

Geopolimer kutatások a BME-n

Geopolymer research at the BME

*Dr. KOPECSKÓ Katalin egyetemi docens¹,
HAJDU Mátyás építőmérnök², FEJES András építőmérnök³,
RUSSÓI András építőmérnök⁴, KHALAF Ali Abdulhasan PhD hallgató¹*
¹ BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

² ARC-S Engineering & Design Ltd.

³ DÉKETTŐ Statikus Iroda Kft.

⁴ AFRY Erőterv Zrt.

E-mail: kopecsko.katalin@emk.bme.hu Tel: (36-1) 463-2238, Fax: (36-1) 463-2017

<http://gmt.bme.hu/>

Abstract

Alkali-activated binders, including “geopolymers,” have attracted great interest in recent decades in both the scientific and industrial worlds. These materials can be prepared by alkaline activation of solid aluminosilicates, which are generally available as industrial by-products. The activator can be a concentrated aqueous solution of alkali hydroxide, silicate, carbonate or even alkali sulphate. Geopolymers can be considered as artificial rock. Portland cement can be substituted up to 100% with alkali-activated or geopolymeric type materials. In this article, we summarize the results of our research on geopolymers.

Keywords: alkali-activated materials, geopolymer, sustainability, eco-cement, green concrete

Kivonat

Az alkáli-aktivált kötőanyagok, beleértve a „geopolimereket” is, az elmúlt évtizedekben nagy érdeklődést váltottak ki mind a tudományos, mind az ipari világban. Ezeket az anyagokat általában ipari melléktermékként rendelkezésre álló szilárd alumino-szilikátok lúgos aktiválásával lehet előállítani. Az aktivátor lehet alkáli-hidroxid, -szilikát, -karbonát vagy akár alkáli-szulfát tömény vizes oldata. A geopolimerek tulajdonképpen mesterséges kőzetnek tekinthetők. Az alkáli-aktivált, illetve geopolimer jellegű anyagokkal akár 100%-ban helyettesíthető a portlandcement. Jelen cikkben a geopolimer témakörben végzett kutatásaink eredményeit foglaljuk össze.

Kulcsszavak: alkáli-aktivált anyagok, geopolimer, fenntarthatóság, öko-cement, ökobeton

1. BEVEZETÉS

Az alkáli-aktivált, illetve geopolimer jellegű anyagok beton kötőanyagként történő alkalmazása viszonylag újkeletű, ígéretes tudományos kutatási terület, mivel felhasználásukkal 100%-ban helyettesíthető a portlandcement. Kutatásuk oka továbbá, hogy a geopolimerek elkészíthetők pl. a széntüzelésű erőművek működéséből felhalmozódó pernyéből vagy a nyersvasgyártásból származó kohósalakból. Ezért a témában jelenleg is világszerte zajlanak kutatások, ezen kívül jónéhány alkalmazás is ismert [1, 2, 3]. A geopolimerek többek között az építőanyagok új családjának is tekinthetők. A geopolimer kötőanyagokkal kompozit anyagok hozhatók létre, amelyek veszélyes és radioaktív hulladékok beágyazására is alkalmasak lehetnek, és alkalmazásukkal a fenntartható fejlődés célkitűzési és a környezettudatosság elvei is érvényesíthetők.

Tudományosan bizonyított tény, hogy a modern ipari tevékenységek bolygónkra nagy hatással vannak. Emberi élettevékenységünk a kimeríthető természeti erőforrások fogyasztását igényli. További ismert tény, hogy az üvegházhatású gázok légkörbe engedése a bolygó hőháztartásában változást, általános felmelegedést okoz. Mérnökként olyan döntések meghozói vagyunk, amelyek környezetünkre mindenféleképpen jelentős mértékű építészeti, társadalmi, ökológiai és gazdasági hatással vannak. Felelőségünk tudatában, kötelességünk tehát módszereink olyan irányú fejlesztése, amely lehetővé teszi újabb technológiák és anyagok használatát, amelyek minél kisebb ökológiai lábnyomot hátra hagyva képesek teljesíteni a megrendelői igényeket.

