



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

Doktori (*PhD*) értekezés

Készítette:

**Bárdos-Udvardi Bella**

okleveles anyagmérnök

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola Anyag-és Vegyészmérnöki  
Kar

Tudományos témavezetők:

**Dr. Kocserha István**

**Dr. Géber Róbert**

Miskolci Egyetem

2024

## TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

**Bárdos-Udvardi Bella**

„*Útépítésben hasznosítható, ásványi nyersanyagok kiváltását célzó alternatív anyagok vizsgálata*” című PhD értekezéséhez

Bárdos-Udvardi Bella a Miskolci Egyetemen szerzett anyagmérnöki MSc oklevelet, majd 2018. szeptemberétől kapcsolódott be az akkor még Kerámia- és Polimermérnöki Intézetben folyó kutatásokba, mint doktorandusz. Doktori tanulmányai során kutatócsoportok tagjaként több kari és egyetemi projekt megvalósításában vett részt.

A Jelölt doktori kutatómunkája során ásványi nyersanyagok kiváltását célzó alternatív anyagok fejlesztésével, különös tekintettel azok aszfalt útépítésben történő alkalmazhatóságával foglalkozott. A témaválasztást nemcsak az útépítések során felhasznált primer nyersanyagok felhasználásának csökkentése, hanem a folyamatosan képződő építési-bontási hulladékok hasznosítása is inspirálta. Emellett a doktori képzés megkezdésekor a Jelölt tématerületéhez kapcsolódó kutatási eredmények száma is elenyésző volt.

A kutatás során a Jelölt célja olyan mesterséges közet kifejlesztése volt, mely aszfaltkeverékekben történő felhasználása esetén megfelelő mechanikai szilárdsággal, kis fajlagos felülettel és porozitással rendelkezik, emellett a bitumen kötőanyaggal is megfelelő kohéziót képes kialakítani. Ennek érdekében a mesterséges kövek előállítását különböző prekursorok (*másodlagos nyersanyagok, illetve hulladékok őrlményei*) alkáli aktiválásával valósította meg. Legjobb eredményeit a betonőrlemény és metakaolin felhasználásával érte el.

A Jelölt kutatómunkáját önállóan, kísérleteit mindig lelkesedéssel és precizitással végezte. Eredményeit számos hazai és nemzetközi konferencián ismertette, illetve szakmai folyóiratokban publikálta, mellyel teljesítette a Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola publikációs követelményeit.

Témavezetőként az elkészített disszertációt és a megfogalmazott téziseket elfogadásra javaslom, valamint a PhD fokozat odaítélését támogatom.

Miskolc, 2024. augusztus 26.

Dr. Géber Róbert

tudományos témavezető

## TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS .....	4
<b>1 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS .....</b>	<b>6</b>
1.1 Az aszfaltburkolatok alapanyagainak bemutatása .....	6
1.2 Alkáli aktivált anyagrendszerek .....	7
1.3 Az alkáli aktivált anyagok főkomponenseinek szerepe .....	15
1.4 Másodlagos nyersanyagok .....	16
1.5 Az építési-bontási hulladékok és hulladék beton alkáli aktiválása .....	20
1.6 A mesterséges kőzetek előállításának módszerei .....	23
1.7 Alkáli aktivált anyagok aszfaltkeverékekben történő alkalmazása .....	26
1.8 Tudáshiány, a kutatómunka célkitűzései .....	28
<b>2 A KUTATÓMUNKA SORÁN ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK .....</b>	<b>29</b>
2.1 A kutatás során alkalmazott alapanyagok bemutatása .....	30
2.2 A vizsgálati módszerek ismertetése .....	33
<b>3 EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTÉKELÉSE .....</b>	<b>49</b>
3.1 Másodlagos nyersanyagokon végre hajtott alapanyagvizsgálatok .....	49
3.2 Másodlagos nyersanyag kiválasztása az alkáli aktiváláshoz .....	51
3.3 Betonörlemény alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának optimalizálása .....	56
3.4 Az alkáli aktivált anyag töltőanyagként történő alkalmazásának lehetősége .....	61
3.4.1 A töltőanyagok szemcseméretének meghatározása .....	61
3.4.2 A töltőanyagok mikroszerkezetének vizsgálata .....	62
3.4.3 A töltőanyagok anyagsűrűségének meghatározása .....	63
3.4.4 A töltőanyagok hézagterfogatának meghatározása .....	64
3.4.5 A töltőanyagok hidrophil/hidrofób tulajdonságainak vizsgálata .....	65
3.4.6 A töltőanyagok olajmegkötő képességének vizsgálata .....	65
3.5 Az alkáli aktivált anyag és prekursorainak ( <i>nyersanyagkeverék</i> ) vizsgálatai .....	66
3.5.1 A nyersanyagkeverék szemcseméret-eloszlásának meghatározása .....	66
3.5.2 A nyersanyagkeverék fajlagos felületének meghatározása .....	67
3.5.3 A nyersanyagkeverék kémiai összetételének meghatározása .....	68
3.5.4 A nyersanyagkeverék mikroszerkezetének vizsgálata .....	69
3.6 Az alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) Vicat-féle kötési idejének meghatározása .....	69
3.7 Az alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) hőkezelése .....	71
3.7.1 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) termoanalitikai vizsgálata .....	72
3.7.2 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) mikroszerkezetének vizsgálata .....	73
3.7.3 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) kémiai kötéseinek vizsgálata .....	74
3.7.4 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) ásványi összetételének meghatározása	75

---

3.7.5	A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) pórusszerkezetének meghatározása higany-porozimetriás technikával.....	76
3.7.6	A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) gázadszorpciós vizsgálatának eredményei.....	77
3.8	Az alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) és a bitumen közötti kölcsönhatás vizsgálata ....	79
3.8.1	Az alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) és a bitumen közötti peremszög vizsgálata ...	79
3.8.2	Az alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) és a bitumen közötti tapadóképesség vizsgálata	81
4	ÖSSZEFOGLALÁS.....	83
5	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK.....	85
6	MEGJELENT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK.....	90
7	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	91
8	MELLÉKLET.....	92
9	IRODALOMJEGYZÉK.....	106

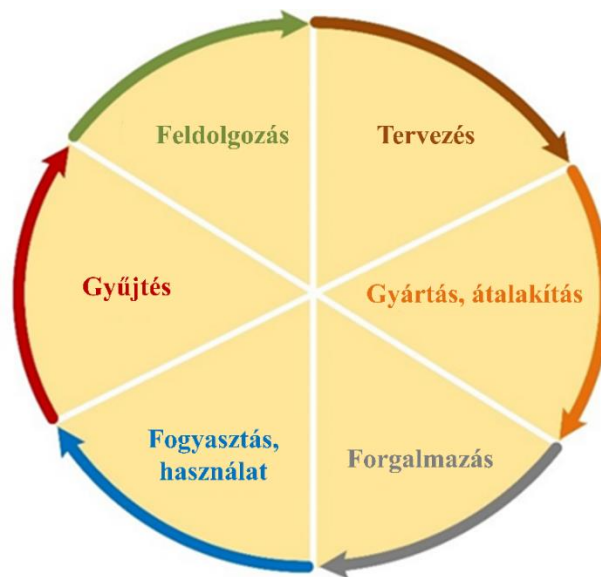
## Az alkalmazott jelölések és rövidítések jegyzéke

AAC	alkáli aktivált cement	<i>alkali activated cement</i>
AAHC	alkáli aktivált hibrid cement	<i>alkali activated hybrid cement</i>
AAM	alkáli aktivált anyag	<i>alkali activated material</i>
AAM <sub>B_MKA</sub>	betonőrlemény, metakaolin és aerosil alapú alkáli aktivált anyag	<i>concrete aggregate, metakaolin and aerosil-based alkali activator material</i>
B_MKA	betonőrlemény, metakaolin és aerosil együttes keveréke	<i>a mixture of ground concrete, metakaolin and aerosil</i>
BET	Brunauer-Emmett-Teller-féle fajlagos felület	<i>Brunauer-Emmett-Teller specific surface area</i>
B-J-H	Barett-Joyner-Halenda módszer	<i>Barett-Joyner-Halenda method</i>
C-A-S-H	kalcium-alumínium-szilikát-hidrát	<i>calcium-aluminum-silicate-hydrate</i>
CDW	építési és bontási hulladék	<i>construction and demolition waste</i>
C-S-H	kalcium-szilikát-hidrát	<i>calcium-silicate-hydrate</i>
EDS	energiadisziperzív spektroszkópia	<i>energy dispersive spectroscopy</i>
FT-IR	Fourier transzformációs infravörös spektroszkópia	<i>Fourier-transform infrared spectroscopy</i>
GGBS	őrölt granulált kohósalak	<i>ground granulated blast-furnace slag</i>
K-A-S-H	kálium-alumínium-szilikát-hidrát	<i>potassium-aluminum-silicate-hydrate</i>
LECA	duzzasztott agyagkavics	<i>lightweight expanded clay aggregate</i>
MIP	higany porozimetria	<i>Mercury Intrusion porosimetry</i>
Ms	szilikát modulus	<i>silicate modulus</i>
N-A-S-H	nátrium-alumínium-szilikát-hidrát	<i>sodium-aluminum-silicate-hydrate</i>
OH <sup>-</sup>	hidroxidion	<i>hydroxide ion</i>
OPC	portlandcement	<i>ordinary portlandcement</i>
POFA	pálmaolajfa pernye	<i>palm oil fuel ash</i>
RCF	Újrahasznosított beton finomrész	<i>Recycled concrete fines</i>
RCP	Újrahasznosított betonból készített őrlemény	<i>Recycled concrete powder</i>
RFP	Építési-bontási hulladékból készített őrlemény	<i>Recycled fine powder</i>
RHA	rizshéj pernye	<i>rice husk ash</i>
RWC	Újrahasznosított hulladék beton	<i>Recycled waste concrete</i>
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp	<i>scanning electron microscope</i>
-Si-O-	szialát	<i>sialate</i>
-Si-OH	szilanol	<i>silanol</i>
Si-O-Si	sziloxán	<i>siloxane</i>
TWCP	kalcinált (hulladék) beton őrleménye	<i>Thermally treated waste concrete powder</i>
VOC	illékony szerves vegyület	<i>Volatile organic compound</i>
WCP	hulladék beton őrleménye	<i>Waste concrete powder</i>
WMA	mérsékelt meleg aszfalt	<i>Warm-mix asphalt</i>
XRD	röntgen pordiffrakció	<i>X-ray powder diffraction</i>
XRF	röntgen fluoreszcencia spektroszkópia	<i>X-ray fluorescence spectroscopy</i>

## BEVEZETÉS

A doktori kutatómunkám témája az útépitésben hasznosítható, ásványi nyersanyagok kiváltását célzó alternatív anyagok fejlesztése. Az útépitőiparban nélkülözhetetlen primer nyersanyagok az ásványi kőzetek, amelyeknek mennyisége világszerte kimerülőben van, így ezek rendelkezésre állása folyamatos problémát fog okozni. Az egyre csökkenő ásványvagyon miatt ezen nyersanyagok ára is folyamatosan növekszik. Emiatt született meg az ötlet az olyan potenciális anyagok fejlesztése iránt, amelyek segítségével az ásványi nyersanyagok részben, vagy teljes egészében helyettesíthetők.

Mindezen túl a nagy mennyiségben termelődő inert, illetve egyéb 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. Manapság e terület kiaknázására egyre nagyobb figyelem terelődik, hiszen a környezetvédelem mellett, a körforgásos gazdaság alapját is az újrahasznosítás képezné (**1.ábra**).



**1. ábra** A körforgásos gazdaság modellje

A körforgásos gazdaság modellje az egyszeri fogyasztás helyett a termékek minél tovább történő alkalmazását célozza meg, azaz a termék élettartamát szeretné meghosszabbítani. Az egyszeri fogyasztás helyett preferálja a használt, vagy hulladékká vált termék bármilyen újrahasználásának kiaknázását, amely által akár a primer nyersanyagok felhasználása csökkenthető, lassítható. A hulladék mennyiségének csökkentése tehát nemcsak környezetvédelmi szempontból fontos, hanem gazdaságilag is előnyös lehet [1, 2]. A lerakókba

került termékek újrafeldolgozásával le lehetne lassítani primer nyersanyagok kitermelését, és kedvező esetben hozzájárulhatunk az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez is. Kutatómunkámban arra törekedtem, hogy a fenti két célt minél jobban megközelítsem. Az értekezésben bemutatott kísérletsorozatokban másodlagos nyersanyag felhasználásával olyan alkáli aktivált anyagot (*AAM*), tkp. mesterséges kőanyagot állítok elő, mely alkalmas lehet a primer ásványi anyagok aszfaltkeverékekben történő kiváltására. Különböző prekursorok és technológiai paraméterek mesterséges kőzetre kifejtett hatásmechanizmusát is megvizsgáltam.

# 1 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

## 1.1 Az aszfaltburkolatok alapanyagainak bemutatása

A doktori munkámban a primer nyersanyagokat aszfaltkeverékben történő alkalmazásra tervezem, emiatt szeretném bemutatni az aszfalt burkolatokat felépítő anyagokat. Aszfaltnak azokat az anyagokat nevezzük, amelyben az ásványi adalékanyagokat kötőanyag von be és köt össze. Az ásvány anyagokat szemcseméretük alapján különböző osztályokba sorolják [3, 4 ]:

- zúzottkő:  $d > 2,0$  mm
- homok:  $0,063$  mm  $< d < 2,0$  mm
- töltőanyag:  $d < 0,063$  mm.

Az aszfaltgyártás során felhasznált ásványi anyagok olyan természetes úton aprózódott kőzetek, vagy vulkáni eredetű kőzetek lehetnek, amelyeket a kívánt szemcseméret előállítása érdekében aprítanak és osztályoznak. Az ásványi kőváz homok frakcióját a természetes kvarchomok adja, ezenfelül a zúzottkövek aprózódása során keletkező anyagok is felhasználhatók a homokfrakcióban.

Az aszfaltkeverékekben a töltőanyagok a töltik be a legfontosabb szerepet. Az egyik feladatuk az, hogy kitöltik a nagyobb méretű szemcsék közötti teret, ezáltal tömörebbé teszik az aszfaltkeveréket. Emellett az aszfalt kötőanyagával, a bitumennel együtt keverve egy erősebb kötést biztosító habarcsot képez, amely a nagyobb méretű kőzeteket összeragasztását, ezáltal az aszfaltburkolat mechanikai szilárdságát biztosítja. Az aszfalttechnológiában elvárt tulajdonság, hogy a bitumen és a kőanyag között jó tapadás alakuljon ki [5].

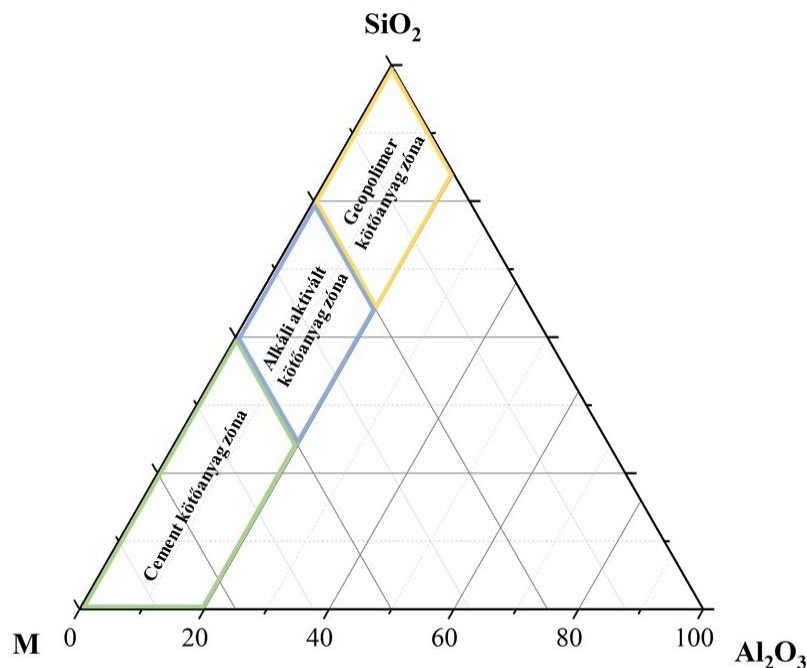
A bitumen különböző szénhidrogén vegyületekből áll. Legnagyobb részét a szén teszi ki 80-85%-ban, emellett 9-10 %-ban tartalmaz hidrogént és egyéb elemeket (*oxigén, kén, nitrogén, fémek*). A bitumen tulajdonságait a komponensei határozzák meg, amelyek a következők:

- Aszfaltén: a bitumen felületaktív komponense. A kötőképességért felelős komponens, amelyek a bitumen 8-30 m/m%-át alkotják.
- Gyantás rész: a bitumenben m/m%-ban található meg a hőmérséklettől függően folyékony, vagy szilárd állapotban. A rugalmasságért felelős.
- Olajos rész: A bitumenben 45-60 m/m%-ban található meg, amely a bitumen folyékonyosságát befolyásolja.
- Aszfaltogén savak: a bitumenben csak nagyon kis mennyiségben ( $< 1$  m/m%) fordul elő. Szerepe az ásványi anyag közötti tapadás biztosítása [6].



## 1.2 Alkáli aktivált anyagrendszerek

A bevezetés részben már említett „alkáli aktivált anyagok” (AAM, *alkali activated materials*) jelenleg az erősen kutatott anyagrendszerek közé sorolható. Elnevezésük a mai napig sem teljesen tisztázott, ugyanis ezt az anyagrendszert teljeskörűen leíró kifejezés nem létezik. A szakirodalomban úgy jelenik meg ez az anyagrendszer, mint „geopolimerek”, „alkáli aktivált cementek”, „ásványi polimerek”, „szervetlen polimerek”, „alkáli kötésű kerámiák”, stb. [7,8] Davidovits [7] volt az, aki geopolimereknek nevezte el ezt az anyagrendszert. Feltehetően polimer szerkezete miatt kapta ezt a nevet, viszont sok kutató gyakran az alkáli cement elnevezéssel azonosítja ezt az anyagot. Tudniillik, bázikus körülmények között az alumínium-szilikátok rendkívül reakcióképes anyagokká alakulnak, és általában az oldódási folyamatot a hidroxil ionok jelenléte indítja el [8, 9, 10]. Emellett ezeknek az anyagoknak a tulajdonságait erőteljesen befolyásolja a  $\text{SiO}_2$  és az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aránya. Az alkáli aktivált anyagok elhelyezkedése a következő  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{M}^1$  egyensúlyi fázisdiagramon tekinthető meg (2. ábra).

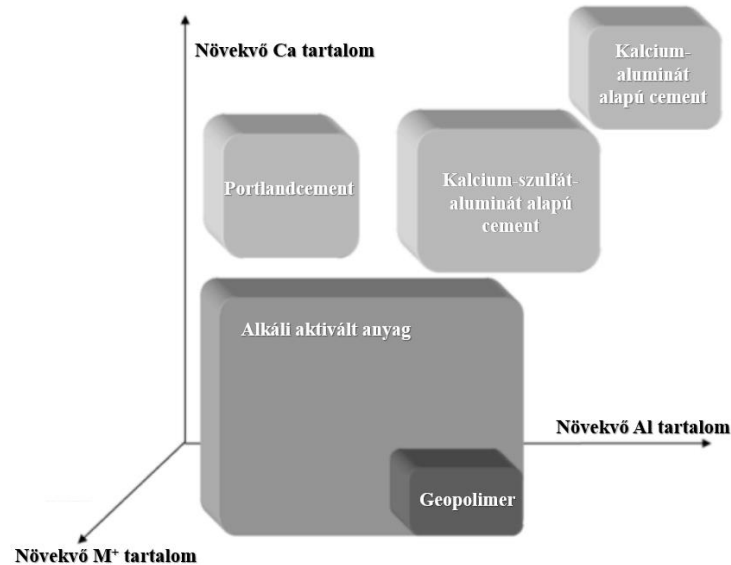


2. ábra  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{M}$  egyensúlyi fázisdiagram (Xu és társai rajza alapján) [11]

Elmondható, hogy minden geopolimer alkáli aktivált anyag, de nem minden alkáli aktivált anyag geopolimer. Ezt jól szemlélteti a 3. ábra is [12]. Az alkáli aktivált anyagok egyedülálló jellemzője az, hogy alapanyagként (*prekurzorként*) egyaránt felhasználhatók természetes

<sup>1</sup>**M**: Az alkáli aktiváláshoz szükséges alkálifém-oxidot jelöli (leggyakrabban a nátrium, vagy kálium oxidjait alkalmazzák)

nyersanyagok (alumínium-szilikátok, pl. agyagok, földpátok), illetve ipari, és mezőgazdasági hulladékok (pl.: pernye, kohósalak, üveghulladék, rizshéj hamu, stb.).



**3. ábra** Az alkáli aktivált anyagok osztályozása a portlandcement, illetve a kalcium-szulfóaluminát kötőanyagokkal összehasonlítva. Átvéve: [12]

Ezen anyagok előállításánál alkalmazott alkáli-hidroxid oldat a kiindulási anyagok feloldásához, alkáli aktiválásához szükséges. A nyersanyagok jellemzői, valamint az alkalmazott alkáli aktiváló oldat (lúgoldat) tulajdonságai szerepet játszanak a kötési folyamatokban és a végtermék szerkezetének kialakításában. Szakirodalmi adatok támasztják alá, hogy a kapott alkáli aktivált kötőanyag mechanikai szilárdsága felülmúlja a portlandcement szilárdságát [13,14].

Kutatómunkámban a *Garcia-Lodeiro és társai* [13] féle csoportosítási rendszert ismertetem, amelyben az alkáli aktivált anyagokat az alapanyag kémiai összetétele alapján sorolták osztályokba. A három csoportban megkülönböztettek kalcium-oxidban szegény (1), kalcium-oxidban gazdag (2), valamint az első és második csoport együtteséből kialakuló hibrid szerkezetet (3).

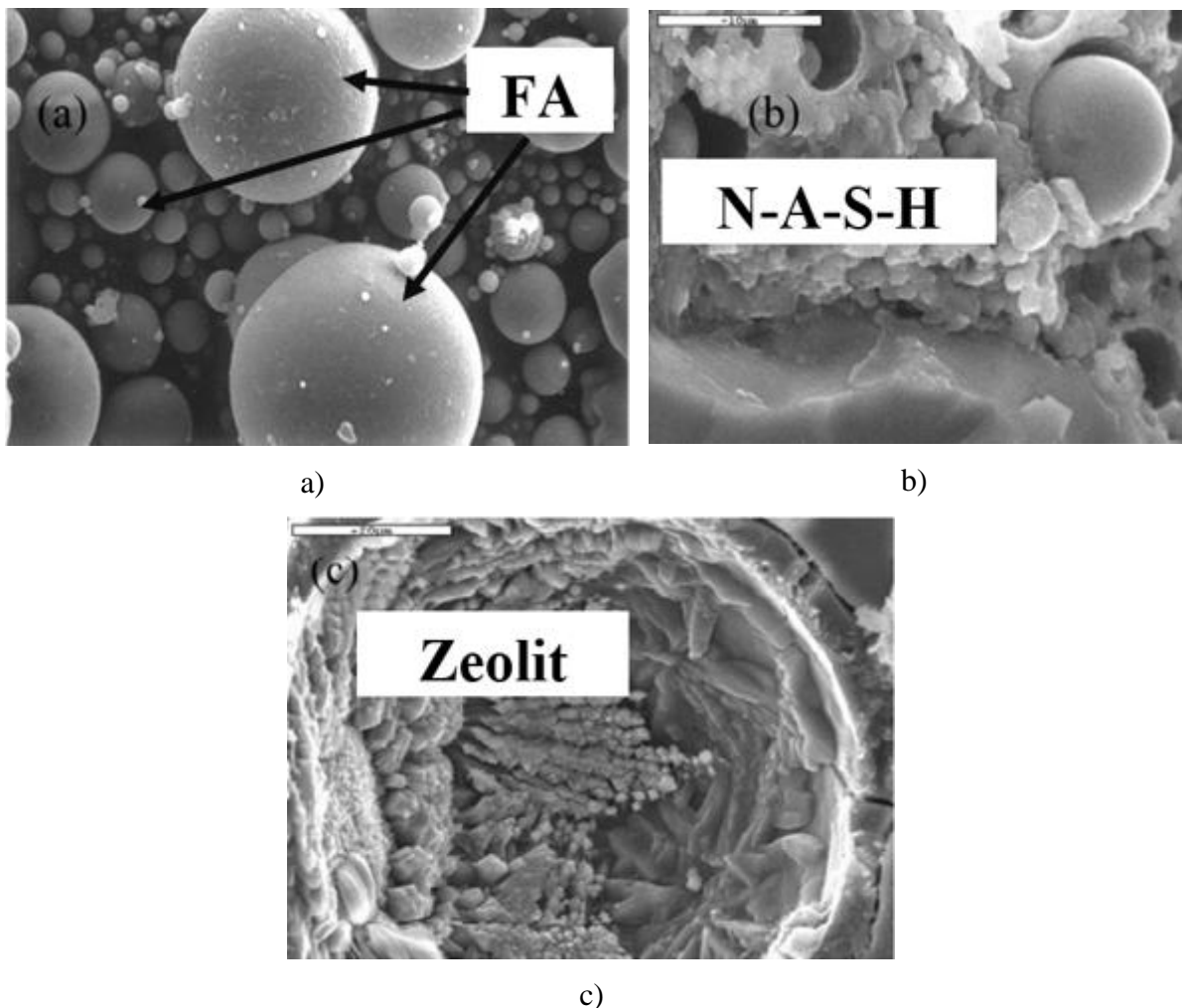
**(1)  $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  (kalcium-oxidban szegény) rendszer:**

Ebben a rendszerben az alapanyag többségben szilíciumot és alumíniumot tartalmaz (ez esetben a leggyakrabban a metakaolint és az F-típusú pernyét<sup>2</sup> alkalmazzák), kalcium nagyon kis mennyiségben van jelen a prekursor anyagban, legfeljebb csak szennyezőként fordul elő. A reakció beindításához erősen lúgos ( $>8 \text{ M NaOH}$ ) közeg és 60-200°C-os hőmérséklet

<sup>2</sup> F típusú pernye (savanyú pernye):  $\text{SiO}_2$  tartalmuk 45-60 m/m%,  $\text{CaO}$  tartalmuk  $<15 \text{ m/m}\%$ , ezen belül az aktív mésztartalom nem lehet több, mint 10 m/m%,

szükséges. A kialakult anyagrendszer fő reakcióterméke a háromdimenziós szervesen polimer hálózat  $(N,K)\text{-A-S-H}$  gél (*alkáli-alumino-szilikát-hidrát*), amely szerkezetileg nagyban hasonlít a zeolitokhoz. Ezt a rendszert a szakirodalomban gyakran nevezik geopolimernek, vagy szervesen polimernek is [14].

*Garcia-Lodeiro és társai* [15] összehasonlító pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételeket készítettek a pernyéről, a  $N\text{-A-S-H}$  gélről és a zeolitról. A **4. ábra** a) felvételén a pernye látható, amely jellemzően különböző méretű gömb alakú szemcsékből áll (*átmérő: 10-200  $\mu\text{m}$* ). A pernye alkáli aktiválása után (*8 M NaOH, 85 °C, 20 óra*) a mátrix egyenletes eloszlású  $N\text{-A-S-H}$  gélt mutat (b). Másodlagos reakciótermékek (*zeolitok*) is láthatók, amelyek morfológiája a képződött zeolit típusától függ. A (c) jelű felvételt összehasonlítva az első két felvétellel megállapítható, hogy valóban a zeolithoz hasonló szerkezet alakul ki pernye alkáli aktiválása során.

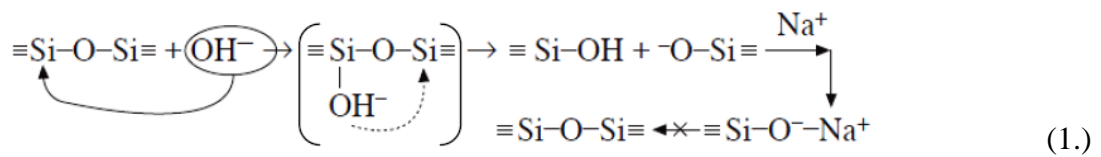


**4. ábra** SEM felvételek (a) pernye; (b)  $N\text{-A-S-H}$  gél; (c) zeolit (*átvéve: [15]*)

Az anyagrendszer kötésmechanizmusa még nem tisztázott teljes mértékben. Szakirodalmi adatok szerint legelőször *Glukhovsky* [16] foglalkozott a témával és kutatása során három lépést különített el a kötési folyamat során:

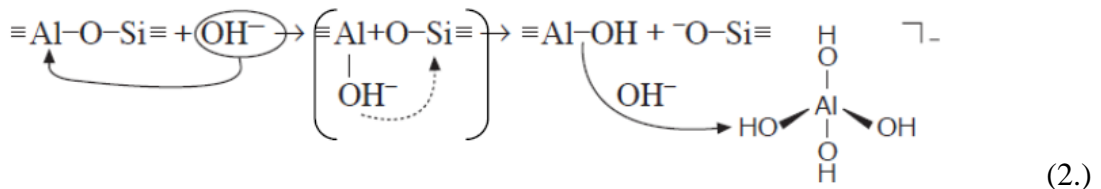
- 1) bomlás-koaguláció
- 2) koaguláció-kondenzáció
- 3) kondenzáció-kristályosodás.

Az első lépés során az történik, hogy a reakció kezdetekor (**1. egyenlet**) az OH<sup>-</sup> -ionok hatására a Si–O–Si (*sziloxán*) kötések felszakadnak.

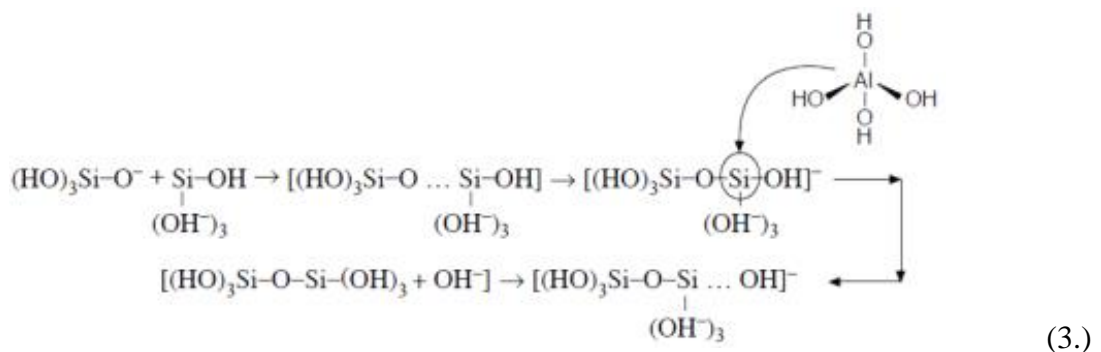


Az OH<sup>-</sup> -ionok mintegy buborék úgy veszik körbe a Si–O–Si kötéset. Reakciótermékként szilanol (–Si–OH) és szilát (–Si–O<sup>-</sup>) egységek jönnek létre. A reakcióban jelenlévő pozitív töltésű kationok és negatív töltésű anionok, valamint a Si–O<sup>-</sup>–Na<sup>+</sup> ionok képződése gátolja, hogy ismét sziloxánok (Si–O–Si) képződjenek [15, 16, 17, 18].

*Garcia-Lodeiro és társai* [15] levezették, hogy az OH<sup>-</sup> csoportok is hasonlóképpen támadják meg a Si–O–Al kötéset, amelyet a **2. egyenlet** ismertet.



A fentebb említett második lépés folyamán (*koaguláció-kondenzáció*) az összetett ionok koncentrációjának növekedésének hatására polikondenzációs folyamat játszódik le, majd ennek eredményként az alábbi kötések jönnek létre a molekulák között. Először monomerek, majd a Si–O–Si kötések kialakításával dimerek, ezt követően polimerek képződnek. A folyamatot a **3. egyenlet** mutatja be, amelyben a fő katalizátor az OH<sup>-</sup> ion és a létrejött sziloxán góccok a tér minden irányában növekedésnek indulnak.

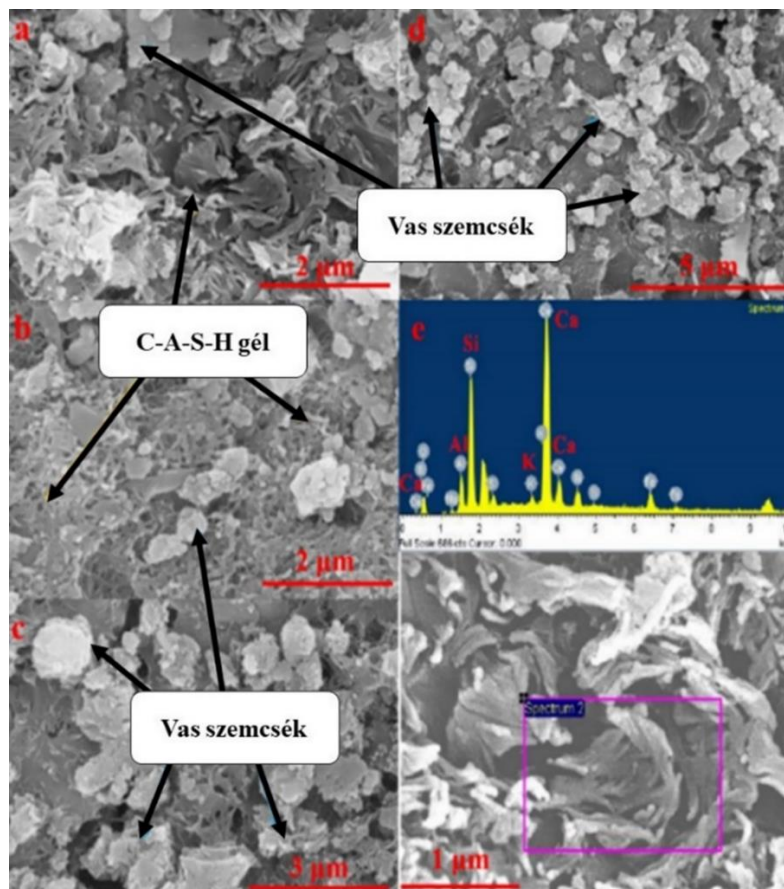


Az aluminát anionok ismét részesei a polikondenzációs folyamatnak. Az alkáli ionok ebben a reakciós folyamatban szerkezeti elemként vesznek részt, míg az első lépésben főként katalizátorként jelentek meg.

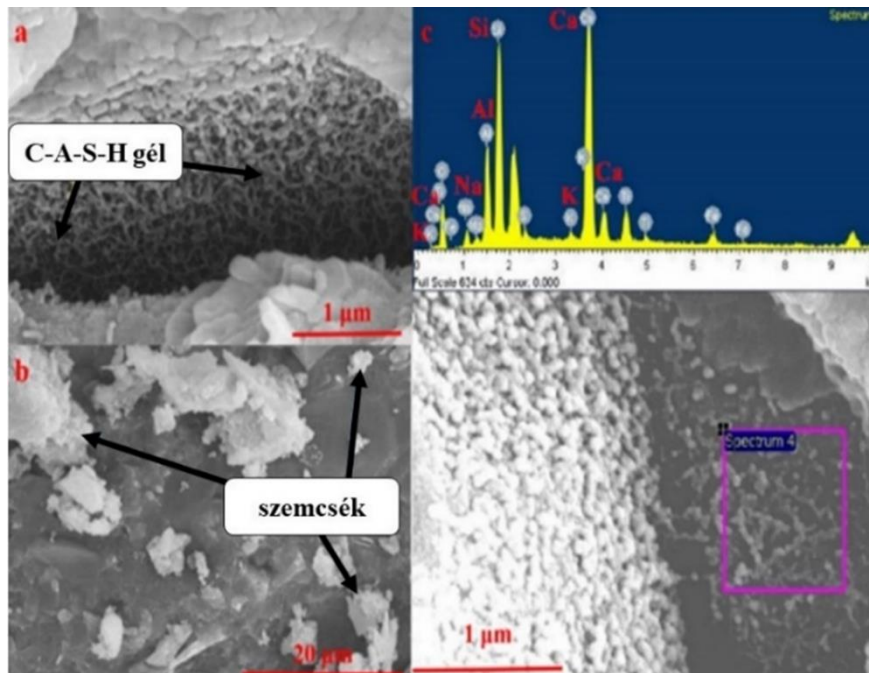
Legvégül a harmadik szakaszban (*kondenzáció-kristályosodás*), a kiindulási anyag szilárd részecskéi további kristálygócokként járulnak hozzá a hidratációs termék létrejöttéhez. A kialakult termék szerkezetét nagyon befolyásolja a nyersanyag összetétele, szerkezete, illetve morfológiája. Emellett az aktiváló oldat, valamint a kötés környezeti körülményei (*hőmérséklet, érlelési körülmény, páratartalom*) is hatást gyakorolnak rá.

**(2) (Na,K)<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (kalcium-oxidban gazdag) rendszer:**

Ebben az anyagrendszerben a szilíciumban és a kalciumban gazdag alapanyagok ( $SiO_2 + CaO > 70 \text{ m/m}\%$ ) vesznek részt, előállításukhoz elegendő kis koncentrációjú lúgoldat (*a kalcium-oxidban gazdag rendszerekhez képest*). Ebben az esetben a reakció főterméke lesz a C-A-S-H gél (*azaz az a kalcium-alumínium-szilikát-hidrát*), amely szerkezetét tekintve nagyon hasonlít a cementek hidratációja során keletkező C-S-H gélhez. A különbség a kettő között, hogy az alkáli aktivált anyagrendszerben az  $Al^{3+}$  -ionok is megjelennek a gélfázisban [15,22].



**5. ábra** Az alkáli aktivált anyagban kialakult C-A-S-H gélek SEM morfológiája (a, b, c, d) és az EDS analízise (e) 7 napos korban (átvéve: [20])



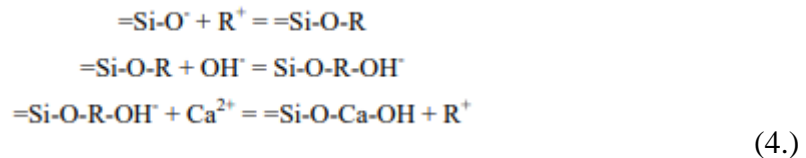
**6. ábra** Az alkáli aktivált anyagban kialakult C-A-S-H gélek SEM morfológiája (a, b) és az EDS analízise (c) 7 és 28 napos korban (átvéve: [20])

Li és munkatársai [20] a C-A-S-H gélek kialakulásának mechanizmusát vizsgálták vörösiszap és vastartalmú meddő alkáli aktivált cementkötésű habarcsban (*Alkali-Activated Red Mud-Iron Tailings Cementitious Mortar*). Az **5. ábra** és a **6. ábra** bemutatja az alkáli aktivált anyagban kialakult C-A-S-H gél szerkezetét 7 és 28 napos korban. A SEM elemzés eredménye szerint az alkáli aktivált anyag főként hálózatos szerkezetet mutat. Ezenkívül látható, hogy a vastartalmú meddő részecskéi a gélmátrixba beágyazódtak, ami azt jelenti, hogy gélek kötik össze, illetve azt, hogy a hálószerű gélek által cementálódnak. A 7 és 28 napig hidratált alkáli aktivált anyagban előforduló hálózatos szerkezettel rendelkező gélek EDS eredményeit a **1. táblázat** mutatja. Mivel a gél Ca, Si és Al elemeket tartalmaz, általánosságban kijelenthető, hogy ennek az anyagrendszernek a reakcióterméke a C-A-S-H gél. A hidratálási idő növelésével a C-A-S-H gélben az Al és a Na+K tartalma 28 nap után jelentősen megnő a 7 naposhoz képest, a Si és a Ca tartalma pedig ennek megfelelően csökken. A hidratálási idő növelésével a C-A-S-H gélben az Al és a Na<sup>+</sup> és K<sup>+</sup> tartalma 28 nap után jelentősen megnő a 7 naposhoz képest, a Si és a Ca tartalma pedig ennek megfelelően csökken. Ennek okán a C-A-S-H gélben a Si Al-mal történő helyettesítésének köszönhetően a SiO<sub>4</sub>-hez kapcsolódó AlO<sub>4</sub> száma a hidratálási idő növelésével együtt nő, és ennek alapján a töltéshiány miatt a megszilárduláshoz vonzó egyértékű kationok (pl. Na<sup>+</sup> és K<sup>+</sup>) száma is ennek megfelelően nő.

1. táblázat A C–A–S–H gél EDS analízisének eredményei [20]

Kémiai elem	Mennyiség [atom%]	
	7 napos korban	28 napos korban
O	41,30	51,35
Al	4,44	6,86
Si	17,71	15,17
Ca	26,85	17,85
Na+K	1,04	2,88

Glukhovsky és Krivenko [16, 21] írták le először azt, hogy milyen reakciók mennek végbe a CaO-és SiO<sub>2</sub>-ban gazdag rendszerek esetén (**4. egyenlet**):



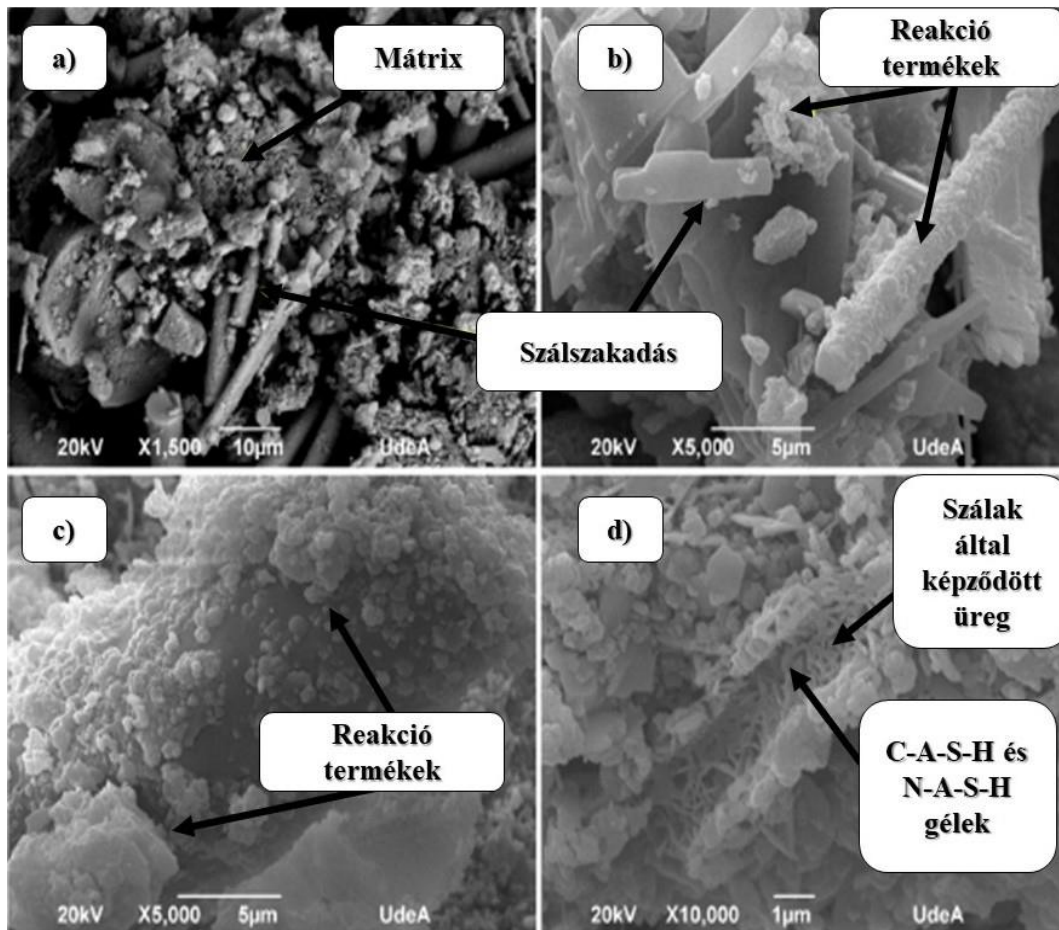
A reakció során az alkáli kation ( $R^+$ ) úgynevezett katalizátorként játszik szerepet, ugyanis segíti a  $Ca^{2+}$ -ion beépülését a polimer láncba. A CaO-ban gazdag alkáli aktivált anyag kötése után a fő reakciótermék szintén gél rendszer. Ez az anyagrendszer nagyon hasonlít a portlandcement hidratációs termékéhez, a C–S–H gélhez. A reakció során melléktermék is keletkezik, amely függ az alkáli aktivált oldat típusától, koncentrációjától, az érlelési körülményektől [22, 23]. Melléktermékként az úgynevezett hidrotalkit ( $Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ ) keletkezik. Ezt a mellékfázist Cheng és munkatársai [24] és Oh és társai [25] is megfigyelték mind az NaOH-os és a vízüveges aktiválások során. A C–A–S–H gél szerkezetére jelentősen hatást gyakorol az aktiváló oldat összetétele. Fernández-Jiménez és munkatársai [22], illetve Wang és Scrivener [23] kutatásai alapján a NaOH alkalmazása során a C-A-S-H gél lemezes megjelenésű és kristályos szerkezetű. Ezzel szemben a vízüveg és NaOH használatakor a kialakult gél amorf szerkezetű.

