



**XXXI. Országos Tudományos Diákköri
Konferencia
2013**



**Műanyag hulladék beton adalékanyagként való
felhasználhatóságának vizsgálata**

Készítette: Soós Máté

Témavezető: Kristófné dr. Makó Éva

Mérnöki Kar, Anyagmérnöki Intézeti

Tartalmi összefoglaló

Világviszonylatban egyre nagyobb mennyiségben állítanak elő műanyag termékeket és egyre szélesebb körben alkalmazzák őket (pl. csomagolás, autóipar, burkolatok, orvostechika). A hasznosításra kerülő műanyagok mennyiségének növekedése azonban a belőlük keletkező hulladék mennyiségének ugrásszerű növekedését is maga után vonja. A műanyagok jelentős része biológiai úton nem bomlik le, ezért ezek a hulladéktároló telepeken halmozódnak fel. A növekvő mennyiségű hulladék egyre nagyobb tároló helyeket igényel.

A műanyag hulladék mennyiségének csökkentésére több megoldás is létezik, amelyhez elsődlegesen a szelektív hulladékgyűjtés szükséges. Elterjedt eljárás, a műanyag hulladék égetése, mellyel jelentős mennyiségű hő termelhető, amennyiben ez nem jár nagy mennyiségű káros anyag kibocsátással. A begyűjtött műanyag hulladékokat másodnyersanyagként alkalmazhatják hagyományos műanyaggyártásban, amelyhez a hulladékot típus szerint osztályozzák és depolimerizálással monomerekre bontják. Sok kutatás foglalkozik a műanyag hulladék építőiparban adalékanyagként történő hasznosításával is, ahol az alapanyagok egy része helyettesíthető a hulladékkal.

Szakmai munkámban a cementhez és a homokhoz különböző arányokban, a homok részleges helyettesítésére, üvegszál erősítésű préselt poliészter örleményt adagoltam. Beton próbatesteket készítettem, és meghatároztam a szabvány szerinti hajlító- és nyomószilárdságukat. Elektronmikroszkóppal a cementpép és az adalékanyag közti kötés kialakulását, illetve a próbatestek morfológiájának változását vizsgáltam. Különböző cégektől származó, eltérő minőségű cementek felhasználásával készített minták tulajdonságait tanulmányoztam, s ezek alapján meghatároztam azt az összetételt, amelyből a hagyományos beton felhasználásához hasonló területeken alkalmazható építőanyag nyerhető a hulladék újrahasznosításával.

Abstract

The amount of plastics produced worldwide has been growing steadily and plastics are more and more widely used in packaging, automotive and other industries, healthcare applications etc. With such large and varying applications, plastics contribute to an ever increasing amount in the solid waste stream. Most plastics are non-biodegradable material and they are disposed in landfills. With more and more plastics waste, the necessary landfill space is a growing concern.

There are different possibilities to reduce the amount of plastics waste. Most of them require the selective collection of waste plastics. Plastic wastes are commonly incinerated to recover their energy content. Current technology makes it possible to incinerate the plastic wastes in a way that emission would not be a problem. Also, there is a range of plastic recovery techniques in plastic production, which require selective collection of wastes and break down of polymers into their constituent monomers. Many researches focus on the utilization of plastic wastes as admixtures in building materials.

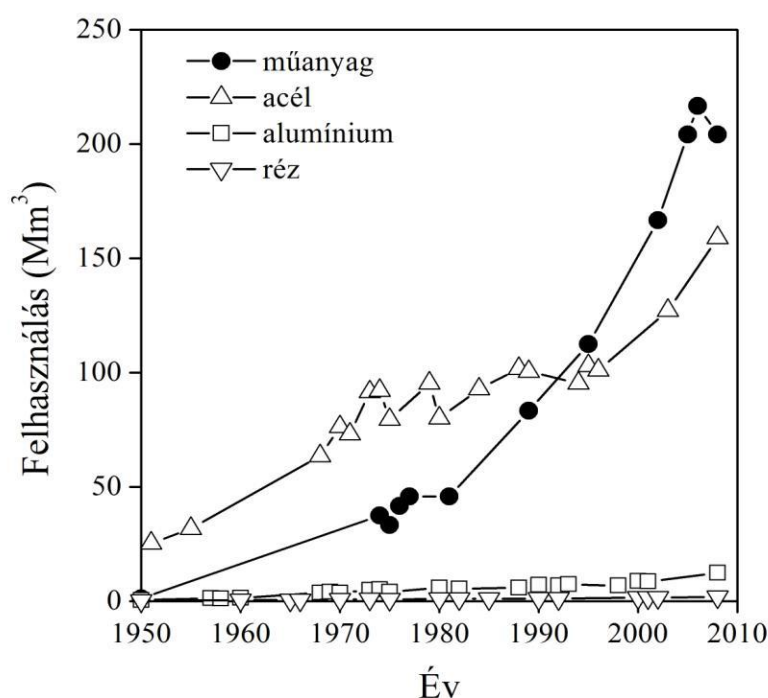
Detailed experiments were conducted on the use of glass fibre reinforced plastic waste in concrete as a partial substitute for fine aggregates of sand. Concrete specimens were prepared and their flexural and compressive strength was determined in accordance with standards. The bond between the cement paste and plastic aggregates, as well as morphology of specimens was examined by electron microscopy. Concrete specimens were made using different types of cement, and the optimal amount of recycled plastics, which can be used to replace the conventional aggregates in concrete, was determined.

Tartalomjegyzék

Bevezetés [1,2]	1
1. Irodalmi összefoglaló	3
1.1 Műanyagok [2,3].....	3
1.2. Cement [4,5]	5
1.2.1 A cement alkotórészei [4]	7
1.2.2. Cementfajták	9
2. Kísérleti rész	13
2.1. A kísérlethez használt műanyag hulladék.....	13
2.2. A kísérlethez használt cementek és homok	16
2.3. A beton próbatestek előállítása	17
2.4. A beton próbatestek vizsgálata.....	18
2.4.1. Szilárdságvizsgálat.....	18
2.4.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat	23
Összefoglaló	27
Irodalomjegyzék	28

Bevezetés [1,2]

Napjainkban a műanyagok már az élet minden területén megtalálható nélkülözhetetlen szerkezeti anyagok. A műanyagok gyártás és alkalmazás fejlődési üteme, a más iparágakat érintő visszaesés ellenére, változatlan. Ma már a világon gyártott műanyagok térfogatban számított mennyisége meghaladja a legtöbb szerkezeti anyagét (1. ábra), és a fejlődés üteme (az előrejelzések szerint) továbbra is töretlen.



1. ábra Néhány szerkezeti anyag felhasználásának időbeli változása [2]

A műanyag gyártás töretlen fejlődési üteme elsősorban az alkalmazásukkal elérhető rendkívül kedvező teljesítmény/ár viszonyoknak tulajdonítható. Ezek az anyagok szinte minden követelményt kielégítenek, esetenként pedig olyan tulajdonságokat adnak, amelyek a hagyományos anyagokkal nem érhetők el.

A műanyagok gyártás és alkalmazás fejlődési üteme, a más iparágakat érintő visszaesés ellenére, változatlan. Annak ellenére, hogy a műanyagok a hulladékoknak csak kis részét teszik ki, a belőlük képződött hulladék abszolút mennyisége nagy, amelynek csökkentésére, illetve a lehető legnagyobb részének újra hasznosítására kell törekedni.

Mind az újrahasznosításra, mind pedig az újrafeldolgozásra új műszaki megoldásokat dolgoznak ki.

A műanyagipar az elmúlt években egy több alternatívát tartalmazó hulladékkezelési stratégiát alakított ki a hulladék mennyiségének csökkentésére tervezéssel, a hulladék újrafeldolgozásával, a hulladék kémiai lebontásával való újrahasznosításával, valamint a műanyag energiatartalmának visszanyerésére hő- vagy áramtermeléssel, és csak utolsó megoldásként a hulladék szemétlerakó telepeken való lerakására.

Sok kutatás foglalkozik a műanyag hulladékok az építőiparban adalékanyagként történő hasznosításával. Az alapanyagok egy része helyettesíthető a hulladékkal, ha az nem okozza a felhasználás szempontjából lényeges tulajdonságok drasztikus romlását. Egyik lehetőség a műanyag hulladék betonban való alkalmazása a finom aggregátum (kavics, homok) részleges helyettesítésével.

1. Irodalmi összefoglaló

1.1 Műanyagok [2,3]

A műanyagok olyan anyagok, amelyek főként nagyméretű szintetikusak vagy módosított természetes eredetű (polimer) molekulákat tartalmaznak és adalék-, illetve társító anyagokat. A műanyagoknak fontos tulajdonsága, hogy megfelelő körülmények között jól alakíthatóvá, formálhatókká válnak.

A polimer egy nagyméretű molekula (makromolekula), amelyek kisebb molekulákból (monomerekből) jönnek létre. A makromolekulák, ismétlődő egységekből felépített szerves vagy szervetlen molekulák, amelyeknek molekulatömege általában nagyobb, mint 5000.

