi különbséget jelent a cementgyártás során.

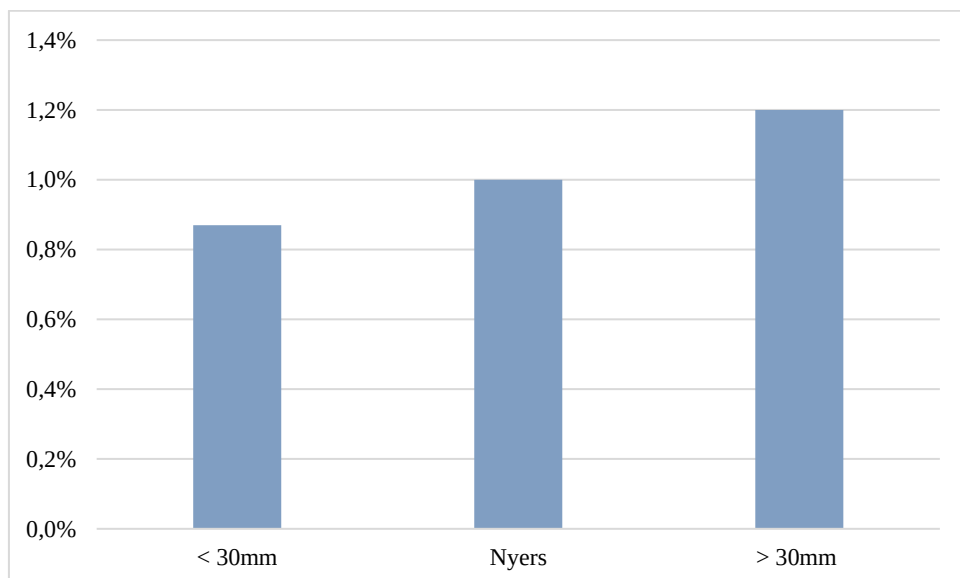
A száraz fűtőérték számítása esetében mind a 15 minta vizsgálatra került. Az így kapott eredmények alapján megerősíthető az égéshővel tett feltételezés, miszerint jelentős különbség várható a 30 mm alatti és a feletti tartomány esetében. A mérések alapján a 30 mm alatti frakció átlagos fűtőértéke 17,76 MJ/Kg, míg a 30mm feletti pedig 22,52 MJ/Kg



30. ábra: Égéshő és fűtőérték összehasonlítása

forrás: Saját mérés

A nehézfém és klórtartalom elemzése során megfigyeltem, hogy a 30 mm feletti frakcióban magasabb volt a klór tartalom. Különösen a 40 mm feletti frakciók esetében, ahol a klórtartalom átlagban meghaladta az 1%-ot. Ez problémát jelent a cementgyárakban történő hasznosítás során, mivel az elégetés során nem biztosítható a megfelelő levegőemisszió. Feltételezhető, hogy a magasabb klór tartalom a nagyobb frakciók esetében magasabb műanyag összetétel okozza.



31. ábra: Klór tartalom összehasonlítása

forrás: Saját mérés

A higany tartalom tekintetében nem volt jelentős eltérés a különböző szemcseméret frakciók között, mivel a mért értékek legtöbbször az alsó méréshatár alatt voltak.

Összefoglalva, a 30 mm alatti szemcseméret frakció nagyobb hamutartalommal és alacsonyabb égéshővel és fűtőértékkel rendelkezik, míg a 30 mm feletti frakciók magasabb klórtartalommal és nagyobb égéshővel, fűtőértékkel jellemezhetők. A cementgyártás szempontjából ezek az eredmények fontosak lehetnek a nyers RDF anyagok minőségének és hasznosításának optimalizálása érdekében.

7 Következtetések

7.1 Tüzelőanyag felhasználásának lehetőségei a cementgyártásban

Az RDF cementgyárban történő hasznosítását a Holcim Magyarország Kft. Királyegyházi cementgyárában vizsgáltam. A telephelyre beérkező alternatív tüzelőanyagoknak számos paraméternek kell megfelelnie. A legjelentősebb paraméter a fűtőérték, melynek minimálisan 15 MJ/Kg értékűnek kell lennie. A technológiai leírásban említett két beadagolási pont a kalcinátor és a főégő. A főégőre jelenleg ~20MJ/Kg fűtőértékű alternatív tüzelőanyagot használnak, amely a beadagolás előtt áthalad egy FlashDyer technológián, amely tovább szárítja és szelektálja az anyagot, így növelve a fűtőértéket. A kalcinátorra ~15 MJ/Kg fűtőértékű anyagot használnak, amely lehet RDF, gumitextil és biomassza is.