### **(1) Hibrid alkáli cement rendszer:**

Ez az anyagrendszer akkor jön létre, ha különböző összetételű prekursor keveredik. Ez esetben a hibrid szerkezet további alcsoportokra bontható. Az „A csoportba” az OPC (*ordinary portlandcement*) és valamilyen AAC (*alkáli aktivált cement*) kiindulási anyaga (*metakaolin/pernye/kohósalak*) alkáli aktiválásának termékei sorolhatók. A „B csoport” pedig az 1. és 2. rendszerbe tartozó alapanyagok keverékeiből előállított termékek (*pl.: salak+pernye*) csoportja. Maga a hibrid csoport reakciótermékei nagyon sokszínűek, valamint több reakciótermék is kialakulhat egyszerre (*C–S–H gél, C–A–S–H gél, N–A–S–H, N–C–A–S–H gél*) [17, 26].

Az alkáli aktivált anyagok nanoszerkezete erősen függ a prekursorok rendelkezésre álló kalciumtartalmától, ugyanis egy magas kalciumtartalmú rendszerben, mint például a granulált kohósalak alapú alkáli aktivált anyagban, a kalcium-alumínium-szilikát-hidrát ( $C-A-S-H$ ) gél dominál, amely tobermoritszerű szerkezetű. Emellett az alacsony kalciumtartalmú rendszerek – mint például a metakaolin, vagy pernye alapúak – inkább alkáli aluminoszilikát ( $N-A-S-H$ ) gélt eredményeznek, amely erősen térhálós, azaz rendezetlen pszeudo-zeolitos szerkezetű [27, 28, 29].

Diego és munkatársai [30] alkáli aktivált cementhez kőzetgyapotot adagoltak és így egy alkáli aktivált hibrid cementet (AAHC) állítottak elő. A 7. ábra a) és b) felvételén az alkáli aktivált cementbe ágyazott kőzetgyapot szerkezete látható. Az alkáli aktiválószer mólarányának változásától függetlenül új reakciótermékek keletkeztek.



7. ábra Alkáli aktivált cementkombinációk SEM felvételei (átvéve: [30])

A c) és d) felvételeken az AAHC-nak megfelelő szerkezet figyelhető meg. A kőzetgyapot szál felületén reakciótermékek jelentek meg, amely főleg a d) jelű fotón látható. A keletkezett reakciótermékek a  $N-A-S-H$  és a  $C-A-S-H$  gélek voltak.



### 1.3 Az alkáli aktivált anyagok főkomponenseinek szerepe

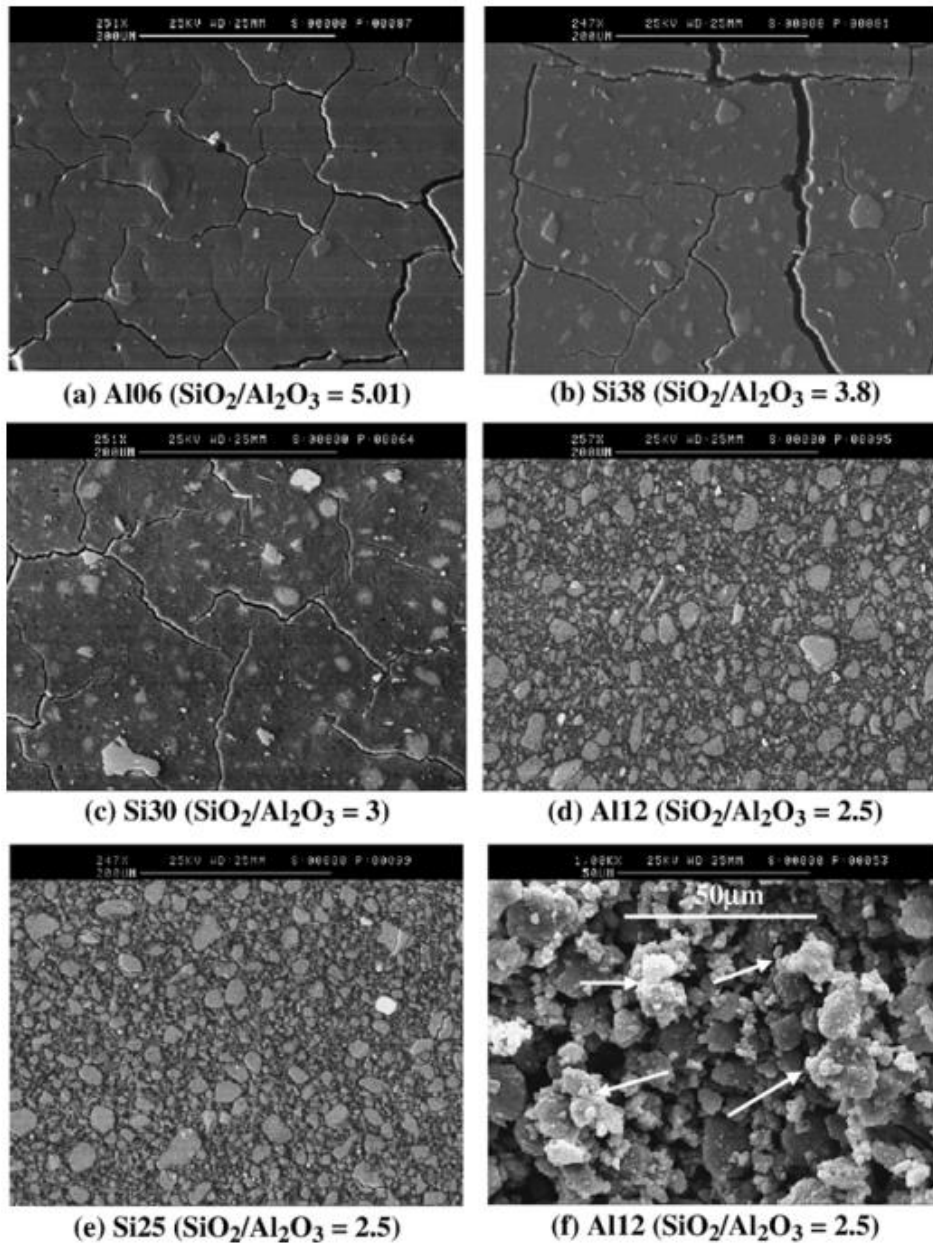
Elméletileg bármilyen alkálifém, vagy alkáliföldfém ( $M$ ) használható alkáli elemként a polimerizációs folyamatokhoz. Ugyanakkor a legtöbb kutatás [31, 32, 33, 34, 35] a  $\text{Na}^+$  és a  $\text{K}^+$  ionok alkalmazását támasztja alá. Az alkáli aktiválás során alkalmazott alkálifémek kation típusának megválasztása sok tényezőtől függ, amelyek közül a legfontosabb az alapanyag típusa, illetve az előállított termék tervezett alkalmazása. Az alkálifém ionok szabályozzák és befolyásolják a polimerizáció szinte minden szakaszát, különösen a reakciótermék szerkezetének kialakulását, a gél fázis szilárdulási folyamatát, valamint a kristályképződést, amelyhez a kationok jelentősen hozzájárulnak. Az alkáli aktiválás folyamata során tehát az  $\text{OH}^-$  ionok segítik elő a  $\text{Si}^{4+}$  és az  $\text{Al}^{3+}$  ionok oldatba jutását. Ezen ionok oldhatósága a pH érték emelésével is növekszik. Erősen bázikus környezetben pedig az  $\text{Al}^{3+}$  ion  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  tetraédereket alkot, ezáltal hozzájárul a (N)–A–S–H, és a C–A–S–H gél kialakulásához.

Magas szilikáttartalmú rendszerekben az alkáli aktivált anyag pép megszilárdulása a reakció befejezése előtt is megtörténhet [36]. Az alkáli aktivált anyagrendszerek szilárdulási idejét főként az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tartalom szabályozza. Szakirodalmi adatok szerint ahhoz, hogy a végtermék nagy szilárdsággal bírjon, a szintézis során bizonyos főkomponens mólarány határértékek betartása szükséges (2. táblázat) [37].

**2. táblázat** Nagy szilárdsággal rendelkező alkáli aktivált anyag előállításához szükséges főkomponens mólarány határértékek [37, 38, 39]

Főkomponens mólarány	Mólarány határértékek
$\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,2 - 0,48
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,3 - 4,5
$\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$	10 - 25
$\text{M}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 - 16
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	4-10
$\text{CaO}/\text{SiO}_2$	0,75-1,5

*Silva és munkatársai* [40] kutatásukban megállapították, hogy egy bizonyos határig a  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  arány is felelős a nagy szilárdság-növekedésért. Az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tartalom növekedése, azaz alacsony  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  arány esetén kis szilárdságú termékek keletkeznek, amelyek olyan mikroszerkezetet produkálnak, melyben megnövekedett a Na–Al–Si fázis.



8. ábra Különböző  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  mól arányú minták törési felületeinek SEM felvétele (átvéve: [40])

A különböző  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  arányú keverék pasztázó elektronmikroszkóppal készült szerkezetét mutatja be **8.ábra.**, amely egyértelműen szemlélteti, hogy az eltérő  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  arány a megszilárdult anyag mikroszerkezetét nagymértékben befolyásolja. A nagyobb  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  arányú keverékek (Al06, Si38 és Si30) mikroszerkezete teljesen különbözött az Al12 és a Si25 mikroszerkezetétől, emellett repedések figyelhetők meg a felvételeken.

#### 1.4 Másodlagos nyersanyagok

Az emberi igények kielégítésének folyamata során nagy mennyiségű hulladék anyag termelődik. Hulladéknak nevezzük azokat az anyagokat, amelyek a feldolgozás, vagy a

felhasználás során az eredeti használati jellegüket elvesztették, ezáltal a termelési, vagy a fogyasztási folyamatból kikerülnek. A hulladék eredete szerint megkülönböztetünk települési vagy kommunális, termelési (*ipari, szolgáltatási, mezőgazdasági*), valamint különleges kezelést igénylő (*veszélyes*) maradék anyagokat. Kutatómunkámban a termelési, azon belül pedig az ipari melléktermékek, és másodlagos nyersanyagok alkalmazhatóságának útépitésben történő vizsgálatával foglalkozom. Fontos megjegyezni, hogy azon ipari melléktermékek hasznosítása gazdaságos, amely nem vagy alig igényel előkészítési eljárást [42, 43, 44, 45].

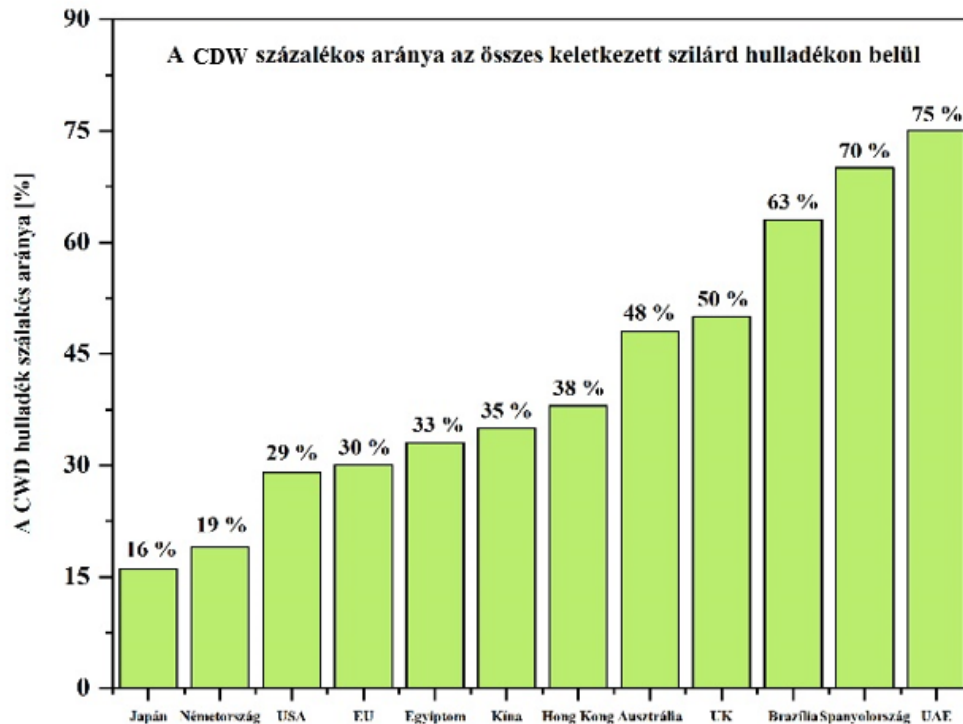
Az alumínium öntészeti salak a fém olvasztása során az ércek meddő alkotórészeinek, illetve a fémolvadékból eltávolítandó nem kívánatos vegyületek, melyek folyékony állapotban keletkeznek, majd megdermednek. Az alumínium olvasztás során keletkező melléktermék, amelynek az elhelyezése világszerte növekvő problémát jelent. Az utóbbi évtizedben Magyarországon is nagy mennyiségben nőtt az alumínium ötvözetek felhasználása, melynek eredményeként számottevő mennyiségű salak keletkezik. Az ipari közetnek is nevezett salakok kedvező mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek. Szerkezetüket tekintve tömörek, nagy szilárdságúak, emellett koptató igénybevételnek is jól ellenállnak. A felsorolt kiváló tulajdonságainak köszönhetően az építőipar számára számos technológiai folyamatban (*útalapok, aszfaltgyártás, betongyártás, rekultiváció, stb.*) visszaforgatható hulladék anyag. Tudományos publikációk támasztják alá, hogy a kohászati salakok felhasználásával javítható a járművek és az útburkolatok közötti súrlódási tulajdonság (*kopás*), valamint az útburkolati hibák (*például a nyomvályúsodás, repedés*) kialakulása is csökkenthető [46, 47, 48, 49, 50].

*Masoudi és társai* [50] kutatómunkájuk során az elektroacél-gyártási salak töltőanyagként történő hasznosíthatóságát vizsgálták meleg aszfaltkeverékek hosszú távú teljesítményére. A természetes adalékanyagokat salakkal kívánták kiváltani. Kutatómunkájuk eredményeként megállapították, hogy az elektroacél-gyártási salakot tartalmazó keverék kevésbé öregedett, mint a referenciaanyagot (*mészkölisztet*) tartalmazó minta.

A világszerte keletkező hatalmas mennyiségű építési-bontási hulladék (*Construction and demolition waste, CDW*) komoly környezeti kihívássá vált, amellyel fontos foglalkozni. A CDW hulladékok újrahasznosítása hatékony megoldási lehetőség lehet a földcsuszamlások kockázatának csökkentésére, az energiafogyasztás mérséklésére, az üvegházhatású gázok csökkentésére, amelynek mintegy 39%-a az építőiparnak tulajdonítható [51].

Az építőipar a világ legnagyobb és leggyorsabban növekvő iparága a népesség növekedése, az életszínvonal és az infrastruktúra iránti igény növekedése miatt. Ez a gyors növekedés hatalmas mennyiségű építési és bontási hulladékot termel. Általánosságban elmondható, hogy a CDW

hulladék mennyisége több, mint egynegyede az összes keletkezett szilárd hulladéknak. A CDW hulladék aránya azonban országonként eltérő, mint ahogyan azt a **9. ábra** is mutatja.



**9. ábra** A CDW hulladék százalékos aránya világszerte [52] ábrája alapján

Fontos azonban megjegyezni, hogy ezek a bejelentett százalékos arányok nem egy szabványosított módszert követnek, hanem számos tényezőtől függenek, beleértve az alkalmazott hulladékgazdálkodási rendszert, a gyűjtési rendszert, a jelentéstételi rendszert és annak pontosságát az egyes országokon belül [52].

A hulladékról szóló *2012. évi CLXXXV. törvény* [53] értelmében egy adott anyag csak akkor minősül hulladéknak, ha „*a tulajdonosa megválnik, megválni szándékozik, illetve megválni köteles az adott anyagtól*”. Az építés és bontási hulladék (CDW) sokféle anyagot tartalmazhat, de annak érdekében, hogy a hulladékokat azonos jelentéstartalommal értsük, a különböző hulladéktípusokra létezik egy úgynevezett azonosító kód. Az építési és bontási hulladékokat azonosító kód szerint a *hulladékjegyzékről szóló 72/2013 (VIII.27) VM rendelet* [54] alapján sorolják be. A rendeletben a hulladékjegyzék szerint az építési és bontási hulladék a 17-es főcsoportban foglal helyet. A fenti rendelet értelmében az építés és bontási hulladékok csoportjába sorolják a beton, téglá, tetőcserép és kerámia anyagokat, illetve ezek keverékét. Emellett a 17 01 06 azonosító kóddal rendelkező veszélyes hulladékok csoportját is (*veszélyes anyagokat tartalmazó beton, téglá, tetőcserép és kerámiafrakciók keveréke*) az építési és bontási hulladékok közé sorolják.

Az építési és bontási hulladékok nagy környezetvédelmi problémát jelentenek, hiszen kezelésük és tárolásuk megoldása sok kérdést vet fel. A hulladéklerakás földterületet foglal el, mindemellett levegő-, víz-és talajszennyezést okozhat. A hulladék elégetése ugyanakkor légszennyező anyagok kibocsátását eredményezi. 2014-es EUROSTAT beszámolója alapján az EU 28 tagállamában 2 494 700 000 tonna hulladék képződött összesen, amelyből 34,5%-ot az építési és bontási hulladék teszi ki [55]. 2020-as adatok szerint az EU-ban az összes gazdasági tevékenység és háztartás által termelt összes hulladék elérte a 2135 000 000 tonnát, amelyből 37,5 %-ot az építési és bontási ágazat tett ki [56]. Összevetve a 2014-es és a 2020-as adatokat megállapítható, hogy összességében a teljes hulladék mennyisége csökkent, azonban a CDW ágazatot tekintve 3%-kal nőtt az építési-bontási hulladékok mennyisége. Mindezek miatt nagy szükség van alternatív megoldásokra. A CDW egyes összetevői nagy erőforrás értékekkel bírnak, így új termékekké, vagy anyagokká alakíthatók. Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek az úgynevezett körforgásos gazdaságra, amely a fenntartható fejlődés fontos eleme. Lényegében a körforgásos ciklus során arra törekednek, hogy egy adott termék életciklusát megnöveljék, ezáltal csökkentve az új termékek előállításához szükséges anyag- és energiafelhasználást, valamint az ezzel járó karbonlábnyom növelést [57].

A téglá-, tetőcserép-és betonörlemény is az építési és bontási hulladékok csoportjába sorolható másodlagos nyersanyag. Számos kutatásban foglalkoztak már a téglaporról, mint újrahasznosított aszfalt töltőanyaggal (*filler*) [48, 49, 58, 59, 60]. *Chen és munkatársai* [48] összehasonlító elemzéseket végeztek, melyben a hagyományos ásványi anyagként használt mészkölisztet és az alternatív anyagként alkalmazott téglá örleményt vizsgálták. A töltőanyagokon elvégzett anyagszerkezeti vizsgálatokat követően, a fillerek felhasználásával aszfaltkeveréket készítettek. A keveréken vízerzékenység-, statikus és dinamikus kúszás-, valamint fáradásvizsgálatot végeztek el. Kísérleti eredményeik által arra a következtetésre jutottak, hogy a téglaporról készített aszfaltkeverékek magasabb modulus értékekkel bírnak, ezáltal a nyomvályúsodásnak jobban ellenállnak, javul a vízerzékenység és a fáradási ellenállás a mészköliszttel készített aszfaltkeverékhez képest.

Számos tanulmány foglalkozik újrahasznosított betonörlemény utépítési anyagként történő alkalmazásával [61, 62, 63, 64, 65, 66, 67]. *Chen és munkatársai* [72] újrahasznosított finomszemcsés betonörlemény aszfaltkeverékben történő alkalmazását vizsgálták. Kísérleti munkájuk során a száraz töltőanyag összetételi és alaktani elemzésével foglalkoztak, majd ezt követően aszfalttechnológiai vizsgálatokat hajtottak végre. Eredményeiket referenciaanyaggal

(*mészköliszttel*) készült keverékekkel vetették össze. Az összehasonlítás során az aszfaltkeverék vízerzékenysége és fáradási ellenállása esetén a mészköliszthez képest javulást figyeltek meg.

### 1.5 Az építési-bontási hulladékok és hulladék beton alkáli aktiválása

A különböző építési-bontási hulladékok, ezen belül is kiemelten a bontott beton alkáli aktiválásával foglalkozó jelentősebb kutatások eredményeit foglalja össze a **3. táblázat**.

**3. táblázat.** Építési-bontási hulladékok és hulladék beton alkáli aktiválásával foglalkozó kutatások néhány eredménye

Ref.	A kutatás célja	Felhasznált pre-kurzor(ok)	Alkáli aktiválószer	Gyártási körülmények	Eredmények
[68]	Alkáli aktivált kötőanyag előállítására betonhulladék őrleményéből ( <i>WCP</i> , $d < 0,075$ mm). Az alkáli aktiválószer koncentrációjának vizsgálata.	WCP	NaOH, KOH; 4-12 M	érlelés szobahőmérsékleten	A különböző NaOH-val aktivált WCP 28 napos korban mért nyomó-szilárdsága (3,8 MPa-5,89 MPa) meghaladta a KOH-val aktivált WCP nyomószilárdságát (2,5 MPa-4,5 MPa).
[69]	Betonhulladék őrlemény ( <i>WCP</i> , $d < 0,075$ mm) reaktivitásának fokozása termikus kezeléssel. Az így előállított TWCP ( <i>termikusan kezelt /kalcinált/ betonőrlemény</i> ) kiegészítő prekurzorként történő alkalmazása GGBS alapú alkáli aktivált habarcsok előállítására céljából.	WCP, illetve TWCP +GGBS keveréke	NaOH, 8 M	<u>1. fázis:</u> termikus kezelés: 600 °C-800 °C <u>2. fázis:</u> a GGBS+TWCP keverékeiből előállított alkáli aktiválthabarcs érlelése szobahőmérsékleten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GGBS esetén a 28 napos korban mért nyomószilárdság: 45 MPa</li> <li>• GGBS+TWCP<sub>800°C</sub>, 50 m/m% esetén a nyomószilárdság: 23 MPa</li> </ul>
[70]	Építési-bontási hulladékok ( <i>többek között betonhulladék</i> ), illetve ipari hulladékok alkáli aktiválása.	vörösiszap, vas-nikkel ötvözet salakja, cserép, téglabeton ( $d < 0,190$ mm)	NaOH, 8 M, 10 M, 12 M	Formába öntés után 4 órán keresztül szobahőmérsékleten történő érlelés, majd lezárt zacskóban T=80°C-on t=24 óra érlelés.	Az alkáli aktivált anyagok 7 napos korban mért nyomószilárdság értékei: <ul style="list-style-type: none"> <li>• referencia vas-nikkel ötvözet salakja: 75 MPa;</li> <li>• betonőrl.: 8 MPa;</li> <li>• 50 m/m% salak+10 m/m% cserépörl.+10 m/m% téglao. +30 m/m% betonörl.: 59 MPa</li> </ul>
[71]	Granulált kohósalak és bontott beton finom frakciói ( <i>RCF</i> , $0,075$ mm $< d < 2,36$ mm; <i>illetve RCP</i> : $d < 0,075$ mm) felhasználásával alkáli aktivált habarcs előállítása	GGBS, RCF, RCP	NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ( $M_s=3,33$ )	Félszáraz keverési eljárás+préselés beton blokkok előállítására érdekében. Érlelés szobahőmérsékleten.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 75 m/m% RCF esetén a habarcs 28 napos korban mért nyomószilárdsága: 60 MPa;</li> <li>• 20 m/m% RCP esetén a habarcs 28</li> </ul>

					napos korban mért nyomószilárdsága: 47,5 MPa
[72]	Az építési-bontási hulladék finomrész (RFP, $d < 0,075$ mm) aktivitásának vizsgálata. Cementkő és alkáli aktivált habarcs próbatestek előállítás.	RFP	NaOH, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (M <sub>s</sub> :3,3)	<p><u>Kémiai aktiválás:</u> NaOH%: 1 m/m%; 2 m/m% és 3 m/m% az RFP tömegéhez viszonyítva; Vízüveg M<sub>s</sub>: 1; 1,5 és 2; A vízüveg mennyisége: 1 m/m%; 2 m/m% és 3 m/m% az RFP tömegéhez viszonyítva;</p> <p><u>Termikus aktiválás:</u> 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C; 2 h hőntartás.</p>	<p><u>A 28 napos korban mért nyomószilárdság értékek:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• referencia cementkő: 44,9 MPa;</li> <li>• Kémiai aktiválás: 31 MPa</li> <li>• Termikus aktiválás: 35 MPa (<math>T=700</math> °C-on termikusan aktiválva)</li> <li>• Kémiai+termikus aktiválás: 40 MPa</li> </ul>
[73]	Szabványos beton nyomószilárdsági próbatestek örleménye (RWC) és metakaolin keverékének alkáli aktiválása.	RWC, MK	NaOH, 6 M; Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (M <sub>s</sub> =0,5; 1,25; 2,0)	Prekursorok és alkáli aktiváló oldat keverését követően szobahőmérsékletű érlelés.	<p><u>A 28 napos korban mért nyomószilárdság értékek:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 m/m% beton-örlemény esetén: 13 MPa;</li> <li>• 40 m/m% beton-örlemény+60 m/m% metakaolin esetén: 79,1 MPa;</li> </ul>

Sasui és társai [68] hulladék beton örleményének (WCP) alkáli aktiválásával foglalkoztak. Kutatásuk célja alkáli aktivált kötőanyag (AAC) létrehozása, NaOH és KOH aktiváló oldatok koncentrációjának változtatásával. A sablonba töltött friss pép érlelését szobahőmérsékleten végezték el, majd 7, 14 és 28 napos korban meghatározták a megszilárdult AAC minták nyomószilárdságát. 8 M NaOH koncentrációjú alkáli aktiválószerrel sikerült a legnagyobb szilárdságú mintát előállítani, ugyanakkor a minták felületén kivirágzásokat is megfigyeltek. Eredményeik alapján azt a következtetést vonták le, hogy a betonörleményből önmagában prekuzorként alkalmazva kis szilárdságú alkáli aktivált kötőanyag hozható létre, annak kis reaktivitása miatt. Ugyanakkor egy reaktívabb prekuzor (pl. GGBS) kiegészítő prekuzoraként vélhetőleg javítható az alkáli aktivált kötőanyag szilárdsága.

Sasui és társai [69] egy másik kutatásukban a hulladék beton örleményének (WCP) termikus aktiválásával foglalkoztak. Kutatásuk első fázisában a WCP termikus kezelését 600°C, 700 °C és 800 °C hőmérsékleteken végezték el, melynek eredményeként kalcinált betonörleményt (TWCP) állítottak elő. A második fázisban a TWCP-t, mint a kohósalak kiegészítő prekuzorát használták fel (10 m/m%, 20 m/m%, 35 m/m% és 50 m/m% adagolással) alkáli aktivált habarcs előállítására. Eredményeik azt mutatták, hogy hőkezeléssel javítható a ECP reaktivitása.

Legjobb eredményeiket a 800 °C-on történő kalcinálással érték el. A csak GGBS-sel készített alkáli aktivált habarcs 28 napos korában mért nyomószilárdságához (45 MPa) képest a TWCP adagolása csökkentette a biner alkáli aktivált habarcs szilárdságát (50 m/m%-os adagolás esetén a nyomószilárdság 23 MPa-ra csökkent). Következtetésük alapján az előállított TWCP biner alkáli aktivált anyagrendszerben kiegészítő prekuzorként alkalmazható.

Zaharaki és munkatársai [70] az építési-bontási hulladékok különböző típusainak, illetve egyéb ipari hulladék alkáli aktiválásával foglalkoztak. Referenciaként vas-nikkel ötvözet salakjának felhasználásával készítették alkáli aktivált kötőanyagot alkalmaztak (75 MPa), ehhez keverték az építési bontási hulladékokat, egymással is keverve különböző mennyiségben (50 m/m% salak+10 m/m% cserépörlemény+10 m/m% téglörlemény+30 m/m% betonörlemény: 59 MPa). Emellett meghatározták a csak betonörlemény alkáli aktiválásával készített minták nyomószilárdságát is (8 MPa). A vizsgálatokat a próbatestek 7 napos korában végezték el.

Ren és munkatársai [71] granulált kohósalak, illetve bontott beton különböző frakcióinak (RCF és RCP) felhasználásával készítették alkáli aktivált habarcsokat. Vizsgálták a folyami homok RCF-fel történő kiválthatóságának lehetőségét is. Eredményeik azt mutatták, hogy a folyami homok 75 m/m% RCF-fel történő kiváltásával érhető el a legnagyobb szilárdság, 28 napos korban mérve (60 MPa). A legnagyobb nyomószilárdságot 20 m/m% RCP esetén érték el, ekkor a habarcs 28 napos korban mért nyomószilárdsága 47,5 MPa. Ennél nagyobb mennyiségű RCP alkalmazása csökkentette a biner alkáli aktivált habarcs szilárdságát.

Chen és munkatársai [72] granulált építési-bontási hulladékok finomrészének (RFP) kémia, termikus, illetve kémiai-termikus aktiválásával foglalkoztak. A kutatómunka célja az RFP aktivitásának vizsgálata volt, a hagyományosan használt cementkőhöz hasonlóan. A referenciaként használt cementkő 28 napos korában mért szilárdságához (44,9 MPa) képest a legjobb eredményt a kombinált kémiai-termikus aktiválással érték el. Ekkor a felhasznált RFP habarcsot T= 700 °C-on termikusan aktiválták, és 15 m/m%-ban adagolták a cementhez.

Miyan és munkatársai [73] betonüzemekben tesztelt nyomószilárdság-vizsgálati próbatesteket, mint hulladék betonokat (RWC), valamint metakaolint használtak fel alkáli aktivált kötőanyag előállítására. A betonörleményt 20 m/m%-onként adagolták a metakaolinhoz, emellett az alkáli aktiváló oldatként használt NaOH-t és Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> keverékének összetételét is módosították. Többek között vizsgálták a friss pép kötési idejét, valamint a megszilárdult AAM nyomószilárdságát is. Eredményeik alapján a tisztán betonörleményt tartalmazó keverékük 28 napos korban mért nyomószilárdsága 13 MPa ( $M_s=2,0$  és 6 M NaOH esetén). A legnagyobb



nyomószilárdságot ( $79,1 \text{ MPa}$ ) a  $40 \text{ m/m\%}$  betonórlemény+ $60 \text{ m/m\%}$  metakaolin alkalmazásakor érték el ( $M_s=2,0$  és  $6 \text{ M NaOH}$  esetén). A kötési idők általában 40%-kal csökkentek betonórleménnyel történő helyettesítéskor, míg efelett a kötési időkben szignifikáns változást nem figyeltek meg.

## 1.6 A mesterséges kőzetek előállításának módszerei

A növekvő építési igényeknek köszönhetően a kőzetek gyorsan fogynak, ami miatt csökken a primer ásványvagyon készlet. Emiatt szükség van alternatív megoldásokra, melyek közül az egyik lehetséges megvalósítási mód a mesterséges kőzetek előállítása. Az alkáli aktivált anyagrendszerek alkalmasak lehetnek arra, hogy részben, vagy teljes egészében kiváltsák a természetes anyagokat. Ezek az anyagok jó szerkezeti teljesítménnyel rendelkeznek, valamint felhasználhatók könnyűbetonok adalékanyagaként is, vagy akár geotechnikai célokra (*például töltés-, vagy szigetelőanyagként*). A természetes adalékanyagokhoz hasonló, javított tulajdonságokkal rendelkező mesterséges kőzetek előállításához nagyon fontos a feldolgozási és előállítási módszerekre összpontosítani. A szinterezés (*sintering*) és a hidegkötés (*cold bonding*) a mesterséges kőzetek előállításának két jól ismert technikája. Ezek mellett az autoklávozási technika egy másik módszer, amelyet a mesterséges kőzetek előállítására használnak. Az autoklávós gőzérlelést (*érlelés, curing*) már évek óta használják a betontermékek szilárdságának növelése érdekében, telített gőznyomást alkalmazva [74, 75, 76, 77, 78].

A hidegkötési eljárás során jellemzően pépeket használnak az alapanyagok összekötésére, megszilárdítására. A hidegkötés olyan érlelési módszer, amely során az alkáli aktivált anyagot zárt környezetben, 1, 3 vagy 7 napig, alacsony hőmérsékleten ( $100 \text{ °C}$  alatt) levegőn szilárdítanak. Az így előállított adalékanyagokat gyakran vízzel készítik. A hidegkötés energiatakarékos érlelési módszer, mivel nem igényel plusz hőt a folyamat során. Széles körben alkalmazzák olyan anyagok (*például erőművi pernye, vasérc-zagy, granulált kohósalak*) esetén, amikor az anyag szilárdságának növelésének a kulcsa a cementhidratáció és/vagy a puccolános reakció [79, 80].

A szinterezési technika nagy – gyakran  $1000 \text{ °C}$  feletti– hőmérsékletet igényel. Az agglomerátumok nagy hőmérsékleten fokozatosan jönnek létre a friss szemcsék tágulása és üvegesedése révén. A szinterezés egy összetett folyamat, amely fizikai és kémiai reakciókat foglal magába, ezért a szinterezett mesterséges kőzetek tulajdonságait leginkább a nyersanyag jellemzői és a szinterezési paraméterek határozzák meg. Ezek közé tartozik a szinterezési hőmérséklet, valamint a szinterezés időtartama [81, 82].

A szinterezési eljárás az egyik legmegbízhatóbb módszer arra, hogy kiváló minőségű, könnyű, mesterséges kőzetet állítsanak elő, amelyek mechanikai tulajdonságai összehasonlíthatók a kereskedelmi forgalomban kapható szabványos könnyűbeton adalékanyagokkal (*Pl. duzzasztott agyagkavics, Lightweight expanded clay aggregate, LECA*). A szinterezési eljárás folyamatos energiaellátással elvégezhető és alkalmazható a nyersanyagok különféle változataira. Számos kutatást végeztek annak érdekében, hogy elemezzék a szinterezési folyamat hatékonyságát az előállított kőzetek tulajdonságait figyelembe véve [58, 59, 60].

A **4. táblázat** néhány olyan jelentősebb kutatási eredményt foglal össze, amelyek a mesterséges kőzetek előállításával foglalkoztak.

**4. táblázat** Mesterséges kőzetek előállításához kapcsolódó néhány kutatási eredmény [83]

Érlelési módszer	Alapanyag	Folyadék/aktiváló oldat	Konklúzió	Ref.
Hideg kötés	pernye + hozzáadott granulált kohósalak és rizshéj hamu	NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	A kohósalak és a rizshéj hamu hozzáadásával nőtt a nyomó-szilárdság.	[9]
	Magas kalcium tartalmú pernye + különböző százalékban hozzáadott OPC	víz, Ca(OH) <sub>2</sub>	Az OPC és a Ca(OH) <sub>2</sub> növelése javította a pernye alapú anyag tulajdonságait, ideértve a sűrűséget és a szilárdságot.	[84]
	pernye	NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	A mesterséges adalékanyagok elfogadható tulajdonságokkal rendelkeznek a kereskedelmi forgalomba hozott duzzasztott agyag adalékanyagokhoz képest, kevesebb energiafelhasználással a gyártás során.	[85]
Autoklávós érlelés	pernye és kőfejtési hulladék ( <i>quarry tailings</i> )	NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	A tulajdonságokat tekintve a mesterséges kőzet jobb térkitöltéssel rendelkezik, kielégítik a kereskedelmi szektor környezeti és gazdasági igényeit, valamint képesek az érlelési idő lerövidítésére az autokláv segítségével.	[86]
	pernye és kőfejtési hulladék ( <i>quarry tailings</i> )	NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	A mesterséges kőzet felhasználható beton adalékanyagként. Az autoklávnak köszönhetően a könnyű adalékanyag szilárdsága nőtt ( <i>7,61 MPa-ról 10,20 MPa-ra</i> ), mikroszerkezete tömörebb, illetve a porozitás is csökkent ( <i>33,40 %-ról 26,32 %-ra</i> ).	[87]
Szinterezés	pálmaolajfa pernye ( <i>POFA</i> )	NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	A POFA alkalmazása könnyű adalékanyagként betonban megfelelő fizikai és mechanikai teljesítményeket mutat.	[88]
	pernye	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	A szinterezett pernyéből készült termék tömörebb szerkezetet mutat.	[84]
	magas kalcium tartalmú pernye és alacsony kalcium tartalmú pernye	NaOH	Könnyűadalék-anyagot készített pernyéből. A pernye javította a megmunkálhatóságot.	[90]

*Bui és társai* [91] hidegkötési eljárást alkalmaztak a pernye alapú mesterséges adalékanyagok gyártása során. Finomra őrölt prekurzorként granulált kohósalakot (*GGBS*) és rizshéj hamut (*RHA*) használtak annak érdekében, hogy javítsák a termék tulajdonságait. Vizsgálták a GGBS és az RHA adagolásának hatását az előállított kőzet szilárdsági tulajdonságaira, valamint

vízfelvételére. A szerzők megállapították, hogy a C–S–H képződése javította a mesterséges kőzet szilárdságát.

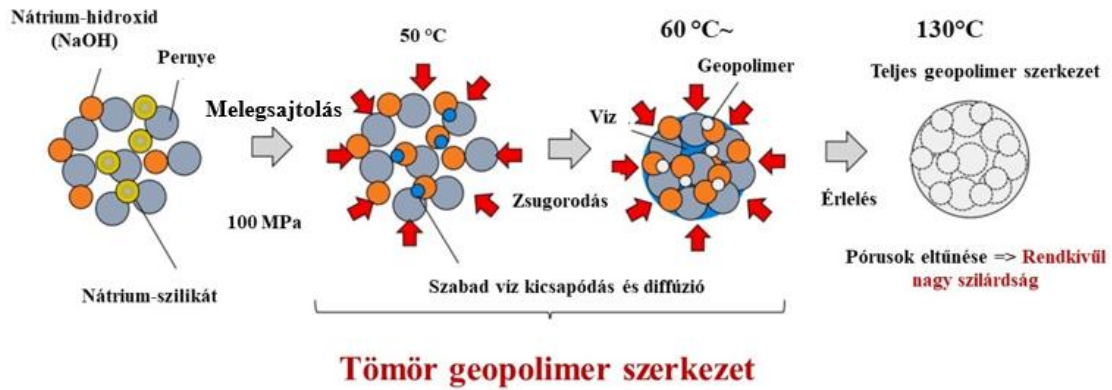
Chalermphan és társai [84] tanulmányukban környezetbarát, hidegen kötött pernye alapú adalékanyagok fejlesztésével foglalkoztak. Kutatómunkájukhoz magas kalciumtartalmú pernyét használtak. Eredményeik alapján a pernye mellett használt portlandcement (OPC) és a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  növelésével a pernye alapú anyag sűrűsége és mechanikai szilárdsága is javult.

*Kwek és társai* [88] szinterezési eljárást alkalmazott pálmaolaj fa elégetése során keletkező pernyéből (POFA) készült mesterséges kőzetek előállítására. Először 400 °C-os előmelegítést alkalmaztak, hogy elkerüljék a hirtelen hőtágulást, amely a nagy hőhatás miatt repedésekhez vezet, és így negatívan befolyásolná a képződő termék tulajdonságait. A kapott eredmények alapján a mesterséges kőzeteket könnyűszerkezeti anyagként történő felhasználásra alkalmasnak találták. A tanulmány igazolta, hogy a szinterezési folyamat során a hőntartás erősebb kötéseket alakít ki, így segítve az előállított kőzetek tulajdonságainak javítását.

*Tuyan és munkatársai* [92] kutatásuk során vizsgálták a hulladék téglapor alapú geopolimer alkáli aktiváló oldat koncentrációjának, valamint az érlelés hatását a szilárdságra és a mikroszerkezetre nézve. Munkájuk során hideg kötési eljárást alkalmaztak a geopolimer pép szilárdításához. Kutatási eredményeik alapján a maximális szilárdság és a minimális költség szempontjából optimális alkáli aktiváló oldat koncentrációja a 10 M NaOH, valamint 1,6 Ms (szilikát modulus,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) arány volt. A maximális nyomószilárdságot (36,2 MPa) 90°C-on 5 napig történő érlelés után érték el, ugyanakkor az energiafelhasználást és a nyomószilárdságot is figyelembe véve 80°C-on 5 napig érdemes érlelni a mintákat.

*Jamil és társai* [93] munkájuk során szinterezési paraméterek hatását vizsgálták a granulált kohósalak alapú alkáli aktivált anyag tulajdonságaira. Az elkészített próbatesteket először 24 órán át szilárdították, ezt követően 14 napig 60 °C-on szárították, majd 900°C-on szintereztek. 4°C/perc fűtési sebesség és 3 óra hőntartás esetén érték el a legalacsonyabb nyomószilárdságot (4,36 MPa). A legnagyobb nyomószilárdság pedig 22,32 MPa volt, amelyet 2°C/perces fűtési sebesség és 900°C-on történő 2 órás hőntartás alkalmazásával sikerült elérni. A szinterezéssel a geopolimer minták sűrűsége nőtt, mely a nyomószilárdság növekedését eredményezte.

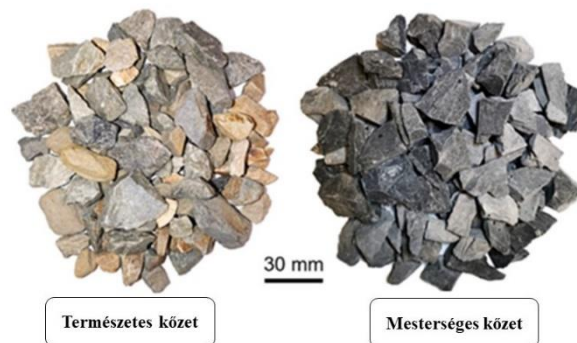
*Nishikawa és társai* [94] úgynevezett „hidegreakciós szinterezést (cold reaction sintering)” alkalmaztak annak érdekében, hogy nagy szilárdságú pernye alapú geopolimert állítsanak elő az érlelési idő lerövidítésével (10.ábra).



10. ábra Hidegreakciós szinterezési módszer mechanizmusa [94] alapján

A pernye átlagos szemcsemérete  $d_{50} < 0,01$  mm volt. A terméket melegsajtolással állították elő, amely során az alkalmazott hőmérséklet  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  volt, emellett  $100\text{ MPa}$ -os egytengelyű nyomást alkalmaztak 10 percen keresztül. A melegsajtolást követően a mintákat kivették a formából, és  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on 12 órán keresztül szárították. A szerzőknek sikerült a geopolimert előállítani az új hideg reakciós szinterezéssel oly módon, hogy a termék kizárólag szilárd alapanyagok felhasználásával készült. A  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  alkáli aktiválószerként való alkalmazásával lehetővé vált a geopolimerizáció kialakulása a hagyományos oldatos előállítási mód nélkül is. A kapott geopolimerek ultranagy sűrűségűek és nagyon nagy szilárdságúak lettek. Az így kapott anyag maximális nyomószilárdsága  $425\text{ MPa}$  volt.