A kialakult makromolekulák tulajdonsága lényegesen különbözhet az alkotókéétól. Ha sok azonos anyagi minőségű molekula összekapcsolódik, akkor a meghatározható tulajdonságok a kialakult makromolekulára érvényesek. Ezek a tulajdonságok az úgynevezett kollektív vagy tömb tulajdonságai az anyagnak. A tömb tulajdonságokat meghatározzák mind a molekulák egyedi tulajdonságai (olyan tulajdonság, ami a molekula természetéből fakad), mind a kollektív tulajdonságok (olyan tulajdonságok, amik a molekulák kölcsönhatásából származnak).

A mesterséges polimerek előállítására szolgáló kémiai folyamatot polimerizációnak hívjuk. A kémiai reakciók mechanizmusa szerint láncpolimerizációt és lépcsős polimerizációt különböztetnek meg.

- A láncpolimerizáció során a monomer molekulák gyors láncreakcióban kapcsolódnak össze. A reakcióelegyben a monomer és a polimer is jelen van. A polimer molekulatömege általában a polimerizáció során állandó. Ezzel az eljárással állítják elő többek között a poliétilént (PE), a polipropilént (PP), a poli(vinil-klorid)ot (PVC), és a polisztirolt (PS).
- A lépcsős polimerizációnál a monomerek megfelelő funkciós csoportjai reagálnak egymással és közben a kialakuló makromolekula mérete folyamatosan nő. A reakció kezdetén elfogynak a monomerek és nagy molekulatömegű polimer gyakorlatilag csak majdnem teljes átalakulásnál keletkezik. A lépcsős polimerizáción belül két fő csoport létezik a polikondenzáció és a poliaddíció. Polikondenzációval gyártják a

poliamidokat, a telített poliésztereket és a polikarbonátokat, míg a poliaddícióval állítják elő a poliuretánokat.

A polimereket és műanyagokat jellemző hőmérsékletük, tulajdonságaik, vagy szerkezetük alapján szokták csoportosítani. Egységes csoportosítás nem létezik. Az egyik csoportosítás szerint megkülönböztetnek elasztomereket, hőre lágyuló műanyagokat, hőre keményedő anyagokat, műszaki műanyagokat, és kompozitokat.

Az elasztomerek rugalmas, lineáris polimerek, melyek üvegesedési hőmérséklete szobahőmérséklet alatt található. Az elasztomereket kémiai vagy fizikai úton tudjuk térhálósítani.

A hőre lágyuló műanyagok lineáris vagy elágazó molekulákból álló anyagok, amelyek üvegesedési és/vagy kristályosodási hőmérséklete szobahőmérséklet felett van. Hő hatására megolvad és ömledékállapotba kerül az anyag. Lehűlés után megszilárdul az alakadás során nyert formában. Az olvadás és megszilárdulás reverzibilis folyamatok.

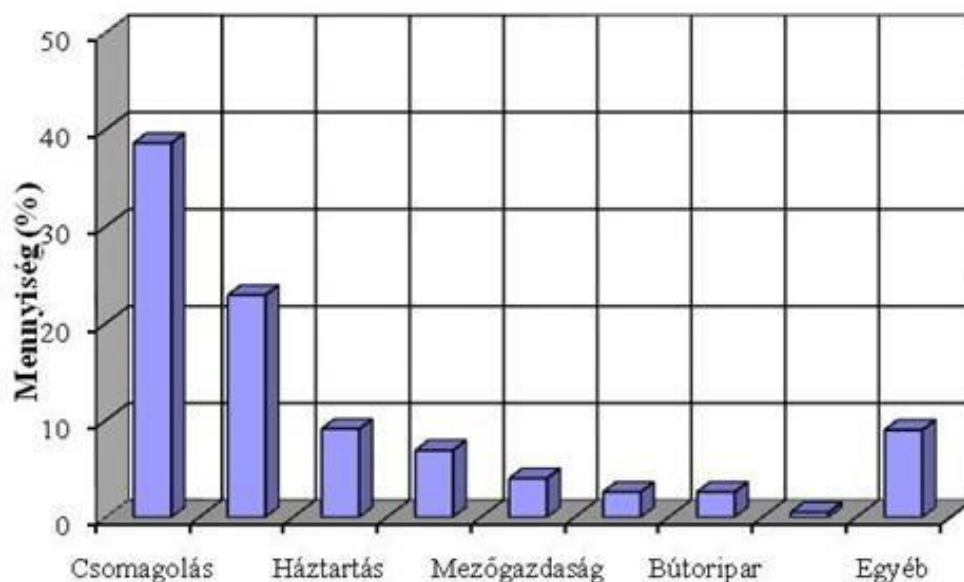
A hőre keményedő anyagok, gyanták szobahőmérséklet feletti üvegesedési hőmérséklettel rendelkező térhálós műanyagok, általában merevek és nagy szilárdsággal rendelkeznek. A feldolgozásuk, alakadásuk során történik a térhálósításuk.

A műszaki műanyagok kiegyenlített jó tulajdonságokkal (mechanikai, elektromos, termikus stb.), különösen nagy szilárdsággal és ütésállósággal rendelkező, hőre lágyuló műanyagok.

A kompozitok töltő- és erősítő anyagot tartalmazó két- vagy többkomponensű műanyagok. A szemcsés töltőanyagot tartalmazó polimereket többnyire nem, de a különböző szálakat (üveg-, szén-, szerves szálak) tartalmazó polimereket ide sorolják. A társítás hatására az anyag merevsége és szilárdsága nő.

A műanyag előállítása közben a polimerekhez különböző anyagokat adagolnak néhány tizedszázaléktól akár 50%-ig is. Ezek az anyagok lehetnek adalékok vagy társító anyagok. Az adalékok között megkülönböztetünk stabilizátorokat, csúsztatókat, formaelválasztókat, lágyítókat, égésgátlókat, színezékeket, optikai fehérítőket, szag- és illatanyagokat, anisztatikumokat és gócképzőket. Társító anyagok a polimerek (polimerkeverékek komponensei), ütésálló adalékok, vezetőképességet biztosító anyagok, töltőanyagok, erősítőanyagok.

Magyarországon jelenleg a műanyagipar a húzóágazatok közé tartozik. Az elmúlt pár évben a vegyipar termelési értékének több mint a 40%-át a műanyag alapanyagok és termékek gyártása tette ki. A hazai műanyag-felhasználás sokrétűségét a 2. ábra alkalmazási terület szerinti megoszlásban mutatja.



2. ábra A műanyag felhasználás alkalmazás szerinti megoszlása Magyarországon (2005)
[2]

1.2. Cement [4,5]

A cement hidraulikus kötőanyag, olyan finomra őrölt szervesetlen anyag, amelyet vízzel összekeverve képlékeny pépet kapunk, ami hidratációs reakciók és folyamatok eredményeképpen megköt és megszilárdul. A megszilárdult cement a víz alatt is képes megtartani a szilárdságát és stabilitását.[4,6]

Az EN 197-1 szabványnak megfelelő és CEM cementnek nevezett cement, megfelelő arányban összekeverve adalékanyaggal és vízzel, olyan betont vagy habarcsot alkot, amely megfelelő ideig bedolgozható és meghatározott időtartam után előírt szilárdságú, valamint tartósan térfogatállandó.

A CEM cement hidraulikus szilárdulását elsősorban a kalcium-szilikátok hidratációja okozza, de egyéb kémiai vegyületek (pl. alumínátok) is szerepet játszhatnak a szilárdulásban. A CEM cementben a reakcióképes kalcium-oxid (CaO) és szilícium-dioxid (SiO_2)

menyiségének összege legalább 50 tömegszázalék legyen, ha ezek arányát az EN 196-2 szerint határozzuk meg.

A cement az építőipar fontos és nélkülözhetetlen alapanyaga. A kor igényei megkövetelték, hogy napjaink betontechnológiájában új szemlélet jelenjen meg – a beton tartóssága. A különböző környezeti hatásoknak ellenálló betonszerkezetekhez különleges cementtípusokra van szükség. A kohósalakcementek ellenállóbbak a betonkorrózióval, agresszív kémiai hatásokkal szemben, mint az általános felhasználású cementek.[6]

A cementtermelésben világszerte és Magyarországon is jelentős részt képeznek a cementkiegészítő anyagokat tartalmazó cementek, az úgynevezett többkomponensű kompozitcementek. Ezek a cementfajták portlandklinker és cementkötésszabályozó mellett egyenél több cementkiegészítő anyagot tartalmaznak.

Ezen cementek elterjedésének oka, hogy a cementgyártók már a cement előállításánál – a szilárdságon kívül – más, az alkalmazástechnikai szempontból fontos tulajdonságokat igyekeznek biztosítani cementjeiknél. A klinkertakarékos, többkomponensű kompozitcementek gyártását a piaci verseny erősödése, a cementtermelés költségeinek a csökkentése, valamint az egyre szigorúbb környezetvédelmi előírások teszik szükségessé.

A cementkiegészítő anyagokat tartalmazó cementek gyártása és felhasználása több szempontból is előnyös.

Ezen cementeknek nagyobb a „teljesítőképesége” a betonban, mint az adalékmentes portlandcementeké. Ez abban nyilvánul meg, hogy ezek a cementek, és a belőlük készült habarcsok, betonok kedvező alkalmazástechnikai tulajdonságokkal (kisebb vízigénnyel, jobb bedolgozhatósággal és vízmegtartó-képességgel, kisebb hőfejlesztéssel, kisebb zsugorodási és repedési hajlammal, stb.) bírnak.

