Az együttégetés klinkergyártási technológiára gyakorolt hatásai és azok minimalizálási lehetőségei

Leskó Gábor*

Témavezető: Csőke Barnabás**

1. Bevezetés

A cement előállítása rendkívül anyag- és energiaigényes folyamat. Az utóbbi évtizedekben a környezetvédelmi szempontok térnyerése, illetve a természeti erőforrások minél hatékonyabb felhasználása érdekében a cementiparban ma már általános gyakorlat, hogy a klinker (a cementgyártás félkész terméke) előállításához különféle hulladékokból származó helyettesítő anyagokat használnak fel. Ezt az eljárást röviden együttégetésnek nevezik, mely gyakorlatilag egy kb. 4-5 méter átmérőjű, mintegy 100 méter hosszú, forgó csőkemencében, rendkívül magas hőmérsékleten lejátszódó termikus folyamat.

A hulladékalapú helyettesítő anyagok felhasználása egyrészt hozzájárul más iparágakban vagy lakossági tevékenységek során keletkező hulladékok kezelésének megoldásához, másrészt csökkenti a cement előállításához szükséges primer, nem megújuló természeti erőforrások felhasználását. A helyettesítő anyagok aránya a felhasznált hatalmas mennyiségű hagyományos nyers- és tüzelőanyagokhoz képest csupán néhány százalék (~1-5%), ez a mennyiség azonban környezetvédelmi szempontból igen jelentős, hiszen azt jelenti, hogy egy-egy cementgyár éves hulladékhasznosítási/ártalmatlanítási kapacitása több tízezer tonnára tehető. Természetesen nem minden hulladék alkalmas cementipari felhasználásra, illetve a felhasználható hulladékokat is általában megfelelő előkészítésnek (aprítás, rostálás, keverés, homogenizálás stb.) kell alávetni, mielőtt a gyártási folyamatba bekerülnek.

Az alábbi felsorolás néhány tipikusan cementgyárban helyettesítő anyagként felhasználható hulladéktípust tartalmaz:

- használt gumiabroncsok,
- fáradt olaj, olajos iszapok,
- oldószerek,
- műanyag-, papír-, fa-, textil-, gumihulladékok,
- olajjal, oldószerrel, festékkel, gyantával vagy peszticiddel szennyezett műanyag-, papír-, fa-, textil-, gumihulladékok,
- húsliszt,
- szárított szennyvíziszap,
- papíriszap.

A hagyományos nyers- és tüzelőanyagokkal együtt kemencébe bekerülő hulladékok szervesen komponensei (pl. kalcium, szilícium, alumínium, vas stb.) a kialakuló klinkerásvány mátrixszerkezetébe stabilan beépülve hasznosulnak, illetve megkötődnek. A hulladék szénatomokból és hidrogénatomokból felépülő összetevői, tehát a különféle szénhidrogének, a tökéletes égést biztosító kemencében szén-dioxiddá és vízzé égnek el, miközben a felszabaduló hőenergia a gyártási folyamatban a lehető legnagyobb mértékben hasznosul, kiváltva ezzel a hagyományos tüzelőanyagok (szén, olaj, gáz stb.) egy részét. Az utóbbi évtizedek eredményei alapján látható, hogy a helyettesítő anyagok klinkergyártásban történő

1. ábra. Hulladékok lehetséges beadagolási pontjai különböző technológiák esetén [3]

* Leskó Gábor doktorandusz hallgató, Miskolci Egyetem, Eljárástechnika Tanszék

** Prof. dr. habil Csőke Barnabás, Miskolci Egyetem, Eljárástechnika Tanszék

felhasználása környezetvédelmi, gazdasági és társadalmi szempontból is előnyös megoldást jelent.

A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy az együttégetés során a klinkergyártás zavartalan működése érdekében fokozott figyelmet kell fordítani a felhasznált helyettesítő anyagok vizsgálatára és előkészítésre, mivel összetételük, illetve fizikai-kémiai tulajdonságaik révén hatással lehetnek a klinkerégetés folyamatára és berendezéseire. A negatív hatások figyelmen kívül hagyása végső soron a klinkertermelési kapacitás csökkenéséhez, illetve a költségek növekedéséhez vezethetnek. A lehetséges hatások közül előjáróban ki kell emelni a fajlagos hőenergia-fogyasztás növekedését, az égési folyamat romlását, az egyre gyakoribbá váló kemenceállásokat, valamint a klinkerminőségre gyakorolt hatást, mely faktorok a felhasználható hulladékmennyiségek tekintetében egyúttal korlátozó tényezőket jelenthetnek.