Ilyen technológiák fejlesztésével akkor érdemes foglalkozni, ha a módszer nem csak a használhatósági, beépíthetőségi feltételeknek, de a piac által elfogadható gazdasági igényeknek is megfelel. Új anyagoknak akkor van jövője, ha egy jól ismert másik anyagot helyettesíteni, vagy annak tulajdonságait akár felülmúlni is képes. A helyettesítést viszont körültekintően, lépésről lépésre, tapasztalati adatok gyűjtésével, valamint a hosszú távú viselkedés megismerését követően tehetjük meg.

Szakmai szempontból egy anyag felhasználási lehetőségeit mérlegelve, egyedül az anyag makroszkópius viselkedése az érdekes. Elsősorban a szilárdsági, rugalmassági és időállósági tulajdonságokat kell megismernünk, hiszen mérnöki szemlélet alapján ezen a tényezőkre alapján tudunk tervezni és eldönteni, hogy anyagunk egyáltalán alkalmas-e valamilyen szerkezeti felhasználásra.

Fontos belátnunk viszont, hogy az anyagok molekuláris tulajdonságainak ismerete nem választható el az anyagi viselkedés megértésétől. A mérnökileg indokolt szintig szükséges elmélyednünk az anyag kémiai, molekuláris vizsgálatában, hogy az anyag használata valóban hatékony, és legfőképpen biztonságos legyen. Az anyag kémiájának megfelelő mértékű ismeretével kiküszöbölhetjük az olyan hibákat, amelyek csak hosszú évek, évtizedek eltelte után tapasztalhatók (mint pl. bauxitbeton szilárdság-csökkenése) [4].

Az egyik legelterjedtebb és legáltalánosabban alkalmazott építőanyag a beton. Ez az anyag, ma már évszázados hagyományokra tekint vissza. A nagyarányú felhasználás indokolja az anyag ökológiai lábnyomát csökkenteni kívánó törekvéseket és innovációkat. Jelenleg is rengeteg kutatás folyik a betontechnológiában, világszerte. Ennek köszönhetően a beton fogalma ma már nem csupán egy jó tulajdonságú, praktikus anyagot takar, hanem egy gyakran alkalmazott építészeti motívum is.

A szokványos betonok kötőanyagként az esetek döntő többségében portlandcementet használunk. A portlandcement előállítása az elsődleges nyersanyag igénye mellett intenzív energiafogyasztással, és nagymennyiségű üvegházhatást okozó gáz keletkezésével jár. Bizonyos becslések szerint a betonipar évente több mint 4 milliárd tonna cement előállítását igényli a világon, amely a Föld összes CO₂ kibocsátásának kb. 7-8%-áért felelős [5]. Egy tonna portlandcement előállításával közelítőleg egy tonna széndioxid kerül a légkörbe [6]. Ezen okokból kifolyólag az ún. heterogén cementekben a tiszta portlandcement klinker egy részét puccolános anyaggal vagy anyagokkal (kohósalak, pernye, trassz, metakaolin) helyettesítik. Ezek az anyagok a cementtel együtt jól használhatók, a szilárdulást segítik, illetve jelentős utószilárdulással bírnak.

Az elmúlt évszázad második felétől jelentős kutatások folytak a kohósalak (GGBS) és a pernye kötési képességének hasznosítására. Ezek az anyagok képesek vízzel közvetlenül hidraulikus kötést létrehozni (látens hidraulitok) vagy aktiváló anyag hatására (puccolánok) megkötni. Ilyen aktiváló anyag a beton esetén a cementhidratáció során keletkező portlandit, Ca(OH)₂. Ezek az anyagok másodlagos kötőanyagként minősülnek, mert csak portlandcement klinker hidratációja következtében keletkező Ca(OH)₂ hatására képesek megkötni. Ezen folyamat következtében keletkeznek a beton szilárdsághordozó kalcium-szilikát-hidrát (CSH) fázisai [7].