Ezek klinkertakarékos cementek (amelyekben a klinkerhányad viszonylag kicsi), ami gazdasági és környezetvédelmi szempontból is kedvező. Az ilyen cementeket környezetbarát cementeknek is nevezik, mivel a kevesebb klinker felhasználása az égetési energia megtakarítását, a CO₂ emissziójának csökkentését, a természetes cementipari nyersanyagszükséglet csökkenését, és a hasznosításra került hulladék anyagok mennyiségének növekedését stb. eredményezi.

1.2.1 A cement alkotórészei [4]

1.2.1.1 Portlandcementklinker (K)

A portlandcementklinkert meghatározott összetételű nyersanyagkeverék égetésével állítják elő. Oxidos összetételben kifejezve, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , és Fe_2O_3 alkotórészeket és kis mennyiségben egyéb anyagokat tartalmaz.

Hidraulikus tulajdonságú anyag, amelynek legalább kétharmad tömegrészben kalcium-szilikátokat alitot ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) és belitet ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) kell tartalmazni. A fennmaradó egyharmad rész alumínium-oxidot, vas-oxidot és egyéb vegyületeket tartalmaz. Fontos, hogy a CaO/SiO_2 tömegaránya 2,0 legyen és a magnézium-oxid mennyisége legfeljebb 5,0 tömegszázalék legyen.

1.2.1.2. Granulált kohósalak (S)

A vas-oxid megolvasztásakor keletkező salakolvadék gyors hűtésével keletkezik. Legalább a kétharmad része üveges állapotú salak. Fontos, hogy a $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ tömegarány 1,0-nél nagyobb legyen.

1.2.1.3. Puccolános anyagok (P, Q)

A puccolános anyagok természetes eredetű anyagok, amelyek szilikátokból vagy aluminát-szilikátokból és ezek változataiból állnak. Főként aktív szilícium-dioxidot (SiO_2) és alumínium-oxidot (Al_2O_3) tartalmaznak. Vízzel összekeverve nem képesek kötésre, de finomra őrölve víz jelenlétében az oldott kalcium-hidroxiddal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagálnak és megszilárdulnak. A keletkező kalcium-szilikát- és kalcium-aluminát-vegyületek hasonlóak a hidraulikus anyagok szilárdulásakor keletkező vegyületekhez.

A természetes puccolánok (P) vulkanikus eredetű vagy üledékes kőzetek megfelelő kémiai és ásványi összetételű termékei.

A természetes kalcinált puccolánok (Q) hőkezelt vulkanikus eredetű anyagok, agyagok és palák vagy üledékes kőzetek.

1.2.1.4. Pernyék (V, W)

A szénportüzelésű kazánokból távozó füstgázokból elektrosztatikus vagy mechanikus leválasztással távolítják el a pernyét (porszerű részecskéket). Megkülönböztetnek savas

jellegű (puccolános tulajdonságú) és bázikus jellegű (hidraulikus és/vagy puccolános tulajdonságú) pernyét.

A savas jellegű pernye (V) főként gömbölyű, üveges részecskékből álló finom por, amely főként reakcióképes szilícium-dioxidból (SiO_2) és alumínium-oxidból (Al_2O_3) áll.

A bázikus jellegű pernye finom por, ami főként aktív kalcium-oxidot (CaO), szilícium-dioxidot (SiO_2) és alumínium-oxidot (Al_2O_3) tartalmaz.

1.2.1.5. Égetett pala (T)

Az égetett palát körülbelül 800 °C-on állítják elő olajpalából. A kiindulási anyag összetételének és a gyártási eljárásnak köszönhetően klinkerásványok, főként dikalcium-szilikát és monokalcium-aluminát alakul ki. Kis mennyiségben szabad kalcium-oxidot és kalcium-szulfátot tartalmaz, ezeknél nagyobb mennyiségben puccolánosan aktív oxidokat, főként szilícium-dioxidot (SiO_2) tartalmaz.

1.2.1.6. Mészkő (L, LL)

A cementgyártásnál alkalmazott mészkő kalcium-karbonát (CaCO_3) tartalma 75 tömegszázalék kell, hogy legyen, az agyagtartalom 1,20g/100g kell, hogy legyen maximálisan. A szerves szén-tartalom (TOC) alapján két fajtáját különböztetik meg a mészkőnek, Az egyik, amikor az összes szerves szén-tartalom legfeljebb 0,20 (LL), a másik, amikor ugyanez a tartalom legfeljebb 0,50 tömegszázalék lehet (L).

1.2.1.7. Szilikapor (D)

A szilikapor a szilícium- és ferro-szilícium-ötvözetek gyártásánál keletkező nagyon finom gömbszerű részecskékből áll, amelyek legalább 85 tömegszázalék amorf szilícium-dioxidot (SiO_2) tartalmaznak. A szilikaporban az elemi szilícium-tartalom nem haladhatja meg a 0,4 tömegszázalékot (az ISO 9286 szerint).

1.2.1.8. Töltőanyag (F)

A töltőanyagok különlegesen válogatott, természetes vagy mesterséges szervesetlen ásványi anyagok, amelyek javítják a cement fizikai tulajdonságait (pl. bedolgozhatóságot). A töltőanyagokat csak megfelelő előkészítés (válogatás, homogenizálás, szárítás és őrlés) után szabad csak felhasználni, nem növelhetik a cement vízigényét, nem ronthatják a beton vagy

habarcs ellenálló képességét a káros hatásokkal szemben, és nem csökkenthetik a betonvasalás korrózióállóságát.

1.2.1.9. Kalcium-szulfát

A kalcium-szulfátot kötés szabályozó komponensként alkalmazzák, amit a gyártás során adagolnak be. Lehet gipszkő (kalcium-szulfát-dihidrát, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), félhidrát ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (vízmentes kalcium-szulfát, CaSO_4), vagy ezek keverékével bevinni.

1.2.1.10. Adalékok

Az EN 197-1 szabványban leírtaknak megfelelően az adalékok szerepe a cement gyártási eljárásának vagy a cement tulajdonságának a javítása. Az adalék mennyisége legfeljebb a cement 1,0 tömegszázaléka lehet. Ha 1,0 tömegszázaléknál nagyobb mennyiséget adnak a cementhez, akkor azt fel kell tüntetni a csomagoláson (a szállítólevélen). Az adalék nem ronthatja a cement, a habarcs vagy a beton tulajdonságait.

1.2.2. Cementfajták

Az EN 197-1 szabvány szerint az általános felhasználású cementeknek öt fő fajtája van (3. ábra): CEM I (portlandcement), CEM II (összetett portlandcement), CEM III (kohósalakcement), CEM IV (puccoláncement), CEM V (kompozitcement). A cementek EN 196-1 szabvány szerint vizsgált nyomószilárdsága meg kell, hogy feleljen a 4. ábrán látható követelményeknek. A cementfajtákra az EN 197-1 szabvány az 5. ábrán megadott kémiai követelményeket is előírja.

Fő cement-fajták	A 27 termék jelölése (az általános felhasználású cementek fajtái)		Mennyiségek tömegszázalékban ^a											
			Főalkotórészek										Mellék-alkotórészek	
			Klinker K	Granulált kohósalak S	Szilikapor D ^b	Puccolán		Pernye		Égetett pala T	Mészkeő			
természetes P	kalci nált Q	savanyú V				bázikus W	L	LL						
CEM I	Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Kohósalak-portlandcement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Szilikapor-portladncement	CEMII/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Puccolánportland-cement	CEMII/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Pernyeporland-cement	CENM II/B-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Égetettpala-portlandcement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Mészkeőportland-cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	Kompozit-portlandcement ^c	CEM II/A-M	80-94	<-----6-20----->										0-5
		CEM II/B-M	65-79	<-----6-20----->										0-5
CEM III	Kohósalakcement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Puccoláncement ^c	CEM IV/A	65-89	-	<-----11-35----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	<-----11-35----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Kompozitcement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	<-----18-30----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	<-----18-30----->			-	-	-	-	0-5	

^a A táblázat értékei a fő és mellékalkotórészek összegét tartalmazzák.

^b A szilikapor aránya legfeljebb 10% legyen.

^c A CEM II/A-M és a CEM II/B-M összetett portlandcementek, a CEM IV/A és CEM IV/B puccoláncementek, valamint a CEM V/A és CEM V/B kompozitcementek esetében meg kell adni a jelölésben a klinker mellett található főalkotórészeket.

3. ábra Az általános felhasználású cementfajták és összetételük [4]

Szilárdsági osztály	Nyomószilárdság (Mpa)				Kötési idő kezdete perc	Térfogatállandóság (tágulás)
	Kezdőszilárdság		Szabványos szilárdság			
	2 napos	7 napos	28 napos			
35,2 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	10 ≤
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-				

4. ábra Mechanikai és fizikai követelmények előírt jellemző értékei [4]

1	2	3	4	5
Tulajdonság	Vizsgálati módszer	Cementfajta	Szilárdsági osztály	Követelmények ^a
Izzítási veszteség	EN 196-2	CEM I CEM III	Valamennyi	$\leq 5,0\%$
Oldhatatlan maradék	EN 196-2 ^b	CEM I CEM III	Valamennyi	$\leq 5,0\%$
Szulfáttartalom (SO ₃ -ként)	EN 196-2	CEM I CEM II ^c CEM IV CEM V	32,5 N 32,5 R 42,5 N	$\leq 3,5\%$
			42,5 R 52,5 N 52,5 R	$\leq 4,0\%$
		CEM III ^d	Valamennyi	
Kloridtartalom	EN 196-21	Valamennyi ^e	Valamennyi	$\leq 0,10\%$ ^f
Puccolánosság	EN 196-5	CEM IV	Valamennyi	Feleljen meg a vizsgálati módszereknek

^a A követelmények a kész cement tömegszázalékában vannak megadva.

