

alkotása és meghonosítása, az akadémiai működési rendszer korszerűsítése és részben a hazai vaskohászati ipar fejlesztése témaköreiben elért kiemelkedő eredmények révén hazai és nemzetközi szinten egyaránt rangos elismerésben részesült Kerpely Antal, s általa az új tanszék is.

Ebből következően az akadémia és azon belül a vaskohászképzés, Európára is kisugárzó, kedvező hatása akkor ismét megjelent, bizonyítva a tanszék alapításának helyességét.

Kerpely Antal – az MTA levelező tagsága (1877) mellett – 1877-ben II. osztályú vaskoronarendet, 1892-ben pedig lovagi címet kapott.

Kerpely Antal vált a magyar vaskohászat világhírnévre is szert tett legnagyobb alakjává. Kiemelkedően gazdag és szakmailag is művelt alkotó eszmeisége – az utódok igyekezetével összhangban – végig kísérte az eddig 150 éven át működő Vaskohászati Tanszék oktató és fejlesztő tevékenységének sikerekre törekvő gondolatvilágát.

HÁRI LÁSZLÓ

Vaskohászati hulladékok felhasználási lehetőségei a cementklinkergyártásban

A portlandcementek hagyományos nyersanyaga a mészkő és az agyag, melyhez még kis mennyiségben vas- és kéntartalmú pótlékokat használnak fel. A fenti anyagokból előállított cementklinkerhez kis mennyiségű gipszet vagy olykor nagymennyiségű olyan kiegészítő anyagokat kevernek, mint a granulált kohósalak, a pernye vagy a mészkő. A melléktermékek minősülő granulált kohósalakot már jól ismeri a cementipar, a jelenlegi közlemény viszont arra hívja fel a figyelmet, hogy a klinkergyártáshoz is eredményesen használhatók a vaskohászati hulladékok.

1. Történeti áttekintés

A hidraulikus kötőanyagokat vízzel péppé keverve azok levegőn és víz alatt is megszilárdulnak és a hozzájuk adott adalékanyagokat (homok, kavics, kőzúzalék) vízzel oldhatatlanul összeragasztják. Az ókori görögök vulkanikus kőzetekből, tehát természetes anyagokból állítottak elő hidraulikus kötőanyagot. Később a rómaiak ismerték fel, hogy bizonyos kőzeteket (pl. a Nápoly mellett található puccolánföldet) mésszel keverve és kiegészítve rendkívül szilárd kötőanyagok nyerhetők. Máig megmaradt az Eiffel és Köln közötti vízvezeték, illetve a római Pantheon épülete, amelyek építéséhez ilyen kötőanyagot használtak.

Agyagból és mészkőből 1824-ben *Joseph Aspdin* (1788–1855) angol kőműves égetett hidraulikus kötőanyagot, amelyet portlandcement néven szabadalmaztatott (1824), mivel színe hasonló volt, mint a Portland szigeten kitermelt kő. Ezt alkalmazták a Temze folyó alatt 1825 és 1843 között elkészült alagút építéséhez. Az igazán jó szilárdságú hidraulikus kötőanyagot, a mai mesterségesen előállított portlandcementet, 1844-ben *Isaac Johnson* állította elő, aki felismerte a klinkerképződésig való égetés és az őrlés fontosságát. Ezzel megkezdődött a cement gyártásának máig is tartó diadalútja, ugyanis a cement a világon a legnagyobb mennyiségben előállított ipari termék.

Hári László 1974-ben metallurgus üzemmérnök, 1979-ben okl. kohómérnök oklevelet szerzett, PhD tudományos fokozatát 1989-ben védte meg. Munkahelye 33 évig a Dunaújvárosi Főiskola, és 11 évig a Dunaferri volt. Előbbi munkahelyén fizikai-kémia, nyersvasgyártás és acélgégyártás tárgyakat oktatott, a Dunaferriben műszaki fejlesztéssel és környezetvédelemmel foglalkozott. Jelenleg nyugdíjas. Kutatási területe a fizikai kémia kohászati alkalmazásai, elegy- és betétszámítások, hulladékok felhasználási területeinek vizsgálata.

Ma általában márgából és mészkőből gyártanak cementet, de használják a kedvező összetételű vulkanikus tufákat is, amilyen a puccolános föld volt. Az égetést 200 m hosszú forgó dobkemencében végzik, a kiégett terméket finomra őrlik. Az adalékanyagokból és cementből előállított beton szilárdságát acél elemek beépítésével növelhetik (vasbeton). 2019-ban 4,46 milliárd tonna volt a világ cementtermelése, melyből Kína 2,67 milliárd tonnát termelt [1].

