



**XXXII. Országos
Tudományos Diákköri
Konferencia
2015**



**Az üvegszál erősítésű poliészter hulladék
betonban való alkalmazhatóságának
vizsgálata**

Készítette:

Maloveczky Anna

Témavezető:

Kristófné dr. Makó Éva, egyetemi docens

Anyagmérnöki Intézet

Mérnöki Kar

Pannon Egyetem

Veszprém

TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓ

Az üvegszál erősítésű poliészter (GRP) a kompozit műanyagok közé sorolható. A hőre keményedő kondenzációs polimerizációval előállított poliésztert gyakran kombinálják üvegszállal, ahol a mátrix a poliészter és az erősítőanyag az üvegszál. A GRP-t hajótestek, fürdőkád, tartály, zuhanytálca, elosztó szekrény, autókarosszéria gyártásánál alkalmazzák. A műanyaggyártás és alkalmazás növekedése a műanyag hulladék mennyiségének folyamatos növekedését eredményezi. A keletkezett műanyag hulladék abszolút térfogata nagy, amelynek csökkentése, illetve újrahasznosítása elengedhetetlen. A műanyag hulladék mennyiségének csökkentése tervezéssel, a hulladék újrafeldolgozásával, újrahasznosításával, valamint a műanyag elégetésével (energiatartalmának visszanyerésével) lehetséges. A műanyag hulladék újrahasznosítása többek között az építőanyag-iparban is megvalósítható, például a betonban levő aggregátum (kavicsos homok) részleges hulladékkal, történő helyettesítésével. Így a betonhoz használt aggregátumnál a nyersanyagok egy része hulladékkal helyettesíthető.

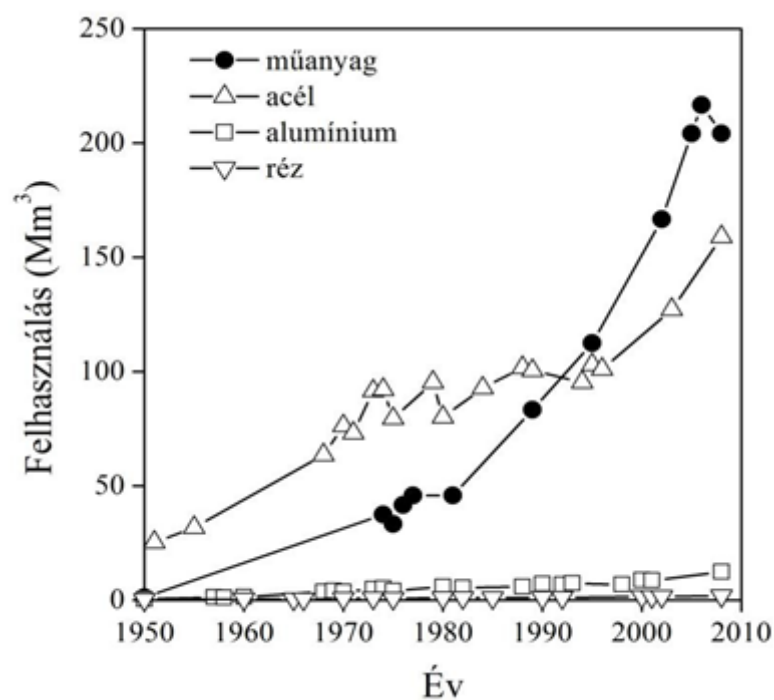
Szakmai munkámban portlandcementből és kavicsos homokból, a homok részleges GRP-vel való helyettesítésével, szabványos 0,5 víz-cement (v/c) tényezővel beton próbatesteket készítettem. A műanyag hulladék alkalmazása rontotta a cementhabarcs bedolgozhatóságát. Ezért szabványos vizsgálattal megállapítottam a homok részleges helyettesítésével készült cementhabarcs területét és bedolgozhatóságát, valamint optimális v/c tényezőjét, majd ezeknek megfelelően próbatesteket készítettem. Vizsgáltam mindkét próbateszt sorozat hajlító- és nyomószilárdságát, valamint hővezető-képességét. A 0,5 és optimális v/c tényezővel készült beton próbatestek testsűrűségének és vízfelvételének meghatározásával jellemeztem a porozitás változását. Pásztázó elektronmikroszkóppal összehasonlítottam a különböző próbatestek morfológiáját, valamint a cementes mátrix és a műanyag hulladék közötti kötést. Az eredmények alapján meghatároztam a GRP hulladékot tartalmazó betonok lehetséges alkalmazási területeit.

Tartalomjegyzék

Bevezetés [1,2]	1
1 Irodalmi összefoglaló	2
1.1 Műanyagok [2, 3]	2
1.2 A műanyag hulladék kezelése és újrahasznosítása [2, 4]	4
1.3 Cement [12,13]	7
2 Kísérleti rész	13
2.1 A kísérlethez használt műanyag hulladék	13
2.2 A kísérlethez használt cementek és homok	18
2.3 A beton próbatestek készítése	19
2.4 A beton próbatestek vizsgálata	23
2.4.1 Szilárdságvizsgálat	23
2.4.2 Testsűrűség, vízfelvétel, látszólagos porozitás vizsgálata	27
2.4.3 Hővezető-képesség vizsgálat	30
2.4.4 Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat	31
3 Összefoglaló	35
4 Irodalomjegyzék	36

Bevezetés [1,2]

Napjainkban a műanyagok az élet minden területén megtalálható fontos szerkezeti anyagok. A világon gyártott műanyagok térfogatban számított mennyisége meghaladja a legtöbb szerkezeti anyagét (**1. ábra**). A műanyagok gyártásának és alkalmazásának fejlődése, a más iparágakban tapasztalható visszaesés ellenére, stabil. Az előrejelzések szerint ez a tendencia egyelőre nem fog változni.



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

A műanyagok gyártásának dinamikus fejlődése elsősorban az alkalmazásukkal elérhető előnyös teljesítmény/ár viszonyoknak tudható be. Ezek az anyagok szinte minden igénynek eleget tesznek, és sokszor olyan tulajdonságokat biztosítanak, amelyeket a hagyományos anyagokkal nem érhetnek el.