2. Helyettesítő anyagok beadagolási módjai

A hulladékalapú helyettesítő anyagok klinkergyártásban történő felhasználásának egyik sarkalatos pontja a kemencébe történő beadagolás helye, mely nemcsak környezetvédelmi szempontból, hanem a kemence, illetve a csatlakozó berendezések működésének szempontjából is lényeges kérdés. A beadagolás helyét alapvetően a klinkergyártási technológia (1. ábra), illetve a hulladék jellemzői határozzák meg.

3. Negatív hatások

Amennyiben a felhasznált helyettesítő anyagoknak alacsony a fűtőértékük, magas a hamutartalmuk, magas a víztartalmuk, nagy mennyiségű ún. körfolyamatot képező elemet tartalmaznak vagy

durva szemcseméretűek, akkor nagy valószínűséggel számítani kell valamilyen negatív hatásra, mely előbb vagy utóbb érezhetően befolyásolja a klinkerégetés folyamatát. Ha kis mennyiségben kerül felhasználásra a hulladék, akkor előfordulhat, hogy a hatásukat nem lehet kimutatni az egyes paraméterek természetes ingadozásai miatt, ezért az ilyen megfigyeléseket nem lehet extrapolálni nagyobb mennyiségekre.

A cementgyárak számára végső soron a termelési költségek alakulása, a kemence kihasználtsága és a klinkerminőség a legfontosabb paraméterek, melyek megfelelő szinten tartása elsődleges szempont. A hulladékalapú helyettesítő anyagok helytelen felhasználása mindhárom tényezőre negatív hatással lehet, mivel a gyártási folyamatba bekerülő anyagok víztartalma, hamutartalma, homogenitásuk és a körfolyamatot képező elemek mennyisége egyaránt befolyással bírnak. A hulladékok egyes tulajdonságai különböző módon hatnak a folyamatokra, melynek főbb összefüggéseit a 2. ábra szemlélteti. A keretezésen belüli nyilak a különböző negatív hatásokat mutatják utalva arra, hogy az egyes paraméter egyenes vagy fordított arányban áll a hulladék adott tulajdonságával.

3.1. Víz- és hamutartalom

A magas víz- és hamutartalmú helyettesítő anyagok a lánghőmérséklet csökkentése, illetve a füstgáz hőmérsékletének növelése révén egyértelműen növelik a kemence fajlagos hőenergia-fogyasztását. Ez egyrészt közvetlenül növeli a költségeket, hiszen a megfelelő minőségű klinker előállításához szükséges minimális lánghőmérséklet (~2100 °C) tartásához több tüzelőanyagot kell vásárolni, másrészt a hőenergia-fogyasztás megnövekedése csökkenti a klinkertermelési kapacitást is, tehát közvetve hatással van a kemence kihasználtságára. Amennyiben a rendszerbe bejuttatott hulladéknak a klinkerhez viszonyítva jelentős hamutartalma van, akkor megfelelő módon

2. ábra. Hulladékok felhasználásának hatása a klinkerégetésre [3]

módosítani kell a nyersliszt összetételét, mivel a hamu kalcium-, szilícium-, vas-, illetve alumíniumtartalma módosíthatja a klinkerminőséget. A hulladék hamujában lévő CaO-tartalom kompenzálására általában a mésztelítési tényezőt kell megnövelni. Ha a nyersliszt fő komponense gazdag CaCO_3 -ban, akkor a kemence nagyobb hamutartalmú hulladékokat képes befogadni problémamentesen, ellenkező esetben a felhasználás erősebben korlátozott vagy esetleg más forrásból beszerzett jobb minőségű mészkővel javítható.