2. A cementgyártás alapanyagai

A cement a jelenlegi nevezéktan szerint fő- és mellékalkotórészekből áll. A főalkotórészek a klinker mellett a kiegészítőanyagok, a mellékalkotók legfeljebb 5%-ban vannak jelen. A cementgyártásban használt főbb kiegészítő anyagok a granulált kohósalak, a pernye, a puccolánok, traszok és a mészkő [2]. A kiegészítőanyagok között érdeklődésre tartanak számot a puccolános anyagok, melyek reakcióképes kovasavas vagy alumínium-szilikátos természetes kőzetek, melyek még vas-oxidokat is tartalmaznak. Önmagukban vízzel keverve nem kötőképesek, de finomra őrölve, az oldott kalcium-hidroxiddal reagálnak és szilárd Ca-szilikátokat és Ca-aluminátokat alkotnak. Valamennyi adalékanyagra és mellékalkotóra jellemző, hogy a klinkerrel együtt kerülnek megőrlésre.

A jelenlegi közlemény, noha megemlíti a kiegészítőanyagnak szánt granulált kohósalakok felhasználhatóságát is, fő témájában a klinkergyártáshoz való hulladékfelhasználhatóságot veszi célba.

Az 1. táblázat részadatai szerint a 27 cementfajtából hétben jelentős mennyiségű a kohósalakok aránya, ugyanakkor előrevetítjük, hogy a klinkergyártás is tartogat még a kohászat számára hulladékelhelyezési lehetőségeket. A salakok közül a cementgyártáshoz kizárólag a hidraulikus

tulajdonságú granulált kohósalak használható fel. Ez utóbbi a nyersvasgyártás mellékterméke, melyet folyékony állapotból erős vízsugárral való gyors hűtéssel nyernek. Az acélglyártási eredetű salakok granulálása Magyarországon még nem valósult meg. Az intenzív hűtés hatására a folyékony salak nem kristályosodik, hanem szétporladva 1-3 mm-es méretfrakcióban üvegesen dermed, miáltal a kristályosodási hő nem szabadul fel, hanem bezárva az anyagban marad és a később felszabaduló hidraulikus kötési energiában ölt testet.

A kész cement minőségenkénti anyag-összeállítását mutatja az 1. táblázat.

1. táblázat. Az MSZ EN 197-1:2000 szerinti általános felhasználású cementek fő összetevői m/m%-ban (részlet)

Fő cementfajta	Termékek neve és jelölése		Klinker K	Kohósalak S
CEM I	Portlandcement	CEM I	95-100	-
CEM II	Kohósalak-portlandcement	CEM II/A-S	80-94	6-20
		CEM II/B-S	69-79	21-35
CEM III	Kohósalakcement	CEM III/A	35-64	36-65
		CEM III/B	30-34	66-80
		CEM III/C	5-19	81-95
CEM IV	Puccoláncement	CEM IV		
CEM V	Kompozitcement	CEM V/A	40-64	18-30
		CEM V/B	20-38	31-50

A tiszta portlandcement-klinker hagyományos alapanyagai mintegy 75-80%-ban a mészkő, 20-25%-ban az agyag és a maradékot a piritpörk teszi ki. Felhasználható a márga is, mely mészkő és agyag keveréke. A felsorolásból kitetszik, hogy a klinker kémiai alapanyagai a CaO, SiO₂, Al₂O₃ és az Fe₂O₃. Ezek alapján könnyen meghatározhatók a vaskohászat azon melléktermékei és hulladékai, melyek sikerrel pályázhatnak a szokásos alapanyagok részleges vagy teljes helyettesítésére.

2. táblázat. A klinker gyártásához ajánlott kohászati hulladékok összetétele (m/m%) [3]

Fő nyersanyag	Kohósalak	LD-salak	EAF-salak	Samottégla	Cementklinker
CaO	39	52	27	1	61-67
SiO ₂	36	17	19	65	19-23
Al ₂ O ₃	10	2,5	8	30	2-6
Fe _{tot}	0,3	15	30	1	0-6
MgO	11	2,3	2,5	1	1-5
Szabad CaO	0	?	0	0	0-4
Na ₂ O, K ₂ O, SO ₃	1,0				0-3

A 2. táblázat a felhasználásra szóba jöhető anyagok vegyi összetételét mutatja. Perspektivikus anyagnak tartjuk a következő melléktermékeket és hulladékokat: nagyolvasztói salakkő, LD-salak, elektroacél-gyártási salak és különböző samottégla.

A táblázat adatait áttekintve megállapíthatjuk, hogy:

– a cement 95-98%-át kitevő fő alkotók ugyanazok, mint a helyettesítő anyagok oxidjai, melyek szintén az alapanyag 90-95%-át teszik ki;

- a helyettesítő anyagok inerteek, nem tartalmaznak olyan (mérgező vagy sugárzó) alkotót, mely kémiai tulajdonságánál fogva lehetetlenné tenné annak felhasználását, ellenben tartalmazhatnak olyan inert vegyületet, mely a cementben csak kis mennyiségben megengedett;
- a táblázatban ismertetett vegyi összetételek átfedése alapján megelölegezhető az a vélemény, hogy az ajánlott anyagok jelentős részben helyettesíteni tudják a hagyományos alapanyagokat.

