

SZILIKÁTTUDOMÁNY

CMR-(Colossal magnetoresistance) effektust mutató ABO₃ szerkezetű perovszkit (Sr₂FeMoO₆) előállítása, valamint fizikai és kémiai tulajdonságainak vizsgálata

Nagy Melinda* – Kotsis Leventéné* – Makó Éva* – Vértés Attila** – Klencsár Zoltán**

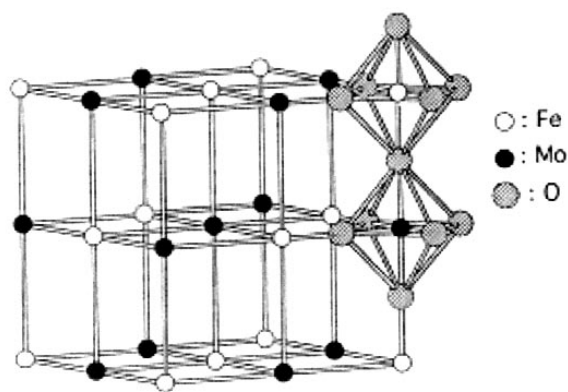
*VE Szilikát és Anyagmérnöki Tanszék, **ELTE

Bevezetés

A CMR-effektust mutató anyagoknak a technikában való alkalmazása az elektromos és mágneses elven működő eszközök – például a nagy kapacitású mágneses adattárolók – új generációjának megjelenéséhez vezethet.

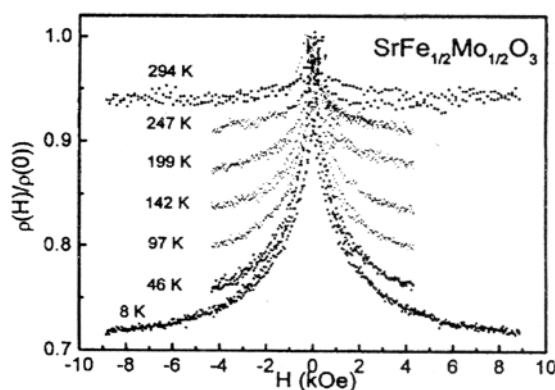
Egyedülálló elektromos és mágneses tulajdonságaik miatt a perovszkit szerkezetű oxidok ideális alanyai lettek az erősen korrelált elektronrendszerek tanulmányozásának az elmúlt másfél évtizedben.

1998-ban Kobayashi és munkatársai szobahőmérsékleten és gyenge mágneses térben is jól kimutatható CMR-effektust találtak a Sr₂FeMoO₆ rendezett perovszkitban [1]. Ebben az ABO₃ szerkezetű perovszkitban az Fe- és Mo-kationok felváltva foglalják el a B kristálytani helyzetet (1. ábra).



1. ábra. Az Sr₂FeMoO₆ szerkezete

A magas mágneses rendeződési hőmérséklet ($T_c \cong 450$ K) miatt szobahőmérséklet felett és gyenge mágneses térben is megfigyelhető mágneses ellenállás a Sr₂FeMoO₆-ra épülő perovszkit anyagokat alkalmassá tehetik széles körű gyakorlati alkalmazásra (2. ábra).



2. ábra. A normált ellenállás függése az alkalmazott mágneses tér erősségétől a Sr₂FeMoO₆ perovszkitban különböző hőmérsékleteken [2]

A különböző szerzőknél a Sr₂FeMoO₆ előállítására vonatkozóan általában szilárd és gázfázisú reakció kombinációjával találkozunk [1, 2, 3, 4, 5]. A legtöbb esetben a SrCO₃, Fe₂O₃ és MoO₃ megfelelő sztöchiometriájú keveréke a kiindulási anyag. A hőkezeléseket pedig rendszerint több lépésben, 900-1200 °C közötti hőmérsékleten, különböző atmoszférában (oxidáló, redukáló, semleges) végzik.

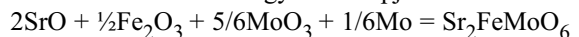
Az [1] irodalom szerzői a Sr₂FeMoO₆ minta előállításakor a kiindulási anyagok sztöchiometriai keverékét 900 °C-on 3 órán át levegő-atmoszférában kalcinálták. A kalcinált keveréket porították, pasztillát készítettek belőle, amelyet 1200 °C-on 2 órán át szintereltek 1 (V/V) % H₂/Ar áramban.

A [2] irodalom arról számol be, hogy a polikristályos Sr₂FeMoO₆ mintát szilárd fázisú reakcióval inertgáz-atmoszférában állították elő. Összekeverték a kiindulási anyagok sztöchiometriai mennyiségét, aztán szinterelték 1050 °C-on 24 órán át Ar-atmoszférában. Ezt követte a minták 800 °C-os, 1 órás hőkezelése 25 kbar nyomáson.

A [3] irodalomban a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ mintához a SrCO_3 , Fe_2O_3 és MoO_3 sztöchiometriai mennyiségét összekeverik, őrlik és kalcinálják 900°C -on 4 órán át levegő-atmoszférában. A hőkezelt keveréket újraőrlik, és 900°C -on 2 órán át 7 (V/V) %-os H_2 -tartalmú Ar áramban égetik. Végül a port őrlik, préselik és szinterelik 2 órán át tiszta Ar-gázban 1200°C -on.

Itoh és szerzőtársai [4] a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületet 10^{-11} atm nyomású oxigén-atmoszférában, a reagensek sztöchiometriai keverékéből gyors hevítéssel, 1473 K -en, meghatározott H_2/CO_2 arány mellett állították elő.

Érdekes módszerről számol be Nakawaga [5]. A mintákat a következő reakcióegyenlet alapján állította elő:



A sztöchiometriai egyenletnek megfelelő keveréket homogenizálta és préselte. A pasztillákat evakuált SiO_2 kapszulába helyezte, és 900°C -on 3 órán át hőkezelt. Hűtés után kivette a kapszulából az anyagot, ismételtlen őrölte és préselte, majd evakuált SiO_2 kapszulába helyezve 24 órán át 1100°C -on hőkezelt.

Az általunk alkalmazott módszer annyiban hasonlít az irodalomban említettekhez, hogy szilárd és gázfázisú reakción alapszik, és a kiindulási anyag is SrCO_3 , Fe_2O_3 és MoO_3 megfelelő sztöchiometriájú keveréke.

A hőkezelések hőmérséklete, időtartama és a redukáló gáz összetétele viszont egyetlen eljárással sem azonos.

1. A kísérletekhez használt eszközök

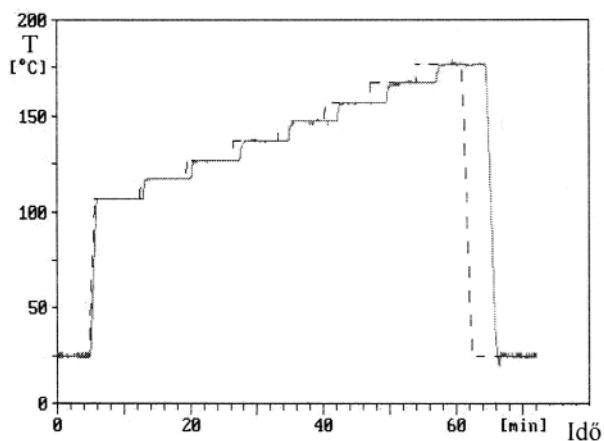
A prekursor és a végtermék ásványi összetételét Philips PW 3710 típusú diffraktométerrel vizsgáltuk, a goniométer sebessége $0,02^\circ/2\theta/\text{s}$, a sugárforrás $\text{Cu K}\alpha$ (40 kV , 40 mA) volt, a felvételek $5^\circ < 2\theta < 70^\circ$ szögtartományban készültek.

A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ elemi cella paramétereinek meghatározása Philips-Appleman-programmal [6] készült. A hevítéses röntgenkamrás vizsgálatok Philips-Anton-Paar HTK 16 kamrával történtek, a lépésköz $0,02^\circ/2\theta$, a mérés ideje 5 s/lépés volt. A fűtési programot a 3. ábra szemlélteti.

A morfológiai vizsgálatokhoz Jeol JSM 50A típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtunk.

A mágneses szuszceptibilitás vizsgálatához Gouy módszerét alkalmaztuk, amelynél az inhomogén mágneses térben elhelyezett mintára ható erőből határoztuk meg a mágneses szuszceptibilitást BRUKER B-E típusú berendezésben.

A Mössbauer spektroszkópiai vizsgálatok során a spektrum standard transzmissziós geometriában készült, 57 Co (Rh) forrás alkalmazásával, s a minta folyékony héliummal hűtött kriosztátban foglalt helyet. A mérés folyamán a minta hőmérséklete $T = 4,2\text{ K}$ volt.

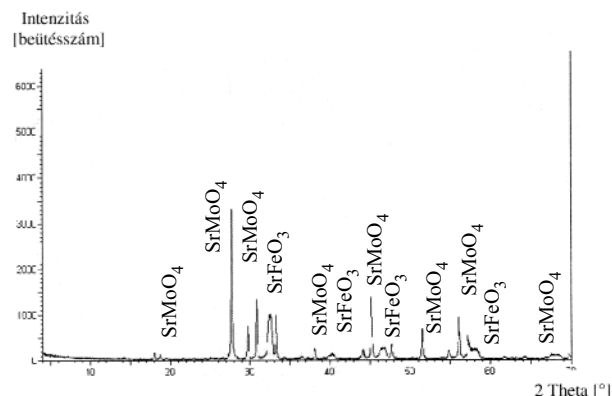


3. ábra. A fűtési program a hevítéses röntgenkamrás vizsgálatoknál

2. A prekursor előállítása és vizsgálata

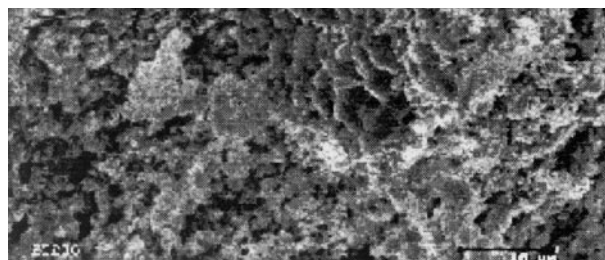
A SrCO_3 , Fe_2O_3 és MoO_3 sztöchiometriai mennyiségét összekevertük, homogenizáltuk, majd 100 MPa nyomással 20 mm átmérőjű és $2\text{--}3\text{ mm}$ vastag pasztillát készítettünk belőle, és kalcináltuk 900°C -on 4 órán át levegő-atmoszférában.

A keverék fázisösszetételének azonosítása röntgendiffrakciós vizsgálattal (4. ábra) történt, melyből megállapítható, hogy a prekursor SrMoO_4 -ból és SrFeO_3 -ból áll.



4. ábra. A prekursor röntgendiffrakciós felvétele

A szemcseméret követésére pásztázó elektronmikroszkópos felvételt készítettünk, melyből látható, hogy a szemcseméret $5\text{ }\mu\text{m}$ alatti, valamint megállapítható, hogy a prekursor sok pórust tartalmaz (5. ábra).



5. ábra. A prekursor elektronmikroszkópos felvétele

3. A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ előállítása hőntartási kísérletekkel

A prekursorzt, amely SrMoO_4 -ot és SrFeO_3 -ot tartalmazott újraőröltük, újból pasztillát készítettünk, és ismételtén hőkezeltük 900 °C-on 5 (V/V) % H_2 -tartalmú N_2 gázatmoszférában különböző hőntartási ideig.

A különböző ideig hőkezelt mintákban röntgendiffrakcióval vizsgáltuk a bennük maradt szennyezés (a mintában maradó SrMoO_4 legnagyobb intenzitású csúcsa) nagyságát, és ez alapján állapítottuk meg az ideális hőntartási időt (1. táblázat).

A mintákat a második hőkezelés előtt gondosan porítottuk, és vagy por, vagy pasztilla formájában (100 MPa) újraégettük.

1. táblázat

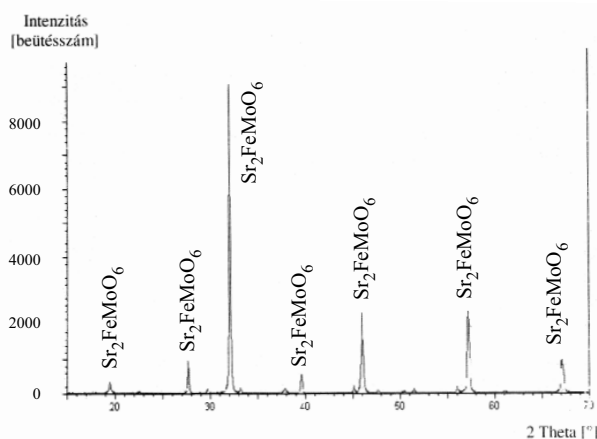
A szennyezés változása a hőntartási idő függvényében

Égetési hőmérséklet [°C]	Hőntartási idő [h]	Vizsgálandó minta	SrMoO_4 intenzitása (2 0 4) [beütésszám]
900	2	por	2247
900	2x2	por	204
900	2x2	pasztilla	142
900	5	por	524
900	5	pasztilla	237

A fentiek alapján az ideális hőntartási időt 2 x 2 órára választottuk, mert ebben az esetben volt a legkisebb a mintában maradó SrMoO_4 intenzitása.

Mindezek alapján a fázisanalitikailag legtisztább minőségű $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületet a következőképpen állítottuk elő:

A SrCO_3 , Fe_2O_3 és MoO_3 sztöchiometriai mennyiségét összekevertük, homogenizáltuk, majd pasztillát készítettünk belőle, és kalcináltuk 900 °C-on 4 órán át levegő-atmoszférában. Az így előállított prekursorzt, mely SrMoO_4 -ot és SrFeO_3 -ot tartalmazott, újraőröltük, újból



6. ábra. Az előállított $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ minta röntgendiffrakciós felvétele

pasztillát készítettünk, és 900 °C-on 2 órán át 5 (V/V) % H_2 -tartalmú N_2 gázatmoszférában hőkezeltük, majd a pasztillát újraőröltük és újból pasztillát készítettünk belőle, és még 2 óráig égettük az előzőekben leírt körülmények között. A 6. ábra röntgendiffrakciós felvétele azt bizonyítja, hogy sikerült közel röntgentiszta $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületet előállítani.

Rácsparaméterek meghatározása

A 2. táblázat az előállított $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyület rácsparaméter-értékeit mutatja.

2. táblázat

A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ rácsparaméter-értékei

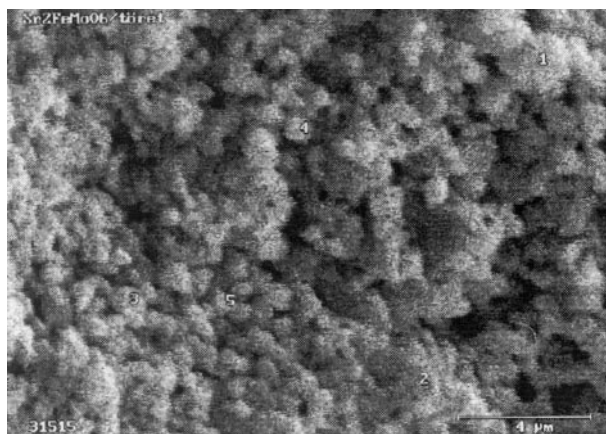
	a [Å]	c [Å]
Elemi cella	5,576	7,888
Hiba	$0,397 \times 10^{-2}$	$0,739 \times 10^{-2}$

Mindkét rácsparaméter-érték közel áll a [7] irodalomban közlőhöz ($a = 5,557128$ Å, $c = 7,89461$ Å), ugyanis a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ a tetragonális rendszer I4/m tércsoportjában kristályosodik.

4. A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ morfológiája és fizikai tulajdonságai

Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

A 7. ábrán a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ pasztilla töretfelületéről készült felvételen látható, hogy az előállított $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ szemcsemérete 1-2 µm-es, és a pasztilla pórusos szerkezetű.

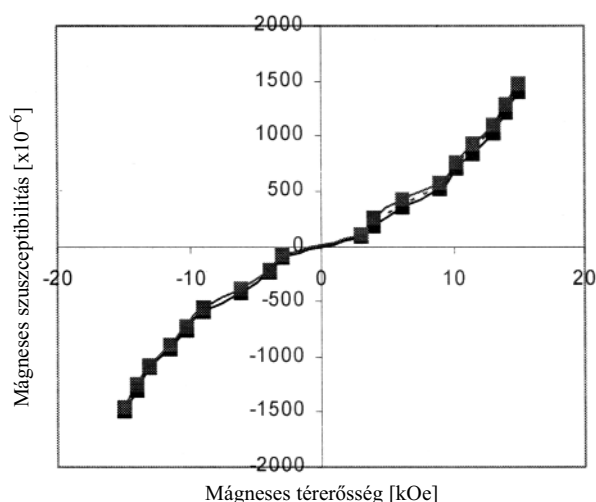


7. ábra. A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ minta elektronmikroszkópos felvétele

Mágneses szuszceptibilitás vizsgálata

A 8. ábrán a mágneses térerősség függvényében ábrázoltuk a mágneses szuszceptibilitást szobahőmérsékleten. A

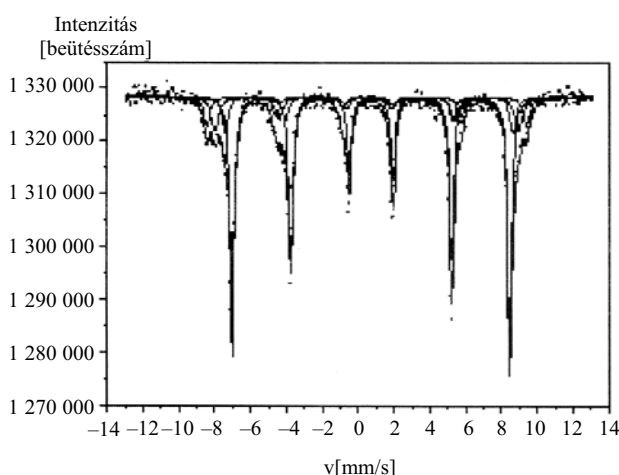
$\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületnél nem tapasztalható remanens mágnesség, s a mágneses hiszterézis is rendkívül csekély mértékű 300 K-en.



8. ábra. A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ minta mágneses szuszceptibilitásának vizsgálata

Mössbauer-spektroszkópiai vizsgálat

A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ perovszkit ^{57}Fe Mössbauer-spektroszkópiai vizsgálatára a KFKI Szilárdtest-fizikai Kutatóintézet Mössbauer-laboratóriumában került sor. A mérés folyamán a minta hőmérséklete $T = 4,2$ K volt. A mérés eredményeképp kapott Mössbauer-spektrum az 9. ábrán látható. A spektrum négy különböző alspektrumra dekomponálható, melyek mindegyike mágneses felhasadást mutat jelezve, hogy a megfelelő vas mikrokörnyezetekben az ^{57}Fe atommag helyén mágneses tér található. Az egyes alspektrumok Mössbauer-paraméterei az 3. táblázatban láthatók.



9. ábra. A $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ Mössbauer-spektruma

A spektrum 61 százalékát kitevő A jelzésű főkom-

ponens az ideális, rendezett $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ perovszkit szerkezethez rendelhető hozzá. Az s elektronok ^{57}Fe atommag helyén mért sűrűségével arányos izomereltolódási paraméter és a mag helyén mért elektromos térgradiens mértékével arányos kvadrupólusfelhasadási paraméter az A komponens esetében megfeleltethető egy oktaéderez oxigénkoordinációjú vaskation jelének. A mágneses tér értéke (≈ 48 T) és az izomereltolódás (≈ 0.73 mm/s) a vas köztes, 2+ és 3+ közötti valenciaállapotára utal. Ez a valenciaállapot egy olyan nagyspinű $3d^6$ konfigurációjú Fe^{2+} elektronkonfigurációra enged következtetni, melyben a hatodik elektron részben delokalizált.