Az ideális, „zöld” (öko-) betonban a portlandcement esetleges teljes elhagyása lenne a cél. Ezért felmerül a kérdés, hogy az eddigiektől különböző módszerrel alkalmasak lehetnek-e a fenti, puccolános tulajdonságú ipari melléktermékek valamilyen önálló kötőanyag kialakítására. A legújabb betontechnológiai kutatások ezt az irányt jelölték ki célul. Joseph Davidovits 1978-ban bevezette a „geopolimer” kifejezést, amely szeretlen amorf szerkezetű, poli-szilikát (Si-Al-Si) polimer anyagok terminológiáját takarja. Ezek az anyagok lúgos közegben állíthatók elő, alumino-szilikát-oxidok és alkáli-szilikátok reakciójával. A kifejezésben „geo” tag arra utal, hogy az anyagra jellemző polimerizációs folyamatokat először talajban fellelhető agyagásványok (alumino-szilikát-oxidok) szilárdulásával kapcsolatban figyelték meg [8, 9]. Ez az anyag valóban használható a cement teljes helyettesítésére is, mivel a polimerláncok képesek az adalékanyag szemcséket megfelelő módon megkötni. Az így keletkező geopolimer-beton szerkezetében merőben eltér a hagyományos betontól, de tulajdonságaiban képes lehet annak helyettesítésére. Kiváló kémiai ellenálló képességgel, hőállósági tulajdonságokkal és megfelelő szilárdsággal rendelkezik.

A geopolimer-beton készítésére alkalmas a legtöbb puccolános anyag (pernye, kohósalak, metakaolin, üveghulladék, vörösiszap). Ezek egy része korábban fel nem használt ipari hulladék, illetve kisebb mértékben kiaknázott ipari melléktermék. Példaként említhetjük, hogy a széntüzelésű erőművekből visszamaradó pernye hazánkban viszonylag kis mennyiségben kerül felhasználásra, mint melléktermék. A geopolimer cement készítéséhez ezeket az anyagokat nem szükséges még egyszer kiegészíteni, mint a portland cement esetén a klinkert, így a hagyományos cementhez képest megközelítőleg, akár 80%-kal kisebb széndioxid kibocsátással, és jóval kevesebb energia befektetésével jár ennek a kötőanyagknak az előállítása [10].

A BME Építőmérnöki Karán a geopolimer témakörben a következő kutatások kapcsán sikerült elmélyülni és eredményeket elérni: 2014-2018 között a COST action TU1404 projekt kapcsán; az Osztrák-Magyar Tudományos és Oktatási Kooperációs Akció Alapítvány 95öu6 sz. (2016-17), valamint 101öu10 sz. (2019-20) projekt támogatása kapcsán; valamint az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózió ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázat

kapcsán. Ezen projektek keretében Dr. Kopecskó Katalin irányításával a következő diplomamunkák születtek: 2013-ban Horváth Marcell BSc [11], 2016-ban Kolos Gergely [12], 2017-ben Hajdu Mátyás Benjamin [13], 2019-ben Fejes András Márk [14] és 2021-ben Russói András [15] MSc diplomamunkái. 2019-től geopolimer jellegű doktori kutatási témán dolgozik Khalaf Ali Abdulhasan [16] PhD hallgató. Kutatásaink célja a hazai adottságokkal készíthető geopolimer kötőanyagok tulajdonságainak optimalizálása, a fizikai, mechanikai és kémia tulajdonságaik megismerése által. Jelen cikkben ezen kutatások célkitűzéseit és eredményeit foglaljuk össze.