3. Az alternatív alapanyagok jellemzése

A történeti áttekintésből is kiderül, hogy a hidraulikus kötőanyagok használata a természetes anyagokkal kezdődött és fokozatosan került át a hangsúly a mesterséges anyagokra. Míg a mesterséges hidraulikus kötőanyagok 19. századi előállítását a természetes anyagok földrajzi szűkössége és a minőségjavítás vágya egyaránt motiválhatta, addig a 21. században az alapanyagok megválasztásában egyaránt szerepet játszik a természeti anyagok szűkössége, a racionális hulladékgazdálkodás és a klímapolitika. A nem hagyományos alapanyagoknak a cementiparban való felhasználásához bizonyos fizikai és kémiai feltételeket kell teljesíteni. A fizikai feltételek általában az örlött, lisztszerű állapot biztosítására vonatkoznak. Ebben a tekintetben a

vasipar a durva- és középaprítást általában biztosítani tudja, míg az örlés és az osztályozás a cementművekben rendelkezésre álló golyósmalmokkal és szitákkal oldható meg. Az anyagválasztás kulcskérdését a hagyományos nyersanyagok pótlására szánt egyéb anyagok kémiai összetételének a megfelelősége jelenti.

3.1. A kohósalak

Magyarországon nagyolvasztósalak már csak a Dunaferriben keletkezik. Éves mennyisége a nyersvasgyártás, ill. az acélglyártás mennyiségének, valamint az érc minőségének függvénye. A 2001–2015-ös kampányidőszakban felhasznált átlagosan 61% elegykihozatalú érc-mészkő elegyből 332 kg salak keletkezett, 1 tonna nyersvasra számítva. Ugyanez az érték a 2018-as év átlagában 63,8%-os elegykihozatalra való javulás következtében 273 kg/t-ra esett vissza. Figyelembe véve az 1354 ezer tonna éves nyersvastermelést, 2018-ban 370 ezer tonna salak keletkezett. A cementgyártásban érdekes salak szempontjából ismeretes, hogy a folyékony salakot a gyártók a lehető legnagyobb arányban granulálni törekednek, azonban a technológiai adottságok és a biztonsági követelmények ezt kb. 50%-ban teszik lehetővé. A maradék salak a salakgödörbe kerül kiöntésre ahol lassan lehűlve, szürkésfehéren kristályosodik. A kristályos salak vegyi összetétele megegyezik az üvegesen dermedt granulált salakéval. Felhasználása döntően az útalapba való bedolgozással történik. Éves keletkezési mennyisége kb. 185 ezer tonna, amely hosszabb időtávban várhatóan csökkenni fog. A cementklinkergyártásban való felhasználását elősegíti a nagy CaO, SiO₂, Al₂O₃ valamint a kis Fe-tartalma, hátrányos azonban a benne levő kb. 10% MgO- és 1% alkália-oxid-tartalom [3].

3.2. Az acélgártási salakok

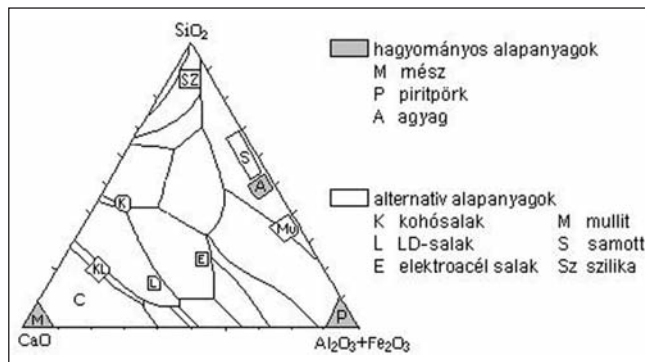
Az acélgártási salakok közül az LD-salak csak a Duna-ferrben képződik, az acélgártásban felhasznált folyékony nyersvas, szilárd acélhulladék és az égetett mész anyagokból. A salak kémiai jellemzésére használatos bázikus-ság (CaO/SiO_2) értéke általában 3,0-3,5 között van, ritkábban 2,5-3,0 között. az utóbbi években előtérbe került falkopás fokozott csökkentésére való igény a magasabb bázikus-ságot favorizálja. A salak cementgyártási szempontból fontos további mutatója a vastartalom értéke kb. 15-16%. A salak egyéb alkotói közül az MgO , Al_2O_3 , Na_2O , TiO_2 koncentrációja nem korlátozza a cementipari felhasználását. Az LD-salak gödörben hűl le, a kb. 11% fajlagos mennyiségéből és az éves kb. 1700 ezer tonna acélgártásból az éves mennyisége kb. 187 ezer tonnára becsülhető. Meg kell jegyezni, hogy fentiekben ismertetett ún. konverter-salak mellett még kb. tizedannyi ún. üstmetallurgiai salak is keletkezik, mely az előbbinél nagyobb Al_2O_3 - és kisebb Fe -tartalmú. A két minőséget a salakhalván együtt, összekeverve tárolják. Korábbi felhasználása az útalapba történt.

