

MISKOLCI EGYETEM

Anyag- és Vegyészmérnöki Kar

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézet



**Útépítésben hasznosítható, ásványi nyersanyagok kiváltását célzó alternatív
anyagok vizsgálata**

Doktori (*PhD*) értekezés téziszfüzet

Készítette:

Bárdos-Udvardi Bella

okleveles anyagmérnök

Tudományos témavezetők:

Dr. Kocserha István

Dr. Géber Róbert

Miskolc

2024

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az útépitőiparban nélkülözhetetlen ásványi kőzetek olyan primer nyersanyagok, amelyeknek mennyisége világszerte kimerülőben van, így ezek rendelkezésre állása néhány évtized múlva már kérdéseket vet fel. Az egyre csökkenő ásványvagyonnak köszönhetően a nyersanyagok ára folyamatosan növekszik. Emiatt született meg az ötlet az olyan potenciális anyagok kutatása iránt, amelyek segítségével az ásványi nyersanyagok részben, vagy teljes egészében helyettesíthetők.

Mindezen túl a nagy mennyiségben termelődő mind inert, és mind környezetszennyező hulladékok növekvő mennyisége is problémákat vet fel. Ezen anyagok hulladéklerakóba történő tárolása nem jelent végleges megoldást, hiszen ez sem gazdasági, sem környezetvédelmi szempontból nem előnyös.

Kutatómunkámban arra törekedtem, hogy a fenti két célt minél jobban megközelítsem. Az értekezésben bemutatott kísérletsorozatokban másodlagos nyersanyag felhasználásával olyan alkáli aktivált mesterséges kőanyagot állítok elő, mely alkalmas lehet primer ásványi anyagok aszfaltkeverékekben történő kiváltására. Vizsgáltam különböző prekursorok és technológiai paraméterek a mesterséges kőzetre kifejtett hatásmechanizmusát is.

A doktori munkámban a primer nyersanyagokat aszfaltkeverékben történő alkalmazásra tervezem. Aszfaltnak azokat az anyagokat nevezzük, amelyben az ásványi adalékanyagokat kötőanyag von be és köt össze. Az ásvány anyagokat szemcseméretük alapján különböző osztályokba sorolják [1, 2], úgy mint zúzott kő: $d > 2,0$ mm; homok: $0,063$ mm $< d < 2,0$ mm és töltőanyag: $d < 0,063$ mm. Az ásványi anyagok vagy természetes úton aprózódott kőzetek, vagy vulkáni eredetű kőzetek, amelyeket aprítással állítanak elő különböző szemcseméretűre. Az aszfaltkeverékekben a töltőanyagok a töltik be a legfontosabb szerepet. Az egyik feladatuk, hogy kitöltik a nagyobb méretű szemcsék közötti teret, tömörebbé téve az aszfaltkeveréket, míg másik feladatuk, hogy az aszfalt kötőanyagával a *bitumennel* összetapadva, a nagyobb méretű kőzeteket összeragasztja, biztosítva az aszfaltkeverék mechanikai szilárdságát. Az aszfalttechnológiában elvárt tulajdonság, hogy a bitumen és a kőanyag között jó tapadás alakuljon ki [3]. A bitumen különböző szénhidrogén vegyületekből áll. A bitumen tulajdonságait a komponensei határozzák meg, amelyek a következők: aszfaltén, gyantás rész, olajos rész, aszfaltogén savak [4].

Az alkáli aktivált mesterséges kőanyagok területén végzett szakirodalmi kutatás alátámasztotta, hogy kevés forrás található ebben a témában. Az áttekintett források többségében az alkáli aktivált anyagokat modifikált bitumen adalékszerként vagy töltőanyagként alkalmazták az aszfaltkeverékekben (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**) [5, 6, 7, **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**], azonban kővázként történő felhasználásra egy kutatási eredmény volt elérhető, amelyben prekurzorként rizshéjhamut és eröművi pernyét használtak a mesterséges kőanyag előállításához.

