



Pannon Egyetem  
Vegyésszmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

**Alternatív nyersanyagok felhasználási  
lehetőségeinek vizsgálata szilikátbázisú  
szervetlen polimerek előállítása és alkalmazása  
során**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Készítette:  
Fitosné Boros Adrienn  
okleveles anyagmérnök

Témavezető:  
Dr. Korim Tamás  
egyetemi docens

2023.

## Bevezetés és célkitűzés

Napjaink legnagyobb mennyiségben felhasznált mesterséges anyaga a cement. Azonban a cementgyártás a legnagyobb CO<sub>2</sub> kibocsájtók egyike és ezzel egy időben jelentős tájromboló hatása is van a mészkőbányászat miatt, ezért mindinkább a támadások keresztútjába kerül. Egyre határozottabb igény jelentkezik olyan kötőanyagok fejlesztésére, amelyek más nyersanyag-bázist igényelnek, valamint eltérő módon képesek kötésre és szilárdulásra, mint az eddig ismert és széles körben használt „klasszikus” hidraulikus (cement) kötőanyagok. Ígéretes megoldást jelenthetnek az ún. alkáli aktivált cementek (AAC) (vagy: szilikátbázisú szervetlen polimerek), amik bár teljes mértékben nem válthatják ki a cementeket, de némely esetben komoly alternatívát jelenthetnek.

Az AAC-ek versenyképessége abban rejlik, hogy alapanyagukként szolgálhat minden olyan porszerű anyag (így akár a környezetet szennyező különböző ipari hulladékok és melléktermékek is), amely elegendő mennyiségű reaktív Si-, Al- és Ca-tartalommal rendelkezik. Ezen túlmenően az AAC-ek mátrixa további hulladékok megkötésére is alkalmas, ezáltal a körforgásos gazdasági modell szerves részét képezhetik. Az a tény sem elhanyagolható, hogy könnyített/habosított szerkezeti elemek gyártásával egészen egyedi alkalmazások is megjelenhetnek a palettán. Az AAC habok, mint környezetbarát, porózus anyagok, kedvező előállítási feltételeik és ígéretes tulajdonságaik miatt a környezetvédelmi és gazdasági szempontból releváns területeken (pl. hő- és hangszigetelés, pH szabályozás, levegő- és szennyvíztisztítás) figyelemreméltó potenciállal rendelkeznek.

Kutatásom elsődleges célja a „hulladékból haszon” elv követése, amelyet két úton kívántam megvalósítani. Célom volt egyrészt a felhalmozódott ipari melléktermékek és hulladékanyagok alkáli aktiválásával olyan nagyobb hozzáadott értékű termék előállítása, amely mechanikai tulajdonságait tekintve versenyképes a klasszikus kötőanyagokkal. Másrészt pedig bizonyítani kívántam, hogy a szennyeződésektől mentes, tiszta komponensek habosításával olyan szabályozható tulajdonságokkal rendelkező multifunkciós AAC habok fejleszthetők, amelyek alkalmazásával sokat tehetünk a levegő- és vízszennyezés, valamint az energiapazarlás ellen. Ehhez az AAC-ek két nagy csoportjából (CaO szegény és gazdag rendszer) 1-1 kiemelt tag (metakaolin és kohósalak) felhasználásával kívántam bemutatni, hogyan lehet alternatív utat találni az egyre súlyosbodó globális környezeti problémák kezelésére, illetve a „klasszikus” kötőanyagok részbeni kiváltására.