A műanyag hulladékok a hulladékoknak csak kis hányadát alkotják, de a belőlük képződött hulladék abszolút mennyisége (térfogata) nagy. Törekedni kell ezeknek a hulladékoknak a csökkentésére, illetve a lehető legnagyobb részének az újrahasznosítására. Az újrahasznosításra egyre korszerűbb műszaki eljárásokat dolgoznak ki.

A műanyag hulladék mennyiségének csökkentésére a műanyagipar egy többféle megoldást tartalmazó stratégiát dolgozott ki az elmúlt években: a hulladék mennyiségének csökkentése tervezéssel; a hulladék újrafeldolgozása; a hulladék újrahasznosítása; a műanyag energiatartalmának visszanyerése hő- vagy áramtermeléssel; és csak végső esetben a hulladék személtlerakó telepeken való lerakása.

A műanyag hulladékok egyik lehetséges újrahasznosítása az építőipari anyagokban történhet. Számos kutatás foglalkozik azzal, hogy az építőipari alapanyagok bizonyos hányada helyettesíthető műanyag hulladékkal, ha ez nem eredményezi a felhasználás szempontjából fontos tulajdonságok erőteljes romlását. Az építőiparban az egyik lehetséges alkalmazás a betonban levő aggregátum (kavics, homok) részleges helyettesítése műanyag hulladékkal. Szakmai munkámban e területen az üvegszál erősítésű poliészter hulladék betonban való alkalmazhatóságát tanulmányozom.

1 Irodalmi összefoglaló

1.1 Műanyagok [2, 3]

A műanyagok elsősorban nagyméretű szintetikus vagy módosított természetes eredetű (polimer) molekulákat, illetve adalék-, és társító anyagokat tartalmaznak. Meghatározó tulajdonságuk, hogy megfelelő körülmények között jól alakíthatók, formálhatók.

A polimer, kisebb molekulákból (monomerekből) létre jött, nagyméretű molekula (makromolekula). Az azonos építőelemekből felépülő szerves, vagy szervetlen makromolekulák molekulatömege általában nagyobb, mint 5000.

A makromolekulák tulajdonsága lényegesen eltérhet az építőelemekétől. A mérhető tulajdonságok, a sok azonos anyagi minőségű molekula összekapcsolódásával kialakult makromolekulára érvényes kollektív, vagy tömb tulajdonságok. Ezeket a tulajdonságokat meghatározzák egyrészt a molekulák kölcsönhatásából származó tulajdonságok, másrészt a felépítő molekulák természetéből fakadó egyedi tulajdonságok.

A mesterséges polimereket polimerizációval állítják elő. Ezen kémiai folyamat mechanizmusa szerint láncpolimerizációt illetve lépcsős polimerizációt különböztetnek meg.

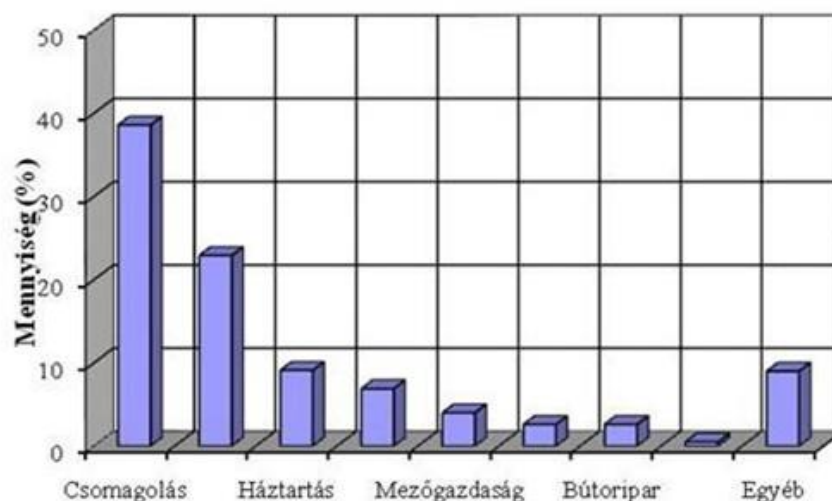
- A láncpolimerizációnál a monomer molekulák gyors láncreakcióban kapcsolódnak egymáshoz. A reakcióelegyben a monomer és a polimer is jelen van. Többnyire a polimer molekulatömege a polimerizáció alatt állandó. Ezt az eljárást használják többek között a

polietilén (PE), a polipropilén (PP), a poli (vinil-klorid) (PVC), és a polisztirol (PS) előállításánál.

- A lépcsős polimerizációnál a monomerek megfelelő funkciós csoportjai lépnek reakcióba és folyamatosan nő a makromolekula mérete. A polimerizáció elején elfogynak a monomerek és nagy molekulatömegű polimer gyakorlatilag csak majdnem teljes átalakulásnál jön létre. A lépcsős polimerizáción belül két fő csoport a polikondenzáció és a poliaddíció. Polikondenzációval állítják elő a poliamidokat, a telített poliésztereket és a polikarbonátokat, míg a poliaddícióval gyártják a poliuretánokat.

A műanyagokban a polimerekhez különböző adalék- és társító anyagokat adagolhatnak 0,1-50% közötti mennyiségben. Adalékanyagként alkalmaznak stabilizátorokat, csúsztatókat, formaelválasztókat, lágyítókat, égésgátlókat, színezékeket, optikai fehérítőket, szag- és illatanyagokat, antisztatikumokat, és gócképzőket. Társító anyagok lehetnek más polimer komponensek, ütésálló adalékok, vezetőképességet biztosító anyagok, töltőanyagok, erősítőanyagok. Az erősítőanyagok anizometrikus adalékok (pl. üvegszál), amelyek növelik a műanyag szilárdságát.

Magyarországon az elmúlt pár évben a vegyipar termelési értékének 40%-nál nagyobb hányadát a műanyagok gyártása tette ki. A műanyagok hazai felhasználásának alkalmazási terület szerinti sokféleségét a **2. ábra** szemlélteti.



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

A polimerek és műanyagok csoportosítása jellemző hőmérsékletük, tulajdonságaik, vagy szerkezetük alapján lehetséges. Egységes csoportosítás nem létezik. Gyakran használt csoport nevek: elasztomerek, hőre lágyuló műanyagok, hőre keményedő anyagok, műszaki műanyagok, és kompozitok.