2. GEOPOLIMER KUTATÁS – LÉPÉSRŐL LÉPÉSRE

2.1. Nagy pernye adagolású betonok kutatása a COST action TU1404 projekt keretében

2014 és 2018 között részt vettünk a COST action TU1404 (Towards the next generation of standards for service life of cement-based materials and structures) COST projektben. Ennek fő célja irányelvek és ajánlások megfogalmazása volt, a cementkötésű anyagok és szerkezetek élettartamának előrejelzéséhez és értékeléséhez, a legújabb kísérleti és numerikus ismeretek integrálásával. Munkánkat elsősorban a WG1 – Testing of Cement-Based Materials munkacsoportban végeztük, ahol részt vettünk a körvizsgálatában (Round Robin test). Az egyes tagok bevonhatták a kutatásba a helyileg rendelkezésre álló másodlagos nyersanyagokat (ipari melléktermékeket, mint pl. pernye, salak, stb.), öko cementet vagy ökobetont létrehozva. Az általunk kiválasztott másodlagos nyersanyag a lignit por égetéséből származó visontai erőművi pernye volt, a pernye betonban történő nagyarányú alkalmazásának tanulmányozása. Nagy adagolásról általában akkor beszélünk, ha a beton kiegészítő anyag tartalma eléri legalább az 50 m%-ot. A projekt programjához a nagy pernye adagolású betonokkal csatlakoztunk [12]. A pernyeadagolás hatására bekövetkező változásokat különböző mértékű adagolás (25, 50 és 75 V% cement helyettesítés), örlési állapot és különféle egyéb kiegészítő anyagok alkalmazása mellett tanulmányoztuk. A szokványos, cementkötésű betonban történő alkalmazáson túlmenően cementmentes (100 V% cement helyettesítés), ún. geopolimer betonok vizsgálatára is kitértünk. A vizsgált geopolimer betonok kötőanyaga alkáli-aktivált pernye volt, ezek a keverékek portlandcement klinkert egyáltalán nem tartalmaztak.

Az egyre növekvő energiaszükséglet következtében jelenleg is folyik a fosszilis eredetű energiahordozók kiaknázása, így a szénportüzelésű hőerőművekben melléktermékként keletkező pernye mennyisége évről-évre fokozódik, halmozódik. A pernye felhasználása és hasznosítása az elkövetkezendő évtizedekben is fontos célkitűzés. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ezeknek a pernyéknek a tulajdonságai eltérőek, mind kémiai összetételüket, aktivitásukat tekintve, mind fizikai tulajdonságaikat tekintve jelentős különbségek lehetnek [17]. Fizikai és kémiai tulajdonságainak függvényében lehetőség nyílik arra, hogy a pernyét felhasználjuk a hagyományos portlandcement részleges, vagy akár teljes helyettesítésére.

A kutatás során a portlandcement változó térfogatarányban (25 V%, 50 V%, 75 V%) történő helyettesítésével 10 féle pernyeadagolású és 2 féle klinkermentes, kizárólag pernye felhasználásával készült geopolimer beton receptúrát vizsgáltunk. A vizsgálati eredményeket egy helyettesítés nélküli, portlandcement referencia betonnal hasonlítottuk össze. A 75 V%-ban helyettesített beton esetében a pernye adagolása miatt bekövetkező kezdeti szilárdságcsökkenést különböző kiegészítő- és tulajdonságjavító anyagok alkalmazásával, valamint a pernye mechanikai aktiválásával (örlésével) igyekeztünk kompenzálni. A pernyeadagolású keverékek esetén állandó vizsgálati paraméter volt az adalékanyag-váz, a kötőanyag-térfogat és a víztartalom. Minden keverék esetében a referencia betonéval megegyező adalékanyag-vázzal alakítottunk ki.

A frissbeton eredmények alapján a pernyeadagolású keverékeknek a növekvő pernyeadagolás hatására romlott a konzisztenciája, a geopolimer frissbeton esetében pedig a szokványos betonokétól jelentősen eltérő viselkedést figyeltünk meg. A pernyeadagolás növelésével a szilárdsági értékek a várakozásnak megfelelően csökkentek, de jelentős utószilárdulással rendelkeztek, ugyanakkor a permeabilitás és a vízfelvétel növekedett, a tűzállóság javult. A kloridion behatolás mértéke az örlött pernyével készült keverékek esetén csökkent a nyers pernyével készített keverékekéhez képest. A pernye aktivitása az örlés hatására jelentősen növekedett. A geopolimer beton szilárdulási folyamata a szárítószekrényben elvégzett hőkezelés hatására gyorsult.