3.2. Inhomogenitás

A fűtőérték, illetve a betáplált anyagmennyiség rövid távú ingadozása a kemencébe kerülő hőmennyiség szabálytalan váltakozását okozza, mely a stabil kemenceműködés szempontjából nem kívánatos, ezért az ingadozást szigorú határok között kell tartani. Gyakorlati tapasztalatok alapján az alábbi irányelv fogalmazható meg:

$$\% \text{ ingadozás (hőbevitel)} \cdot \% \text{ hőenergia-helyettesítés} < 100\%,$$

ahol: $\% \text{ ingadozás (hőbevitel)} = \text{fűtőérték-ingadozás} + \text{betáplált mennyiség ingadozása}$.

Ez azt jelenti, hogy a negatív hatások elkerülése érdekében például egy 20% hőenergia-helyettesítés esetén a hőbevitel ingadozását 5% alá kell csökkenteni. Amennyiben az ingadozás magasabb, mint a fenti irányértékek, számítani lehet CO -képződésre, a hőenergia-fogyasztás megnövekedésére és ezen keresztül a termelési kapacitás csökkenésére. Másik fontos negatív hatás az égési folyamat romlása, mely közvetlenül a klinkerminőségre gyakorol negatív hatást, illetve a hőenergia-felhasználás további növekedését vonja maga után.

3.3. Szemcseméret

Elérhető hőenergia-helyettesítés különféle klinkerégető rendszerek esetén [3]

Kemencetípus	Adagolási pont	Maximális hőenergia-helyettesítés szilárd anyagok esetén
Előkalcinálós kemence	1) Főégő	< 5 mm vagy fólia esetében < 50 mm: max. 10-15% helyettesítés < 1.5 mm: max. 25% helyettesítés
	2) Előkalcináló	< 50 mm: max. 30% helyettesítés (de legfeljebb az előkalcináló hőigényének a fele)
	3) Kemencebeömlés	Nagy darabok (pl. egész gumi): max. 10% helyettesítés
Hőcserélős kemence	1) Főégő	< 5 mm vagy fólia esetében < 50 mm: max. 30% helyettesítés < 1.5 mm: max. 50% helyettesítés
	2) Másodtüzelés (kemencebeömlés vagy felszálló füstgázvezeték)	Nagy darabok (pl. egész gumi): max. 10% helyettesítés < 50 mm (pl. műanyagdarabok): max. 20% helyettesítés
Rostély hőcserélős kemence (Lepol)	1) Főégő	< 5 mm vagy fólia esetében < 50 mm: max. 30% helyettesítés < 1.5 mm: max. 50% helyettesítés
	2) Másodtüzelés (kemencebeömlés vagy forró kamra)	Nagy darabok (pl. egész gumi): max. 10% helyettesítés < 50 mm: max. 20% helyettesítés
Hosszú száraz vagy nedves kemence	1) Főégő	< 50 mm: max. 15% helyettesítés < 5 mm vagy fólia esetében < 50 mm: max. 50% helyettesítés
	2) Kemenceközépi adagoló	Nagy darabok (pl. egész gumi vagy bálák): max. 20% helyettesítés

1. táblázat

A hulladékok cementipari klinkerégető kemencékben történő felhasználása esetén kiemelt figyelmet kell fordítani azok megfelelő előkészítésére. Szilárd hulladékok esetén egyik legfontosabb szempont a hulladék szemcsemérete, mivel ez a paraméter szoros összefüggésben van az égéssel, másrészt viszont a szemcseméret csökkentésével az aprítási költségek exponenciálisan emelkednek. A kívánt szemcseméretet a kemence típusa, a kemencébe történő beadagolás helye és az előirányzott hőenergia-helyettesítés szabja meg. Az 1. táblázat összefoglalja, hogy egyes kemencetípusok, illetve beadagolási pontok esetén milyen szemcseméret szükséges ahhoz, hogy elérhető legyen a maximális hőenergia-helyettesítés.

A táblázatban szereplő hőenergia-helyettesítési értékek külön-külön értelmezendők, nem adhatók össze, tehát például egy hőcserélős kemence esetében a főégőnél vagy 30%-os helyettesítést érhetünk el < 5 mm-es szemcsemérettel, vagy 50%-ot < 1,5 mm-es szemcsemérettel.