3. táblázat

Az alspektrumok Mössbauer-paraméterei

Komponens A	
Területi arány	61(2)%
Izomereltolódás	0.727(2) mm/s
Mágneses tér	48.14(2) Tesla
Kvadrupólusfelhasadás	-0.004(3) mm/s
Vonalszélesség	0.280(6) mm/s
Komponens B	
Területi arány	13(3)%
Izomereltolódás	0.620(15) mm/s
Mágneses tér	49.92(16) Tesla
Kvadrupólusfelhasadás	0.00(1) mm/s
Vonalszélesség	0.40(5) mm/s
Komponens C	
Területi arány	15(3)%
Izomereltolódás	0.493(16) mm/s
Mágneses tér	52.64(18) Tesla
Kvadrupólusfelhasadás	-0.005(6) mm/s
Vonalszélesség	0.50(7) mm/s
Komponens D	
Területi arány	11(3)%
Izomereltolódás	0.527(15) mm/s
Mágneses tér	55.40(15) Tesla
Kvadrupólusfelhasadás	-0.096(32) mm/s
Vonalszélesség	0.44(6) mm/s

Az A, B, C és D alkomponensek ebben a sorrendben növekvő mágneses térrel rendelkeznek. Az A, B és C komponensek ezzel egyidejűleg csökkenő izomereltolódás értékeket is mutatnak. A nagyobb mágneses térrel egyidejűleg csökkenő izomereltolódás magasabb vas valenciaállapotra utal. Ennek megfelelően az A, B és C alkomponensekhez olyan, az ideálistól eltérő vas mikrokörnyezetek rendelhetők hozzá, melyekben egyre kisebb a vas 3d pályáján lokalizált elektronok száma. A D komponens esetében talált 0.527 mm/s izomereltolódás és 55.4 T mágneses tér már kifejezetten egy nagyspinű Fe^{3+} állapotra utal.

Az ^{57}Fe Mössbauer-spektroszkópiai mérések alapján tehát elmondható, hogy a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ perovszkitban a vas mind Fe^{3+} , mind pedig jól elkülöníthető Fe^{2+} és Fe^{3+} közötti köztes valenciaállapotokban található.

A hevítéses röntgenkamrás vizsgálat eredményeinek összefoglalása

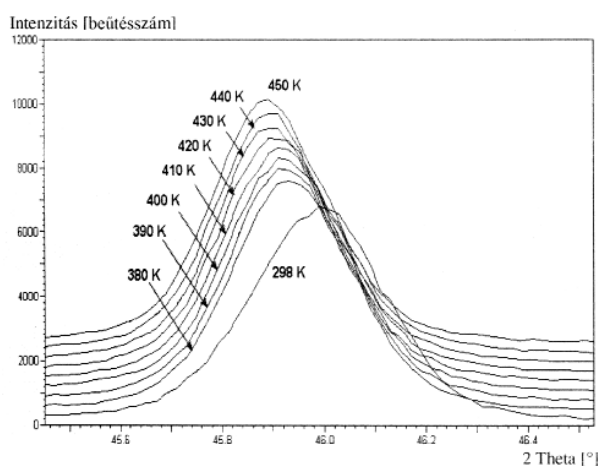
T [K]	[° 2θ]	d	(004) reflexióterület [beütésszám·° _{2θ}]	[° 2θ]	d	(200) reflexióterület [beütésszám·° _{2θ}]	$\frac{\text{terület}_{(200)}}{\text{terület}_{(004)}}$
298	45,840	1,926	268,10	45,983	1,920	1356,44	5,06
380	45,834	1,936	288,91	45,929	1,922	1305,65	4,52
390	45,839	1,926	320,93	45,922	1,922	1276,80	3,98
400	45,823	1,926	201,44	45,912	1,923	1388,30	6,89
410	45,816	1,927	193,62	45,905	1,923	1398,80	7,22
420	45,814	1,927	207,89	45,899	1,923	1394,62	6,70
430	45,821	1,926	186,08	45,890	1,924	1403,25	7,54
440	45,791	1,928	91,26	45,881	1,924	1503,85	16,47
450	45,786	1,928	98,32	45,875	1,924	1510,04	15,34

Hevítőkamrás röntgendiffrakciós vizsgálat

A vizsgálat célja a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ minta T_C (Curie) hőmérsékletének megállapítása volt.

Az [5] irodalom alapján a tetragonális $\leftrightarrow$ köbös módosulátváltozás jól követhető neutrondiffrakcióval. 13 K hőmérsékleten a tetragonális rendszerű $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -ban a (220) és (004) Miller-indexű reflexiók jól elkülönülnek egymástól. A hőmérséklet növekedésének függvényében intenzitásarányuk változik. A Curie-hőmérsékleten e két reflexió átalakul a köbös fázis (400) Miller-indexű egyetlen reflexiójává.

A Curie-hőmérséklet megállapítására He-atmoszférában hevítéses röntgenkamrás felvételeket készítettünk, a 380-450 K-es hőmérséklet közben 10 K-enként növelve a hőmérsékletet (2 perces hőtartás után) a $2\theta = 45,4-46,6^\circ$ -os szögtartományban (10. ábra). A látszólag rendkívül hasonló görbéknel a PC-PAD Profile Fit programmal az egyetlen reflexió csúcsnak látszó görbéket két csúcsra bontottuk fel. A csúcsok helyét és „d” értékét, a csúcsokhoz tartozó területek nagyságát, továbbá a csúcs-területek arányát a 4. táblázatban tüntettük fel.



10. ábra. Hevítéses röntgenkamrás felvételek

Látható, hogy 440 K-en hirtelen csupán egy csúcs (400) válik dominánssá, így ez a hőmérséklet tekinthető a minta Curie-hőmérsékletének. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a minta kis tömegű át nem alakult fázist is tartalmaz.

Összefoglalás

CMR-effektust mutató $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületet állítottunk elő SrCO_3 , Fe_2O_3 és MoO_3 kiindulási anyagokból. A SrMoO_4 és SrFeO_3 keverékből álló prekursor előállítása a homogenizált és pasztillázott SrCO_3 , Fe_2O_3 és MoO_3 keverék 900 °C-os 4 órás levegő-atmoszférában történő hőkezelésével történt. A prekursor aprításával és pasztillázásával, majd 900 °C-os 2 órás 5 (V/V) % H_2 -tartalmú N_2 -atmoszférában való hőkezelésével, majd ismételt aprítással és pasztillázással és azonos feltételek melletti hőkezeléssel közel röntgentszta $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületet állítottunk elő, tetragonális cellájának rácsparaméterei:

$$a = 5,576 \pm 3,97 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}, c = 7,888 \pm 7,39 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}.$$

Ezen 1-2 μm -es szemcsékből felépülő anyag mágneses szuszeptibilitásának vizsgálata azt mutatta, hogy nem tapasztalható remanens mágnesség a $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -vegyületnél. Az ^{57}Fe Mössbauer-spektroszkópos vizsgálat alapján elmondható, hogy e vegyületben a Fe 89 % (m/m)-a Fe^{2+} és Fe^{3+} közötti köztes valenciaállapotokban, míg 11 % (m/m)-a Fe^{3+} formájában található. A hevítőkamrás röntgendiffrakciós vizsgálat szerint az előállított $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ minta T_C (Curie) hőmérséklete ~ 440 K.

„Készült az OTKA (F 034837 és T 034839) és a Bolyai János és Széchenyi Professzori Ösztöndíj támogatásával.”

Irodalom

- [1] K.-I. Kobayashi –T. Kimura –H. Sawada –K. Terakura –Y. Tokura: Nature 395 15 (1998) 677-680.
- [2] T. H. Kim –M. Uehara –S.-V. Cheong: Applied Physics Letters 74 12 (1999) 1737-1739.
- [3] B. Garcia-Landa –C. Ritter –M. R. Ibarra –J. Blasco –P. A. Algarabel –R. Mahendiran –J. Garcia: Solid State Communications 110 (1999) 435-438.
- [4] M. Itoh –I. Ohta –Y. Inaguma: Materials Science and Engineering B41 (1996) 55-58.
- [5] T. Nakawaga: Journal of the Physical Society of Japan 24 4 (1968) 806-811.
- [6] D.E. Appleman –H. T. Evans, Jr.: Geological Survey Computer Contribution, Program Number W 9214
- [7] O. Chmaissem –R. Kruk –B. Dabrowski –D. E. Brown –X. Xiong –S. Kolesnik –J. D. Jorgensen –C. W. Kimball: The American Physical Society 62 21 (2000) 14 197-14 206.

Nyomelemek hatása a cementklinker képződési folyamataira, kristályszerkezetére és tulajdonságaira

Opoczky Ludmilla, CEMKUT Kft.

Bevezetés

Az egyre fokozódó környezetvédelmi követelmények hatékony intézkedések végrehajtását sürgetik a hulladékok hasznosítása terén. A hulladékok hasznosítása tekintetében a cementiparnak kiemelt szerepe van, mivel a cementgyártási technológia alkalmas a különböző hulladékok felhasználására.

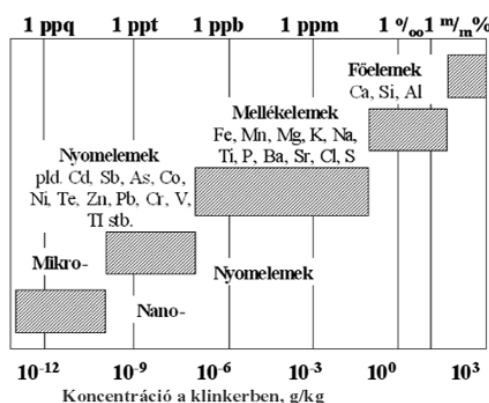
A hulladékok alternatív anyagként történő felhasználása következtében megnőtt a nyerslisztbe, a klinkerbe és a cementbe bekerülő nyomelemek és ezen belül a nehézfémek száma és mennyisége. Ezzel összefüggésben szükségessé vált a nyomelemek cementkémiai és várható környezeti hatásainak tanulmányozása.

A kutatások során a **Ba** (bárium), **Pb** (ólom), **P** (foszfor), **Ti** (titán), **Cr** (króm), **Co** (kobalt), **Ni** (nikkel), **Zn** (cink), **Cd** (kadmium) és **V** (vanádium) nyerslisztkezelhetőségére, klinkerképződési folyamatokra, a klinker és a cement egyes tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgáltuk. Ezen belül tanulmányoztuk az egyes elemek klinkerfázisok szerinti eloszlását, a klinkerfázisokba történő beépülésének jellegét, kioldódásának mértékét, mely utóbbi információt szolgáltat a nehézfémek viselkedéséről a cement feldolgozása és üzemeltetése során.

E témakörben végzett kutatásokat az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA) támogatja, ill. finanszírozza (T 029195 sz.).

Nyomelemek szerepe a cementgyártásban

A cementklinkerben lévő elemeket – koncentrációjuk alapján – fő-, mellék- és nyomelemekre osztjuk (1. ábra).



1. ábra. A cementklinker fő-, mellék- és nyomelemeinek koncentrációtartományai [1]

A cementklinker kémiai és fizikai tulajdonságait alapvetően a benne lévő fő- és mellékanyagok sorozata határozza meg. Összhányaduk a klinkerben általában ~ 99% körül van.

Azokat az elemeket, amelyek koncentrációja a klinkerben kisebb mint 100 ppm, nyomelemeknek nevezzük. A cementiparban felhasználásra kerülő természetes nyers- és hagyományos tüzelőanyagok általában csak kis mennyiségben tartalmaznak nyomelemeket. Hulladékanyagok – alternatív anyagként történő felhasználása esetén – a klinkerégető rendszerbe bekerülő nyomelemek száma és mennyisége is nő, ami ahhoz is vezethet, hogy koncentrációjuk a klinkerben a 100 ppm értéket meghaladja.

A nyomelem sorsát a cementklinker égetőrendszerben elsősorban illékonysága határozza meg. A klinkerégetésnél uralkodó magas hőmérsékleten a felhasználásra kerülő anyagokban a kötések részben vagy teljesen felbomlanak, az illékony nyomelemek nagyobb része elpárolog és átmegy a gázfázisba. A nem vagy kevésbé illékony nyomelemek jelentős része ugyanakkor a nyerslisztben marad, ill. a klinkerben megkötődik. A klinkerégető rendszerbe bekerülő nyomelemek befolyásolják a klinkerképződési folyamatokat, és hatást gyakorolnak a klinker és a cement tulajdonságaira is.

A klinkerásványok egyik fontos kristálykémiai sajátossága az, hogy képesek bizonyos mennyiségben „idegen” elemeket a rácsukba felvenni, mely beépülés következtében rácshibák keletkezhetnek: így ha a nyomelem (atom) a rács egyes pontjain lévő főelemet (atomot) (Ca, Al, Si) helyettesíti, akkor szubsztitúciós rácshibák, ha pedig rácsközi helyekre ékelődik be, intersticiós vagy Frenkel-féle rácshibák stb. A nyomelemek beépülése következtében változhat az ionok közti kémiai kötések jellege, az ionok koordinációja stb., ami végső soron a klinkerásványok tulajdonságainak változását vonhatja maga után. Kittel szerint „a szilárd test számos tulajdonsága sokkal nagyobb mértékben függ a kristály rácshibáitól, mint az alapanyagoktól, mely mintegy a rácshibák hordozójának tekinthető” [2].

A nyomelemeknek a klinkerásványok képződési folyamataira és tulajdonságaira gyakorolt hatásában meghatározó szerepet játszanak elektromos tulajdonságaik és geometriai méretük. Az elektromos tulajdonságok között a kémiai kötések alakulása szempontjából legfontosabb az adott ionok elektronegativitása és polarizációs mértéke, a geometriai méretek között pedig az ionsugár

nagysága. Az elektronegativitási értékek adnak felvilágosítást arról, hogy mely kötéstípus (ionos, kovalens) dominál az adott vegyületben. A klinkerásványok kristályainak kötéstípusai átmeneti jellegűek az ionos és kovalens között.

Az 1. táblázatban összefoglaltuk a klinker főelemeire (Ca, Si, Al), valamint a vizsgálat tárgyát képező – e cikkben tárgyalt – nyomelemekre vonatkozó, fentiekben említett jellemzőit [3, 4].

1. táblázat

Egyes ionok elektronegativitása, mérete és kötési jellege*

Ca ²⁺	Si ⁴⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Zn ²⁺	Cd ²⁺	Pb ²⁺	Co ²⁺	Ni ²⁺	Cr ³⁺	Cr ⁶⁺
Elektronegativitás										
1,0	1,8	1,5	1,8	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6
Ionsugár, Å										
1,04	0,41	0,57	0,67	0,74	0,99	1,20	0,74	0,72	0,69	0,52
Százalékos ionos jelleg (FÉM-O), %										
79	51	63	51	59	55	51	51	51	59	59

* A különböző szerzők által közölt adatok némileg eltérnek egymástól

Kísérleti anyagok és vizsgálati módszerek

Ebben a cikkben a cinkkel (Zn), nikkellel (Ni), ólommal (Pb), krómmal (Cr), kadmiummal (Cd) és kobalttal (Co) végzett vizsgálatok eredményeiről számolunk be.

Az égethetőség, ill. klinkerképződési vizsgálatokhoz igen nagy tisztaságú nyersanyagokból etalon nyerskeveréket készítettünk (TT = 0,90; SM = 2,2; AM = 1,7), melyhez különböző mennyiségben (0,05 ... 2,5 m/m%) ZnO-t, NiO-t, PbO-t, CdO-t, CoO-t és Cr₂O₃-t adagoltunk. Az ilyen módon előállított nyerskeverékeket ~ 5000 cm²/g fajlagos felületre (Blaine-szám) őröltük, majd pasztillákat készítettünk belőlük, melyeket a laboratóriumi elektromos szilitrudas kemencében levegő (oxidáló) atmoszférában 1400 C°-on 30 percig égettük. Az előállított modellklinkerekben határoztuk meg a szabad CaO-tartalmat etilénlikolos módszerrel. A modellklinkereket röntgendiffrakciós (JEOL JDX-8S típus), optikai mikroszkópi (OLYMPUS BH-2 típus) ráső fényben, valamint elektronmikroszkópi (JEOL JSM-35 típus) + mikroszkopos (EDAX, LINK típus) vizsgálatoknak vetettük alá. Az egyes nyomelemek klinkerfázisok szerinti eloszlásának vizsgálatához szelektív szétoldást (szalicilsav/metanol, cukor/desztillált víz) alkalmaztunk. A nyomelemek a cement hidraulikus, ill. fontosabb fizikai-mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata céljából a klinkereket laboratóriumi malomban ~ 3200 cm²/g fajlagos felületre (Blaine-szám) őröltük, SO₃ = 3,5 m/m%-nak megfelelő mennyiségű gipszkeverékkel együtt.

A nyomelemek, ill. nehézfémek a cement felhasználása és üzemeltetése során várható viselkedésének vizsgálata céljából kioldódási vizsgálatokat végeztünk az következők szerint:

- kioldódás desztillált vízben, mely azokról a nyomelemről, ill. nehézfémekről ad előzetes információt, melyek a cement vízzel történő összekeverése, azaz feldolgozása során a cementből azonnal kioldódhatnak;
- kioldódás ammónium-acetát pufferben (pH = 4,5) azokról a nyomelemről, ill. nehézfémekről ad előzetes információt, melyek a cement üzemeltetése során „gyenge savas” hatásokra kioldódhatnak.

A kivonatok készítése MSZ 21978-9:1998 sz. szabvány szerint történt. A kioldódott mennyiségek meghatározását ICP-AES (Atomemissziós plazmaspektrometriás) módszerrel végeztük.

Vizsgálati eredmények

Az 2. táblázatban összefoglalt égethetőségi vizsgálatok eredményeiből látható, hogy a ZnO, NiO, PbO és CoO adagolásával és mennyiségének növekedésével – a vizsgált mennyiségi tartományban – a klinkerek szabad CaO-tartalma csökkent, amiből olyan következtetés vonható le, hogy a nikkellel, az ólommal, a cinkkel és a kobalttal a nyersliszt égethetőségét, azaz a klinkerképződési folyamatokat kedvezően befolyásolják. A kadmiummal szemben növeli a nyersliszt szabad CaO-tartalmát, azaz kedvezőtlen hatást gyakorol a nyersliszt égethetőségére. Megjegyezzük, hogy az illó elemek közé tartozó kadmium hatásának tanulmányozása azért volt fontos, mert annak jelenléte az üzemi klinkerekben gyakran kimutatható.