Az elektroacélgártási (EAF) salakok általános összetétele szintén lehetővé teszi a klinkergyártásban való felhasználást. Ez a típus az LD-salakokhoz képest kisebb bázicitású (1,5-1,7) de nagyobb Fe -tartalmú (25-30). A salakokban előforduló MgO , Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 a felhasználást nem korlátozza. Meg kell jegyezni, hogy a mindkét salaktípusban jelen levő MnO -tartalom értéke kb. 5%, melynek hatása nem ismeretes. A salak az ózdi ÓAM Kft. telephelyén keletkezik. Éves mennyisége a gyár 350 ezer tonna éves acéltermeléséből és a kb. 8-10% mennyiségű fajlagos salakjából kb. 28-35 ezer tonnára becsülhető. Az ugyanitt keletkező üstmetallurgiai salak hasonló minőségben és fajlagos arányban keletkezik, mint a dunaújvárosi.

3.3. Samott és egyéb nagy SiO_2 -tartalmú hulladékok

A kohászai üzemekben levő olvasztókemencék, üstök, izzítókemencék és egyéb berendezések béléanyagából jelentős mennyiségű samothulladék képződik. Annak ellenére, hogy az utóbbi időkben az olvasztókemencék és üstök tűzálló béléanyagát a magnezitre cserélték le, azonban a léghevítőkből, a hevítő- és izzítókemencékből, az üstök állandó béléseiből vagy a kupolókemencékből még jelentős mennyiségű samothulladék keletkezik. A téglák minősége, a felhasználás helyének függvényében változik, miszerint a kisebb tűzállóságot kívánó helyekre kisebb Al_2O_3 -tartalmú, a nagyobb tűzállóságúakhoz pedig nagyobb Al_2O_3 -tartalmú téglák kerülnek felhasználásra. Az ún. savanyú téglák katasztere a szilikatéglától kezdődően a samottminőségeken keresztül a mullittégláig terjed. Ennek megfelelően ezek SiO_2 -tartalma 95%, 55-70% és 25%, a többi Al_2O_3 és max. 5% egyéb oxid. Jellemző a hulladékok keletkezésére, hogy a kohászaton kívül is jelentős mennyiségben keletkezik. Ilyen pl. a koksolás, az üvegipar és az öntödék. Béléscsere után a téglákat vegyesen a hányóra viszik. Hasonló a helyzet az öntödei homokokkal kapcsolatban is. Értékesítésük általában nem megoldott.

Fő komponensenként vizsgálva az alternatív anyagokat, megállapítható, hogy a CaO egyik anyagban sem éri el a cementben átlagosan jelen levő kb. 62%-os értéket. Ennek következtében bármely anyagot használjuk is fel, az alter-



■ 1. ábra. A klinkergyártás hagyományos és alternatív anyagainak összehasonlítása

natív anyagokat még ki kell egészíteni a hagyományos mészkővel.

Az alternatív anyagok SiO_2 -tartalma általában meghaladja a cementben levő koncentrációt, ezért várható, hogy felhasználásuk aránya korlátozott lesz, esetleg a keverésnél szükség lesz a keverék hígítására.

A kiegészítő anyagok Al_2O_3 -tartalma szintén nagyobb, mint a cementé, ezért a nagy timföld-koncentrációjú samott várhatóan csak kismértékben vagy hígító anyaggal együtt használható fel. Hígítónak számít ebben az esetben a mészkő is, vagy minden kis Al_2O_3 -tartalmú egyéb alkotó.

A klinkerekben szükséges Fe_2O_3 -tartalom biztosítására alkalmas nagy vastartalmú acélműi salakok szintén alkalmasak a hagyományos piritpörk kiváltására.

A hagyományos és az alternatív alapanyagok legfontosabb négy alkotóját mutatja az 1. ábrán feltüntetett három-alkotós salakrendszer.

Az ábráról a következő fontos összefüggések állapíthatók meg:

- A klinker összetételét mutató KL pont az M-A (mész-anyag) pontokat összekötő vonalra esik, illetve kissé az M-A-P háromszög belsejébe. A hagyományos elegy tehát – mint az a gyakorlatból is köztudott – a fenti anyagokból összeállítható.
- A klinker a K-L-E háromszögön kívül esik, ezért a megadott három anyagból nem állítható elő. Ehhez kell a hagyományos mész is, mely a háromszöget egy poliéderré bővíti.
- A két salak közül az egyik nem okvetlenül szükséges, mivel a KL pont egyaránt az M-L-K és az M-E-K háromszögekben is benn van.
- A klinker összetételének a fenti anyagokból beállítására szinte számtalan variáció adódik, de ennek feltétele, hogy termék összetételét mutató pont az alapanyagok csúcseit összekötő konvex poliéder belsejébe (szélső esetben az oldalára) essen.
- Fenti megállapítás akkor érvényes, ha mindegyik alapanyag korlátlan felhasználhatóságú, vagyis nincs az alternatív anyagok között egy olyan szennyező mely a termékben csak igen kis mennyiségben fordulhat elő. Ilyen szennyező lehet esetleg az MgO , MnO és pl. a klór.