Durva darabos hulladékok (pl. gumiabroncsok) beadagolása esetén elkerülhetetlen a lokális redukáló körülmények kialakulása a kemencében, mely a kén párolgásának megnövekedése következtében hatással van a klinkerminőségre is, mégpedig barna elszíneződést okoz a klinker belsejében. A klinker SO_3 -tartalma összefüggésben van a cement korai szilárdságával is, melynek csökkenése szintén nemkívánatos jelenség.

3.4. Körfolyamatban részt vevő elemek

A kemence stabil működésének és ezen keresztül a kemence kihasználtságának szempontjából kiemelten fontos az alkáli-kén-klór arány megfelelő fenntartása, mivel az egyensúly felborulása betapadásokhoz és ezáltal gyakori kemenceállásokhoz vezet.

A hulladékok egyrészt összetételük révén befolyásolhatják a tapadékképződést, másrészt szemcseméretük is hatással van a folyamatra, mivel durva darabos formában történő együttégetésük során a kemence különböző helyein lokális redukáló körülmények alakulnak ki. A kemencének ezen pontjain megnövekszik a kén, illetve a klór párolgása, amely a hidegebb zónákban lecsapódik, és stabil alkáli-klorid (KCl, NaCl) és alkáli-szulfát [K_2SO_4 , $K_3Na(SO_4)_2$, Na_2SO_4] vegyületek formájában tapadékokat képez. A betapadások a kemence típusától függően más-más helyeken jelentkeznek, melyet a 3. ábra szemléltet.

A gyűrűk, illetve betapadások lecsökkentik az áramlási keresztmetszeteket, ezzel megnövekszik a füstgázáram sebessége, lerontva a hőcserélőben a hőátadás hatásfokát. A nyersanyag áramlása bizonytalanná válik, mely kihat az egész rendszerre, és végső soron csökkenti a termelési kapacitást, és negatívan befolyásolja a minőséget. Az átmeneti zónában képződő réteg következtében a falazat kopása is felgyorsul, melynek cseréje meglehetősen költséges, illetve a falazás miatt eltelt idő újabb termelés kiesést jelent.

A betapadások eltávolítása felesleges kockázatot jelent a dolgozók számára is, mivel a kézi tisztítási művelet során a leszakadó forró tapadéktömbök könnyen balesetet okozhatnak. A nagyobb mennyiségben helyettesítő

anyagot használó cementgyáraknál ez hatás komoly korlátozó tényező, mely ellen a leghatékonyabb védekezés a folyamat megfelelő optimalizálása.

4. A negatív hatások minimalizálása

A fentiekben felsorolt negatív hatások minimalizálására, illetve elkerülésére számos megoldási lehetőséget dolgoztak ki az iparban, melyek egzakt számításokon, illetve gyakorlati tapasztalatokon alapulnak. A lehetőségek között egyaránt találunk egyszerű beállításokat, valamint komoly technológiai módosításokat is.

A negatív hatások minimalizálása érdekében első lépésként meg kell ismerni, hogy az egyes hatásokat milyen paraméterekkel, folyamatjelző indikátorokkal lehet jellemezni, majd meg kell határozni azok vizsgálati módszereit. Ezt követően a megfelelő összefüggések ismeretében ki lehet számolni vagy tapasztalati tények alapján meg lehet határozni az egyes paraméterekre vonatkozó határértékeket, melyek betartása mellett a klinkerégetés még zavartalanul végezhető.

Például a tapadékképződést négyféle paraméterrel jellemezhetjük, melyekre külön-külön irányértékek határozhatók meg: az egész klinkerégető rendszerre vonatkozóan az egyik fontos paraméter az alkáli/ SO_3 arány, melyet célszerű 0,8 és 1,2 között tartani, miközben egy másik jelzőszámot, az SO_3 -bevitelt úgy kell korlátozni, hogy értéke a klinkerben ne haladja meg az 1,5 tömegszázalékot. A harmadik folyamatindikátor a kén illékonyasága, melyet érdemes 0,7 alatt tartani. A negyedik mérőszám a rendszerbe bekerülő klór mennyisége, mely a kemence típusától függően eltérő lehet. Száraz bypass nélküli hőcserélős kemence esetében a megengedhető érték 200–300 mg klór/kg klinker. Ha ezt a négy határértéket betartja a cementgyár, akkor nem kell számítani betapadások miatti gyakori kemenceállásokkal.