2. táblázat

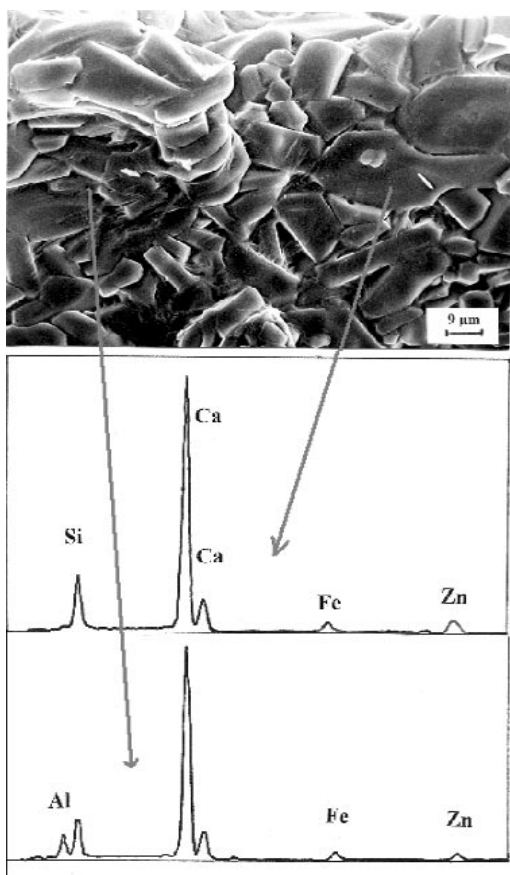
Cink, nikkellel, ólom, kadmium és kobalt hatása a nyersliszt égethetőségére

	Fém-oxid mennyisége, m/m%						
	0	0,05	0,10	0,25	0,50	1,0	2,0
ZnO							
Szabad CaO, m/m%	1,20	1,05	0,85	0,75	0,73	0,68	0,55
NiO							
Szabad CaO, m/m%	1,20	0,85	0,74	0,65	0,57	0,46	0,29
PbO							
Szabad CaO, m/m%	1,20	0,98	0,87	0,72	0,65	0,60	0,50
CdO							
Szabad CaO, m/m%	1,20	1,62	1,78	1,79	1,81	2,76	5,92
CoO							
Szabad CaO, m/m%	1,20	1,18	1,16	1,15	1,13	0,68	0,45

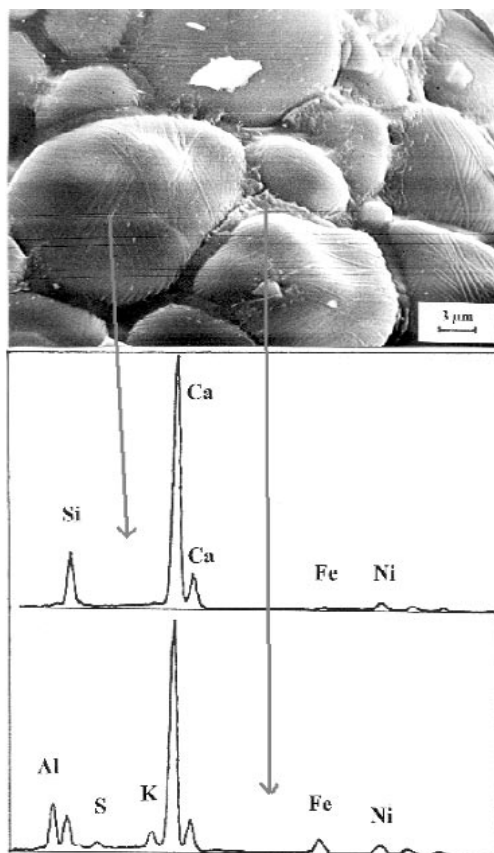
Az elektronmikroszkópi felvételek és a hozzájuk tartozó röntgenspektrumok szerint a cink (Zn) az alit- és aluminát-ferrit, a nikkellel (Ni), az ólommal (Pb), a kobalttal (Co)

és a kadmium (Cd) leginkább az *aluminát-ferrit-fázisban* koncentrálódik, de jelenlétük a *szilikátfázisokban* is kimutatható (2. ábra). Ezen megállapításokat a cink, a nik-

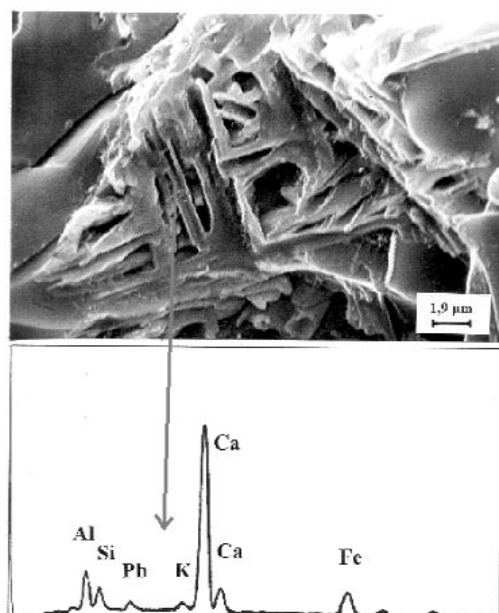
kel és az ólom vonatkozásában a szelektív szétoldási vizsgálatok is alátámasztják (3. táblázat).



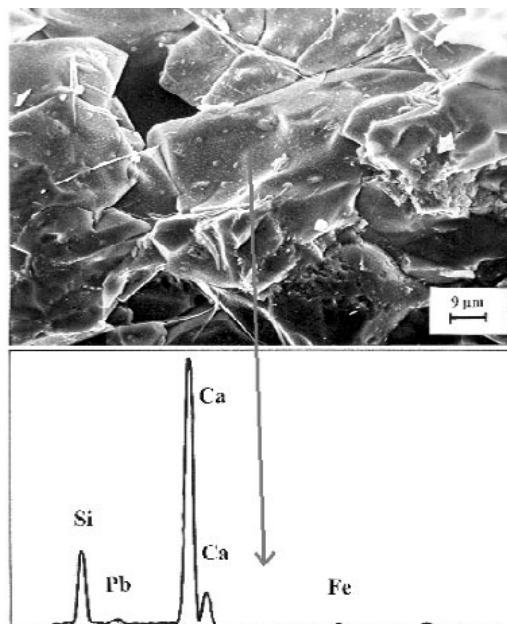
A. Cinktartalmú klinker

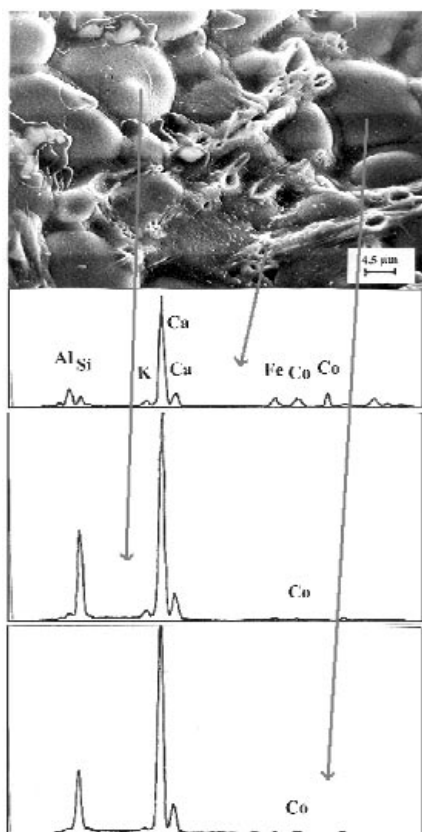


B. Nikkeltartalmú klinker

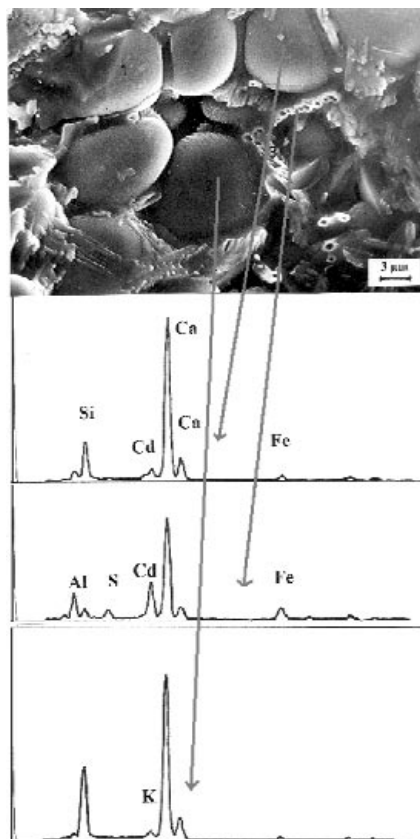


C. Ólomtartalmú klinker





D. Kobalttartalmú klinker



E. Kadmiumtartalmú klinker

2. ábra. Modellklinkerek elektronmikroszkópi felvételei és röntgenspektrumai

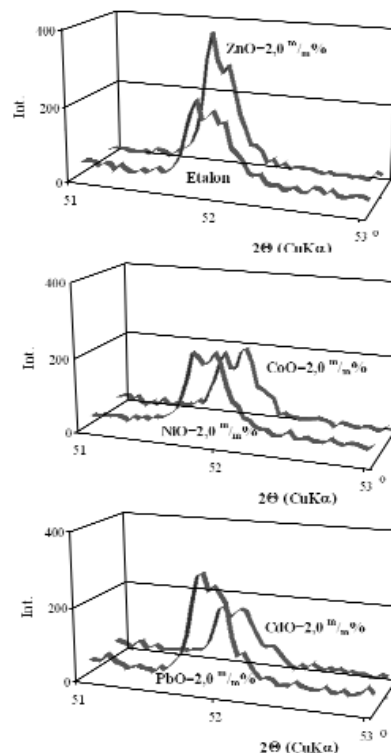
3. táblázat

Egyes nyomelemek, ill. nehézfémek klinkerfázisok szerinti eloszlása

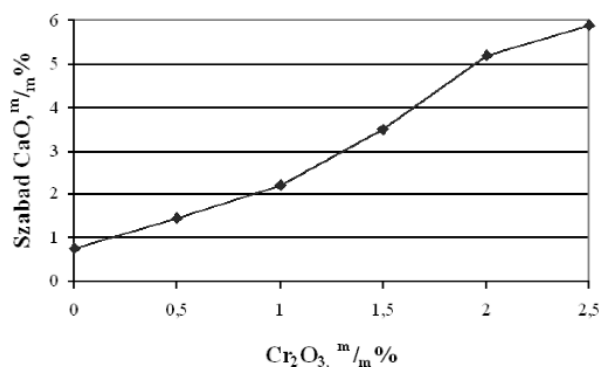
Klinkerfázisok	Komponensek		
	Zn	Ni	Pb
	m/m%		
Szilikát (alit, belit)	0,40	0,23	0,20
Aluminát-ferrit	0,72	1,82	2,00
Aluminát	0,15	0,18	0,12
Klinker ásványi össze- tetele (Bogue szerint)	$C_3S = 59,5 \text{ m/m}\%$ $C_2S = 19,8 \text{ m/m}\%$	$C_3A = 9,2 \text{ m/m}\%$ $C_4AF = 11,5 \text{ m/m}\%$	
Fém-oxid mennyisége a klinkerben	0,50 m/m%		

Röntgendiffrakciós vizsgálatok szerint – $2\theta = 51-53^\circ$ közötti csúcs alakja alapján – etalonklinker az alitot (C_3S) *triklin*, a ZnO , NiO , PbO , CdO és CoO adagolású modellklinkerek pedig *monoklin* módosulatban tartalmazzák (3. ábra).

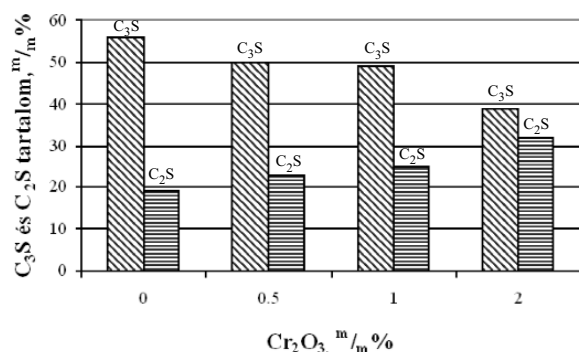
A különböző Cr_2O_3 -tartalmú nyerslisztekben laboratóriumi kemencében előállított modellklinkerek szabad CaO -tartalma a 4. ábrán, C_3S és C_2S -tartalma a 5. ábrán látható.



3. ábra. Modellklinkerek röntgendiffraktogramjai



4. ábra. Szabad CaO változása a Cr_2O_3 -tartalom függvényében



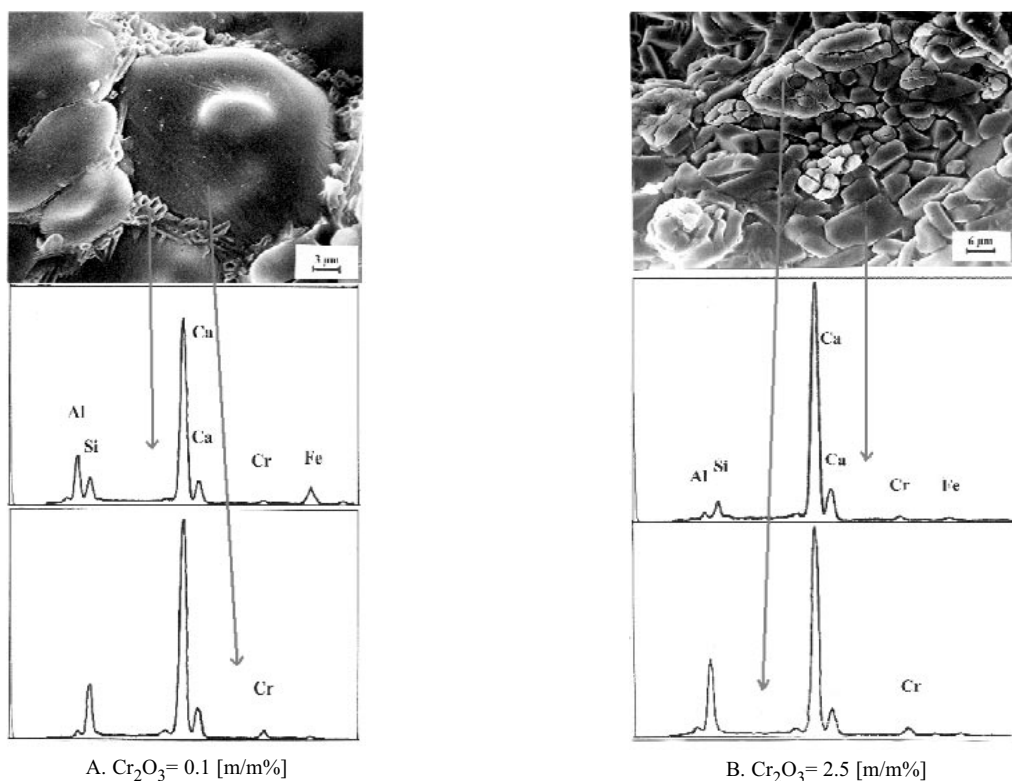
5. ábra. C_3S és C_2S mennyiségének változása a Cr_2O_3 -tartalom függvényében

Megállapítható, hogy a Cr_2O_3 -tartalom növekedésével a klinkerek szabad CaO-tartalma nőtt (4. ábra), és ezzel egyidejűleg csökkent a C_3S (alit)-, és növekedett C_2S (belit)-tartalma (5. ábra). A vizsgálati eredményekből olyan következtetés vonható le, hogy a króm kedvezőtlen hatást gyakorolt a nyersliszt égethetőségére, mintegy fékezte az alit (C_3S) képződését.

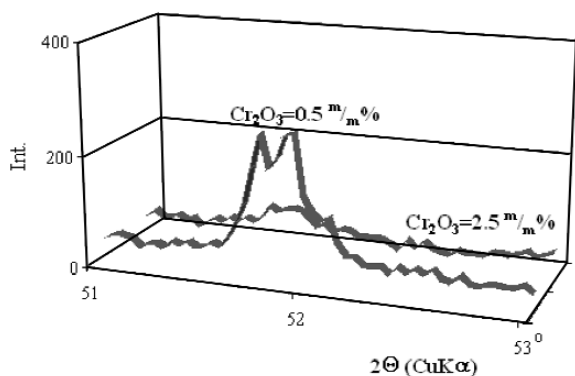
Az elektronmikroszkópi felvételek és a hozzájuk tartozó röntgenspektrumok szerint a króm leginkább a *szilikátfázisokban* (alit, belit) koncentrálódik, de jelenléte az *aluminát-ferrit-fázisban* is kimutatható (6/A ábra). A 2,5 m/m% Cr_2O_3 -adagolással készült klinker elektronmikroszkópi felvételen bomlásnak indult alit-, valamint belit- és CaO-kristályok láthatók (6/B ábra). A C_3S bomlását a 2,5 m/m% Cr_2O_3 -adagolással készült klinkerben röntgendiffrakciós felvételek is alátámasztják (7. ábra).

A különböző nyomelemek adagolásával készült modellklinkerek szövetszerkezetének jellegzetességei legjobban az alitkristályok állapotával jellemezhetők:

- a ZnO-tartalmú klinkerek jól kristályosodott, hexagonális és prizma alakú, 10-50 μm -es nagyságú alitkristályokat tartalmaznak;
- a NiO-tartalmú klinkerekre jól kristályosodott, a szokásostól eltérő, kikerekedett alakú, 15-20 μm -es nagyságú alitkristályok jelenléte a jellemző;
- a PbO-tartalmú klinkerek nagyméretű (80 μm -es), prizma alakú, hosszúkás alitkristályokat és nagyobb mennyiségű „köztes-fázist” tartalmaznak;



6. ábra. Krómtartalmú modellklinkerek elektronmikroszkópi felvételei és röntgenspektrumai



7. ábra. Krómtartalmú modellklinkerek röntgendiffraktogramjai

- a Cr_2O_3 -tartalmú klinkerekre a szokásosnál nagyobb méretű ($>100\ \mu\text{m}$) hexagonális és prizma alakú, zöld színű, „smaragdhatású” alitkristályok jelenléte a jellemző. Az alitkristályok zöld elszíneződését az alitfázisba beépült króm (Cr^{3+} és Cr^{6+}) okozza;
- a CdO - és CoO -tartalmú klinkerekre jól kristályosodott, kikerekedett formájú, $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ nagyságú alitkristályok, valamint nagyobb mennyiségű „közet-fázis” jelenléte a jellemző. A CdO -tartalmú klinkerek gyakran prizma alakú, hosszúkás – a PbO -tartalmú klinkerekéknél megfigyelthez hasonló – alitkristályokat tartalmaznak.

Vizsgálataink szerint egyes nyomelemek pozitív hatást gyakorolnak a klinkerek őrlhetőségére. Ezekkel a kérdésekkel egy másik dolgozatban foglalkozunk részletesen [5].

A $0,1\ \text{m/m}\%$ fém-oxid-adagolású modellklinkerekből előállított cementek fontosabb fizikai-mechanikai tulajdonságai nem tértek el lényegesen a fém-oxidot nem tartalmazó klinkerekből előállított cementétől. Ez a megállapítás valamennyi fém-oxiddal készült cementre vonatkozik. Ennek illusztrálására a ZnO -adagolású cementtel végzett vizsgálatok eredményeit mutatjuk be (4. táblázat).

4. táblázat

Az etalon (C_0) és a cinktartalmú (C_{Zn}) klinkerből előállított cementek fizikai-mechanikai tulajdonságai

Tulajdonságok	Cement jele	
	C_0	C_{Zn}
Fajlagos felület, cm^2/g	3230	3250
Kötési idő		
– víz a szabványos folyóssághoz, $\text{m/m}\%$	27,0	27,5
– kötés kezdete, óra-perc	3-20	3-00
– kötés vége, óra-perc	4-30	4-20
Térfogat-állandóság (Le Chatelier-gyűrű), mm	1,0	1,0
Szilárdság, MPa		
2 nap	15,8	15,0
7 nap	26,2	25,8
28 nap	34,8	35,2

* $\text{ZnO} = 0,1\ \text{m/m}\%$

A kioldódási vizsgálatok eredményeit az 5. táblázatban foglaltuk össze.

5. táblázat

$0,05\ \text{m/m}\%$ fém-oxid-tartalmú modellklinkerek kioldódási vizsgálatának eredményei

Nehézfém-tartalom, mg/kg (ppm)	Zn	Ni	Pb	Cd	Co	Cr
vízben kioldódott	$< 0,1$	$< 0,1$	< 1	$< 0,1$	$< 0,1$	46,7
amm.-acetát pufferben ($\text{pH} = 4,5$) kioldódott	$< 0,1$	$< 0,1$	< 1	$< 0,1$	$< 0,1$	48,0

A kioldódási vizsgálatok eredményeiből megállapítható, hogy a klinkerek vizes és „gyenge savas” kivonataiban valamennyi vizsgált nyomelem, ill. nehézfém koncentrációja – króm kivételével – a kimutathatósági határ alatt van. Ez mindenképpen arra enged következtetni, hogy a vizsgált nehézfémek döntő mértékben a klinkerek égetése során a klinkerfázisokban megkötődtek, mégpedig olyan „erősen”, hogy sem vízben, sem pedig „gyenge savas” ($\text{pH} = 4,5$) közegben nem oldódtak ki. A szélsőségesen kis oldhatóságot a klinkerek „vizes” kivonatainak nagy pH -értéke is okozhatta, melynek köszönhetően az egyes nehézfémek hidroxidok formájában kicsapódtak.