Qian és munkatársai [95] mesterséges kőzetet készítettek pernye, szilikapor, granulált kohósalak és cement felhasználásával. A kőzet elkészítéshez aluminátcementet (*magas  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  és  $\text{CaO}$  tartalommal*) használtak. A kőzetet hidegkötési technológiával szilárdították. A szükséges szemcsefrakciót aprítással állították elő (11.ábra).



11. ábra A természetes és mesterséges kőzet  $10/20$  mm szemcseméretű frakcióban [95]

### 1.7 Alkáli aktivált anyagok aszfaltkeverékekben történő alkalmazása

A szakirodalmi kutatás során a legtöbb esetben az alkáli aktivált anyagokat modifikált bitumen adalékszerként vagy töltőanyagként alkalmazták aszfaltkeverékekben.

*Tang és munkatársai* [96] célja geopolimer, mint a **bitumen adalékszereként** ( $d < 0,15 \text{ mm}$ ) történő alkalmazása mérsékelten meleg aszfaltkeverékekben (*WMA, warm-mix asphalt*). Az általuk alkalmazott prekursorok a metakaolin, acélgyártási salak és a szilikapor volt. Tanulmányukban megállapították, hogy a geopolimer ígéretes adalékszer lehet a WMA aszfaltkeverék előállításához, mivel az alábbi kiváló eredményeket produkálta: a geopolimert bitumenhez adagolva nőtt a bitumen lágyulás pontja, míg a penetráció csökkent. A bitumen viszkozitása csökkenthető a geopolimer adalékszer alkalmazásával, ezáltal javul az aszfalt bedolgozhatósága. Csökkenthető az aszfaltkeverék előállításához szükséges keverési hőmérséklet. A szerzők által meghatározott optimális geopolimer adalékszer mennyiség 6 m/m% volt, az optimális aszfalt keverési hőmérséklet pedig 140 °C.

Szintén *Tang és munkatársai* [97] emellett vizsgálták ezen geopolimerek környezetvédelmi hatását is. Tanulmányozták, hogy az aszfaltkeverékek előállításakor **adalékszerként használt geopolimer** milyen hatással van az emissziós értékekre. Megállapították, hogy – az előzőekben bemutatott pozitív tulajdonságok miatt – a csökkentett keverési hőmérséklet következtében csökken az illékony szerves vegyületek (*VOC, volatile organic compounds*) és a szállópor emissziója is.

*Ago és munkatársai* [98] hidrofób, geopolimer alapú mesterséges követ állítottak elő, melyhez prekuzorként rizshéjhamut, illetve eröművi pernyét használtak. A megszilárdult geopolimerből töréssel állították elő az **aszfalt kőanyagot**, amelynek az alábbi tulajdonságait vizsgálták meg: törőszilárdság, víz nedvesítési peremszögének meghatározása, Los Angeles aprózódás, vízfelvevő képesség, mikrokeménység. Eredményeik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy az általuk előállított geopolimer hidrofób tulajdonságú, melyet a mesterséges kőzetet alkotó mullit fázis mennyisége képes szabályozni. Az előállított mesterséges kőzet jó alternatívája lehet a referenciaként használt mészkőnek.

A bitumenes tapadóképességet már több kutató is tanulmányozta különböző primer ásványi anyagokkal, viszont szeretném kiemelni, hogy alkáli aktivált kőanyagon elvégzett bitumen tapadóképességi vizsgálatot nem végeztek idáig.

*Wistuba és munkatársai* [99] különböző bitumen tapadóképesség vizsgálati módszereket hasonlítottak össze. Többféle ásványi kőanyagon (*gabbró, bazalt, mészkő, és gránitféléken*) 48 órán keresztül végezték a forgópalackos bitumen tapadóképesség vizsgálatot. Eredményeik alapján a B50/70 típusú bitumen gabbró, bazalt és mészkő esetén 40-65%-os bevontságot mutatott, míg a gránitfélék esetén a bevontság mértéke 15-25 %-os volt.

*Pstrowska és munkatársai* [100] formaldehiddel modifikált kátrányokat vizsgáltak, mint lehetséges aszfalt kötőanyagok. A palackforgató bitumen tapadóképesség vizsgálat elvégzését követően megállapították, hogy 48 órát követően a kőanyagok bevontságának mértéke – kátrány típustól függően – 35-70 % volt.

*Paliukaité és munkatársai* [101] a bitumen tapadóképességét vizsgálták különböző vizsgálati technikákkal. Változó mennyiségben adagolt **tapadásjavító adalékszerek** hatásmechanizmusát tanulmányozták. A forgópalackos vizsgálati módszer esetén – tapadásjavító adalékszer alkalmazásával – a gránit és dolomit kőanyagokon mért bevontság mértéke (24 órát követően) B 50/70 bitumen használatkor csupán 15-45 % között változott.

### 1.8 Tudáshiány, a kutatómunka célkitűzései

Az előzőekben ismertetett szakirodalmi forrásokban fellelhető eredmények alátámasztották, hogy az alkáli aktivált anyagok aszfaltkeverékekben történő alkalmazása még nem eléggé kutatott terület, az elérhető tudományos eredmények, ismeretek meglehetősen hiányosak. A kutatómunkámhoz kapcsolódóan ezért felmerült néhány nyitott kérdés:

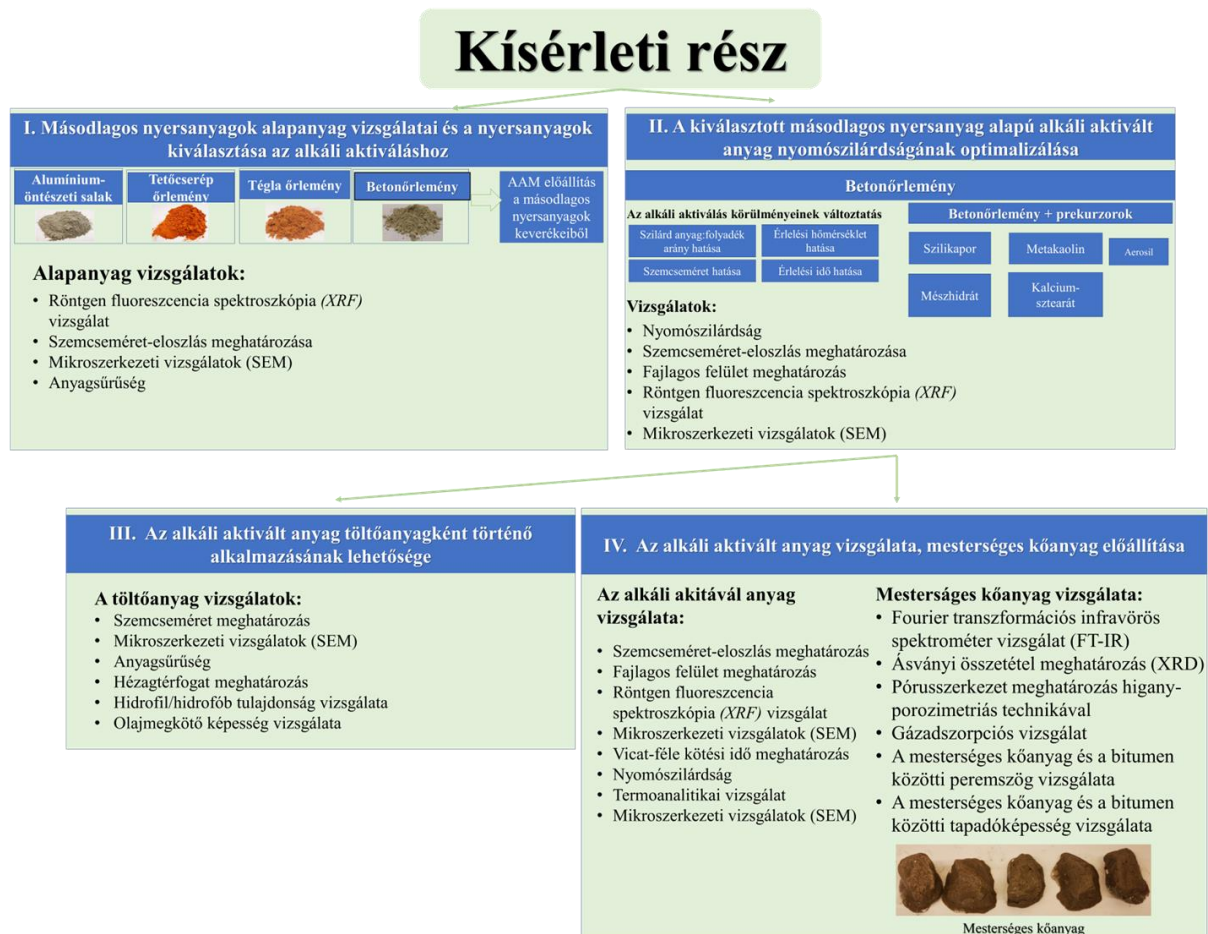
1. Előállítható-e másodlagos nyersanyagokból, alkáli aktiválással olyan mesterséges kőanyag, amely helyettesítheti az aszfaltkeverékek kővázát?
2. Az alkáli aktivált anyag elviseli-e az aszfalttechnológiában alkalmazott szárítási és keverési hőmérsékletet?
3. Milyen az alkáli aktivált anyag és a bitumen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

A doktori értekezésemben a fenti kérdésekre kerestem a választ, és az alábbi célokat fogalmaztam meg:

- **másodlagos nyersanyagok, mint alkáli aktivált anyagok lehetséges prekursorainak vizsgálata;**
- **a vonatkozó szakirodalomban fellelhető alkáli aktivált anyagokhoz képest növelt szilárdságú anyag előállítása;**
- **az előállított alkáli aktivált anyag szilárdságának növelése különböző prekursorokkal;**
- **az előállított alkáli aktivált anyag különböző hőmérsékleteken történő viselkedése**
- **az előállított alkáli aktivált anyag, mint aszfaltkeverékek töltőanyagának és kőanyagának vizsgálata. A bitumen és az előállított alkáli aktivált anyag kölcsönhatásának tanulmányozása.**

## 2 A KUTATÓMUNKA SORÁN ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A doktori disszertációm kísérleti részét négy fő szakaszra tudom osztani (*Hiba! A hivatkozási forrás nem található.. ábra*). Ahogyan azt a célkitűzéseimben is megfogalmaztam, kutatómunkám során az elsődleges feladatomban az volt, hogy megtaláljam az alkáli aktiváláshoz szükséges másodlagos nyersanyagot (I.), majd ezt követően olyan alkáli aktivált receptet kísérletezzek ki – szükség esetén egyéb prekursorok felhasználásával -, amellyel megfelelő szilárdságú (II.), útépitési célra felhasználható mesterséges kőzetet, illetve annak finom őrleményét (III. és IV.) lehet előállítani.



12. ábra A kísérleti rész fő pontjai

Kutatómunkám során a **5. táblázatban** bemutatott vizsgálatokat hajtottam végre, melyeket – a felhasznált alapanyagok bemutatásával, jellemzésével együtt – a következő fejezetekben röviden ismertetek.

5. táblázat A kutató munka 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> )

## 2.1 A kutatás során alkalmazott alapanyagok bemutatása

Ahhoz, hogy a számomra megfelelő alkáli aktivált terméket előállítsam előkísérleteket végeztem négy különböző másodlagos nyersanyag felhasználásával. Munkám során alumínium öntészeti salakot (*S*), téгла őrleményt (*T*) és tetőcserép (*CS*) őrleményt, valamint betonőrleményt (*B*) alkalmaztam másodlagos nyersanyagként (**13. ábra**).



Alumínium öntészeti salak



Tégla őrlemény





Tetőcserép őrlemény



Betonőrlemény

**13. ábra** Az előkísérletekhez használt másodlagos alapanyagok

Munkámhoz az alumínium-öntészeti salakot a Miskolci Egyetem Anyag-és Vegyészmérnöki Karán található Fémtechnológiai Intézet biztosította. A téglá őrleményt és a tetőcserép őrleményt a Miskolci Egyetem Anyag-és Vegyészmérnöki Karán található Energia-, Kerámia-és Polimertechnológiai Intézet biztosította. Az alumínium-öntészeti salakot, a téglá őrleményt és a tetőcserépőrleményt por formájában kaptam a fent említett Intézetektől, amelyeket  $d < 0,250$  mm névleges lyukbőségű szitán frakcionáltam. Kutatómunkám során prekursor anyagként bontott beton villanyoszlopból (**14. ábra**) előállított betonőrleményt alkalmaztam, amely az építési és bontási hulladék csoportjába tartozó anyag. A válogatott hulladék betont a *Trans Special Kft*-től szereztem be.



**14. ábra** Bontott beton villanyoszlop

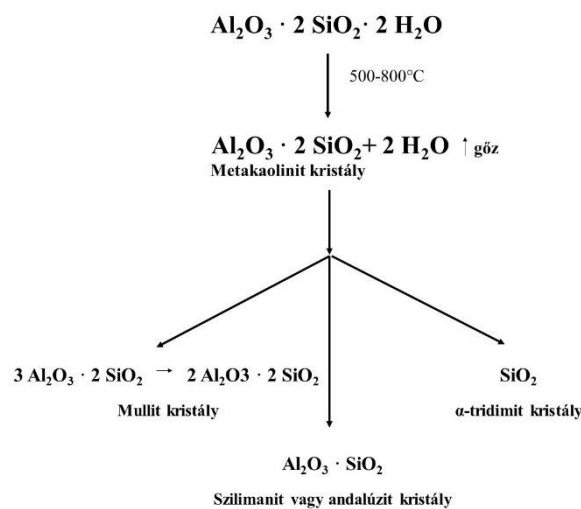
A kísérleti eredményeim alapján kiválasztottam a négy különböző másodlagos nyersanyag közül azt, amelyikre a kutatómunkám további részét építem. Ezt követően ennek a referencia anyagnak a nyomószilárdság-optimalizálását végeztem el, amelyhez más típusú (*kiegészítő*) prekursorokat (*szilikapor, kalcium-sztearát, mézhidrát, metakaolin és aerosil*) adagoltam. Munkám során az alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának növelése céljából a kereskedelmi forgalomban kapható *Mapeplast SF* puccolán hatású szilikaport (*tkp. amorf kvarc*)

alkalmaztam. Színét tekintve ez az anyag egy sötét szürke por, amely nagyrészt 0,1 mm-nél kisebb szemcseméretű, gömb alakú szemcsékből áll.

A *Donauchem Kft*-től szereztem be a szintén kereskedelmi forgalomban kapható kalcium-sztearátot, amely fehér színű, szobahőmérsékleten szilárd vegyület. Kémiai képlete  $C_{36}H_{70}CaO_4$ , moláris tömege 607,03 g/mol.

Ebben a kísérleti fázisban prekuzorként még mészhidrátot is (*kalcium-hidroxid*,  $Ca(OH)_2$ ) felhasználtam. A mészhidrátot kalcium-oxidból állítják elő víz hozzáadásával ( $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Q$  (*keletkezett hőmennyiség*)). Lúgos, por állagú anyag. Munkám során a kalcium-sztearátot és a mészhidrátot az alkáli aktivált anyag CaO tartalmának növelése céljából adagoltam a keverékeimhez. Szakirodalmi források [102, 103,] arra utalnak, hogy magas CaO tartalommal az alkáli aktivált anyag mikroszerkezetének porozitása csökkenthető, elősegítve ezáltal a szilárdság növelését, valamint a Ca-Al-Si gél kialakulását is.

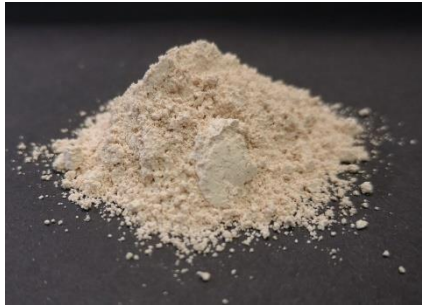
A metakaolint a kaolin ( $Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$ ,  $AS_2H_2$ ) nevű kőzet termikus aktiválásával nyerik. A kaolin kőzet hőkezelése során metakaolin keletkezik (**15. ábra**). A kaolin kőzet fő ásványi komponense a kaolinit nevű agyagásvány, amely a kaolinit mellett jellemzően kvarcot és csillámot is tartalmaz. A kaolin hevítés hatására 500-800 °C közötti hőmérsékleten átalakul metakaolinná [104, 105].



**15. ábra** A kaolin termikus aktiválása (*átvéve: [106]*)

A metakaolin az alumíniumszilikátok csoportjába tartozik, amely puccolános tulajdonságokkal rendelkezik. Átlagos szemcsemérete kb.  $d_{50} < 3-5 \mu m$ , tehát kisebb a portlandcementtől ( $d_{50} < 15 \mu m$ ). Mikroszerkezetét jellemzően lapkák, vagy amorf jellegű (*hevítéstől függ*) szemcsék építik fel. Más puccolános anyagoktól az különbözteti meg, hogy képes nagyon gyorsan elreagálni a portlandittal (*kalcium-hidroxidot*,  $Ca(OH)_2$ ) [107]. Kutatómunkámban

mádi kaolin kalcinálását  $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérsékleten és  $t= 3\text{h}$  hőntartási idő alkalmazásával végeztem el, melynek során előállítottam a prekuzorként használt metakaolint.



**16. ábra** A kutatáshoz alkalmazott mádi metakaolin

Az aerosil lényegében tiszta szilícium-dioxid ( $\text{SiO}_2$ ), másnéven kvarclisztnek is hívják. Kereskedelmi forgalomban kapható nagy finomságú, nagyon könnyű, fehér por formátumban megtalálható anyag. Gyakran alkalmazzák tixotropizáló (*konzisztencia-sűrítő*) szerként. Az aerosil alkalmazásával az összekevert anyag bedolgozási ideje megnő, emellett javítja a kész termék nyomószilárdságát [108].



**17. ábra** A kutatáshoz alkalmazott aerosil

A mintaelőkészítések során az egyes vizsgálatokhoz a rendelkezésre álló, örölt, homogenizált őrlemények mennyiségét ún. negyedeléses módszerrel csökkentettem a kívánt vizsgálati anyagmennyiség eléréséhez.

## 2.2 A vizsgálati módszerek ismertetése

Jelen fejezetben ismertetem a munkám során alkalmazott vizsgálati módszereket, annak fontosságát, illetve röviden bemutatom az érintett berendezések működési elvét.

### Röntgen fluoreszcencia spektroszkópia (XRF) vizsgálat

Az XRF (*röntgenfluoreszcencia*) vizsgálatnál az adott anyag kémia (*oxidos*) összetételének meghatározásáról kapunk információt. Az XRF berendezés a minta kémiai összetételét a minta fluoreszcens (*vagy másodlagos*) röntgensugárzásának mérésével határozza meg, amelyet egy elsődleges röntgensugár gerjeszt. A mintában lévő minden elem egy jellegzetes fluoreszcens

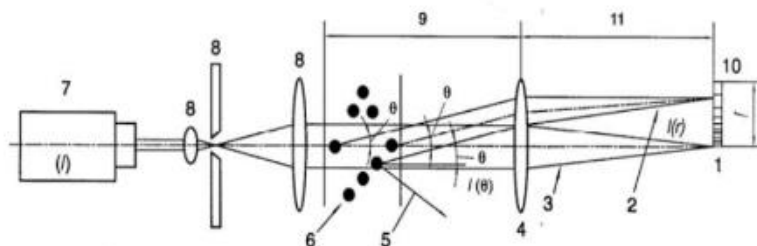
röntgensugárzást („*ujjlenyomatot*”) produkál, amely az adott elemre egyedi, ezért főként az anyagok összetételének minőségi és mennyiségi elemzését teszi lehetővé [109]. A vizsgálat nagyon egyszerű mintaelőkészítést igényel, és maga a mérési idő is gyors, másodpercekben mérhető elemzést tesz lehetővé [110].

Kutatómunkám során az XRF vizsgálatához *Rigaku Supermini 200* típusú berendezést használtam, az MFK Ásvány és Kőzettan Tanszéken. A kísérleteim szempontjából ennek a vizsgálatnak nagy jelentősége van, hiszen a prekursor anyagok oxidos összetételének ismerete elengedhetetlenül fontos.

### Szemcseméret-eloszlás meghatározása

Az alkalmazott anyagok szemcseméret-eloszlását a Miskolci Egyetem Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézetében található *CILAS 715* típusú, nedves eljárású lézergranulométer segítségével határoztam meg. A módszer (**18.ábra**) a lézerfény szórásán alapul, miszerint a szemcséken szóródó fényt detektorok érzékelik. A fényszórás hatására diffrakciós kép alakul ki. A vizsgálat alapelve, hogy az adott minta folyadékban (*jelen esetben víz*) diszpergálva monokromatikus lézersugáron halad át. A vizsgálat során egy többelemű szenzor érzékeli a szemcsék által különféle szögben szórt fényt. A diffrakciós képet megadó értékeket további elemzés céljából detektálják. Ezután a diffrakciós kép-adatokat átalakítják, melynek eredményeként a teljes térfogat részeit méretosztályba sorolják, meghatározva így a vizsgált anyag szemcseméret-eloszlását [113].

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1. Elsőtétedési detektor                                | 6. Részecske halmaz                   |
| 2. Szórt fény   | 7. Lézer fényforrás                   |
| 3. Közvetlen sugárnyaláb                                | 8. Sugár feldolgozó egység            |
| 4. Fourier lencse                                       | 9. Többelemes detektor                |
| 5. A Fourier lencse által össze nem gyűjtött szórt fény | 10. A Fourier lencse fókusz távolsága |



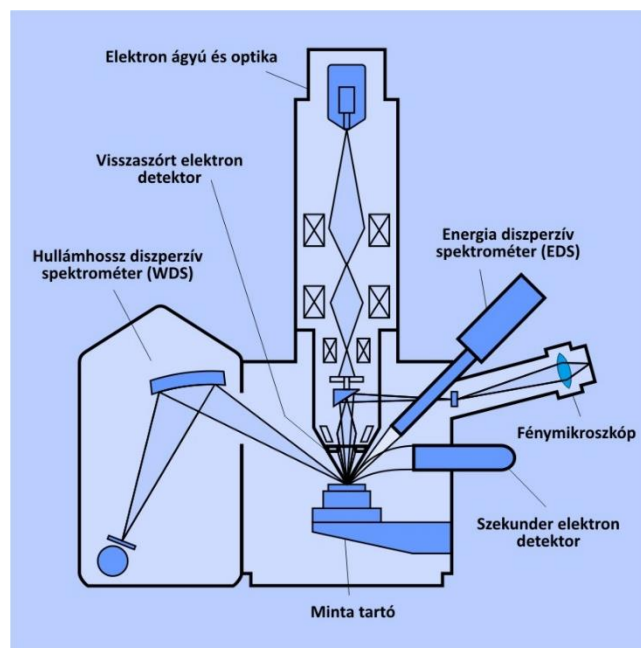
**18. ábra** A lézergranulométer elvi vázlatja [113]

Kutatómunkám szempontjából nagyon fontos, hogy a prekursor anyagok szemcseméret-eloszlását meghatározzam, mert nagy mértékben befolyásolja a friss pép és a megszilárdult alkáli aktivált anyag tulajdonságait. Jelentősége van a tömörebb szerkezet kialakításában, illetve a szemcsék alkáli aktivált oldatban történő oldódásánál.

### Mikroszerkezeti vizsgálatok (SEM+EDX)

A kutatómunka során alkalmazott anyagok mikroszerkezetének és elemi összetételének meghatározását pásztázó elektronmikroszkóp (*Scanning Electron Microscope, SEM*) és energia-diszperzív röntgen spektroszkóp (*EDX*) segítségével végeztem el. A SEM egy olyan berendezés, amely a vizsgált anyag felszínét, vékony elektronnyalábbal pásztázza végig. Az elektronforrásból (*katódból*) kilépő elektronokat a vizsgálandó minta felé nagy feszültség gyorsítja, és az elektronmágnesekből álló lencserendszer (*kondenzor és objektív*) egy nyalábbá fókuszálja (**19. ábra**). A berendezésben vákuum található, annak érdekében, hogy az izzó katód kiégését elkerüljék [115, 116, 117].

A berendezéshez csatlakoztatott energia-diszperzív röntgenspektroszkóppal lehetőség van a vizsgálandó minta felületi elemösszetételének meghatározására. Az analízis annak a röntgen sugárzásnak a mérésén alapul, amelyet a pásztázó elektron mikroszkóp elektronnyalábja a vizsgálandó anyagban keltett. A gerjesztett karakterisztikus sugárzás energiája arányos a kibocsátó elem koncentrációjával, majd a detektálást követően az intenzitásokból egy számítógépes program kémiai összetételt ad.



19. ábra A SEM elvi váza [117]

A vizsgálatot a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítástani és Nanotechnológiai Intézetében található ZEISS EVO MA10 típusú SEM + EDX berendezéssel végeztem el. A vizsgálat előtt a mintákat 20x20 mm-es mintatartó lapra rögzítettem kétoldalú ragasztószalag segítségével, majd a mikroszkópba történő behelyezés előtt - a megfelelő vezetőképesség elérése érdekében – a minta felületét arannyal gőzöltem (*Bio-Rad SEM Coating SEM system*).

### **Ásványi összetétel meghatározása**

A röntgen pordiffrakciós vizsgálat egy roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer, amit nagyon gyakran használnak a kristályos anyagok fázisainak azonosítására, meghatározására és mennyiségi jellemzésére. A módszerrel az adott hullámhossztartományba eső röntgensugarak szóródását mérik. A Bragg-egyenlet ( $m \cdot \lambda = 2d \sin \Theta$ ) azt fejezi ki, hogy milyen összefüggés van a röntgensugár hullámhossza ( $\lambda$ ), a rácssíkok közötti távolság ( $d$ ) és a diffrakciós szög ( $\Theta$ ) között. A kiértékelést tekintve megkülönböztetünk minőségi azonosítást, amely azon alapul, hogy a röntgenreflexió és erőssége jellemző az adott mintára. A mennyiségi meghatározás során a porminta esetében különböző kristályos fázisokhoz tartozó reflexiók intenzitása a komponensek mennyiségi arányától függ [118].

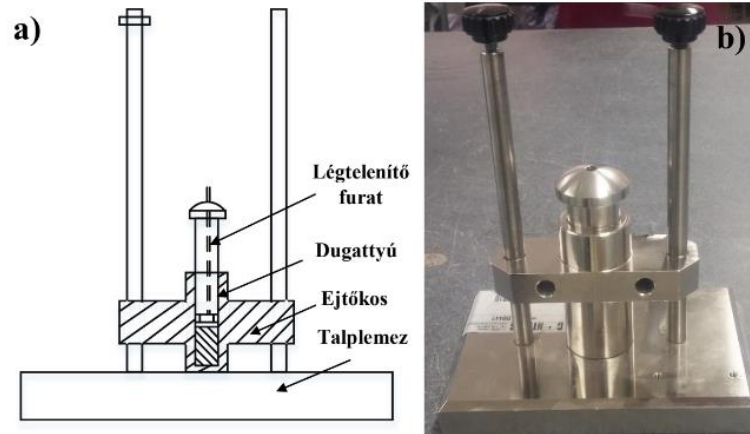
A kutatómunka során az alapanyagokat és a hőkezelésnek kitett alkáli aktivált anyagokat *Rigaku MiniFlex II* típusú röntgen diffraktométer segítségével (*Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézet*) vizsgáltam.

### **Anyagsűrűség meghatározása**

Az alapanyagok anyagsűrűségét piknométeres módszerrel, az MSZ EN 1097-7:2008 szabványnak megfelelően hajtottam végre [120]. A piknométeres eljárás lényege, hogy meghatározzuk a vizsgált ömlesztett anyag tömegét és pontos térfogatát, így a sűrűséget a mért értékek hányadosa adja meg. Mérőfolyadéként etanolt alkalmaztam.

### **A Rigden-féle hézagterfogat meghatározása**

Kísérleti munkám során meghatároztam a töltőanyagok szárazon tömörített hézagterfogatát a MSZ EN 1097-4:2000 szabvány [121] szerint, amely a szárazon tömörített minta Rigden-készülékkel való hézagterfogat meghatározását írja elő. Ez a vizsgálat a töltőanyagok aszfaltkeverékekre kifejtett merevítő tulajdonságának megítélését is elősegíti.



20. ábra a) Tömörítő készülék vázlati rajza b) Rigden-féle hézagterfogó készülék

A Rigden-féle hézagterfogó mértékét 3 ismételt mérés átlaga alapján határoztam meg:

$$V = \left( 1 - \frac{4 \cdot 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot a^2 \cdot \rho_f \cdot h} \right) \cdot 100 \quad (6.)$$

ahol:

- $V$  – a hézagterfogó [V/V %]
- $m_2$  – a tömörített kőliszt tömege [g]
- $a$  – a furat belső átmérője az ejtőkosban [mm]
- $\rho_f$  – a vizsgált töltőanyag anyag sűrűsége [g/cm<sup>3</sup>]
- $h$  – a tömörített kőliszt magassága [mm].

### Az alkalmazott anyagok hidrofób/hidrofil tulajdonságainak vizsgálata

A hidrofil tényező megállapítása a töltőanyag poláros és apoláros folyadék adszorbeáló képességének összehasonlításán alapszik. A hidrofil tényező értékét ( $\eta$ ) a töltőanyagok ülepedési térfogatainak arányából lehet meghatározni (7.) [7]:

$$\eta = \frac{V_{poláros}}{V_{apoláros}} [-] \quad (7.)$$

Hidrofilitás szempontjából két esetet különböztetünk meg:

- $\eta > 1$ : hidrofil
- $\eta < 1$ : hidrofób

Szakirodalmi adatok és a gyakorlati tapasztalatok alapján a bitumennel az a töltőanyag képes erős kapcsolatot kialakítani, amelynek hidrofil tényezője 0,7-0,85 közötti értékkel rendelkezik [7]. Az aszfalttechnológiában kötőanyagként a bitument alkalmazzák, amely apoláros anyag, akárcsak az olaj és a petróleum. Kísérleteim során a petróleum mellett döntöttem, ugyanis kisebb sűrűsége miatt a szemcsék ülepedése gyorsabban végbemegy. Poláros mérőfolyadéként pedig etanolt alkalmaztam. A vizsgálatok során analitikai mérleg segítségével 10 gramm töltőanyagot mértem be párhuzamosan 5-5 db talpas kémcsőbe, melyeket 10 ml-re töltöttem fel a vizsgálati folyadékokkal. Ezt követően fémpálca segítségével összekevertem a kémcsőben lévő szuszpenziót, majd 1 perces ultrahangos kezelést alkalmaztam az esetlegesen a szemcsék közé szorult levegő eltávolítása érdekében. Mindezek után 25 ml-re töltöttem fel a kémcsöveket, melyeket az esetleges párolgás elkerülése végett lezártam. A kémcsöveket rázkódásmentes helyre tettem és 72 óra elteltével leolvastam a skálázott kémcsövekről a töltőanyagok ülepedési térfogatait ( $V_{poláros}$ ,  $V_{apoláros}$ ).

### **Az olajmegkötő képesség vizsgálata**

A *German Filler Test* az ásványi töltőanyag olajmegkötő képességének mérésére szolgáló vizsgálat. Megjegyzendő, hogy ez a vizsgálat nem szabványosított vizsgálat, de gyakorlati célokból rendkívül hasznos. Segítségével meghatározható a töltőanyag és a bitumen olajtartalma közötti kohézió mértéke, valamint a szemcsék közötti hézagterefogat mértékére is következtethetünk. Kifejlesztése a német *Koch Materials Company*-hoz kötődik [122]. A bitument felépítő komponensek egyike az ún. olajos rész, ami kb. 45-60 % közötti részt tartalmaz. A méréshez hidraulika olajat használtam, melyből 15 grammot mértem ki. Ehhez hozzáadtam 45 gramm tömegű töltőanyagot és a keverékből egy golyót formáztam. Ezután további töltőanyagot adagoltam a keverékhez 5 grammos lépésekben. Minden hozzáadott 5 gramm után a masszát jól összegyúrtam, hogy az olaj kitöltse a szemcsék közötti teret, valamint a szemcsék pórusait, majd ismét golyót formáltam belőle. Ezt a folyamatot addig ismételtam, amíg a töltőanyag és az olaj közötti összetartó erő megszűnt.

### **Fajlagos felület meghatározásának elmélete**

A fajlagos felület lényegében egy egységnyi tömegre vonatkoztatott felület. A bitumen és az ásványi anyagok közötti kölcsönhatás a határfelületükön végbemenő adszorpciós folyamatoktól jelentősen függenek, ezért fontosnak tartottam a töltőanyagok és a kőanyagok fajlagos felületének meghatározását.



A fajlagos felület meghatározása *TRISTAR 3000* típusú gázadszorpciós elven működő készülékkel történt (*Miskolci Egyetem, Fémelőállítási és Öntészeti Intézet*). A fajlagos felület meghatározása volumetrikus módszerrel történt. A vizsgálat során a gáztalanított mintákat alacsony hőmérsékletre hűtik, majd nyomás növelése mellett gázzal telítik. A nyomás növelésének hatására az anyagok felületén megkötött gázmolekulák száma gyarapodik, ezáltal nő az adszorbeálódott réteg vastagsága. Az adszorbeálódott anyagmennyiség függ a határfelület minőségétől, a nyomástól és a hőmérséklettől. Addig amíg a mintán adszorbeálatlan felület van, addig a folyamat nem ér véget. A nyomás csökkenésével a felületen megkötött gázmolekulák felszabadulnak. Ezt a folyamatot deszorpciónak nevezzük. A nyomásérték és a megkötött gáz mennyisége alapján határozható meg a BET (*Brauner-Emmett-Teller*)-féle fajlagos felület [123].

A hengeres pórusok sugarát a 10. egyenlet írja le [126]:

$$r_p = r_k + t \quad (10.)$$

ahol:

- $r_p$ - pórusugár [nm]
- $r_k$ - kondenzátummal töltött belső (Kelvin-) pórusugár [nm]
- $t$ - fizikailag adszorbeálódott molekularéteg vastagság [nm]

A 11. egyenlet írja le a Kelvin egyenletet, amely segítségével kiszámítható, hogy adott relatív nyomáson milyen méretű pórusok keletkeznek [126]:

$$r_k = - \frac{2 \cdot V_0 \cdot \sigma \cdot \cos \phi}{R \cdot T \cdot \ln \frac{p}{p^0}} \quad (11.)$$

ahol:

- $r$ -Kelvin rádiusz [m]
- $V_0$ -folyékony adszorptívum mól térfogata a mérés hőmérsékletén [ $\text{m}^3/\text{kmol}$ ]
- $\sigma$ -felületi feszültség [N/m]
- $R$ -egyetemes gázállandó [ $\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ ]
- $p$ - görbült felület gőznyomása [Pa]
- $p^0$ -sík felület telített gőznyomása [Pa]

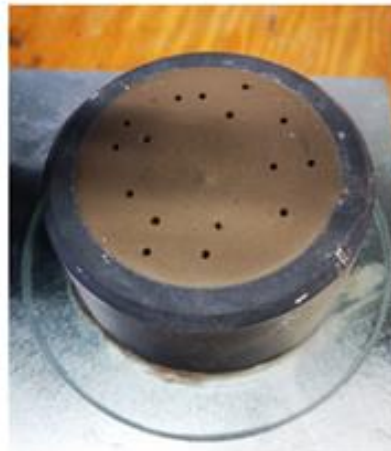
### Az alkáli aktivált anyag Vicat-féle kötési idejének meghatározása

A Vicat-féle vizsgálat elsősorban cementpépek kötési idejének vizsgálatára használható módszer (MSZ EN 196-3:1990) [127]. Mivel az alkáli aktiválás során a friss alkáli aktivált anyag pép – a cementhez hasonlóan – megszilárdul, ezért a kötési idő kezdetének és végének meghatározásához a Vicat-féle módszer alkalmazható.

A Vicat-féle készülék lényegében egy milliméter skálával ellátott állvány. Az állványhoz függőleges irányban rögzítve van egy henger geometriájú fémpálca, amelynek felső végére feltét helyezhető. A pálca középső részén található egy mutató, amely a mm skálája előtt mozogva a fémpálca helyzetét jelzi. A fémpálca alsó részére 10 mm átmérőjű, síkvégű henger alakú fémrúd, vagy 1,13 mm átmérőjű ( $1\text{ mm}^2$  keresztmetszetű) síkvégű acéltű szerelhető fel. A mozgó rész teljes tömegének  $300\pm 2$  grammnak kell lennie. A készülékhez tartozik még egy üveglapra helyezett, csonkakúp alakú gyűrű, amely keménygumiból készül. A vizsgálatához elkészített friss pépet ebbe a gyűrűbe kell önteni.



a)



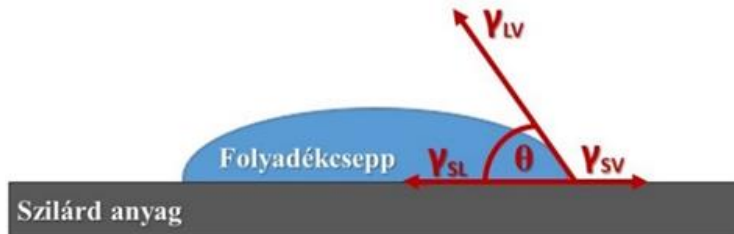
b)

21. ábra a) Vicat-féle készülék és b) az alkáli aktivált anyaggal töltött gumigyűrű

### Peremszög vizsgálata hevítómikroszkóppal

Amikor egy folyadék egy szilárd anyag felületével érintkezik (22. ábra), akkor két esetet különböztetünk meg:

- a folyadékcsepp a szilárd anyag felületén teljesen szétterül, a peremszög ekkor zérus vagy
- a folyadékcsepp nem terül szét teljesen, hanem valamilyen szöget zár be a szilárd anyag felületével [128, 129].



22. ábra A peremszög szemléltetése

Az első esetben tökéletes nedvesítésről beszélünk. Amennyiben a folyadék nem terül szét teljesen a szilárd felületen, azt a jelenséget kontakt nedvesítésnek nevezzük.

A folyadék és a szilárd felület között kialakult szöget illeszkedési-vagy másnéven peremszögnek (*kontaktszögnek*,  $\theta$ ) nevezik (22. ábra), amely leírható a határfelületi feszültségek függvényeként (8.). A határfelületi feszültségek vízszintes komponenseinek egyensúlya határozza meg a folyadék és a szilárd anyag közötti peremszöget, amelynek így az egyensúly feltétele [130]:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \cos\theta \cdot \gamma_{LV} \quad (8.)$$

ahol:

- S-szilárd (*solid*) halmazállapotú anyag,
- L-folyadék (*liquid*) halmazállapotú anyag,
- V-gőz (*vapor*) halmazállapotú anyag.

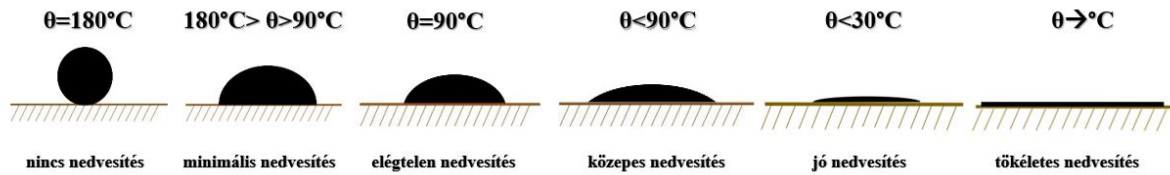
Ebből adódik a peremszög számításához szükséges képlet (9.):

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (9.)$$

ahol:

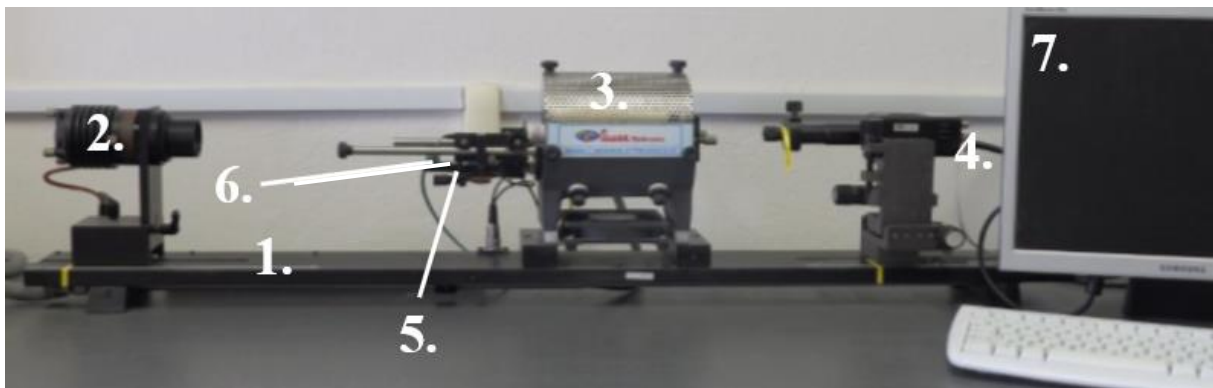
- $\theta$ -nedvesítési peremszög [°],
- $\gamma_{SV}$ -szilárd-gőz határfelületi feszültség [N/m],
- $\gamma_{SL}$ -szilárd-folyadék határfelületi feszültség [N/m],
- $\gamma_{LV}$ -folyadék-gőz határfelületi feszültség [N/m].

A 23. ábra a felületi nedvesítés különböző szintjeit szemlélteti.



23. ábra A felületi nedvesítés szintjei [131]

Az alkáli aktivált anyag és annak a felületére helyezett bitumen minta nedvesítő képességének meghatározására alkalmas berendezés a hevítőmikroszkóp. A 24. ábra a *Camar Elettronica* típusú hevítőmikroszkópját szemlélteti (*Miskolci Egyetem, Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézet*), amelynek maximális hőmérséklete  $T=1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

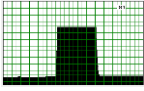
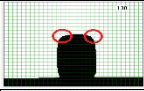
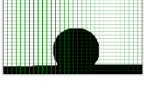
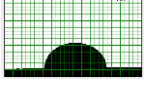
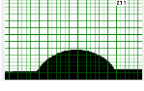


24. ábra A hevítőmikroszkóp felépítése

A berendezés felépítése: 1) mikroszkóp állvány; 2) fényforrás; 3) csökemence; 4) digitális kamera; 5) mintatartó állvány; 6) vizsgálati minta; 7) képfeldolgozó szoftver

A vizsgálat során a mikroszkóp állványra elhelyezett fényforrással megvilágítjuk a csökemencében lévő alkáli aktivált anyagból elkészített mintatartóra helyezett bitumen mintát. Egy nagyfelbontású digitális kamera és a berendezés vezérlő szoftvere segítségével bináris képet készítünk. Digitális képelemzéssel a vezérlő szoftver valós időben meghatározza a minta relatív magasságát ( $h$ , %), szélességét (*olvadék esetén a területét*,  $2h/w$ , -), valamint a peremszög kiegészítő szögét ( $^{\circ}$ ). Ezek ismeretében megállapítható az olvadási tulajdonságokat jellemző öt különböző fázis, és azok pontos hőmérséklete (**6. táblázat**).

6. táblázat A hevítőmikroszkópos vizsgálat során meghatározott jellemző hőmérsékletek

	<b>Szintereződés:</b> az a hőmérséklet, amikor a minta magassága a referencia magassághoz képest 5%-kal csökken.
	<b>Lágyulás:</b> ez akkor következik be, ha a hengeres minta felső pereme lekerekedik.
	<b>Gömb állapot:</b> amikor az aktuális magasság és szélesség egyenlő, valamint a peremszög kiegészítő szöge kisebb, mint 90°.
	<b>Félgömb állapot:</b> akkor jön létre, ha az aktuális magasság fele az aktuális szélességnek.
	<b>Olvadék állapot:</b> ez az állapot akkor alakul ki, ha az aktuális magasság 1/3-a az aktuális szélességnek.

Ahhoz, hogy tanulmányozni tudjam az alkáli aktivált anyag és a bitumen között kialakult lágyulási és nedvesítési folyamatokat, a hevítőmikroszkóp számára megfelelő méretű mintatartót kellett készítenem. Tudományos munkám szempontjából fontosnak tartom megjegyezni, hogy a szakirodalmi adatokat kutatva nem találtam egy olyan tanulmányt sem, amelyben vizsgálták volna alkáli aktivált anyagon a bitumen peremszögét.