1. táblázat Alkáli aktivált anyagok aszfaltkeverékben történő alkalmazásra

Ref.	Alapanyagok	A tanulmány célja	Elért eredmények
[5]	metakaolin, acélgyártási salak, szilikapor	Geopolimer adalékszer meleg aszfalt keverékbe, bitumen modifikálása céljából.	A geopolimert bitumenhez adva a bitumen lágyuláspontja nőtt, a penetráció csökkent. A geopolimer port a bitumenhez adagolva csökkent a bitumen a viszkozitása, ezáltal javult az aszfalt bedolgozhatósága és csökkenthető volt a keverési hőmérséklet.
[6]	pernye (F típusú)	A geopolimerrel modifikált bitumen reológiai viselkedésének és mikroszerkezeti tulajdonságainak laboratóriumi vizsgálata.	A nyomvályúsodási tényező 10 rad/sec és 58 °C-on 22 %-kal, 58,2 %-kal és 86,6 %-kal nőtt a geopolimerek 3,6 és 9%-os tömegarányú hozzáadásával a kötőanyaghoz képest, ami azt jelzi, hogy a merevség javult.
[7]	pernye (F-típusú)	Pernye alapú geopolimerrel modifikált bitumen.	A bitumenhez adagolt geopolimer javította a bitumen rugalmasságát.
[Hiba! A könyvjelző nem létezik.]	rizshéjhamu, eröművi pernye	Geopolimer alapú mesterséges kőzet előállítása.	A megszilárdult geopolimerből aprítással állították elő a mesterséges kőanyagot. A geopolimer törőszilárdságát, Los Angeles aprózódását, vízfelvevő képességét, mikrokeménységét vizsgálták és eredményeik alapján a készítő alternatívájának megfelel a geopolimer.

A szakirodalmi áttekintés után az alábbi nyitott kérdések fogalmazódtak meg:

1. Előállítható-e másodlagos nyersanyagokból, alkáli aktiválással olyan mesterséges kőanyag, amely helyettesítheti az aszfaltkeverékek kővázat?
2. Az alkáli aktivált anyag elviseli-e az aszfalttechnológiában alkalmazott szárítási és keverési hőmérsékletet?
3. Milyen az alkáli aktivált anyag és a bitumen közötti nedvesítés?
4. A bitumen megtapad-e az alkáli aktivált anyag felületén?

A fenti kérdések alapján fogalmaztam meg a kutatásom céljait, amelyek a következők voltak: másodlagos nyersanyag felhasználásával olyan alkáli aktivált mesterséges kőanyag előállítása, mely alkalmas lehet a primer ásványi anyagok aszfaltkeverékben történő kiváltására.

Kutatómunkámat tehát az alábbiak szerint építettem fel:

- másodlagos nyersanyagok, mint alkáli aktivált anyagok lehetséges prekursorainak vizsgálata;
- az előállított alkáli aktivált anyag szilárdságának növelése különböző prekursorokkal;
- az előállított alkáli aktivált anyag különböző hőmérsékleteken történő viselkedése;
- aszfaltkeverékek töltőanyagának és kőanyagának vizsgálata: a bitumen és az előállított alkáli aktivált anyag kölcsönhatásának tanulmányozása (nedvesítőképesség, bitumenes tapadóképeség).

1 A KUTATÓMUNKA SORÁN ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Az alkáli aktiváláshoz megfelelő méretű betonőrleményt (*B*) alkalmaztam másodlagos nyersanyagként (prekuzorként), amelyet bontott beton villanyoszlopból állítottam elő. A válogatott hulladék betont a *Trans Special Kft*-től szereztem be (*1. ábra*).



1. ábra Az előkísérletekhez másodlagos alapanyagok

Az alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának növelése céljából metakaolint alkalmaztam. A kaolin hevítés hatására 500-800 °C közötti hőmérsékleten átalakul metakaolinná [8, 9]. Más puccolános anyagoktól az különbözteti meg, hogy képes nagyon gyorsan elreagálni a portlandittal (*kalcium-hidroxidot*, $Ca(OH)_2$) [10]. Kutatómunkámban mádi kaolin kalcinálását $T=750$ °C hőmérsékleten és $t=3$ h hőntartási idő alkalmazásával végeztem el, melynek során előállítottam a kiegészítő prekuzorként használt metakaolint. A másik kiegészítő prekuzorként aerosil nevű anyagot használtam, amely lényegében tiszta szilícium-dioxid (SiO_2) és kereskedelmi forgalomban kapható nagy finomságú, nagyon könnyű, fehér por. Gyakran alkalmazzák tixotropizáló (*konzisztencia-sűrítő*) szerként. Az aerosil alkalmazásával

az összekevert anyag bedolgozási ideje megnő, emellett javítja a kész termék nyomószilárdságát [11].

A doktori kutatómunkámban a **2. táblázatban** bemutatott vizsgálatokat hajtottam végre:

2. táblázat A kutatómunka során alkalmazott vizsgálatok

Vizsgálat típusa	Meghatározandó anyagjellemző
Röntgen fluoreszcencia spektroszkópia (<i>XRF</i>)	Kémiai (<i>oxidos</i>) összetétel
Lézergranulometria	Szemcseméret-eloszlás
Pásztázó elektronmikroszkópia (<i>SEM</i>) és energia-diszperzív röntgen-analizátor (<i>EDX</i>)	Morfológia és felületi elemösszetétel
Röntgen pordiffrakció (<i>XRD</i>)	Ásványi összetétel
Anyagsűrűség (<i>MSZ EN 1097-7:2008</i>)	Anyagsűrűség (<i>töltőanyag, AAM</i>)
Rigden-féle hézagterfogat (<i>MSZ EN 1097-4:2000 szabvány</i>)	Hézagterfogat (<i>töltőanyag</i>)
Hidrofób/hidrofil vizsgálat	Hidrofil tényező (<i>töltőanyag, AAM</i>)
German Filler Teszt	Töltőanyagok olajmegkötő képesség (<i>töltőanyag, AAM</i>)
Fajlagos felület	BET fajlagos felület (<i>töltőanyag, AAM</i>)
Vicat-féle kötési idő (<i>MSZ EN 1963:2017</i>)	Kötési idő (<i>alkáli aktivált pép</i>)
Hevítőmikroszkópos vizsgálat	Peremszög (<i>AAM és bitumen között</i>)
Derivatográf	Tömegcsökkenés.
Fourier transzformációs infravörös spektrométer segítségével (<i>FT-IR</i>)	Funkciós csoportok (<i>AAM</i>)
A bitumen tapadóképességének meghatározása kőanyagalmazon (<i>MSZ EN 12697-11:2012</i>)	Tapadás mértéke (<i>AAM és bitumen között</i>)
Higanyporozimetria	Nyílt porozitás, pórusméret-eloszlás (<i>AAM</i>)

Előkísérletek során meghatároztam azt a másodlagos nyersanyagot (*prekurzort*), melyet az anyagkutatáshoz, fejlesztéshez használok. Az előkísérletben ipari melléktermékként alumínium-öntészeti salakot és három építési-bontási hulladékot (*tetőcserép őrlemény és téglá őrleményt, valamint betonőrleményt*) használtam. A kísérletek első szakaszában nyilvánvalóvá vált, hogy az alumínium salak, a tetőcserép őrlemény és téglá őrlemény önmagában, illetve egymással keverve nagyon kis szilárdságú alkáli aktivált anyag előállítását teszi lehetővé, így a mechanikai szilárdságot ($R_{ny} \sim 17 \text{ MPa}$) figyelembe véve a betonőrlemény alkalmazásával haladtam tovább.

A második szakaszban eltérő NaOH oldat koncentrációkkal (*4M, 6M, 8M, 10M, 12M, 14M és 16M*) végezett alkáli aktiválás során kimutattam, hogy a 10 M NaOH oldat alkalmazásával állítható elő a legnagyobb szilárdágú minta. Emellett több szempont szerint vizsgáltam a nátrium-szilikát (Na_2SiO_3) és a nátrium-hidroxid (NaOH) arányának hatását is. Ezalapján az 50:50 arányban alkalmazott NaOH: Na_2SiO_3 a legoptimálisabb a friss pép bedolgozhatósága, illetve a termék szilárdsága szempontjából. A szilárd anyag/folyadék arány tekintve a 70/30

arányú keveréket találtam megfelelőnek az alkáli aktivált pép bedolgozhatósága és nyomószilárdsága szempontjából.

A harmadik kutatási fázisban betonőrlemény alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának a növelése volt a célom. A betonőrlemény alapú alkáli aktivált anyag (AAMB) jelű alkáli anyaghoz egyéb kiegészítő prekursorokat (*szilikapor, méshidrát, kalcium-sztearát, metakaolin és aerosil*) adagoltam a betonőrlemény mennyiségének csökkentése mellett. A legnagyobb nyomószilárdság (59 MPa) eredményt a betonőrleményhez adagolt metakaolin és az aerosil nyersanyagkeverékkel értem el, amelyből az alkáli aktivált anyagot előállítottam. Anyagvizsgálatokkal jellemeztem a kiválasztott nyersanyagkeveréket és meghatároztam az alkáli aktivált friss pép Vicat-féle kötési idejét is.

Az aszfalttechnológiában a kőanyagokat a felhasználásuk előtt szárító/keverődobban szárítják kb 180 °C-200 °C-on, éppen ezért fontos volt, hogy megvizsgáljam az előállított mesterséges kőzet, hogyan viselkedik különböző hőmérsékleteken (20 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C és 200 °C). A kísérleteket elvégezve megállapítottam, hogy a hőkezelt AAMB_MKA (*betonőrlemény, metakaolin és aerosil alapú alkáli aktivált anyag*) jelű alkáli aktivált anyag szerkezetében változások sem a DTA, sem a FT-IR és sem a XRD vizsgálatokkal nem voltak kimutathatók. Gázadszorpciós vizsgálatok azonban csökkenő pórustérfogat mennyiséget jeleztek, azaz tömörebb szerkezet kialakulása eredményezi a hőkezelés során bekövetkező nyomószilárdság növekedést.