Amennyiben a korai nagy szilárdság nem követelmény, a nagy pernyeadagolás (75 V% cementhelyettesítés) esetén az örlött pernye és szilikapor együttes alkalmazásával nagyon ígéretes eredmények születtek, a szilárdságcsökkenés ellenére. A cement nyers pernyével történő helyettesítése kifejezetten jó eredményeket adott a 25 V%-os cementhelyettesítés esetében [12]. Ugyanakkor az alkáli-aktivált pernye kötőanyagú, „geopolimer” jellegű betonok viselkedésének alaposabb megismerése céljából további kutatásokat céloztunk meg [13].

2.2. Geopolimer kötőanyag optimalizálási kísérletek

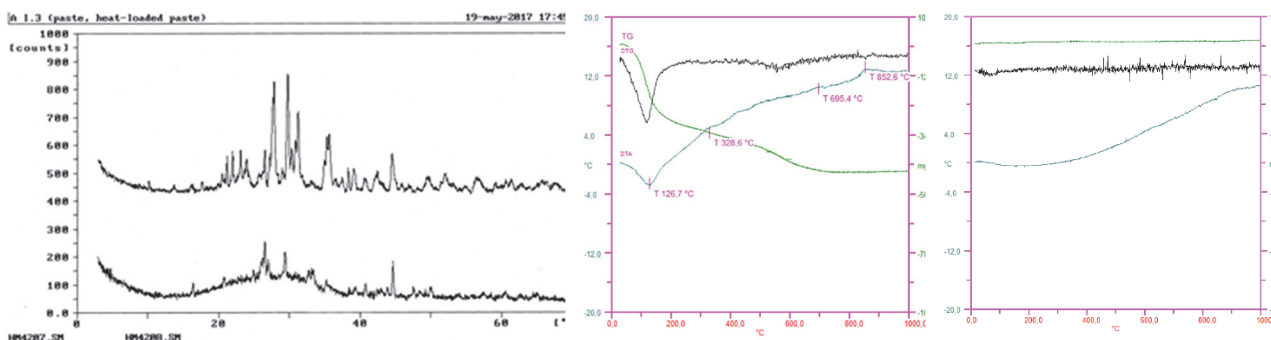
A COST projekt során elkezdett geopolimer kutatásainkat kötőanyag optimalizálási kísérletekkel folytattuk. A kutatás célja egy, hazai lehetőségek között előállítható, cementet helyettesíteni képes, újfajta kötőanyag kidolgozása. Ennek oka, hogy a cementgyártás jól ismert környezeti hatásait figyelembe véve, a modern tudományos élet alternatívákat keres a portlandcement kiváltására. Ebbe a kutatási tendenciába való becsatlakozás magas szintű és aktuális építőmérnöki feladat.

Ez a kutatás két részből állt. Az első részben a geopolimer kötőanyagot pépszinten tanulmányoztuk: 30 különböző kötőanyag keveréket vizsgáltunk. A kísérletek a következő kötőanyag típusok kutatására irányulnak:

- nyers lignit pernye és kohósalak alapú geopolimerek
- tisztított szűrt kőszénpernye és kohósalak alapú geopolimerek
- szulfát aktivált kohósalakok
- kohósalak-metakaolin alapú geopolimerek.

Az alkalmazott aktivátorok és prekursorok (pernyék, kohósalak, stb.) alapján négy kötőanyag csoportot különböztettünk meg: nátrium-aktivált kohósalak-pernye-alapú geopolimerek, kálium-aktivált kohósalak-pernye-alapú geopolimerek, szulfát-aktivált kohósalakokat, és végül kohósalak-metakaolin alapú geopolimerek.

Vizsgáltuk a különböző összetevők, illetve azok változó arányainak az anyagok szilárdsági és tűzállósági tulajdonságaira gyakorolt hatásait. A keletkezett anyagok fázisösszetételét röntgendiffrakciós és termóanalitikai módszerekkel vizsgáltuk (1. ábra).