4. A hulladékfelhasználás általános irányelvei és korlátai

Az alternatív alapanyagok felhasználásának elengedhetet-

len feltétele, hogy a klinker, illetve a cement tulajdonságai ne változzanak a hagyományos alapanyagokból készült termékéhez képest. Az új alapanyagot ajánlónak és a felhasználónak egyaránt tisztában kell lennie az alaptulajdonságok anyagi hordozóival és azok arányváltozásainak következményeivel. A klinker és a belőle gyártott cement technológiai tulajdonságait általában nem a tájékoztatásnak szánt oxidos összetétel, hanem a komplex oxidokból álló ásványos összetétel határozza meg, melynek alapján a következő klinkerásványokat definiálja a cementipar.

Alit, trikálcium-szilikát ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, röviden: C_3S). A cement 37-60%-át teszi ki. A nagy kezdőszilárdságot adja.

Belit, dikalcium-szilikát négyféle módosulata közül a legfontosabb, a β -módosulat ($\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, röviden: $\beta\text{-}\text{C}_2\text{S}$). Mennyisége a cementben 15-37%. Kezdeti szilárdulása lassú, utószilárdulása nagy, hőfejlesztése kicsi.

Felit, trikálcium-aluminát ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, röviden: C_3A). Mennyisége a cementben 7-15%. A leggyorsabban kötő és a legtöbb hőt fejlesztő, gyenge szulfátállóságú klinkerásvány, zsugorodásra hajlamos. Ha hiányzik vagy kicsi a mennyisége a cementben, akkor a cement szulfátálló. Ellenkező esetben a cement kevésbé szulfátálló, mint a portlandcementek általában.

Celit, tetrakalcium-aluminát-ferrit ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, röviden: C_4AF). Mennyisége a cementben 10-18%. Szilárdsága igen kicsi, lassan köt. Ennek a klinkerásványnak a mennyiségét növelve a cement szulfátállósága javul.

A négy portlandcement-klinkerásvány együttesen a tiszta portlandcement 90-98%-át teszi ki. A maradék 2-10% szabad magnézium-oxidból, kalcium-szulfátból és kalcium-oxidból áll.

A klinker tulajdonságait az klinkerásványok aránya szabja meg, amelyet modulusokkal lehet szabályozni. Követelmény, hogy a modulusok értéke adott határok között legyen. Portlandcementklinker esetén a megadott határértékekkel a szilikátmodulus (SM), az aluminátmodulus (AM) és a mézstelítettségi index (TT) használatos [4].

$$SM = \frac{S}{A + F}; \quad SM = 1,8 - 2,8 \quad (1)$$

$$AM = \frac{A}{F}; \quad AM = 0,5 - 2,5 \quad (2)$$

$$TT = C - \text{CaO}_{\text{szabad}} - 1,65A - 0,35F - \frac{0,7\text{SO}_3}{2,8S}; \quad TT = 0,85 - 0,95 \quad (3)$$

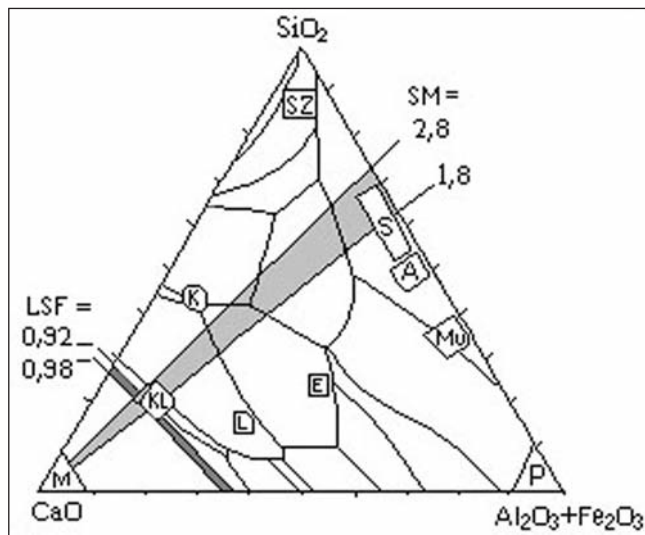
A mézstelítés kifejezésére mások a következő egyszerűbb képletet használják [5]:

$$LSF = \frac{C}{2,8S + 1,2A + 0,65F} \quad LSF = 0,92 - 0,98 \quad (4)$$

ahol az S, A, F, C betűk sorra az SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 és CaO vegyületek egyszerűsített rövidítései.

Megállapíthatjuk, hogy a helyes összetételű klinkernek az (1), (2), (3) és (4) modulusok által behatárolt területbe kell esniük. A modulusok szabályzó hatását a 2. ábra mutatja.

Az izoszilikát modulus vonalai a CaO sarokból indulnak ki és a szemközti $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ oldalt az SiO_2 -közeli saroknál metszik, melynek koordinátái számíthatók. Az izo-LSF-



■ 2. ábra. A Rankin-diagramban a klinker helye (KL) a berajzolt szilikátmodulus (SM) és a mézstelítési mutató (LSF) vonalseregeinek metszéspontjában van

vonalak közel párhuzamosak a CaO sarokkal szemközti oldallal. A két vonalsereg metszi egymást és a metszéspontok közötti terület adja a mindkét feltételnek megfelelő KL-négyszöget. A modulusok értékei szigorúan nézve nem állandók, hanem a cementtől elvárt tulajdonságok függvényében a gyártók bizonyos intervallumban változtathatják.