Az aszfalt keverékekben lévő kőanyag (*mely az utak kőváza*) esetén a bitumennel történő keverés esetén az alkáli aktivált anyag és a bitumen kötőanyag közötti kapcsolat, azaz a tapadás elsőrendű fontosságú. Ezt a tulajdonságot hevítőmikroszkóp segítségével térképeztem fel, majd a kapott eredményeket a referencia anyaggal (*mészkö*) vizsgálati eredményeivel vettem össze. A tapadásvizsgálatok ellenőrzését bazalt kőzet szemcsék felhasználásával készített egyedi szilikon formák segítségével gyártott nagymennyiségű, öntéssel előállított alkáli aktivált kőanyagon végeztem el egy aszfalttechnológiában rendszeresített vizsgálati metódus (MSZ EN12697-II) szerint. Az eredmények alapján 60%-os a bitumen tapadóképessége, amely igazolja, hogy a mesterséges kőzet ezen tulajdonság alapján alkalmas aszfalt keverékekben történő felhasználásra.

2 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK-TÉZISEK

1. TÉZIS

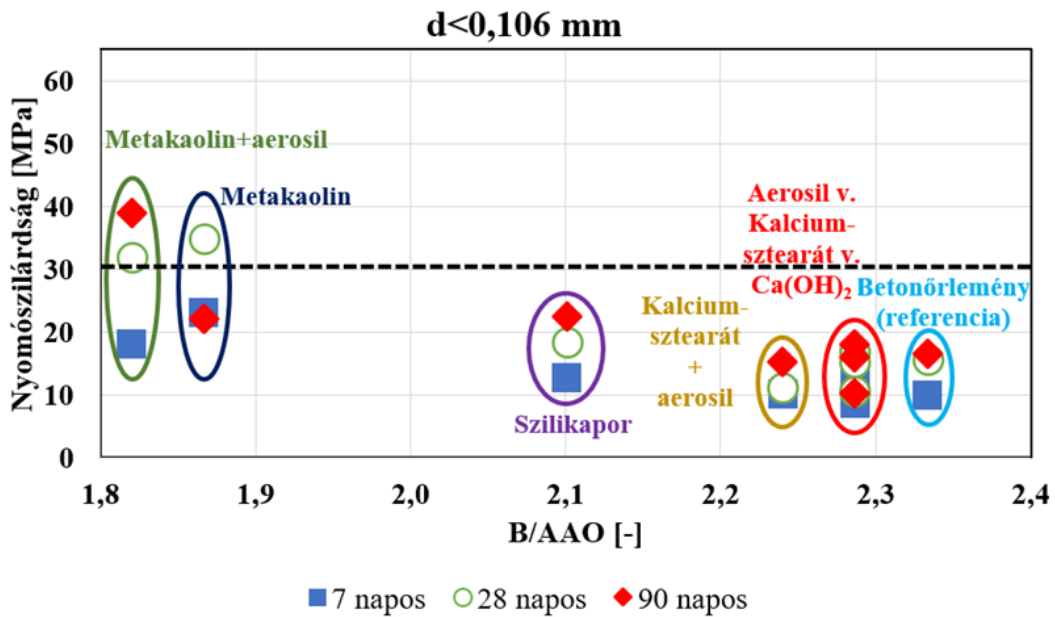
Kimutattam, hogy a referencia mintaként használt bontott betonörleményből ($SiO_2+Al_2O_3$: 78,7 m/m%, $d<0,063$ mm, $d_{50}<0,01018$ mm) alkáli aktiválással (10 M NaOH oldat+ Na_2SiO_3 50:50 arányban készült alkáli aktiváló oldat, 70:30 szilárd anyag/folyadék arány) megszilárdult alkáli aktivált kötőanyag hozható létre (AAM_B). A megszilárdult alkáli aktivált anyag szobahőmérsékleten érlelt, 28 napos korban mért nyomószilárdsága 10,7 MPa, 90 napos korban mért nyomószilárdsága pedig 12,8 MPa.