^b Az oldhatatlan maradék meghatározása sósavban és nátrium-karbonátban.

^c T>20% tartalom esetén CEM II/B-T és a CEM II/B-M cementfajták szulfáttartalma (SO₃-ként) valamennyi szilárdsági osztályban legfeljebb 4,5% legyen.

^d A CEM III/C cementfajta szulfáttartalma legalább 4,5% legyen.

^e A CEM III/C cementfajta esetében megengedett a 0,01%-nál nagyobb kloridtartalom, ebben az esetben a tényleges kloridtartalmat fel kell tüntetni a cement csomagolásán és/vagy a szállítás jegyen.

^f Előkészített beton készítéséhez a cement szigorúbb követelményérték szerint is gyártható. Ebben az esetben a 0,10%-ot helyettesíteni kell a kisebb értékkel, amit fel kell tüntetni a szállítási jegyen.

5. ábra Kémiai követelmények előírt jellemző értékei [4]

Saikia és de Brito [1] összefoglaló munkájukban a műanyag hulladékok betonban és habarcsokban aggregátumként történő felhasználási lehetőségeit elemzi. Megállapítják, hogy a bedolgozhatóság szempontjából számít, hogy a hulladék milyen szemcseméretű és

szemcseszerkezetű. Amennyiben pelyhes, porózus a műanyag aggregátum a felhasználásával készült habarcs bedolgozhatóságának romlását tapasztalták. Ha a szemcsék gömb alakúak voltak kevésbé romlott a bedolgozhatóságuk. A beton nyomószilárdsága függetlenül attól, hogy milyen egyéb adalékot vagy töltő anyagot tartalmazott az adott műanyag hulladék, csökkent. A nyomószilárdság csökkenésének két fő lehetséges okát nevezik meg. Az egyik lehetséges oknak a műanyag és a cementmátrix között kialakuló gyenge kötést jelölik meg. A másik lehetséges okot a műanyagok hidrofób jellegében látják, amely gátolja a cement hidratációs reakcióinak lejátszódását azzal, hogy a cementport és a víz érintkezését akadályozza. Megállapítják, ha a cementpor és a víz nem tud érintkezni, akkor nem tud végbemenni a teljes hidratáció, nem tud tömör betonszerkezet kialakulni, porózus lesz a beton, és csökken a szilárdsága. Megemlítik, hogy különböző kutatók különböző mértékű nyomószilárdság csökkenésről számolnak be, amit a hulladék szemcsemérete, szemcsealakja, bedolgozhatóságának mértéke a bekeverés után, stb. okoz. Az irodalomban közölt adatok alapján látható, hogy a hajlítószilárdság a nyomószilárdsághoz képest nem változik olyan látványosan, és az adaléktól rugalmasabbá váltak a próbatestek. A tapasztalatok azt mutatták, hogy megváltozott a test viselkedése a mechanikai behatás alatt, és a töréskor keletkező repedés terjedését a műanyag adalékanyag meg tudta akadályozni. A kísérletek bizonyították, hogy a műanyagadalék felhasználásával készült beton próbatestek az agresszív kémiai hatásokkal szemben ellenállóbbak.

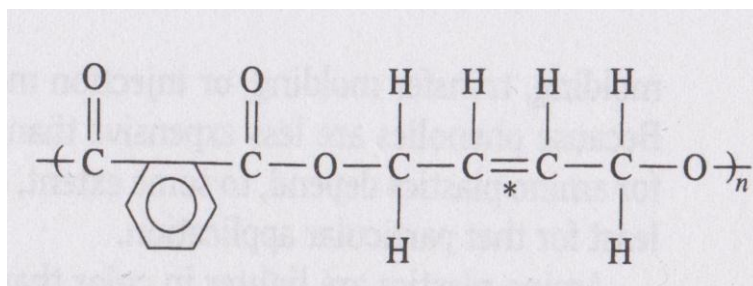
2. Kísérleti rész

A vizsgálatokhoz két különböző összetételű és minőségű cementből készítettem beton próbatesteket a homok részleges helyettesítésével. A felaprított műanyag hulladékkal 10%, 20%, 40% és 50%-ban váltottam ki az MSZ EN 196-1 szabványban előírt homok mennyiségét. A próbatestek elkészülte után elvégeztem a szilárdság vizsgálatokat és elektronmikroszkóppal vizsgáltam a műanyag hulladék elhelyezkedését a mintákban.

2.1. A kísérlethez használt műanyag hulladék

A műanyag hulladékot (MH) a Csatári Plast Kft.-től (Városlőd) szereztem be. A cég SMC üvegszál erősítésű poliésztert használ tokozatok és elosztó szekrények gyártásához. Ez a fajta műanyag 30-40% üvegszálat, poliészter-gyantát és egyéb adalékanyagokat (pl. színezőanyagokat) tartalmaz.

Az üvegszál erősített poliészter a kompozit műanyagok csoportjába sorolható. A hőre keményedő poliésztert kondenzációs polimerizációval állítják elő, az ismétlődő egységek (6. ábra) észter kötésen keresztül kapcsolódnak össze.[2,3]



6. ábra Telítetlen poliészter [3]

A poliésztert általában üvegszállal kombinálják, ahol a mátrix a poliészter és az erősítőanyag az üvegszál. Az üvegszál erősített poliésztert hajótestek, fürdőkád, zuhanytálca, elosztó szekrény, autókarosszéria elem gyártásánál használják. [3]

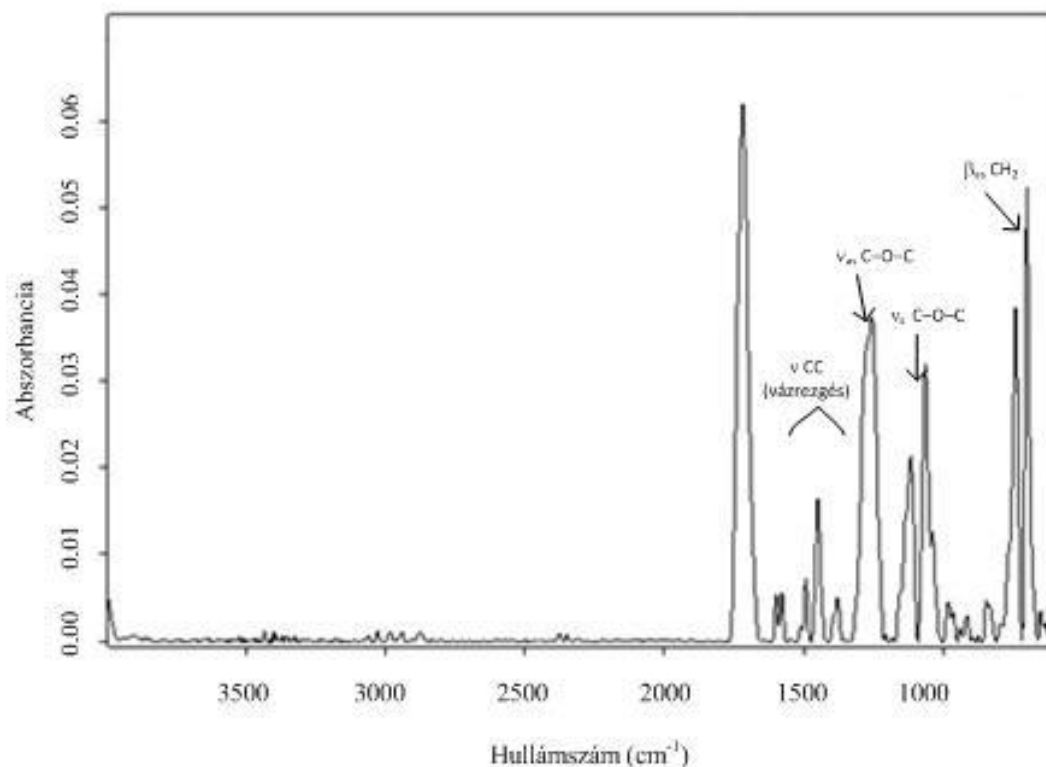
Az MH-t kb. 5-10 cm átmérőjű darabokban kaptam. A homok részleges helyettesítéséhez az MH-t 5 mm alatti (MH5) szemcseméretre aprítottam (7. ábra). Az MH aprítását késes vágógéppel végeztem. Az aprított MH 5 mm-nél kisebb szemcséket tartalmazott, de a szemcsék alakja nem volt egységes. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat alapján az MH5 tűszerű és lemezes alakú szemcséket, illetve egészen finom port (50 µm alatti szemcséket) is tartalmazott.



7. ábra Az aprított műanyag hulladék

Mivel a hulladék különböző termékekből származott, az aprítást követően a kevert MH5-öt infravörös spektrometriával és termikus analízissel vizsgáltam.