Az elasztomerek rugalmas, lineáris polimerek, melyek üvegesedési hőmérséklete szobahőmérséklet alatt van. Az elasztomerek térhálósítása kémiai vagy fizikai úton történhet.

A hőre lágyuló műanyagok lineáris vagy elágazott láncú molekulákból állnak, amelyek üvegesedési és/vagy kristályosodási hőmérséklete szobahőmérsékletnél nagyobb. Hevítés során az anyag megolvad és ömledékállapotba megy át. Hűtés hatására megszilárdulnak és megőrzik a formázás során nyert alakjukat. Az olvadás és megszilárdulás reverzibilis folyamatok.

A hőre keményedő anyagok, gyanták merev és nagy szilárdsággal rendelkező térhálós műanyagok, amelyek üvegesedési hőmérséklete szobahőmérséklet van. Térhálósításuk a feldolgozásuk, alakadásuk során.

A műszaki műanyagok olyan hőre lágyuló műanyagok, amelyek kiváló szilárdsággal és ütésállósággal, valamint kiegyenlítetten jó mechanikai, elektromos, termikus stb. tulajdonságokkal rendelkeznek.

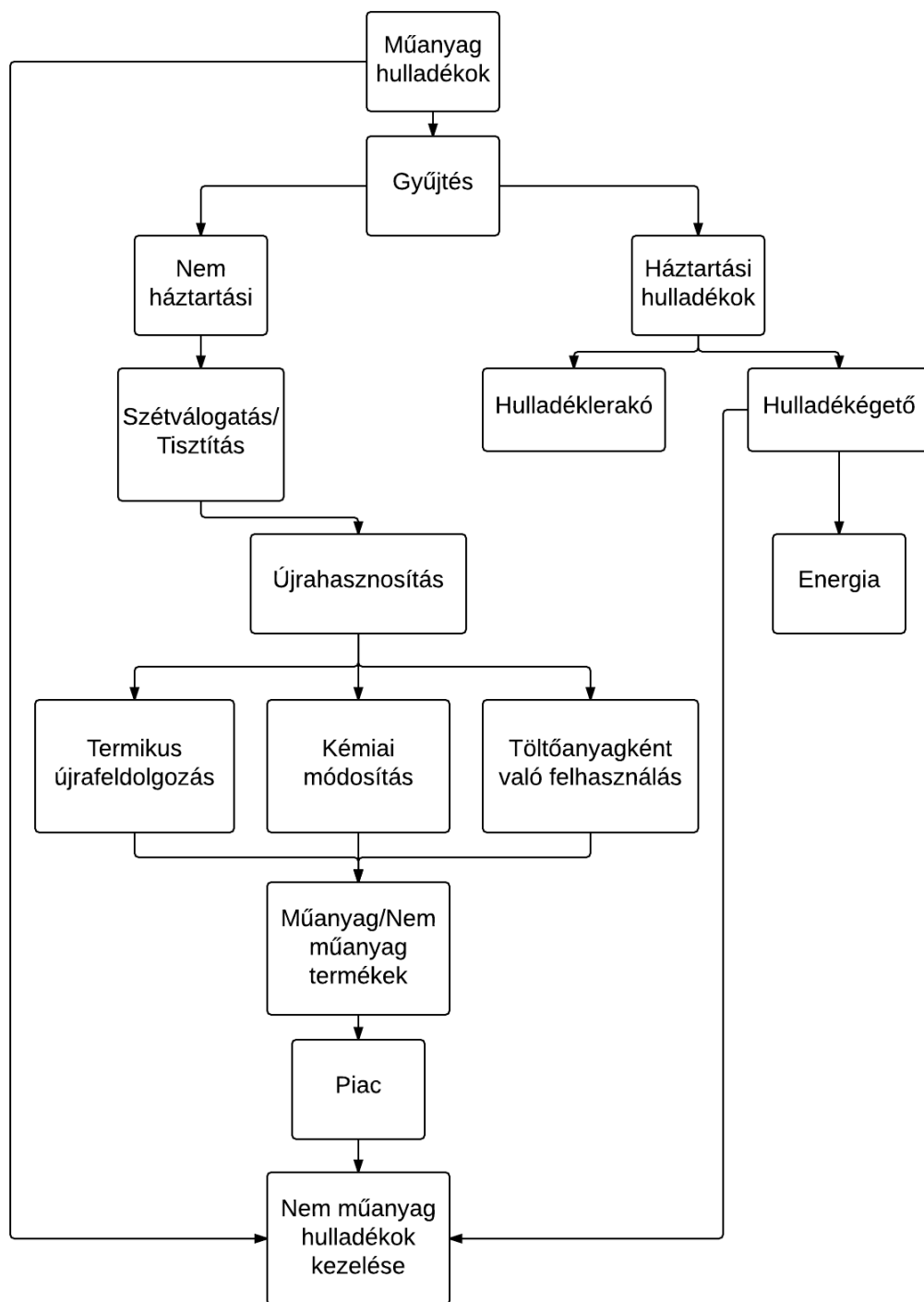
A kompozitok két- vagy többkomponensű töltő- és erősítő anyagot tartalmazó műanyagok. Széles körben alkalmazott kompozitok az üveg-, szén- vagy szerves szálakkal erősített térhálós polimerek.

A telítetlen poliészter gyantákat kétféle polimerizációs eljárással gyártják. Először egy prepolimert állítanak elő telítetlen dikarbonsav vagy anhidrid, telített dikarbonsav vagy anhidrid és diolok kondenzációjával. A kapott prepolimert sztirol hozzáadásával, gyökös polimerizációval térhálósítják. Nagy merevségű és szilárdságú műanyagok. A poliészter gyantákat legnagyobb mennyiségben üvegszál erősítésű műanyag kompozitok mátrixaként használják. Az üvegszálat szövet vagy paplan formájában átitatják a gyantával, majd formázzák és térhálósítják (keményítik). Az üvegszál erősítésű poliészterekből (GRP) többek között tartályokat, szűrőket, hajókat, gördeszkákat, és egyre nagyobb mennyiségben járműipari karosszériaelemeket gyártanak.