A Cr_2O_3 -adagolású klinker vizes és „gyenge savas” kivonatai ugyanakkor jelentős mennyiségű vízoldható Cr^{6+} -t tartalmaznak. A nyerslisztbe Cr_2O_3 -formában bevitt króm (Cr^{3+}) tehát – a kemencében uralkodó oxidáló atmoszférában – részben hatos vegyértékű krómmá (Cr^{6+}) alakult át, mely részben a klinkerfázisokban lekötődött. A klinkerfázisokban le nem kötődött, vízoldható Cr^{6+} – vizsgálataink szerint – kálium-kromátok ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ és/vagy K_2CrO_4) formájában maradt a klinkerben. Hozzá kell tenni, hogy a megszilárdult cementekből 28 és 120 napos korban sajtolással kinyert porusolatok Cr^{6+} tartalma általában sokkal kisebb annál, mint ami a cement vízzel történő keverése során a cementből azonnal kioldódik. Ebből arra lehet következtetni, hogy a cement hidratációja, ill. szilárdulása során a vízoldható kromátok jelentős része a hidratfázisokban megkötődik [6].

Fontosabb megállapítások és következtetések

Vizsgáltuk a cink (Zn) a nikkel (Ni), az ólom (Pb), a kadmium (Cd), a kobalt (Co) és a króm (Cr) által a nyersliszt égethetőségére és a klinkerképződési folyamatokra, a klinker szövetszerkezetére, valamint a cement tulajdonságaira gyakorolt hatását. Ezen belül tanulmányoztuk az egyes nyomelemek klinkerfázisok szerinti eloszlását, beépülésének jellegét stb. Elvégeztük a kioldódási vizsgálatokat is, melyek információt szolgáltatnak a nehézfémek várható környezeti hatásairól a cement feldolgozása és üzemeltetése során.

Megállapítottuk, hogy a *cink*, a *nikkel*, az *ólom* és a *kobalt* 0,05 ... 2,0 m/m%-os (fém-oxidokra számított) mennyiségben adagolva *kedvezően*, a *kadmium* és a *króm* pedig *kedvezőtlenül* befolyásolják a *nyersliszt égethetőségét*. A nyomelemek kis mennyiségben is hatást gyakorolnak az olvadékfázis mennyiségére és minőségére, elsősorban viszkozitására, valamint a klinkerfázisok képződésére stb.

A vizsgálat tárgyát képező nyomelemek a klinker égetése során a klinkerfázisokba épülnek be: a cink az *alít- és aluminátferrit-*, a króm az *alít- és belít-*, a nikkel, az ólom, a kobalt és a kadmium leginkább az *aluminátferrit-fázisban* koncentrálnak, de jelenlétük a *szilikátfázisokban* is kimutatható. A fém-oxidokat tartalmazó klinkerek az alitot (C_3S) *monoklin módosulatban* tartalmazzák.

Vizsgálataink igazolták, hogy a cink, a nikkel és a kobalt a C_3S -rácsban a Ca^{2+} -iont helyettesítik. Mivel a Zn^{2+} ($r_k = 0,74 \text{ \AA}$), a Ni^{2+} ($r_k = 0,72 \text{ \AA}$) és a Co^{2+} ($r_k = 0,74 \text{ \AA}$) ionok sugarainak mérete valamivel kisebb, mint a Ca^{2+} -ioné ($r_k = 1,04 \text{ \AA}$), ezek beépülése nem idéz elő figyelemre méltó feszültségeket, deformációkat a C_3S -kristályrácsban. A nagyobb ionsugarú Pb^{2+} ($r_k = 1,20 \text{ \AA}$) beépülése viszont deformációkat okozhat a C_3S -kristályrácsban. Az ólom beépülési jellegének (helyettesítés, beékelődés) tisztázása további vizsgálatokat igényel. A $Ca^{2+} \leftrightarrow Cd^{2+}$ ioncsere folyamatának lefolyása kérdéses. Véleményünk szerint a Cd^{2+} -ion leginkább a rácsközi helyekre ékelődik be az alitrácsban, rácshibák keletkezését vonva maga után, ami a C_3S C_2S -ra és CaO -ra történő bomlását is okozhatja. Ezzel magyarázható részben a CdO által a nyersliszt égethetőségére gyakorolt kedvezőtlen hatása. A vizsgált nyomelemek, ill. ionok Ca^{2+} -ion helyére történő beépülése következtében az alitrácsban az ionos kötés százalékos hányada csökken.

A Cr_2O_3 a nyersliszt égethetőségére, ill. az alit képződésére gyakorolt kedvezőtlen hatása azzal van összefüggésben, hogy a kemence *oxidáló atmoszférában* képződött hatos vegyértékű króm a βC_2S -t stabilizálja, mely hatás mechanizmusa abban áll, hogy a $[CrO_4]^{2-}$ -anion ($r_a = 3,00 \text{ \AA}$) a βC_2S -rácsban a $[SiO_4]^{4-}$ -anion ($r_a = 2,90 \text{ \AA}$) helyére épül be („heterovalens” izomorfizmus). E beépülés, ill. stabilizáció következtében a βC_2S oldódásának sebessége az olvadékfázisban csökken, ami lassítja, fékezi az alit (C_3S) képződését. A króm elsősorban $[CrO_4]^{2-}$ formájában épül be a $[SiO_4]^{4-}$ helyére az alít-, ill. belítfázisokba, de emellett a Cr^{3+} -formában tör-

ténő beépülésével is számolni kell [7, 8]. Mivel a Si-O komplexben a kovalens kötés hányada $\sim 50\%$, a Cr-O-ban pedig $\sim 39\%$, a fenti beépülés következtében az alit- és belitkristályokban a kovalens kötés hányada és így azok keménysége is csökken, és ezáltal javul a klinker örölhetősége [5].

A 0,1 m/m% fém-oxidot tartalmazó modellklinkerek-ből előállított cementek fontosabb hidraulikus, ill. fizikai-mechanikai tulajdonságai gyakorlatilag azonosak voltak az etalonklinkerből előállított cementével. A szélsőségesen nagy mennyiségű ($> 2,00 \text{ m/m\%}$) fém-oxidot tartalmazó cementek egyes tulajdonságai (vízigény, térfogat-állandóság, kezdeti szilárdság stb.) azonban eltértek az etaloncement tulajdonságaitól. Ezekkel a kérdésekkel egy másik dolgozatban foglalkozunk majd részletesen.

A kioldódási vizsgálatok eredményeiből olyan következtetés vonható le, hogy a vizsgált *nehézfémek* – króm kivételével – a *cement feldolgozása és üzemeltetése* során a *cementmátrixból nem fognak kioldódni, így nem kerülnek közvetlen kapcsolatba a környezettel*. A cement feldolgozása és üzemeltetése során a vízzeloldható Cr^{6+} *jelenlétéből* esetlegesen adódó környezeti hatásokkal azonban számolni kell. Ezzel összefüggésben indokolt a cementben lévő Cr^{6+} -nak Cr^{3+} -ra történő átalakítási kérdéseivel (pl. redukálószer alkalmazása) kutatási szinten foglalkozni.

Irodalom

- [1] Sprung, S.: Spurenelemente – Anreicherung und Minderungsmaßnahmen. Zement-Kalk-Gips 41 (1988) Nr. 5, pp. 251-257.
- [2] Kittel, Ch.: Bevezetés a szilárdtestfizikába. Műszaki Kiadó, Budapest, 1966.
- [3] Butt, Ju. M. – Timasev, V. V.: Portlandcementnij klinker. Sztrójizdat, Moszkva, 1967.
- [4] Berecz, E.: Kémia műszakiaknak. Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [5] Opoczky, L. – Gábel, V.: Effect of certain trace element on the grindability of cement clinkers in the connection with the use of wastes. 10th European Symposium on Comminution, Heidelberg, 2002. pp. B 43.
- [6] Opoczky, L. – Fodor, M. – Tamás, F. – Tritthart, J.: Chemical and environmental aspects of heavy metals. Cement and Concrete Research (s. a.)
- [7] Boikova, A.: Solid solution of cement-minerals. Publiser „Nauka”, Leningrad, 1974.
- [8] Opoczky, L. – Fodor, M. – Révay, Zs.: Cement chemistry and environmental effects of chromium introduced by waste materials. 14. Internationale Baustofftagung (IBAUSIL), Weimar, 2000. Vol. 1. pp. 1-0061 – 1-0068.

Hirdessen az Építőanyag című folyóiratban!

SZILIKÁTTECHNIKA

Hangszigetelés – az YTONG falak előnyös tulajdonságai*

P. Nagy József

1. Néhány fontos fogalom és törvényszerűség

1.1. Léghang, testhang

Tágabb értelemben hangnak nevezzük a rugalmas közeg (pl. levegő, beton) mindazon rezgéseit, amelyeket valamilyen hangforrás (pl. hangszer) kelt, s ezek a rezgések a közegben hullám formájában terjednek. A hangterjesztő közeg halmazállapotától függően **léghangot** és – a szerkezetekben terjedő – **testhangot** különböztetünk meg. A hallható hangok frekvenciája: 16 – 20 000 Hz.

1.2. Sávós frekvenciaelemzés

A gyakorlatban előforduló hanghatások többsége a hallható frekvenciatartomány nagy részére kiterjedő (széles sávú) zörej. Elengedhetetlen a különböző frekvenciájú összetevők erősségének megállapítása, mert az épületszerkezetek akusztikai tulajdonságai és a hallás tulajdonságai egyaránt függvényei a frekvenciának.

A zörejek frekvencia-összetevőinek erősségét **sávszűrők** alkalmazásával mérjük. A sávszűrő egy meghatározott frekvenciatartományban átengedi, azon kívül pedig nagymértékben csillapítja az összetevőket. A gyakorlatban főként oktávszűrőket és terciszűrőket (harmad-oktáv szűrőket) alkalmaznak. A sávszűrő relatív sáv szélessége: az átbocsátási sáv felső (f_2) és alsó (f_1) frekvenciájának hányadosa.

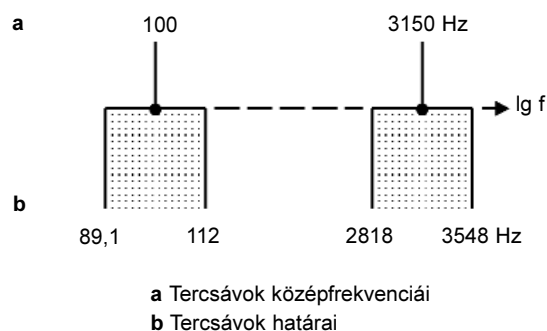
– **Oktávszűrő** esetén: $f_2 / f_1 = 2$ (1)

– **Terciszűrő** esetén: $f_2 / f_1 = 2^{1/3}$ (2)

A sávokat **a sáv középfrekvenciájával** (f_k) jellemezzük.

$$f_k = \sqrt{f_1 f_2} \text{ Hz} \quad (3)$$

A hangszigetelési jellemzőket általában 16 tercsávban vizsgáljuk, a sávközép-frekvenciák 100...3150 Hz tartományában. A vizsgált frekvenciatartomány azonban ennél nagyobb, 89,1...3548 Hz (lásd az 1. ábrát), tehát nem a teljes hallható hangtartományra terjed ki. A vizsgálati tartomány lényeges szűkítése azért lehetséges, mert e tartomány alatti kis rezgésszámokra az emberi hallás kevésbé érzékeny, a nagy rezgésszámok tartományában pedig minden megoldásnak lényegesen nagyobb a teljesítőképessége, mint a vizsgálati tartományban.



1. ábra. A hangszigetelési jellemzők vizsgálata során használt első és tizenhatodik terciszűrő adatai

1.3. A hangforrások energetikai jellemzői

A **hangteljesítmény** (P) a hangforrás által az időegység alatt kisugárzott összes hangenergia (munka) mennyiségével azonos. Mértékegysége: W (watt).

A **hangteljesítményszint**: L_P (power level)

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dB (decibel)}, \quad (4)$$

ahol P_0 a hangteljesítmény alapszintje (vonatkoztatási szintje), nemzetközi megállapodás szerint:

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W.}$$

A 2. ábrán áttekintést adunk néhány hangforrás energetikai jellemzőiről.

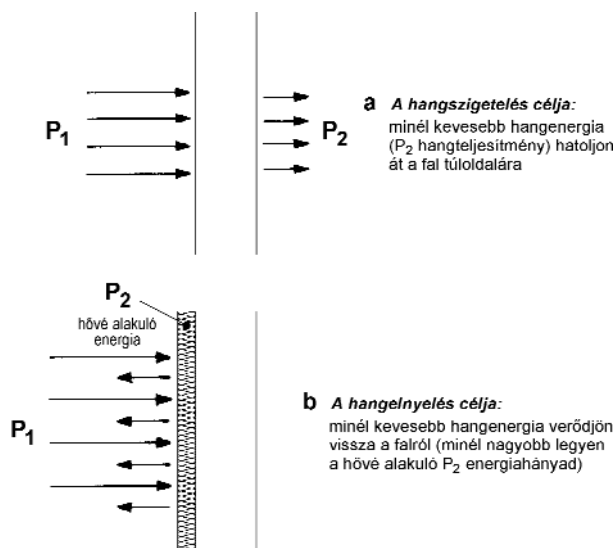
* A 2001. június 8-án rendezett I. YTONG konferencián elhangzott előadás változatlan anyaga. A hangszigeteléssel kapcsolatos általános ismeretanyag bővebben megtalálható a Szerző saját kiadásában a közeljövőben megjelenő, *A hangszigetelés elmélete és gyakorlata* című könyvében.



2. ábra. Néhány hangforrás tájékoztató jellegű hangteljesítménye és hangteljesítményszintje

1.4. A hangszigetelés fogalma és célja

A hangszigetelés azoknak az akusztikai hatásoknak az összességét jelenti, amelyek az épület valamely helyiségébe kívülről (pl. a mellette vagy fölötté lévő helyiségből, illetve a szabadból) behatoló zaj elleni védelmet szolgálják. A hangszigetelés célját – és a *hangelnyelési*ől lényegesen eltérő sajátosságát – a 3/a ábrával illusztráljuk:



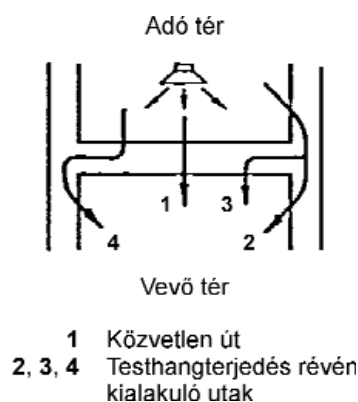
3. ábra

Hangsúlyoznunk kell, hogy míg hangelnyelési célra (pl. a helyiségen belül keletkező zaj csökkentésére) spe-

ciális *hangelnyelő* anyagokat használunk, *hangszigetelő* anyag nincs, pontosabban fogalmazva: a 4. ábrán feltüntetett hangterjedési utak sokasága révén az épület minden anyaga és szerkezete közreműködik a hangszigetelésben, kisebb-nagyobb mértékben. Nyilvánvaló azonban, hogy az anyagok egy csoportja műszaki-gazdasági szempontból a többiekénél alkalmasabb speciális szerkezetek és szerkezetkapcsolatok kialakítására.

1.5. Hangterjedési utak

A 4. ábrán feltüntettük az épületen belüli léghangszigetelés esetén elvileg lehetséges hangterjedési utakat. Az 1 jelű *közvetlen út* mellett léteznek *kerülőutak* is (lásd a 2, 3, 4 jelű hangutakat). A kerülőutakon főként testhangterjedés megy végbe. A *testhangszigetelés* a testhangterjedés akadályozását jelenti.



4. ábra. Hangterjedési utak léghangszigetelés esetén

A hangszigetelés mértékét (a terjedési utak mentén felépő energiacsökkenést) számos fizikai jelenség befolyásolja pozitív vagy negatív értelemben. A *hangvisszaverődés* (reflexió) gátolja legnagyobb és meghatározó mértékben a léghangok és a testhangok terjedését (pl. a léghangok útjában álló fal, vagy a könnyű válaszfalban haladó testhangok terjedését akadályozó vasbeton födém). Ezzel függ össze, hogy a hangszigetelést jellemző mennyiségek közül leggyakrabban a *hanggátlási számot* használjuk, amelynek fizikai definíciója a 3. ábra jelöléseivel:

$$R = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ dB}, \quad (5)$$

ahol R az angol reduction szóra utal,

P_1 hangteljesítmény az akadály előtt, dB,

P_2 hangteljesítmény az akadály után, dB.

Az (5) képlet szerint – meglehetősen nagy és műszakilag nehezen teljesíthető – 60 decibeles hanggátlás akkor jön létre, ha az akadály egymilliomod részére csökkenti az átjutó hangenergiát. Ilyenkor a kiabálás hangenergiája (10^{-2} W) csak a halk beszédnek megfelelő szintre (10^{-8} W) csökken, tehát nem jön létre tökéletes csend, mert $10 \lg (10^{-2} / 10^{-8}) = 60$ dB.

1.6. A léghangszigetelés szabványos jellemzői és követelményei

Léghanggátlási szám: R

A 4. ábrán feltüntetett 1 jelű közvetlen hangút a térelválasztó fal jellemzője, amelyet csak a kerülő hangutak terjedését kizáró akusztikai laboratóriumban lehet vizsgálni, a (6) összefüggés alkalmazásával:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \text{ dB}, \quad (6)$$

ahol L_1 átlagos hangnyomásszint valamely tercsávban az adó térben, dB,

L_2 átlagos hangnyomásszint valamely tercsávban a vevő térben, dB,

S a térelválasztó szerkezet felületének nagysága, m^2 ,

A a vevő tér egyenértékű elnyelési felülete, m^2 .

A (6) képletben lévő $(+10 \lg S/A)$ mennyiség révén a léghanggátlási szám a vizsgált szerkezet felületének nagyságától és a laboratórium tulajdonságaitól függetlenül mennyiséggé válik.

Látszólagos (helyszíni) léghanggátlási szám: R'

A kész épületben mért mennyiség, amely a 4. ábrán feltüntetett 1 jelű közvetlen hangút és a 2, 3, 4 jelű kerülőutak hatását jellemzi, ezért értéke mindig kisebb mint R , és a körülményektől függően lényegesen eltérhet a laboratóriumban mért hanggátlási számtól. R' értékét is a (6) képlettel határozzuk meg.

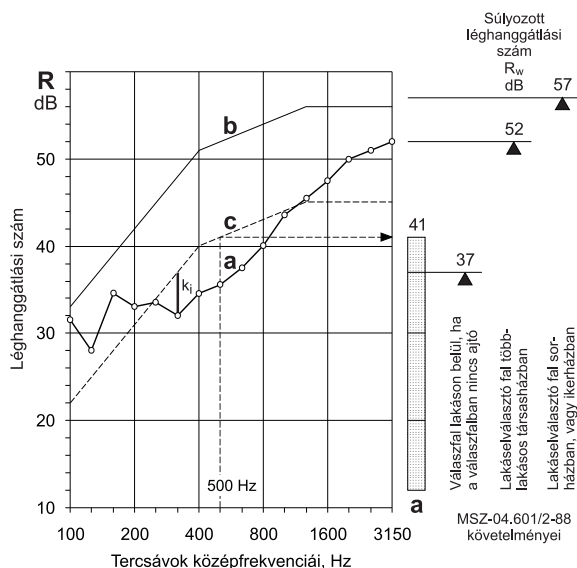
Súlyozott léghanggátlási szám: R_w, R'_w

Egyetlen számmal helyettesíti (súlyozza) a 16 tercsávban mért léghanggátlási számokat (a w index az angol *weighted* szóra utal). R_w , illetve R'_w értékét az 5. ábra alapján lehet meghatározni. A szabványok R'_w értékeivel írják elő a követelményeket.

2. Egyhéjú szerkezetek hangszigetelésének fizikai alapjai

Léghang-szigetelési szempontból **egyhéjú** és **kéthéjú** szerkezeteket különböztetünk meg. A szerkezet egyhéjú, ha a látszó felületek azonos felületi normálissal rendelkező pontjaiban a léghangok által gerjesztett rezgések iránya és erőssége (pl. a részecskesebesség, v) egyenlő (lásd a 6/a ábrát). A szerkezet kéthéjú, ha külső felületeinek rezgési iránya és erőssége nem egyenlő (lásd a 6/b ábrát).