7. táblázat A hevítőmikroszkópos vizsgálatához szükséges minta elkészítése

Elsőként szilikon öntőformát készítettem, amelyhez a megfelelő méretű (gyári) $Al_2O_3$ mintatartó lapokat használtam etalonként. Ezeket egy fém edénybe rögzítettem kétoldalú ragasztó segítségével, majd kétkomponensű hőálló szilikonnal körbe öntöttem. A sablonból 24 óra eltelté után távolítottam el a mintákat.	
Ezt követően már a szilikon sablonba tudtam önteni az alkáli aktivált pépet, majd 24 óra eltelté után könnyedén eltávolítottam a sablonból.	
Az alkáli aktivált anyagból készült mintatartókat zárható dobozban tároltam 7 napig, majd ezt követően hevítőmikroszkóp segítségével tanulmányoztam a mesterséges kőanyag felülete és a bitumen között kialakult tapadást.	

Ahhoz, hogy ezt megvalósíthassam, bitumen próbatesteket is kellett készítenem. A bitumen minták előállításához is ugyanazt a kétkomponensű hőálló szilikont alkalmaztam, mint az alkáli aktivált lapok gyártásánál. Acélból kiesztorgált henger geometriájú referencia próbatest készült ( $h=4,0\text{ mm}$ ,  $d=2,0\text{ mm}$ ), amelyet körbe öntöttem a szilikkonnal. A sablon elkészítését követően a bitument  $170\text{ °C}$  hőmérsékletre melegítettem fel, majd a megolvadt bitumenből egy cseppnyi anyagot egy kis fémhuzal segítségével a hőálló szilikon formába helyeztem. A felesleget fémhuzal, illetve triklór-etilén oldószer segítségével eltávolítottam, ezzel sikerült a hengeres mintát kialakítanom. Ezután mélyhűtőben tároltam felhasználásig a sablonnal együtt.



### Termoanalitikai vizsgálatok

A differenciális termoanalitikai vizsgálat célja az anyagokban, anyagkeverékekben hőmérséklet hatásra bekövetkező változások, átalakulások feltárása. A kutatómunka során *MOM Derivatograph-C* típusú készüléssel végeztem el a vizsgálatokat az Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézetében (Miskolci Egyetem) található berendezésen. A vizsgálati eljárás során a berendezésben összehasonlításképp inert anyagot ( $Al_2O_3$ ) alkalmaznak. A kemencében egyidejűleg hevített két anyag (*vizsgálati anyag és az inert anyag*) hőmérsékletét hőelempárral rögzítik, ezáltal közvetlenül lehet mérni és regisztrálni a vizsgálandó anyagban végbemenő endoterm és exoterm reakciókat (*DTA görbe*).

A szilárd anyagok nagy részében hő hatására tömegváltozás is történik, amelyek legtöbbször kémiai átalakulások következménye, ugyanis valamilyen bomlási anyag (*víz,  $CO_2$* ) távozik a rendszerből. Az anyagok hőmérséklet hatására bekövetkező tömegváltozását mutatja a termogravimetriai (*TG*) görbe. A DTG görbe ennek a derivált görbéje, amely a tömegváltozások részfolyamatait és azok pontos helyét még jobban szemléltetővé teszi. Emellett a tömegváltozás sebességéről ad felvilágosítást [132, 133, 134].

### FT-IR vizsgálatok

A Fourier transzformációs infravörös spektroszkópiával szilárd, folyékony vagy gázból származó abszorpció, vagy emisszió infravörös spektrumából tájékozódnak. A mérés során a FT-IR berendezés egyszerre nagy spektrális felbontású adatokat széles spektrumtartományban tud vizsgálni.

A FT-IR spektrométer anyagigénye kedvező, hiszen nagyon kevés minta (*néhány mg*) is elegendő a vizsgálat elvégzéséhez. A vizsgálat egy roncsolásmentes mérést tesz lehetővé  $0,01 \text{ cm}^{-1}$ -nél is jobb hullámszám pontossággal. A spektrumok kiértékelése során a mért karakterisztikus sávok alapján tudjuk beazonosítani a molekulákban lévő kötések és csoportokat.

Az infravörös spektrum kiértékelésénél a következő csoportok jellemző frekvenciái ismertek:

- hidroxilcsoport:  $3650\text{-}3200 \text{ cm}^{-1}$
- amincsoport:  $3500\text{-}3300 \text{ cm}^{-1}$
- $\text{C}\equiv\text{C}$  kötés  $2200\text{-}2100 \text{ cm}^{-1}$
- $\text{C}\equiv\text{N}$  kötés:  $2300\text{-}2200 \text{ cm}^{-1}$
- $\text{C}=\text{C}$  kötés:  $1850\text{-}1630 \text{ cm}^{-1}$
- Si-O-Si:  $1000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ [135, 136].

### Bitumenes tapadóképesség vizsgálata

Ahhoz, hogy az alkáli aktivált anyagon elvégezhessem a bitumenes tapadóképesség vizsgálatot, el kellett készítenem a megfelelő szemcséket. A kőzetekből a zúzottköveket aprítással, majd osztályozással állítják elő. Mivel ezek rendkívül energiaigényes folyamatok, emellett az aprítás során keletkeznek maradék anyagok is, ezért az alkáli aktivált anyag előállítására más megoldást kerestem. Az alternatív megoldás mellett szól az is, hogy az aprítás során használt erőhatás következtében az alkáli aktivált kőzet veszít a szilárdságából, emellett további hulladék anyag keletkezik. Mindezek miatt munkám során egy ún. sablonozási technológiával (**8. táblázat**) oldottam meg a „mesterséges kövek” előállítását.

## 8. táblázat Szilikon sablon készítésének folyamata és az elkészült kőzetek

<p>Kísérleteim során olyan szilikon öntőformát készítettem, amelyhez Magyarországon elterjedten felhasznált kőanyagokat használtam fel mintázáshoz: a referencia szemcsék mészkő (<i>Tatabánya</i>) és andezit (<i>Tállya</i>) kőanyagok 11/22 frakciói voltak. A véletlenszerűen kiválasztott kőzetszemcséket egy bontható, kerettel ellátott sablon alá rögzítettem, majd kétkomponensű hőálló szilikonnal körbeöntöttem. A sablonból 24 óra eltelté után távolítottam el a mintákat.</p>	
<p>A sablonozási módszer pozitív eredményeket mutatott, ugyanis a sablonból a minták rendkívül könnyen eltávolíthatóak voltak. A sablon előállítás során egy szilikon sablont készítettem, amelybe 40 db minta önthető. Így egy öntés alkalmával kb. 600 grammnak megfelelő mennyiségű kőanyagot tudok elkészíteni. Az öntés 24 óránként megismételhető.</p>	

A kőanyagokat bevontság szerint az MSZ EN 12697-11:2012 [26] szabványnak megfelelően szokták jellemezni, amelyben a bitumen tapadókéességét vizsgálják. A vizsgálat során a bitumennel bevont és vízben forgatott kőzeteket szemrevételezéssel jellemzik. Kutatómunkám során 510 gramm 11/22 szemcseméretű mesterséges kőzetet mértem ki, amelyet a bitumennel és keverőedénnyel együtt 160 °C-ra szárítószekrénybe helyeztem. Miután felmelegedett, 15 gramm mennyiségű bitument mértem rá, majd 180 °C-ra beállított fűtőlapon az alapanyagokat jól összekevertem, hogy egyenletesen bevont kőzetszemcséket kapjak. Kihűlést követően minden szemet sütőpapírra helyeztem úgy, hogy a szemek ne érjenek egymáshoz. 24 óra elteltével, 3x150 grammot üvegpálcával együtt egy lezárható, hengeres edénybe helyeztem, feltöltöttem desztillált vízzel, és egy forgatóberendezésre tettem (25. *ábra*) 48 óra vizsgálati időtartamig.





Az AAM kőanyag kimérése



A kőanyagra történő bitumen bemérés



A kőanyag és a bitumen összekeverése



A bitumennel bevont szemcsék szeparálása



A bitumennel bevont szemcsék vízben forgatást követően

25. ábra Az alkáli aktivált anyag és a bitumen közötti tapadás vizsgálata

### Az alkáli aktivált anyag porozitásának meghatározása

A kőanyagok porozitásának meghatározását higany-porozimetria (*Mercury Intrusion porosimetry, MIP*) segítségével vizsgáltam, Pascal 140 és Pascal 440 típusú higany-poroziméter segítségével (26. ábra).



26. ábra .Kutatómunkámhoz alkalmazott Pascal 140 és Pascal 440 típusú higany-poroziméter

A módszerrel lehetőség van a porózus anyagok makro-és mezopórusainak méret-, és térfogat szerinti meghatározására. Különböző anyagok pórusrendszerének egyik korszerű vizsgálati módja, amely információt nyújt az anyagrendszer belső szerkezetéről, mint például a nyílt

porozitás, pórusméret-eloszlás, a teljes pórustérfogatról, látszólagos sűrűségéről, valamint a minta fajlagos felületéről. A higany-porozimetrián kívül jelenleg nincs még egy olyan mérés technikai elv, amely ugyan ezen jellemzők meghatározására egyidejűleg képes.

A vizsgálathoz olyan folyadékra van szükség, amely nem lép reakcióba a vizsgálandó anyaggal. A higany, mely egy nem nedvesítő folyadék (azaz a nedvesítési szöge  $\Theta > 90^\circ$ ) ezért, ha találkozik egy szilárd, porózus anyaggal, annak a pórusaiba spontán nem képes behatolni. Egy külső növekvő nyomás szükséges ahhoz, hogy a pórusok higannyal telítődhessenek. A vizsgálandó pórusméret-tartomány kiterjesztése miatt alacsony-, és nagynyomású egységek alkalmazása szükséges. Minél nagyobb a nyomás, annál kisebb pórusokba képes behatolni a higany. A minta által felvett higany mennyisége (*térfogata*) jellemzi az anyagban található pórusok térfogatát [137, 138, 139, 140].

### 3 EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTÉKELÉSE

#### 3.1 Másodlagos nyersanyagon végre hajtott alapanyagvizsgálatok

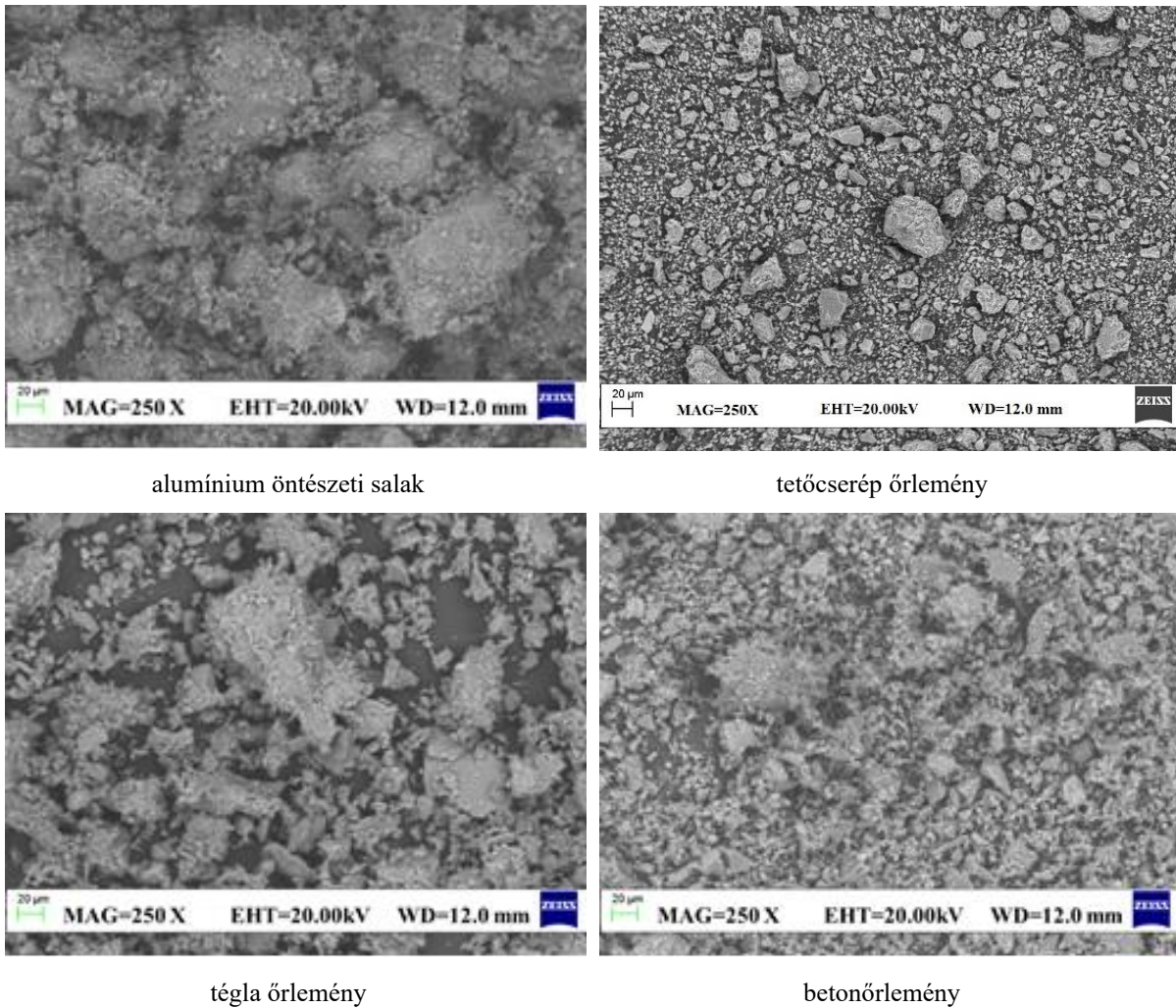
Az előkísérleteimhez másodlagos nyersanyagként (*prekurzorként*) alumínium-öntészeti salakot, téglá őrleményt és tetőcserépőrleményt, illetve betonőrleményt alkalmaztam. Az alkáli aktiválás előtt meghatároztam az alapanyagok kémiai összetételét (*XRF vizsgálattal*) anyagsűrűségét (*piknométeres módszerrel*), valamint a szemcseméret eloszlásukat (*lézer-granulometriával*). Mindezek mellett anyagszerkezeti és morfológiai vizsgálatot is végeztem pásztázó elektronmikroszkóp segítségével.

**9. táblázat** Az előkísérletek során alkalmazott másodlagos anyagok oxidos összetétele (röntgen-fluoreszcens/XRF/ vizsgálati eredmények)

Vegyületek	Alumínium öntészeti salak, S [m/m%]	Tetőcserép őrlemény, CS [m/m%]	Tégla őrlemény, T [m/m%]	Beton- őrlemény, B [m/m%]
SiO <sub>2</sub>	18,14	54,20	60,97	75,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,93	17,10	19,49	3,40
MgO	3,81	4,15	1,65	0,60
CaO	1,91	10,20	0,72	13,36
Na <sub>2</sub> O	10,57	0,68	0,79	0,35
K <sub>2</sub> O	3,36	2,95	2,26	0,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32	6,04	7,03	1,28
MnO	0,10	0,11	0,11	0,03
TiO <sub>2</sub>	0,21	0,75	1,23	0,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,15	0,90	0,04
<b>TOTAL</b>	74,40	96,3	94,34	0,64
<b>IZZÍTÁSI VESZTESÉG, %</b>	25,60	4,01	5,66	<0,30

A kémiai összetételt (**9. táblázat**) tekintve megállapítható, hogy az alapanyagok mindegyike változó mennyiségben tartalmazza az alkáli aktiváláshoz szükséges két fő oxidot (SiO<sub>2</sub> és Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Az alumínium öntészeti salak (54,07 m/m%) kivételével az alapanyagok megközelítőleg 80 m/m%-ban tartalmazzák a kívánt két oxidot.

A lehetséges prekurzorokat pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam meg annak érdekében, hogy az alapanyagok felületi jellegét feltárjam. A felvételek 250x-szeres nagyításokban készültek el, amelyek jól mutatják a nyersanyagok morfológiáját és méretét (**27. ábra**). Az azonos nagyításban készült SEM képeken megfigyelhető, hogy a négy prekurzor közül a tetőcserépőrlemény rendelkezik a legdurvább szemcsemérettel. Az alumínium öntészeti salak, illetve a téglá-és betonőrlemény esetében megfigyelhető, hogy a legkisebb méretű szemcséik agglomerálódtak.



alumínium öntészeti salak

tetőcserép őrlemény

tégla őrlemény

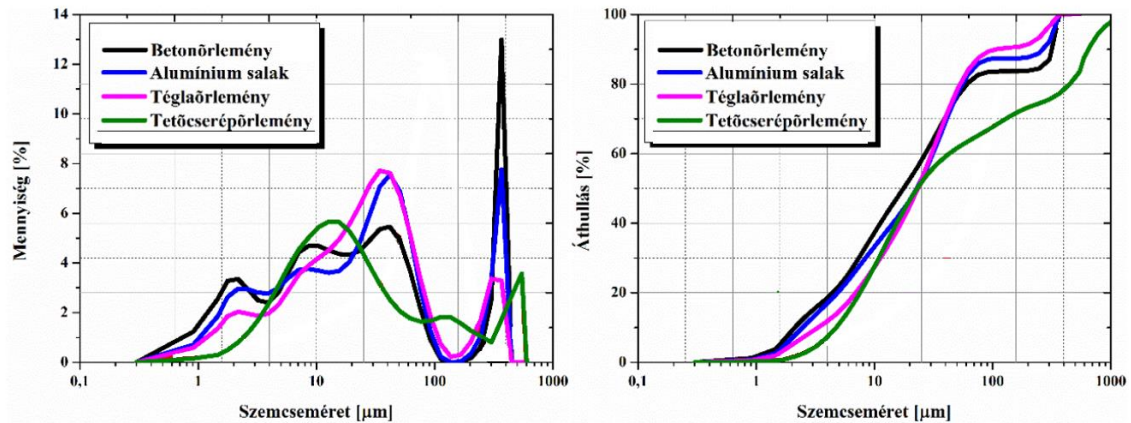
betonőrlemény

**27. ábra** Az lehetséges prekursorok SEM felvételei

A szemcseméret-eloszlás alapján megállapítható (**28. ábra**), hogy az alapanyagok polidiszperz anyagok. A hisztogramon látható a betonőrlemény négy fő csúcsa, amelyből három 100 µm alatti mérettel rendelkezik. A negyedik, keskeny csúcsként jelenik meg 350 µm körüli mérettartományban. Az alumínium öntészeti salak szemeloszlása nagymértékben követi a betonőrlemény szemeloszlását. A téglá őrlemény közel 75%-a 40 µm-nél kisebb szemcséket, míg a tetőcserép őrlemény 50%-a 22 µm alatti szemcséket tartalmaz.

Az alapanyagok átlagos szemcsemérete ( $d_{50}$ ) a következő:

$$d_{50B}: 20 \mu\text{m} < d_{50CS}: 22 \mu\text{m} < d_{50S}: 26 \mu\text{m}, d_{50T}: 26 \mu\text{m}.$$



28. ábra A másodlagos nyersanyagok szemcseméret-eloszlása

Az alapanyagok anyagsűrűségének meghatározását piknométeres módszerrel hajtottam végre az MSZ EN 1097-7:2008 [21] szabványnak megfelelően. Az alapanyagok anyagsűrűségének értékei a hézagterfogat meghatározásához, valamint a keverékösszetétel számításához volt szükséges. A **10. táblázatban** található prekursorok anyagsűrűségeinek mérési eredményei szerint az alumínium öntészeti salak rendelkezik a legmagasabb sűrűség értékkel. Ez valószínűleg abból ered, hogy a salak tartalmazza a legnagyobb mennyiségben az  $Al_2O_3$ -t, illetve más, nagy sűrűségű oxidvegyületeket ( $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ). Ellenben a betonörleménnyel, ugyanis ennek az anyagnak a legkisebb az anyagsűrűsége.

10. táblázat Az előkísérlethez használt alapanyagok anyagsűrűsége

Prekursor	Anyagsűrűség [ $g/cm^3$ ]
Alumínium salak	2,90
Tetőcserép örlemény	2,82
Tégla örlemény	2,78
Betonörlemény	2,70

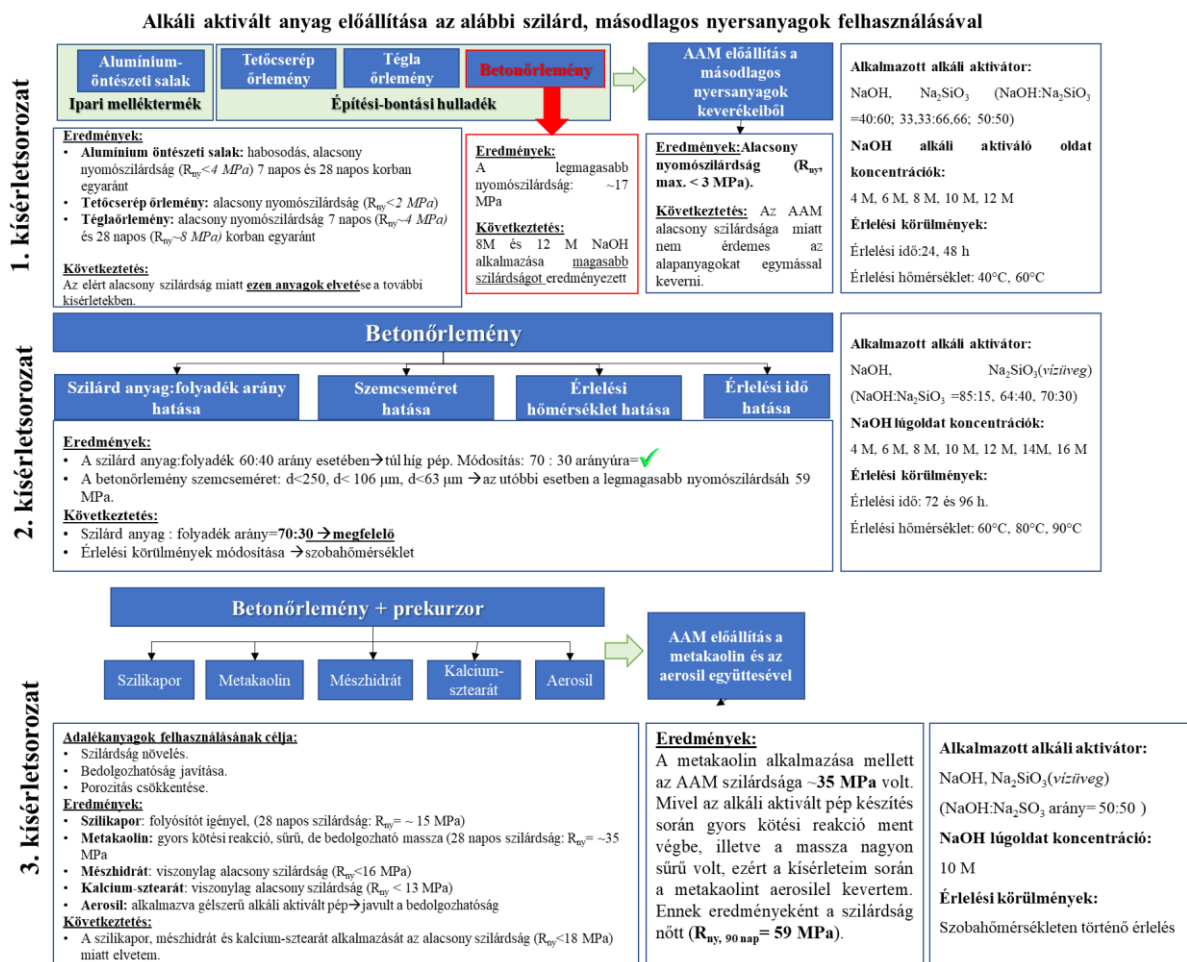
### 3.2 Másodlagos nyersanyag kiválasztása az alkáli aktiváláshoz

Az egyes kísérletsorozatok során az alábbi kísérleti beállításokat és a keverékenkénti próbadarabszámot készítettem el, melyekből meghatároztam a szilárdságvértékek számtani átlagértékeit (**11. táblázat**):

11. táblázat A kísérletsorozatokként elkészített keverékek és felhasznált próbatestek száma

KÍSÉRLETSOROZAT	KEVERÉKEK SZÁMA	PREKURZOROK SZÁMA	PRÓBATESTEK SZÁMA	ÖSSZES PRÓBATEST
I. kísérletsorozat	66	4	8	528 db
II. kísérletsorozat	18	1	8	144 db
III. kísérletsorozat	12	1 (+6 kiegészítő)	8	96 db
ÖSSZESEN	96			768 db

Az I. kísérletsorozatban tehát különböző másodlagos nyersanyagok (prekurzorok) alkalmazásának lehetőségeit vizsgáltam. Ebben a szakaszban a munkám célja az volt, hogy kiválasszam az(oka)t a másodlagos nyersanyag(ka)t, amelyek felhasználásával alkáli aktivált anyag állítható elő.



29. ábra Az alkáli aktivált anyag előállítása érdekében elvégzett kísérletek (I-III kísérletsorozat)

Az **I. kísérletsorozatban** az alumínium salak alkáli aktiválása során azt tapasztaltam, hogy a minták habosodtak, amelynek eredményeként habszerkezetű termékeket kaptam. Ennek oka az lehet, hogy a finomszemcsés alumínium-por lúgos közegben reakcióba lépett a lúgos alkáli aktiváló oldattal, melynek eredményeképpen hidrogén gázt fejlődött, amely a habosodást eredményezte.

A gázképződés hatására a mintában pórusok képződtek, ennek következtében a mechanikai szilárdság, illetve a testsűrűség is csökkent. A pórusos szerkezet által 7 és 28 napos korban is kevesebb, mint 4 MPa nyomószilárdságot értem el 8 M koncentrációjú NaOH oldattal. Minden egyes, alumínium-öntészeti salakot tartalmazó alkáli aktivált anyag esetében tapasztaltam a fent említett habszerkezet kialakulását. Ezért a mesterséges kőanyagként történő alkalmazhatóság szempontjából az alumínium öntészeti salakot, mint másodlagos nyersanyagot elvettem.

A tetőcserép őrlemény és téglá őrlemény alkalmazása során – az alkalmazott alkáli aktiváló oldószer, illetve az érlelési körülmények mellett – kis nyomószilárdságú termékeket sikerült előállítanom. A tetőcserép esetében a nyomószilárdság 2 MPa alatt volt 7 és 28 napos korban egyaránt, míg a téglá őrlemény esetében is alacsony szilárdsági értékeket (*7 napos korban <5 MPa, 28 napos korban <10 MPa*) kaptam.

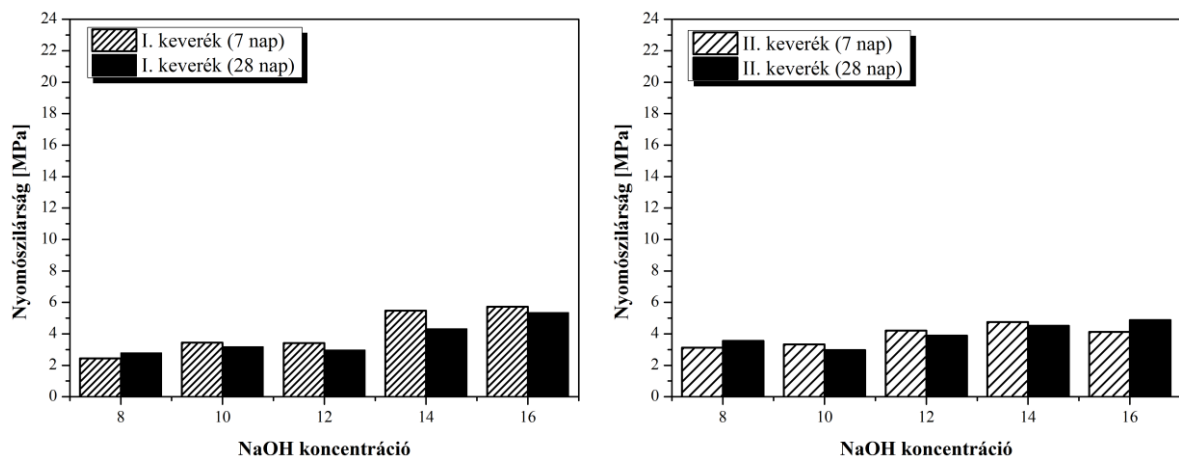
A kísérleteket végrehajtva a négy különböző másodlagos nyersanyag alkáli aktiválása során eldől, hogy a kiválasztott prekursor anyag, amelyre a kutatómunkám további részét építem, az a betonőrlemény.

Az előkísérletek során a legmagasabb nyomószilárdságot az alumínium salakhoz, a tetőcserép őrlemény és téglá őrleményhez képest a betonőrlemény alkalmazása során értem el ( $R_{ny\_B} \sim 17$  MPa). Munkám során azt tapasztaltam, hogy a betonőrlemény 4 M és 12 M NaOH koncentrációjú oldat alkalmazása során olyan gyors kötési reakciók mentek végbe, hogy a pép sablonba történő öntése problémát jelentett, a pép konzisztenciája nem volt megfelelő. Mivel a 8 M NaOH oldattal készült keverékek esetében nem talákoztam ilyen jellegű problémával, ezért úgy döntöttem, hogy kísérletet teszek 6 M, 8 M és 10 M NaOH koncentrációjú oldatokkal. Szakirodalmi források, illetve saját korábbi tapasztalataim alapján olyan kísérletsorozatot állítottam össze (**II. kísérletsorozat**), melyekben a NaOH koncentrációt, a prekursor anyag szemcseméretét, illetve az alkáli aktivált anyag érlelési módjának hatásmechanizmusát vizsgáltam. A szilárd anyag/alkáli aktiváló oldat arányt 60:40 és 70:30 arányúra választottam. Az alkáli aktivált anyag előállításához 8M, 10M, 12M, 14M és 16M NaOH koncentrációt alkalmaztam. A teljes keveréktervet a **12. táblázat** mutatja.

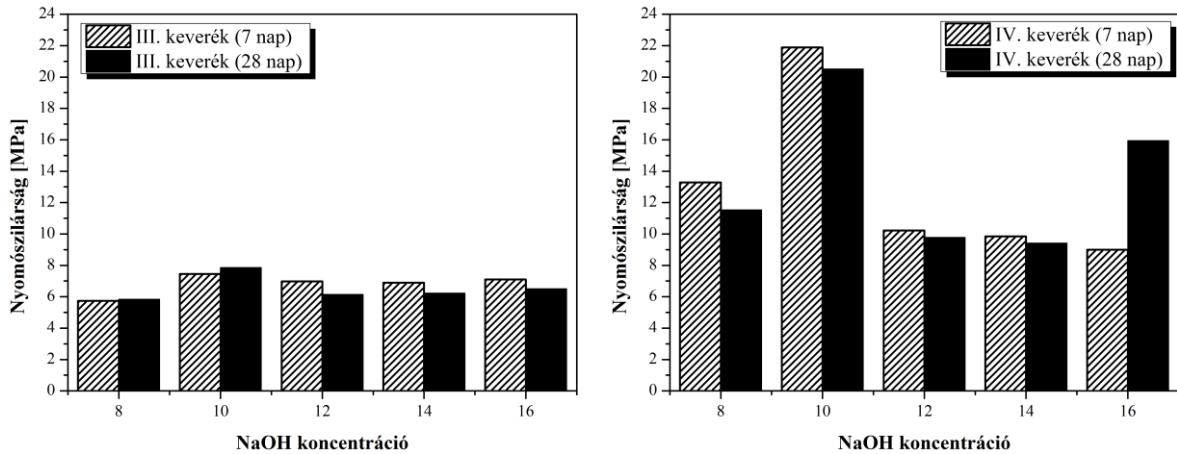
12. táblázat A betonörlemény alapú alkáli aktivált anyag keverékterve

Keverék azonosítás	Keverék arány (sz:f)	NaOH koncentráció	Szilárd anyag	Alkáli aktiváló oldat 85:15	Érlelés
I/1.	60:40	8 M	Betonörlemény ( $d < 0,250 \text{ mm}$ )	NaOH: Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	80 °C, 96 óra
I/2.		10 M			
I/3.		12 M			
I/4.		14 M			
I/5.		16 M			
II/1.	60:40	8 M	Betonörlemény ( $d < 0,250 \text{ mm}$ )	NaOH: Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	90 °C, 96 óra
II/2.		10 M			
II/3.		12 M			
II/4.		14 M			
II/5.		16 M			
III/1.	70:30	8 M	Betonörlemény ( $d < 0,250 \text{ mm}$ )	NaOH: Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	80 °C, 96 óra
III/2.		10 M			
III/3.		12 M			
III/4.		14 M			
III/5.		16 M			
IV/1.	70:30	8 M	Betonörlemény ( $d < 0,250 \text{ mm}$ )	NaOH: Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	90 °C, 96 óra
IV/2.		10 M			
IV/3.		12 M			
IV/4.		14 M			
IV/5.		16 M			

Az érlelést követően a mintákon nyomószilárdság vizsgálatot végeztem el 7 és 28 napos korban, amelynek az eredményeit, azaz az NaOH koncentráció nyomószilárdságra gyakorolt hatását tüntettem fel **30. ábra** segítségével.





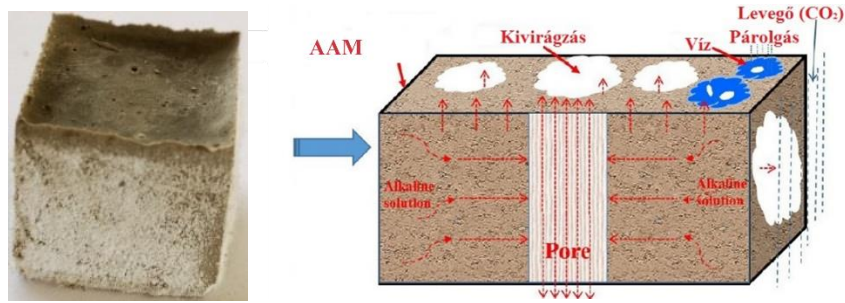


30. ábra A betonórlemény alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdsága 7 és 28 napos korban a NaOH koncentráció függvényében

A betonórlemény alapú alkáli aktivált anyagokon elvégzett nyomószilárdsági vizsgálatot követően azt a megállapítást tettem, hogy a betonórlemény szemcseméretét tekintve a  $d < 0,250$  mm és 10 M NaOH koncentrációval sikerült elérnem a legnagyobb nyomószilárdságot. 10 M NaOH koncentráció és 70:30 szilárd anyag/folyadék arány alkalmazásakor az AAM pép jól keverhető és önthető volt, a formába töltéshez megfelelő konzisztenciával rendelkezett, valamint az így készített próbatest rendelkezett a legnagyobb nyomószilárdsággal is. Az ettől eltérő koncentrációk esetén a pépek nagyon hamar kötésnek indultak, keverésük és formába öntésük nehézkes volt.

Az érlelési körülményeket figyelembe véve a 80 °C-on és 90 °C-on 96 órán át tartó érlelés túl soknak bizonyult, ugyanis a minta felületén hajszálrepedések jelentek meg. Mindezek miatt további kísérleteket hajtottam végre, az érlelési hőmérséklet szobahőmérsékletre és 60 °C-ra való csökkentésével. (Az eredményeket a **MELLÉKLET I. -Másodlagos nyersanyagok kiválasztása az alkáli aktiváláshoz** című részben a M3. ábra mutatja).

A 30. ábrán látható, hogy az esetek többségében 28 napos korban mért nyomószilárdság kisebb, mint a 7 naposé. Ennek oka a próbatestek tárolásával van összefüggésben. A II. kísérletsorozatban a próbatestek elkészítését követően azokat szabad levegőn tároltam a nyomószilárdsági vizsgálat elvégzéséig. Ez idő alatt a minták felületén fehér színű kivirágzás jelent meg (31. ábra), amely az AAM felületén kivált alkáli fémsókra utal.



31. ábra Az AAM felületén lévő alkáli fémek és a kivirágzás folyamata [141]

Ez a jelenség levegőn történő érlelés során tapasztalható. A mechanikai tulajdonságokra hatást gyakorol, ugyanis a kivirágzás miatt a minta porozitása nagy lesz, emiatt pedig csökken a termék szilárdsága. Mindezek miatt a kutatómunka további szakaszaiban a próbatesteket zárt dobozban érleltem a nyomószilárdsági vizsgálat elvégzéséig. Továbbá ez az oka annak is, hogy az AAM próbatestek nyomószilárdságát hosszútávú érlelést követően (90 napos korban) is meghatározom.

### 3.3 Betonörlemény alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának optimalizálása

Ebben a fejezetben a betonörlemény alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának az optimalizálási lépéseit ismertetem. Emiatt a kutatási szakaszban (29. ábra, 3. kísérletsorozat) különböző kiegészítő prekursorokat használtam, annak érdekében, hogy növeljem az AAM szilárdságát.

A további vizsgálataimhoz és a szilárdság növelése céljából a betonörleményt szabványos szitasorral tovább frakcionáltam a kívánt szemcseméret eléréséig, amelyek a következők voltak:  $d < 0,063$  mm,  $d < 0,106$  mm.

A betonörlemény volt a fő prekursor anyagom, amely a legnagyobb mennyiségbe került a keverékbe, mellé szilikaport (*S*), mészhidrátot (*O*), kalcium-sztearátot (*C*), metakaolint (*MK*) és aerosilt (*A*) alkalmaztam. A szilikapor puccolános tulajdonsággal rendelkező amorf kvarc. Emellett  $\text{SiO}_2$  forrásként alkalmaztam a szubmikroszkópikus finomsággal rendelkező aerosilt. Számos kutatás foglalkozik a metakaolin alapú alkáli aktivált anyagok előállításával, melyek felhasználásával viszonylag nagy szilárdságot értek el a kutatók [142, 143, 144]. Emiatt kísérletet tettem a betonörlemény és a metakaolin hatásmechanizmusának vizsgálatára. A pórusok mennyiségének csökkentése érdekében az alkáli aktivált anyag előállításához  $\text{CaO}$  forrásként mészhidrátot ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) és kalcium-sztearátot ( $\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{CaO}_4$ ) adagoltam. A 10M NaOH koncentrációjú oldattal értem el a legbiztosabb eredményeket, ezért az alkáli aktiválás során a 10M-os töménységet használtam. A 13. táblázatban ismertetem az alkáli aktiváláshoz használt keverék tervét.

**13. táblázat** Az alkáli aktiváláshoz használt keverék terv (III. kísérletsorozat)

Minta kód	Prekursor		Folyadék [m/m%]		Kiegészítő prekursor [m/m%]					
	Betonőrlemény [m/m%]	Szemcseméret [mm]	NaOH oldat	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	SZ	MK	O	C	A	F
AAM106	70	d <0,106 mm	15	15	0	0	0	0	0	0
AAMSF106	61,17		14,56	14,56	6,80	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91
AAMA106	68,60		15,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00
AAMC106	68,60		15,00	15,00	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00	0,00
AAMMK106	56,00		15,00	15,00	0,00	14,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AAMCA106	67,20		15,00	15,00	0,00	0,00	0,00	1,40	1,40	0,00
AAMCF106	66,60		14,56	14,56	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00	2,91
AAMO106	68,60		15,00	15,00	0,00	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00
AAMMA106	54,60		15,00	15,00	0,00	14,00	0,00	0,00	1,40	0,00
AAM63	70,00		d <0,063 mm	15,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AAMSF63	61,17	15,00		15,00	6,80	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91
AAMA63	68,60	15,00		15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00
AAMC63	68,60	15,00		15,00	0,00	0,00	0,00	1,40	0,00	0,00
AAMMK63	56,00	15,00		15,00	0,00	14,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AAMCA63	67,20	15,00		15,00	0,00	0,00	0,00	1,40	1,40	0,00
AAMO63	68,60	15,00		15,00	0,00	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00
AAMMA63	54,60	15,00		15,00	0,00	14,00	0,00	0,00	1,40	0,00

AAM=alkáli aktivált anyag; S=szilikapor (S), folyósító (F); A=aerosil; C-kalcium-sztearát; MK= metakaolin; O-mészhidrát (oltott méz)

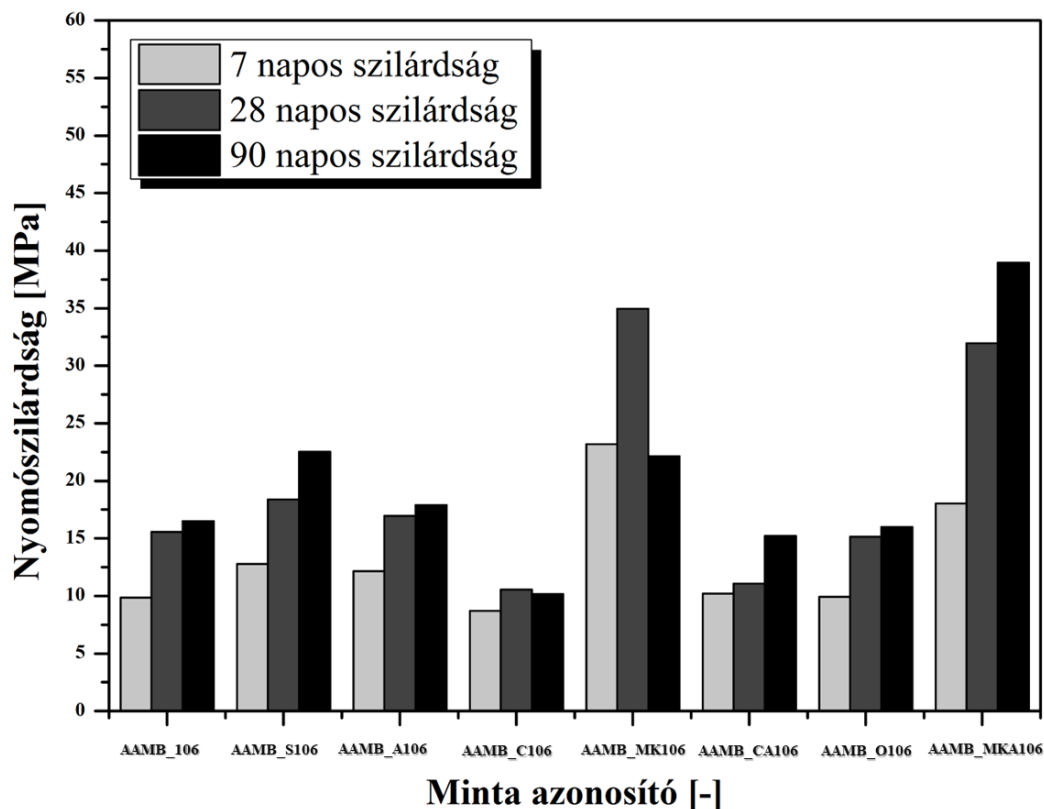
A további vizsgálataimhoz és a szilárdság növelése céljából a betonőrleményt szabványos szítással tovább frakcionáltam manuálisan a kívánt szemcseméret eléréséig, amelyek a következők voltak:  $d_{50} < 0,063$ ,  $d_{50} < 0,106$  mm.

Mivel a 10 M NaOH koncentrációjú oldattal értem el a legbiztosabb eredményeket, ezért az alkáli aktiválás során a 10 M-os töménységet fogom használni.

