



Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ

Anyagmérnöki Intézeti Tanszék

Tisztelt Dr. Szilágyi Tamás!

Nagyon köszönöm azt az időt és erőfeszítést, amelyet arra fordított, hogy értékelje az „**Alternatív nyersanyagok felhasználási lehetőségeinek vizsgálata szilikátbázisú szervesetlen polimerek előállítása és alkalmazása során**” című doktori értekezésemet. Hálás vagyok a dolgozattal kapcsolatos észrevételekért. A műhelyvitára készített, részletekbe menő opponensi véleménye alkalmat adott munkám ismételte, alapos átgondolására. A nyilvános vitára készített bírálata megerősített a témaválasztás fontosságában és aktualitásában, továbbá inspirációt adott a további kutatásokhoz.

Az értekezéshez kapcsolódó kérdésekre és megjegyzésekre pontról pontra szeretnék válaszolni.

Kérdések:

- I. *Hosszabb távon nem jelenthet-e gondot, hogy a „hulladék-felhasználás” alapja maga az a hulladék, amit minden gyártó, felhasználó csökkenteni akar (azaz végtelen időtávon a mennyisége 0-hoz konvergál). A jelölt nem látja-e veszélyét annak, hogy a hulladéokra átállított ipar:*
 - a. *nyersanyag nélkül marad (azaz a beszerzési ár az egekbe szökik),*
 - b. *a magas ár miatt nem lesz hajtóerő, hogy a beszállító ipar csökkentse hulladékképzését?*

Válasz: Jogos az opponens kérdése. Természetesen nem is kérdés, hogy ez gondot jelenthet. Fennáll a veszélye annak, hogy a kohósálakra „átállított” ipar nyersanyag nélkül marad, illetve nagyon felszökik az ára. Ugyanakkor megjegyezném, hogy a cementipar is komoly problémákkal küzd az ún. zero-waste és karbonsemlegességre irányuló törekvések miatt. A kutatók már dolgoznak az utólagos CO₂ megkötési technológiákon, azonban ezek még kezdetleges állapotban vannak. Véleményem szerint átütő sikert az hozhatna, ha az ipart képesek lennénk nem cement alapú kötőanyagokra átállítani. A dolgozatomban jellemzett kohósálak alapú alkáli aktivált cement (AAC) csupán egyetlen lehetséges alternatívát mutatott be. A továbbiakban olyan hulladékok (pl. YTONG por, betonhulladék, bontott téglák, stb.) is előtérbe kerülhetnének, amikkel ez idáig nem igazán foglalkoztak. Az Anyagmérnöki Intézeti Tanszéken folynak ilyen jellegű kutatások, pl. betonhulladék AAC-ekben történő felhasználásával olyan nem gyúlékony, habosított termékek állíthatók elő, amelyek hőszigetelő képessége versenyképes a kereskedelmi forgalomban kapható hőszigetelő anyagokéval. Az a meglátásom, hogy az építőipari bontási hulladékok, mint az AAC-ek kiindulási anyagai, korunk bontási és felújítási igényei miatt hosszú távon rendelkezésre fognak állni, így a hulladékra átállított ipar életképes maradhat. Azonban nem mehetünk el azon tény mellett, hogy a jelenlegi technológiai fejlettség és szakmai tudás még nem teszi lehetővé azt, hogy a klasszikus kötőanyagokat teljes



Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ

Anyagmérnöki Intézeti Tanszék

egészében kiváltsuk. Bár remek alternatív megoldások létezhetnek (ld. a fentebb bemutatott példák), az évi 4 milliárd tonna AAC előállítása egyelőre csupán illúzió.