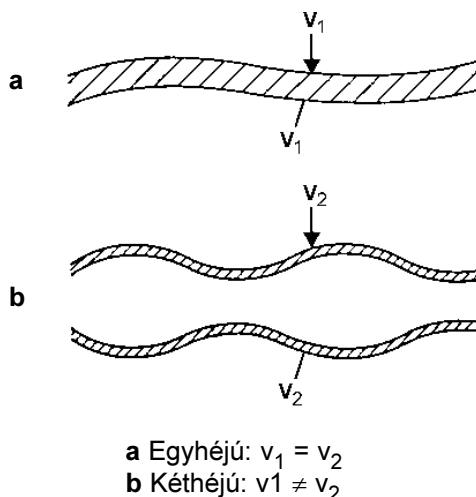
Többrétegű szerkezet is lehet akusztikai szempontból egyhéjú. Ilyen például a szokványos fa ajtószárny. (A keret és a sűrű bordázat két oldalára rétegelt lemez vagy farostlemez van ragasztva.) A legegyszerűbb egyhéjú szerkezet a homogén lemez, amelynek hangszigetelő képes-



- 10 cm vastag YTONG fal + 2x1,5 cm vakolat ($m = 84 \text{ kg/m}^2$) 16 tercsávban mért szabványos **léghanggátlási függvénye**
- Nemzetközileg elfogadott **súlyozó görbe**, amely tapasztalat alapján alakult ki (a DIN 52211 1951-ben vezette be, 25 cm vastag vakolt tömörtégla fal hangszigetelési görbéjével gyakorlatilag azonos)
- b-vel párhuzamosan szerkesztett görbe, amelynek 500 Hz-hez tartozó ordinátáját tekintjük a keresett egyszámjegyű jellemzőnek. A szerkesztés matematikai feltétele $1 < \bar{k} < 2$, ahol:

$$\bar{k} = \frac{1}{16} \sum k_i$$

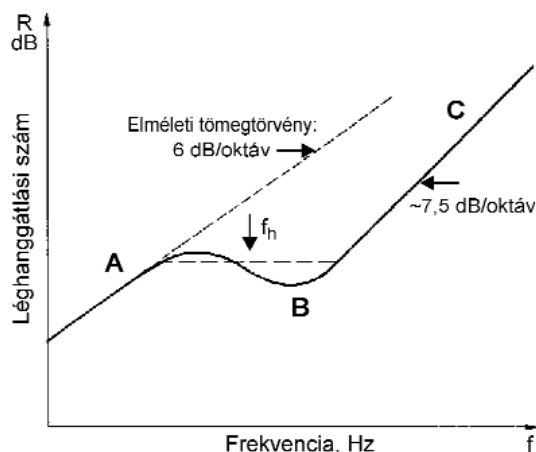
5. ábra. Szabványos módszer a léghangszigetelés minőségének egyetlen számmal történő jellemzésére



- Egyhéjú: $v_1 = v_2$
- Kéthéjú: $v_1 \neq v_2$

6. ábra. Az egyhéjú (a) és a kéthéjú (b) szerkezet fogalmának értelmezése

ségét alapvetően két tényező, a tömeg és a hajlítómerevség határozza meg. A tömeg hatása pozitív, a hajlítómerevség hatása negatív. Pozitív hatású továbbá a lemez részecskéinek rezgése közben fellépő sűrűlódás is, amely szokványos anyagú szerkezetek esetén (pl. acél, téglá, beton) gyakorlatilag elhanyagolható, de az YTONG anyagú falaknál számottevő, amint azt a következőkben számszerűen is ki fogjuk mutatni. Az egyhéjú szerkezet léghanggátlási görbéjének három jellegzetes szakaszát különböztetjük meg a 7. ábra szerint.



7. ábra. Egyhéjú szerkezet léghanggátlási görbéjének jellegzetes szakaszai

2.1. A tömeg hatása

A 7. ábra szerinti függvény legkedvezőbb A jelű szakaszában a tömeg hatása érvényesül. (Ez a szakasz optimális esetben a hangszigetelésre előírt frekvenciatartomány legnagyobb részére kiterjed.) A tömeg hanggátló hatása Newton 2. mozgástörvénye szerint (erő = tömeg × gyorsulás) megy végbe. Ennek lényege a következő.

- A lemezt rezgőmozgásba hozó F erő a tömegtehetlenséggel rendelkező lemez a rezgés gyorsulását idézi elő. Newton törvénye alapján felírhatjuk a (7) egyenletet:

$$F = ma \text{ N,} \quad (7)$$

ahol m a lemez négyzetméterenkénti tömege (kg/m^2).

- Már a (7) összefüggés alapján is kimondhatjuk, hogy adott gerjesztőerő esetén a lemez rezgéseinek erőssége annál kisebb lesz, minél nagyobb a lemez tömege. Nyilvánvaló, hogy minél kisebb a gerjesztett rezgések erőssége, annál kisebb az akadályon átjutó hangteljesítmény, ebből adódóan annál nagyobb lesz a hangszigetelés.

- További elméleti megfontolások és helyettesítések után vezethető le a (7) összefüggésből az **elméleti tömegtörvény**, amely mindkét irányban végtelen kiterjedésű és hajlítómerevséggel nem rendelkező lemez hanggátlását írja le:

$$R_0 = 20 \lg fm \cos \theta - 42 \text{ dB,} \quad (8)$$

ahol f frekvencia, Hz,

m tömeg, kg/m^2 ,

θ beesési szög (a felületi normálissal bezárt szög).

- Lakószoba-méretű, diffúz helyiségeket elválasztó szerkezet esetén feltételezzük, hogy az átlagos beesési szög 45° , feltételezzük továbbá, hogy a lemez kiterjedése véges, és merev kapcsolat van a vizsgált lemez és a hozzá csatlakozó szerkezetek között. Ilyen peremfeltételek mellett a (8) egyenlet a következők szerint módosul:

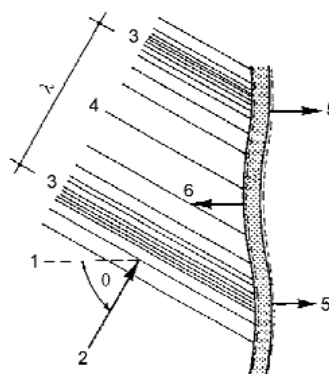
$$R_0 = 20 \lg fm - 49 \text{ dB,} \quad (9)$$

A fentiek összefoglalásaként kimondhatjuk, hogy a tömegtörvény szerint a hanggátlás a frekvencia és a tömeg növelésével folytonosan nő. (R Berger már 1911-ben felismerte ezt a törvényszerűséget.) A tömeg vagy a frekvencia kétszerezésével a hanggátlás $20 \lg 2 = 6$ decibellel növekszik.

2.2. A hajlítómerevség hatása

A 7. ábra szerinti B és C jelű szakaszban – két bonyolult fizikai jelenség kedvezőtlen hatása miatt – nem érvényesül az elméleti tömegtörvény (vö. a szaggatott vonallal jelzett függvényt a B és C jelű görbeszakaszokkal). Mindkét jelenség a hajlítómerevséggel kapcsolatos.

Az egyik jelenség az ún. „kényszer-hajlítóhullámok” energia-visszasugárzása a gerjesztési oldalra. Kedvezőtlen hatása a B és C jelű szakasz minden pontjában fellép. A lejátszódó bonyolult fizikai jelenség lényegét a 8. ábra segítségével ismertetjük.



- 1 Felületi normális
- 2,3,4 A gerjesztő léghang terjedési iránya és a részecskék sűrűsödési-, ill. ritkulási helyei
- θ, λ A léghang beesési szöge és hullámhossza
- 5,6 A kényszer – hajlítóhullám energiasugárzása a lemez túloldalára, ill. a gerjesztési oldalra

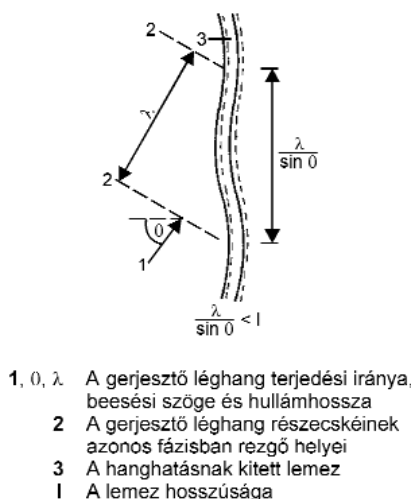
8. ábra. A kényszer-hajlítóhullám peremfeltételei nagy kiterjedésű homogén lemez esetén

A ferde szög alatt beeső léghanghullám kényszerhatást fejt ki, meghajlítja a hajlítómerevséggel rendelkező lemezt.

A kompresszióhelyeken az 5 jelű nyíl irányába, a dekompresszióhelyeken pedig a 6 jelű nyíl irányába mozdul el a lemez, majd ez az állapot az időben váltakozik és terjed a lemezben, azaz **kényszer-hajlítóhullám** jön létre, amelynek hullámhossza csak a gerjesztő léghang hullámhosszától és a beesési szögtől függ. E jelenség kedvezőtlen végeredménye az, hogy a merev lemez a 6 jelű nyíl irányába, a gerjesztési oldalra visszasugározza a hangenergia egy részét, s ezáltal nagymértékben csökkenti a léghangátvitelt.

2.3. A tömeg és a hajlítómerevség arányának hatása

A hajlítómerevséggel kapcsolatos másik, legkedvezőtlenebb jelenség a L. Cremer professzor által 1942-ben felfedezett hullámkoincidencia, amelynek hatása a 7. ábra B jelű szakaszára korlátozódik. A jelenség lényegét a 9. ábra segítségével ismertetjük.



9. ábra. A hullámkoincidencia kialakulásának peremfeltételei

A lemez léghanggal történő ferde szögű gerjesztésekor a 9. ábrán jelölt $\lambda / \sin \theta$ távolságra vannak egymástól azok a helyek, amelyeket a léghang ugyanolyan fázisállapotban (kompresszió vagy dekompresszió) gerjeszt. E távolság neve: **nyomhullámhossz** (λ_{nyom}), a léghang hullámhosszának nyoma a lemez felületén. A trigonometriai viszonyok alapján:

$$\lambda_{nyom} = \frac{\lambda}{\sin \theta} \text{ m.} \quad (10)$$

A hajlítási rezgések rezonanciaszerű felerősödése következik be (a lemez hajlításra rendkívül engedékeny), ha a nyomhullámhossz azonos a lemez tulajdonságaitól és a gerjesztőfrekvenciától függő, **szabad hajlítóhullám** (λ_h) hosszával. Ennek az azonosságnak, vagy más szóval egybeesésnek (latinul: *coincidentia*) a neve: **hullámkoincidencia**. A levezetés mellőzésével közöljük, hogy hullámkoincidencia bármely gerjesztőfrekvencia esetén létrejön, ha teljesül a következő feltétel:

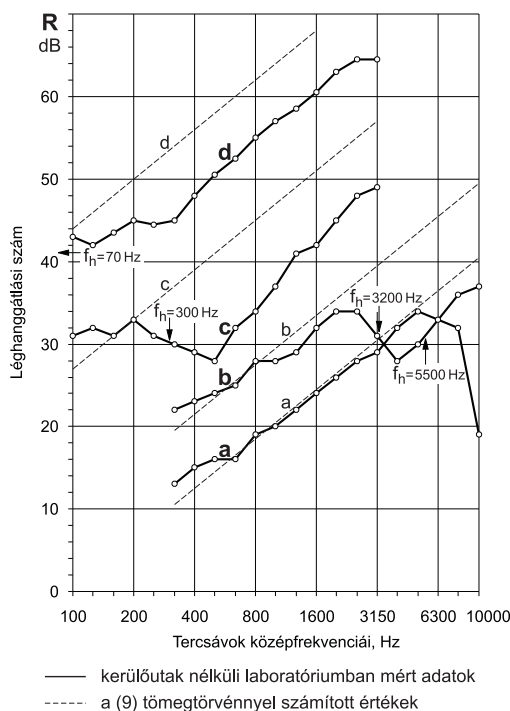
$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{EI}} \frac{1}{\sin^2 \theta} \text{ Hz,} \quad (11)$$

ahol c hangterjedési sebesség levegőben, m/s,
 m a lemez tömege, kg/m²,
 E a lemez anyagának rugalmassági modulusa, Pa = N/m²,
 I 1 m széles lemezsáv inercianyomatéka, m⁴/m,
 θ a gerjesztőléghang beesési szöge,
 $E I$ hajlítómerevség.

Diffúz terek közötti hangszigetelés esetén nagyon sok beesési szög létezik, így a hullámkoincidencia nagy frekvenciatartományra (a 7. ábra szerinti B jelű szakaszra) terjed ki. A koincidencia határesetek a lemez síkjával párhuzamos gerjesztés esetén ($\theta = 90^\circ$) jön létre. E határeset frekvenciája az ún. **határfrekvencia** (f_h). A (11) képletben $c = 343$ m/s és $\sin^2 90^\circ = 1$ helyettesítésével:

$$f_h = 18788 \sqrt{\frac{m}{EI}} \text{ Hz.} \quad (12)$$

A (12) összefüggés a hangszigetelés tervezésének egyik legfontosabb képlete, mert segítségével – a tömeg (m) és a hajlítómerevség ($E I$) arányának célszerű megválasztásával – „előírhatjuk”, hogy a hullámkoinci-



Jel	Anyag	Vastagság mm	Tömeg kg/m ²
a	Kemény farostlemez	4	3,2
b	Gipszkarton lemez	8	8
c	Gipszperlit	80	64
d	Tömörtégla + 2x1,5 cm vakolat	270	240

10. ábra. A tömeg (m) és a hajlítómerevség ($E I$) arányának tükröződése néhány homogén lemez hangszigetelési függvényében

dencia a frekvenciatartomány melyik szakaszában fejtsse ki kedvezőtlen hatását. A határfrekvencia alapján az egyhéjú szerkezeteket három jellegzetes csoportba sorolhatjuk.

- „**Elég merev**” szerkezetek: $f_h < 200$ Hz (pl. a 10. ábra d jelű megoldása). Léghanggátlásuk nem követi ugyan a tömegtörvényt, de elég nagy tömeg esetén egyhéjú vagy kéthéjú szerkezet kialakítására alkalmasak.
- „**Közepesen merev**” szerkezetek: $200 \text{ Hz} < f_h < 1600$ Hz (pl. a 10. ábra c jelű megoldása). Az ilyen szerkezetek hangszigetelésre kevésbé alkalmasak.
- „**Elég hajlékony**” lemezek: $f_h > 1600$ Hz (pl. a 10. ábra b jelű megoldása). Hanggátlási görbéjük döntő része gyakorlatilag a 7. ábra szerinti A jelű szakaszra esik, azaz viszonylag jól követik a tömegtörvényt. A hajlékony lemezek (pl. gipszkarton lemez) kéthéjú szerkezetek kialakítására, vagy merev szerkezetek hangszigetelő képességeinek javítására alkalmasak.

2.4. A sűrűdési veszteség kedvező hatása az YTONG falak hangszigetelésére

A veszteségi tényező (η) fogalma és mérése

A léghangok által gerjesztett lemezek rezgőmozgást végző részecskéi egymással sűrűlnek, miközben a rezgési energia egy része sűrűdési hővé alakul. A hővé alakult energiahányad a **veszteségi tényezővel** (loss factor, *Verlustfaktor*) arányos. Értékét valamely frekvencián a rezgési energia irreverzibilis és reverzibilis összetevőinek hányadosa adja. Az **összes veszteségi tényező** meghatározásának módszerét az MSZ EN ISO 140-3: 1998 sz. szabvány E jelű melléklete írja le. Ennek lényege a következő.

- A vizsgálat céljából beépített falat gumi alátétes kalapáccsal megütik (testrezgéseket hoznak létre). A gerjesztett rezgés erőssége a részecskék közötti sűrűdés következtében folytonosan csökken, a rezgés lecseng.
- Megméri a **lecsengési időt** (T), vagyis azt az időtartamot, amely alatt a rezgés erőssége 60 decibellel csökken.
- Az összes veszteségi tényező értékét – amely a vizsgált fal, a vakolat és a vizsgálónyílás közötti kapcsolat rezgéscsökkentő hatását is magában foglalja – az alábbi képlettel határozzák meg:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{2,2}{fT}, \quad (13)$$

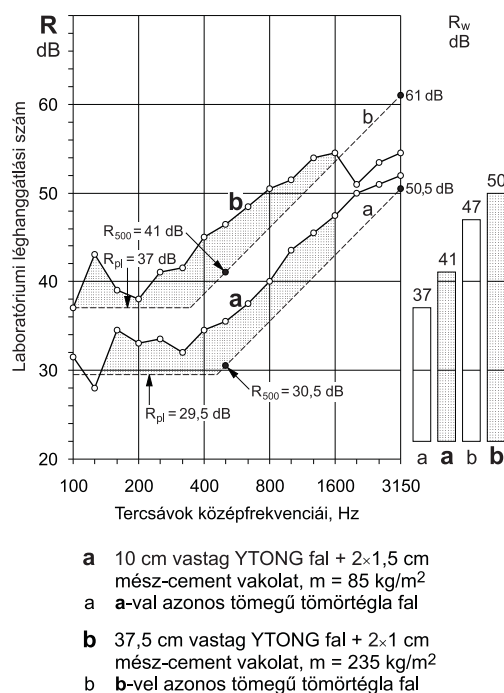
ahol f a rezgés frekvenciája, s^{-1} ,
 T utózenngési idő, s.

A (13) képlet szerint a veszteségi tényező annál nagyobb, minél kisebb T értéke, vagyis minél rövidebb idő alatt felemésztydik a rezgési energia.

Sajnálatos tény, hogy a falak hangszigetelésének vizsgálata során a veszteségi tényezőt általában nem mérik, ezért nem állnak rendelkezésünkre összehasonlításra alkalmas, megbízható adatok. Közvetett úton azonban bizonyítani tudjuk, hogy az YTONG falaknál fellép a sűrűdési energiaveszteség hangszigetelést növelő hatása.

YTONG falak és tömörtégla falak hangszigetelési görbéinek összehasonlítása

A 11. ábra adataival támasztjuk alá előbbi megállapításunkat. Ezen az ábrán összehasonlítottuk két YTONG fal laboratóriumban mért hangszigetelési jellemzőit ugyanilyen tömegű tömörtégla falak K. Gösele elméletével számított jellemzőivel. Az YTONG falak súlyozott hanggátlási számai – a lényegesen nagyobb sűrűdési veszteségnek köszönhetően – 3-4 decibellel nagyobbak, mint a tömörtégla falaké. A hangszigetelési görbéken pontozással jelöltük a különböző frekvenciasávokban mutatkozó – a sűrűdési veszteségnek köszönhető – javító hatást.



11. ábra. 500 kg/m³ térfogatsúlyú YTONG falak hangszigetelési jellemzői az ÉMI laboratóriumi vizsgálatai szerint (Gyártó: YTONG Hungary Kft.)

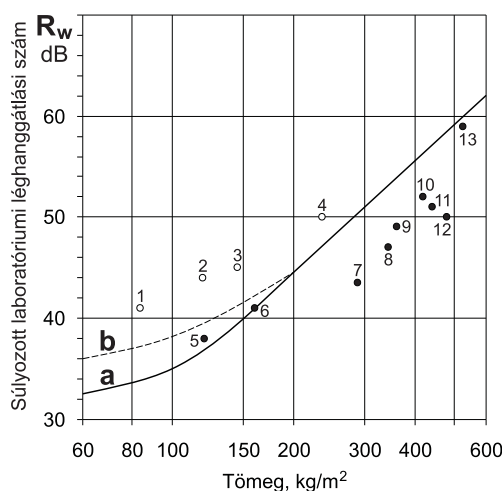
YTONG, tömörtégla és üregetégla falak súlyozott laboratóriumi hanggátlási számainak összehasonlítása

A 12. ábrán a négyzetméterenkénti tömeg függvényében ábrázoltuk a címben jelzett falak súlyozott hangszigetelési jellemzőit, a következők szerint.