## Kísérleti tevékenység

Doktori értekezésemben az AAC-ek gyakorlati alkalmazhatóságát korlátozó problémák feltárásával és azok lehetséges megoldásával foglalkoztam. A vonatkozó szakirodalom feldolgozása alapján elmondható, hogy a különböző hulladékok társításával előállított kompozitok mechanikai tulajdonságaikat tekintve kevésbé jól teljesítenek, mint a „klasszikus” kötőanyag bázisú kompozit társaik. Az alkalmazott alumino-szilikát forrás mellett az adalékanyag minősége is döntően befolyásolja a végtermék tulajdonságait. A kohósalak és az end of life abroncsokból származó gumiőrlemény társítása esetén fő feladat volt a kompozit szilárdságának maximálása a gumiőrlemény/homok arány megfelelő megválasztásával, a mátrix és a gumiszemcsék közötti kompatibilitás biztosításával, továbbá szálerősítés alkalmazásával. A fizikai jellemzők vizsgálata során a tárolási körülmények, a próbatest méretének és/vagy alakjának, valamint a ciklikus terhelésnek nyomószilárdságra gyakorolt hatását vizsgáltam, amit klasszikus kötőanyagok (CEM I 42,5 N jelű portlandcement, CEM III/B 32,5 N-LH/SR jelű kohósalakcement) releváns értékeivel hasonlítottam össze. A kapott eredmények alapján a 10% (m/m)-ban kénsavval kezelt gumiőrleményt és 1% (m/m)-ban kaolingyapot szálakat tartalmazó keverék összetétele nevezhető meg optimális összetételnek, amelynek mechanikai tulajdonságai versenyképesek a klasszikus kötőanyagokéval.

A metakaolin alapú AAC habok, mint környezetbarát porózus anyagok, amellyel, hogy tűzállók és kémiaiilag inertek, nagy fajlagos felülettel és gázáteresztő-képességgel rendelkeznek. Azonban a gyakorlati alkalmazás szempontjából komoly aggodalomra ad okot az alumino-szilikát forrás extrém vízigényéhez párosuló száradási zsugorodás és az abból fakadó erőteljes repedezés. Emellett a pórusszerkezet szabályozhatósága, továbbá a nagy átmenő porozitás melletti optimális szilárdság biztosítása szintén nem megoldott probléma. Kísérleti munkám második felében a habosítást elszappanosítás/peroxidos-bomlás/gélesítés (EPG) kombinált eljárással valósítottam meg. A  $H_2O_2$  koncentrációjának, a stabilizáló szer fajtájának és mennyiségének, továbbá a salakadagolásnak a fizikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltam. A habok szervesanyag és repedésmentessé tételét a technológiai paraméterek (hőkezelés, mosás és égetés) optimalizálásával valósítottam meg. Eredményeim alapján a könnyű és kis hővezetőképességű habok alkalmasak hőszigetelő elemekként az épületek energiaveszteségének csökkentésére. Nagy nyílt porozitásukhoz, fajlagos felületükhöz, szilárdságukhoz fotokatalitikus tulajdonságokat párosítva pedig figyelemreméltó potenciállal rendelkeznek számos fizikai-kémiai alkalmazásban (pl. levegő- és szennyvíztisztítás).

## Új tudományos eredmények, tézisek

1. Bizonyítottam, hogy különböző hulladékanyagok (kezelt gumiőrlemény, kohósalak, kaolingyapot) felhasználásával, alkáli aktiválást alkalmazva, a gumiőrlemény/homok arány optimalizálásával olyan kompozit rendszer alakítható ki, amelynek fizikai sajátságai (nyomószilárdság akár 44,0 MPa) összemérhetők a vonatkozó termékszabványban (EN 197-1) megkövetelt második szilárdsági osztályú cementekével.
2. Megállapítottam, hogy a szabványos (EN 12390-2) módon és méretben történő előállítással és tárolással a hulladék bázisú alkáli aktivált cementek (AAC-ek) szilárdsági értékei maximálhatók, a fejlesztett kompozitok mechanikai tulajdonságait tekintve versenyképesek a klasszikus kötőanyagokkal. Amellett, hogy a szilárdság meghaladja az összehasonlításban vizsgált klinker-takarékos cement (CEM III/B 32,5 N-LH/SR) szabványban megkövetelt értékét, a fejlesztett kompozit 2,5-szer több hulladékot is tartalmaz, mint a CEM III kohósalakcementből előállított habarcs.
3. Megállapítottam, hogy a gumiszemcsék és az AAC mátrix között fellépő kompatibilitás problémát sem a cementiparban általánosan használt betonfolyósító, sem pedig a műanyagiparban bevált hidrofilizáló szerek nem orvosolják, viszont a gumi felületének kémiai, illetve fizikai úton történő kezelése megoldást jelent. A legjelentősebb szilárdságnövekedés (55%-os javulás a kiindulási állapothoz képest) kénsavval történő kezeléssel érhető el. A kezelés hatására bekövetkező, FT-IR vizsgálatokkal igazolt anyagszerkezeti változások a gumiszemcsék saját szilárdságának javításával (Shore A keménység mérés) is hozzájárulnak a kompozit szilárdságának növeléséhez.
4. Bemutattam, hogy a kénsavval kezelt gumiőrlemény és szálerősítés együttes alkalmazásával előállított hulladék bázisú AAC kompozitok nem csak statikus, hanem ismétlődő terhelésnek kitett helyeken is alkalmazhatók, jól viselik a ciklikus igénybevételt, így a mechanikai hatásokkal szembeni ellenállóképesség határozottan javítható (44,0 MPa → 47,3 MPa, 8%-os növekedés).