Az infravörös spektrometriai mérést a TENSOR 27 típusú FT-Infravörös spektrométerrel végezték. Az FT-Infravörös spektrométer irányítását, és az adatok feldolgozását Opus 5.5 szoftver segítségével végezték. Az összetartozó mérések (mérés csoport) előtt felvették a referencia-spektrumot (háttér-spektrum), és csak ezután végezték el a méréseket. Az interferométer irányítását HeNe lézer végezte. Hullámhossza 633 nm. Alacsony zajszintű, nagy érzékenységű DLaTGS (Deutero L- α -Alanin Triglicin-Szulfát) detektort, KBr ablakkal használtak. Az MH5-ről készült infravörös felvételen (8. ábra) (az 1. táblázatban megadott csoport hozzárendeléseket használva) azonosíthatók az észter kötésre jellemző rezgési sávok, ami jelzi, hogy a hulladék poliésztert tartalmaz.



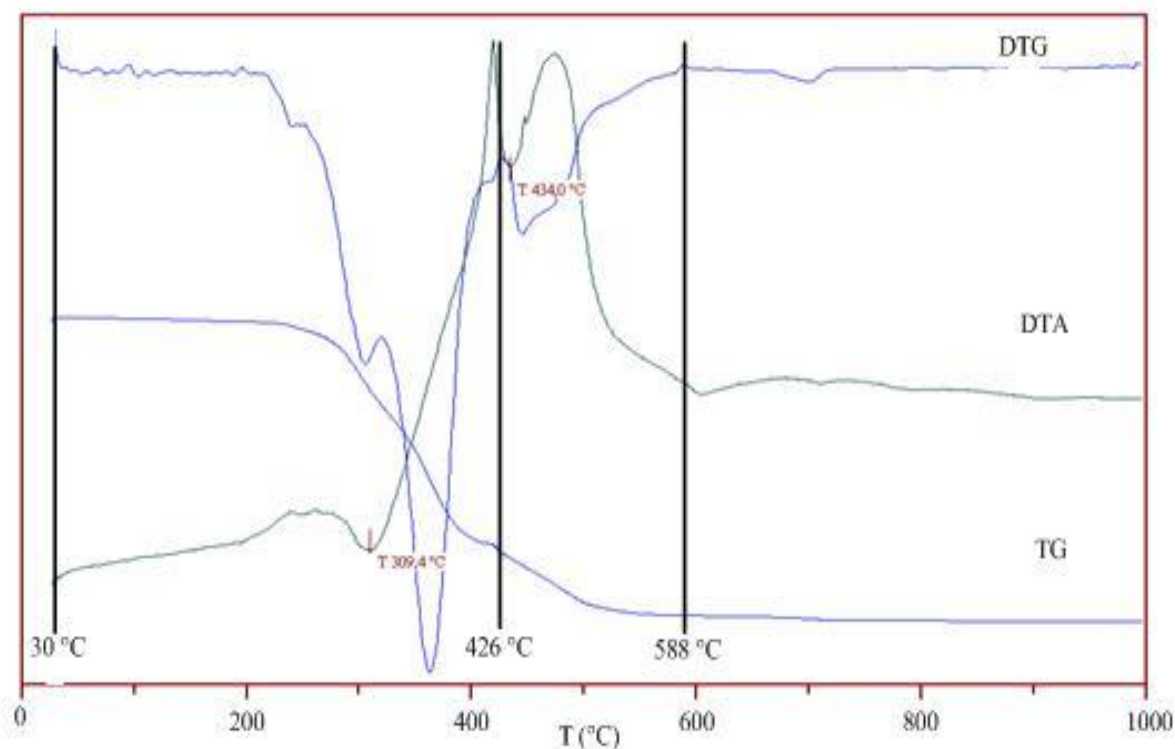
8. ábra Az MH5 infravörös spektruma

1. táblázat A műanyagok jellegzetes infravörös rezgési sávjai és a megfelelő csoportok hozzárendelése [7]

Szénhidrogének jellemző szinképsávjai	
Rezgéstípus	Sáv helye, hullámszám (cm ⁻¹)
Telített szénhidrogének	
β _{as} CH ₂	720
Telítetlen szénhidrogének	
ν C=C	1655-1610
β _s (=CH ₂)	1420-1400
Aromás szénhidrogének	
ν CC (vázrezgés)	1635-1600
	1595-1570
	1520-1460
	1470-1415
Észterek	
ν _{as} C-O-C	1300-1150
ν _s C-O-C	1150-1000

A termoanalitikai mérésekhez MOM Derivatograph Q 1500 típusú berendezést használtunk. A bemérés 280 mg volt. A mintát statikus levegő atmoszférában, korund

tégelyben, és korund inert anyaggal hevítették 10°C/perc felfűtési sebességgel. A maximális hőmérséklet 1000 °C volt.



9. ábra Az MH5 derivatogramja

A 9. ábrán a termogravimetriás (TG) és a derivált termogravimetriás (DTG) görbék alapján két tömegvesztési részfolyamatot határoztam meg, amelyek a műanyag bomlását jelzik. Az részfolyamatban 426 °C-ig a műanyag bomlási termékeinek jelentős része (33,9%(m/m)) eltávozik, majd 426 - 588 °C között a műanyag bomlási termékeinek maradéka (9%(m/m)) lép ki. Tehát kb. 600 °C-ig a műanyag termikusbomlása befejeződik és mintából csak az üvegszál marad vissza [8]. A tömegvesztés alapján a minta műanyagtartalma 44,6%(m/m) és az üvegszál mennyiség 56,4%(m/m).

2.2. A kísérlethez használt cementek és homok

A kísérletekhez a Knauf GmbH. által gyártott CEM I 42,5 N portlandcementet, és a Duna-Dráva Cement Kft. (Vác) által gyártott CEM II/B-M (V-LL) 32,5 N kompozit-portlandcementet használtam (3. ábra). A cementek különböző szilárdság osztályba tartoznak (4. ábra).

Az LB-Knauf Kft. cégtől kapott homok az MSZ EN 196-1 szabványban elvárt minőségű volt.

2.3. A beton próbatestek előállítása

A beton próbatesteket az MSZ EN 196-1 szabványban előírtaknak megfelelően készítettem. A 2. táblázatban látható a cement, homok és MH5, valamint a víz kísérleteknél alkalmazott mennyisége, és az így kapott próbatestek jelölése.

2. táblázat Keverékek összetétele

Mintaszám	Cement (g)	Víz (g)	Homok (g)	MH5 (g)	
P0	450	225	1350	0	Portlandcement
P10	450	225	1215	135	
P20	450	225	1080	270	
P40	450	225	810	540	
P50	450	225	675	675	
K0	450	225	1350	0	Kompozit-portlandcement
K10	450	225	1215	135	
K20	450	225	1080	270	
K40	450	225	810	540	

A minták jelölésénél a „P” a portlandcementből, a „K” kompozit-portlandcementből készült mintákat jelöli. A szám tömegszázalékban a homok részleges helyettesítésére használt MH5 mennyiségére utal.

A cementből, a homokból, az MH5-ből és a vízből az MSZ EN 196-1 szabványnak megfelelő automata bolygó lapátos keverőgéppel készítettem a habarcsot, majd a szabványnak megfelelően szabványos ejtőasztalon tömörítettem. Az MSZ EN 196-1 szabványnak megfelelően 3 db 40x40x160 mm méretű próbatestet készítettem. A víz hozzáadásától számítva 24 óra múltán kizsaluztam a próbatesteket és áthelyeztem őket egy vízzel teli medencébe, majd a szabványban előírt 28 nap elteltével elvégeztem a szilárdság vizsgálatokat. [9]

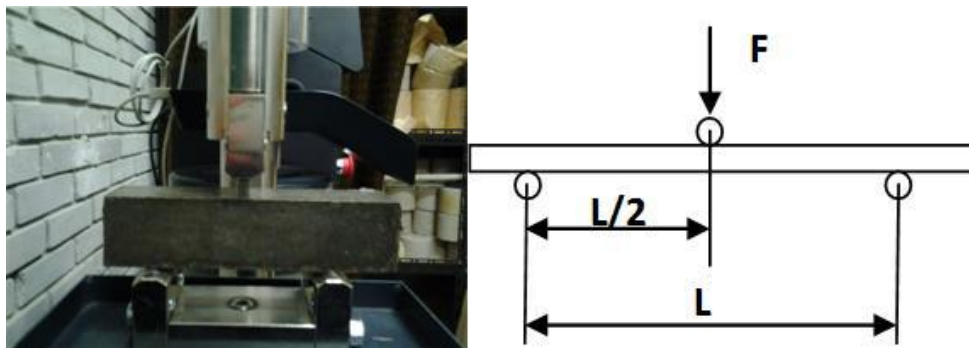
A kompozit-portlandcement esetében a homok 50%-ban MH5-tel történő helyettesítésénél a habarcsot nem lehetett elkeverni, ezért ilyen összetételű próbatest nem készült. A portlandcement esetén 15 próbatestet, ebből 3 darab P0 referencia mintát, készítettem. A kompozit-portlandcement esetén összesen 12 (9 db MH5-öt tartalmazó és 3 db K0 referencia) próbatest készült.