A gyakorlatban érvényesülő modulusok helyét a felhasznált alapanyagok tömegarányai határozzák meg. A kohósalak mennyiségének növelése ceteris paribus a szilikátmodulus értékét növeli, az LD-salak növelése pedig csökkenti.

5. A klinkergyártáshoz felhasználható hulladék mennyiségének meghatározása

Az alternatív betétanyagok lehetséges mennyiségének meghatározására a szerző egy számítási algoritmust dolgozott ki, mely az anyag- és komponensmérlegek alkalmazásával biztosítja az előírt modulusok értékét.

A számítási modell egyenletrendszerében 9 ismeretlen szerepel, melyben 3 a hagyományos, 9 pedig az alternatív alapanyag. Ezek a mézskő (M), az agyag (A), a piritpörk (P), a kohósalak (K), az LD-salak (L), az elektroacélgyártási salak (E), a mullit (Mu), a samott (Sa) és a szilikátégla (Sz). A számítások eredményei különböző feltételezések alapján alakultak ki, melyeket a sorszámok mutatnak. A 3. táblázatban közölt eredmények mindegyike kielégíti a $SM = 1,8-2,8$, $AM = 0,5-1,5$ és a $LSF = 0,92-0,98$ modulusok és az $\text{MgO} < 5\%$ követelményeket. A számítás során alkalmazott célfüggvény a hulladékmennyiség maximuma volt, az árártól függetlenül.

A 3. táblázat 1. sora a klinkergyártáshoz szükséges hagyományos alapanyagok (mészskő, agyag, piritpörk) mennyiségét mutatja a modulkövetelményeknek megfelelően számítva, 100 kg klinkerre vonatkozóan. Mivel egyes felhasznált anyagokban (M, A) az η kihozatal értéke < 1 , ezért az alapanyagok tömegeinek összege > 100 . Az itt kapott mennyiségi adatokat a továbbiakban összehasonlító bázisnak tekintjük.

A 2. sorban, az eredeti nyersanyagok mellett feltételeztük a kohósalak rendelkezésre állását is. A modulkövetel-

3. táblázat. A klinkergyártáshoz javasolt kohászati salakok mennyisége (kg/100 kg_{klinker})

Sorszám	M	A	P	K	L	E	Megjegyzés
1	113	34	3	-	-	-	Hagyományos elegy
2	75	-	6	51	-	-	Csak kohósalakkal
3	97	30	-	0	17	-	Csak LD-salakkal
4	107	31	-	0	-	10	Csak EAF-salakkal
5	58	-	-	41	-	25	Összes salakkal

4. táblázat. A klinkergyártáshoz felhasználható téglahulladékok mennyisége (kg/100 kg_{klinker})

Sorszám	M	A	P	Mu	Sa	Sz	Megjegyzés
1	113	34	3	-	-	-	Hagyományos elegy
2	113	34	3	-	-	-	Csak a mullit hatása
3	119	-	4	-	28	-	Csak a samott hatása
4	118	14	5	-	-	14	Csak a szilika hatása
5	116	-	8	6	-	18	A 3 téglá együtt

5. táblázat. A klinkergyártáshoz együttesen felhasználható salakok és téglahulladékok mennyisége (kg/100 kg_{klinker})

S	M	A	P	K	L	E	Mu	Sa	Sz	Megjegyzés
1	113	34	-	-	-	-	-	-	-	Hagyományos elegy
2	58	-	41	-	-	25	-	-	-	Összes salakkal
3	116	8	-	-	-	-	6	-	18	Összes téglával
4	58	-	41	6	-	25	-	-	-	Salakokkal és téglákkal

6. táblázat. A klinkergyártáshoz betétviszonyainak alakulása kohászati hulladékok felhasználása esetén (kg/100 kg_{klinker})

S.	M	A	P	K	E	Összesen	Megjegyzés
1	113	34	3	-	-	150	Hagyományos elegy
2	58	-	-	41	25	124	Salakokkal és téglákkal
3	-55	-34	-3	41	25	-26	Különbség (2)-(1)

mények és az anyagi tulajdonságok alapján a kohósalakkal az agyag teljes mennyiségben kiváltható volt, és a mészkő mennyisége is jelentős mennyiségben csökkent. A piritpörk mennyisége növekedett, ami annak köszönhető, hogy az elegyből eltűnt agyag Fe-tartalmát nem lehetett kis Fe-tartalmú kohósalakkal helyettesíteni. A 3. sorban az LD-salak egyedi tulajdonságait vizsgáltuk, melynek CaO- és Fe-tartalma is nagyobb, mint a kohósalaké. A számítás szerint a LD-salakból csak harmadannyi használatot fel, mint kohósalakból, aminek oka az, hogy ha a viszonylag kis mennyiségű Fe pótlása megvalósul, akkor csak az ennek megfelelő CaO-tartalom kerül a klinkerelegybe. A fentiek okán az LD-salak nagy CaO-tartalma nem használható ki.