1. ábra. Szobahőmérsékleten szilárdított (balra lent), valamint 800 °C-on hőkezelt (balra fent) alkáli-aktivált kötőanyag keverék röntgendiffraktogramja; szobahőmérsékleten szilárdított (középen), valamint 800 °C-on hőterhelt alkáli-aktivált kötőanyag keverék derivatogramja (jobbra)

A kutatás második részében a kiválasztott kötőanyagokkal habarcsokat készítettünk. Kétféle kötőanyagból négyféle habarcs készítettünk. Az egyik esetben kizárólag hazai eredetű anyagokkal, viszontai pernye és őrlött granulált kohósalak (GGBS) felhasználásával 40% adalékanyag tartalom mellett, a másik három esetben az optimálisnak kiválasztott geopolimer kötőanyaggal többféle, 55%, 65% illetve 75% adalékanyag tartalommal készültek a habarcsok. A habarcs próbatesteken vizsgáltuk a szilárdulás ütemét, térfogatváltozást, valamint a mechanikai, tűzállósági, hidrotechnikai és tartóssági tulajdonságokat.

A kutatás során sikeresen állítottunk elő valódi geopolimer anyagokat, amelyek tulajdonságai széles skálán változtak, felismerhető és jól körülhatárolható összefüggések mentén. A létrehozott anyagok jó nyomószilárdsági, valamint kedvező hajlító-húzószilárdsági értékekkel, ezen kívül rendkívül jó tűzállósággal rendelkeznek. A kísérleti munka során az anyag gyengébb (zsugorodási és vízzárósági) tulajdonságaira is fény derült. Ennek tükrében, mérnöki tárgyilagossággal tárgyaltuk az anyag felhasználhatóságát: az anyag sajátosságait megismerve ismertettük az építőmérnöki szerkezetekben való felhasználásának lehetőségeit. A legfontosabb megállapítás, hogy az anyag zsugorodási tulajdonságain, valamint kloridionokkal szembeni ellenálló képességén javítani kell. Ez utóbbinak az ismeretében elsősorban nem acél anyagú betétekkel, tehát nemfemes (fibre reinforced polymer, FRP) betétekkel javasoljuk a geopolimer kötőanyaggal készített beton szerkezeti alkalmazását [13, 18].

2.3. Geopolimer kötőanyag teljesítőképességének javítása

A kutatást a BME Építőmérnöki Karon zajló három éves NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenálló-képességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című projekt támogatásával folytattuk. A „Kémiai ellenállóképesség fokozása” c. altémához

kapcsolódott a klinkermentes kötőanyagok nyújtotta lehetőségek körüljárása, a geopolimer kompozitok kutatása volt, az alkáli-aktivált kötőanyagok további optimalizálása a teljesítőképességük fokozása céljából. A célkitűzések elérését a korábban kikísérletezett geopolimer receptúrák metakaolinnal történő finomításával, valamint a zsugorodás csökkentése érdekében különféle szálak adagolásával szándékoztuk elérni.

A kutatás első részét itt is a kötőanyag vizsgálatok tették ki. Ehhez 3 különböző típusú geopolimert, és típusonként 4-féle receptet dolgoztunk ki, amelyek különböző metakaolin adagolással készültek. Az így megalkotott, összesen 12 receptből kevert próbakockákon a szilárdsági vizsgálatokon túlmenően tűzállósági és savállósági vizsgálatokat is végeztünk. A teljesítőképesség alapján kerestük az optimális receptúrát.

A három legjobban teljesítő kötőanyag felhasználásával habarcsokat készítettünk, ez volt a kutatás második része. A habarcsokat vizsgáltuk szál nélkül (referencia), valamint műanyag-, illetve alkáliálló üvegből készült mikroszál adagolással is. Mértük a szilárdság fejlődését, a zsugorodást, a tűzállóságot, különféle hidrotechnikai tulajdonságaikat és a kloridion-migrációs ellenállásukat. A kutatás részben kapcsolódott az Osztrák-Magyar Akció Alapítvány 95öu6 sz. projektje által támogatott, Bécsi Műszaki Egyetemen való együttműködésünkhöz is, ahol a vizsgált szálak anyagok szívóssági vizsgálatait végezhetjük el. Pásztázó elektronmikroszkópos felvételekkel lehetőségünk nyílt az előállított anyagok mikroszerkezetének tanulmányozására is [14].