1.2 A műanyag hulladék kezelése és újrahasznosítása [2, 4]

A műanyagok előállítása, feldolgozása és alkalmazása nem tárgyalható a műanyag hulladékok kezelése nélkül. A sokféle és általában szennyezett műanyag hulladék környezetbarát módon

történő kezeléséhez jól összehangolt hulladékgyűjtési és kezelési eljárások szükségesek (3. ábra).



3. ábra: A műanyag hulladék kezelésének folyamata [4]

A műanyag hulladék hulladéklerakóban történő elhelyezése a hulladékkezelésnek a legrosszabb módja, amely kedvezőtlen a környezet szempontjából, meglehetősen drága, és a műanyag energiatartalma teljesen elvész. Továbbá a műanyagok igen lassan bomlanak le. Ehhez szükséges a levegővel való érintkezés, fény, nedvesség és bizonyos mikrobák, de a folyamat így is lassú.

Nagyon fontos a hulladék mennyiségének tervezéssel történő csökkentése, hiszen ez a megoldás csökkenti a hulladék képződését, ami gazdaságossági szempontból mind a gyártó, mind a vevő számára előnyös. Ebben az esetben a műanyag termékeket minél kevesebb anyag felhasználásával úgy tervezik, hogy azok biztonsággal betöltsék funkciójukat.

A műanyagok újrahasznosítása mind a gazdaságosság és a környezettudatosság szempontjából indokolt. További előny, hogy az újrahasznosítással a műanyag hulladék mennyisége nagymértékben csökkenthető. A műanyagok újrahasznosítása történhet égetéssel, kémiai lebontással, újrafeldolgozással, és töltőanyagként való felhasználással stb. A hétköznapi gyakorlatban az elsőt jelentős mértékben alkalmazzák. Az utóbbi időben a másik két megoldás szerepe egyre nő.

A műanyag hulladék égetése kézenfekvő és hasznos eljárás a hulladék megsemmisítésére és egyidejűleg a hulladék energiatartalmának kinyerésére. A legtöbb műanyag fűtőértéke vetekszik a kőszén, barnaszén és földgáz fűtőértékével. A módszer gyenge pontja, hogy gondot okoznak az égés során keletkező mérgező, környezetszennyező gázok.

A kémiai újrahasznosításnál a műanyagokat kis móltömegű komponensekre bontják (pl. pirolízissal, hidrogénezéssel, krakkolással), amelyeket később számos területen felhasználhatnak.

A hulladék újrafeldolgozása a gyártó- és feldolgozóüzemekben, ahol a hulladék keletkezik, természetes és egyszerű. A legtöbb üzemben a gyártási hulladékot vagy a selejtes terméket őrlőberendezésekben őrlik, és a hulladék őrleményét újra feldolgozzák. A háztartási műanyag hulladék újrafeldolgozása csak megfelelő válogatás és tisztítás után valósítható meg. Az üzemekben levő egykomponensű tiszta hulladék esetében az újrafeldolgozással a termék értéke nagy, de az eljárás többnyire költséges. A háztartási hulladékok újrafeldolgozása olcsóbb, de a termék értéke általában kicsi.

A műanyag hulladékok széles körben alkalmazhatók töltőanyagként pl. útépitésnél, betonban, habarcsban. Ez a módszer különösen a kompozit műanyag (pl. az üvegszál erősítésű hőre keményedő poliészter) hulladékok problémáját oldja meg, ahol az újrafeldolgozást még nem sikerült tökéletesen megoldani.

A műanyag hulladékok betonban és habarcsban aggregátumként történő felhasználásával több kutatás [1, 4-11] foglalkozik. Megállapítják, hogy a hulladék szemcsemérete és szemcseszerkezete befolyásolja a habarcs bedolgozhatóságát és a szilárdságot. A pelyhes, porózus szemcsék erőteljesen, míg a gömb alakú szemcsék kevésbé rontják a bedolgozhatóságot. A beton hajlító- és nyomószilárdsága a műanyag hulladék mennyiségének növekedésével csökkent. A nyomószilárdság csökkenését egyrészt a műanyag és a cementmátrix között kialakuló gyenge kötéssel, másrészt a cement hidratációs reakcióinak (a hidrofób műanyaggal való) gátlásával magyarázzák. Ha a cement a vízzel a műanyag jelenlétében nem tud teljes mértékben hidratálódni, akkor porózus és kisebb szilárdságú lesz a beton. A kísérletek bizonyították, hogy a műanyag hulladék akadályozta a töréskor létre jövő repedések terjedését, és javította a beton próbatestek kémiai ellenálló képességét, valamint csökkentette a gázáteresztő képességét. [1, 4-11].

1.3 Cement [12,13]

A cement hidraulikus kötőanyag, ami azt jelenti, hogy a megszilárdult cement a víz alatt is képes megtartani a szilárdságát és stabilitását. A cement olyan finomra őrölt szervesetlen anyag, amely vízzel összekeverve képlékeny pépet ad, ami hidratációs reakciók következtében megköt és megszilárdul. [12, 14]

Az MSZ EN 197-1 szabványnak megfelelő (CEM cementnek nevezett) cement az előírt mennyiségű adalékanyaggal és vízzel összekeverve megfelelő ideig bedolgozható habarcsot, valamint meghatározott időtartam után adott szilárdságú és tartósan térfogatállandó betont képez.

A CEM cement hidraulikus szilárdulásában főként a kalcium-szilikátok hidratációja játszik szerepet, de egyéb kémiai vegyületek (pl. aluminátok) is elősegíthetik szilárdulást. A CEM cementben a reakcióképes kalcium-oxid (CaO) és szilícium-dioxid (SiO₂) együttes (az MSZ EN 196-2 szerint meghatározott) mennyisége legalább 50 %(m/m) kell, hogy legyen.

A cement mind a mai napig az építőipar számára nélkülözhetetlen alapanyag. Napjaink betontechnológiájában lényeges, hogy a különböző környezeti hatásoknak ellenálló betonszerkezetekhez új különleges cementtípusok álljanak rendelkezésre. A kohósalakcementek jobban ellenállnak a betonkorrózióknak, és az agresszív kémiai hatásoknak, mint az általános felhasználású cementek. A tűzállócementekből készült beton nagyobb hőmérsékleten alkalmazható. Fontos, hogy az adott alkalmazásra legjobban megfelelő cementtípussal dolgozzunk. [14]

Világszerte és Magyarországon is a termelt cement nagy részét teszik ki a cementkiegészítő anyagokat is tartalmazó többkomponensű kompozitcementek. Ezek a cementek a portlandklinkeren és a kötőszabályozón kívül több cementkiegészítő anyagot tartalmaznak.