5. Bizonyítottam, hogy elszappanosítás/peroxid-bomlás/gélesítés (EPG) kombinált eljárással lehetséges tervezetten változtatható porozitású és optimális szilárdságú habosított szerkezeti anyagok előállítása. A pórusrendszer szabályozása a habosítószer és a különböző stabilizálószer kombinációjával valósítható meg;  $\text{H}_2\text{O}_2$  oldat alkalmazásával, illetve a stabilizáló szerek és peroxid (S/H) arányának változtatásával kvázi tetszőlegesen szabályozható nyílt porozitású (5,8 – 67,5% (V/V)) termékek állíthatók elő.
6. Bizonyítottam, hogy nem csak kontrollált tulajdonságú, multifunkciós habok fejleszthetők, hanem megoldást találtam az alumino-szilikát forrás extrém vízigényéhez párosuló, a habok száradási zsugorodásának és az abból fakadó erőteljes repedezésének meggátlására is. Ennek során mosási és hőkezelési programokat dolgoztam ki. Bemutattam, hogy a szervesanyag-tartalom csökkentése (mosás) kritikus jelentőséggel bír a minták későbbi égetése során, a megfelelő hőkezelés pedig gyorsítja az alkáli aktiválási reakció lezajlását, katalizálja a  $\text{H}_2\text{O}_2$  bomlását és elősegíti az elszappanosítási folyamatot, ami végeredményben az egymással összekapcsolódó, átmenő pórusok mennyiségének növekedését eredményezi.
7. Megállapítottam, hogy az AAC habok hőkezelése kiterjed azok égetésére is, ami nem csupán a szervesanyag-mentesítés eszközeként szolgál, hanem alkalmazásával a releváns fizikai tulajdonságok javulnak, a nyílt porozitás 1/3-ával, a nyomószilárdság pedig akár 6,5-szeresével is növelhető.
8. Igazoltam, hogy a tömb típusú AAC habok multifunkciós felhasználási lehetőségeket rejtnek magukban, előnyös fizikai sajátságaiknak (nyomószilárdság 8,6 MPa, nyílt porozitás 77,7% (V/V), testsűrűség 499 kg/m<sup>3</sup>, hővezetési tényező 0,041 W/mK, fajlagos felület 4,3 m<sup>2</sup>/g) köszönhetően teljesíthetik a legtöbb olyan gyakorlati követelményt, amelyekkel a hőszigetelő anyagoknak és a katalizátorhordozóknak rendelkezniük kell.
9. Bemutattam, hogy a fejlesztett AAC habok önmagukban (felületükön félvezető tulajdonságokkal rendelkező fémionok megkötése nélkül) is rendelkeznek fotokatalitikus aktivitással, pórusszerkezetüknek és nagy fajlagos felületüknek köszönhetően figyelemreméltó potenciállal rendelkeznek a levegő- és szennyvíztisztítási eljárásokban.