- Az a jelű folytonos görbe tömörtégla falak átlagát jelzi az EN 12354 sz. nemzetközi szabvány alapján.

- A *b* jelű görbe porózus betonfalakra vonatkozik.
- Az 1 – 4 jelű pontok az YTONG Hungary Kft. által gyártott falaknak az ÉMI laboratóriumában mért adatait jelzik.
- Az 5 – 13 jelű pontok az ÉTI laboratóriumában 1989-ben vizsgált különböző típusú üregestégla falakra vonatkoznak.

A 12. ábra alapján kimondhatjuk, hogy laboratóriumi körülmények között az 500 kg/m^3 térfogatsúlyú YTONG falak – a négyzetméterenkénti tömegtől függően – 2-6 decibellel jobbak, mint az ugyanolyan tömegű tömörtégla falak (a nagyobb veszteségi tényezőnek köszönhetően), az üregestégla falak pedig átlagosan 3 decibellel rosszabbak, mint az ugyanolyan tömegű tömörtégla falak.



- a** Téglák és beton anyagú falak átlaga az EN 12354 sz. szabvány szerint
- b** Mint **a**, de porózus beton falakra
- 500 kg/m³ térfogatsúlyú YTONG falak jellemzői az ÉMI laboratóriumában
 - Szokványos üregestégla falak jellemzői az ÉTI laboratóriumában

12. ábra. Különböző anyagú falak hangszigetelési jellemzői kerülművek nélküli laboratóriumban

Egyhéjú YTONG falak „masszív” épületekben

A tervezési segédletként is használható 13. ábra lehetővé teszi, hogy az YTONG falak helyszíni körülmények között is megnyilvánuló előnyös tulajdonságait kimutassuk. A masszív épületekben elérhető súlyozott helyszíni hanggátlási szám (R'_w) értékeit a négyzetméterenkénti tömeg függvényeként ábrázoltuk, a következők szerint.

- A *b* jelű függvény – amelyet a DIN 4109–1989 sz. szabvány 1. mellékletének 1. táblázatában közölt adatokból szerkesztettük – tömörtégla falakra vonatkozik. Ennek egyenlete:

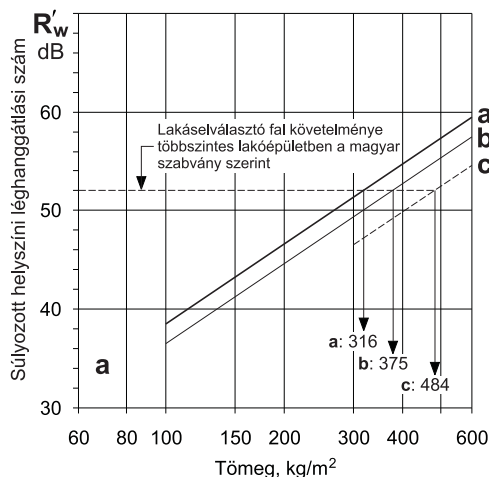
$$R'_w = 27 \lg m - 17,5 \text{ dB.} \quad (14)$$

- Az *a* jelű függvény YTONG falakra vonatkozik. Itt R'_w értékei – a DIN 4109 szerint – 2 dB-lel nagyobbak az előzőnél, ennek megfelelően az *a* jelű egyenes egyenlete:

$$R'_w = 27 \lg m - 15,5 \text{ dB.} \quad (15)$$

- A *c* jelű függvény szokványos, nagy üregű téglából készített falakra vonatkozik, amelyek egyenlete:

$$R'_w = 27 \lg m - 20,5 \text{ dB.} \quad (16)$$



13. ábra. Segédlet a masszív épületek egyhéjú lakáselválasztó falainak akusztikai méretezéséhez YTONG (a), tömörtégla (b), illetve szokványos üregestégla fal (c) esetén

A 13. ábra segítségével egyszerűen kimutathatjuk, hogy például a többszintes lakóépületek lakáselválasztó falaira vonatkozó $R'_w \geq 52 \text{ dB}$ szabványos követelmény kielégítéséhez YTONG anyagú fal esetén lényegesen kisebb négyzetméterenkénti tömeg lenne szükséges mint tömörtégla vagy üregestégla anyagú fal esetén. A pontos értékeket a (14) (15) (16) egyenletek segítségével állapíthatjuk meg. A számítások végeredménye:

- a** YTONG fal esetén: 316 kg/m²,
- b** tömörtégla fal esetén: 375 kg/m²,
- c** nagy üregű fal esetén: 484 kg/m²

lenne szükséges az MSZ-04.601/88 sz. szabvány szerinti követelmény kielégítéséhez.

Az YTONG-ra nézve rendkívül kedvezőek a fenti összehasonlító adatok. Ennek ellenére sem célszerű lakáselválasztás céljára egyhéjú YTONG falat alkalmazni, mert 2×1 cm mészcement vakolat esetén $316 - 36 = 280 \text{ kg/m}^2$ YTONG-ra lenne szükség, ehhez pedig az alábbi vakolatlan vastagságok tartoznak:

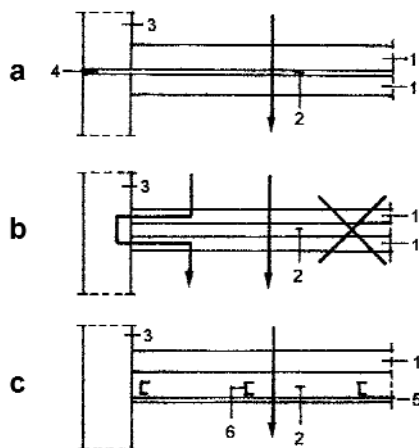
Térfogatsúly:	500	600	800 kg/m ³
Vakolatlan vastagság:	56	47	35 cm

Ezek a falvastagságok irreálisan megnövelnék a lakások bruttó alapterületét és költségét. Ezzel függ össze, hogy a németországi gyakorlatban ez ideig főként 24 cm vastag, kb. 430 kg/m² tömegű vakolt mészhomok téglá falakat alkalmaztak többszintes YTONG lakóépületek lakásainak elválasztására, a miénknél szigorúbb $R'_w = 53 \text{ dB}$ követelmény teljesítésére.

3. Kéthéjű falak

Az előadás korlátozott keretei nem teszik lehetővé a kéthéjű falak hangszigetelésével kapcsolatos fizikai tudnivalók ismertetését, így csak tényszerűen közöljük a legfontosabbakat.

A szilikátbázisú anyagok alkalmazásával készíthető kéthéjű falak három csoportját különböztetjük meg a 14. ábra szerint.



- 1 Önhordó, merev fal
- 2 Légtér, benne esetlegesen hangelnyelő anyag
- 3 A válaszfalhoz csatlakozó merev fal, vagy földém
- 4 Szerkezeti dilatáció
- 5 Hajlékony fal
- 6 Az önhordó faltól független, vagy arra pontszerű rögzítéssel szerelt válaszfalborda

14. ábra. Akusztikai szempontból kéthéjű falak

a) Tökéletesen kéthéjű fal, amely az épület egészén átmenő szerkezeti dilatációval készül, és kizárja a kerülőutas hangterjedést (14/a ábra). Ikerházak és sorházak $R'_w \geq 57$ dB követelményét csak ilyen megoldással lehet kielégíteni. Az YTONG Hungary Kft. által rendelkezésünkre bocsátott dokumentumok szerint a különböző térfogatsúlyú kéthéjű, 2x1 cm gipszvakolattal ellátott néhány változat súlyozott hanggátlási számai a következők:

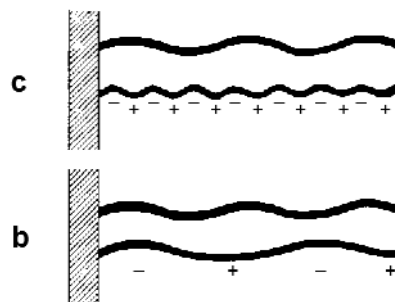
Térfogatsúly, kg/m ³	1. fal vastagsága, cm	Üveggyapot légtér, cm	2. fal vastagsága, cm	R'_w , dB
800	11,5	4	11,5	60
600	17,5	3	17,5	59
500	24	3	24	60

b) A dilatáció nélküli körítőszerkezetekkel szilárd kapcsolatban álló, kéthéjű merev fal (14/b ábra). Ez a megoldás akusztikai szempontból kedvezőtlen a következők miatt.

- Az adó oldallal határos falakban és födémekben a léghangok által gerjesztett hosszúhullámú testhang

– a szilárd kapcsolat közvetítésével – alig csillapítva átmegy a vevő oldali falba, amely a rezgési energiát kisugározza a vevő légtérbe (15/b ábra). Ennek következtében 10-15 decibellel gyengébb lesz a hangszigetelés, mint az egyébként ugyanolyan *a* típusú megoldás.

- A másik probléma, a kerülőutak jelenléte ilyenkor elkerülhetetlen.



A c jelű változat hajlékony falában rövid hullámú testhangok jönnek létre, így közel vannak egymáshoz a + jelű kompresszió- és a - jelű dekompresszióhelyek, ezáltal "rövidzár", azaz nyomáskiegyenlítődés alakul ki, végeredményben gyenge léghang keletkezik a vevő térben, ellentétben a b jelű változattal

15. ábra. Az akusztikai rövidzár szemléltetése

A DIN 4109–1989 sz. szabvány szerint a kéthéjű merev falak hanggátlása masszív épületekben gyakorlatilag az egyhéjű falakra vonatkozó törvényszerűséget követi oly módon, hogy a két fal együttes tömegével kell számolni. Ezt a megállapítást a következő példával illusztráljuk. Az YTONG Hungary Kft. megbízására az ÉMI laboratóriumában vizsgálták az alábbi rétegrendű kéthéjű, 200 kg/m² összes tömegű YTONG falat:

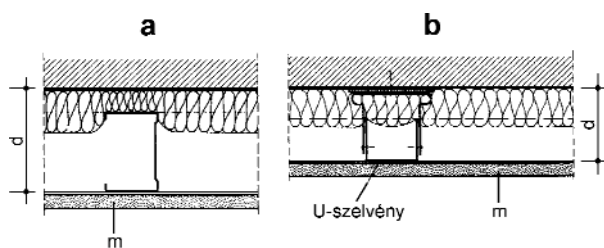
- 30 cm vastag YTONG P4–06 fal,
- 2,5 cm vastag üres légtér,
- 10 cm vastag YTONG válaszfal,
- 2x1 cm vastag mészcement vakolat.

A vizsgálat eredménye laboratóriumban kedvező ($R_w = 54$ dB), de masszív épületekben, helyszíni viszonyok között a (15) képlettel számolhatunk, azaz:

$$R'_w = 27 \lg 265 - 15,5 = 50 < 52 \text{ dB,}$$

amely nem felel meg a többlakásos lakóépületekre vonatkozó hazai előírásnak.

Merev fal + hangszigetelést javító hajlékony fal. A 14/c ábra szerinti megoldás a többnyire gipszkartonból készülő hajlékony fal (Vorsatzschale) különleges tulajdonságával függ össze, amely szerint az egyik oldalon lévő merev fal a szilárd peremkapcsolat közvetítésével rövidhullámú testhangot kelt, amely az akusztikai rövidzár révén a hangenergia nagy részét felemészti, következésképpen hatékonyan javítja a merev fal hangszigetelő képességét (magyarázat 15/c ábrán). A 16. ábrán a legismertebb megoldások elvi vázlatait közöljük.



- a** Egy "fél gipszkarton fal"
- b** Dűbelekkel a merev falhoz rögzített lengő bilincsek, kb. 50 cm-enként függőleges tartóbordákhoz rögzített gipszkarton lemez

16. ábra. Hangszigetelést javító gipszkarton burkolat szokásos változatai

A javító hatás (ΔR_w) annál nagyobb

- minél nagyobb a hajlékony fal tömege (m) és a merev faltól mért távolsága (d),
- csekély javító hatása van a légtérben elhelyezett hangelnyelő anyagnak is,
- minél inkább független a hajlékony fal a merev szerkezettől (ebből a szempontból a 16. ábra a jelű megoldása előnyösebb),
- minél kisebb a javítandó fal tömege.

K. Gösele szerint könnyű (50-100 kg/m² tömegű) falak hanggátlását 15-20 decibellel, nehéz (400-500 kg/m² tömegű) falak hanggátlását pedig mindössze 3-4 decibellel javítja a 16/a ábra szerinti szimpla gipszkarton burkolat, $d \geq 60$ mm esetén. Nyilvánvaló azonban, hogy az összesített eredmény ($R_w + \Delta R_w$) annál jobb, minél nagyobb a javítandó fal tömege.

Valójában minden építési rendszerhez és minden fal-típushoz esetenként kell kikísérletezni a különféle szempontoknak legjobban megfelelő megoldást, különös tekintettel az adott építési rendszerre jellemző kerülőutakra. Az YTONG falakkal kapcsolatos kísérletek halmaza közül a következő konkrét eredményeket ismertetjük.

3.1. Az YTONG Hungary Kft. megrendelésére az ÉMI laboratóriumában végzett kísérlet eredménye

- A javítandó fal: 30 cm vastag YTONG P4-06, egyik oldalán 1 cm vastag mészcement vakolattal. Tömege: $m = 180$ kg/m², súlyozott laboratóriumi hangszigetelési jellemzője: $R_w = 49$ dB.
- A hangszigetelést javító burkolat típusa a 16/b ábra szerinti, $d = 70$ mm, a légtérben 50 mm vtg. 18 kg/m³ térfogatsúlyú üveggyapot, a 12,5 mm vastag gipszkarton lemez tömege: $m = 9,4$ kg/m².
- A vizsgálat eredménye: $R_w = 56$ dB.
- A burkolat javító hatása a laboratóriumban: $\Delta R_w = 7$ dB.

A fenti adatok alapján feltételezhetjük, hogy ez a megoldás megfelel a többszintes társasházak lakáselválasztó szerkezeteire vonatkozó $R'_w \geq 52$ dB hazai köve-

telménynek. Teljes biztonsággal csak a helyszíni vizsgálat eredménye alapján lehet nyilatkozni.

3.2. Az YTONG Entwicklungszentrum laboratóriumi kísérleteiről

J. Seidel úr érdekes és meglepően jó eredményekről számol be a 2001. 05. 02-án kelt TH-AKU 69 sz. vizsgálati jelentésben. Ezúttal a jelentésben ismertetett 5 megoldás terjedelmes anyagából csak 2 változat műszaki adatait ismertetjük. A két változat hangszigetelési szempontból azonos értékű.

A vizsgált megoldások		
a) Hagyományos, 24 cm vastag mészhomok téglafal 2×1 cm vakolattal (amely helyszíni viszonyok között megfelel a DIN 4109-1988 sz. szabvány szerinti $R'_w \geq 53$ dB helyszíni követelménynek)		
Műszaki jellemzők		
Vastagság, mm	Tömeg, kg/m ²	R_w , dB
260	430	60,2
b) 15 cm vastag YTONG fal P4/055 minőségű anyagból, egyik oldalon 1 cm vastag vakolattal ($m = 109$ kg/m ² , $R_w = 39,8$ dB), a másik oldalon a 16/b ábrához hasonló rendszerű, de a rugóként működő lengő kengyel helyett merev rögzítőelemekkel készült, kétrétegű gipszkarton burkolat (összes vastagsága 62 mm, javító hatása: $\Delta R_w = 20,5$ dB!)		
Műszaki jellemzők		
Vastagság, mm	Tömeg, kg/m ²	R_w , dB
222	130	60,3
Megtakarítás a b-változattal: 38 mm és 300 kg/m ²		

A megtakarítás hihetetlennek tűnő adatai meggyőzően bizonyítják, hogy az YTONG falak előnyös tulajdonságai a kéthéjú falban is érvényesülnek, ha a konstrukciót a hangszigetelés törvényszerűségei alapján tervezik. A szakirodalomban már YTONG-ból készült hajlékony burkolatokkal is találkozhatunk, amelyek akusztikai paraméterei hasonlóak a gipszkartonéhoz.

4. Fontos megjegyzés

A 2001. június 8-án elhangzott előadásban és ebben a publikációban – címének megfelelően – az YTONG falak előnyös hangszigetelési tulajdonságainak bemutatására törekedtünk. A korlátozott terjedelem nem tette lehetővé, hogy az YTONG külső falakban fellépő kerülőutak terjedésének csökkentési módszereivel foglalkozzunk. Ezért hangsúlyozottan felhívjuk a figyelmet arra, hogy

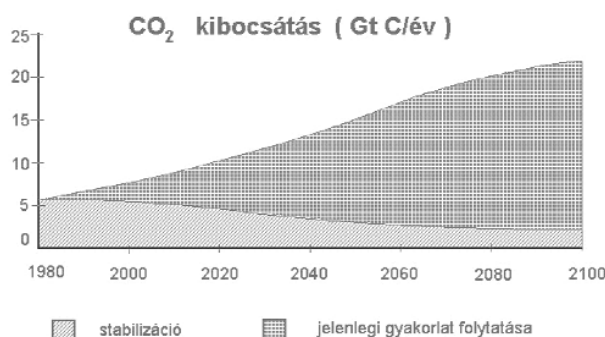
- a laboratóriumban kiváló – és a helyszíni határértéket messze meghaladó hanggátló képességgel rendelkező – fal vagy födém sem felel meg az épületben, ha nincs megfelelően akadályozva a 4. ábrán feltüntetett kerülőutas hangterjedés. Ezért
- a kiviteli tervezés során épületakusztikus szakértő közreműködését célszerű igénybe venni.

A perlit hasznosítása az építőipari vakolatanyagok előállításában*

Pozsonyi László, Saint-Gobain Weber Terranova Kft.

Az energiahordozók felhasználásának hatása a környezetre

A foszilis energiahordozók jelenlegi gyakorlat szerinti felhasználása, környezetre gyakorolt hatása katasztrófával fenyeget (1. ábra). A megújuló energiaforrások alkalmazásával (pl. szoláris technológiák), ill. az épületek hőszigetelésének fűtési energiát megtakarító hatásával a helyzet jelentősen javulhat, stabilizálódhat.



1. ábra

A duzzasztott perlit gyártása, jelentősége a Saint-Gobain Weber Terranova Kft.-nél és jogelődjénél Pilisvörösváron

Magyarországon először 1978-ban kezdődött az ún. „korszerű vakolatok” gyártása a zsákban, felhasználásra kész TERRANOVA nemesvakolatok formájában.

A magyarországi Terranova (jelenleg Saint-Gobain Weber Terranova Kft.) kezdettől fogva pilisvörösvári székhellyel működik. Az üzem telepítését az igen jó minőségű dolomitvagyon természetes előfordulása és a főváros közelsége egyaránt motiválták.

A 80-as években kezdődő és 1991-92-ben új hőtechnikai szabványban rögzített szigorúbb hőtechnikai előírások igen komoly igényt jelentettek az épületek megfelelő hőszigetelését biztosító, gyári hőszigetelő vakolatrendszerek bevezetése szempontjából.

1985-ben, saját perlitduzzasztónk üzembe helyezése

főként hőszigetelő alapvakolataink gyártását tette gazdaságossá.

A perlitduzzasztó főbb paraméterei:

- átlagteljesítmény: 18 m³/h (P1 min. perlitre vonatkoztatva);
- fajlagos energiaigény: 10-15 m³ földgáz/m³ duzzasztott perlit;
- villamosenergia-igény: 3 kW·h/m³ duzzasztott perlit;
- előállítható perlitminőségek: standard minőség P1, megfelelő perlitfajtából: P2, P3;
- gyártókapacitás: kb. 80 000 m³ duzzasztott perlit/év.

Duzzasztott perlitből 1985 óta közvetlenül, illetve termékeinkbe beépítve együttesen 500 000 m³-t gyártottunk, illetve forgalmaztunk.