- II. *Az AAC (GGBFS, pernye) esetén mindenki úgy gondolja, hogy az ezek előállítása során keletkezett CO₂ nem számít bele a karbonlábnyomba. Milyen lábnyomot kapunk, ha ezeket számítjuk feltételezve, hogy a jövőben az AAC-k mennyisége felfut a jelenleg cement mennyiségre (és a vasipar már nem tudja fedezni hulladékból a szükségletet)?*

Válasz: Sajnálatos módon az AAC-ek is rendelkeznek CO₂ kibocsátással, még ha ezt – tévesen – nem számítják bele a karbonlábnyomba. Több olyan tanulmány is született [1-4], amik az AAC-ek és a klasszikus kötőanyagok (OPC) gyártási folyamatának teljes CO₂ kibocsátását vizsgálták. Bár a kutatók egyetértenek abban, hogy az AAC-ek előállítása jóval kisebb emisszióval jár (~50-70%-os csökkenés), mint az OPC gyártása, azonban a folyamat teljes mértékben nem nevezhető karbonsemlegesnek. Yang és munkatársai [3] kiterjedt kutatást folytattak annak érdekében, hogy kiderítsék, az egyes kiindulási anyagok, a töltőanyagok, a gyártási folyamat, a hőkezelés, az aktiváló oldatok, a víz és az egyéb adalékok, illetve a szállítás milyen mértékben járulnak hozzá az előállított kötőanyag karbonlábnyomához. Míg OPC esetén főként a klinker előállítása jár a legtöbb CO₂ kibocsátással, addig az AAC-ek esetén az aktiválószer előállítása. A tanulmányból az derült ki, hogy minél nagyobb szilárdságú termék előállítása a cél, annál nagyobb mértékű lesz a CO₂ emisszió. Az alábbi táblázat összegzi a tanulmány eredményeit.

Tervezett nyomószilárdság	Vizsgált kötőanyagrendszer karbonlábnyoma (kg/m ³)		
	OPC	Salak alapú AAC	Pernye alapú AAC
24 MPa	323	110	160
40 MPa	509	122	181
70 MPa	568	256	223

A tanulmányban közölt eredmények alapján az AAC-ek alapanyagának előállítása salak esetén ~15-20 kg/m³, pernye esetén pedig ~10 kg/m³ CO₂ kibocsátással jár, míg az OPC-é ~300-500 kg/m³.

Amennyiben arra vagyunk kíváncsiak, hogy 1 t alapanyag előállítása milyen mértékű karbonlábnyommal párosul, úgy az alábbi értékeket kaphatjuk [4]:

- OPC: 0,94 t CO₂ / t,
- Salak: 0,026 t CO₂ / t.

Ha bekövetkezne az a helyzet, hogy a vasipar már nem tudja fedezni az AAC-ek előállításához szükséges hulladék mennyiségét, úgy előtérbe kerülhetnek más alternatív nyersanyagok. Ilyenek lehetnek az 1. kérdésre adott válaszban említett



Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ

Anyagmérnöki Intézeti Tanszék

építési bontási hulladékok, vagy a természetes nyersanyagok. Utóbbiak közé sorolhatjuk nagy agyagásvány tartalmú agyagokat, valamint a tufát és a perlitet, amelyben hazánk is bővelkedik. A perlit készletek esetén elmondható, hogy Magyarország a világ 10. helyén áll. A felsorolt anyagok mechanokémiai vagy termikus aktiválás útján alkalmasak lehetnek AAC-ek alapanyagául szolgálni. A tanszékünkön folyó kutatások rámutattak arra, hogy sok esetben az őrlés útján történő aktiválás kisebb karbonlábnnyommal jár, mint a termikus úton történő [5]. Ahhoz, hogy meg lehessen becsülni ezen anyagok felhasználásával előállított AAC-ek teljes CO₂ kibocsátását, kiterjedt kutatások szükségesek, amelyeket jövőbeli célként lehet kitűzni.

- [1] Weil, M., Dombrowski, K., Buchwald, A., Life-cycle analysis of geopolymers. In *Geopolymers, Cambridge, Woodhead Publishing*, (2009) 194-210. ISBN 978-1-84569-449-4.
- [2] McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., Riessen, A. van, Corder, G.D., Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19 (2011) 1080-1090.
- [3] Yang, K.H., Song, J.K., Song, K.I., Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. *Journal of Cleaner Production*, 39 (2013) 265-272.
- [4] Alsaman, A., Assi, L.N., Kareem, R.S., Carter, K., Ziehl, P. Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. *Cleaner Environmental Systems*, 3 (2021) 100047.
- [5] Soósné Balczár I. Alkáli aktivált, szervesetlen polimer bázisú kötőanyagrendszer fejlesztése – Doktori (PhD) értekezés (2018) (DOI:10.18136/PE.2018.674)