A többkomponensű kompozitcementek gyártása és felhasználása több szempontból is kedvező. A cementkiegészítő anyagot tartalmazó cementek gyártása szükséges a piaci verseny erősödése, a cementtermelés költségeinek a csökkentése, valamint az egyre szigorúbb környezetvédelmi előírások (CO₂ emisszió csökkentése, hegyek lebontásának megállítása stb.) miatt.

Ezek a cementek, és a belőlük készült habarcsok, betonok kedvezőbb alkalmazástechnikai tulajdonságokkal (kisebb hőfejlesztéssel, kisebb zsugorodási és repedési hajlammal, kisebb vízigénnyel, jobb bedolgozhatósággal és vízmegtartó-képességgel, stb.) rendelkeznek, mint az adalékmentes portlandcementek. Ezekben a klinkertakarékos cementekben a klinkerhányad relatíve kicsi, ami gazdasági és környezetvédelmi szempontból is előnyös. Ezért az ilyen cementeket környezetbarát cementeknek is nevezik, mivel a kevesebb klinker felhasználása az égetéshez felhasznált energia megtakarításával, a CO₂ kibocsátásának csökkenésével, a cementipari nyersanyag felhasználásának csökkenésével, és hulladék anyagok hasznosításával jár.

A cement alkotórészei: a portlandcementklinker (K), a granulált kohósalak (S), a természetes puccolánok (P), a kalcinált puccolánok (Q), a pernye, az égetett pala (T), a kalcium-karbonát (CaCO₃), a szerves szén-tartalom (TOC), a szilikapor, a töltőanyag (F), a gipszkő (kalcium-szulfát-dihidrát, CaSO₄•2H₂O), a félhidrát (CaSO₄•1/2H₂O), az anhidrit (vízmentes kalcium-szulfát, CaSO₄).

A portlandcementklinker (K) CaO, SiO₂, Al₂O₃ és Fe₂O₃ fő alkotórészeket és kis mennyiségben egyéb komponenseket tartalmaz. Meghatározott összetételű nyersanyagkeverék égetésével állítják elő. Legalább kétharmad tömegrészben kalcium-szilikátokat alítot (3CaO•SiO₂) és belitet (2CaO•SiO₂), valamint egyharmad rész alumínium-oxidot, vas-oxidot és egyéb vegyületeket tartalmaz. Hidraulikus tulajdonságú anyag, amelynek a CaO/SiO₂ tömegaránya 2,0, és a magnézium-oxid mennyisége legfeljebb 5,0 tömegszázalék kell, hogy legyen.

A granulált kohósalakot (S) a vas-oxid megolvasztásakor képződő olvadék gyors hűtésével kapják. Legalább a kétharmad részben üveges állapotú anyagot tartalmaz. Kémiai összetételében a (CaO+MgO)/SiO₂ tömegarány 1,0-nél nagyobb kell, hogy legyen.

A puccolános anyagok szilikátokból, vagy aluminát-szilikátokból, és ezek változataiból álló természetes anyagok. A természetes puccolánok (P) megfelelő kémiai és ásványi összetételű vulkanikus eredetű vagy üledékes kőzetekből állnak. A természetes kalcinált puccolánokat (Q) vulkanikus eredetű anyagok, agyagok és palák vagy üledékes kőzetek hőkezelésével állítják elő. A puccolános anyagok elsősorban aktív szilícium-dioxidból (SiO_2) és alumínium-oxidból (Al_2O_3) állnak. Ha vízzel összekeverjük őket nem képesek megkötni. Ugyanakkor, ha finomra őröljük őket, akkor az örlemény víz jelenlétében reakcióba lép az oldott kalcium-hirossal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), és megszilárdul. A szilárdulás során keletkező kalcium-szilikát- és kalcium-aluminát-vegyületek hasonlóak a hidraulikus anyagok szilárdulásánál kialakuló vegyületekhez.

A pernyét (porszerű részecskéket) a szénportüzelésű kazánokból távozó füstgázokból elektrosztatikus vagy mechanikus leválasztással távolítják el. Megkülönböztetnek savas jellegű (puccolános tulajdonságú) és bázikus jellegű (hidraulikus és/vagy puccolános tulajdonságú) pernyét.

Az égetett palát (T) olajpalából állítják elő körülbelül 800 °C-os hőkezeléssel. Főként dikalcium-szilikátot és monokalcium-aluminátot, kis mennyiségben szabad kalcium-oxidot és kalcium-szulfátot tartalmaz. Jelentős összetevői a puccolánosan aktív oxidok, főként szilícium-dioxid (SiO_2).

A cementgyártáshoz használt mészkő legalább 75 tömegszázalék kalcium-karbonátot (CaCO_3) kell, hogy tartalmazzon. A mészkő agyagtartalma maximum 1,20 g/100g legyen. A mészkő szerves szén-tartalma (TOC) alapján két fajtáját adják meg. Az egyik fajtánál az összes szerves szén-tartalom (TOC) legfeljebb 0,20 (LL), a másikonál a TOC legfeljebb 0,50 tömegszázalék lehet (L).

A szilikapor kisméretű gömb alakú szemcsékből áll, amelyek a szilícium- és ferro-szilícium-ötvözetek gyártásánál képződnek. A szilikaporban az amorf szilícium-dioxid (SiO_2) mennyisége legalább 85 tömegszázalék kell, hogy legyen. Az elemi szilícium-tartalma viszont 0,4 tömegszázaléknál kisebb kell, hogy legyen (az ISO 9286 szerint).

A töltőanyagként (F) megfelelően előkészített (válogatott, homogenizált, szárított, őrölt), természetes vagy mesterséges szervesetlen ásványi anyagokat alkalmaznak. Ezek az anyagok javítják a cement fizikai tulajdonságait (pl. bedolgozhatóságot) ugyanakkor nem növelhetik a cement vízigényét, nem csökkenthetik a beton vagy habarcs kémiai ellenálló képességét, és nem ronthatják a betonvasalás korrózióállóságát.