A duzzasztott perlit hatása a falazó- és vakolóhabarcsok tulajdonságaira

A duzzasztott perlit a habarcsokban:

- javítja az adott termék hőszigetelési paramétereit (hővezetési tényező: λ);
hagyományos vakolatok: $\lambda = 0,8-0,9$ W/(m·K);
perlites vakolatok: $\lambda = 0,14$ W/(m·K);
perlit+polisztirolgyöngy-tartalmú vakolatok: $\lambda = 0,085$ W/(m·K);
- kedvező hatása van a vakolatok bedolgozhatóságára (bedolgozhatósági idő növekszik);
- kedvezővé teszi a megszilárdult perlittartalmú alapvakolat előnedvesíthetőségét, így könnyebbé válik a nemesvakolatok bedolgozhatósága;
- javítja az alapvakolat páraáteresztő képességét ($\mu = 6 - 10$);
- csökkenti a vakolat testsűrűségét, mely vastagabb vakolatréteg-felhordást tesz lehetővé (egyenetlen falfelületek kiegyenlítése).

A hazai épületállomány helyzete és hőszigetelésének jelentősége energetikai és környezetvédelmi szempontból

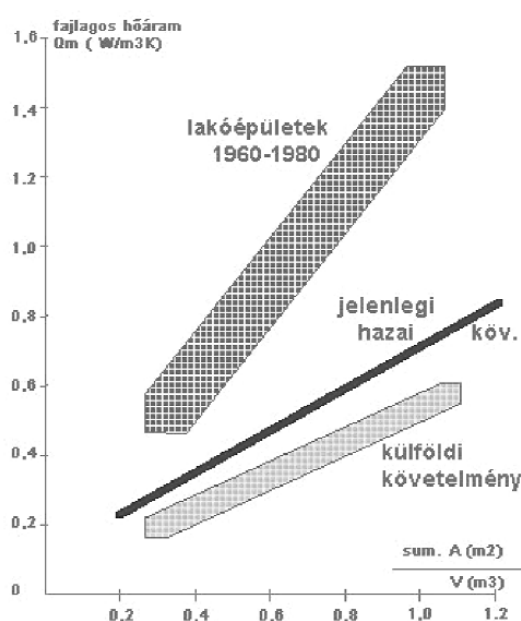
Az ország évi energiafogyasztásának mintegy ¼-ét épületek fűtésére használjuk fel. Ez mintegy 300 PJ (1 PJ 24 millió kg kőolaj fűtőértéke, vagy 29 millió m³ földgáz el-

* „Perlit környezetbarát magyar ásványi nyersanyag” tudományos konferencián elhangzott előadás anyagából. Miskolc, 2001. okt.

égéséből származó energia). Súlyos következménye ennek az energiamennyiségnek a környezetkárosító hatása.

Míg a gazdaság többi ágazataiban egy technológiát 10-15 év alatt általában le lehet, sőt le kell cserélni, addig az épületek a 100 éves fizikai élettartamot figyelembe véve nagyon lassan cserélődnek, és az új épületek részarányának növekedése is igen lassú. Ez azt jelenti, hogy az építésszek mai döntései egy évszázad múlva is kihatnak az ország energetikai, gazdasági, ökológiai helyzetére.

Az ország épületállománya igazából pontosan nem ismert. Legtöbbet a lakásokról, lakóépületekről tudunk, tehát elemezni ezen építménycsoportot érdemes. Valószínű, hogy középületeink, ipari épületeink is hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek, hiszen ugyanazon felkészültségű társadalom nagyjából azonos időben és ütemezésben építette valamennyit (2. ábra).



2. ábra. Szabályozás

Lakásaink száma közelíti a 4 milliót, amelyről az Országos Épületenergetikai Programjavaslat 1999 áprilisában állapította meg: több mint a fele szorul rossz állapota miatt középtávon felújításra és még nagyobb hányada energetikai korszerűsítésre. A lakóépület-állomány hőtechnikai teljesítményét tekintve 90%-ban „gyenge” vagy „közepes” (1. táblázat).

1. táblázat

Lakások megoszlása a hőszigetelésük mértéke szerint

Átlagos hőátbocsátási tényező, k	Lakás, db
Gyenge, $k > 1,3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$	2,08 millió
Közepes, $0,8 < k < 1,3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$	1,46 millió
Elfogadható, $k < 0,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$	0,40 millió
Összesen	3,94 millió

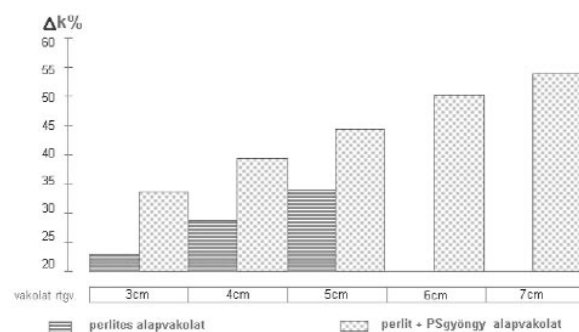
Az új követelményrendszer bevezetése növelte a tervezési szabadságot, és az eddiginél is nagyobb lehetőséget ad a hőszigetelés ésszerű, racionális megvalósítására:

- az a szerkezeti elem hőszigetelhető, amelyben a szigetelés hatása az épület egésze szempontjából a leghatékonyabb;
- a hőszigetelés hatása az épület energiamérlegére egyértelműen megállapítható;
- a hőszigetelés hatásának begyűrűzése (hőhidak, légcseré) követhető, értékelhető.

A meglévő épületállomány mint adottság és a hőtechnikai szabályozás mint lehetőség fontos és felelősségteljes feladatot jelent a döntéshozók számára, és egyre nagyobb jelentőséget ad az ésszerűen megvalósított hőszigetelés környezetkímélő megoldásaira.

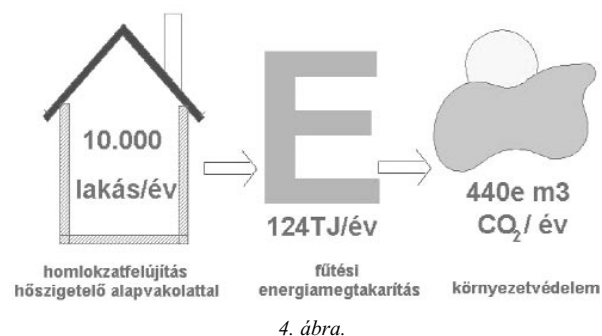
Magyarországon kb. 3,5 millió lakás hőszigetelését kellene javítanunk. Ebből mintegy 2 millió ($k > 1,3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$) gyenge, 1,5 millió ($1,3 > k > 0,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$) közepes átlagos hőátbocsátási tényezővel rendelkezik.

Ezeknél 5 cm vastag a hőszigetelő perlitess, ill. hőszigetelő perlit + polisztirolgyöngyös alapvakolatokkal átlagosan $\Delta k = 0,33 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, ill. $\Delta k = 0,50 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ falazati hőszigetelő képesség javulást lehet elérni (3. ábra).



3. ábra. Hőszigetelő alapvakolatok által eredményezett Δk javulás B30-as falazóblokkból készült falazaton

Feltételezve, hogy országos szinten évente 10 ezer lakást újítanak fel, melyek átlagos homlokzati felülete $200 \text{ m}^2/\text{lakás}$, a fűtésükből származó energiamegtakarítás mintegy 124 TJ/év (4. ábra).



4. ábra.

A falazatok hőszigetelése a legvitatottabb intézkedés még ma is. Kétségtelen, a közvetlen megtakarítás terén –

a nyílászárók hézagzárásának javítása és a tetők, illetve tetőfödémek hőszigetelése után – a harmadik helyre sorolható, azonban az épület használoinak komfortérzetét azonnal és jelentősen javítja, az épületszerkezetek élet-tartamát pedig számottevően növeli. Kiküszöböli az egyéb intézkedések (pl. hézagzárás) negatív mellékhatá-sait, azaz növeli azok eredményességét.

A perlitbázisú habarcsok összetételükből adódóan is szilikátbázisú anyagok, melyek önmagukban is környe-zetkímélő megoldást adnak.

A hőszigetelő falazóhabarcsokkal homogénné tehető egy korszerű (jó hőszigetelő képességű) falazóblokkból készült fal, megszüntetve a hagyományos falazóhabar-csoknál jelentkező hőhídhatásokat.

A hőszigetelő vakolatok – a közepesnek mondható hővezetési tényezőjük miatt – alkalmasak a hagyomá-nyos falazóhabarccsal falazott korszerű falazóelemek hőhídhatásainak mérséklésére.

Elsősorban tagolt, építésszerű igényesebb homlok-zatok esetén, a kisebb hőszigetelő képesség kompro-misszumát elfogadva javasolható.

Előnye ezen ún. habarcsos hőszigetelő rendszernek a csekély mértékű páradiffúziós ellenállása, mely biztosít-ja a falazat „légzését”.

A jövő

Úgy gondoljuk, hogy a duzzasztott perlittek építési célú felhasználásának még hosszú távon lehet jelentősége. Ezt bizonyítja az a tény is, hogy a magyarországi nyers perlittek nagy hányada a közelmúltú adatok szerint nyugati országokba kerül. Pl. Ausztriába kb. 25 000 t éven-te, amelyből kb. 250 000 m³ duzzasztott perlit nyerhe-tő. Ennek, tudomásunk szerint, csak 10%-át használják egyéb célra, 90%-át az épületek hőszigetelésére fordít-ják. Ezekben az országokban, ahol a korszerűbb építő-anyag-gyártás és az építéstechnológia köztudomásúan korábban kezdődött a hazainál, még mindig ilyen nagymértékű a duzzasztott perlit építési célú felhaszná-lása. Feltételezhető, hogy hazánkban is még igen hosz-szú időn keresztül szükség lesz perlit-tartalmú habar-csok gyártására.

Balázs György „Barangolásaim a betonkutatás területén” című könyvének bemutatása*

Kunszt György

A 75 éves Balázs György professzor köszöntése alkal-mából szeretném méltatni betonkutatásait, elsősorban az idén megjelent „Barangolásaim a betonkutatás terüle-tén” c. könyve alapján.

A „barangolás” szó azt hiszem különlegesen ritka a tu-dományos munkák címében található szavak képzeletbeli szótárában, de a magyar nyelvben sem valami gyakori; egy alapfokú magyar nyelvvizsgát megcélzó magyar nyelv-könyv szöszedetében biztos nem fordul elő, s jó, ha egy felsőfokúéban rá lehet bukanni. Talán azért is van ez így, mert ez a szó kissé régiesnek is mondható, hiszen a ma ti-pikus embere rendszerint céltudatosan rohan, s ha véletle-nül marad szabad ideje, akkor azt leginkább egy fitness-klubban tölti, de semmiképp sem barangolással, még turis-taként sem, mert akkor is gondosan kidekázott program szerint rohan látnivalóról látnivalóra. Ez a szó inkább egy 75 éves ember bölcs visszapillantásra hajló természetéből adódik, ami már tudományos munkákban is helyet ad szub-jektív elemek szóbahozásának, az egyébként kötelezően személytelen objektivitással szemben. S valóban, a Szerző

előszava oldalain olyan – szinte szórakoztató célzattal elő-adott – személyes motívumokkal is találkozunk, mint a szerző mindenre elszánt egykori irtózása attól, hogy köte-lezőnek látszó „elvtársi” elképzeléseknek megfelelően az ábrázoló geometria oktatójává válják az induló miskolci műegyetemen, s megkönnyebbülése, mikor Michailich Győző meghívta tanársegédnek a „II-es Hídtanszék”-re.

Mégis, nagy tévedésbe esne, aki azt hinné, hogy a *Barangolásaimat* olvasva majd mondhatni szórakoztató, egy szaktudományt népszerűsítő kutatói élménybeszá-molóval fog találkozni. Ellenkezőleg: az olvasó egy igen szigorú logikával szerkesztett tudományos monográfiá-val találja magát szemben, amely tankönyvszerű érthető-ségre is törekedve mutat be a betontudomány szinte egé-szét átfogó ismereteket. Itt a szerző személye majdnem láthatatlanná válik, annál is inkább, mert a szakma olyan nagy tömegű, jól vagy alig ismert hazai és külföldi kép-viselőjének kutatására hivatkozva fejti ki a mondanivaló-ját, hogy érzésünk szerint a művet egy hatalmas nemzet-közi zenekar adja elő, amelynek a szerző csak egyik szó-listája. Ez a kép csak annak a nagyon figyelmes olvasó-nak a szemében változik meg, aki észreveszi, hogy az áb-rák óriási hányada, erős többsége a szerző által végzett-

* Elhangzott a Műegyetem dísztermében, dr. Balázs György 75. szület-snapja alkalmából 2001. november 14-én rendezett ünnepségen.

irányított saját kutatások eredményeit mutatja be, s hogy a könyvben elsősorban mégis ezek átfogó feldolgozásáról van szó, csak szisztematikusan törekedve annak láthatóvá tételére, hogy ezek a nemzetközi eredményezőben pontosan hol helyezkednek el. A feldolgozás során a szerző önmagát mégis olyan kevésbé tolja előtérbe, hogy teljesítményének könnyebb azonosíthatósága érdekében nyomdatechnikai eszközökhöz kellett nyúlni: vastag betűvel emelték ki a kísérletek végeredményeit tézisszerűen meghatározó mondatok közül azokat, amelyeket a szerző a kutatás idején saját maga újnak ítélt.

Ahhoz is a barátai javaslatára volt szükség, hogy fejezetenként adjon olyan „összefoglalást”, amely kiemeli a kutatásai alapján levonható gyakorlati következtetéseket. Így a szerző személyes teljesítménye gyakorlati szempontból is jól értékelhetővé vált.

A könyv terjedelme 692 oldal, és kilenc fejezetből áll. Az elsőnek a szerző a *Bevezetés* címet adta, s ehhez a fejezethez nem csatolt „összefoglalást”, mintegy ezzel is jelezve, hogy ez a fejezet közvetlenül nem a végzett kísérletek bemutatására irányul, hanem azokat az alapismerteket adja meg, amelyek a szerző kísérleti munkájának megértéséhez elengedhetetlenül szükségesek. Először a beton és a portlandcement fogalmát tárgyalja, majd részletezi azokat a cementkémiail és betonfizikail ismereteket és meghatározásokat, amelyek ma már mondhatni egyezményes közkinccsnek tekinthetők, s amelyekből a beton- és cementkutatók nemzetközi szinten is egységesen kiindulnak. Ennek során – többek között – beszél a cement kötődéséről és szilárdulásáról, a cement optimális gipszkötetméről, a cementkő porozításáról, a cementkő és az adalékanyag tapadásáról, a beton törési mechanizmusáról, a beton tulajdonságairól és az azokat befolyásoló tényezőkről s a betontervezés fejlődéséről. Külön figyelmet szentel a beton alakváltozási jellemzőinek, köztük a zsugorodásnak és a lassú alakváltozásnak.

Az összefogottabb tárgyalás érdekében a további nyolc fejezet – némi önkényességgel – három csoportba sorolható. Az elsőbe a 2., a 3. és a 4. fejezetet sorolnám, a harmadikba az utolsó, a 9. fejezetet, a közbülső csoportba pedig így az 5., a 6., a 7. és a 8. fejezet kerülne. Ennek a csoportosításnak az lehet az előnye, hogy segítségével a Balázs György által végzett-irányított kutatások – legalább részben – nagyon szemléletesen kapcsolhatók a XX. század második felében végbemenő építéstechnikail és építéstudományi fejlődés egyes döntő súlyú feladatköréhez és irányzataihoz. Ilyen feladatkör volt a második világháborút követő évtizedekben az építés iparosítása, a század végén pedig ilyenné vált a fenntartható építés követelményeinek a kielégítése. A második világháborút követő évtizedek domináns feladatkörében fogantak azok a kutatások, amelyekkel a kötet 2., 3. és 4. fejezete foglalkozik, s a századvég gondjainak szempontjából emelkednek ki a 9. fejezetben tárgyalt munkák.

A második világháború után Európa legtöbb országá-

ban alapvető feladattá vált a tömeges lakásépítés megteremtése, részben azért, mert a háború elpusztította a lakásállomány jelentős hányadát, részben azért, mert a háború öt évében sok országban egyáltalán nem épültek lakások. Uralkodó nézetté vált, hogy a feladat a legjobban, sokak szerint, csakis az építés iparosításának segítségével oldható meg, amin elsősorban vasbeton épületelemek betonelemgyárakban vagy házgyárakban való előállítását értették. A tömegtermelés alapvető követelménye volt az üzemi zsaluzatok minél jobb kihasználása, ami szükségessé tette a beléjük kerülő beton szilárdulásának a lehető legnagyobb mértékű gyorsítását. Ezzel a problémával foglalkozik Balázs György monumentális méretű „barangolási” beszámolójának 4., a *Betonszilárdítás* című fejezete.

Hazánkban az 50-es évek elején a beton gőzölését tették általánossá a betonelemgyárakban, s egyes tapasztalt károsodások kiküszöbölése érdekében az Építéstudományi Intézetet bízták meg azzal, hogy dolgozzon ki műszaki irányelveket a beton gőzölésére. Ezeket az irányelveket körülbelül három évig folytatott kísérleti munka alapján 1954-ben lehetett kiadni, s ezek a kísérletek azt mutatták, hogy a különböző cementek felhasználásával készülő betonok igen különböző módon reagálnak a gőzölésre, különösképpen annak eltérő hőfok-, időtartam- és egyéb paramétereire. Azt hiszem, hogy elsősorban ezek a tapasztalatok és Mironom a cementek ásványi összetételének és a betont érő hőhatások következményeinek összefüggésére irányuló kutatásai adhatták az ösztönzést a 2. fejezetben leírt, s gondolom nemzetközileg is egyedülállóan átfogó kísérletek elvégzésére; e fejezet címe a kötetben: *A cement modellezése klinker-ásványok segítségével*. Jellemző a szerző becsületességére, hogy felhívja a figyelmet egyes kutatók kételyeire a klinkerásvány-kísérletek hasznosságára vonatkozóan, azt hiszem azonban, hogy ezek nemzetközileg is fennálló jelentősége vitán felül áll, csak még a klinker-ásványok közötti kölcsönhatás-vizsgálatok nagyszabású folytatására lenne szükség, ami rendkívülien nagy költségekkel járna. Ez a fejezet és a ráépülő 3., *A cementpép, a cementkő tulajdonságai* című, valamint a 4., a *Betonszilárdítás* címmel ellátott fejezet együtt különösen szembeszökően mutatja azt a rendkívüli interdiszciplinaritást, amely Balázs György talán legfontosabb kutatásait fémjelzi: ezekben a vegyészmérnöki és az építőmérnöki, a cementkémiail és a betonfizikail kompetencia olyan fokú integráltsággal érvényesül, ami nemzetközileg is igen ritka; ez csak kiváló cementkémikusok bevonásával, intenzív team-munkával volt megvalósítható, s ez mutatja Balázs György kiemelkedő kutatási közösségképző és szervező képességét.

Ez a példamutató interdiszciplinaritás jellemzi a kötet utolsó fejezetében ismertetett tartóssági kísérleteket is, amelyek az elmúlt század végétől uralkodóvá vált kutatási trendhez, a „fenntartható építés” követelményei kielégítésének feladatához kapcsolódnak. Amint ismeretes, az em-

beriség „fenntartható fejlődésének” egyik alapvető problémája az energiaigény drámai növekedésének, a felhasználható energiakészletek egyre fenyegetőbb kimerülésének, valamint az energiafelhasználás környezetszennyező hatásainak nyomasztó gondja. Jól érthető, hogy ezek között a feltételek között megkülönböztetett nemzetközi figyelem fordult a beton- és vasbeton szerkezetek tartósságára, hiszen a cement és az acél előállításának rendkívül nagy az energiaigénye, s ugyanakkor e szerkezetek igen nagy hányada van kitéve a tartósságukat különösen veszélyeztető környezetszennyezettségi hatásoknak. Ezzel a problémakörrel foglalkozik a könyv utolsó, a 9. fejezete, *A beton és a vasbeton tartóssága* címmel; ez a fejezet is lemegy a végső alapokig, hiszen például ebben is a klinkerásványok szintjéig mélyíti a kutatásokat; ezek a tartóssági szempontból bizonyosan vagy esetleg mértékadó tényezők hatásának rendkívül széles körre terjednek ki, és nagyszámú, 20 évnél idősebb s az ország légszennyezettségi szempontból legkritikusabb régióiban lévő műtárgy, elsősorban híd helyszíni és kivett anyagmintákkal végzett laboratóriumi vizsgálatát is magukban foglalják.