A 4. sorban ugyanilyen okokból az előbbieknél nagyobb Fe-tartalmú és kisebb CaO-tartalmú EAF salakok felhasználhatóságának eredményei szerepelnek. Megállapítható, hogy a nagyobb Fe-tartalom miatt ebből a salakból kevesebb használható fel és a mészmegtakarító képessége is csekélyebb. Ha a számításokat olyan feltételek mellett végezzük el, amikor mind a 3 salakmennyiség rendelkezésre áll, akkor – az 5. sor szerint – lehetőség van az agyag és a piritpörk teljes mennyiségének a helyettesítésére és a mészkő megtakarítás is ekkor a legnagyobb.

A kohászatban keletkező SiO₂-ben dús anyagok, elsősorban téglahulladékok – a salakoktól függetlenül – szintén használhatók a klinkergyártásban. Jelenleg a mullit (Mu), a samott (Sa) és a szilikatéglák (Sz) felhasználhatóságát vizsgáljuk az előbbi módszerrel. A 4. táblázat ezek felhasználásának a hagyományos betétalkotókra kifejtett hatását mutatja.

A 4. táblázat 1. sora ugyanazokat a számított értékeket mutatja, mint a 3. táblázat, ugyanazon jelentéssel, de a változók ezúttal a téglahulladékok. A 2. sorban szereplő mullitéglák felhasználhatósága zérus, míg a samott-téglák felhasználásával a hagyományos betétből az agyag teljes mennyiségben kiváltható, ami azonban a mészkő és a piritpörk mennyiségének kismértékű növelésével jár. Hasonló okokra visszavezethetően, de kisebb hatása van a szilika-tégláknak is. A 3 téglá együttes rendelkezésre állásával kiváltott hatás, a mullit és a szilika révén hasonló a samottéhoz. Bármelyik helyettesítési kombinációt is nézzük, mindegyik esetében megállapítható, hogy az alapanyagok Ca hiánya miatt a téglahulladékok mészkőhelyettesítő képessége közel zérus és ez állapítható meg az Fe-hiányuk miatt a piritpörk helyettesítő képességről is. A savanyú alkotókat tartalmazó téglák – a modulok által lehetővé váló esetben – azonban képesek a cement SiO₂ és Al₂O₃ alkotóinak helyettesítésére.

A vegyes esetre vonatkozó számítás adataiból megállapítható, hogy a salakok előnyös összetétele nem teszi lehetővé a jelentősebb arányú téglafelhasználást. Ezt a helyzetet mutatja

az 5. táblázat 3. és 5. sora, ahol látható, hogy a korlátlan salakfelhasználás nem teszi lehetővé a téglafelhasználást. Téglá csak akkor használható kis mennyiségben, ha nem áll rendelkezésre salak.

A továbbiakban megállapítható, hogy egy tetszőleges alternatív hulladék annál nagyobb arányban használható a klinkergyártáshoz, minél nagyobb mennyiségben tartalmazza a klinkerben is nagy mennyiségben meglévő komponenseket. Ugyancsak megállapítható, hogy a klinkergyártás alapanyaga akkor lesz a lehető legolcsóbb, ha a legdrágább anyagok helyettesítésére kerül sor. Az alternatív betétanyagok felhasználásának másik oldala, hogy megnyitja az utat – az itt nem részletezett – a betétből származó CO₂-csökkentés előtt is. Ez utóbbi javítására a nagy CaO-tartalmú hulladékok használata az előnyös.

Az eredményeket a 6. táblázat foglalja össze, amely a felhasználható kohászati hulladékok mennyisége szempontjából legkedvezőbb esetet a hagyományos eleggyel hasonlítja össze. Ennek alapján megállapítható, hogy az összes fajlagos betét a belépő és a feleslegessé vált anyagok együttes hatására 26 kg-mal (17%-kal) csökken. Ezen belül az agyag és a piritpörk 100%-os mértékben megtakarítható lesz, a mészkőmennyiség és a benne levő CO₂-csökke-

nése 49%. Mivel a tüzelőanyag-felhasználás arányos a betétmennyiséggel, azt becsülhetjük, hogy a tüzelőanyag-megtakarításból származó CO₂-csökkenés is kb. 17%.

6. Összefoglaló

Magyarországon éppúgy, mint szerte a világban a cementgyártók keresik a cementgyártás, azon belül a klinkergyártás költségcsökkentési lehetőségeit. Ennek kijárt útja az olcsó betétanyagok, köztük az ipari hulladékok felhasználása és alternatív tüzelőanyagok beszerzése. A kohászati hulladékok elvben – kémiai összetételük alapján – alkalmasak a mész-agyag-piritpörk elegy jelentős részének helyettesítésére és ezzel párhuzamosan a mészkő- és energiacsökkenéssel arányos szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére. Megállapítottuk, hogy anyagi tulajdonságaik alapján a ko-

hósalak, majd sorrendben az LD-salak és legkisebb mértékben az elektroacélgyártási salakok, valamint a savanyú kémhatású téglahulladékok felhasználhatók a klinkergyártásban.