2. TÉZIS

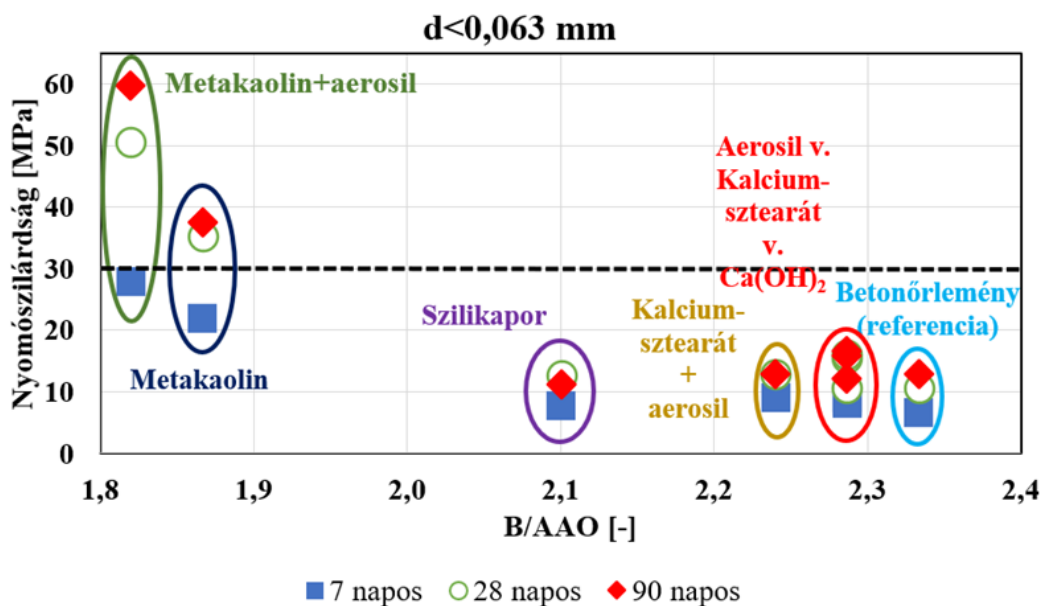
A betonörlemény alapú, szilárd kiegészítő prekursorok (szilikapor, kalcium-sztearát, mészhidrát, metakaolin, aerosil, illetve ezek keverékének) adagolásával előállított alkáli aktivált kötőanyag elemzéséhez definiáltam egy B/AAO arányt, amely a betonörlemény és az alkáli aktiváló oldat (=folyadék) egymáshoz képesti tömegarányát jelenti. A B/AAO arányt a nyomószilárdság függvényében ábrázolva, az arány alkalmas a referencia anyaghoz ($SiO_2+Al_2O_3$: 78,7 m/m%, $d<0,063$ mm, $d_{50}<0,01018$ mm) adagolt, szilárd kiegészítő prekursorok nyomószilárdságra gyakorolt hatásának kimutatására és összehasonlítására.

3. TÉZIS

A referencia anyaghoz ($SiO_2+Al_2O_3$: 78,7 m/m%, $d<0,063$ mm, $d_{50}<0,01018$ mm) adagolt, szilikapor, kalcium-sztearát, mészhidrát, metakaolin, aerosil, illetve ezek keverékének, mint szilárd kiegészítő prekursorok alkalmazása esetén a 2,1 B/AAO arány alatt a várható nyomószilárdság 20 MPa feletti, míg 2,1 B/AAO arány felett 20 MPa alatti szilárdság várható.



A B/AAO arány hatása a nyomószilárdságra, ahol a betonőrlemény szemcsemérete-eloszlása $d < 0,106$ mm



A B/AAO arány hatása a nyomószilárdságra, ahol a betonőrlemény szemcsemérete-eloszlása $d < 0,063$ mm

4. TÉZIS

Kimutattam, hogy a referencia mintaként használt bontott beton őrlményéből ($SiO_2 + Al_2O_3$: 78,7 m/m%, $d < 0,063$ mm, $d_{50} < 0,01018$ mm) készült alkáli aktivált anyaghoz viszonyítva az AAM_{B_MKA} minta ($SiO_2 + Al_2O_3$: 83,2 m/m%), amely 14 m/m% mennyiségben hozzáadott mádi metakaolint ($SiO_2 + Al_2O_3$: 94,9 m/m%) + 1,4 m/m% mennyiségben adagolt aerosilt (SiO_2 : 100m/m%) tartalmaz szobahőmérsékleten érlelt és 90

napos korban mért nyomószilárdsága a lenti anyagok és körülmények alkalmazása mellett 4,9-szeresére nőtt, ($*R_{AAMB}=12,8 \text{ MPa}$, $R_{AAMB_MKA}=59 \text{ MPa}$).

Előállítási körülmények és felhasznált anyagok:

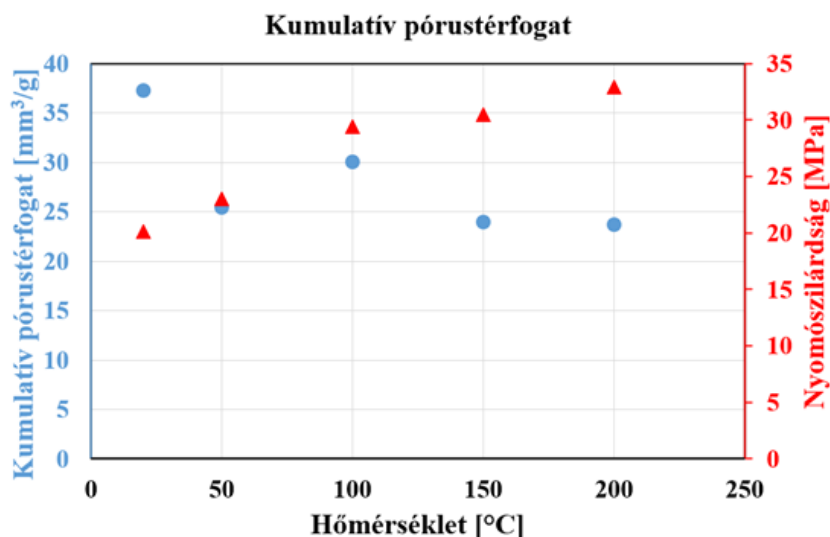
- száraz alapanyagok őrlési paraméterei (bolygóműves golyósmalomban): 150 fordulat/perc, 10 min őrlési idő;
- szilárd/folyadék arány: 70:30
- NaOH:Na₂SiO₃=50:50 m/m%
- M_{NaOH}= 10 M
- Ms;Na₂SiO₃ (szilikátmodulus)=3,87 (SiO₂: 30,95m/m% és a Na₂O: 8 m/m%)