Legfontosabb megállapításaink: Az előállított geopolimer 7 napos szilárdsága végszilárdságnak tekinthető és akár 80 MPa is lehet. A törésmódok egyedi módon jellemezték az egyes keverékeket, míg az I-es sorozat robbanásszerűen ment tönkre, addig a II-es esetén elmorzsolódás jelentkezett, a III-as sorozat pedig a tönkremenetel során a függőleges átmenő repedések által oszlopocskákra tagolódott, majd ezen oszlopok kihajlásával merült ki a szilárdsága. Tűzállóság vizsgálat során tapasztalható volt a belső szerkezet átalakulása. Az I-es sorozatnál tűzterhelést követően egyáltalán nem tapasztaltunk repedéseket, valamint a tűzterhelést követően a sorozat maradékoszilárdsága 50-70 %. A tűzterhelést követően a II-es sorozat egyes keverékeinél nyomószilárdság növekedést tapasztaltunk. A savállóság vizsgálat során beigazolódott a geopolimer kiváló ellenálló képessége: a 0-2 %-os tömegvesztés, és a legrosszabb esetben tapasztalt 50 %-os szilárdságcsökkenés kiemelkedően jónak mondható, az azonosan kezelt portlandcementből készült pépkockák ellenállóképességéhez viszonyítva.

2.4. Természetes szálak geopolimer kötőanyagban

A kutatást az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című projekt támogatásával tudtuk folytatni. Ennek keretében össze tudtuk hasonlítani a geopolimer jellegű, illetve portlandcement pépek porozitás eloszlását. A higanyintrúziós porozimetriás vizsgálatok eredményei alapján az általunk fejlesztett geopolimer kötőanyag leggyakoribb pórusméret tartománya közel egy nagyságrenddel kisebb, mint a portlandcementtel készített pépé.

A kutatás kapcsolódott az Osztrák-Magyar Akció Alapítvány 101öu10 sz. projektje által támogatott, Bécsi Műszaki Egyetemen való együttműködésünkhöz is, amelyben a természetes eredetű szálak anyagok betonban történő alkalmazását céloztuk meg, mind cementkötésű, mind alkáli-aktivált kötőanyag mátrixban. A projektben a mesterséges mikroszálakon (polipropilén és alkáli-álló üvegszálakon) túlmenően vágott len- és kenderszálak alkalmazhatóságát is vizsgáltuk, amelyekkel a fenntarthatóság további szempontjait is figyelembe tudtuk venni [15].

2.5. Geopolimer és portlandcement kötésű betonok rugalmassági modulusa

A kutatás célja a hazai adottságokkal készíthető geopolimer beton tulajdonságainak optimalizálása, a fizikai, mechanikai és kémia jellegzetességek megismerése által. Ehhez először áttekintettük azokat a tényezőket, amelyek befolyásolhatják a megszilárdult tulajdonságokat. Ezen tényezők között szerepel a szilárd anyag (prekursor) kémiai összetétele, az alkáli-aktiváló oldat tulajdonságai (koncentráció, alkáli lúg fajtája és/vagy vízüveg alkalmazása), a víztartalom és a szilárdulás körülményei. Másodsorban, meg kell érteni ezeknek a szabályozó tényezőknek és a geopolimer beton tulajdonságainak kapcsolatát. Egy új egyszerűsített módszert javasoltunk a geopolimer beton tervezéséhez, amely az ACI 211 szabvány és a geopolimer szintézisben részt vevő oxidok javasolt moláris arányainak kombinációján alapul. Az adalékanyag hatását a térfogati módszer alkalmazásával vettük figyelembe a keverék tervezésénél [16].