7.2 Gazdasági és környezeti hatások

A cementgyárak Magyarországon egységes környezethasználati engedéllyel rendelkeznek, amelyben szigorúan szabályozva van a gyár működtetése. Minden gyárnak egyedi határértékei és megkötései vannak, amelyek a technológia egyedi adottságaiból és a lokális tényezőkből adódnak. Így van ez a maximálisan beadagolható napi, és éves alternatív tüzelőanyag mennyiségének esetében is. Sok esetben előfordul, hogy nagyobb termelési volumenre lenne szükség, azonban így a gyártás meghaladná a maximális tüzelőanyag mennyiséget. Ezért vagy vissza kell venni a termelést, vagy fosszilis tüzelőanyagot kell használni, azonban egyik megoldás sem gazdaságos. Azáltal, ha lenne egy magasabb fűtőértékű anyag, amellyel feljebb lehetne húzni a főégőre és a kalcinátorra kerülő anyag minőségét, azáltal elkerülhetővé válna az a helyzet, hogy a fűtőanyag mennyisége miatt gazdasági hátrányt szenvedjen a gyártás.

8 Kutatás összefoglalása

8.1 Javaslatok cementgyárak számára

A kutatási eredmények alapján javasolom, hogy a cementgyárak az RDF stabilabb adagolhatósága és hasznosítása érdekében külön tároljanak be RDF-et méretfrakciók szerint. A nyers RDF mintán kívül a 30 mm alatti és a 30 mm feletti anyagok külön kezelése számos előnnyel járhat.

A 30 mm alatti frakció finomabb szemcseméretű anyagokat tartalmaz, amelyek gyorsabban és kritikusan égnék el. Ez lehetővé teszi a cementgyár számára, hogy az égés során gyorsan növelje a hőmérsékletet, ami különösen hasznos lehet a gyártási folyamat kezdeti szakaszában vagy hirtelen hőmérséklet-csökkenés esetén. A finomabb frakciók gyorsabb égése a stabilabb hőmérséklet-szabályozáshoz és javítja az égés hatékonyságát. Ugyanakkor alacsonyabb égéshővel rendelkezik, így a kalcinátoron történő beadása javasolt.

A 30 mm feletti frakció nagyobb darabokat tartalmaz, amelyek lassabban égnék el, de hosszabb ideig biztosítják a folyamatos tüzelőanyag-ellátást. Ez lehetővé teszi az égési folyamat hosszabb távú stabilizálását. Különösen fontos olyan időszakokban, amikor a gyár működése hosszabb ideig folyamatos hőellátást igényel. Ezen frakciók külön tárolása jó lehetőség arra, hogy igény szerint keverjük azokat a nyersanyaggal, így könnyebben szabályozható a tüzelőanyag fűtőértéke.

A finomabb frakció hozzáadásával csökkenthető, míg a nagyobb frakció hozzáadásával növelhető a keverék fűtőértéke. Ez a rugalmasság segít optimalizálni a gyártási folyamatot és csökkenteni az energiafogyasztást, így a cementgyár jobban tud alkalmazkodni a változó hőigényhez és a termelési kapacitáshoz.

8.2 Optimalizációs lehetőségek az adagolásban

Ha a jelenleg cementgyárban hasznosított RDF-et összehasonlítjuk a vizsgálat során szétválasztott két frakcióval, számos fejlesztési lehetőséget találunk. A két beadagolási pont közti különbség igen jelentős. Míg a kalcinátor teljes kapacitás mellett ~15 tonna/óra, a főégő pedig ~7,5 tonna/óra. Ha 24 óra üzemet tekintünk akkor ez összesen napi 360 tonna felhasznált hulladékot jelent a kalcinátoron, a főégőn pedig 180 tonna, amely együtt: napi 540 tonna hasznosított RDF. Jelenleg a cementgyárban használt