A kalcium-szulfátot 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) formájában, vagy ezek keverékeként adagolják gyártás során. Kötésszabályozó komponensként használják.

Az adalékok, az MSZ EN 197-1 szabvány szerint, a cementgyártás műveleteit egyszerűsítik, vagy a cement tulajdonságait javítják. Az adalék mennyisége maximum a cement 1,0 tömegszázaléka lehet. Ha a cement 1,0 tömegszázaléknál nagyobb mennyiségben tartalmaz adalékot, akkor azt a csomagolásán meg kell adni.

Az MSZ EN 197-1 szabványban az általános felhasználású cementeknek öt fő fajtáját adják meg (**1. táblázat**): CEM I (portlandcement), CEM II (összetett portlandcement), CEM III (kohósalakcement), CEM IV (puccoláncement), CEM V (kompozitcement). A cementek nyomószilárdságának az MSZ EN 196-1 szabványban megadott követelményeket (**2. táblázat**) teljesíteni kell. Az MSZ EN 197-1 szabvány kémiai követelményeket is megad a cementfajtákra (**3. táblázat**).

1. táblázat: Az általános felhasználású cementfajták és összetételük [12]

Fő cement-fajták	A 27 termék jelölése (az általános felhasználású cementek fajtái)		Mennyiségek tömegszázalékban ^a											
			Főalkotórészek										Mellékalkotórészek	
			Klinker	Granulált kohósalak	Szilikapor	Puccolán		Pernye		Égetett pala	Mészke			
			K	S	D ^b	természetes P	kalci-nált Q	savanyú V	bázi-kus W	T	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-portlandcement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Puccolánportlandcement	CEM II/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	
	Pernyeporlandcement	CEM 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	
	Mészkeportlandcement	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.

2. táblázat: Mechanikai és fizikai követelmények [12]

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	-				

3. táblázat: Kémiai követelmények [12]

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	CEMI 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.

2 Kísérleti rész

A munkám során a homokból (a homok részleges 5%, 10%, 15%, 20% felaprított üvegszál erősítésű műanyag hulladékkal történő helyettesítésével), portlandcementből és vízből készítettem beton próbatesteket. Az MSZ EN 196-1 szabványban előírtaknak megfelelően készítettem referencia próbatesteket is. Vizsgáltam a próbatestek hajlító- és nyomószilárdságát, testsűrűségét, porozitását, és hővezető-képességét. Elektronmikroszkóppal elemeztem a műanyag hulladék elhelyezkedését a cementmátrixban.

2.1 A kísérlethez használt műanyag hulladék

Az üvegszál erősítésű poliészter (GRP) vágási hulladékot a Balatonplast Kft.-től (Felsőörs) szereztük be. A cég üvegszál erősítésű poliésztert használ busz karosszéria elemek, kerti medencék, csónakok és szélérőmű lapátok gyártásához. A cégnél ezek a termékek ortoftálsavas poliészter gyantából (Viapal VUP 4805) kézi laminálással készülnek. A gyantát 2-4 m/m% metil-etil-ke-ton-peroxiddal katalizálják. A laminátumban 28 m/m% üvegszál-as szövetet (CAMELYAF) használnak. Az impregnált laminátum 24 óra alatt térhálósodik, utána a kiveszik a gyártó szerszámból és kézi, vagy gépi úton vágják. A vágás során keletkezik a vágási GRP hulladék, amit a kísérletekhez használtam. A GRP hulladékot kb. 5-10 cm széles és 30-50 cm hosszú darabokban kaptam (**4. ábra**).

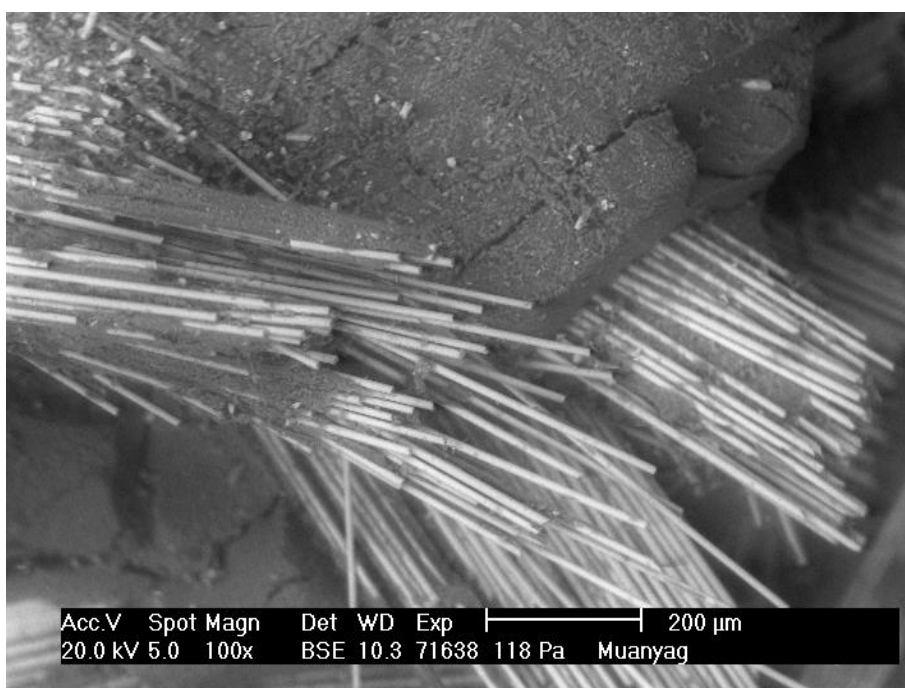


4. ábra: A vágási GRP hulladék

A műanyagot késes vágógép segítségével 5 mm alatti szemcseméretre aprítottam (5. ábra).