A hatások minimalizálásának egyik lehetősége a folyamat optimalizálása, melyet a mai korszerű számítógépes folyamatirányító rendszerek segítségével jó hatásfokkal végezhetünk. A technológiai módosítások közül érdemes megemlíteni a filterpor kivételét a rendszerből, vagy a bypass technológiát, melyek elsősorban a körfolyamatot képező elemek hatását csökkentik. A betapadások miatti kemenceállások elkerülésére egyébként hatékony módszer a hőcserélő rendszeres tisztítása, például légágyú telepítésével. Alkalmazzák még a füstgázkezelési kapacitás megnövelésének módszerét, mely egyúttal termelési kapacitásnövekedést is jelent, de előfordulhat, hogy a kritikus helyeken megnövelik az áramlási keresztmetszeteket, habár ez utóbbi módszer jelentős költségráfordítást jelent.

A bemenő anyagok oldaláról kiemelten fontos a megfelelő előkészítés, melynek széles körben alkalmazott módja egy ún. előkezelő telep létesítése, ahol a különböző típusú, eltérő minőségű hulladékokból homogén, ismert összetételű helyettesítő anyagok állíthatók elő (pl. Belgi-

3. ábra: Gyűrűképződések és betapadások helyei a különféle kemence-típusoknál [1]

umban a Scoribel nevű előkezelő telep). Természetesen a gyárban található fogadó- és adagolórendszereket is úgy kell megtervezni és kivitelezni, hogy a bemenő anyag tulajdonságainak megfelelően egyenletes beadagolást biztosítsanak. A megfelelő égő alkalmazása és annak helyes beállítása (primer levegő aránya, axiális momentum, adagolási sebesség stb.) is sarkalatos pont. A helyettesítő anyagok alkalmazásakor sok esetben új égő beszerzése szükséges, mely képes egyszerre akár többféle anyagot is párhuzamosan a kemencébe juttatni (többcsatornás égő).

5. Összefoglalás

Összegzésként elmondható, hogy a hulladékalapú helyettesítő anyagok klinkergyártásban történő felhasználásának negatív hatásai megfelelő körülményekkel, illetve szükség esetén kisebb technológiamódosításokkal minimálisra csökkenthetők. Ha a helyettesítő anyagok kemencére, illetve a kapcsolódó berendezésekre gyakorolt negatív hatásait összemérjük a környezetvédelmi, gazdasági vagy társadalmi előnyökkel, akkor egyértelműen az utóbbiak javára billen a mérleg. Környezetvédelmi, illetve társadalmi szempontból figyelemre méltó, hogy hulladékalapú helyettesítő anyagok felhasználásával primer, nem megújuló erőforrásokat lehet megőrizni, valamint az együttes ellenőrzött körülmények között

végleges és megnyugtató megoldást tud nyújtani más ipari vagy lakossági tevékenységekből származó hulladékok problémájára. Egy-egy gyár több tízezer tonnás hulladék-hasznosítási kapacitásának köszönhetően a cementipar világszerte jelentős szerepet tölt be az egyes országok hulladékkezelési gondjainak orvoslásában. Az Európai Bizottság hulladékkezeléssel foglalkozó felmérése szerint csak az Európai Unió cementgyárai 2003-ban több mint 2,5 millió tonna veszélyes és nem veszélyes hulladék felhasználásával járultak hozzá a környezetterhelés csökkentéséhez. Egy cementgyár természetesen akkor tud partnerként közreműködni a hulladékkal kapcsolatos problémák megoldásában, ha a felhasználással, illetve a környezetvédelmi szolgáltatás bevételei révén csökkenteni tudja költségeit.

Irodalom

- [1] *M. Gyurech – R. Bachmann*: Calculation of the Circulation of Volatile Elements in Cement Kilns, Report PT 98/14367/E, 1998.
- [2] *Dr. Tamás F.*: Szilikátipari kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [3] *A. Obrist – D. Pauling – A. Flacher*: Low Grade Fuel Study, Report TPT 00/21018/E, 11. 12. 2001.
- [4] *M. Suter*: Kiln operation with AFR – challenges and requirements for success, Presentation, 2004.
- [5] *D. Pauling*: Installations and Experiences with Alternative Fuels at Ciments D'Obourg, Report PT 98/14336/E, 07. 07. 1998.