*R_{AAMB}=referencia (betonőrleményből készített alkáli aktivált anyag) nyomószilárdsága

*R_{AAMB_MKA}=betonőrlemény, metakaolin és aerosil alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdsága

5. TÉZIS

Bizonyítottam, hogy a 7 napos korában T₁=20 °C-on (referenciaminta, R_{AAMB_MKA}) vizsgált alkáli aktivált anyag nyomószilárdsága t=30 percig tartó, különböző hőmérsékleteken (T₂=50 °C, T₃= 100 °C, T₄=150 °C, T₅= 200 °C) történő hőkezelés hatására a hőkezelési hőmérséklet emelésével növelhető. Gázadszorpciós vizsgálatokkal igazoltam, hogy a minta tömörödése ezzel párhuzamosan a szilárdság növekedése, az alkáli aktivált anyag pórustérfogat csökkenésének eredménye. XRD és FTIR vizsgálatokkal szerkezeti változást nem mutattam ki.



A hőkezelt alkáli fajlagos felülete és átlagos pórusmérete a mikropórus tartományban

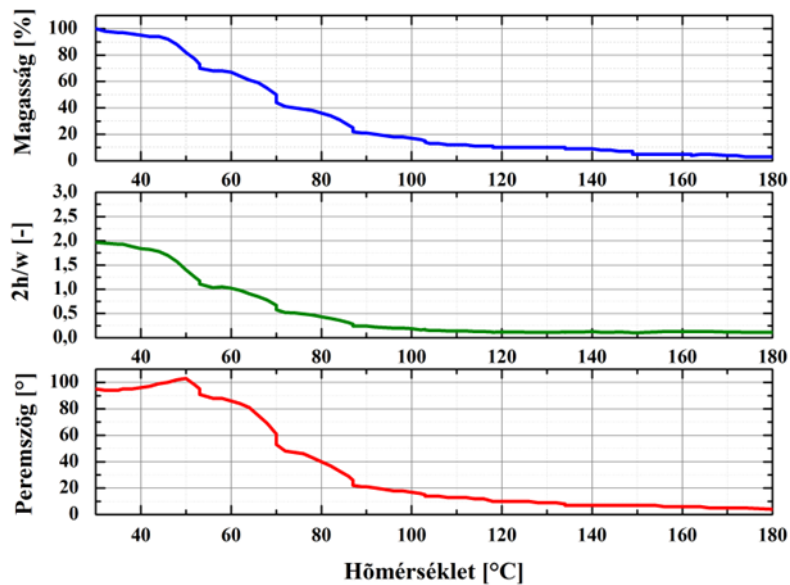
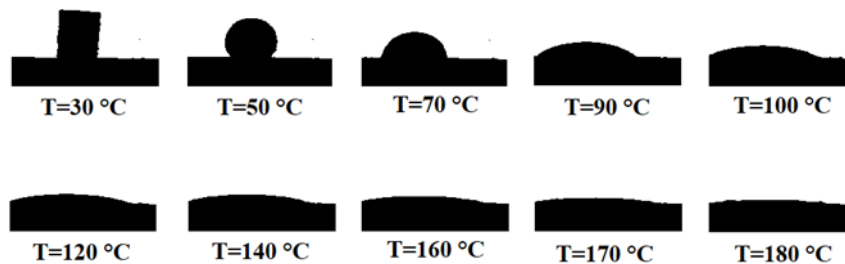
6. TÉZIS

Kísérleti úton bizonyítottam, hogy a bontott betonörleményből ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$: 78,7 m/m%, $d<0,063$ mm, $d_{50}<0,01018$ mm) készült, AAMB jelű alkáli aktivált anyag szobahőmérsékleten mért átlagos kötési ideje (55 perc) az érlelési hőmérséklet növelésével csökkenthető. Az érlelési hőmérséklet növelése 60°C -ig optimális, ekkor a tényleges kötési idő 40 percre csökken. A hőmérséklet további növelése a kötési időt nem befolyásolja.