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az alkáli-aktivált, illetve geopolimer jellegű anyagok beton kötőanyagként történő alkalmazása jó alternatívát jelenthet, amely lehetővé teszi a portlandcement gyártás következtében környezetünket terhelő széndioxid kibocsátás mérséklését és az elsődleges források kimerítésének csökkentését. Világszerte számos kutatás folyik és ipari alkalmazás ismert. Jelen cikkben a BME Építőmérnöki Karán geopolimer témakörben végzett kutatásaink eredményeit foglaltuk össze.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért. Köszönettel tartozunk az Osztrák-Magyar Akció Alapítvány 95öu6, valamint 101öu10 sz. projekt által nyújtott támogatásáért. Köszönetet mondunk a Stipendium Hungaricum ösztöndíjprogram során nyújtott támogatásért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. CRC Press. 2003. p. 392. <https://doi.org/10.1201/9781482266900>
- [2] Provis, J.L., van Deventer, J.S.J. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2009. p. 454.
- [3] Zákány I., Korim T. *Alkáli aktivált szervesetlen polimerek, mint a kötőanyagok újabb generációja*. Építőanyag, 63. évf. 3–4. (2011), pp. 74–77.
- [4] <http://www.betonopus.hu/notesz/fogalomtar/57-bauxitbeton.pdf>. (Utolsó letöltés: 2021. 05.10).
- [5] Andrew, R.M. *Global CO₂ emissions from cement production*, Earth Syst. Sci. Data, 10, 195–217, 2018 <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- [6] Davidovits, J. *A review on Geopolymer cement, as of January 2013*. Geopolymer Cement, 2013., <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/21-geopolymer-cement-review-2013>
- [7] Gjorv, O. E. (1989). *Alkali Activation of a Norwegian Granulated Blast-Furnace Slag*. Third International Conference Proceedings. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Trondheim, Norway. American Concrete Institute, pp. 1501-1518.
- [8] Davidovits, J. *Geopolymer chemistry and sustainable development*. Conference: Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, Geopolymer 2005 Conference. Saint-Quentin, France. Institut Géopolymère / Geopolymer Institute. Volume: Session 1, pp. 9-17.
- [9] Krivenko, P.V. Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials. August 2017 *Journal of Ceramic Science and Technology* 8(3):323-334. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00042>
- [10] Mucsi G., Csöke B., Molnár Z., *Alkáli Aktivált Perynealapú Kötőanyag Vizsgálata*, Hulladék Online, 2012. 3. évf. 1. sz. 2010. p. 11.
- [11] Horváth Marcell: *Geopolimerek építőipari alkalmazása*. BSc diplomamunka. 2013.
- [12] Kolos Gergely. *A nagy pernyeadagolás hatása a szerkezeti beton tulajdonságaira*. MSc diplomamunka. 2016.
- [13] Hajdu Máttyás Benjámin. *Geopolimer jellegű anyagok vizsgálata és hasznosítási lehetőségei*. MSc diplomamunka. 2017.
- [14] Fejes András Márk. *Geopolimer kompozitok kötőanyagának optimalizálása a teljesítőképesség fokozása céljából*. MSc diplomamunka. 2018.
- [15] Russói András. *Geopolimer habarcs tulajdonságainak javítása*. MSc diplomamunka. 2021.
- [16] Ali Abdulhasan Khalaf, Katalin Kopecskó. *Proposed simplified method of geopolymer concrete mix design*. *Concrete Structures* 2020 Vol 21 pp. 31-37. DOI: 10.32970/cs.2020.1.5
- [17] MSZ EN 450-1:2005+A1:2008 *Pernye betonhoz. 1. rész: Fogalom meghatározások, követelmények és megfelelési feltételek*
- [18] Katalin Kopecskó, Máttyás Hajdu and György L. Balázs. *Alkali-activated binders based on fly-ash and GGBS*. *CONCRETE Innovations in Materials, Design and Structures: Proceedings of the fib Symposium 2019 held in Kraków, Poland, 27-29 May 2019*. 2167-2174.