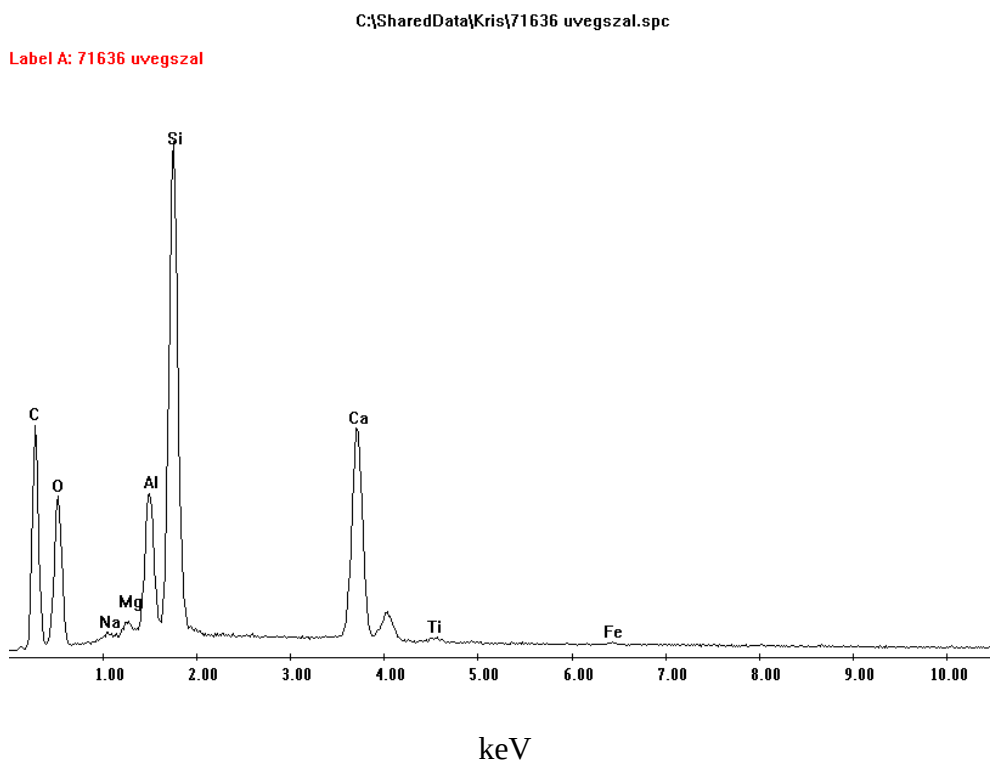
5. ábra: Az aprított GRP hulladék



6. ábra: Az aprított GRP hulladék SEM felvétele

Az aprított GRP hulladék morfológiáját (6. ábra) Philips XL 30-ESEM típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltam visszaszórt elektron detektort (BSE) alkalmazva. A BSE detektorral a nagyobb rendszámú elemeket tartalmazó üvegszálak világosabbak, míg a kisebb rendszámú elemeket tartalmazók műanyag sötétebb. Az aprított GRP hulladék 10-50 μm szemcseméretű műanyag darabok 5mm-nél kisebb halmazait tartalmazza, amely 10-3000 μm hosszú üvegszálakat foglal magába.

Az üvegszálak elemi összetételét a pásztázó elektronmikroszkópra szerelt energiadisperzív röntgenanalízátorral (EDX) jellemeztem (7. ábra). Az EDX elemzés alapján tehát az üvegszál mészkalkáli üvegből készült és a szál felületén műanyag hulladék is jelen van.



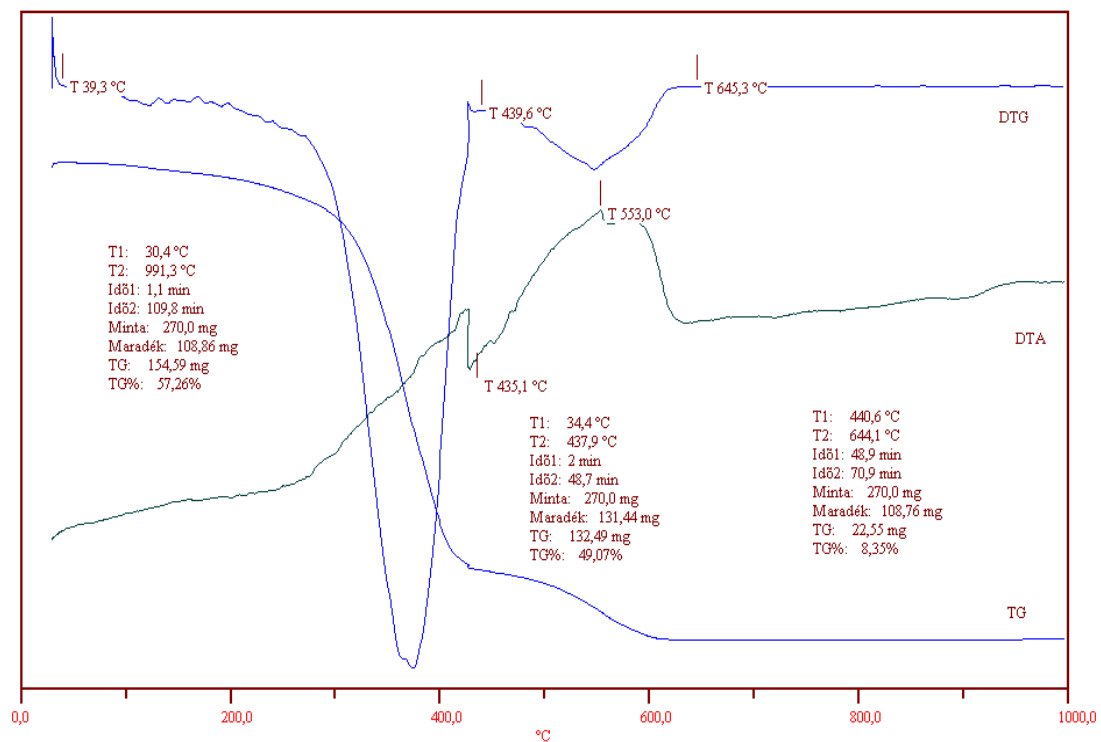
7. ábra: Az üvegszál EDX spektruma

Az aprított műanyag hulladék szemcseméret-eloszlását szitavizsgálattal határoztam meg (4. táblázat).