2.4. A beton próbatestek vizsgálata

2.4.1. Szilárdságvizsgálat

Az MSZ EN 196-1:1996 szabványnak megfelelően elkészített próbatesteknek a szabvány szerint határoztam meg a hajlító- és nyomószilárdságát. A szilárdságvizsgálatot a szabványnak megfelelő Controls Automax 5 törőberendezéssel végeztem el. Először a hajlítószilárdság vizsgálatát végeztem el, majd a törésnél keletkező félhasábokon mértem a nyomószilárdságot. [9]

A 10. ábrán látható a hajlítószilárdság vizsgálatához behelyezett próbatest, ahol az F hajlító erő az alátámasztó görgők távolságának (L) felénél a hajlító görgőn keresztül terheli a próbatestet.



10. ábra Hajlítószilárdság meghatározása

Az alátámasztó görgők távolsága 100 mm és 10 mm átmérőjűek. A beton próbatestet a bedolgozási felületére merőlegesen a hosszanti tengelyével a támasztó görgőkre merőleges kell elhelyezni.

A hajlítószilárdságot (σ_h) az (1) képlet alapján számolhatjuk.

$$\sigma_h = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot L}{4 \cdot W} \quad (1)$$

ahol, F a hajlító-erő N-ban, L az alátámasztási távolság mm-ben, W a keresztmetszeti tényező mm³-ben, σ_h a hajlítószilárdság MPa-ban.

A keresztmetszeti tényező a méréseimnél használt hasáb alakú próbatestekre a (2) egyenlettel számítható.

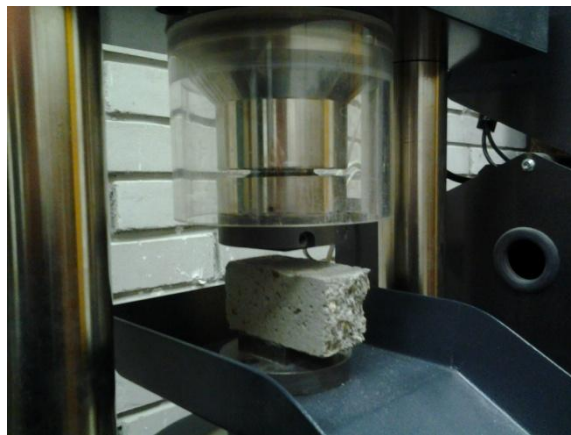
$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (2)$$

ahol, b a próbatest szélessége mm-ben, h a próbatest vastagsága (magassága) mm-ben.

A nyomószilárdság vizsgálatnál (11. ábra) a félhasábokat a bedolgozási felületre merőlegesen a nyomógép nyomólapjára helyeztük és a törésig tartó szabványos nyomó igénybevételnek tettük ki.

A – szabványos körülmények között készített, tárolt, meghatározott alakú, szabványos módon terhelt – próbatestek nyomószilárdságán (σ_{ny} , MPa) a törőerő (F , N) és a próbatest nyomott felületének (A , mm²) hányadosát (3) értjük.

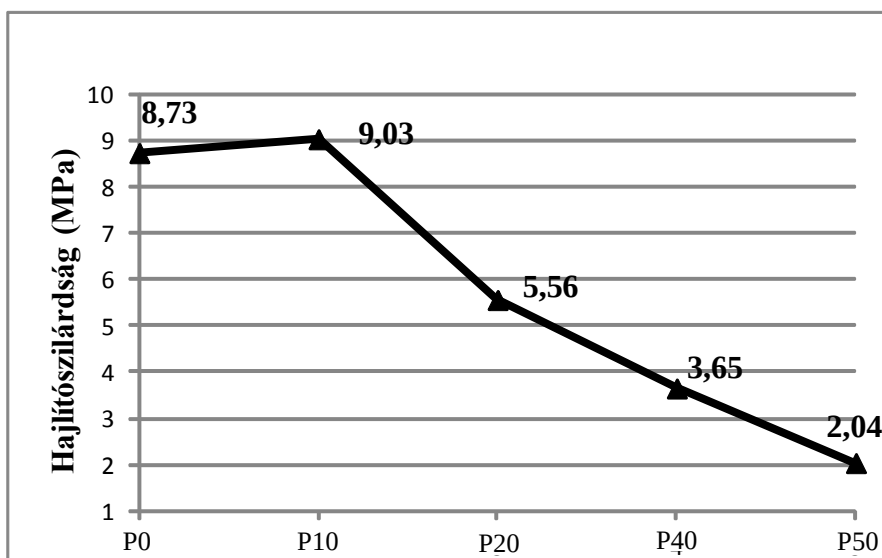
$$\sigma_{ny} = \frac{F}{A} \quad (3)$$



11. ábra Nyomószilárdság meghatározása

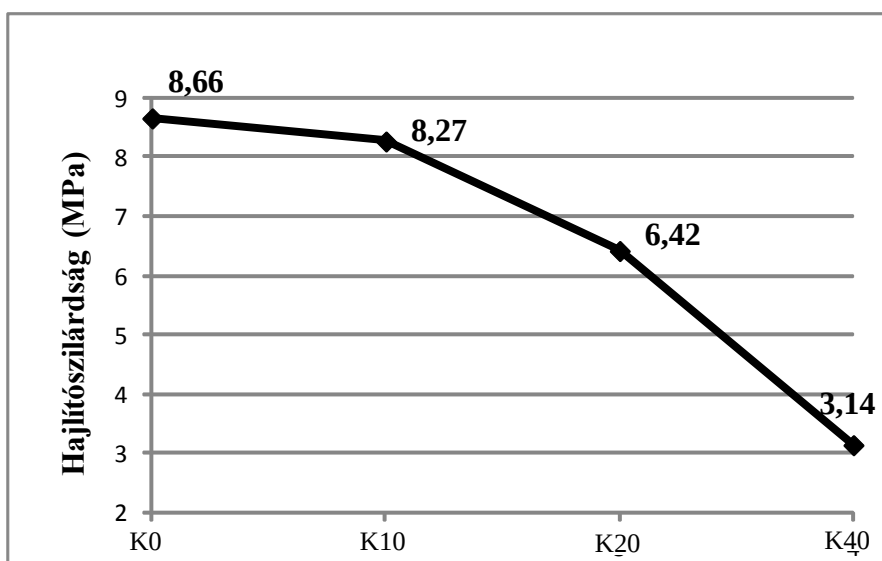
A hajlítószilárdság a hajlítással szemben kifejtett ellenállás a gyakorlatban rendkívül fontos a beton építőelemként való alkalmazásánál. Ennek az értéke általában egy nagyságrenddel kisebb, mint a nyomószilárdság. Különböző módszereket, adalékanyagokat alkalmaznak, hogy növeljék a hajlítószilárdságot. Például így járnak el a vasbeton szerkezeteknél, ahol egy vasháló biztosítja a beton megkívánt hajlítószilárdságát.

A 12. és 13. ábrákon a két különböző minőségű cementnél kapott hajlítószilárdság értékeket a homok helyettesítésének a függvényében ábrázoltam.



12. ábra A portlandcementből készített minták hajlítószilárdsága

A portlandcementből készült hasábok hajlítószilárdsága (12. ábra) az MH5 tartalmának a növelésével csökken. A P10 minta hajlítószilárdsága a P0 referencia mintához képest 3,4%-kal nagyobb, ami belesik a szabvány által megengedett 10% mérési hibahatárba. A P20 minta hajlítószilárdsága már 36,3%-kal, a P50 mintáé már 76,6%-kal csökken a P0 mintához viszonyítva.



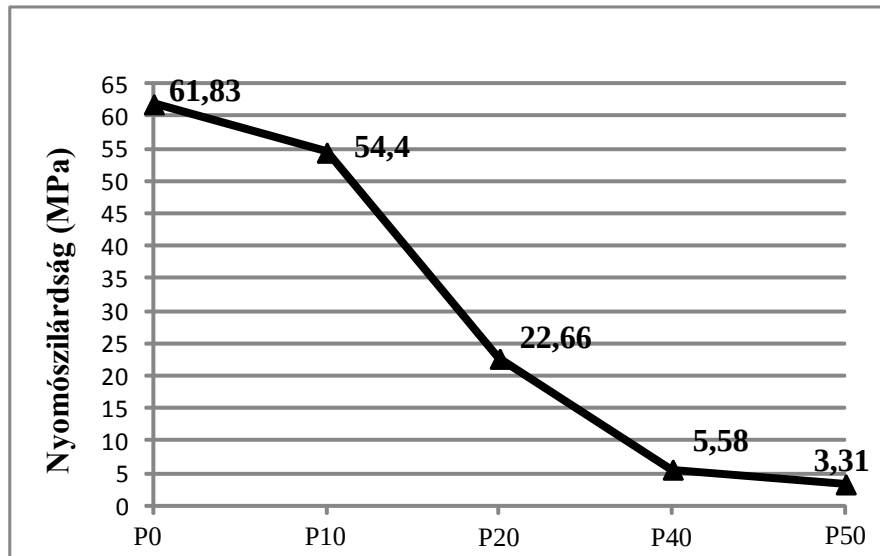
13. ábra A kompozit-portlandcementből készített minták hajlítószilárdsága

A kompozit-portlandcementből készült beton hasábok hajlítószilárdsága a 13. ábrán látható. A hajlítószilárdság itt is az MH5 tartalom növelésével csökken. A K10 minta hajlítószilárdsága 9,5%-kal kisebb a K0 referencia mintáénál, ami itt még beleesik a szabvány által megengedett 10%-os mérési hibahatárba. A K20 minta hajlítószilárdsága már 25,8%-kal csökken a K0 referencia mintáéhoz képest.