## A doktori értekezés témaköréhez tartozó közlemények

### I. A PhD dolgozat alapját képező közlemények

#### Idegen nyelvű, külföldi folyóiratban megjelent közlemény

1. Boros, A., Varga, C., Prajda, R., Jakab, M., Korim, T. (2021) Development of waste-based alkali-activated cement composites. *Materials*, 14, 5815 (IF: 3,623 (2021)).
2. Boros, A., Korim, T. (2022) Development of geopolymer foams for multifunctional applications, *Crystals*, 12, 386 (IF: 2,589 (2021)).
3. Balczár, I., Boros, A., Kovács, A., Korim, T. (2022) Foamed geopolymer with customized pore structure. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 28 (4), 287-296 (IF: 0,925 (2021))

#### Idegen nyelven tartott konferencia előadás, kivonatos megjelenéssel

4. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2017) Synthesis of inorganic polymers based on different raw materials, *12<sup>th</sup> Conference for Young Scientists in Ceramics*, Novi Sad, Serbia, October 18-21., ISBN: 978-86-6253-082-0, p. 120.
5. Boros, A., Korim, T., Balczár, I., (2018) Alkali activated cement foams as catalyst supports, *Seventeenth Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, Belgrade*, Serbia, December 5-7., ISBN: 978-86-80321-34-9, p. 39.
6. Boros, A., Korim, T. (2019) Photochemical activity of metakaolin based geopolymer foams, *13<sup>th</sup> Conference for Young Scientists in Ceramics*, Novi Sad, Serbia, October 16-19., ISBN: 978-86-6253-104-9, p. 96.

#### Magyar nyelven tartott konferencia előadás, kivonatos megjelenéssel

7. Boros, A., Balczár, I., Korim, T., (2017) Változtatható porozitású szervesetlen polimerek előállítási lehetősége, *XXIII. Nemzetközi Vegyészkonferencia*, Déva, Románia, Október 25-28., ISSN:1843-6293, p. 21.
8. Boros, A., Korim, T., (2017) Kombinált eljárással (GEP) előállított tervezett porozitású alkáli aktivált szervesetlen polimer habok, *PhD hallgatók anyagtudományi napja XVII.*, Veszprém, December 04.

9. Boros, A., Korim, T., (2018) Alkáli aktivált szervesetlen polimer habok előállítása GEP módszerrel, *Műszaki Kémiai Napok 2018*, Veszprém, Április 24-26., ISBN 978-963-396-107-0, p. 21.
10. Boros, A., Korim, T., (2018) Kaolin alapú AASP habok zsugorodásának és repedési hajlamának csökkentése, *PhD hallgatók anyagtudományi napja XVIII.*, Veszprém, November 26.
11. Boros, A., Korim, T., Prajda, R. (2020) Ipari hulladékanyagok felhasználási lehetőségeinek vizsgálata AAC-bázisú kompozitok előállítására, *PhD hallgatók anyagtudományi napja XX.*, Veszprém, November 16.

#### **Idegen nyelvű poszter**

12. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2018) Alkali activated cement foam blends based on metakaolinite and ground granulated blast furnace slag, *14<sup>th</sup> International Ceramics Congress*, Perugia, Italy, June 4-8.
13. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2018) Production of inorganic polymer foams with combined foaming process (GSP), *FEMS JUNIOR EUROMAT CONFERENCE 2018*, Budapest, July 8-12.
14. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2018) Investigation of kaolin based inorganic polymer foams, *11<sup>th</sup> Chemistry Conference*, Plovdiv, Bulgaria, October 11-13.
15. Boros, A., Korim, T., (2019) Production of crack free catalyst supports from metakaolin based geopolymers, *5<sup>th</sup> Conference of The Serbian Society for Ceramic Materials*, Belgrade, Serbia, June 11-13., ISBN 978-86-80109-22-0, p. 117.
16. Boros, A., Korim, T., (2019) Special application possibilities of metakaolin based geopolymer foams, *Twenty-first Annual Conference YUCOMAT 2019 & Eleventh World Round Table Conference on Sintering WRTCS 2019*, Herceg Novi, Montenegro, September 2-6., ISBN 978-86-919111-4-0, p. 107.