**AAMB=referencia (betonörleményből készített alkáli aktivált anyag)*

7. TÉZIS

Hevítőmikroszkópos mérésekkel igazoltam, hogy az $\text{AAM}_{\text{B_MKA}}$ jelű alkáli aktivált anyag alkalmazható az aszfaltkeverékek esetén, mint mesterséges kőanyag. A B50/70 százhalmattai útépitési bitumen és az $\text{AAM}_{\text{B_MKA}}$ anyag között, az aszfaltkeverés jellemző hőmérsékletén ($T=180^\circ\text{C}$) mért a nedvesítési peremszög átlagos értéke $\Theta=9^\circ$, így a bitumen jól nedvesíti az alkáli aktivált anyag felületét.



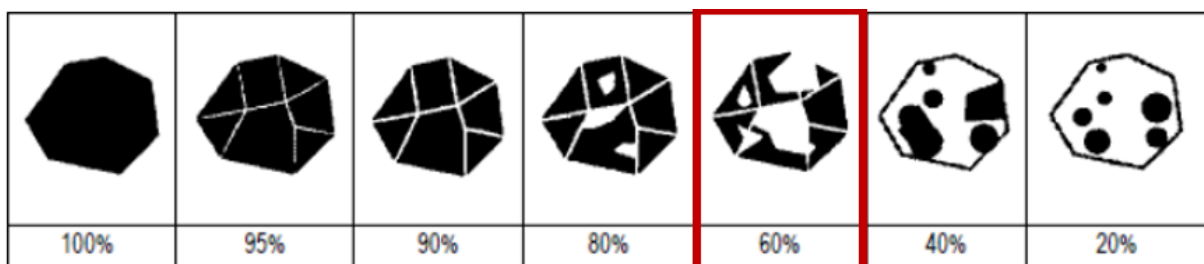
Az $\text{AAM}_{\text{B_MKA}}$ hevítőmikroszkópos vizsgálati eredménye

8. TÉZIS

Bitumenes tapadóképesség vizsgálattal igazoltam, hogy az AAM_{B_MKA} jelű alkáli aktivált anyag és B50/70 százalombattai útépitési bitumen keveréke, 48 órás vizsgálati időt követően 60 %-os bevontsági értéket eredményez. Ez az érték nagyobb, mint az általános használatban lévő mészkő (45 %) és dolomit (50 %) kőzetek irodalmi adatként fellelhető bevontsági értéke, így az AAM_{B_MKA} jelű alkáli aktivált anyag mesterséges kőzetként aszfaltkeverékekben alkalmazható.



Bitumenes tapadóképesség meghatározása szemrevételezéssel



Bitumenes tapadóképesség értékelését segítő referencia ábra [12, 13]

Summary

My research was aimed to develop materials to replace some or part of the primary minerals used in asphalt mixtures. The problem of the depletion of primary mineral resources and the problem of construction and demolition waste, which is a heavy burden on the environment, were both motivations for my thesis. My aim was to achieve this goal by alkaline activation of these wastes. Research on the use of alkali-activated materials (AAM) in asphalt mixtures is still minimal.

In my doctoral thesis, I conducted alkaline activation of a range of industrial by-products and construction and demolition wastes (*including aluminium dross, waste brick powder, waste tile powder and waste concrete powder*) as potential precursors of AAM. The results indicated that waste concrete powder exhibited the most promising outcomes.

The mechanical strength of the AAMs was further enhanced through the use of a range of additional precursor materials. The influence of these additional precursors was evaluated using a method I have defined, namely the B/AAO (*waste concrete powder/alkali activator solution*). The addition of metakaolin (*14 m/m%*) and aerosil (*1.4 m/m%*) to the alkali-activated material (*AAM_{B_MKA}*) resulted in a notable enhancement in compressive strength. At 28 days, the material exhibited a compressive strength of 51 MPa, which increased to 59 MPa at 90 days.

A test series were conducted to examine the potential applicability of this AAM in asphalt technology. The impact of temperature on the material's behaviour was investigated. It was observed that at temperatures relevant to asphalt technology, the strength of the AAM increases due to a reduction in the volume of the pores within the material's structure. This ultimately results in a densification of the material.

Heating microscopy has confirmed that the bitumen wets the AAM surface well. Furthermore, a moulding technique was used to prepare AAM aggregates for testing the adhesion of the bitumen on the AAM aggregate's surface. The results demonstrated that the bitumen adheres well to the surface of the AAM, with a degree of adhesion comparable to that of currently used stone materials.

Furthermore, the potential use of AAM as a filler was investigated. The findings indicated that this material is also suitable for use in asphalt technology.