III. *A salakos minták vizsgálatánál, a jelölt elvégezte-e a salaktartalom változtatását is, vagy csak az MK sorból megállapított 10 m/m%-s helyettesítést? Különös tekintettel saját megállapításra: az „MK esetén megfigyelt gumitartalom-szilárdság összefüggés (26. ábra), miszerint adott gumimennyiségek esetén a szilárdsági értékek szinten tarthatók, a GGBFS alkalmazásakor nem érvényesül (31. ábra)”.*

Válasz: Kísérleti munkám során mind a metakaolin, mind pedig a salak alapú AAC-ek (gumi- és szálmentes keverékek) összetétele az Anyagmérnöki Intézeti Tanszéken korábban folyó kutatások alapján került kiválasztásra. Mindkét anyagrendszer esetén célom volt egy-egy olyan optimális összetételből kiindulni, amelyeknél a szilárdsági értékek már maximálva lettek. A kísérleteket a 23. és 24. ábrákon, valamint a 9. táblázatban ismertetett rögzített paraméterek (kiindulási anyag tartalom, aktiváló oldat összetétel) alkalmazása mellett végeztem el. A töltőanyagként alkalmazott szabványhomok gumihulladékkal történő helyettesítését MK alapú rendszernél 0-45% (m/m), salak alapú rendszernél pedig 0-25% (m/m) közötti tartományban végeztem el. Az opponens által idézett mondat tulajdonképpen azt jelenti, hogy míg MK alapú AAC-eknél azt tapasztaltam, hogy a 0-10% (m/m)-os gumihelyettesítés



Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ

Anyagmérnöki Intézeti Tanszék

nem okozza a szilárdsági értékek drasztikus változását (26. ábra), addig a salak alapú AAC-eknél ez nem mondható el (31. ábra).

- IV. 61. oldal 35. ábrához: megvizsgálta-e a rendszereket 56 – 90 napos korban (érdemes lenne 1 – 2- 3 évet is átnézni)? (a GGBFS kifejezetten lassan kötő anyag, amit az aktivátorral felgyorsítunk, azonban a CEM III/B 32,5 N-LH/SR esetében a cement alkálitartalma adja az aktivitást okozó alkáliákat, azaz sokkal lassabban köt meg) A kiegészítő vizsgálatnál kizárható lenne az időben változó kötéserősségek összevetésének félreértése.

Válasz: Ilyen kísérleteket ez idáig nem végeztem, azonban az Anyagmérnöki Intézeti Tanszéken korábban már folytak ehhez kapcsolódó kutatások. Salak alapú AAC-ek esetén elmondható, hogy a tárolási idő előrehaladtával (1, 2, 7, 28 nap, 3, 6 és 12 hónap) a próbatestek szilárdsága folyamatosan nő, a 28 napos korban mért nyomószilárdság 37,6 MPa, az 1 éves korban mért pedig 83,1 MPa, ez utóbbi meghaladta az EN 197-1 szabvány szerinti legnagyobb szilárdsági osztály értékét (52,5 MPa). Az AAC-ek hosszú távú szilárdságfejlődése nagyobb mértékű, mint amit az OPC alapú kötőanyagoknál tapasztalhatunk. Mivel a cement alapú kötőanyagok szabványos szilárdságaként a 28 napos értéket tekintik mérvadónak, nem tartottam szükségesnek az értekezésben vizsgált kötőanyagrendszerek ettől hosszabb ideig tartó tárolását és vizsgálatát. Azonban kétségtelen tény, hogy a gumitartalmú kompozitok 28 napos kort meghaladó szilárdságáról nincsenek sem saját, sem pedig szakirodalmi adataim. Így jelen kutatás folytatásaként az opponens által javasolt kiegészítő vizsgálat elvégzését jövőbeli célnak tekintem.

Bízom benne, hogy sikerült megválaszolni minden kérdést és észrevételt. Még egyszer őszinte tisztelettel köszönöm opponensi véleményét és javaslatát, miszerint támogatja dolgozatom nyilvános vitára történő bocsátását és az értekezésben megfogalmazott eredmények elfogadását.

Tisztelettel:

Fitosné Boros Adrienn
doktorjelölt

Veszprém, 2023. június 01.