Irodalom

- [1] <https://sites.google.com/site/tbernadettportfolio/home/szilikatiparok/epitoipari-kotoanyagok>
- [2] <https://www.cembeton.hu/tudasbazis/cement>. Magyar Cement-, Beton- és Mészipari Szövetség
- [3] Cseh F. – Titz I. – Hevesi I.: A II. sz. nagyolvasztó kampányidőszaka. (2001.08.02.–2015.12.19.) ISD DUNAFERR Műszaki Gazdasági Közlemények 2016/4.
- [4] Portlandcement - https://hu.qaz.wiki/wiki/Portland_cement
- [5] Rao D. S., Vijayakumar T. V. et al: Geochemical assessment of a siliceous limestone sample for cement making. DOI:10.1007/s11631-011-0484-8 www.gyig.ac.cn www.springerlink.com

Az energiaintenzív ágazatok gyors intézkedést követelnek a példa nélküli energiaválság kezelésére

Az EUROFER 2021 október 20-án kiadott közleménye

Az acélipar egyike a nagy energiafelhasználó ágazatoknak; működésének gazdaságosságát az energiaárak jelentős mértékben befolyásolják. Az elmúlt év második felében ugrásszerűen megnőtt energiaárak súlyos következményeire hívta fel az EUROFER (az európai acélipar legfontosabb érdekvédő szervezete) az Unió döntéshozóinak figyelmét és javaslatokat tett a problémák kezelésére. A közlemény kibocsátása óta az újabb, egyelőre beláthatatlan következményekkel járó orosz–ukrán háború tovább súlyosbítja a helyzetet.

Az utóbbi hetekben és hónapokban exponenciálisan nőttek a gáz- és villamos energia árak, az előző év 4-5-szörösét is elérve. Ennek okai a gázpiacon (amely jelenleg a primer rövidtávú elem a rendszerben) kialakult zavarok, továbbá olyan szezonális tényezők, amelyek hatására csökkent a megújuló energiák termelése, csökkent az atomerőművek teljesítménye és nőttek a villamosenergia-árakat terhelő karbonköltségek.

Az ilyen ugrásszerű árnövekedések az energiaintenzív ágazatokat érintik leginkább; ezek végül termelés-csökkentésre és leállásra is kényszerültek. A halasztott vásárlások magas árai már a 2022 tavaszi árakban is megjelentek. Ez a trend súlyos veszélyt jelent a járvány utáni helyreállítási folyamatban.

A kis karbonköltségű energiaforrások elérése kulcsfontosságú az energiaintenzív ágazatok számára a klímasemleges cél elérése szempontjából. A jövőbeni magas, ill. bizonytalan energiaárak középtávon veszélyeztetik átalakulásukat.

Az Európai Bizottság által előterjesztett eszköztár azokat a rövidtávú intézkedéseket tartalmazza, amelyek támogatják a háztartásokat és az ipart ebben a helyzetben. Arra ösztönözzük a tagországok hatóságait, hogy az eszköztár összes lehetőségét használják ki. Egyértelmű azonban, hogy a példátlan válság miatt további sürgős intézkedésekre is szükség lesz.

A gázpiacon kialakult feszültségek enyhítése érdeké-

ben az EU-nak a lehető legnagyobb kereskedelmi és diplomáciai nyomást kell alkalmaznia a nagy gázszállítókkal szemben. Emellett ad hoc szabályokat kell hozni az állami támogatások engedélyezése területén, hogy a vállalatok a jelenleginél hatékonyabban tudjanak reagálni az energiapiacokon kialakult feszültségek idején. Ezzel párhuzamosan a téli időszakban a villamos energia és a gázpiaci igények szigorú ellenőrzését is be kell vezetni az esetleges ellátási kiesések elkerülése érdekében.

Míg a jelenlegi válságban számos konjunkturális tényező játszik szerepet, hatásai fontos középtávú jelzéseket tartalmaznak az általános klíma- és energia-feltételrendszer szempontjából is, ezért:

- az EU emissziókereskedelmi rendszerében ki kell küszöbölni a karbonköltségek hirtelen növekedését;
- a hatékony kibocsátáscsökkentés érdekében az emissziókereskedelemre vonatkozó direktívát módosítani kell;
- támogatni kell a hosszútávú áramkereskedelmi egyezményeket annak érdekében, hogy versenyképes karbonmentes villamos energia legyen elérhető az eddigénél jobban becsülhető árakon;
- az igényeket és a lehetőségeket megfelelően össze kell hangolni az ellátás stabilitásának biztosítása érdekében;
- a versenypolitikának, beleértve a megfelelő klíma, energia és környezetvédelmi szabályozókat, az ipar átalakítását kell ösztönözni.

Tardy P.