3 TÉMÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

1. **Bella Udvardi**, Róbert Géber, István Kocserha. **Examination of different waste materials for road construction.** Košice, Technical University of Kosice, (2019) pp. 17-23.
2. **Bella Udvardi**, Róbert Géber, István Kocserha. **Investigation of Aluminum Dross as a Potential Asphalt Filler.** International Journal of Engineering and Management Sciences. (2019) Vol. 4 pp. 445-451.
<https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.55>.
3. **Bella Udvardi**, Róbert Géber, István Kocserha. **Examination of the utilization of aluminum dross in road construction.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/613/1/012053>
4. **Bella Udvardi**, Róbert Géber, István Kocserha. **Aktualitások az útéépítésben hasznosítható másodlagos nyersanyagok területén.** Útügyi lapok: a közlekedésépítési szakterület mérnöki és tudományos folyóirata. (2019) 7.évfolyam, 12.szám. pp. 33-41.
<https://doi.org/10.36246/UL.2019.1.04>
5. **Bella Udvardi** et al. **Effect of different additives on the compressive strength of concrete powder based geopolymer.** Journal of Physics: Conference Series. (2022) Vol. 2315. (Q3)
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2315/1/012006>

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni azoknak az embereknek, akik a PhD tanulmányaim alatt támogatták szakmai fejlődésemet.

Hálamat szeretném kifejezni konzulenseimnek, Dr. Kocserha Istvánnak és Dr. Géber Róbertnek, akik rendkívül segítőkészek és támogatóak voltak, emellett rengetek hasznos szakmai tanácsot adtak.

Mindemellett köszönöm az Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézet összes dolgozójának a munkáját, akik segítettek a PhD tanulmányaim alatt.

Köszönöm a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézetben dolgozó Kovács Árpádnak a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok kivitelezését.

Továbbá köszönöm a Fémelőállítási és Öntészeti Intézetbenből Ferenczi Tibornak a gázadszorpciós vizsgálatokban nyújtott segítségét.

Köszönetemet szeretném kifejezni Móricz Ferencnek (Műszaki Földtudományi Kar Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet) az XRF vizsgálatokban nyújtott segítségével.

Végül óriási hálaomat szeretném szavakba önteni a családomnak, akik mindvégig türelemmel álltak mellettem, bíztak bennem és folyamatosan támogattak a PhD fokozat megszerzéséhez vezető úton.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Ferenczy Géza: **Aszfaltburkolatok I.**, Tankönyvkiadó, Budapest, 1968
- [2] L.B. Gezencvej: „**Aszfaltbeton útburkolatok**”, Moszkva, OSZSZK Közsséggazdálkodási Minisztériumának Kiadóhivatala (1960).
- [3] Benke Márton, Dr. Boromissza Tibor, Móczár Ferenc: **Útéptítés II.**, Műszaki Könyvkiadó, 1983
- [4] European Committee for Standardization. EN 12597: **Bitumen and bituminous binders – Terminology.** Brussels: European Committee for Standardization; 2000.
- [5] N. Tang, Z. Deng, J. G. Dai, K. Yang, C. Chen, Q. Wang. **Geopolymer as an Additive of Warm Mix Asphalt: Preparation and Properties.** Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 192. pp. 906-915, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.276>
- [6] Hamid, A.; Alfaidi, H.; Baaj, H.; El-Hakim, M. **Evaluating fly ash-based geopolymers as a modifier for asphalt binders.** Adv. Mater. Sci. Eng. 2020, 2020, 1–11.
- [7] Sri Atmaja P. Rosyidi, Suzielah Rahmad, Nur Izzi Md. Yusoff b, Aini Hazwani Shahrir, Ahmad Nazrul Hakimi Ibrahim, Nor Farah Nadia Ismail, Khairiah Haji Badri. **Investigation of the chemical, strength, adhesion and morphological properties of fly ash based geopolymer-modified bitumen.** Construction and Building Materials. 2020. Vol. 255. pp. 119364.
- [8] G. Varga. **The structure of kaolinite and metakaolinite.** Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2007. Vol.59. pp. 6. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2007.2>
- [9] DR. Borsónyi Adorján, Sziártó Anna. **Metakaolin vizsgálata cement kiegészítő anyagként a k-érték elve szerint.** Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2016. Vol.68. pp. 40-44. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.7>
- [10] Meselia Hungaria Kft. **Metakaolin.** <https://meselia.com/metakaolin/>. (Hozzáférés ideje: 2023.04.27.)
- [11] <http://www.novochem.hu/index.php?op=3016> (Hozzáférés ideje: 2023.10.17.)
- [12] MSZ EN 12697-11:2012 **Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei.** 11. rész: A bitumen tapadóképességének meghatározása kőanyagalmazon
- [13] A. Riekstins, V. Haritonovs, A. Balodis. **Evaluation of adhesion between bitumen and aggregate with the digital image processing method.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 660. 2019. pp. 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012047>