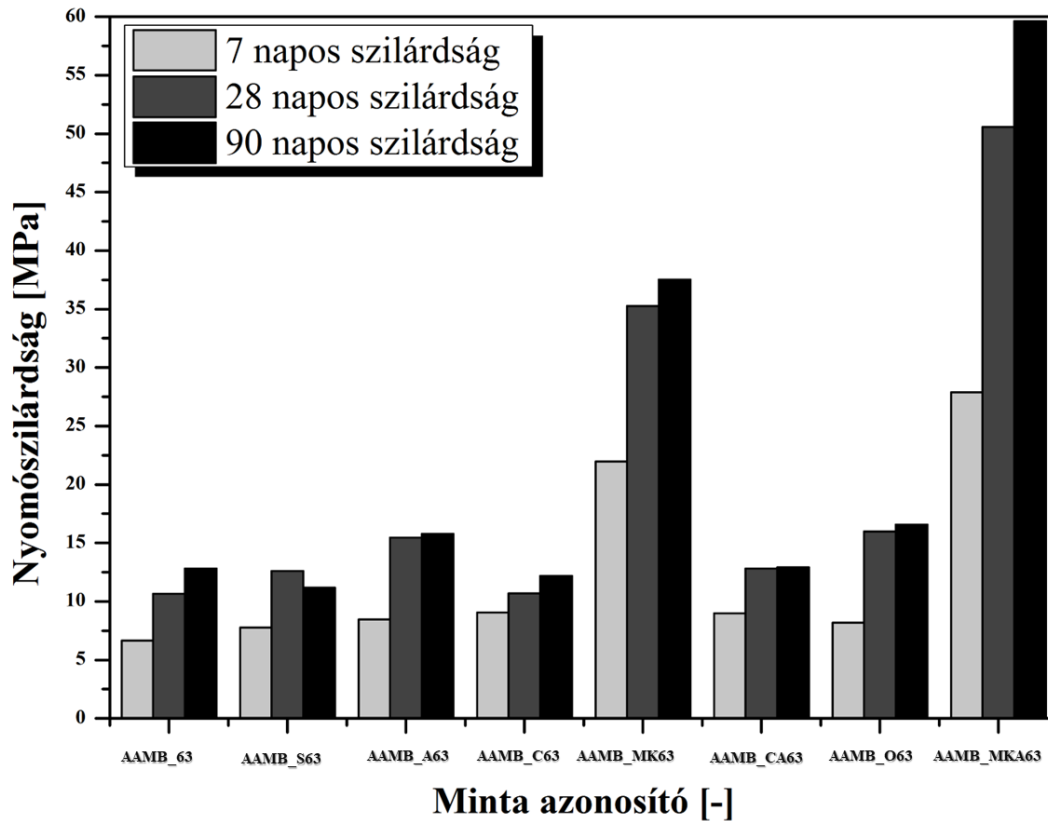
Az alkáli aktiválás előtt a betonőrleményt és a szilárdság növelése céljából hozzáadott kiegészítő prekursor anyagokat *Retsch PM 400*-as típusú golyósmalomban 150-es fordulatszámra 10 percig őröltem egy homogénebb és finomabb szárazanyag-keverék előállításának érdekében. Az alkáli aktiváláshoz NaOH és Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (nátron vízüveg) 50:50 m/m%-os keverékét használtam. A NaOH oldat elkészítéséhez 99,8 % tisztaságú NaOH pelyhet, illetve desztillált vizet használtam fel. Az alkáli aktiváló oldatot minden esetben 30 perccel az AAM készítése előtt készítettem el. A keverékkészítés során a friss pépet sablonba öntést követően vibroasztalon tömörítettem ( $t=30$  s). Szeretném kiemelni, hogy az AAM készítése során plusz folyadékként vizet nem adagoltam a keverékhez, csak az alkáli aktiváló oldatot alkalmaztam

folyadékként. Minden keveréket 24 órán keresztül szilárdítottam. A formabontást követően a mintákat a nyomószilárdság vizsgálatig szobahőmérsékleten érleltem. Az alkáli aktivált anyagok hosszútávú (7, 28 és 90 napos korban) szilárdságának alakulását tanulmányoztam, amely eredmények a **32. ábra** és a **33. ábra** szemlélteti.

Külön diagramon tüntettem fel a 0,106 mm és a 0,063 mm alatti betonőrleményből készült anyagok nyomószilárdságát. Az AAM<sub>B</sub> alkáli aktivált anyagot vettem referencia anyagként, amely prekursor anyagként csak a betonőrleményt tartalmazta. Az alkáli aktivált anyagok előállításánál minden keveréknél ugyan azokat a feltételeket teremtettem meg az összehasonlíthatóság végett. 28 napos korra a minták nyomószilárdsága kivétel nélkül nőtt. Az AAM minták nyomószilárdsága 90 napos korban kismértékben nőtt a 28 napos korhoz viszonyítva. A nyomószilárdságra vonatkozó szórás eredményeket a **MELLÉKLET II. -A kiválasztott másodlagos nyersanyag alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának az optimalizálása** című fejezet **M2. 1.-16 táblázatban** találhatók.



**32. ábra** Az alkáli aktivált anyagok nyomószilárdság vizsgálatának eredményei ( $d_B < 0,106$  mm)



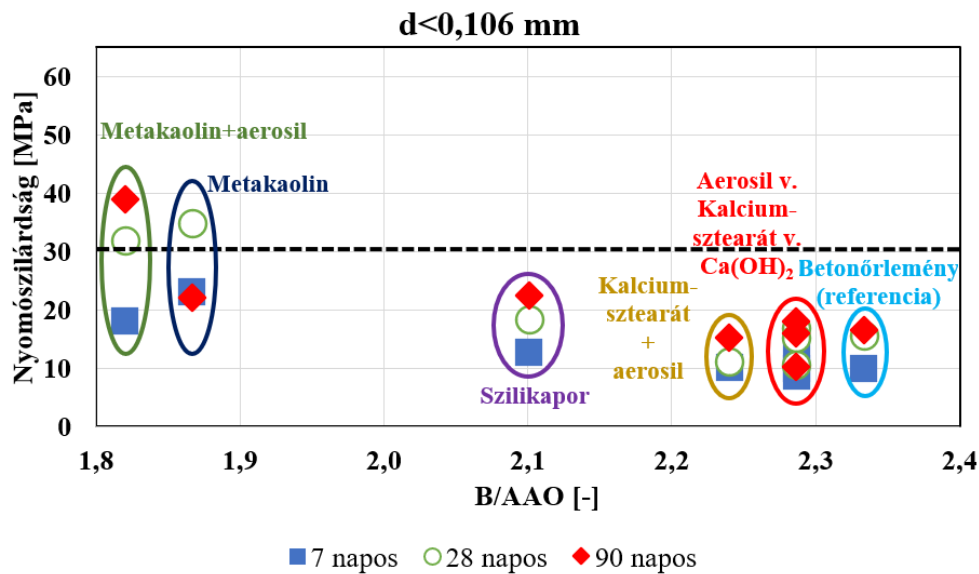
33. ábra Az alkáli aktivált anyagok nyomószilárdság vizsgálatának eredményei ( $d_B < 0,063$  mm)

Egyes keverékeknel (*AAMB\_C106*, *AAMB\_O106*, *AAMB\_S63*) 90 napos korra a nyomószilárdság csökkent, ugyanakkor ez a csökkenés nagyon kismértékű volt mindhárom minta esetében. A nyomószilárdság vizsgálat eredményei alapján a betonórlemény szemcseméretétől függetlenül a keverékhez kiegészítő prekuzorként hozzáadott metakaolin, illetve metakaolin+aerosil együttesével magasabb nyomószilárdság érhető el a többi prekuzor alkalmazásához képest. A referencia anyaghoz (*AAMB\_63*) képest az *AAMB\_MKA63* jelű alkáli aktivált anyag összetétele 14 m/m% metakaolint és 1,4 m/m% aerosilt tartalmazott.

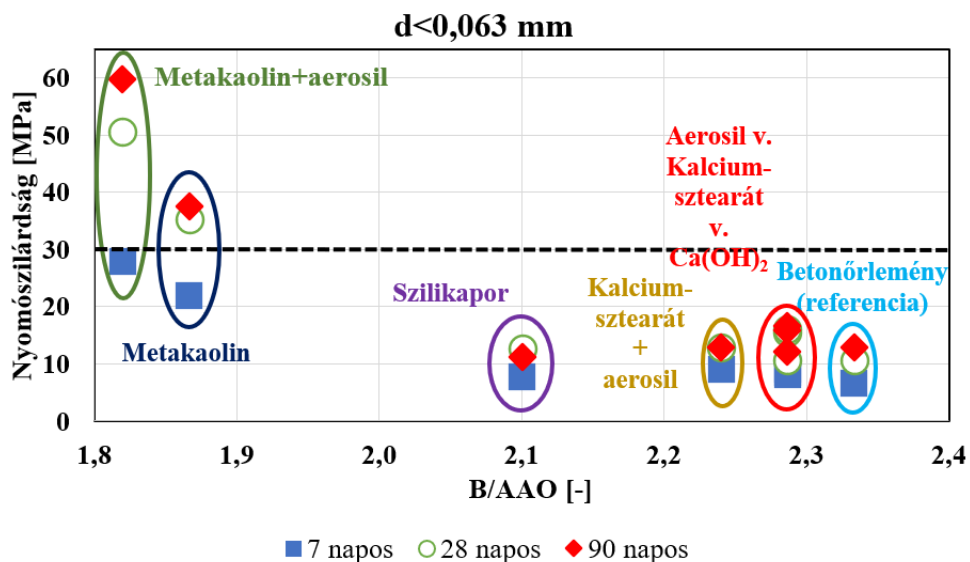
Az alkáli aktiválás során az ilyen jelentős szilárdság növekedés (4,9-szeres növekedés,  $R_{AAMB} = 12,8$  MPa,  $R_{AAMB\_MKA} = 59$  MPa) azt jelzi, hogy a metakaolin és az aerosil aktív komponensei reakcióba léptek az alkáli aktiváló oldattal és a – többi kiegészítő prekuzor hatásához képest – erősebb kötést alakított ki.

A betonórleményhez különböző mennyiségben – esetenként keverékben – adagolt kiegészítő prekuzorok hatásának elemzéséhez definiáltam egy ún. *B/AAO arányt*, amely a betonórlemény/alkáli aktiváló oldat (azaz a folyadék) egymáshoz képesti tömegarányát jelenti. A 34. ábra és a 35. ábra szemlélteti a betonórlemény/alkáli aktiváló oldat nyomószilárdságra gyakorolt hatását. A diagramon külön ábrázoltam a  $d < 0,106$  mm és a  $d < 0,063$  mm szemcseméretű betonórleményből készült AAM minták nyomószilárdsági eredményeit. A

keverékhez a betonórlemény mennyiségét csökkentettem, a redukált mennyiséget pedig egyéb kiegészítő prekursor (*kalcium-sztearát, mészhidrát, szilikapor, metakaolin és aerosil, illetve ezek keverékével*) anyag hozzáadásával, 70:30 szilárd/folyadék arányra állítottam be. Ahhoz, hogy az betonórlemény és az alkáli aktiváló oldat egymásra gyakorolt hatását számszerűsítsem, definiáltam egy úgynevezett B/AAO arányt, amely a betonórlemény/alkáli aktiváló oldat (*azaz a folyadék*) egymáshoz képesti tömegaránya.



34. ábra A B/AAO arány hatása a nyomószilárdságra, ahol a betonórlemény szemcsemérete-eloszlása  $d < 0,106$  mm



35. ábra A B/AAO arány hatása a nyomószilárdságra, ahol a betonórlemény szemcsemérete-eloszlása  $d < 0,063$  mm

A kiegészítő prekursorok és a szemcseméret hatását tekintve a metakaolin+aerosil és a  $d < 0,063$  mm szemcseméretű betonórleményből készült minták esetében látható nagyobb változás, a  $d < 0,106$  mm szemcseméretű betonórleményből készült mintákhoz képest. A B/AAO arányt

csökkentve az AAM minták nyomószilárdsága nőtt. Megfigyelhető, hogy 2,33 B/AAO aránnyal 7 napos korban a nyomószilárdság 6 MPa, amely 90 napos korban 12 MPa volt. Ezzel szemben a legalacsonyabb B/AAO arány (1,82) mellett a minta nyomószilárdsága 7 napos korban 27 MPa volt, míg 90 napos korra 59 MPa nyomószilárdságot mértem a 0,063 mm alatti betonörlemény alkalmazása során.

A **34. ábra** és a **35. ábra** alapján elmondható, hogy a 2,1 B/AAO arány alatt és a szilikapor, kalcium-sztearát, a mészhidrát, a metakaolin, aerosil és ezek keverékének alkalmazása során 20 MPa feletti nyomószilárdság várható, viszont 2,1 B/AAO arány felett 20 MPa alatti nyomószilárdság érhető el.

Kutatómunkám további részében a fent említett  $AAM_{B\_MKA}$  jelű alkáli aktivált anyag összetétellel fogok dolgozni. Megvizsgálom az AAM alkalmazási lehetőségét aszfalt töltőanyagként, és aszfalt kőanyagként.

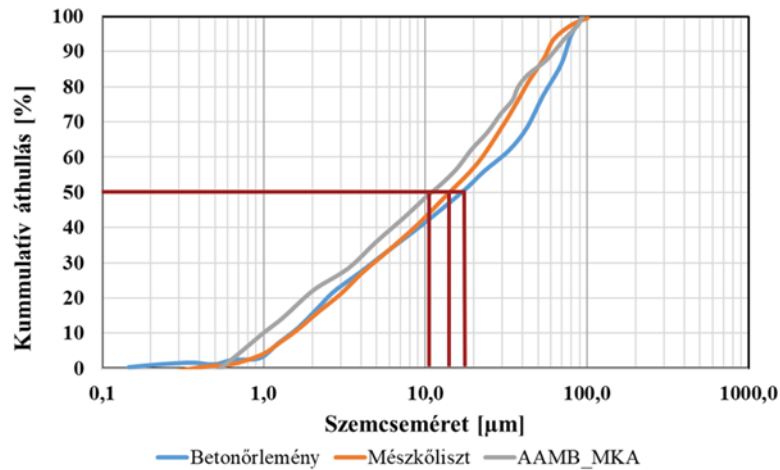
### **3.4 Az alkáli aktivált anyag töltőanyagként történő alkalmazásának lehetősége**

Kutatómunkám egyik célja, hogy a kiválasztott másodlagos nyersanyagot és az alkáli aktivált anyagot aszfalt töltőanyagként vizsgáljam. Ezért az előző kísérletsorozatok során elkészített AAM minták közül a legnagyobb szilárdságú keverékből ( $AAM_{B\_MKA}$ ) bolygóműves golyósmalom segítségével töltőanyag frakciót állítottam elő.

Fontosnak tartom a töltőanyag vizsgálatok elvégzését, hiszen a vizsgálati eredmények által pontosabb információhoz juthatok azoknak aszfaltkeverékekben betöltött viselkedéséről. A betonörlemény ( $B$ ) és  $AAM_{B\_MKA}$  alkáli aktivált anyag mellett referenciaként az aszfaltechnológiában gyakran alkalmazott töltőanyagot, mészkőliszten (*származási hely: Tatabánya*) is elvégeztem vizsgálatokat.

#### **3.4.1 A töltőanyagok szemcseméretének meghatározása**

A töltőanyagok szemcseméret-eloszlásának meghatározását CILAS 715 típusú, nedves eljárású lézeres szemcseméret elemző berendezéssel végeztem el. A **36. ábra** segítségével mutatom be a betonörlemény, a mészkőliszt és az  $AAM_{B\_MKA}$  jelű alkáli aktivált anyag szemcseméret-eloszlás görbéit.

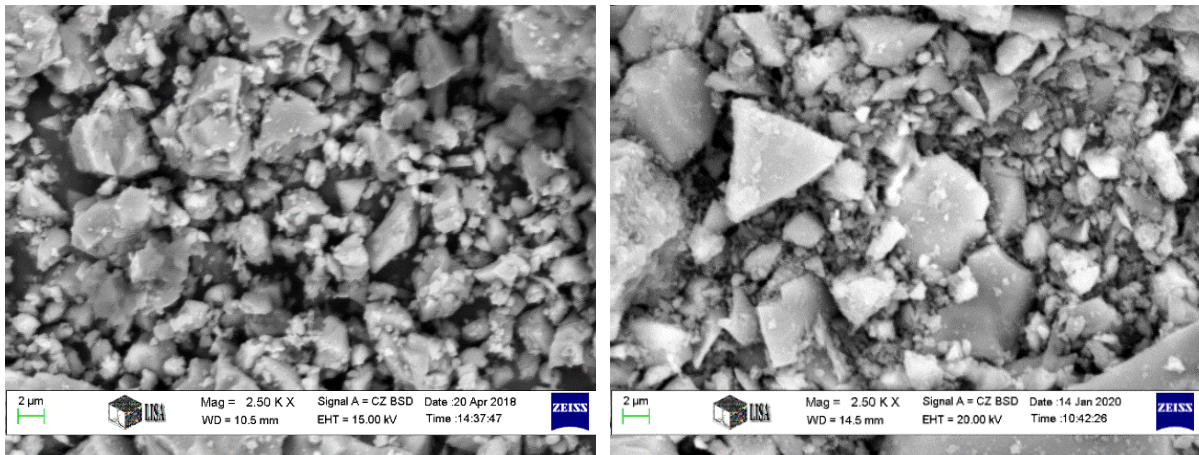


36. ábra A töltőanyagok szemcseméret-eloszlása

Az eredmények alapján elmondható, hogy mind a három töltőanyag finom szemcsemérettel rendelkezik, ugyanis az átlagos szemcseméret minden esetben  $20\ \mu\text{m}$  alatt van. A legfinomabb átlagos szemcsemérettel ( $d_{50} < 11\ \mu\text{m}$ ) az  $AAMB\_MKA$  jelű alkáli aktivált anyag rendelkezik. A mészkőliszt esetében az átlagos szemcseméret ( $d_{50}$ )  $14\ \mu\text{m}$  alatt van. A három töltőanyag közül a betonörlemény rendelkezik a legdurvább szemcsefrakcióval, ugyanis az átlagos szemcsemérete  $d_{50} < 20\ \mu\text{m}$  alatti.

### 3.4.2 A töltőanyagok mikroszerkezetének vizsgálata

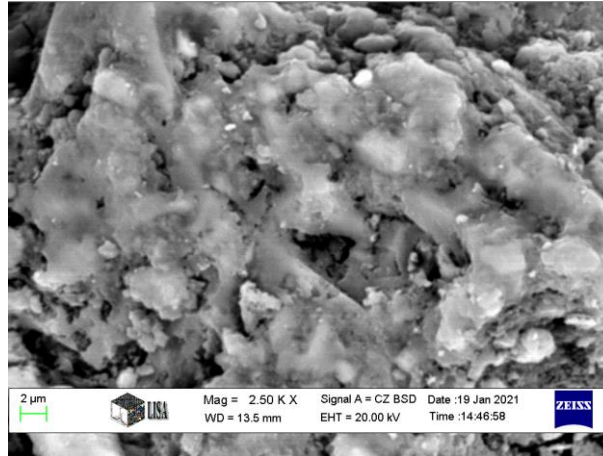
A mészkőliszt, a betonörlemény és az alkáli aktivált anyag ( $AAMB\_MKA$ ) töretfelületét pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam. A SEM felvételek (37. ábra) mindhárom anyag esetében 2500x-es nagyításban készültek.



a) mészkőliszt

b) betonörlemény



c)  $AAM_{B\_MKA}$ 

37. ábra A a) mészkőliszt a b) betonőrlemény és az c)  $AAM_{B\_MKA}$  mikroszerkezetének vizsgálata

A felvételeket elemezve megállapítható, hogy a mészkőliszt és a betonőrlemény hasonló geometriai sajátosságokkal rendelkezik. A szemcsék változatos morfológiával rendelkeznek, éles töretfelületekkel határoltak, amelyek az aprítás-örlés következtében alakultak ki.

A szemcsék felületén pórusok elvétve figyelhetők meg. Aszfalttechnológiai szempontból ez azért fontos, mivel az ilyen jellegű szemcsék növelik az ásványi váz belső súrlódását, ami pedig pozitív hatást gyakorol az aszfaltburkolat teherbíró képességére. A betonőrlemény SEM felvétele alapján elmondható, hogy a nagy mennyiségben jelenlévő finomszemcsék mellett durvább szemcsék is előfordulnak, így a vizsgált frakció polidiszperz rendszerként jellemezhető. A mészkőliszt esetében jellemzően 20-40  $\mu\text{m}$  közötti szemcsék voltak megfigyelhetők.

Az  $AAM_{B\_MKA}$  jelű alkáli aktivált anyag szerkezetében egyidejűleg megfigyelhetők kristályos szemcsék, valamint összefüggő, az AAM anyagok gél szerkezetére jellemző területek is.

### 3.4.3 A töltőanyagok anyagsűrűségének meghatározása

A vizsgálatot piknométeres módszerrel, a [10] szabvány előírásainak megfelelően hajtottam végre.

14. táblázat A mészkőliszt, a betonőrlemény és az  $AAM_{B\_MKA}$  töltőanyagok anyagsűrűsége

Alapanyagok	Anyagsűrűség [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
Mészkőliszt	2,82
Betonőrlemény	2,70
$AAM_{B\_MKA}$	2,29

A sűrűségmérés eredményei azt mutatják, hogy a referenciaanyagként használt mészkőliszt sűrűsége a legnagyobb. A töltőanyagok sűrűségeinek számszerű értékét a későbbiekben bemutatásra kerülő Rigden-féle hézagterfogat meghatározáshoz, valamint keveréktervezéshez használok fel.

#### 3.4.4 A töltőanyagok hézagterfogatának meghatározása

Az aszfaltkeverékekben felhasznált finomszemcsés ásványi töltőanyagokat a bitumennel keverve a bitumennél erősebb kötést biztosító anyaggá, aszfalthabarccsá válik, amelynek az egyik legfontosabb jellemzője az aszfaltkeverékre kifejtett merevítő hatás biztosítása. Emiatt meghatároztam a töltőanyagok szárazon tömörített hézagterfogatát az MSZ EN 1097-4:22008 [121] szabványnak megfelelően, az ún. Rigden-készülékkel.

15. táblázat A vizsgált töltőanyagok szárazon tömörített hézagterfogata

Alapanyag	Hézagterfogat [V/V%]
Mészkőliszt	47,9
Betonórlemény	51,1
AAM <sub>B_MKA</sub>	46,7

A töltőanyagok Rigden-féle hézagterfogata hatással van az aszfaltkeverék kopásállóságára, a deformációval szembeni ellenállásra és a merevítő tulajdonságaira, illetve a bitumen viszkozitására. Értéke függ a töltőanyag szemcseméret-eloszlásától, méretétől, alakjától és sűrűségétől [145]

A Rigden-féle hézagterfogat vizsgálati módszere a töltőanyagok tömöríthetőségének mértékét jellemzi. Minél alacsonyabb a hézagterfogat értéke, a töltőanyagok annál jobban tömöríthetők, ekkor érhető el ugyanis a szemcsék közötti legkisebb ki nem töltött térfogat.

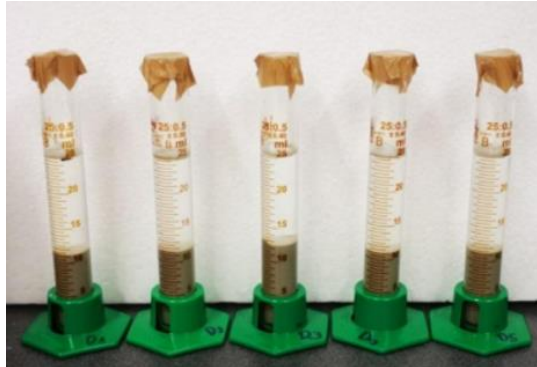
Megállapítható, hogy az AAM<sub>B\_MKA</sub> jelű alkáli aktivált anyag hézagterfogata a legalacsonyabb, azonban ez az érték közeli egyezést mutat a referenciaként használt mészkőliszttel. A hézagterfogat értékek eredményei a szemcseméret-eloszlásra vezethetők vissza. Az AAM<sub>B\_MKA</sub> jelű alkáli aktivált anyag rendelkezik a legkisebb átlagos szemcsemérettel:

$$d_{50}AAM_{B\_MKA}: 11 \mu\text{m} < d_{50}M: 14 \mu\text{m} < d_{50}B: 20 \mu\text{m},$$

ezáltal a szárazon tömörített hézagterfogata kisebb, mivel a finom szemcsék jól kitöltik a durvább szemcsék közötti hézagokat.

### 3.4.5 A töltőanyagok hidrofil/hidrofób tulajdonságainak vizsgálata

A töltőanyagok hidrofil tényezőjének meghatározását minden esetben 5 párhuzamos mérés átlagértékeként határoztam meg (38. ábra).



38. ábra Hidrofil tényező meghatározása

A 16. táblázat tartalmazza a töltőanyagok hidrofil tényezőinek értékét, amely alapján elmondható, hogy az ülepedési térfogatok aránya mindhárom anyag esetében 1-nél kisebb, tehát hidrofób tulajdonsággal rendelkeznek, amely a bitumennel való erős kölcsönhatás kialakítására utal. A szakirodalomban megadott optimális tartományba ( $\eta=0,7-0,85$ ) a vizsgált töltőanyagok közül csak az  $AAM_{B\_MKA}$  esik.

16. táblázat A töltőanyagok hidrofil tényezője

Töltőanyag	Mérőfolyadék	Ülepedési térfogat [cm <sup>3</sup> ]	Hidrofil tényező	Szórás
Mészkőliszt	etanol	6,2	<b>0,57</b>	0,48
	petróleum	10,8		0,35
Betonőrlemény	etanol	11,5	<b>0,96</b>	0,51
	petróleum	12		0,49
$AAM_{B\_MKA}$	etanol	12	<b>0,84</b>	0,57
	petróleum	14,3		0,27

### 3.4.6 A töltőanyagok olajmegkötő képességének vizsgálata

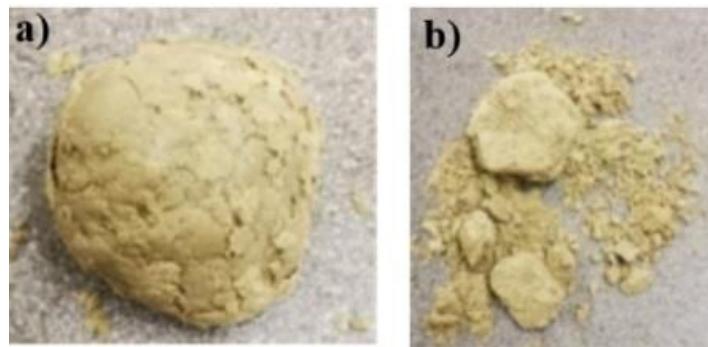
Az ásványi anyagok olajmegkötő képességét az ún. *German Filler Test* segítségével határozhatjuk meg, mely vizsgálat kifejlesztése a német *Koch Materials Company*-hoz kötődik [145]. Habár a vizsgálat nem szabványosított eljárás szerinti mérést tesz lehetővé, ugyanakkor gyakorlati szempontból rendkívül fontosnak tartom annak elvégését. A vizsgálat segítségével feltárható a töltőanyag és a bitumen olajtartalma közötti kohézió mértéke, illetve a szemcsék közötti hézagterfogat mértékére is következtethetünk.

A töltőanyag olajmegkötő képessége függ az ásványi anyag hézagterefogatától, a szemcsék méretétől, szemcseméret-eloszlásától, fajlagos felületétől(39.ábra) [145].

17. táblázat German Filler Test eredményei

Töltőanyag	Olajfelvevő képesség [g]
Mészköliszt	50
Betonőrlemény	25
AAM <sub>B_MKA</sub>	15

A töltőanyag és olaj keverékének kiindulási mennyiségéhez adagolható töltőanyag mennyisége az AAM<sub>B\_MKA</sub> esetén volt a legkisebb, amely csupán 15 gramm extra mennyiséget volt képes megkötni. Ezzel szemben a betonőrlemény 25 g, a mészköliszt pedig ennek kétszeresét volt képes megkötni (39. ábra).



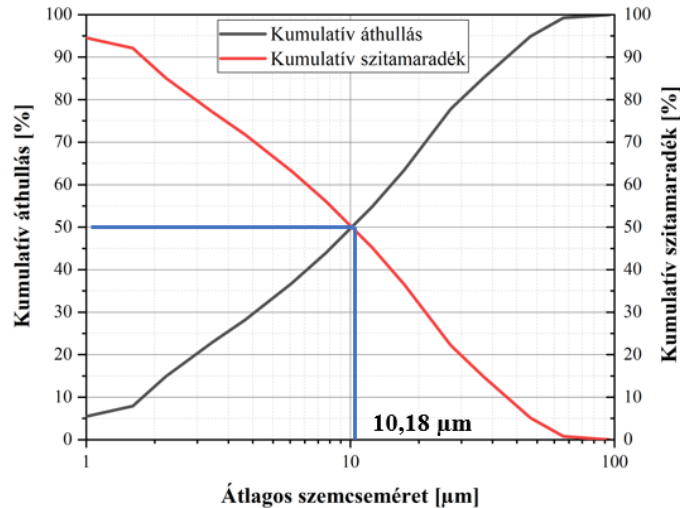
39. ábra a) A betonőrlemény és az olaj közötti megfelelő kohézió b) a betonőrlemény és az olaj közötti kohézió megszűnése

### 3.5 Az alkáli aktivált anyag és prekursorainak (nyersanyagkeverék) vizsgálatai

Ebben a fejezetben mutatom be az alkáli aktivált anyagot, illetve az annak előállításához használt betonőrlemény és kiegészítő prekursorok keverékén elvégzett vizsgálatok eredményeit.

#### 3.5.1 A nyersanyagkeverék szemcseméret-eloszlásának meghatározása

A golyósmalomban történő őrlést követően meghatároztam a B\_MKA jelű nyersanyagkeverék szemcseméret-eloszlását (40. ábra). A vizsgálatot CILAS 715 típusú, nedves eljárású lézeres szemcseméret elemző berendezéssel végeztem el, 1-192 µm méréstartományban. A mérések víz közegben, nátrium-tripolifoszfát diszpergálószer és 1 perces ultrahangos diszpergálás alkalmazásával történtek. Az eredmények 3 mérés átlagértékeiből adódtak.



40. ábra A B\_MKA nyersanyagkeverék szemcseméret eloszlása

A 40.ábra a B\_MKA nyersanyagkeverék szemcseméret-eloszlását szemlélteti, amelyen jól látható, hogy a keverék nagyon finom szemcseméretű. A szemcsék 90%-a ( $d_{90}$ ) 39  $\mu\text{m}$ -nél finomabb szemcsékből áll, míg a szemcsék átlagos szemcsemérete ( $d_{50}$ ) 10,18  $\mu\text{m}$ .

### 3.5.2 A nyersanyagkeverék fajlagos felületének meghatározása

Az alkáli aktiválás során az alapanyag szemcsemérete mellett a fajlagos felület is hatást gyakorol a végtermék tulajdonságaira. Emiatt gázadszorpciós módszerrel meghatároztam a nyersanyagkeverék BET-féle fajlagos felületét (18. táblázat). A szemcsék porozitása, a pórusok mérete és eloszlása, valamint a felületükön lévő repedések növelik az anyag fajlagos felületét, ezáltal befolyásolják az alkáli aktiválás folyamatát.

18. táblázat A B\_MKA nyersanyagkeverék fajlagos felülete és átlagos pórusmérete

Anyagtulajdonság	Mértékegység	B_MKA nyersanyagkeverék
BET, fajlagos felület, SSA	$\text{m}^2/\text{g}$	6,27
B–J–H <sub>deszorpciós</sub> átlagos pórusméret	nm	18,81

A B\_MKA keverék gázadszorpciós vizsgálatának eredményei alapján a BET-féle fajlagos felület értéke 6,27  $\text{m}^2/\text{g}$ , ami – a mészkőliszt fajlagos felületéhez képest – viszonylag nagy fajlagos felületet jelent. A korábbi vizsgálati eredményeim alapján önmagában a betonőrlemény BET-féle fajlagos felülete 1,60  $\text{m}^2/\text{g}$ . Mivel a nyersanyagkeverék betonőrleményen kívül metakaolint és aerosilt is tartalmaz, ezért arra a következtetésre jutottam, hogy ez a két alapanyag növelte meg a keverék fajlagos felületének értékét.

### 3.5.3 A nyersanyagkeverék kémiai összetételének meghatározása

A nyersanyagkeveréket alkotó betonőrlemény, valamint a metakaolin kémiai összetételét XRF vizsgálattal határoztam meg. Megjegyzendő, hogy az aerosil kis sűrűsége miatt ezzel a módszerrel önmagában nem vizsgálható meg, ugyanakkor biztonsági adatlapja [146] alapján 100 m/m% SiO<sub>2</sub> tartalmú. A vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy az alkáli aktiválás szempontjából összes (*aktív és nem aktív*) SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mennyisége a B\_MKA nyersanyagkeverék esetén 83,2 m/m%

19. táblázat Az alapanyagok és a nyersanyagkeverék kémiai összetétele

Kémiai összetétel [m/m%]	Betonőrlemény	Metakaolin	B_MKA nyersanyagkeverék
SiO <sub>2</sub>	75,30	65,10	72,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,40	29,80	10,80
MgO	0,60	0,18	0,51
CaO	13,40	0,14	11,97
Na <sub>2</sub> O	0,35	0,09	0,32
K <sub>2</sub> O	0,67	1,30	0,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	1,40	1,42
MnO	0,027	0,006	0,025
TiO <sub>2</sub>	0,101	0,711	0,218
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,037	0,080	0,052
SO <sub>3</sub>	0,64	0,99	0,85
Izzítási veszteség	4,20	0	0
Összesen	100	99,8	99,80

A nyersanyag keverék oxidos összetétele alapján kiszámoltam a AAM<sub>B\_MKA</sub> jelű anyag főkomponenseinek molarányait, figyelembe véve az alkáli aktiváló oldat komponenseit is, amelynek eredménye a **20.táblázatban** szerepel.

20. táblázat Az alkáli aktivált anyag (AAM<sub>B\_MKA</sub>) főkomponens molarányai

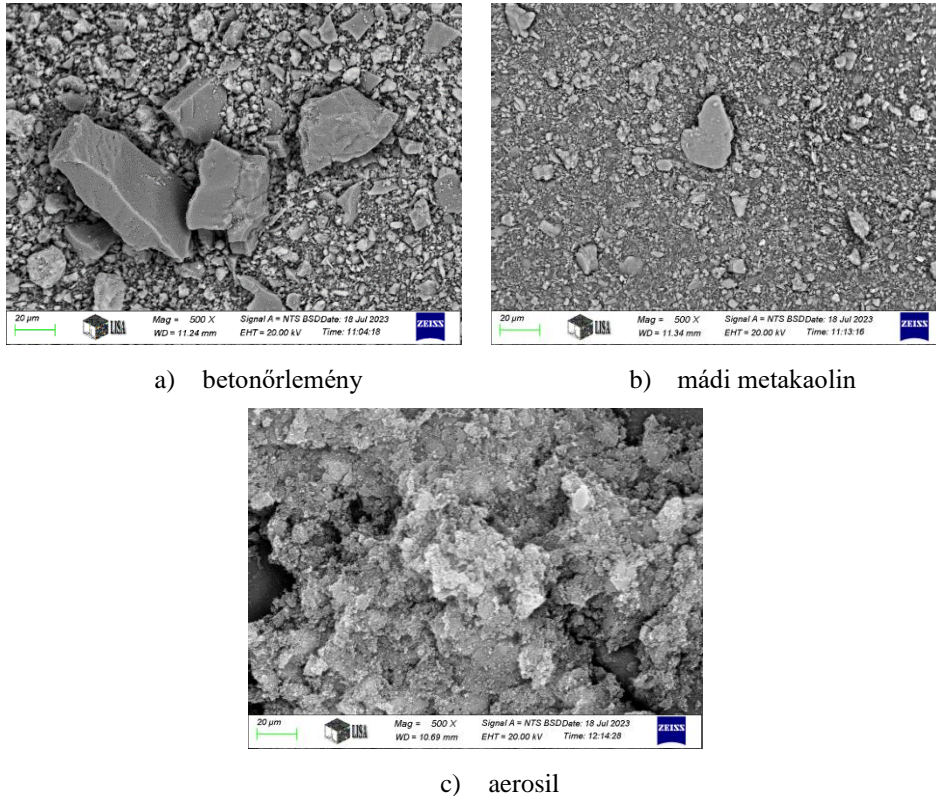
FŐKOMPONENS MÓLARÁNYOK				
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,24	30,14	0,15	8,88	7,33

A **20. táblázatban** zölddel jelöltem a szakirodalomban megadott tartományokba eső molarányokat, pirossal a tartomány feletti, kézzel pedig a tartomány alatti molarányokat. A szakirodalmi adatokhoz képest (**2.táblázat**) lényeges pozitív irányú eltérés a SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molarányánál figyelhető meg, amely során az AAM<sub>B\_MKA</sub> jelű alkáli aktivált anyag SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molaránya 30,14. Szakirodalmi adat támasztja alá, hogy ha a SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molaránya nagyobb, mint 20, akkor az alkáli aktivált anyag alkalmazási területét tekintve a tűz- és hőálló anyagok csoportjába sorolható [147]. Számomra ez egy pozitív eredmény, hiszen ezek alapján az előállított alkáli aktivált anyagot az aszfaltkeverék készítése során a bitumen olvadási pontjának

megfelelő hőmérsékleten elő lehet melegíteni, anélkül, hogy az anyag szerkezetében káros változások mennének végbe. A kék háttérű, tartományon alatti  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  arány nagy mértékben függ a prekursor anyagoktól és az alkáli aktiválás során kialakult AAM tulajdonságaitól. A  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  arány növelésével a C-A-S-H gélek száma növelhető az aluminoszilikát gélben.

### 3.5.4 A nyersanyagkeverék mikroszerkezetének vizsgálata

A betonőrleményt és a kiegészítő prekursorokat pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam meg (41. ábra). A felvételek 500x-szoros nagyításban készültek a mintákról.

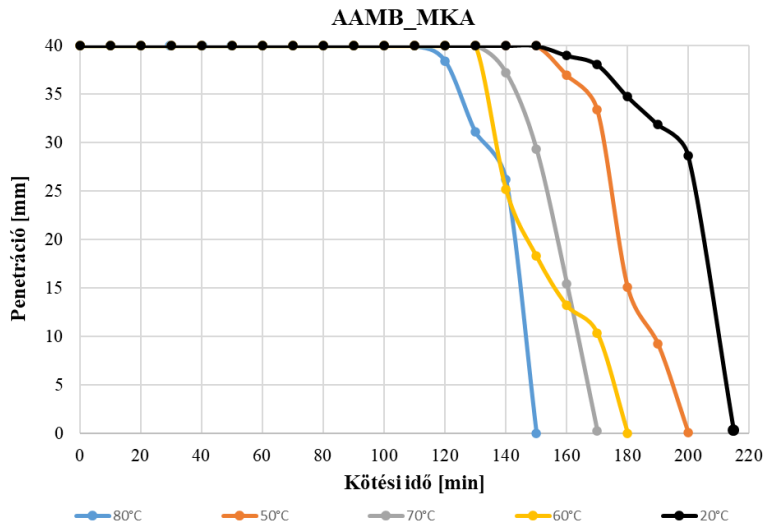


41. ábra A nyersanyagokról készült SEM felvételek

A felvételeken (41. ábra) látható, hogy a betonőrlemény szemcséinek alakja változatos. A vizsgált területen a betonőrleményt kisebb ( $0,002\text{ mm}$ ) és nagyobb ( $0,060\text{ mm}$ ) szemcsék építik fel. A betonőrlemény és a metakaolin mikroszerkezete nagyon hasonló. Az aerosil esetében a szemcsék agglomerálódása figyelhető meg.

### 3.6 Az alkáli aktivált anyag ( $\text{AAM}_{B\_MKA}$ ) Vicat-féle kötési idejének meghatározása

A Vicat-féle vizsgálat elsősorban cementpépek kötési idejének vizsgálatára alkalmas módszer, amelyet az MSZ EN 1963:2017 [148] szabványnak megfelelően hajtottam végre. Az alkáli aktivált pép kötési idejét szobahőmérsékleten, illetve  $50\text{ }^\circ\text{C}$ -on,  $60\text{ }^\circ\text{C}$ -on,  $70\text{ }^\circ\text{C}$ -on és  $80\text{ }^\circ\text{C}$ -on határoztam meg (42. ábra).

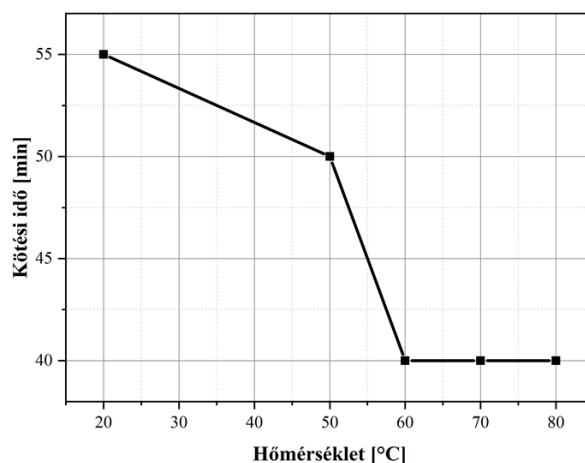


42. ábra Vicat-féle kötés idő meghatározása különböző hőmérsékleteken

A 42. ábra alapján megfigyelhető, hogy 80 °C-on 110 percnél, 70 °C esetében 130 percnél, 60 °C-on 120 percnél, 50 °C-on 150 percnél, míg szobahőmérsékleten 160 percnél kezdődött el a kötés.

A 43. ábra tényleges kötés idő eredményeit tüntettem fel, amelyeket a kötés vége, illetve a kötés kezdeti értékeinek a különbsége adott meg. Az eredmények jól szemléltetik, hogy az érlelési hőmérséklet jelentősen befolyásolja az alkáli aktivált anyag tényleges kötés idejét. A vizsgálati eredményekből látszik, hogy szobahőmérsékleten a pép nagyon lassan szilárdult meg: a tényleges kötés (azaz a kötés idő kezdete – kötés idő vége) ideje 55 perc volt.

Egyértelműen látható a görbén, hogy a hőmérséklet növelésével a kötés idő kezdete a korábbi időpontok felé tolódik, emellett az aktivált anyag tényleges kötés ideje is csökkent, ami azzal magyarázható, hogy hő jelenlétében a polimerizációs reakció felgyorsul.



43. ábra Az alkáli aktivált anyag tényleges kötés ideje különböző érlelési hőmérsékleten



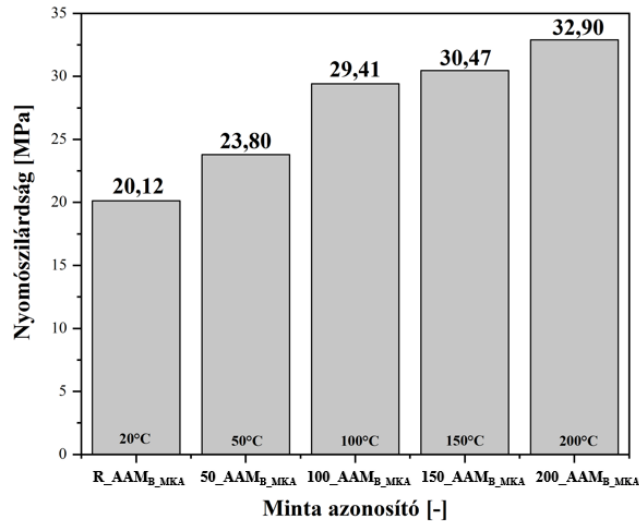
A 60 °C-on, 70 °C-on és 80 °C-on elvégzett vizsgálat eredményei ugyanakkor azt tükrözik, hogy az anyag tényleges kötési ideje érdemben már nem csökkent, mind a három hőmérsékleten meghatározott tényleges kötési idő 40 perc volt.

A fenti eredmények tükrében kijelenthető, hogy a  $AAM_B$  jelű alkáli aktivált anyag tényleges kötési ideje szobahőmérsékleten 55 perc, amely az érlelési hőmérséklet növelésével csökkenthető. Az érlelési hőmérséklet növelése 60°C-ra emelése optimálisnak tekinthető, ekkor a tényleges kötési idő 40 percre csökken. A hőmérséklet további növelése a kötési időt nem befolyásolja.