#### **Magyar nyelvű poszter rövid előadással**

17. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2017) Tervezett porozitású alkáli aktivált szervesetlen polimerek előállítása, *XI. Országos Anyagtudományi Konferencia*, Balatonkenese, Október 15-17., ISBN 978-615-5270-40-6, p. 61.

## **II. A PhD dolgozat tématerületét érintő közlemények**

### **Idegen nyelvű, külföldi folyóiratban megjelent közlemény**

1. Balczár, I., Korim, T., Hullár, H., Boros, A., Makó, É. (2017) Manufacture of air-cooled slag-based alkali-activated cements using mechanochemical activation, *Construction and Building Materials*, 137, 216-223 (IF: 3,169 (2017))

### **Magyar nyelvű, hazai folyóiratban megjelent közlemény**

2. Eniszné Bódogh, M., Hegedűs-Dobrádi, A., Jakab, M., Korim, T., Soósné Balczár, I., Boros, A., Kovács, A., Kristófné Makó, É. (2021) Nemfémes szervesetlen funkcionális anyagok és nanoszerkezetek fejlesztése a Pannon Egyetemen, *Magyar Kémiai Folyóirat*, 127 (3-4), 153-159.

### **Magyar nyelven tartott konferencia előadás, kivonatos megjelenéssel**

3. Boros, A., Korim, T., (2015) Szervesetlen polimer bázisú kötőanyagok előállítása alternatív nyersanyagok felhasználásával, *Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia Műszaki Tagozat*, Veszprém, November 18.
4. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2016) Geopolimerek előállítási lehetőségeinek vizsgálata eltérő fajlagos felületű kiindulási komponensek felhasználásával, *Műszaki Kémiai Napok 2016*, Veszprém, Április 24-26., ISBN 978-963-396-087-5, p. 155-156.
5. Boros, A., Korim, T., (2017) Szervesetlen polimer bázisú kötőanyagok előállítása alternatív nyersanyagok felhasználásával, *XXXIII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia Műszaki Tudományi Szekció*, Dunaújváros, Április 6-8., ISBN 978-963-9915-88-6, p. 64.
6. Balczár, I., Korim, T., Boros, A., Hullár, H. (2017) Hőszigetelő tulajdonságú kötőanyagrendszerek, *XI. Országos Anyagtudományi Konferencia*, Balatonkenese, Október 15-17., ISBN 978-615-5270-40-6, p. 39.
7. Balczár, I., Korim, T., Boros, A., Hullár, H. (2018) Hőszigetelő tulajdonságú kötőanyagrendszerek, *Műszaki Kémiai Napok 2018*, Veszprém, Április 24-26., ISBN 978-963-396-107-0, p. 75.
8. Boros, A., Korim, T., (2019) Rejtett hidraulikus sajátságokkal rendelkező, CaO-ban szegény, természetes bányatermékek alkáli aktiválása, *PhD hallgatók anyagtudományi napja XIX.*, Veszprém, December 02.

### **Idegen nyelvű poszter**

9. Boros, A., Korim, T., Balczár, I. (2016) Comparative Analysis of Inorganic Polymers Obtained by Raw Materials with Different Properties, 4<sup>th</sup> International Conference on Competitive Materials and Technology Processes, Miskolc-Lillafüred, October 03-07., ISBN 978-963-12-6592-7, p. 143.
10. Boros, A., Balczár, I. Korim, T., Makó, É. (2017) Production of inorganic polymers with different raw material activating methods based on kaolin, 15<sup>th</sup> Conference & Exhibition of the European Ceramic Society, Budapest, July 9-13., ISBN 978-963-454-094-6, p. 51-52.

## **A doktori értekezés témaköréhez nem kapcsolódó közlemény**

### **Idegen nyelvű poszter**

1. Boros, A., Korim, T., (2017) Analysis of application of lighting technology waste glass for ceramic industry, *Slovak and Czech Glass Conference & Seminar on Defects in Glass*, Trenčianske Teplice, Slovakia, June 28-30.