Mindkét cementnél a 10%-nál több MH5-öt tartalmazó próbatestek hajlítószilárdsága az MH5 tartalom növelésével egyre erőteljesebben csökken. A hajlítószilárdság vizsgálat közben megfigyelhető volt, hogy már a 10%-os MH5 tartalommal készült hasábok sem törtek el teljesen úgy, mint a P0 és K0 referencia hasábok. A hajlító igénybevétel hatására keletkező repedés a hasáb keresztmetszetén végig futott, de a hasáb nem esett szét két részre. Feltehetően ezt az okozhatta, hogy a MH5-től rugalmasabbá vált a próbatest [1].

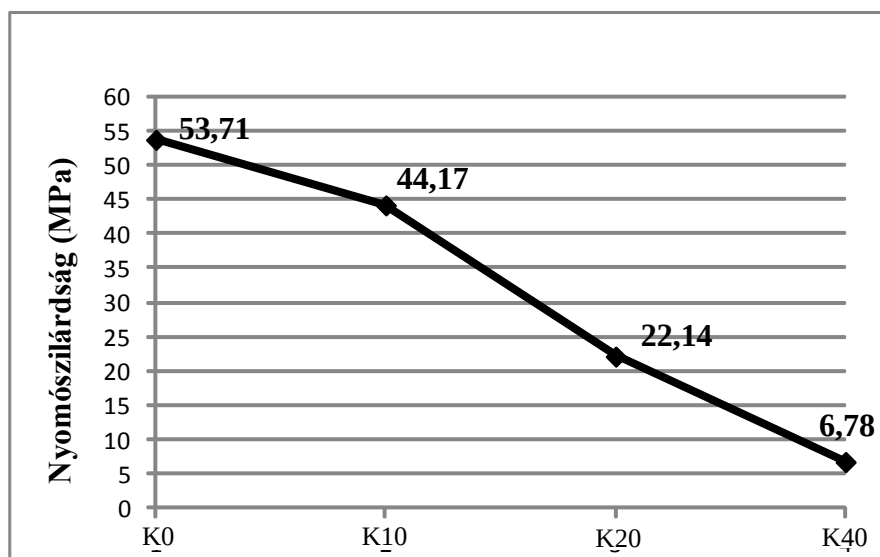
A vizsgálatok alapján a 10% MH5 felhasználásával, a cement hajlítószilárdsága nem változik meg jelentős mértékben. A hajlítószilárdság vizsgálatok alapján tehát a 10% MH5 használata javasolható.

A 14. és 15. ábrán látható, hogy az MH5 mennyiségének növelésével a nyomószilárdság, mindkét cementből készült betonhasábok esetén csökkent. A portlandcementből 10%-nál több MH5-öt tartalmazó hasábok szilárdsága már drasztikusan csökkent. A P10 mintánál kapott nyomószilárdság a P0 referencia betonéhoz képest 12%-kal kisebb. A P10 próbatestre mért nyomószilárdság a 42, 5 N szilárdsági osztály 28 napos korra vonatkozó szabványos szilárdsági tartományának megfelelő (4. ábra). A P20 minta nyomószilárdsága viszont már 63,3%-kal kevesebb, mint a P0 mintáé. A P20, P40, és P50 próbatestek nyomószilárdsága a vonatkozó szabványos minimális 42, 5 MPa-nál jóval kisebb.



14. ábra A portlandcementből készített minták nyomószilárdsága

A 15. ábrán a kompozit-portlandcementből készült próbatesteknél a nyomószilárdság csökkenése egyenletesebb az MH5 tartalom növekedésével. A K10 minta nyomószilárdsága 17,7%-kal kisebb, mint a K0 referencia minta nyomószilárdsága. A K10 nyomószilárdsága megfelel a 32,5 N szilárdsági osztály 28 napos próbatestekre vonatkozó szabványos előírásainak (4. ábra).



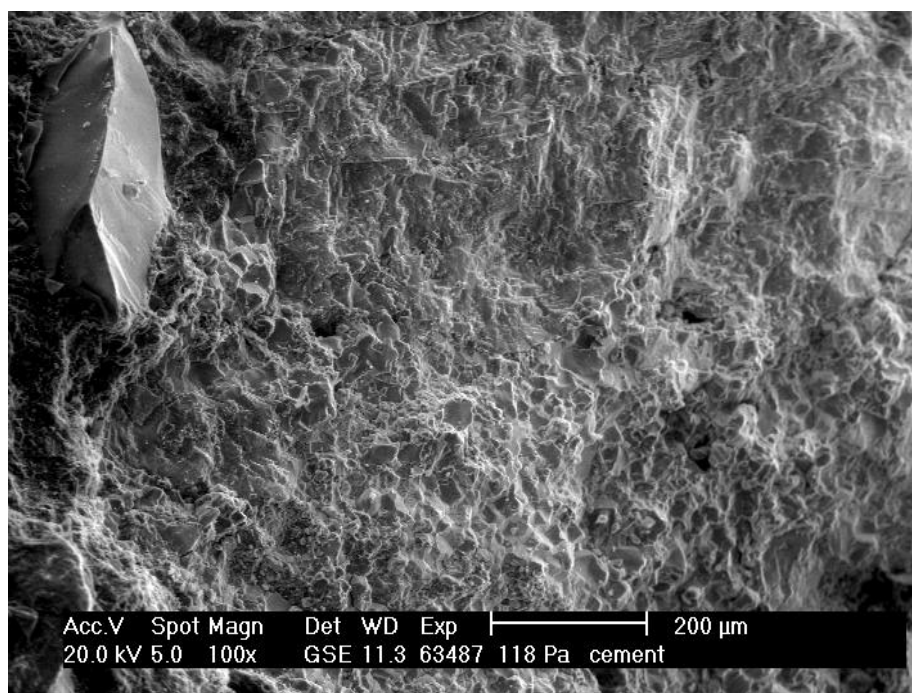
15. ábra A kompozit-portlandcementből készített minták nyomószilárdsága

A nyomószilárdságra kapott eredmények alapján a 10% MH5-tel készült minták a szabvány 28 napos próbatestekre vonatkozó előírásait teljesítik, tehát ilyen mennyiségben alkalmazható a vizsgált MH.

2.4.2. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

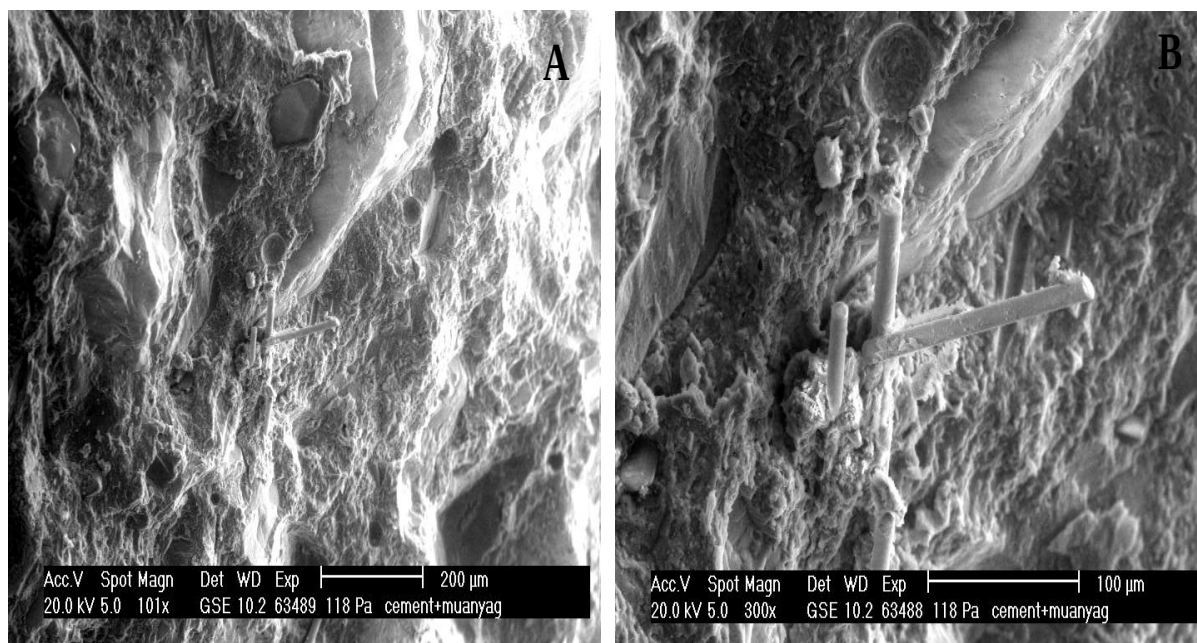
A szilárdságvizsgálat után az eltört próbatesteket Philips XL 30-ESEM típusú pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk környezeti üzemmódban. A P0, P10, P40 és a K0, K10, K40 mintákat vizsgáltam pásztázó elektronmikroszkóppal. A képalkotáshoz szekunder elektron detektort (GSE) alkalmaztam. A képeken látható egyes fázisok összetételét a visszaszórt elektron detektorral (BSE) készült felvételek segítségével energiadiszperzív röntgenanalízissel (EDX) határoztam meg. A BSE detektorral a nagyobb rendszámú elemeket tartalmazó szemcsék világosabb, míg a kisebb rendszámú elemeket tartalmazók sötétebbek a képen. A mintákban a műanyag a széntartalom miatt a sötétebb, az üvegszálak világosabbak és a cement hidratációs termékek a legvilágosabbak. [10]

A 16. ábrán látható, hogy az MH5-öt nem tartalmazó P0 minta egységes, tömör szerkezetű. A kép bal felső sarkában látható kvarcsezemcsét tökéletesen körbe veszi a cement mátrix. A képeken kevés pórus látható, tehát a próbatest nem túlzottan porózus, ami a mért nagyobb szilárdságoknak megfelelő.