### 3.7 Az alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) hőkezelése

Az aszfaltkeverékekben felhasznált kőzeteket felhasználás előtt – a keverőberendezés-konstruktív kialakításától függően – a szárító/keverődobban 180-200 °C-os hőmérsékleten szárítják és előmelegítik. Az  $AAM_{B\_MKA}$  alkáli aktivált anyag potenciálisan az aszfaltkeverékek kőanyaga lehet, ezért a hő hatására végbemenő változások vizsgálata mindenképpen indokolt. A minták előkészítése a megszokott módon történt: azokat az előre őrölt (10 percen keresztül, percenkénti 150-es fordulatszám)  $B\_MKA$  száraz anyag keverékből állítottam elő. Az elkészített alkáli aktivált anyagot 7 napos korrig zárt térben érleltem, majd 50 °C, 100 °C, 150 °C és 200°C-ra előmelegített szárítószekrényben 30 percen keresztül hőkezelttem. Ezt követően meghatároztam a termék tömegcsökkenését, száradási zsugorodását és testsűrűségét. Ezek mellett azt is figyelemmel kísértem, hogy a hőmérséklet növelése milyen hatást fejt ki a mesterséges kőanyag nyomószilárdságára, valamint az alkáli aktiválás során végbemenő folyamatokra (DTA, SEM, FT-IR, XRD, porozitás).

A **MELLÉKLET III.-Az alkáli aktivált anyag vizsgálata, mesterséges kőanyag előállítása** című fejezetben az **M3.-1.táblázat** mutatja meg a hőkezelés hatására az alkáli aktivált anyagban végbemenő tömegcsökkenés, a száradási zsugorodás, a tömegcsökkenés és száradási zsugorodás, valamint a testsűrűség változásait. A **44.ábra** szemlélteti az alkáli aktivált anyag hőmérséklet hatására történő nyomószilárdság változásait.

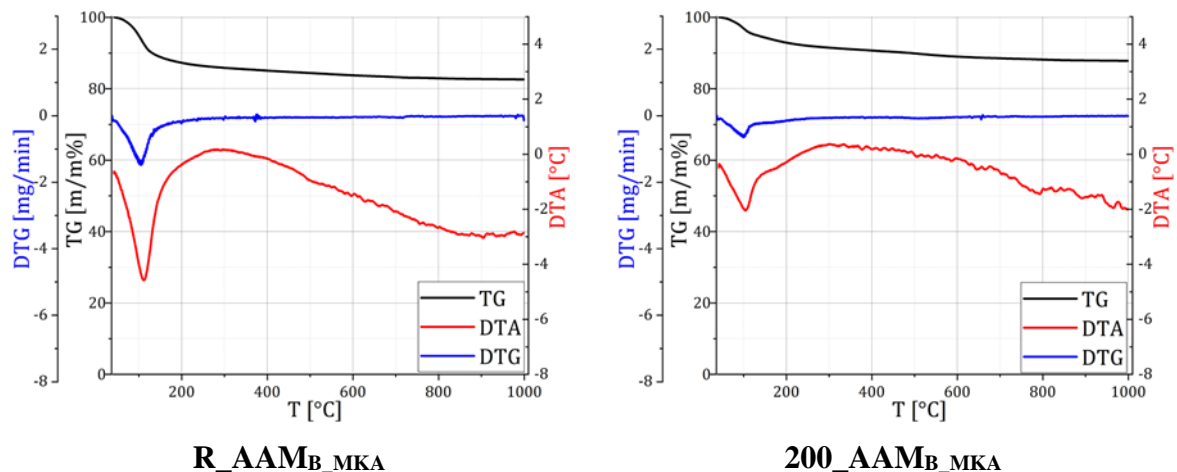


44. ábra A hőmérséklet hatása az AAMB\_MKA jelű alkáli aktivált anyag nyomószilárdságára 7 napos korban

A vizsgálatot a termék 7 napos korában végeztem el, miszerint egyértelműen kijelenthető, hogy az AAM nyomószilárdsága a hőmérséklet emelésével nőtt. Mivel a nyomószilárdság növekedését az eddig elvégzett vizsgálatokkal egyértelműen alátámasztani még nem lehet, ezért további vizsgálati módszereket alkalmaztam a jelenség feltárása érdekében.

### 3.7.1 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAMB_{MKA}$ ) termoanalitikai vizsgálata

A hőkezelt követően a mintákat differenciális termoanalitikai (DTA) vizsgálatnak vettem alá annak érdekében, hogy megfigyeljem az alkáli aktivált anyag hevítés hatására bekövetkező fizikai és kémiai tulajdonságait. A 45. ábra a referencia minta ( $AAMB_{MKA}$ ) és a 200 °C-on hőkezelt alkáli aktivált anyag DTA eredményeit tüntettem fel. A *MELLÉKLET III.-Az alkáli aktivált anyag vizsgálata, mesterséges kőanyag előállítása* című fejezet M3-1.ábrán bemutatom az összes hőkezelt minta vizsgálati eredményeit.



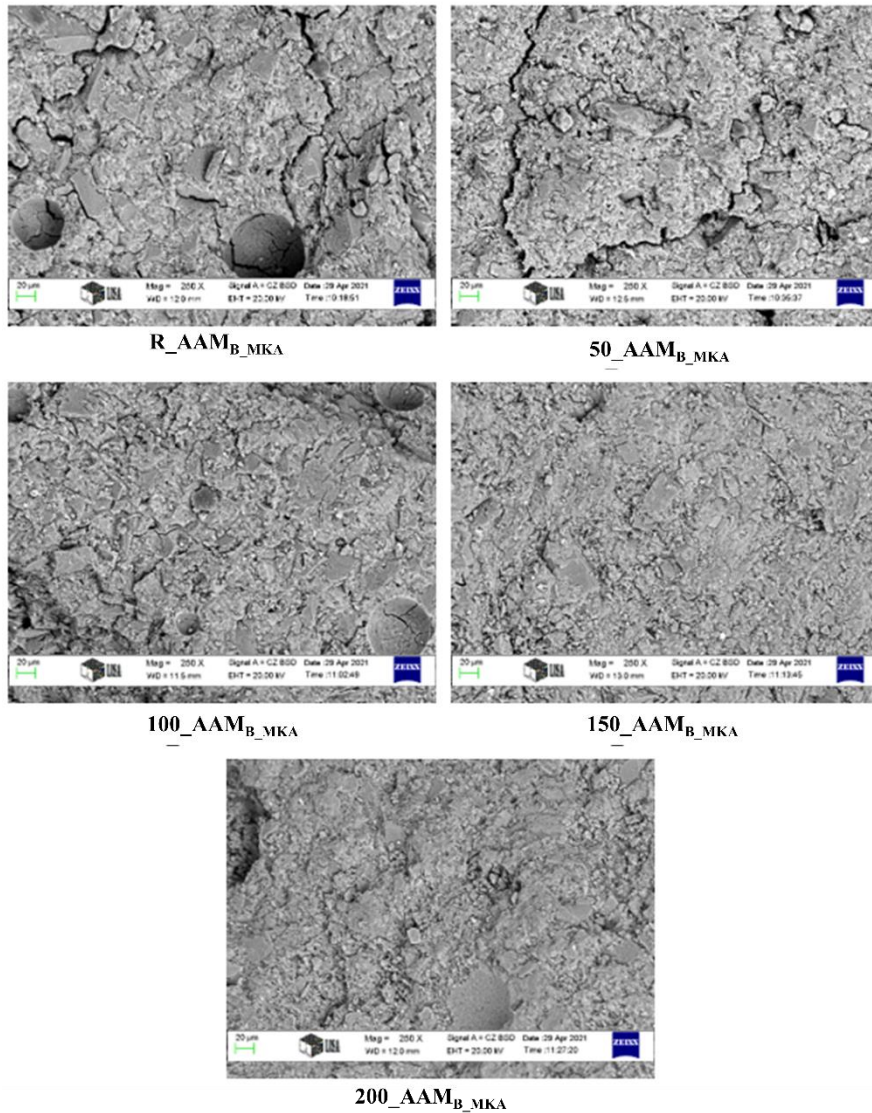
45. ábra A hőkezelt alkáli aktivált anyag termoanalitikai mérési eredményei

DTA vizsgálatok során rögzített görbék mind az öt esetben hasonló jellegűek voltak, nem figyelhetők meg kiugró különbségek a hőkezelés hatására az alkáli aktivált anyagok esetében. A hőmérséklet hatására bekövetkező tömegváltozás a 200 °C-on hőkezelt alkáli aktivált anyag esetében volt a legkisebb, hiszen ebben az esetben már csak minimális folyadékot tartalmazott az anyag. Mind az öt minta esetében a DTA analízis során a minta hevítésének hatására egy endoterm csúcs jelent meg. A referencia minta DTA görbájén található endoterm csúcs minimuma 111,8 °C-nál található, és 7,45 %-os tömegcsökkenés játszódott le. A 200 °C-on hőkezelt alkáli aktivált anyag DTA görbájén az endoterm csúcs 106,5°C-nál jelent meg, míg a tömegcsökkenés ez esetben csak 3,58 % volt. Az endoterm folyamat során hőelnyelés történik, amely a referencia minta esetén 281,3 °C-on fejeződött be, míg a 200 °C-on hőkezelt alkáli aktivált anyag esetében 301,9 °C-ig tartott. Az endoterm csúcs után mindkét anyagnál egy nagyon lassú tömegcsökkenés ment végbe. A referencia minta 998 °C mért tömegcsökkenése 12,4 % volt, míg a 200\_AAM<sub>B</sub>\_MKA jelű alkáli aktivált anyag 998 °C-ig 7,6 %-os tömegcsökkenést mutatott. A referencia minta hőkezelésén nem esett át, így a szerkezetében található alkáli aktivált oldat mennyiségéből adódhat a nagyobb tömegcsökkenés.

### 3.7.2 A hőkezelt alkáli aktivált anyag (AAM<sub>B</sub>\_MKA) mikroszerkezetének vizsgálata

A hőkezelt alkáli aktivált anyagokon SEM és EDS vizsgálatokat végeztem el annak érdekében, hogy feltárjam az alkáli aktiválást követő hőkezelés mikroszerkezetre gyakorolt hatását és magyarázatot találhassak a hőkezelés hatására bekövetkező szilárdság növekedésére.

A 46. ábra a hőkezelt alkáli aktivált anyagok SEM felvételeit mutatja be. Elmondható, hogy a hőmérséklet növelésével a szilárd alumínium-szilikátok alkáli oldatban történő oldódását a hőkezelés elősegítette, ezáltal a hőmérséklet emelésével egyre sűrűbb, tömörebb szerkezet volt megfigyelhető. A növekvő hőmérséklet a polimerizációs reakciót felgyorsította, az oldott Al és Si közötti polimerizáció eredményeként kialakult az AAM-re jellemző gélfázis. A 200 °C hőmérsékleten hőkezelt kőanyag esetében jóval tömörebb szerkezet figyelhető meg a többi mintához képest, emellett sokkal több az oldott szemcsék aránya.

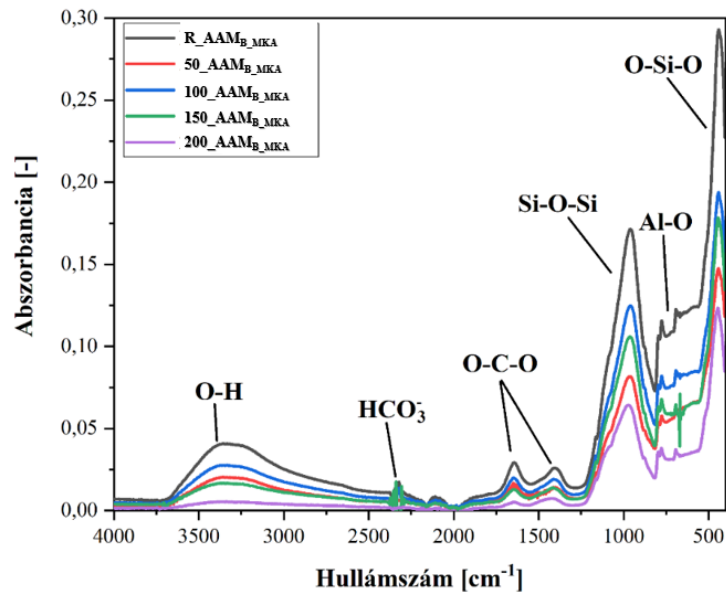


46. ábra A hőkezelt alkáli aktivált anyagokról készült SEM felvételek 250x-es nagyításban

### 3.7.3 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) kémiai kötéseinek vizsgálata

A különböző hőmérsékleteken hőkezelt AAM-eket közvetlenül a hőkezelés után Fourier transzformációs infravörös spektrométer segítségével vizsgáltam meg, annak érdekében, hogy nyomon kövessem a kémiai reakciók alakulását. A **47. ábra** szemlélteti, hogy mind az öt minta esetében azonos kémiai kötések alakultak ki, változó intenzitás mellett. A csúcshintenzitások a hőkezelési hőmérséklet emelkedésével csökkentek.

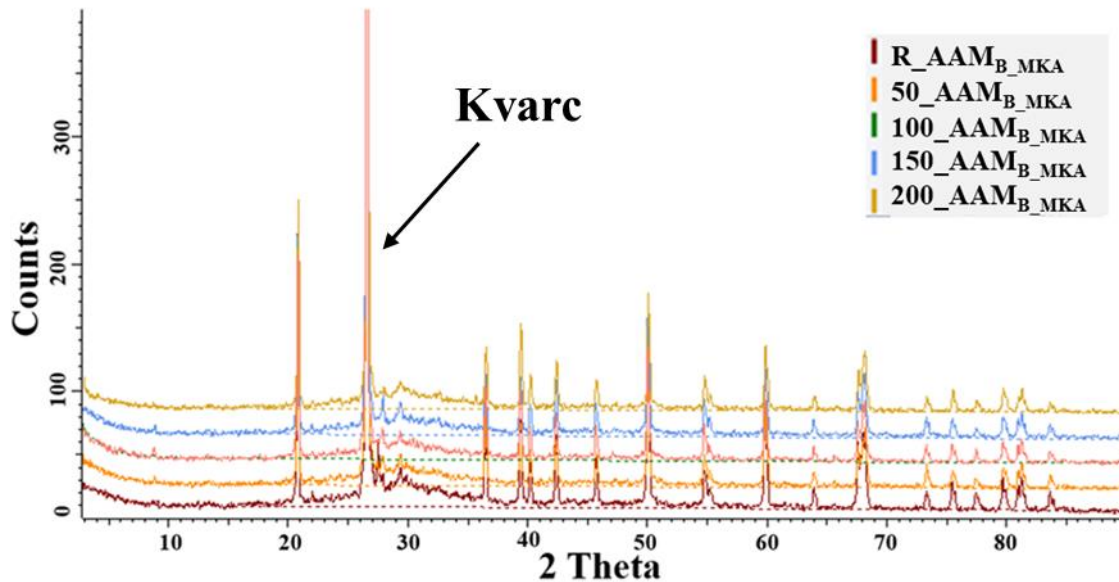
A  $3700-2650\text{ cm}^{-1}$  közötti széles csúcsok az O-H kötések (*kötött víz*) jelenlétére utalnak. A  $2000-1300\text{ cm}^{-1}$  közötti hullámszám tartományban karbonátosodási folyamatra jellemző kötések detektáltak. A polimerizációs szintézis lejátszódásáért a  $1000-400\text{ cm}^{-1}$  hullámszám körüli csúcsok felelősek. A FT-IR vizsgálat eredményei összességében nem adnak magyarázatot arra, miért növekedett az AAM-ek szilárdsága hőkezelés hatására.



47. ábra Különböző hőmérsékleteken hőkezelt  $AAM_{B\_MKA}$ -ek FT-IR spektrumai

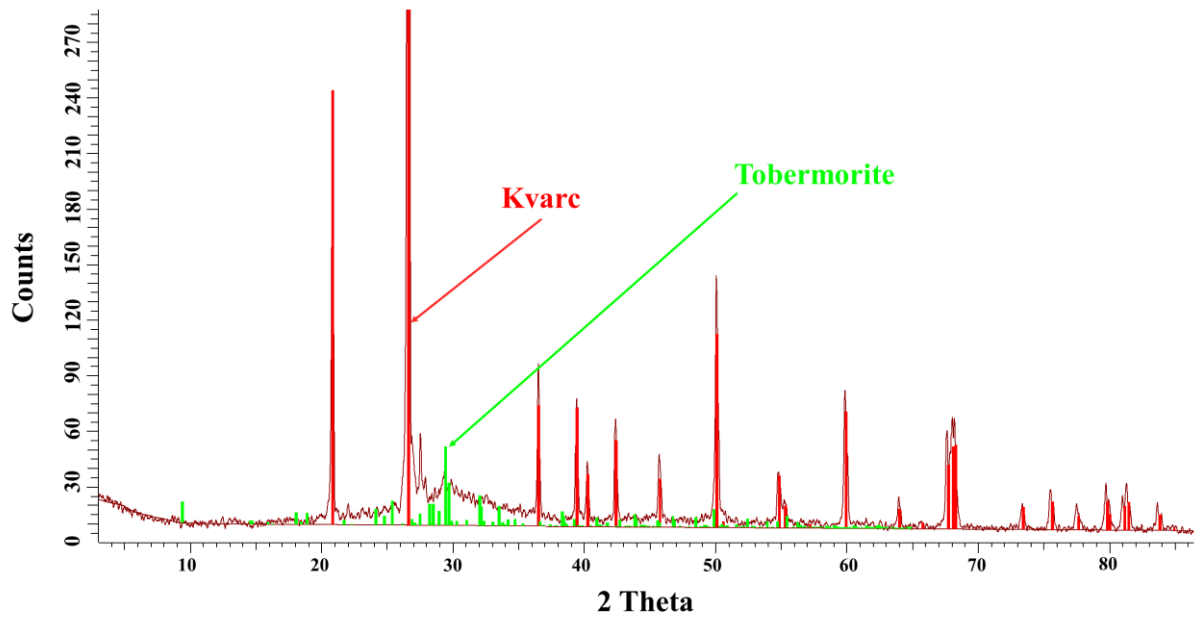
### 3.7.4 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) ásványi összetételének meghatározása

A hőkezelt alkáli aktivált anyag ásványi összetételét röntgen pordiffrakció (XRD) segítségével határoztam meg, amelynek eredményeit a 48. ábra szemlélteti.



48. ábra Különböző hőmérsékleteken hőkezelt  $AAM_{B\_MKA}$ -ok röntgenspektrumai

Az XRD elemzés eredményeként az alkáli aktivált anyagok ásványi összetételében a hőkezelés hatására nem alakultak ki olyan fázisok, amelyek alapján különbséget lehetne tenni a minták között. A hőkezelt alkáli aktivált anyagok esetében a görbék (48. ábra) teljesen azonos jellegűek, minden esetben ugyanazok a csúcsok voltak azonosíthatóak.

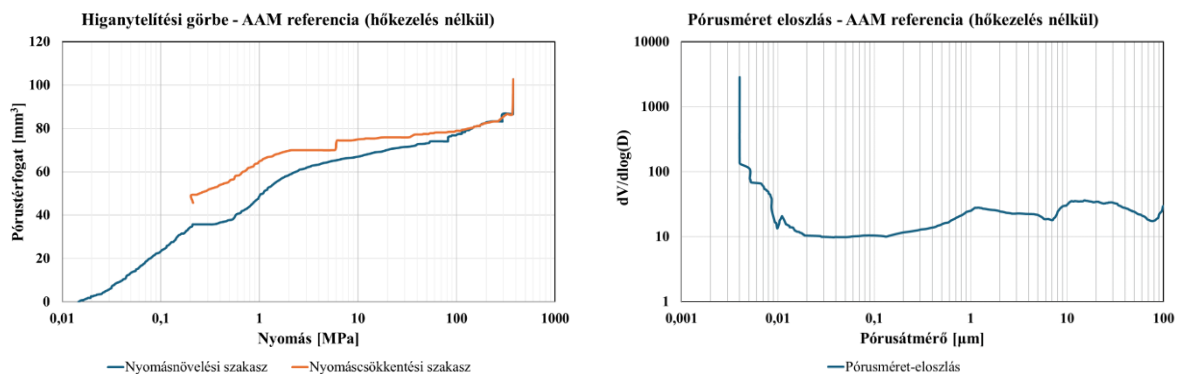


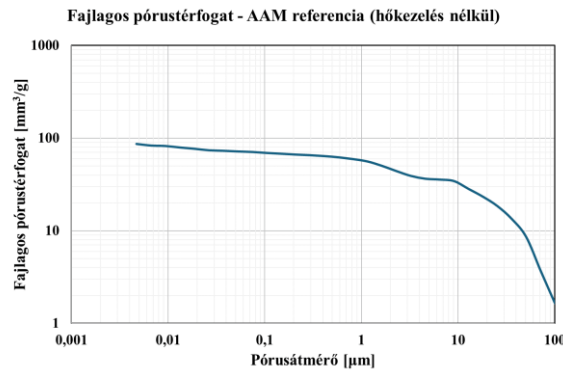
49. ábra AZ R\_AAMB\_MKA röntgenspektruma

A 49. ábra alapján elmondható, hogy a hőkezelt AAMB\_MKA anyagok esetében nagy mennyiségű kvarcot detektáltam, amelyet a piros színű görbe jelöl. A zöld színnel jelölt görbe kis mennyiségben jelenlévő tobermorit vegyületre utal.

### 3.7.5 A hőkezelt alkáli aktivált anyag (AAMB\_MKA) pórusszerkezetének meghatározása higany-porozimetriás technikával

A hőkezelésnek alávetett minták pórusszerkezetét vizsgálatam, amely során rögzítettem a higanytelítési görbét, a mérési eredményekből pedig meghatároztam a pórusméret-eloszlást és a fajlagos pórustérfogatot, amelyet a hőkezelés nélküli (*referenciának tekintett*) AAM példáján mutatok be (50. ábra). A hőkezelt alkáli aktivált anyagok 50 °C-on, 100 °C-on, 150 °C-on és 200 °C-on meghatározott higany-porozimetriás vizsgálati eredményeit a **MELLÉKLET III.- Az alkáli aktivált anyag vizsgálata, mesterséges kőanyag előállítása** (M3.-2. ábra - M3.-6. ábra) című fejezetben található.





**50. ábra** A referencia (*hőkezelés nélküli*)  $R_{AAM_B\_MKA}$  minta higany-porozimetriás vizsgálatának eredményei

A higanytelítési diagram alapján elmondható, hogy a kialakult hiszterézis görbe távolsága kicsi, amely szerint a  $R_{AAM_B\_MKA}$  jelű alkáli aktivált anyag szerkezetében kevés pórus található. A pórusméret-eloszlás alapján megállapítható, hogy az alkáli aktivált anyag többmódusú pórusméret-eloszlással rendelkezik. A nyomáscsökkentési szakasz végén közel azonos térfogatú higany maradt vissza a nyílt pórusokban, amely arra utal, hogy a minták össz-pórustérfogatát a vizsgált pórusméret-tartományban (*mezopórusok+makropórusok*) a hőkezelés érdemben nem változtatta meg.

### 3.7.6 A hőkezelt alkáli aktivált anyag ( $AAM_{B\_MKA}$ ) gázadszorpciós vizsgálatának eredményei

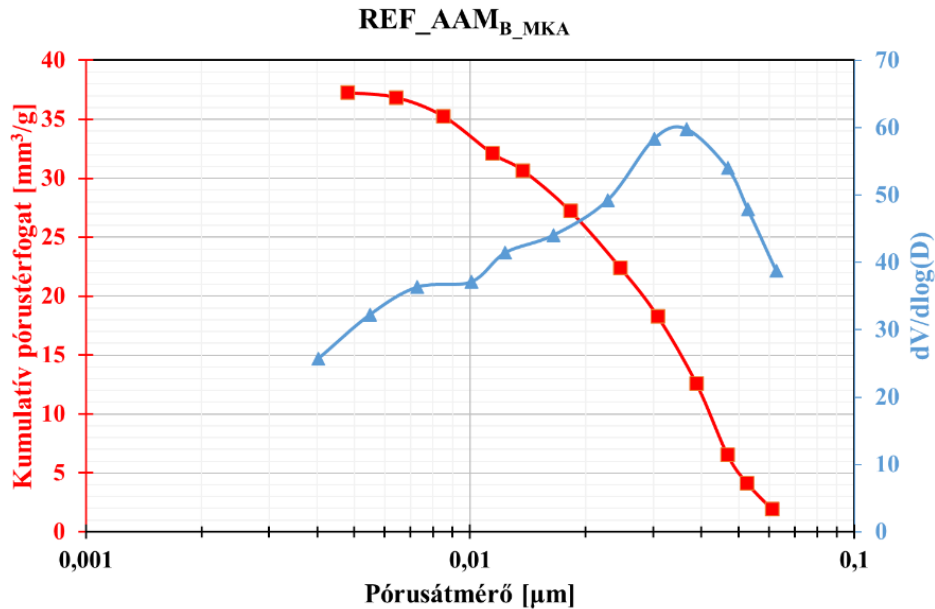
Gázadszorpciós vizsgálattal meghatároztam a hőkezelt alkáli aktivált anyagok fajlagos felületét, illetve pórusméret-eloszlását a mikropórus tartományban. A **21. táblázatban** szerepelnek a hőkezelt alkáli aktivált anyag fajlagos felülete, B–J–H-féle pórusméret-eloszlása (*kumulatív pórustérfogat*), illetve tartalmazza az alkáli aktivált anyagok hőkezelés után mért nyomószilárdságainak értékét is.

**21. táblázat** A hőkezelt alkáli aktivált anyag BET fajlagos felülete, B–J–H-féle pórusméret-eloszlása és a nyomószilárdsága

Anyagjellemző	$R_{AAM_B\_MKA}$	$50_{AAM_B\_MKA}$	$100_{AAM_B\_MKA}$	$150_{AAM_B\_MKA}$	$200_{AAM_B\_MKA}$
BET fajlagos felület [m <sup>2</sup> /g]	6,27	4,93	4,76	5,17	4,06
B–J–H-féle kumulatív pórustérfogat [mm <sup>3</sup> /g]	37,30	25,46	30,06	23,95	23,73
Nyomószilárdság [MPa]	20,12	23,80	29,41	30,47	32,90

A **MELLÉKLET III.-Az alkáli aktivált anyag vizsgálata, mesterséges kőanyag előállítása** fejezetben **M3.-7. ábrán** szerepelnek hőkezelt alkáli aktivált anyagok pórusméret eloszlásai

(50°C-on, 100°C-on, 150°C-on és 200°C-on). Az **51. ábrán** mutatom be az alkáli aktivált referencia minta pórusméret eloszlását.

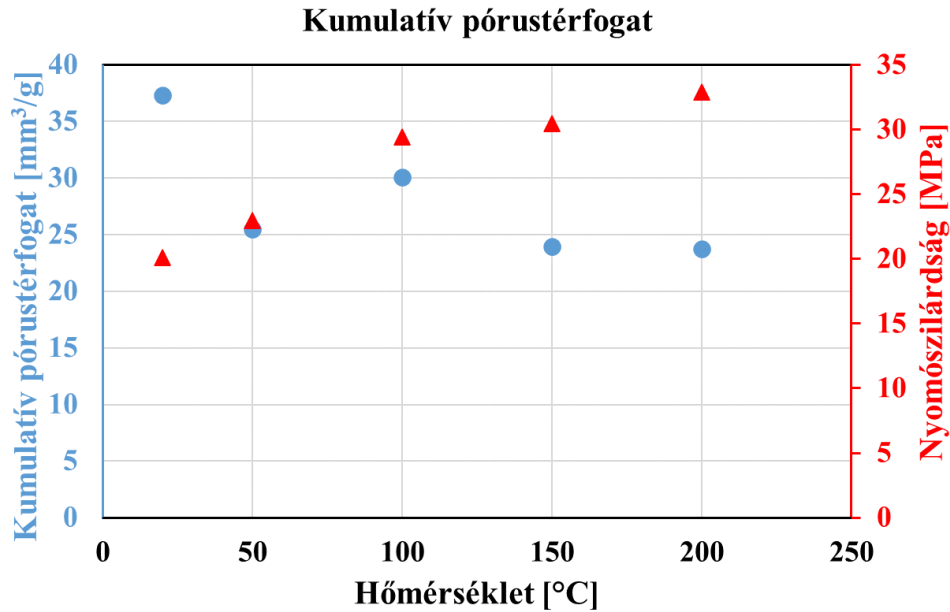


**51. ábra** A R\_AAM<sub>B\_MKA</sub> anyag pórusméret eloszlása

Az **51. ábrán** megfigyelhető, hogy a referencia minta pórusátmérője 0,0046 µm és 0,06 µm között oszlik meg. A pórusméret eloszlás tekintve egy széles és egyben fő csúcs jelenik meg 0,03 µm-nél.

Továbbá a *MELLÉKLET III.-Az alkáli aktivált anyag vizsgálata, mesterséges kőanyag előállítása* című fejezetben szerepel a BET fajlagos felület, mikropórus felület, kumulatív pórusfelület és az átlagos pórusátmérő mért eredményei a nyomószilárdságra gyakorolt hatását figyelembe véve (**M3.-2. táblázat, M3.-8.ábra-M3.-11.ábra**). A különböző hőmérsékleteken hőkezelt alkáli aktivált anyag vizsgálati eredményei szerint hőmérséklet egyaránt hatást gyakorol az AAM pórustérfogatára és a nyomószilárdságra. A kutatás szempontjából ez jelentős és fontos eredmény, hiszen ez azt jelenti, hogy a hőkezelés hatására az alkáli aktivált minta tömörebbé válik, kevesebb pórust tartalmaz a mikropórus tartományban (1,7 nm-300 nm), ezáltal a mechanikai szilárdsága is javul.





52. ábra A hőkezelt alkáli alkáli aktivált anyag átlagos pórusmérete a mikropórus tartományban

A 52. ábra szemlélteti, hogy a referenciaminta ( $R\_AAM\_B\_MKA$ ), azaz 20 °C-on vizsgált AAM minták és a 30 percig tartó, különböző hőmérsékleteken (50 °C, 100 °C, 150 °C és 200 °C) történő hőkezelés hatására a hőkezelési hőmérsékletet emelve azok nyomószilárdsága nőtt. A gázadszorpciós vizsgálatok eredményei igazolják, hogy a hőkezelés hatására a minták tömörödnek, ezzel párhuzamosan pedig a nyomószilárdság nő az AAM pórustérfogatának a csökkenését eredményezve.

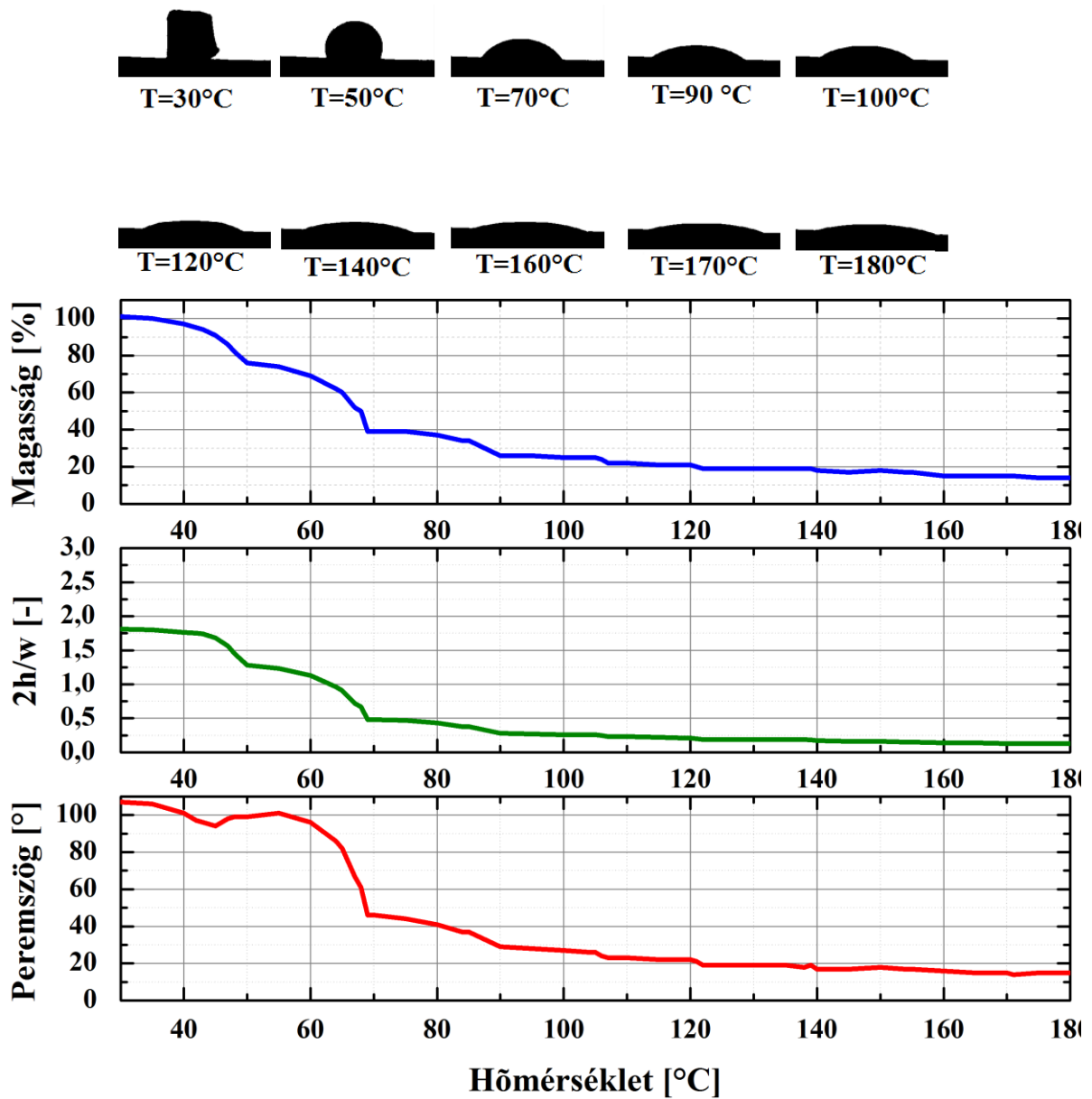
### 3.8 Az alkáli aktivált anyag ( $AAM\_B\_MKA$ ) és a bitumen közötti kölcsönhatás vizsgálata

#### 3.8.1 Az alkáli aktivált anyag ( $AAM\_B\_MKA$ ) és a bitumen közötti peremszög vizsgálata

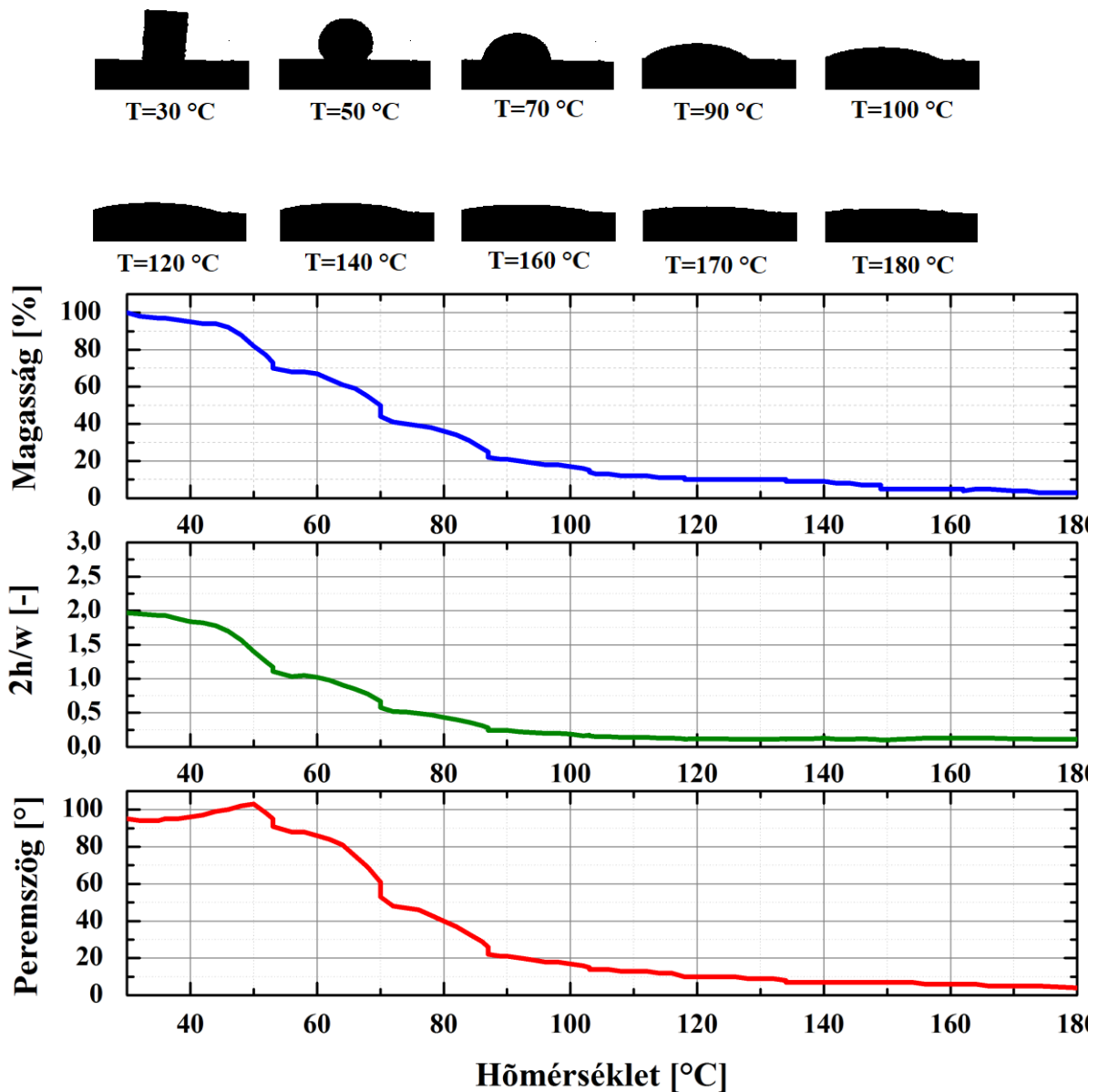
A hevítómikroszkópos vizsgálattal az volt a célom, hogy a bitumen és az alkáli aktivált anyag ( $AAM\_B\_MKA$ ), mint lehetséges aszfalt kőanyag közötti nedvesítési tulajdonságokat feltárjam.

A vizsgálat kezdő hőmérséklete 30 °C-ról indult, a maximális hőmérséklet pedig 180 °C volt, 5 °C/min felfűtési sebességet alkalmazva. Kutatómunkám során az alkáli aktivált anyag és a bitumen minta között kialakult nedvesítési folyamatok eredményeit összevettem a hazai útépitőiparban gyakran alkalmazott, általam ebben a vizsgálat sorozatban referenciaként használt mészkő (származási hely: Tatabánya) hevítómikroszkópos vizsgálati eredményeivel (53. ábra és 54. ábra). Megfigyelhető, hogy a mészkövön, illetve az AAM felületén folyamatosan meglágyuló, majd olvadó bitumen viselkedése nagyon hasonló. A növekvő hőmérséklet hatására a bitumen és az alkáli aktivált anyag felülete között jó tapadás alakult ki. A bitumen kötőanyag az AAM felületén teljesen szétterült, tehát jól nedvesíti azt. Az olvadék

állapotot 74 °C-nál detektálta a berendezés, míg a legmagasabb hőmérsékleten a peremszög értéke 9 °, eszerint a bitumen az alkáli aktivált anyagot majdnem tökéletesen nedvesíti.



53. ábra Mészke hevítőmikroszkópos vizsgálati eredménye

54. ábra Az AAM<sub>B\_MKA</sub> hevítőmikroszkópos vizsgálati eredménye

A hevítőmikroszkópos mérésekkel igazoltam, hogy az AAM<sub>B\_MKA</sub> jelű alkáli aktivált anyag alkalmazható, az aszfaltkeverékek esetén, mint mesterséges kőanyag, mivel a B50/70 százalombattai útépitési bitumen és az AAM<sub>B\_MKA</sub> anyag között, az aszfaltkeverék jellemző keverési hőmérsékletén ( $T=180^{\circ}\text{C}$ ) mért nedvesítési peremszög átlagos értéke  $\Theta=9^{\circ}$ , tehát a bitumen kötőanyag jól nedvesíti az alkáli aktivált anyag felületét.

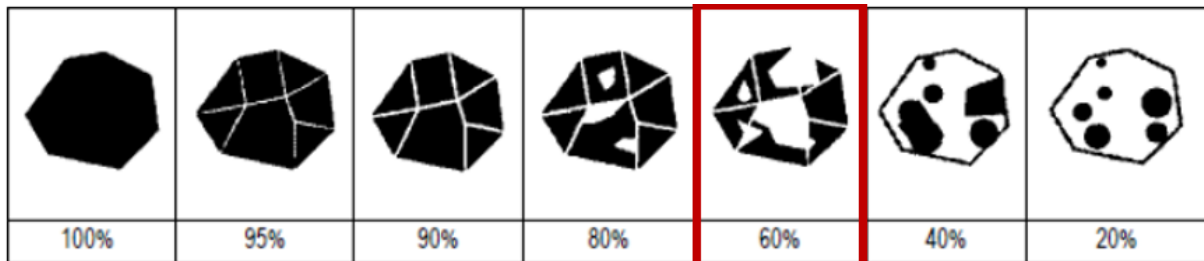
### 3.8.2 Az alkáli aktivált anyag (AAM<sub>B\_MKA</sub>) és a bitumen közötti tapadóképesség vizsgálata

A bitumenes tapadóképesség vizsgálat kiértékelése annak elvégzését követően történt. A szabvány előírásainak megfelelően szemrevételezéssel értékeltem a mintáimat. A három forgotott vizes palackból kivett szemcsékről készült felvételeket mutatja be az **55. ábra**.



55. ábra Bitumenes tapadóképesség meghatározása szemrevételezéssel

A kőanyag bitumenes tapadóképességének értékelése az *MSZ EN 12697-11* szabványnak [149] megfelelően történt. Összehasonlítva a vizsgálati eredményeket a referencia ábrával (56. ábra), megállapítható, hogy a bitumen a vizsgálati időt (48 h) követően az  $AAM_{B\_MKA}$  szemcsék felületén 60%-ban tapadt meg.



56. ábra Bitumenes tapadóképesség értékelését segítő referencia ábra [149, 150]

Ha összevetjük az AAM vizsgálati eredményét a szakirodalmi összefoglalás fejezetében bemutatott vizsgálati eredményekkel, akkor az alábbi megállapítások tehetők:

Az  $AAM_{B\_MKA}$  anyaghoz a vizsgálathoz használt B 50/70 típusú bitumen megfelelően volt képes tapadni. A bitumenes tapadóképesség vizsgálat alapján 60%-os a bitumen bevonsági értéket állapítottam meg, amely igazolja, hogy mesterségesen előállított alkáli aktivált kőanyag ezen tulajdonság alapján alkalmas aszfalt keverékekben történő felhasználásra.

## 4 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkám olyan anyagok kifejlesztésére irányult, melyekkel az aszfaltkeverékekben felhasznált primer ásványi anyagok részben, vagy egészében kiválthatók. A primer ásványvagyon csökkenésének, valamint a környezetet erősen terhelő, nagy mennyiségben és folyamatosan termelődő építési-bontási hulladékok problémájának megoldása egyaránt motiválta értekezésem elkészítését. Kitűzött céloom elérését ezen hulladékok alkáli aktiválásával kívántam elérni. Az alkáli aktivált anyagok (AAM) aszfaltkeverékekben történő alkalmazásával foglalkozó kutatási eredmények száma mindmáig minimális.

A doktori értekezésemben ipari melléktermék, valamint építési-bontási hulladékok (*alumínium öntészeti salak, tégláörlemény, cserépörlemény, betonörlemény*), mint az AAM lehetséges prekursorainak alkáli aktiválását végeztem el, melyek közül a betonörleménnyel értem el a legjobb eredményeimet. Ezen AAM szilárdságának további növelését különböző kiegészítő prekursorokkal folytattam. A betonörleményhez adagolt kiegészítő prekursorok hatását az általam definiált B/AAO (*betonörlemény/alkáli aktiváló oldat*) segítségével jellemeztem. Metakaolin ( $14 \text{ m/m}\%$ ) és aerosil ( $1,4 \text{ m/m}\%$ ) együttes használatával a betonörlemény alapú alkáli aktivált ( $AAM_{B\_MKA}$ ) anyag szilárdsága 28 napos korban mérve 51 MPa, 90 napos korban mérve pedig 59 MPa értéket ért el.