tüzelőanyagok melyet a kalcinátoron hasznosítanak, átlagban 16 MJ/Kg, a főégőn pedig 21 MJ/Kg (nem számolva a flashdryer általi módosulással). Ez napi 5 760 GJ energia a kalcinátoron, a főégőn pedig 3 780 GJ, amely összesen 9 540 GJ. Ha ugyan ezen paraméterek alapján behelyettesítjük a kutatásomban keletkező anyagokat, úgy, hogy a 30 mm alatti frakciót a kalcinátorra, míg a 30 mm felettit direktben a főégőre adagoljuk javulást tapasztalunk. A módosult fűtőértékek mellett azt az eredményt kapjuk, hogy a kalcinátornál napi 6 394 GJ hőenergia, a főégőnél pedig 4 054 GJ, amely összesen 10 445 GJ. Ezzel a módosítással 9,5%-os hőenergia emelkedés érhető el, ha mennyiségben ugyan annyi tüzelőanyagot használnak a cementgyártás során.

Ezen számítások alapján az is elképzelhető, hogy az újonnan keletkező két anyagáram használatával növekedni tud a termelési kapacitás is. Ez hasznos kiindulási alap lehet a cementgyártó cégeknek, hiszen a termelési kapacitás növelése mellett tudják csökkenteni a CO₂ kibocsátásukat.

8.3 További kutatási irányok megjelölése

Az RDF cementgyárban történő felhasználása számos kutatási irányt kínál, amelyek tovább erősíthetik és optimalizálhatják a technológia alkalmazását. A jelenlegi projekt próbaüzeme kiváló lehetőségeket nyújtana arra, hogy ezek a kutatási irányok konkrét gyakorlati eredmények tekintetében is vizsgálva legyenek. A próbaüzem során a cementgyárakban RDF-et használnak tüzelőanyagként, ami lehetőséget ad arra, hogy megvizsgáljuk a különválasztott RDF tényleges hatékonyságát és környezeti hatásait valós ipari körülmények között.

A jövőbeli kutatások egyik fő iránya lehetne az emissziók és környezeti hatások részletes vizsgálata. Ehhez részletesebben szükséges tanulmányozni az RDF égetése során keletkező különböző szennyező anyagokat, például a szén-dioxidot, kén-dioxidot, nitrogén-oxidokat, valamint a nehézfémeket. Ezen anyagok kibocsátásának minimalizálása érdekében fejleszteni kell a füstgázkezelési technológiákat.

Egy másik fontos kutatási terület lehet az RDF minőségének javítása és az előállítási technológiájának fejlesztése. Olyan új válogatási és előállítási módszerek kidolgozása, amelyek növelik a hulladékból származó tüzelőanyag minőségét és fűtőértékét. Ennek során különös figyelmet kell fordítani a szennyezett anyagokra és a nedvességtartalom csökkentésére.

További gazdasági elemzések szükségesek az RDF cementgyárakban való alkalmazásának költséghatékonyságáról. Ezek az elemzések magukban foglalják az előállítási költségeket, a logisztikai kihívásokat és a potenciális megtakarításokat a hagyományos tüzelőanyagokkal szemben. Az RDF használatának gazdasági előnyei mellett a technológiai integráció kérdése is kiemelt jelentőségű. Vizsgálni kell az RDF égetésének hatását a cement minőségére és tulajdonságaira.

9 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni mindenki segítségét, aki bármilyen módon is hozzájárult a kutatásomhoz. Elsőként szeretnék köszönetet mondani dr. Leitol Csabának, aki segített a témával kapcsolatos kérdéseimben és hogy biztosította számomra a lehetőséget, hogy a Dél-Kom Nonprofit Kft telephelyén végezzem a mintavételeket és a méréseket. Győrfi Alexandrának, aki segített a mintavételek és mérések megszervezésében és lebonyolításában és tanácsaival támogatta munkámat. Köszönöm a segítséget Pataki Tamásnak és Varga Zsoltnak, akik az analitikai mérésekben segítettek a munkámat. Köszönettel tartozom a Holcim Magyarország Kft munkatársainak: Kovács Mátyásnak, Kiss Gábornak, Nagy Tibornak és Mayer Zsanettnek, hogy szakmai tudásukkal és hasznos tanácsaikkal támogattak.