A közbülső, az 5., a 6., a 7. és a 8. fejezetben tárgyalt kutatások nem kapcsolhatók olyan közvetlenül a legkritikusabb társadalmi-történelmi problémákhoz mint azok, amelyekről eddig volt szó, de ez nem csökkenti a jelentőségüket. Összefoglalóan talán azzal jellemezhetők, hogy olyan kérdésekkel foglalkoznak, amelyek hagyományosan foglalkoztatják a betonkutatást, mert az eredményeikre alapvető szükség van az építőmérnöki munka, a szerkezettervezés és kivitelezés minőségének érdekében. Ezekben a fejezetekben a beton húzó- és nyomószilárdságáról, ezek viszonyszámairól, a beton zsugorodásáról, lassú alakváltozásáról s a beton terheléssel kapcsolatos alakváltozási jellemzőiről van szó.

Ezeknek a jelenségeknek a vizsgálatára a betonkutatás elmúlt 100 évében rendkívül sok kísérletet végeztek, s ezért Balázs György a figyelmét elsősorban olyan jellemzőkre fordította, amelyeket eddig viszonylag elhanyagoltak. Így például hallatlanul sokat foglalkoztak a beton nyomószilárdságával, a húzó- és a hajlítószilárdságával viszont sokkal kevesebbet, pedig ezek bizonyos esetekben (pl. az útbetonoknál) rendkívül fontosak. Ezért Balázs György és munkatársai különösen átfogóan és alaposan vizsgálták a húzó- és a hajlítószilárdság alakulását, igen sok tényező hatásának függvényében, de sokat foglalkoztak a betonok fagyállóságával is, ahol szintén sok volt az üresen hagyott folt. Ugyanakkor, a betonkutatás és gyakorlat történetében más kutatók számos olyan képletet és számítási eljárást dolgoztak ki, amelyeknek esetében nem eléggé vizsgálták az érvényességi határokat, vagy azoknak a feltételezéseknek a helytállót voltát, amelyekre alapozták őket. Balázs és munkatársai ezek közül is soknak a felülvizsgálatára vállalkoztak. A kísérletek során számos olyan eredményre jutottak, amelyek eddig nem voltak ismertek, s a publikálásukkal nagy nemzetköz-

zi feltűnést keltettek. Ilyen volt például annak a megállapítása, hogy míg a cement őrlésfinomságának a növelése a nyomószilárdság alakulásának szempontjából szinte korlátlanul kedvező, addig ennek a húzószilárdság szempontjából elég hamar jelentkező határa van. Meghökkenítő volt az a megállapításuk, hogy a szilárdulás szakaszában lévő betont érő fagyhatások okozta károk szempontjából nem annyira egy kritikus szilárdságra, hanem egy kritikus korra érdemes figyelni. Nagy feltűnést keltett az a megállapításuk, hogy ha a gőzölést vagy az autoklavölést szárítással kombináljuk, akkor lehetőség nyílik praktikusán zsugorodásmentes betonelemek előállítására. Nagyon váratlan volt az a kísérleti eredmény, hogy a tartós terhelés hatására a beton tömörödik, s ez 15-20%-os szilárdságnövekedéssel jár.

Elméleti eredményeik közül leginkább a zsugorodási feszültségek Dischinger-féle számításmódja esetében alapul vett feltételezések elfogadható voltának kritikai vizsgálatát kell kiemelni. Kimutatták, hogy ezek a feltételezések nem fogadhatók el maradéktalanul; ezért kidolgozták a Dischinger-féle differenciálegyenlet-rendszer módosított változatát, s bemutatták e módosított változat részletezett használatát. Ez a – zsugorodási feszültségek számítását érintő közel 30 oldalas – két szakasz a könyv elméleti szempontból legigényesebb, erősen matematizált része.

A figyelemre méltó egyéb kísérleti és elméleti eredmények felsorolását még hosszasan lehetne folytatni, de erre ezúttal nincsen mód, s befejezésül már csak a könyv címére, a „barangolás” kifejezésre szeretnék újból visszatérni. Első főnököm, az Építéstudományi Intézet Betonosztályának valamikori megalapítója, néhai Gáspár Géza szokta a nála munkába lépő fiatal kutatók figyelmét felhívni arra, hogy – idézem – „a beton *csalárd* anyag”. Ennek a humorizáló minősítésének a relevanciáját erősíti a most 75 éves Balázs Györgynek az a bölcs döntése, hogy monumentális kutatói életművének ezt a szelektív (még közel 700 oldalon sem az összes elvégzett kísérletre kiterjedő) bemutatását – szerényen – csupán „barangolás” beszámolóinak minősítse. A beton minőségét annyira nagyszámú tényező és körülmény befolyásolja, s a beton – a mérnöki gyakorlat során esetenként elhanyagolhatatlan – tulajdonságainak a száma is olyan nagy, hogy végérvényes kimerítésének szempontjából – bölcsen és szerényen – még egy ekkora kutatói életművet is csak „barangolásnak” lehet minősíteni. Ugyanakkor egy percig sem vitás, hogy Balázs György a több mint 100 éve folyó modern betonkutatás nevezetes alakja, akinek a könyvei még sok mérnökgenerációt fognak segíteni abban, hogy a betont illetően – a lehetőségekhez képest – kompetensnek érezhessék magukat. Kívánom, hogy ennek tudata megérdemelt örömmel töltse el a 75. életévét most betöltő Balázs Györgyöt: Isten éltesse!

Megrendelhető: Akadémiai Kiadó Vevőszolgálat. 1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 4. Telefon: 464-8200, fax: 464-8201

Kombinált oxigéntüzelésű rendszer (Combined Oxyfired System)*

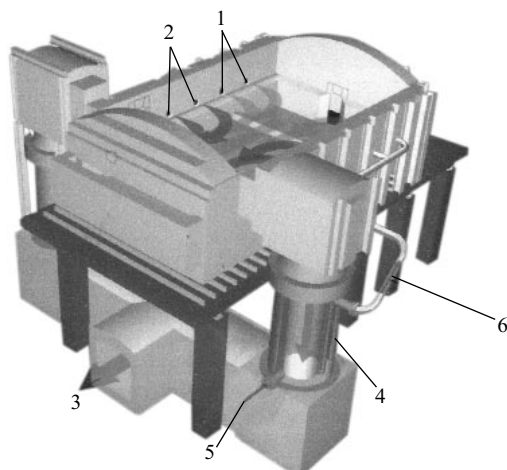
M. Kunz, HORN Glasanlagen GmbH
Bergstraße 2, 95703 Plößberg, www.hornglas.de

Felépítés

A kombinált oxigéntüzelésű rendszer (CO-rendszer) az üveglasztókádak egyik fűtési rendszere, amely oxigéntüzelésű és rekuperatív fűtésből áll.

A CO-rendszerrel az oxigéntüzelésű kádak (Oxy-Fuel-kádak) és a rekuperatív kádak előnyeit lehet egyesíteni. A tisztán oxigéntüzelésű kádaknak alacsony az energiafelhasználása és a NO_x-kibocsátása. Ugyanakkor magas oxigénárak jelentkeznek, és a keletkező gázok hőértéke az égési levegő előmelegítése következtében nem vezethető vissza az olvasztási folyamatba. Így a füstgáz hőenergiájának nagy része veszendőbe megy. Csupán gazdasági szempontból a tisztán oxigéntüzelésű kád az alacsony energiafelhasználás ellenére is csak akkor kifizetődő, ha az oxigént kedvező áron lehet beszerezni vagy előállítani. Ezzel szemben a rekuperatív tüzelésű kádak energiafelhasználása nagy, mivel az égési levegőt csak kb. 600 – 650 °C-ra lehet előmelegíteni.

A CO-rendszer a rekuperatív tüzelésű és az oxigéntüzelésű kád kombinációját jelenti, azaz egyaránt tartalmaz hagyományos levegő-fűtőanyag égőket és oxigénégőket (1. ábra). Egy tizenkét égős (oldalanként 6 égővel rendelkező) kád esetében például egy oxigénégő és 11 levegőégő, vagy éppen fordított arányban, vagy bármely más kombinációban kerülhet beépítésre. Az oxigén- és levegőégők aránya a mindenkorli helyzet függvényében és a kád üzemeltetőjének kívánsága szerint alakul.

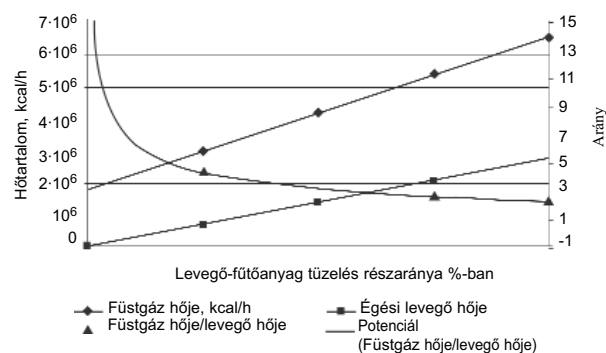


1. ábra. CO-rendszer
1-rekuperatív égő; 2-oxigénégő; 3-füstgáz; 4-rekuperátor;
5-égési levegő; 6-előmelegített égési levegő

Előnyök

A levegő előmelegítése

A kombináció azzal az előnnyel jár, hogy az oxigén- és levegőégésből keletkezett összes füstgáz elszívása a hőcserélőn keresztül történik, és így a levegőégők égési levegőjének az előmelegítésére hasznosíthatók. Minél több oxigénégő van beépítve, annál nagyobb térfogatú füstgáz áll rendelkezésre az égési levegő előmelegítésére. Továbbá a növekvő oxigénegéssel együtt – a változó gázösszetétel következtében – növekszik a távozó gázok fajlagos hőkapacitása. Mindkét tény azt eredményezi, hogy a növekvő oxigéntüzeléssel több hő áll rendelkezésre a füstgázból (2. ábra) az égési levegő előmelegítésére, és így magasabb hőmérsékleteket lehet elérni. Ez az összefüggés, a füstgáz hőjének a levegő hőjéhez való aránya látható a 2. ábrán. Minél kisebb a levegő-fűtőanyag tüzelés részaránya, annál nagyobb lesz ez az arány. A levegő túlzott előmelegítését, amely a rekuperátor élettartamának csökkenéséhez vezetne, a szokásoson túlmenő biztonsági intézkedésekkel akadályozzák meg.

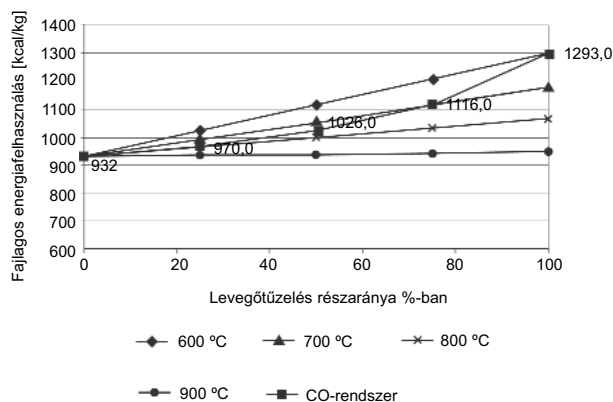


2. ábra. Füstgáz hőértéke – levegő hőértéke

Energiafelhasználás

A CO-rendszer fajlagos energiafelhasználása azon energiaszükséglet részarányától függ, amely a levegőégésen keresztül kerül hozzáadásra, azaz a levegő- és oxigénégők kombinációjának függvénye. Minél többet vezetünk be az oxigénégés következtében, annál kisebb lesz az energiafelhasználás. Továbbá az égési levegő elérhető hőmérséklete annál magasabb, minél több energiát juttatunk be az oxigénégésen keresztül. Ezt visszatükrözi a kád energiafelhasználása is, ahogyan az egy 350 t/d kád esetében látható (3. ábra).

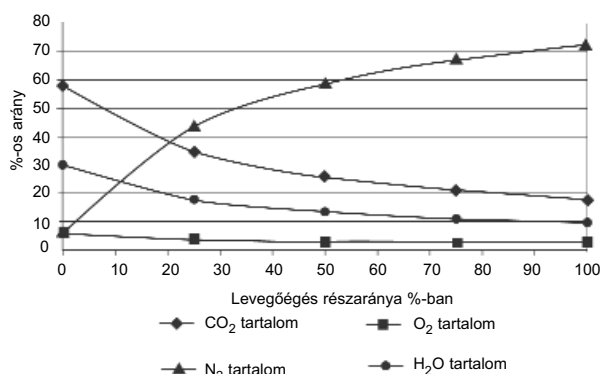
*„Környezetvédelem és hulladékfelhasználási lehetőségek az üvegyiparban” konferencián elhangzott előadás anyagából. Bp., 2002. május 15.



3. ábra. Fajlagos energiafelhasználás (fosszilis) a levegő különböző előmelegítése esetén

Füstgáz összetétele

A tisztán oxigéntüzelésű kádak esetében a füstgáz víztartalma nagyon magas. Az elpárolgó alkáliák a boltozat hideg helyein lecsapódhatnak, és a füstgázban lévő vízzel reakcióba lépve alkáli-hidroxidokat hozhatnak létre, amelyek a szilikaboltozat olvadáspontját csökkentik, a korróziót gyorsítják, és ezzel a boltozat élettartamát megrövidítik. Az oxigén- és levegőégés megfelelő kombinációja révén a füstgáz víztartalma (4. ábra) lényegesen csökkenthető, és az oxigéntüzelésű káddal szemben a boltozat élettartama növelhető.



4. ábra. Füstgáz összetétele földgáztüzelés mellett

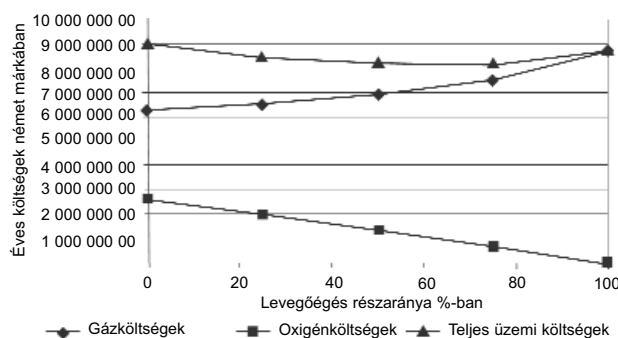
Emisszió

A NO_x-emisszió csökkenthető, ha az oxigénégőket a beolvasztási szakaszban, a levegőégőket pedig a tisztító

szakaszban helyezzük el. Lehetséges a levegőégők sztöchiometrián aluli beállítása. Ezáltal késleltetjük az égést, és elkerülhető a forró láng. Ugyanakkor az oxigénégők sztöchiometrián felüli beállításúak, úgyhogy a levegőégésből származó elégtelen fűtőanyag azt követően teljes mértékben elég.

Üzemeltetési költségek

Sok oxigénkád az alacsony energiafelhasználás ellenére sem gazdaságos a magas oxigénköltségek miatt. A rekuperatív tüzelésű kádaknak nagy az energiafelhasználása. Ez is magas üzemelési költségeket eredményez. A CO-rendszereknél a levegő- és oxigéntüzelés kombinációja révén ezek csökkenthetők. Az oxigén és a tüzelőanyag árából függően egy bizonyos kombináció esetében elérhető egy minimum, ahogyan ez az 5. ábrán látható. Ebben az esetben a minimum kb. 70% levegőtüzelésnél és 30% oxigéntüzelésnél található. Látható még egy teljesen rekuperatív tüzelésű kád és egy teljesen oxigéntüzelésű kád is. A költségek mindegyik esetben magasabbak.



5. ábra. Üzemeltetési költségek összehasonlítása (35 pfennig a gáz és 6 pfennig az oxigén)

3. Összefoglalás

A CO-rendszer olyan tüzelésrendszer, amely lehetővé teszi a költségeknek a minimumra történő csökkentését, miközben egyaránt rendelkezik a rekuperatív tüzelésű kádak és az oxigénkádak előnyeivel. Elengedhetetlen, hogy pontosan elemezzük a kád üzemeltetőjének kívánásait és helyzetét annak érdekében, hogy a CO-rendszer kombinációját úgy határozzuk meg, hogy a kád üzemeltetési költségei és üzem módja optimálisan legyenek kialakítva.

Az „Építőanyag” c. folyóirat 2002. évi megjelenését támogatja:

- PRO RENOVADA CULTURA HUNGARIAE ALAPÍTVÁNY
- IPAR MŰSZAKI FEJLESZTÉSÉÉRT ALAPÍTVÁNY
- AZ ÉPÍTÉS FEJLŐDÉSÉÉRT ALAPÍTVÁNY



Cím: 1034 Budapest, Bécsi út 122-124.

Levélcím: 1301 Budapest, Pf. 81

Anyagvizsgálati lehetőségek és eszközök

Fizikai vizsgálatok

- **Porozitás és pórusméret-eloszlás** 4 nm–177 μm pórusátmérő-tartományban higanypenetrációs poroziméterrel.
- **Fajlagos felület mérése** „egyponτος” nitrogéngáz abszorpciós módszerrel 0,1 m^2/g -nál nagyobb fajlagos felületű anyagokra.
- **Sűrűség meghatározása** hélium-piknométeres módszerrel, folyadékokban nem vizsgálható, azaz oldódó anyagokra is!
- **Szemcseméret-eloszlás és átlagos szemcseméret** mérése 0,1–600 μm tartományban lézergranulométerrel. A vizsgálatokhoz már 0,5 g anyag elegendő!

Termoanalitikai vizsgálatok

- **Differenciál termoanalitikai vizsgálatok**, számítógépi adatfeldolgozású derivatográffal 1000 °C vagy 1500 °C-ig (tömeg és entalpiaváltozás mérése hőmérséklet, valamint idő függvényében).
- **Dilatációs vizsgálatok** (hosszváltozás mérése) 20–1000 °C, 20–1500 °C, -170–400 °C tartományban.
- **Terhelés alatti lágyulás és kúszás vizsgálata max. 1700 °C-ig**

Kristályszerkezeti vizsgálatok

- Minőségi és mennyiségi röntgen-pordiffrakciós fáziselemzés számítógépes adatfeldolgozással. Fázisátalakulások in situ vizsgálata levegőn 1500 °C-ig, vákuumban 2200 °C-ig.

Morfológiai és mikroszondás vizsgálatok

- **Morfológiai vizsgálatok** pásztázó elektronmikroszkóppal, 20–60 000-szeres nagyítási tartományban.
- **Lokális kémiai összetétel** tanulmányozása a morfológiaiilag is megfigyelhető különböző fázisok, hibahelyek stb. esetén energiadisziperz mikroszondával.
- **Optikai mikroszkópia** számítógépes adatfeldolgozású képanalizátorral (különböző anyagok optikai jellemzőinek meghatározása).

Kémiai összetétel meghatározása

- Röntgenfluoreszcens analizátorral sorozatminták vizsgálata 1–3 nap alatt.

Akustikai vizsgálatok

- **Hangelnyelő tulajdonságok:** pórusos és szálas anyagok hangelnyelési fokának mérése állóhullámú csőben és az áramlási ellenállás vizsgálata.
- **Dinamikai rugalmas tulajdonságok:** rezgésszigetelő és -csillapító anyagok, lépéshang-szigetelők, műanyagok, kompozitok és egyéb nagy szilárdságú anyagok dinamikai rugalmassági modulusának és veszteségi tényezőjének vizsgálata.

További információ: Dr. Wojnárovits Lászlóné ügyvezető igazgató

Telefon: 388-8752, tel./fax: 368-7626, fax: 430-1460

E-mail: szikktilaborkft@matavnet.hu

www.szikktilaborkft.hu