Az aszfalttechnológiai alkalmazhatóság érdekében az alkáli aktivált anyag különböző hőmérsékleteken történő viselkedését tanulmányoztam. Azt tapasztaltam, hogy az aszfalttechnológiai hőmérsékleteken az AAM szilárdsága növekszik, melynek oka az anyag szerkezetében lévő pórusok térfogatának csökkenése, végső soron az anyag tömörödése.

Hevítőmikroszkópos vizsgálatokkal igazoltam, hogy az útépitési bitumen az AAM felületét jól nedvesíti. Sablonozási technikával mesterséges köveket is készítettem, melyeken a bitumen tapadóképességét vizsgáltam meg. Eredményeim azt mutatták, hogy a bitumen jól tapad az AAM felületére, a tapadás mértéke a jelenleg használt kőanyagokhoz hasonló.

Az AAM töltőanyagként történő felhasználás lehetőségét is tanulmányoztam. Az eredmények ebben az esetben is az aszfalttechnológiai alkalmazhatóságot erősítették.

## 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<sub>B\_MKA</sub>*) 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.

## 5 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

### 1. TÉZIS

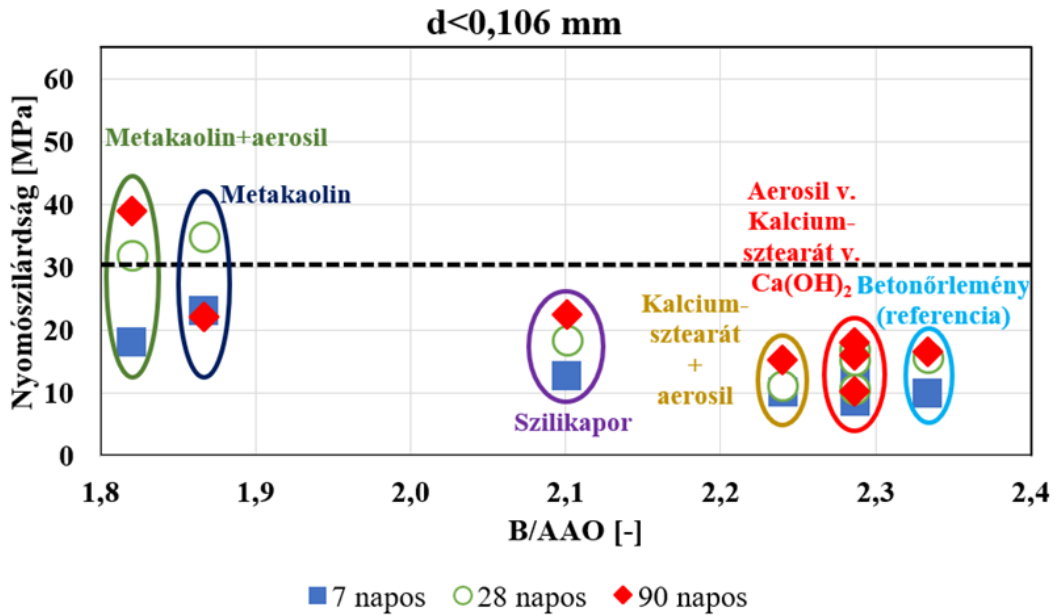
Kimutattam, hogy a referencia mintaként használt bontott betonörleményből ( $SiO_2+Al_2O_3$ : 78,7 m/m%,  $d<0,063$  mm,  $d_{50}<0,01018$  mm) alkáli aktiválással (10 M NaOH oldat+ $Na_2SiO_3$  50:50 arányban készült alkáli aktiváló oldat, 70:30 szilárd anyag/folyadék arány) megszilárdult alkáli aktivált kötőanyag hozható létre (AAM<sub>B</sub>). 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

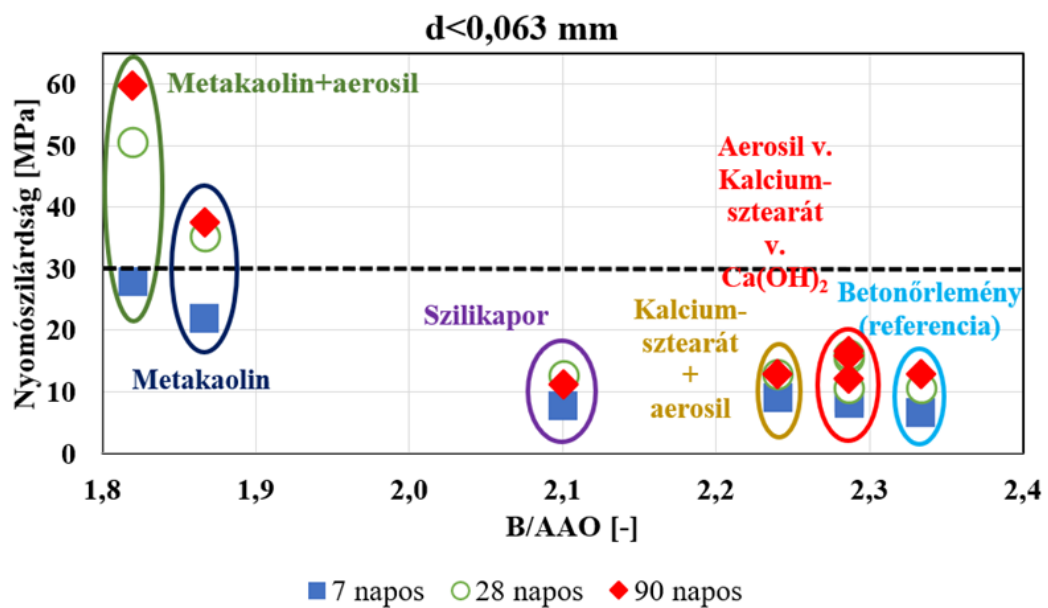
A betonörlemény alapú, szilárd kiegészítő prekursorok (szilikapor, kalcium-sztearát, mészhidrát, metakaolin, aerosil, illetve ezek keverékének) adagolásával előállított alkáli aktivált kötőanyag elemzéséhez definiáltam egy B/AAO arányt, amely a betonörlemény és az alkáli aktiváló oldat (=folyadék) egymáshoz 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-ábra** A B/AAO arány hatása a nyomószilárdságra, ahol a betonőrlemény szemcsemérete-eloszlása  $d < 0,106$  mm (34. ábra)



**B-ábra** A B/AAO arány hatása a nyomószilárdságra, ahol a betonőrlemény szemcsemérete-eloszlása  $d < 0,063$  mm (35. ábra)

#### 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<sub>B\_MKA</sub> 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, ( $*R_{AAMB}=12,8 MPa$ ,  $R_{AAMB\_MKA}=59 MPa$ ).

Előállítási körülmények és felhasznált anyagok:

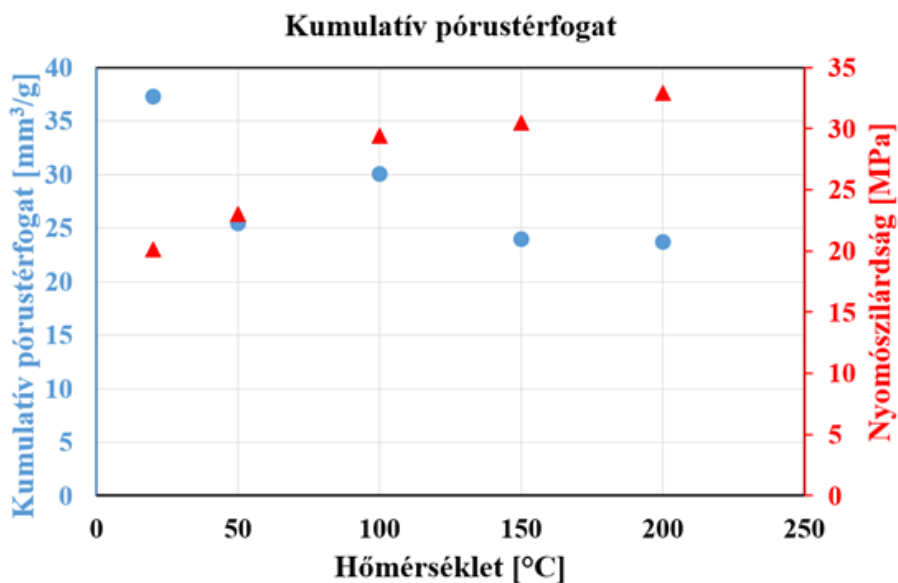
- száraz alapanyagok őrlési paraméterei (*bolygóműves golyósmalomban*): 150 fordulat/perc, 10 min őrlési idő;
- szilárd/folyadék arány: 70:30
- NaOH:Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>=50:50 m/m%
- M<sub>NaOH</sub>= 10 M
- Ms;Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (*szilikátmodulus*)=3,87 ( $SiO_2$ : 30,95m/m% és a Na<sub>2</sub>O: 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  $T_1=20$  °C-on (*referenciaminta*,  $R_{AAMB\_MKA}$ ) vizsgált alkáli aktivált anyag nyomószilárdsága  $t=30$  percig tartó, különböző hőmérsékleteken ( $T_2=50$  °C,  $T_3=100$  °C,  $T_4=150$  °C,  $T_5=200$  °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.



**C-ábra** A hőkezelt alkáli aktivált anyag és átlagos pórusmérete a mikropórus tartományban (52. ábra)

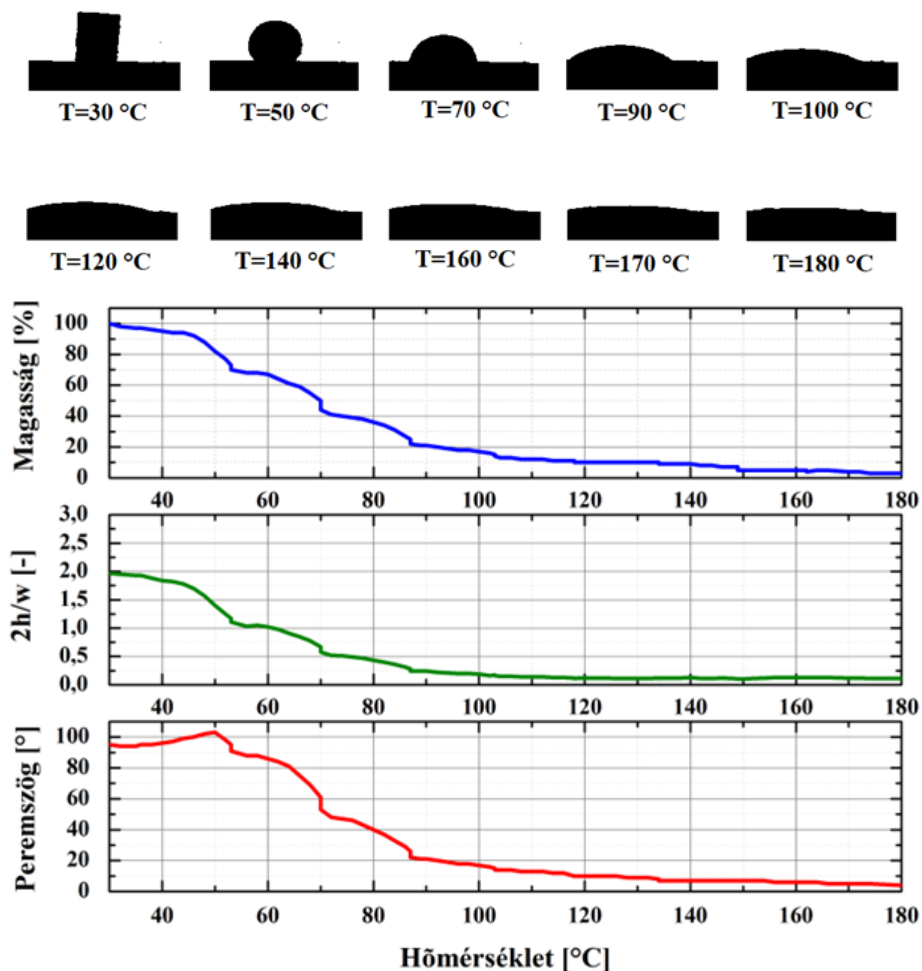
## 6. TÉZIS

Kísérleti úton bizonyítottam, hogy a bontott betonörleményből ( $SiO_2+Al_2O_3$ : 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 AAMB\_MKA jelű alkáli aktivált anyag alkalmazható az aszfaltkeverékek esetén, mint mesterséges kőanyag. A B50/70 százalombattai útépitési bitumen és az AAMB\_MKA anyag között, az aszfaltkeverés jellemző hőmérsékletén ( $T=180$  °C) mért a nedvesítési peremszög átlagos értéke  $\Theta=9^\circ$ , így a bitumen jól nedvesíti az alkáli aktivált anyag felületét.



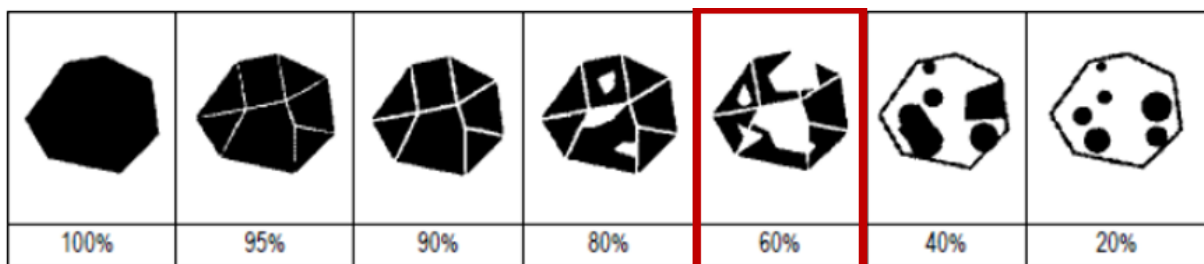
D-ábra Az AAMB\_MKA hevítőmikroszkópos vizsgálati eredménye (54.ábra)

## 8. TÉZIS

Bitumenes tapadóképesség vizsgálattal igazoltam, hogy az AAM<sub>B\_MKA</sub> 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<sub>B\_MKA</sub> jelű alkáli aktivált anyag mesterséges kőzetként aszfaltkeverékekben alkalmazható.



**E-ábra** Bitumenes tapadóképesség meghatározása szemrevételezéssel (55. ábra)



**F-ábra** Bitumenes tapadóképesség értékelését segítő referencia ábra (56. ábra)

## 6 MEGJELENT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

1. Zoltán Soós, Róbert Géber, Csaba Tóth, Zsuzsanna Igazvölgyi, **Bella Udvardi**. **Utilization of aluminium dross as asphalt filler.** ÉPÍTŐANYAG: JOURNAL OF SILICATE BASED AND COMPOSITE MATERIALS. (2017) Vol. 69. pp. 89-93.  
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2017.15>
2. **Bella Udvardi**, Alexandra Hamza, Emese Kurovics, István Kocserha, Róbert Géber, Andrea Simon. **Production of lightweight geopolymer concrete.** Journal of Physics: Conference Series. (2020)  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1527/1/012045>
3. **Bella Udvardi**, Róbert Géber, István Kocserha. **Examination of different waste materials for road construction.** Košice, Technical University of Kosice, (2019) pp. 17-23.
4. **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>.
5. **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>
6. **Bella Udvardi**, Róbert Géber, István Kocserha. **Aktualitások az útépítésben hasznosítható másodlagos nyersanyagok területén.** Útügyi lapok: a közlekedésepítési szakterület mérnöki és tudományos folyóirata. (2019) 7.évfolyam, 12.szám. pp. 33-41.  
<https://doi.org/10.36246/UL.2019.1.04>
7. **Bella Udvardi**, Alexandra Hamza, Flóra Fehér, István Kocserha. **Possibilities of utilization ground reed in cement foam.** Materials Science and Engineering. (2020) Vol. 45, pp. 316-322,  
<https://doi.org/10.32974.mse.2020.032>
8. **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>

## 7 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 Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézetben dolgozó **Kovács Árpádnak** a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok kivitelezését.

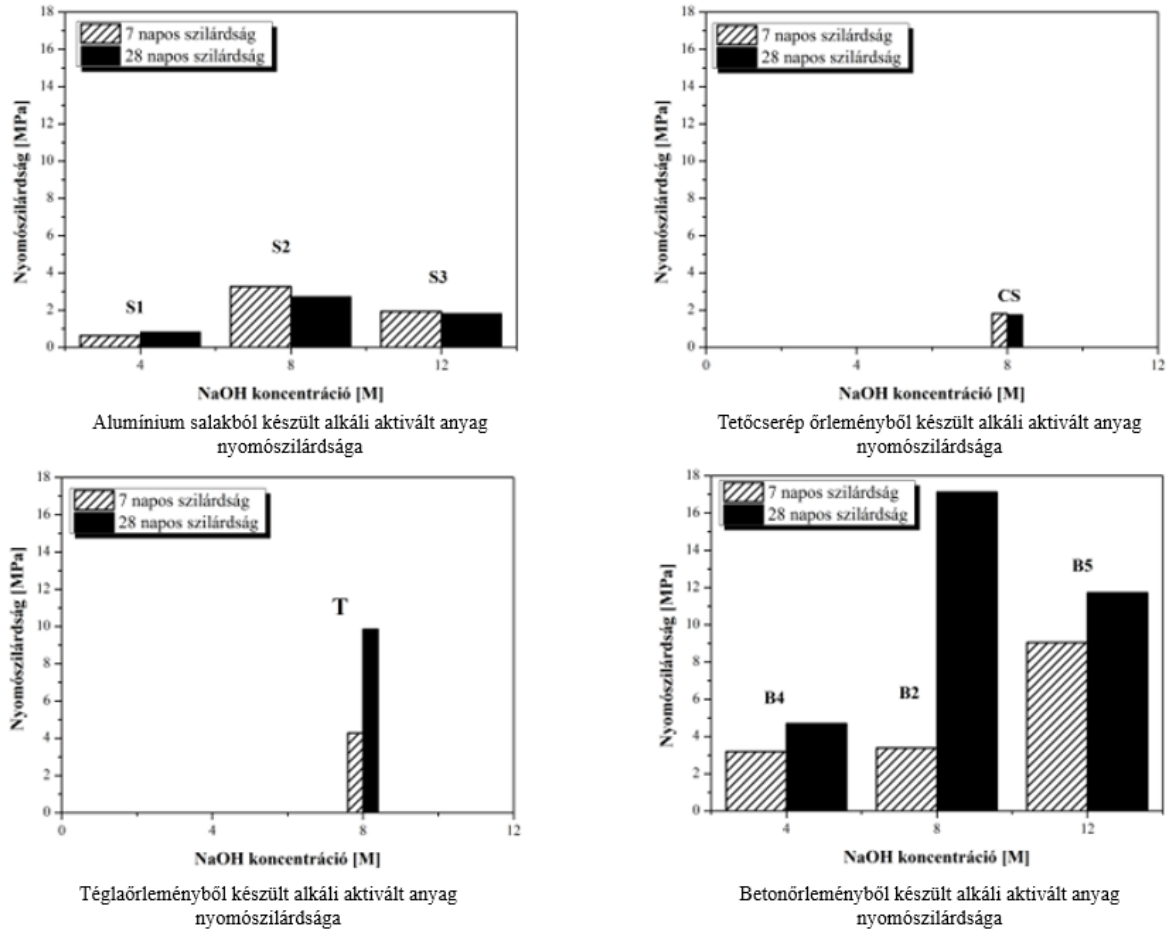
Továbbá köszönöm a Fémelőállítási és Öntészeti Intézetben munkálkodó **Ferenczi Tibornak** a gázadszorpciós vizsgálatokban nyújtott segítségét.

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

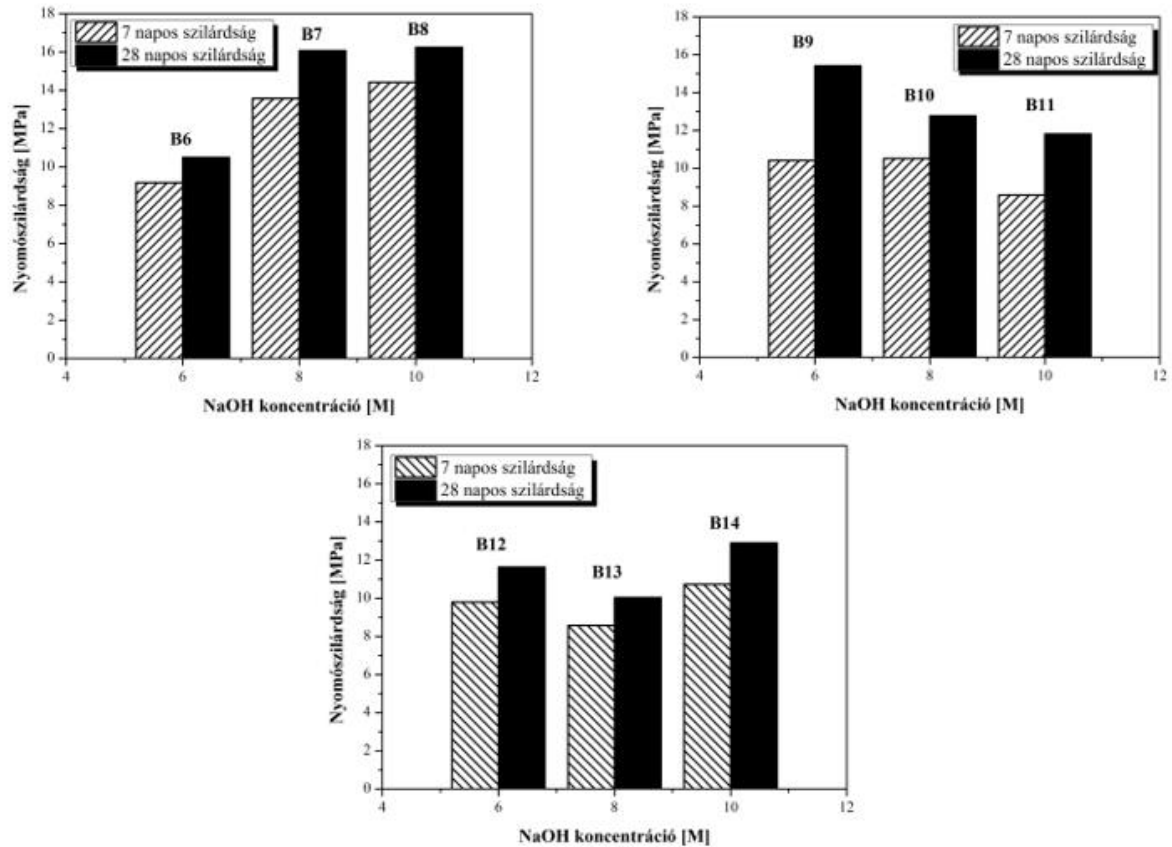
Végül óriási hálamat szeretném szavakba önteni a **családomnak**, akik mindvégig türelemmel álltak mellettem, bíztak bennem és folyamatosan támogattak a PhD fokozat megszerzéséhez vezető úton.

## 8 MELLÉKLET

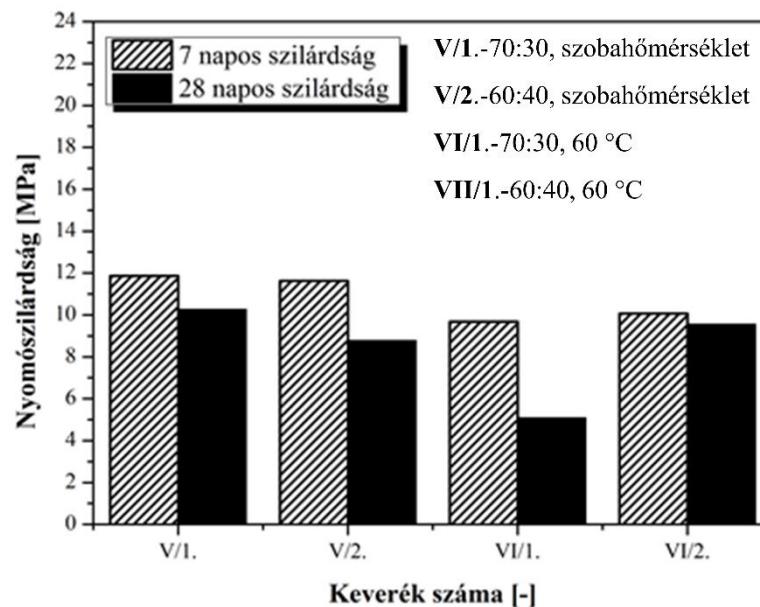
### MELLÉKLET I. - Másodlagos nyersanyagok alapanyagvizsgálatai és a nyersanyagok kiválasztása az alkáli aktiváláshoz



**M1.ábra** Másodlagos nyersanyagokból alkáli aktivált termékek nyomószilárdsága a NaOH koncentráció függvényében



**M2.ábra** Betonórleányból készült alkáli aktivált anyagok nyomószilárdsága a NaOH koncentráció függvényében



**M3.ábra** A betonórleányból készült alkáli aktivált anyagok nyomószilárdsága szobahőmérsékleten és 60 °C-os érlelési hőmérsékleten

## MELLÉKLET II. -A kiválasztott másodlagos nyersanyag alapú alkáli aktivált anyag nyomószilárdságának az optimalizálása

M2. -1.táblázat- AAMB\_106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_106	9,79	14,89	16,85
	10,62	13,99	16,55
	9,75	16,44	16,02
	10,42	16,55	16,35
	9,99	16,10	16,36
	9,55	14,67	17,22
	10,11	16,02	17,11
	8,56	15,75	15,54
<b>Átlag</b>	9,85	15,55	16,50
<b>Szórás</b>	0,63	0,93	0,56

M2.-2.táblázat- AAMB\_S106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_S106	12,15	17,05	22,33
	11,89	16,95	22,15
	13,41	18,30	22,04
	13,74	18,23	23,12
	11,55	19,04	22,45
	12,65	19,21	22,75
	13,35	19,33	22,01
	13,56	19,10	23,4
<b>Átlag</b>	12,79	18,40	22,53
<b>Szórás</b>	0,84	0,96	0,51



M2.-3.táblázat - AAMB\_S106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_S106	12,02	16,00	17,81
	11,55	15,58	18,91
	12,36	16,96	17,69
	12,99	17,15	17,63
	12,79	17,85	17,61
	12,78	16,95	17,67
	11,42	17,90	17,95
	11,25	17,17	17,98
<b>Átlag</b>	12,15	16,95	17,91
<b>Szórás</b>	0,68	0,81	0,43

M2.-4.táblázat - AAMB\_C106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_C106	8,11	10,63	10,01
	8,98	10,57	10,18
	8,95	10,96	10,95
	9,15	10,22	9,75
	9,02	10,03	10,15
	8,81	10,65	10,07
	8,45	10,75	9,99
	8,32	10,65	10,16
<b>Átlag</b>	8,72	10,56	10,16
<b>Szórás</b>	0,38	0,30	0,35

M2.-5.táblázat - AAMB\_M106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_M106	23,14	34,12	21,69
	23,85	34,95	21,96
	22,97	34,63	22,02
	22,54	35,44	23,26
	23,03	35,01	22,14
	23,66	35,33	22,36
	23,15	35,39	22,02
	23,10	34,65	21,77
<b>Átlag</b>	23,18	34,94	22,15
<b>Szórás</b>	0,41	0,46	0,49

M2.-6.táblázat - AAMB\_M106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_O106	9,97	15,17	15,04
	9,25	15,25	15,36
	10,36	14,85	16,82
	10,65	16,12	15,99
	8,91	15,15	15,79
	9,93	14,89	16,22
	9,99	15,01	16,29
	10,35	14,78	16,23
<b>Átlag</b>	9,93	15,15	15,97
<b>Szórás</b>	0,58	0,43	0,56

M2.-7.táblázat - AAMB\_CA106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_CA106	10,19	11,25	15,21
	9,78	11,36	15,36
	9,65	10,09	14,97
	10,11	12,17	14,85
	10,63	11,93	15,23
	9,97	10,68	15,45
	10,19	10,29	15,37
	10,20	10,69	15,34
<b>Átlag</b>	10,09	11,06	15,22
<b>Szórás</b>	0,30	0,75	0,21

M2.-8.táblázat - AAMB\_MKA106 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_MKA106	17,85	31,91	39,45
	19,25	31,03	39,28
	19,17	32,63	39,99
	18,05	32,69	38,42
	17,96	31,97	38,36
	17,42	31,85	37,91
	17,26	31,79	38,86
	17,33	31,79	39,52
<b>Átlag</b>	18,04	31,96	38,97
<b>Szórás</b>	0,78	0,52	0,71

M2.-9.táblázat - AAMB\_63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_63	6,65	10,01	12,96
	6,96	11,47	12,12
	6,12	11,85	11,25
	6,79	10,60	13,63
	7,14	10,52	13,05
	6,85	10,36	12,86
	6,37	9,79	13,14
	6,23	10,62	13,36
<b>Átlag</b>	6,64	10,65	12,80
<b>Szórás</b>	0,36	0,69	0,76

M2.-10.táblázat - AAMB\_S63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_S63	7,78	12,63	11,12
	7,96	12,45	11,36
	7,36	13,31	11,15
	7,71	13,15	11,65
	7,94	11,89	11,52
	7,94	12,50	10,89
	7,72	12,45	11,02
	7,74	12,39	10,84
<b>Átlag</b>	7,77	12,60	11,19
<b>Szórás</b>	0,20	0,45	0,29

M2.-11.táblázat AAMB\_A63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_A63	8,77	15,42	15,63
	8,97	15,78	15,96
	8,54	15,36	15,59
	9,12	15,40	15,92
	8,16	15,32	15,63
	7,99	15,47	16,13
	7,85	15,46	15,79
	8,40	15,47	15,61
<b>Átlag</b>	8,48	15,46	15,78
<b>Szórás</b>	0,46	0,14	0,20

M2.-12.táblázat - AAMB\_C63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_C63	8,77	10,69	12,42
	9,54	11,92	12,11
	7,89	11,25	11,87
	9,29	10,95	12,13
	9,65	11,60	12,65
	9,26	9,74	12,14
	9,15	9,60	11,89
	8,89	9,65	12,2
<b>Átlag</b>	9,06	10,68	12,18
<b>Szórás</b>	0,56	0,92	0,26

M2.-13.táblázat - AAMB\_MK63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_MK63	21,12	35,25	37,52
	21,97	35,12	37,89
	22,02	35,96	37,42
	22,36	35,67	37,39
	21,91	35,02	37,25
	22,67	34,93	37,85
	21,94	35,11	37,15
	21,69	35,00	37,65
<b>Átlag</b>	21,96	35,26	37,52
<b>Szórás</b>	0,46	0,37	0,27

M2.-14.táblázat - AAMB\_CA63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_CA63	8,77	12,81	13,25
	8,15	12,98	12,94
	8,91	12,45	12,11
	9,12	12,91	13,95
	10,25	12,94	12,45
	9,14	12,81	12,14
	8,02	12,79	13,65
	9,60	12,85	12,97
<b>Átlag</b>	9,00	12,82	12,93
<b>Szórás</b>	0,73	0,16	0,68

M2.-15.táblázat - AAMB\_OA63 anyag nyomószilárdság értékei

Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_OA63	8,14	15,65	16,45
	8,25	15,74	15,85
	8,96	16,25	16,51
	8,75	16,96	16,98
	7,82	15,75	16,99
	7,65	15,78	16,78
	7,45	15,45	16,78
	8,61	16,42	16,31
<b>Átlag</b>	8,20	16,00	16,58
<b>Szórás</b>	0,54	0,50	0,38

M2.-16.táblázat - AAMB\_MKA63 anyag nyomószilárdság értékei

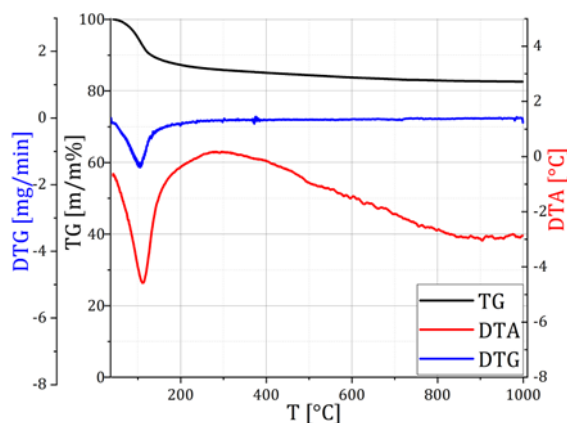
Minta azonosító	Nyomószilárdság [MPa]		
	7 napos	28 napos	90 napos
AAMB_MKA63	27,15	45,85	60,21
	27,56	52,01	59,45
	28,90	50,75	60,25
	28,45	50,80	59,16
	27,45	50,79	59,24
	27,85	51,21	59,36
	28,14	51,34	59,78
	27,70	51,79	59,69
<b>Átlag</b>	27,90	50,57	59,64
<b>Szórás</b>	0,57	1,96	0,42

### MELLÉKLET III.-Az alkáli aktivált anyag vizsgálata, mesterséges kőanyag előállítása

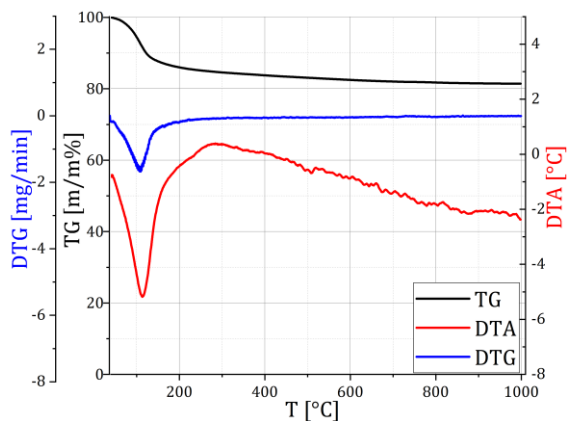
**M3-1. táblázat** Az alkáli aktivált kőanyag tömegcsökkenése, zsugorodása és testsűrűsége a hőkezelést követően

Minta azonosító	Hőkezelési hőmérséklet [°C]	Tömegcsökkenés [%]	Száradási zsugorodás [%]	Hőkezelés előtti sűrűség [g/cm <sup>3</sup> ]	Hőkezelés utáni sűrűség [g/cm <sup>3</sup> ]
R_AAM <sub>B_MKA</sub>	(T=20 °C)	0	0	1,85	-
50_AAM <sub>B_MKA</sub>	50	0,67	2,12	1,82	1,86
100_AAM <sub>B_MKA</sub>	100	5,03	5,03	1,73	1,82
150_AAM <sub>B_MKA</sub>	150	6,30	5,58	1,72	1,80
200_AAM <sub>B_MKA</sub>	200	15,30	6,22	1,53	1,63

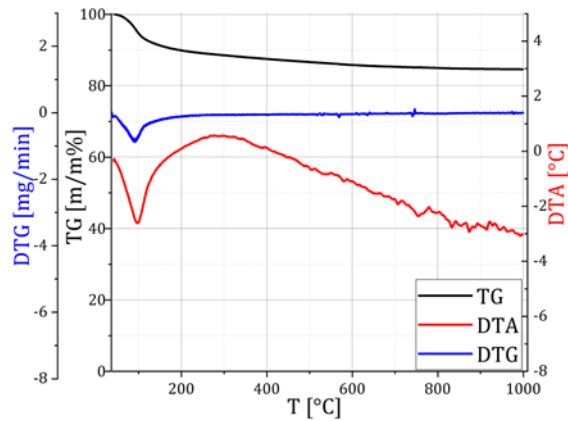
Megj.: R\_AAM<sub>B\_MKA</sub>-szobahőmérséklet/referencia minta, 50\_AAM<sub>B\_MKA</sub>- 50°C-on hőkezelt kőanyag, 100\_AAM<sub>B\_MKA</sub>-100°C-on hőkezelt kőanyag, 150\_AAM<sub>B\_MKA</sub>-150°C-on hőkezelt kőanyag, 200\_AAM<sub>B\_MKA</sub>-200°C-on hőkezelt kőanyag



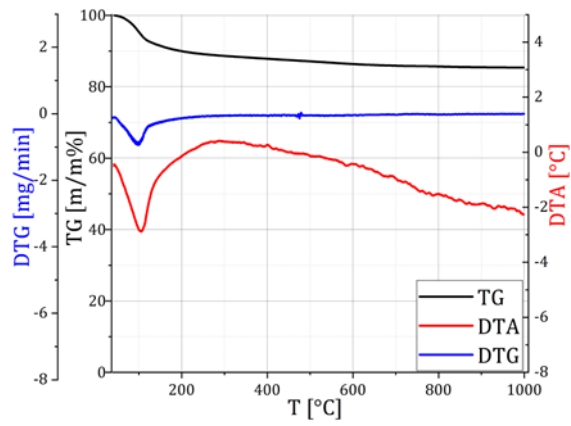
**R\_AAM<sub>B\_MKA</sub>**



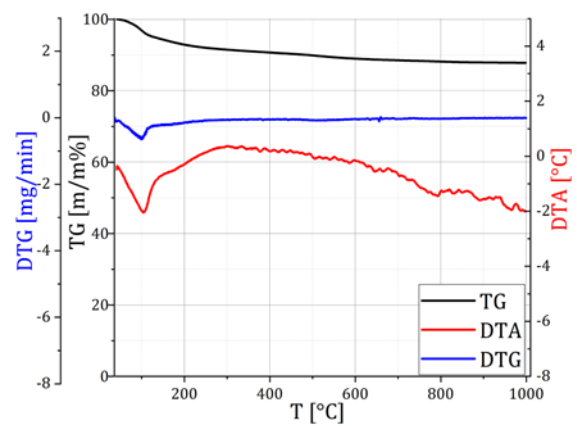
**50\_AAM<sub>B\_MKA</sub>**



**100\_AAM<sub>B\_MKA</sub>**

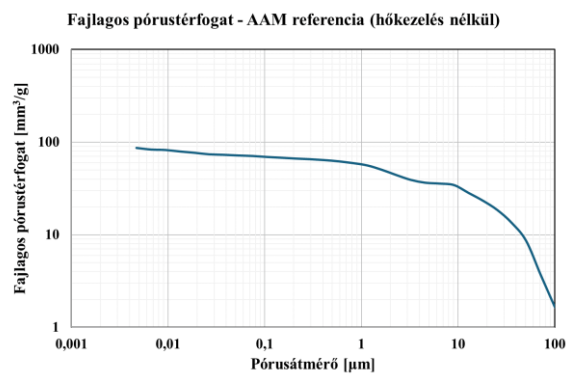
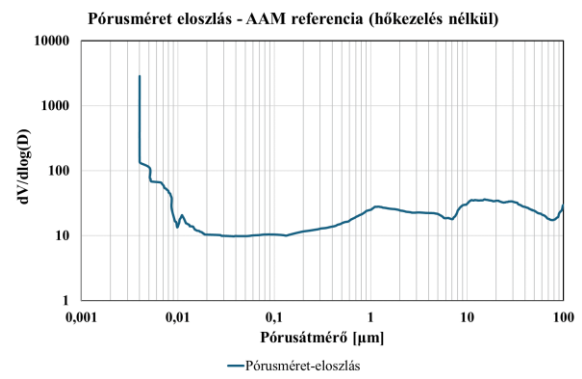
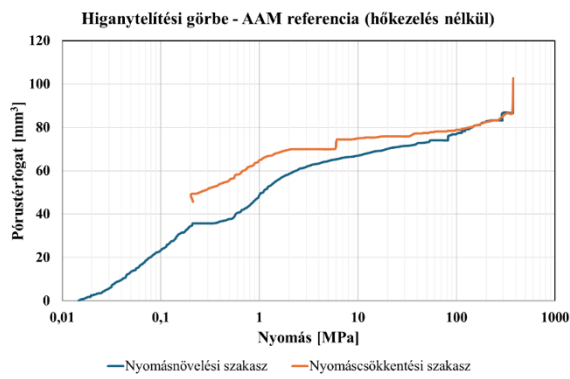


150\_AAMB\_MKA

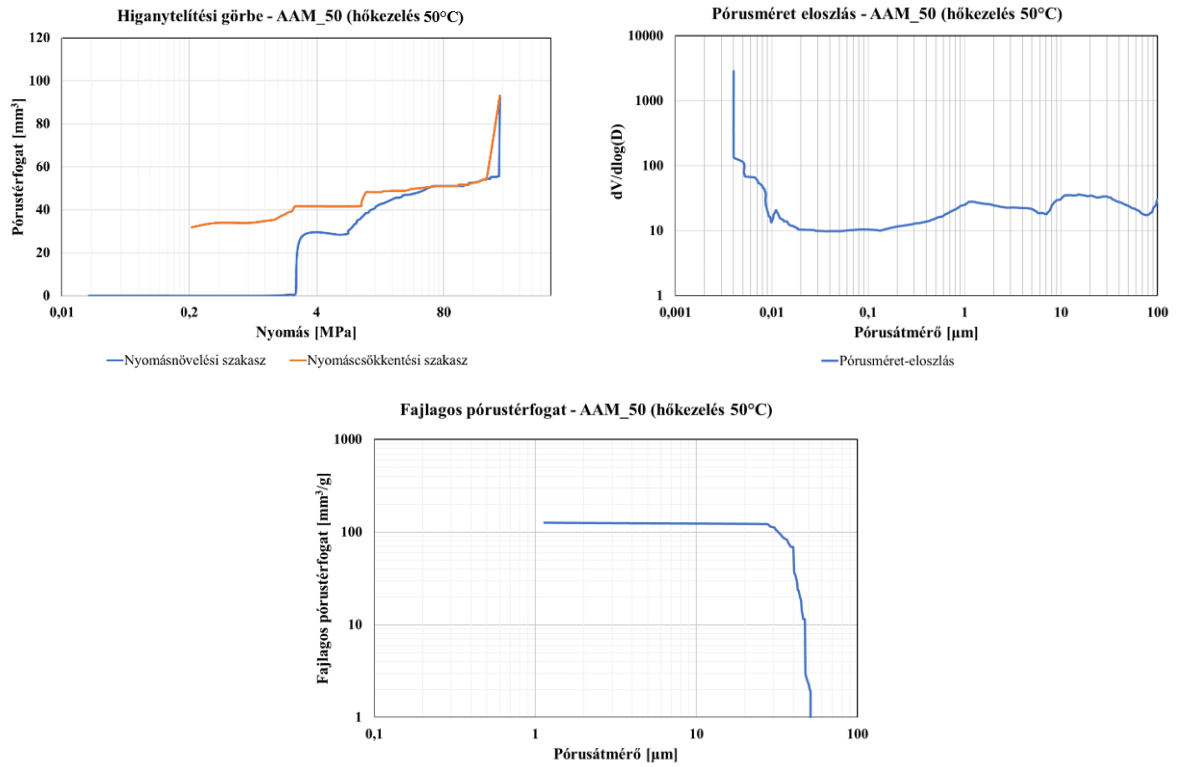


200\_AAMB\_MKA

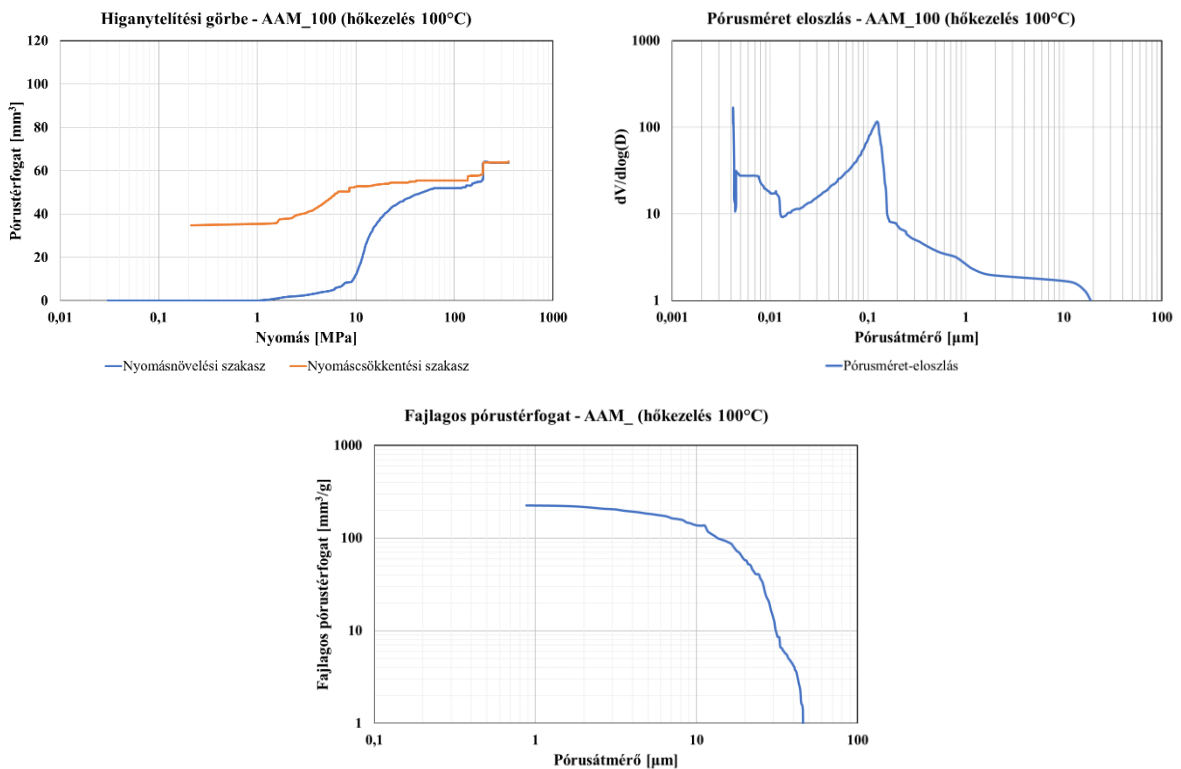
M3.-1. ábra A hőkezelt alkáli aktivált anyagok DTA mérési eredményei