16. ábra A P0 próbatestről készült SEM felvétel

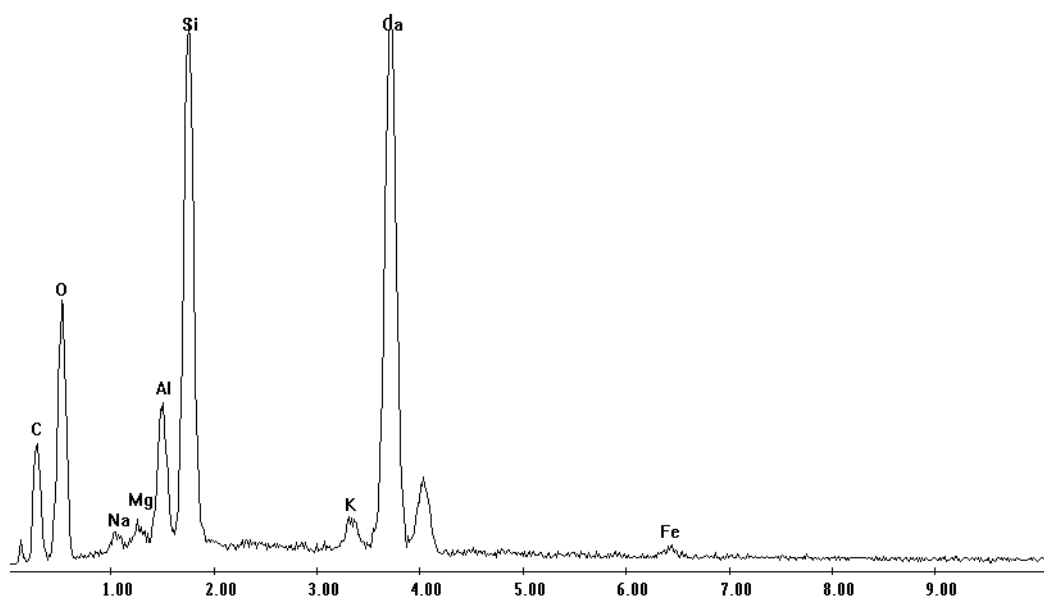
A szilárdság vizsgálatok és a bedolgozhatóság szempontjából legjobbnak ítélt P10 és K10 mintákról készült felvételek közül csak a P10 mintáét mutatom be (17. ábra), mivel a két mintáról készült SEM felvétel hasonló.



17. ábra A P10 minta SEM felvételei különböző nagyításban

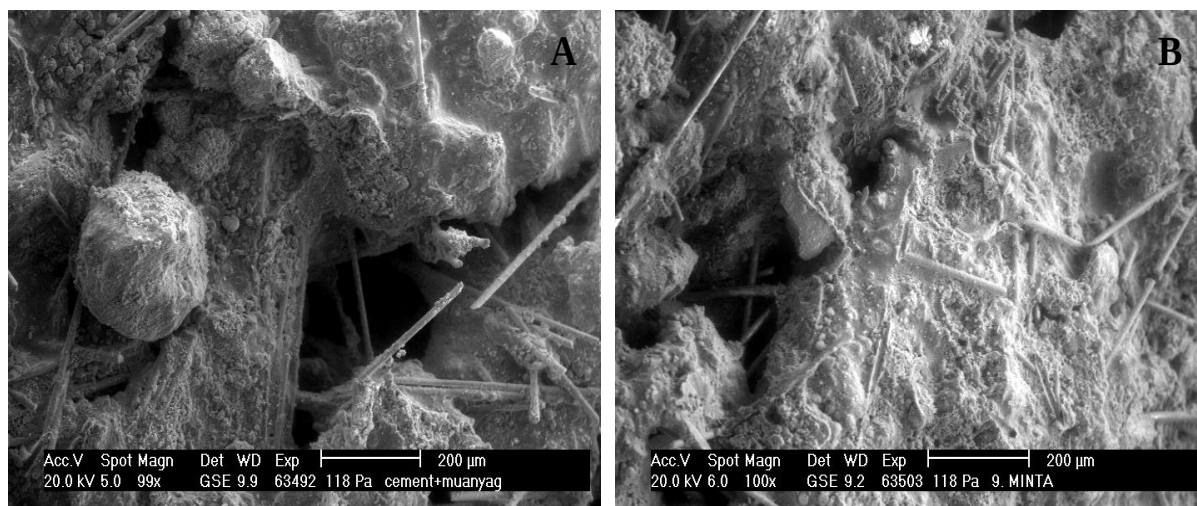
A 17. ábrán látható, hogy a beton szerkezete továbbra is tömör, és kevés pórust tartalmaz. Az MH5-ből származó üvegszálak és műanyagdarabok jól illeszkednek a cement mátrixba. Az üvegszálak és a műanyag szemcsék egyenletesen oszlanak el a mintákban. Az „A” kép közepén látható üvegszálakat tartalmazó képrészletet a „B” jelű képen kinagyítva látjuk. A pásztázó elektronmikroszkóp energiadiszperzív elem analizátorával (EDX) végzett összetétel vizsgálata azt mutatta, hogy az üvegszál mészkalkáli üveg (49,99%(m/m) SiO_2 , 10,70%(m/m) Al_2O_3 , 32,01%(m/m) CaO , 3,01%(m/m) MgO , 1,76%(m/m) Na_2O , 2,52%(m/m) K_2O az összetétele) és a szál felületén műanyag is jelen van (18. ábra).

Label A: 63488A



18. ábra A próbatestben látható üvegszál EDX pontanalízise

A 19. ábrán a P40 és K40 nagyon rossz szilárdsággal rendelkező minták SEM felvétele látható.



19. ábra A P40 (A) és a K40 (B) minta SEM felvétele

A felvételeken nagy 50-200 μm méretű pórusok figyelhetők meg. A próbatestek nem tömör, hanem porózus szerkezetűek. A cementes mátrix sok helyen elválik az üvegszálaaktól és műanyag daraboktól. Az irodalomnak [1] megfelelően, a 40% MH5 tartalom nagymértékű porozitás növekedést, és ennek köszönhetően jelentős szilárdságsökkenést okoz.

Összefoglaló

Dolgozatomban két eltérő minőségű cementhez üvegszál erősítésű poliészter műanyag hulladékot kevertem a homok részleges helyettesítésével. A különböző keverékekből szabványos eljárással beton próbatesteket készítettem és vizsgáltam a MH5 adagolás hatását a cement nyomó-, hajlítószilárdságára, illetve a beton próbatestek szerkezetére.

A MH5 tartalom növelésével a cementek hajlító- és nyomószilárdsága egyre erőteljesebben csökken, romlik a bedolgozhatóság, és növekszik a beton próbatestek porózussága.

A 10% MH5 alkalmazásánál a cementek hajlító- és nyomószilárdsága nem csökkent lényegesen, a szabványban támasztott nyomószilárdsági követelményeknek megfeleltek a cementek, és az üvegszál és a műanyag be tudott épülni a cementes mátrixba tömör szerkezetet képezve.

A 20% vagy nagyobb MH5 tartalomnál a cementek hajlító- és nyomószilárdságát drasztikusan csökkentette, amit a cementes mátrix, az üvegszál és a műanyag szemcsék elválása, a betonszerkezet porózussága okozott.

Az elvégzett vizsgálatok alapján tehát a 10% MH5 használata javasolható. A felhasználhatóság megítélése érdekében további vizsgálatok szükségesek. Az elvégzendő mérések közé tartozik a rugalmassági modulus meghatározása, valamint szükség van még a bedolgozhatóság javítására irányuló eljárások kidolgozására is.

Irodalomjegyzék

- [1] Saikai, N.; de Brito, J.; Construction and Building Materials 34 (2012) 385.
- [2] Pukánszky, B.; Móczó, J.; Műanyagok. Típotex Kiadó, 2011.
- [3] Brent, S.; Plastics: Materials and Processing. Pearson Hall, 2006.
- [4] MSZ EN 197-1:2000: Az általános felhasználású cementek összetétel követelményei és minőségi feltételei.
- [5] Opoczky, L.; Cementkiegészítő anyagok, 2001.
- [6] Reisz, L.: Cement- és mészgártás kézikönyv, Építésügyi Tájékoztatási Központ, 1989.
- [7] Holly, S.; Sohár, P.; Infravörös spektroszkópia, Műszaki Könyvkiadó, 1968.
- [8] Parra, D., F.; Mercuri, L., P.; Matos, J.; R.; Brito, H., F.; Romano, R., R.; Thermochimica Acta 386 (2002) 143.
- [9] MSZ EN 196-1:1996: Cementvizsgálati módszerek, 1. rész: A szilárdság meghatározása.
- [10] Pozsgai, I.; Elektronmikroszkópia II, Budapest, 1994.

Köszönetnyilvánítás

Dolgozatom a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0025 projekt keretében készült. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.