11 Irodalomjegyzék

- [1.] 1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól (<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=99500053.tv>)
- [2.] 2000. évi XLIII. törvény a hulladékgazdálkodásról (<https://mkogy.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0000043.TV>)
- [3.] 2003/87/EK (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=celex%3A32003L0087>)
- [4.] 2008/98/EK (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=celex:32008L0098>)
- [5.] 2010/75/EU (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>)
- [6.] 2012. évi CLXXXV. törvény a hulladékról (<https://njt.hu/jogszabaly/2012-185-00-00>)
- [7.] 2014/95/EU (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=CELEX:32014L0095>)
- [8.] 2019/1885/EU határozat (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=CELEX:32021D1885>)
- [9.] 2019. évi XLIV. törvény a klímavédelemről (<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a2000044.tv>)
- [10.] 29/2014. (XI. 28.) FM rendelet a hulladékégetés műszaki követelményeiről, működési feltételeiről és a hulladékégetés technológiai kibocsátási határértékeiről (<https://njt.hu/jogszabaly/2014-29-20-11>)
- [11.] Bacatelo, M., Capucha, F., Ferrão, P., Margarido, F., & Bordado, J. (2024). Life cycle assessment of synthetic natural gas production from captured cement's CO₂ and green H₂. Journal of CO₂ Utilization, 83, 102774. (<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102774>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982024001094>)

- [12.] Chai, S. Y. W., How, B. S., Chin, M. Y., & Ngu, L. H. (2024). Utilization of accelerated weathering of limestone captured carbon dioxide (CO₂) with cement kiln dust to produce building material. *Journal of Cleaner Production*, 468, 143047. (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143047>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262402496X>)
- [13.] Európai kibocsátáskereskedelmi rendszer (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A02003L0087-20240301>)
- [14.] Genon, G., & Brizio, E. (2008). Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. *Waste Management*, 28(11), 2375–2385. (<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.022>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X07004084>)
- [15.] Györfi A., Rostás A.K., Pencz A., Leitöl Cs., Kiss T.: Hulladékból származtatott tüzelőanyag nehézfém tartalmának vizsgálata - Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Környezetmérnöki Tanszék
- [16.] Hercog, J., Lewtak, R., Glot, B., Jóźwiak, P., Nehring, G., Tavares, V. D., Nunes, A. M., & Gaspar, D. (2023). Pilot testing and numerical simulations of the multifuel burner for the cement kiln. *Fuel*, 342, 127801. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127801>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123004143>)
- [17.] Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources Conservation and Recycling*, 68, 21–28. (<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912001097>)
- [18.] Magyar Szabványügyi Testület (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [19.] MSZ EN 15357:2011 – Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Terminológia, meghatározások és leírások (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [20.] MSZ EN 15358:2011: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Minőségirányítási rendszerek és előállítás egyedi alkalmazási követelményei. (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)

- [21.] MSZ EN 15359:2012: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Jellemzések és osztályok. (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [22.] MSZ EN 15400:2011: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Fűtőérték meghatározása (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [23.] MSZ EN 15403:2011: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Hamutartalom meghatározása (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [24.] MSZ EN 15413:2012: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Nedvességtartalom meghatározása szárítószekrényes módszerrel. (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [25.] MSZ EN 15414-3:2011: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Részecskeméret-eloszlás meghatározása. (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [26.] MSZ EN 15415-3:2012: Szilárd újrahasznosítható tüzelőanyagok. Laboratóriumi mintaelőkészítések módszerei. (<https://www.mszt.hu/hu-hu/>)
- [27.] MSZ EN ISO 21637:2021 Hulladékokból kinyert szilárd tüzelőanyagok (<https://prod.mszt.hu/hu-hu/>)
- [28.] Pieper, C., Wirtz, S., Schaefer, S., & Scherer, V. (2020). Numerical investigation of the impact of coating layers on RDF combustion and clinker properties in rotary cement kilns. *Fuel*, 283, 118951. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118951>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120319475>)
- [29.] Sharma, P., Sheth, P. N., & Mohapatra, B. (2022). Co-processing of petcoke and producer gas obtained from RDF gasification in a white cement plant: A techno-economic analysis. *Energy*, 265, 126248. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126248>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222031346>)
- [30.] Sharma, P., Sheth, P. N., Chourasia, M., & Mohapatra, B. (2024). Chemical characterization of refuse derived fuel (RDF) using Py-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 179, 106456. (<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106456>) (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237024001116>)

- [31.] Tihin, G. L., Mo, K. H., Onn, C. C., Ong, H. C., Taufiq-Yap, Y., & Lee, H. V. (2023). Overview of municipal solid wastes-derived refuse-derived fuels for cement co-processing. *Alexandria Engineering Journal*, 84, 153–174.
(<https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.043>)
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823009456>)