M3.-2. ábra Az 50 °C-on hőkezelt minta higany porozimetriás vizsgálatának eredményei

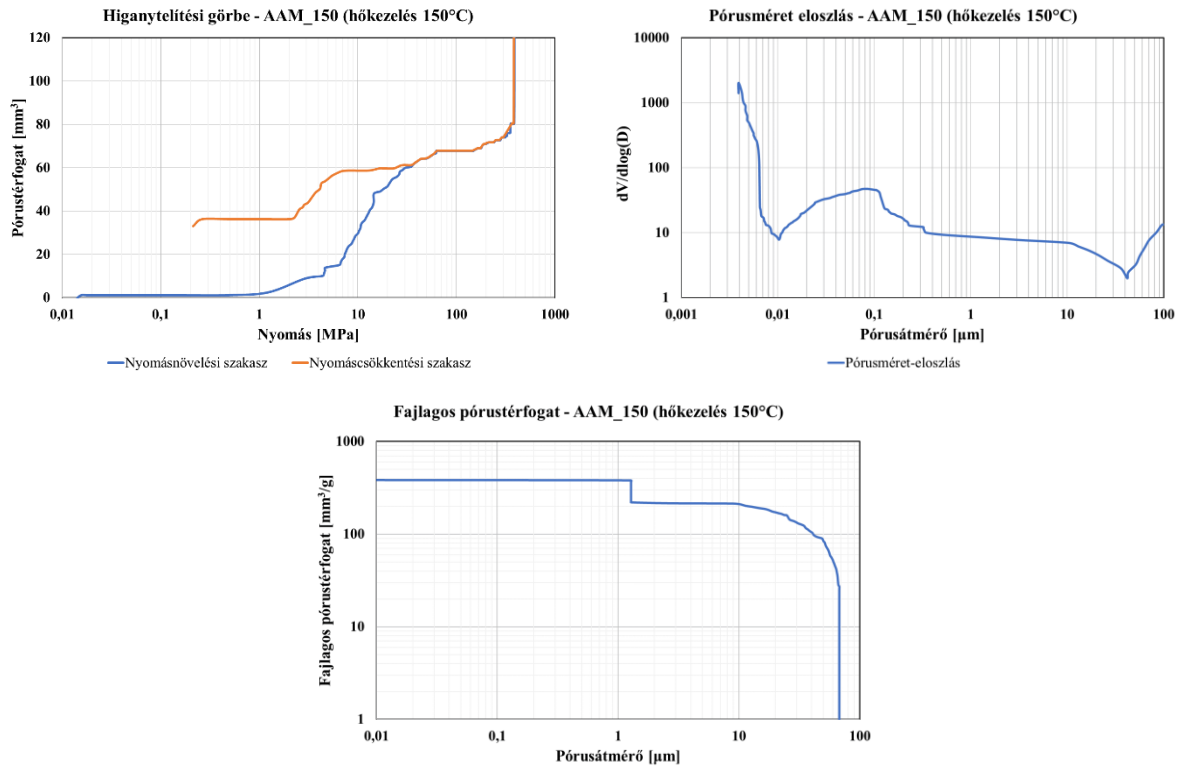


**M3.-3. ábra** Az 50 °C-on hőkezelt minta higany porozimetriás vizsgálatának eredményei

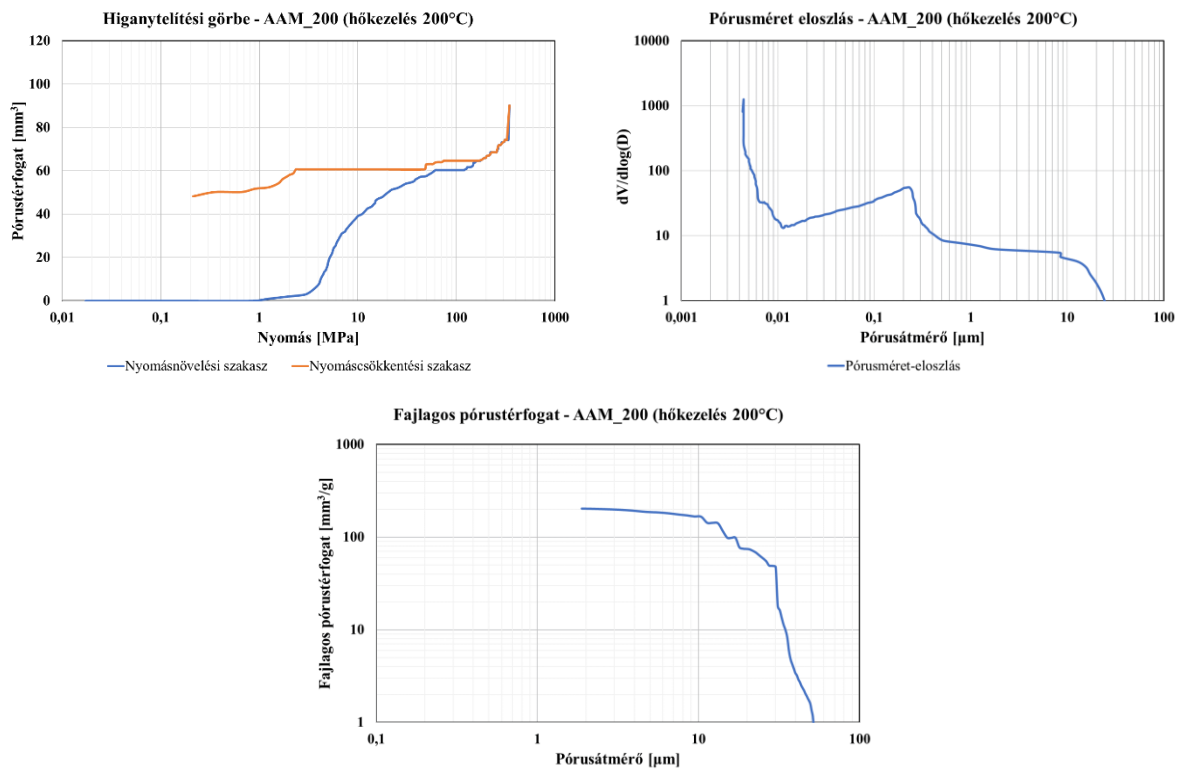


**M3.-4. ábra** A 100 °C-on hőkezelt minta higany porozimetriás vizsgálatának eredményei





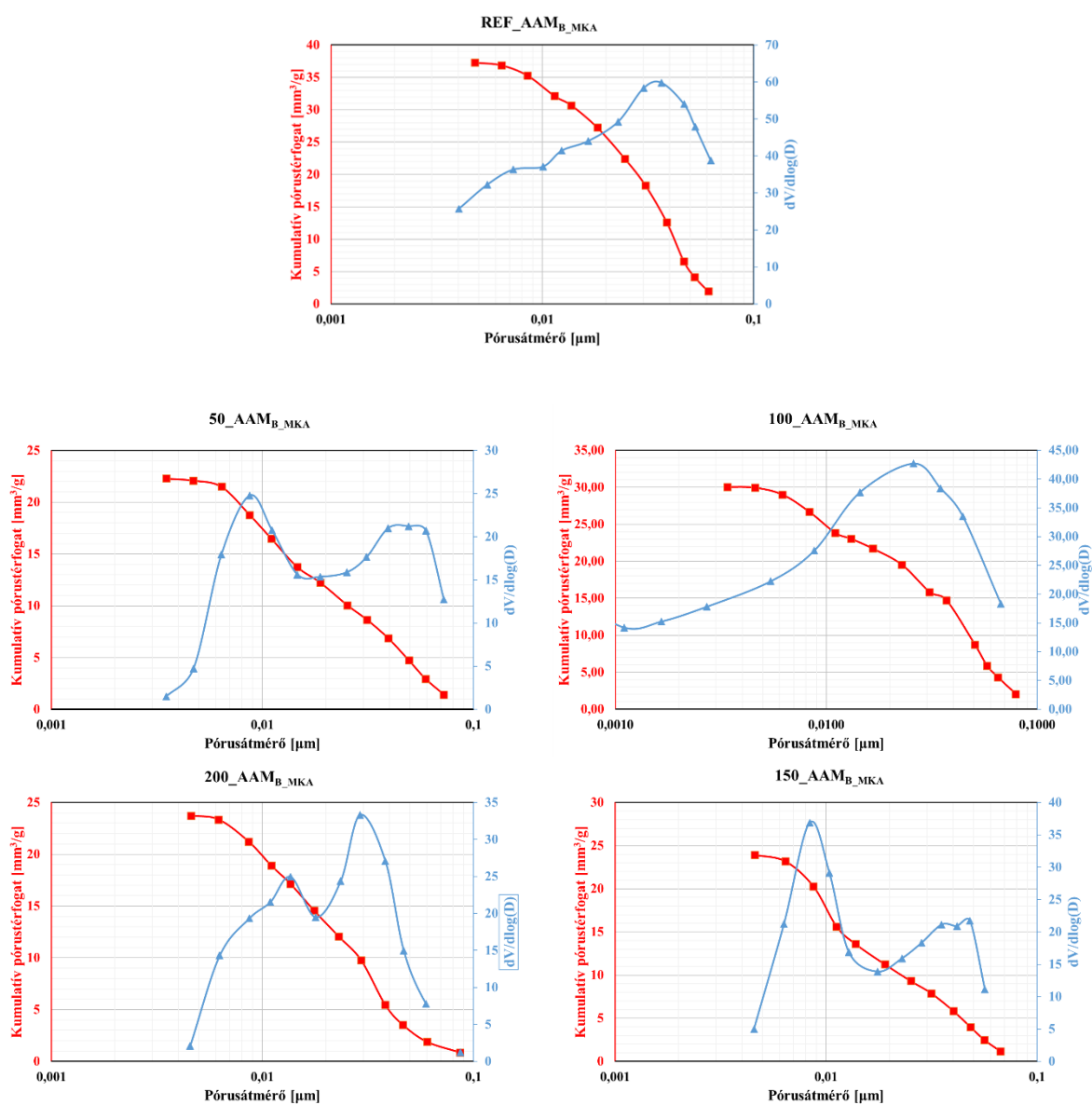
**M3.-5. ábra** A 150 °C-on hőkezelt minta higany porozimetriás vizsgálatának eredményei

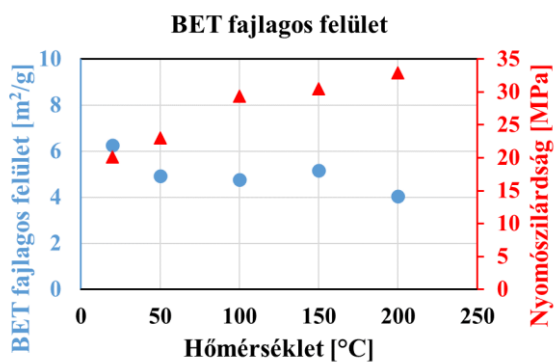


**M3.-6. ábra** A 200 °C-on hőkezelt minta higany porozimetriás vizsgálatának eredményei

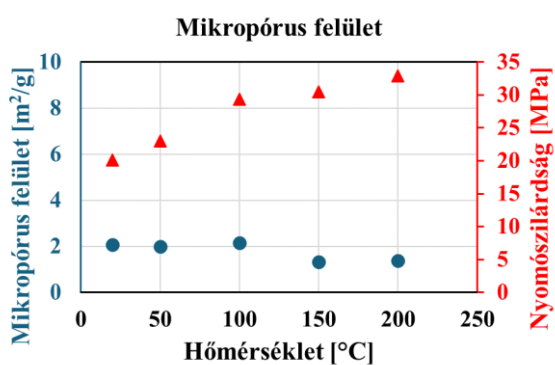
M3.-2. táblázat A hőkezelt alkáli aktivált anyag gázadszorpciós vizsgálatának eredményei

Anyagjellemző	R_AAM <sub>B_MKA</sub>	50_AAM <sub>B_MKA</sub>	100_AAM <sub>B_MKA</sub>	150_AAM <sub>B_MKA</sub>	200_AAM <sub>B_MKA</sub>
BET fajlagos felület [m <sup>2</sup> /g]	6,2673	4,9347	4,7687	5,1741	4,0564
Mikropórus felület [m <sup>2</sup> /g]	2,0846	2,0086	2,1610	1,3402	1,3851
B-J-H-féle pórusméret-eloszlás [m <sup>2</sup> /g]	7,9312	6,8772	7,0524	7,3651	6,1788
B-J-H-féle pórusméret-eloszlás [cm <sup>3</sup> /g]	0,0373	0,0255	0,0301	0,0239	0,0237
B-J-H-féle pórusméret-eloszlás [mm <sup>3</sup> /g]	37,3020	25,4610	30,0650	23,9480	23,7330
B-J-H-féle pórusméret-eloszlás [nm]	18,8129	14,8092	17,0524	13,0059	15,3640
Nyomószilárdság [MPa]	20,12	23,00	29,41	30,47	32,90

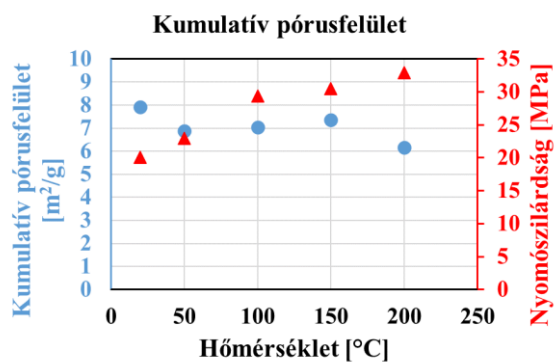
M3-7.ábra A AAM<sub>B\_MKA</sub> anyagok pórusméret eloszlásai



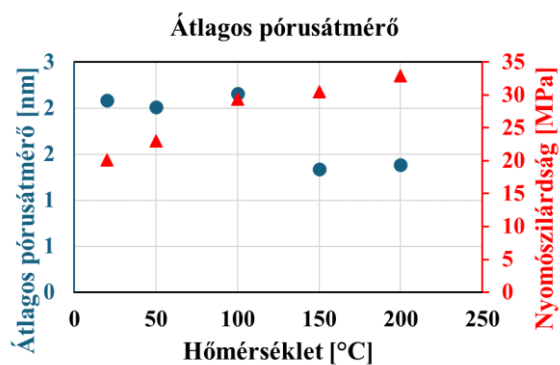
**M3.-8. ábra** A hőkezelt alkáli aktivált anyag BET fajlagos felülete



**M3.-9. ábra** A hőkezelt alkáli aktivált anyag mikropórus felülete



**M3.-10. ábra** A hőkezelt alkáli aktivált anyag kumulatív pórusfelület



**M3.-11. ábra** A hőkezelt alkáli aktivált anyag átlagos pórusátmérője

## 9 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Európai Parlament,  
<https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/economy/20151201STO05603/korforgasos-gazdasag-mit-jelent-miert-fontos-es-mi-a-haszna> (Hozzáférés ideje: 2023.07.30.)
- [2] Szabó Róbert. **Építési-bontási hulladékok hasznosításának tapasztalatai az építőiparban.** XIV. Kő és Kavicsbányászati Napok, Siófok. 2022. 03.9-11. <https://szte.org.hu/wp-content/uploads/22.hu> (Hozzáférés ideje: 2023.07.30.)
- [3] Ferenczy Géza: **Aszfaltburkolatok I.**, Tankönyvkiadó, Budapest, 1968
- [4] L.B. Gezencvej: „**Aszfaltbeton útburkolatok**”, Moszkva, OSZSZK Községgazdálkodási Minisztériumának Kiadóhivatala (1960).
- [5] Benke Márton, Dr. Boromissza Tibor, Móczár Ferenc: **Útépités II.**, Műszaki Könyvkiadó, 1983
- [6] European Committee for Standardization. EN 12597: **Bitumen and bituminous binders – Terminology.** Brussels: European Committee for Standardization; 2000.
- [7] J. Davidovits, J. Orlinski, **Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer.** Compiègne, France, (1988)1–3 June, pp. 125–134
- [8] C.K. Yip, G.C. Lukey, J. S.J. Van Deventer., **The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation.** Cement and Concrete Research 35 (2005) pp.1688– 1697.
- [9] Singh, P.S., Bastow, T., Trigg, M., 2005. **Structural studies of geopolymers by <sup>29</sup>Si and <sup>27</sup>Al MAS-NMR.** Journal of Materials Science. Vol.40. pp. 3951– 3961
- [10] Phair, J.W., Van Deventer, J.S.J., Smith, J.D., 2000. **Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymers.** Industrial and Engineering Chemistry Research Vol.39. pp. 2925–2934
- [11] G. Xu, J. Zhong, X. Shi: **Influence of graphene oxide in a chemically activated fly ash.** Fuel. 2018. Vol. 226. pp. 644-657, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.033>
- [12] J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer (ed.): **Alkali activated materials, State-of-the-Art Report,** RILEM TC 224-AAM (2014)
- [13] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, F. Pachecho-Torgal, L.A. Labrincha, C. Leonelli. **An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders.** In Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. Cambridge, Woodhead publishing, pp. 19-47, ISBN 978-1-7842-276-1.
- [14] V.D. Glukhovskiy. **Ancient, modern and future concretes.** In Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, pp. 1-9.
- [15] Ines Garcia-Lodeiro, Angel Palomo, Ana Fernández-Jiménez. **An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders.** Materiales de Construcción. (2015) Vol. 64 pp. e022, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.

- [16] Glukhovskiy, V.D. **Ancient, modern and future concretes**. In Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev, Ukraine. pp. 1-9
- [17] Soósné Balczár Ida Anna. Alkáli aktivált, szervesetlen polimer bázisú kötőanyagrendszer fejlesztése. 2018. Veszprém. Pannon Egyetem.
- [18] P. Duxson, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W. M. Kriven, J.S.J. van Deventer. **The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 292. pp. 8-20
- [20] C. Li, N. Zhang, J. Zhang, S. Song és Y. Zhang. **C-A-S-H Gel and Pore Structure Characteristics of Alkali-Activated Red Mud-Iron Tailings Cementitious Mortar**. Materials (*Basel*). (2021) Vol.15. pp.112. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15010112>.
- [22] A. Fernández-Jiménez, F. Puertas, I. Sobrados, J. Sanz. **Structure of calcium-silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: influence of the type of alkaline activator**. Journal of the American Ceramic Society, 2003. Vol. 86. pp. 1389-1394
- [23] S.D. Wang, K.L. Scrivener. **Hydration products of alkaline activated slag cement**. Cement and Concrete Research, 1995. Vol. 25. pp. 561-571.
- [24] H.Q. Cheng, A. Tagnit-Hamou, S.L. Sarkar. **Strength and microstructural properties of water glass activated slag**. Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 245, pp. 49-54.
- [25] E.J. Oh, P.J. Monteiro, S.S. Jun, S. Choi, S. M. Clark. **The evolution of strength and crystalline phase for alkaline-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers**. Cement and Concrete Research, 2010. Vol. 40. pp. 189-196.
- [26] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, G. Kovalchuck, L.M. Ordonez, M.C. Naranjo. **OPC-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during alkaline hydration**. Journal of Materials Science, Vol. 42. pp. 2958-2966.
- [27] J.L. Provis, S.A. Bernal, **Geopolymers and related alkali-activated materials**, Annu Rev Mater Res. 2014. Vol. 44. pp. 299-327.
- [28] I.G. Richardson, A.R. Brough, G.W. Groves, C.M. Dobson, **The characterization of hardened alkali activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) paste**. Cem Concr Res. 1994. Vol. 24. pp. 813-829.
- [29] Provis, J.L., Palomo, A. and Shi, C. **Advances in understanding alkali-activated materials**. Cement and Concrete Research, 2015. Vol.78 (Part A). pp. 110-125. ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
- [30] Diego A. Gutiérrez-Orrgo, Maryory A. Gómez-Botero, Edwin F. García. **Alkali-Activated Hybrid Cement from Mineral Wool Fibre Waste and OPC**. Buildings. 2023. Vol. 13 pp. 354. <https://doi.org/10.3390/buildings13020354>
- [31] A. Font, L. Soriano, L. Reig, M.M. Tashima, M.V. Borrachero, J. Monzó, J. Payá: **Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production**. Materials Letters. 2018. Vol. 223. pp. 10-13. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.04.010>

- [32] M. Bing-hui, H. Zhu, C. Xue-min, H. Yan, G. Si-yu: **Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers**. Applied Clay Science. 2014. Vol 99. pp. 144-148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.024>
- [33] A.M. Kaja, A. Lazaro, Q.L. Yu: **Effects of Portland cement on activation mechanism of class F fly ash geopolymer cured under ambient conditions**. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 189. pp. 1113-1123, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.065>
- [34] P. Koutník, A. Soukup, P. Bezucha, J. Šafář, J. Kohout: **Low viscosity metakaolinite based geopolymer binders**. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 230. pp. 116978. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116978>
- [35] A. Nikolov, H. Nugteren, I. Rostovsky: **Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminate activators**. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 243. pp. 118257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118257>
- [36] J. L., Provis, J.S.J., Van Deventer: **Geopolymerisation kinetics. 1. In situ energy-dispersive X-ray diffractometry**. Chemical Engineering Science. 2007. Vol. 62. pp.2309–2317
- [37] R. A. Fletcher, K.J.D., MacKenzie, C.L., Nicholson, S., Shimada: **The composition range of aluminosilicate geopolymers**. Journal of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25 (9). pp. 1471–1477
- [38] K. Juengsuwattananon, F- Winnefeld, P. Chindaprasirt, K. Pimraksa. **Correlation between initial  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer**. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. pp. 406-417
- [39] X. Fang Wang, C. Li, G. Chen, H. Lin, W. Wu, Q. Wang, Q. Lan. **Effect of  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  on the chloride permeability of one-part alkali-activated nickel slag concrete**. Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. pp. 134348
- [40] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, V. Sirivivatnanon. **Kinetics of geopolymerization: Role of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$** . Cement and Concrete Research. 2007. Vol.37. pp. 512-518.
- [42] Kerekes S.: **A környezetgazdaságtan alapjai**  
<http://mek.oszk.hu/01400/01452/html/hulladek/index.html>  
(Hozzáférés ideje: 2018. 11. 20.)
- [43] Szabó I.: **Hulladék elhelyezés**  
<http://hulladekonline.hu/files/78>  
(Hozzáférés ideje: 2018. 11. 18.)
- [44] Csöke B., Böhm J. **A hulladék, mint nyersanyag**, A Miskolci Egyetem Közleménye A sorozat, Bányászat. 2002. 62. kötet. pp. 9-34
- [45] **Építési és bontási hulladék**  
[http://www.kvvm.hu/szakmai/hulladekgazd/hulladekgazdalkodas/hulladektipusok\\_epit\\_bont.htm](http://www.kvvm.hu/szakmai/hulladekgazd/hulladekgazdalkodas/hulladektipusok_epit_bont.htm)  
(Hozzáférés ideje: 2018. 11. 20.)

- [46] Q. Li, Y. Qiu, A. Rahman et al. **Application of Steel Slag Powder to Enhance the Low temperature Fracture Properties of Asphalt Mastic and its Corresponding Mechanism**, Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 184. pp. 21-31  
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.245>
- [47] Z. Chen, S. Wu, J. Wen, et al. **Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture**, Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. pp. 911-918  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.070>
- [48] M.Chen, J. Lin, S. Wu et al. **Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture**. Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. pp. 1532-1536.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>
- [49] S. Wu, J. Zhu, J. Zhong et al. **Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder**. Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. pp. 2883-2887.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040>
- [50] S. Masoudi, S. Abtahi, A. Goli.: **Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging**, Construction and Building Materials. 2017. Vol. 135. pp. 260-266
- [51] M.A-T. Alsheyab. **Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development**. International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol.19. pp. 2129-2138. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03217-1>
- [52] M.A-T. Alsheyab. **Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development**. International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol.19. pp. 2129-2138. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03217-1>
- [53] <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1200185.tv> (Hozzáférés ideje:2023.09.13.)
- [54] <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1300072.vm> (Hozzáférés ideje:2023.09.13.)
- [55] **Generation of waste by waste category**, Eurostat <http://ec.europa.eu/eurostat.hu> (Hozzáférés ideje:2023.09.13.)
- [56] **Waste generation by economic activities and households**, 2020, [https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Waste statistics#Total waste generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation) (Hozzáférés ideje:2023.09.15.)
- [57] Hulladékgazdálkodók Országos Szövetsége,  
<https://hosz.org/korforgas/mi-az-a-korforgasos-gazdasag-diohejban> (Hozzáférés ideje:2023.09.15.)
- [58] A. Aliabdo, H. Hassan. **Utilization of crushed clay brick in concrete industry**. Alexandria Engineering Journal. 2014. Vol. 53. pp. 151-168  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>
- [59] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta.. **Application of waste materials as fillers in bituminous mixes**. Waste Management. 2018. Vol. 78. pp. 417-425

---

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.009>

[60] N. Bilgin, H. Yeprem, S. Arslan et al. **Use of waste marble powder in brick industry**, Construction and Building Materials. 2012. Vol. 29. pp. 449-457

<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>

[61] M. Chen, J. Lin, S. Wu. **Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture**, Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. pp. 3909-3914

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>

[62] S. Bhusal, X. Li, H. Wen. **Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt**. Journal of the Transportation Research Board. 2011. Vol. 2205. pp. 36-39

<http://doi.org/10.3141/2205-05>

[63] M. Batayneh, I. Marie, I. Asi. **Use of selected waste materials in concrete mixes**. Waste Management. 2007, Vol. 27. pp. 1870-1876

<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>

[64] J. Gallego, M. Toledano, J. Talbo et al. **Asphalt mixtures with construction and demolition debris**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport. 2010. Vol. 163. pp. 165-174

<http://doi.org/10.1680/tran.2010.163.4.165>

[65] J. Seo, D. Park, T. Ho et al. **Development of an asphalt concrete mixture for Asphalt Core Rockfill Dam**. 2017. Vol. 14. pp. 301-309

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.100>

[66] A. Arulrajah, J. Piratheepan, M. Disfani et al. **Demolition Materials in Pavement Subbase Applications**, Journal of Materials in Civil Engineering. 2013. Vol. 25. pp. 1077-1088

[http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652)

[67] A. R. Pasandín, I. Pérez. **Adhesion of Recycled Concrete Aggregates, Demolition Debris, and Asphalt**, Petroleum Science and Technology, 2014. Vol. 32. pp. 2584-2591

<https://doi.org/10.1080/10916466.2013.856444>

[68] S. Sasui, G. Kim, J. Nam, S. F. Alam, H. Eu, Y. Lee, M. Ahmad: **Alkali activation of waste concrete powder: Effects of alkali type and concentration**; Ceramics International Vol. 49 2023 pp. 16260–16271

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.224>

[69] S. Sasui, G. Kim, A. Riessen, S. F. Alam, J. Nam, S. Ishak, H. Eu: **Influence of elevated temperature on waste concrete powder and its application in alkali activated materials**; Journal of Cleaner Production Vol. 434 2024 140423

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140423>

[70] D. Zaharaki, M. Galetakis, K. Komnitsas: **Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation**; Construction and Building Materials Vol. 121 2016 pp. 686–693

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.051>



- [71] P. Ren, B. Li, J-G. Yu, T-C. Ling: **Utilization of recycled concrete fines and powders to produce alkali activated slag concrete blocks**; Journal of Cleaner Production Vol. 267 2020 122115 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122115>
- [72] L. Chen, M. Wei, N. Lei, H. Li: **Effect of chemical–thermal activation on the properties of recycled fine powder cementitious materials**; Case Studies in Construction Materials Vol. 20 2024 e02956 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02956>
- [73] N. Miyan, T. Omur, B. Amed, H. Özkan, R. Aydin, N. Kabay: **Recycled waste concrete and metakaolin based alkali-activated paste: Characterization, optimization, and life cycle assessment**; Construction and Building Materials, Vol 416. 2024 135233 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135233>
- [74] Nguyen, Q.D.; Castel, A. **Reinforcement corrosion in limestone flash calcined clay cement-based concrete**. Cement. Concr. Res. 2020. Vol. 132. pp. 106051
- [75] Shahrou, N.; Allouzi, R. **Shear behavior of captive- and short- column effects using different basalt aggregate contents**. J. Build. Eng. 2020. Vol. 32. pp.101508.
- [76] Delsaute, B.; Staquet, S. **Development of strain-induced stresses in early age concrete composed of recycled gravel or sand**. J. Adv. Concr. Technol. 2019. Vol. 17. pp. 319–334.
- [77] Shoaie, P.; Musaei, H.R.; Mirlohi, F.; Narimani zamanabadi, S.; Ameri, F.; Bahrami, N. Waste ceramic powder-based geopolymer mortars: **Effect of curing temperature and alkaline solution-to-binder ratio**. Constr. Build. Mater. 2019. Vol. 227. pp. 116686.
- [78] Nadesan, M.S.; Dinakar, P. **Mix design and properties of fly ash waste lightweight aggregates in structural lightweight concrete**. Case Stud. Constr. Mater. 2017. Vol. 7. pp. 336–347
- [79] Anja Terzić, Lato Pezo, Vojislav Mitić, Zagorka Radojević. **Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances**. Ceramics International. 2015. Vol.41 pp. 2714–2726. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.086>
- [80] P.Tang, M.V.A. Florea, H.J.H. Brouwers. **Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash**. Journal of Cleaner Production. 2017 Vol.165. pp. 1371-1384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.234>
- [81] Pengfei Ren, Tung-Chai Ling, Kim Hung Mo. **Recent advances in artificial aggregate production**. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 291 pp. 125215, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125215>
- [82] Rafiza Abd Razak, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Kamarudin Hussin, Subaer, Zarina Yahya, Rosnita Mohamed, Alida Abdullah. **Performance of Sintered Pozzolanic Artificial Aggregates as Coarse Aggregate Replacement in Concrete**. Sustainable Waste Utilization in Bricks, Concrete, and Cementitious Materials. 2021. Vol. 129. pp. 191-210

- [83] Mohammad Almadani, Rafiza Abd Razak, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Rosnita Mohamed. **Geopolymer-Based Artificial Aggregates: A review on Methods of Producing, Properties, and Improving Techniques.** Materials. 2022. Vol.16 pp. 1-27. <https://doi.org/10.3390/ma15165516>
- [84] Chakermphan Narattha, Arnon Chaipanich. **Phase characterizations, physical properties and strength of environment-friendly cold-bonded fly ash lightweight aggregates.**Journal of Cleaner Production. 2018. Vol.171. pp. 1094-1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.259>
- [85] Puput Risdanareni, Katrin Schollbach, Jianyun Wang, Nele De Belie. **The effect of NaOH concentration on the mechanical and physical properties of alkali activated fly ash-based artificial lightweight aggregate.** 2020. Vol. 259. pp. 119832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119832>
- [86] Dongyun Wang, Chong Cui, Xue-Fei Chen, Shihua Zhang, Hailong Ma. **Characteristics of autoclaved lightweight aggregates with quartz tailings and its effect on the mechanical properties of concrete.** 262 (2020) pp. 120110, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120110>
- [87] Shunfeng Wang, Long Yu, Fei Yang, Weikang Zhang, Linglin Xu, Kai Wu, Luping Tang, Zhenghong Yang. **Resourceful utilization of quarry tailings in the preparation of non-sintered high-strength lightweight aggregates.** Construction and Building Materials. 2022. Vol.334 pp. 127 444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127444>
- [88] Shi Ying Kwek, Hanizam Awang, Chee Ban Cheah, Hasmaliza Mohamad. **Development of sintered aggregate derived from POFA and silt for lightweight concrete.** Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 49. pp. 104039. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104039>
- [90] Mohammad Balapour, Weijin Zhao, E.J. Garboczi, Nay Ye Oo, Sabrina Spatari, Y. Grace Hsuan, Pieter Billen, Yaghoob Farnam. **Potential use of lightweight aggregate (LWA) produced from bottom coal ash for internal curing of concrete systems.** Cement and Concrete Composites. 2020. Vol.105. pp. 103428, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103428>
- [91] Le Anh-tuan Bui, Chao-lung Hwang, Chun-tsun Chen, Kae-long Lin, Meng-ying Hsieh. **Manufacture and performance of cold bonded lightweight aggregate using alkaline activators for high performance concrete.** Construction and Building Materials. 2012. Vol.35 pp. 1056–1062, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.032>
- [92] Murat Tuyan, Özge Andiç-Çakir, Kambiz Ramyar. **Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer.** Composites Part B. 2018. Vol.135. pp. 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>
- [93] Noorina Hidayu Jamil, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Wan Mohd Arif W. Ibrahim, Razna Rahim, Andrei Victor Sandu, Petrica Vizureanu, João Castro-Gomes, José Manuel Gómez-Soberón. **Effect of Sintering Parameters on Microstructural Evolution of Low Sintered Geopolymer Based on Kaolin and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag.** Crystals. 2022. Vol. 12. pp. 1553, <https://doi.org/10.3390/cryst12111553>
- [94] Kosuke Nishikawa, Shinobu Hashimoto, Haruo Imai, Sylvie Rossignol. **Cold reaction sintering for preparation of ultra-dense geopolymer products.** Cold reaction sintering for preparation of

- ultra-dense geopolymer products.** Construction and Building Materials. 2022. Vol.328. pp. 127101, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127101>
- [95] Lan-Ping Qian, Bo-Tao Huang, Ling-Yu Xu , Jian-Guo Dai. **Concrete made with high-strength artificial geopolymer aggregates: Mechanical properties and failure mechanisms.** Construction and Building Materials. 2023. Vol.367. pp. 130318, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104039>
- [96] 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>
- [97] N. Tang, K. Yang, Y. Alrefaei, J.G. Dai, L.M. Wu, Q. Wang. **Reduce VOCs and PM emissions of warm-mix asphalt using geopolymer additives.** Construction and Building Materials. 2020. Vol. 244. pp. 118338, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118338>
- [98] C. Ago, G. Li, J. Wu, N. Yusuff. **Feasibility Study of Using Hydrophobic Geopolymer-Based as Aggregate Substitution in Asphalt Mixture.** Polymers 15 2023. pp.3077. <https://doi.org/10.3390/polym15143077>
- [99] M. P. Wistuba, H. Grothe, J. Grönniger, F. Handle: **Adhesion of Bitumen: screening and evaluating laboratory testing techniques;** 5<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15<sup>th</sup> June 2012, Istanbul
- [100] K. Pstrowska, V. Gunka, Y. Prysiazhny, Y. Demchuk, Y. Hrynychuk, I. Sidun, M. Kułazyński, M. Bratychak: **Obtaining of Formaldehyde Modified Tars and Road Materials on Their Basis;** Materials 2022. Vol. 15. pp. 5693.
- [101] M. Paliukaitė, V. Vorobjovas, M. Bulevicius, V. Andrejevas: **Evaluation of different test methods for bitumen adhesion properties;** Transportation Research Procedia. 2016. Vol.14. pp. 724–731.
- [102] P. Chindaprasirta, T. Phoo-ngernkhamc, S. Hanjitsuwand, S. Horpibulsuke, A. Poowancumf, B. Injorho. **Effect of calcium-rich compounds on setting time and strength development of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature.** Case Studies in Construction Materials. 2018. Vol. 9. pp. e00198. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00198>
- [103] H. M Khater. **Effect of Calcium on Geopolymerization of Aluminosilicate Wastes.** Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. Vol. 24. pp. 92-101. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000352](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000352)
- [104] 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>
- [105] DR. Borsónyi Adorján, Szijártó 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>
- [106] Gömze A. L., Liszátné Helvei Á., Simonné Odler A., Szabó M. **Kerámiaipari évkönyv I.** 2001. (Hozzáférés ideje:2023.09.13.)

- [107] Meselia Hungaria Kft. **Metakaolin**. <https://meselia.com/metakaolin/>. (Hozzáférés ideje: 2023.04.27.)
- [108] <http://www.novochem.hu/index.php?op=3016> (Hozzáférés ideje: 2023.10.17.)
- [109] <https://www.thermofisher.com/blog/ask-a-scientist/what-is-xrf-x-ray-fluorescence-and-how-does-it-work/>
- [110] <https://xrf-spectroscopy.com/> (Hozzáférés ideje: 2023.10.17.)
- [113] [https://www.ogyei.gov.hu/dynamic/GYK2010/2\\_9\\_31\\_6\\_6.pdf](https://www.ogyei.gov.hu/dynamic/GYK2010/2_9_31_6_6.pdf) .  
(Hozzáférés ideje: 2023.10.17.)
- [115] Havancsák Károly, Dankházi Zoltán: **Pásztázó elektronmikroszkópia**, ELTE Anyagfizikai Tanszék, mérésleírás 51 <http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf>  
(Hozzáférés ideje: 2016. 07.27.)
- [116] Pozsgai Imre és Marthi Katalin: **Pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis, tananyag**
- [117] <https://www2.sci.u-szeged.hu/inorg/MOMA/ch08s03.html> (Hozzáférés ideje: 2024. 08. 29.)
- [118] Laczkó László, Wojnárovitsné Dr. Hrapka Ilona, Fórizs Katalin (2014): “**Anyagvizsgálati lehetőségek a SZIKKTI Labor Kft.-ben**”. Üvegipari Szakmai Konferenci Budapest, 2014. Vol. 11. Elérhető: <https://szte.org.hu/upload/Anyagvizsgalat.pdf> (Hozzáférés ideje: 2024.05.27.)
- [<sup>120</sup>] MSZ EN 1097-7:2008-**A kőliszt anyagsűrűségének meghatározása**. Piknométeres módszer
- [121] MSZ EN 1097-4:2000- **A szárazon tömörített kőliszt hézagterfogatának meghatározása**
- [122] Prithvi S. Kandhal Cynthia Y. Lynn Frazier Parker, Jr: Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures. NCAT Report No. 98-2 (1998)
- [123] Géber Róbert: **Mész kőliszt és dolomit töltőanyagok hatása aszfalthabarcok reológiai tulajdonságaira**. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem. 2012
- [126] Sas Zoltán. **Építőanyagok radonemanációját és exhalációját befolyásoló paraméterek meghatározása**. Doktori (PhD) értekezés. Pannon Egyetem. Radiokémiai és Radioökológiai Intézet. Kémiai és Környezettudományi Doktori Iskola. 2012.
- [127] MSZ EN 196-3:1990. **Cementvizsgálati módszerek. 3. rész: A kötési idő és a terfogatállandóság meghatározása. 6. fejezet: A kötési idő meghatározása.**
- [128] Mihály Levente. **Nedvesítési tulajdonságok vizsgálata acél alapanyagon**. Budapesti Műszaki Gazdaságtudományi Egyetem. Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar. Gépjárműtechnológia tanszék. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest. 2017.
- [129] Pécsi Tudomány Egyetem. Gyógyszertechnológiai Intézet. **Szuszpenziók**. [file:///C:/Users/Bella/Downloads/\(2\)\\_T2-2020-02-13\\_Diszperz\\_rendszerek,\\_Szuszpenziok\\_VHB.pdf](file:///C:/Users/Bella/Downloads/(2)_T2-2020-02-13_Diszperz_rendszerek,_Szuszpenziok_VHB.pdf)  
(Hozzáférés ideje: 2023.05.30.)
- [130] P. A. Webb. **An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data**; Micromeritics Instrument Corporation. 2001

- 
- [131] <http://cheminst.emk.nyme.hu/ragaszto/peremsz.pdf> (Hozzáférés ideje: 2024.01.30.)
- [132] A. R. Boccaccini and P. A. Trusty. **In Situ Characterization of the Shrinkage Behavior of Ceramic Powder Compacts during Sintering by Using Heating Microscopy.** *Materials Characterization* Vol. 41 Issue 4, 1998, pp. 109-12, [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(98\)00025-4](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(98)00025-4)
- [133] G. Zsoldos, I. Kocserha and A. Szegedi: Determining the Viscosity of Rarely Examined Glasses *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 812, pp 405-410, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.812.405>
- [134] Makó, É., Kristóf, J., Horváth, E., and Vágvölgyi, V. **Kaolinite–urea complexes obtained by mechanochemical and aqueous suspension techniques—A comparative study.** *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009. Vol. 330. pp 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.10.05>
- [135] <https://www.airproducts.hu/applications/fourier-transform-infrared-spectroscopy>
- [136] <https://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kemia7/www/ch04s02.html>
- [137] I.S. Bessa, V.T.F. Castelo Branco, J.B. Soares, J.A. Nogueira Neto, **Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt,** *Journal of Material Civil Engineering*. Vol. 27. pp. 04014212-1  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000118)
- [138] Thermo Scientific Mercury Porosimeter PASCAL 140 Series Instruction Manual PN 317 130 26, Revision April 2009
- [139] Thermo Scientific Mercury Porosimeter PASCAL 440 Series Instruction Manual PN 317 130 30, Revision April 2009
- [140] K. Aligizaki. **Pore structure of Cement – Based Materials.** Taylor & Francis, New York, 2006
- [141] Y. Wang, X. Liu, W. Zhang, Z. Li, Y. Zhang, Y. Li, Y. Ren: *Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer.* *Cleaner Production*. 2020. Vol. 244, pp. 118852, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118852>
- [142] X. Li, F. Rao, S. Song, M. A. Corona-Arroyo, N. Ortiz- Lara, E. A. Aguilar-Reyes. **Effects of aggregates on the mechanical properties and microstructure of geothermal metakaolin-based geopolymers.** *Results in Physics*. 2018. Vol 11. pp. 267-273, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.018>
- [143] X. Li, F. Rao, S. Song, Q. Ma. **Deterioration in the microstructure of metakaolin-based geopolymers in marine environment.** *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol 8. pp. 2747-2752. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.03.010>
- [144] X. Guo, H. Shi. **Metakaolin-, fly ash- and calcium hydroxide-based geopolymers: effects of calcium on performance.** *Advanced in Cement Research*. 2015. Vol 27. pp. 559-566. <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.14.00081>
- [145] Prithvi S. Kandhal Cynthia Y. Lynn Frazier Parker, Jr. **Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1638. pp. 101–110. <https://doi.org/10.3141/1638-12>

[146] <https://compositevisions.com/wp-content/uploads/2021/06/model-1095-aerosil-200-sds.pdf>

(Hozzáférés ideje: 2023.01.30.)

[147] M. Weil, U. Jeske, K. Dombrowski, A. Buchwald. **Sustainable Design of Geopolymers-Evaluation of Raw Materials by the Integration of Economic and Environmental Aspects in the Early Phases of Material Development.** In Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses; Proceedings of the 14<sup>th</sup> CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Waseda University. Tokyo. 2007. pp. 279-283.

[148] MSZ EN 196-3:2017. **Cementvizsgálási módszerek.** 3. rész: A kötési idő és a térfogatállandóság meghatározása. 6. fejezet: A kötési idő meghatározása

[149] MSZ EN 12697-11:2012 **Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei.** 11. rész: A bitumen tapadókéességének meghatározása kőanyagalmazon

[150] 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>