4. táblázat: Az aprított GRP hulladék szemcseméret-eloszlása

szemcseméret [mm]	Mennyiség [m/m%]
5,00-2,00	67,59
2,00-1,60	0,98
1,60-1,00	5,02
1,00-0,50	6,97
0,50-0,16	14,77
0,16-0,08	2,84
0,08-0	1,83

A GRP hulladék termikus analízisét MOM Derivatograph Q 1500D típusú berendezéssel végeztük. A 270 mg mintát statikus levegő atmoszférában, korund tégelyben, és korund inert anyaggal, 10°C/perc fűtési sebességgel elemeztük. A termogravimetriás (TG) és a derivált termogravimetriás (DTG) görbék alapján **(8. ábra)** két tömegvesztési részfolyamat megy végbe, amelyek a műanyag bomlását jelzik. Az első részfolyamatban 438 °C-ig a műanyag bomlási termékeinek jelentős része (49,07 m/m%) eltávozik, majd 441–644 °C között a műanyag bomlási termékeinek maradéka (8,35 m/m %) lép ki. Tehát kb. 644 °C-ig a műanyag termikus bomlása befejeződik és mintában csak az üvegszál marad vissza **[15]**. A tömegvesztés alapján a minta műanyagtartalma 57,26 m/m% és az üvegszál mennyiség 42,74 m/m%.



8. ábra: A GRP hulladék derivatogramja

2.2 A kísérlethez használt cementek és homok

A kísérletekhez a Duna-Dráva Cement Kft. (Beremend) által gyártott CEM I 42,5 N portlandcementet használtam. A portlandcement cég által megadott kémiai összetétele és fizikai tulajdonságai az 5., 6. táblázatban találhatóak.

5. táblázat: A cement kémiai összetétele

Komponensek	Mennyiség [m/m%]
Izzítási veszteség	2,75
SiO ₂	20,54
Al ₂ O ₃	5,4
Fe ₂ O ₃	3,26
TiO ₂	0,27
CaO	61,97
MgO	1,61
K ₂ O	0,52
Na ₂ O	0,11
SO ₃	3,16
Oldhatatlan maradék	0,1
Cl ⁻	0,012
Szabad CaO	0,88

6. táblázat: A cement fizikai tulajdonságai

Jellemző	Vizsgálati eredmény
Hajlítószilárdság [MPa]	8,7
Nyomószilárdság [MPa]	54,2
Sűrűség [g/cm ³]	3,18
Fajlagos felület [cm ² /g]	3720

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

2.3 A beton próbatestek készítése

A próbatesteket az MSZ EN 196-1 [19] szabványnak megfelelően állítottam elő. A 7. táblázatban látható a cement, homok, GRP hulladék mennyisége, valamint a víz-cement (v/c) kísérleteknél alkalmazott tömegaránya, és az így kapott próbatestek jelölése. Az MSZ EN 196-1 szabvány 0,5 v/c tömegarányt ír elő a próbatestek készítésénél.

7. táblázat: A cementhabarcs összetétele

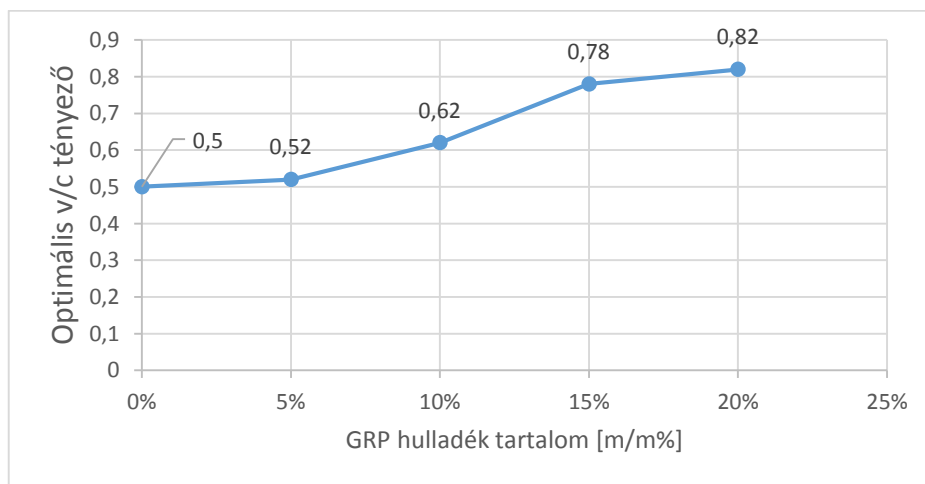
Próbatest jelölés	Cement (g)	Víz (g)	Homok (g)	GRP (g)	v/c tényező
0,5 v/c tényezővel készült minták					
0%	450	225	1350	0	0,5
5%	450	225	1215	135	0,5
10%	450	225	1080	270	0,5
15%	450	225	810	540	0,5
20%	450	225	675	675	0,5
Optimális v/c tényezőjű minták					
V5%	450	234	1215	135	0,52
V10%	450	279	1080	270	0,62
V15%	450	351	810	540	0,78
V20%	450	369	675	675	0,82

A GRP hulladék mennyiségének növelése jelentősen rontotta a cementhabarcs bedolgozhatóságát. A 15% és 20% GRP hulladék tartalomnál a habarcs nagyon szárazzá és nehezen keverhetővé vált. A habarcs bedolgozhatóságát a víz mennyiségének növelésével javítottam. Az MSZ EN 1015-3 [16] szabvány szerint meghatároztam a GRP hulladékot nem tartalmazó 0,5 v/c tényezővel készült habarcs területét. A habarcs területének vizsgálatához a szabványnak megfelelő ejtőasztalt használtam. A szabványos kúpot a vízszintes asztallapra helyeztem, az előírás szerint betömörítettem a habarcsot, majd 30 ejtést végeztem 10 mm magasságból, másodpercenként egyet. Végül a szétterült habarcs (9. ábra) átmérőjét két egymásra merőleges irányban milliméter pontossággal megmértem, majd ezek átlagát használtam a terület jellemzésére. A GRP hulladékot nem tartalmazó 0,5 v/c tényezővel készült habarcs területe 13,4 cm volt. Ezt tekintetem a habarcs optimális konzisztenciájának (területének), ami szükséges a jó bedolgozhatósághoz.



9. ábra: A cementhabarcs területének vizsgálata

Az 5%, 10%, 15% és 20% GRP tartalmú habarcsoknál a víz mennyiségének növelésével meghatároztam az optimális konzisztenciához tartozó v/c tényezőt (ábra). Az optimális bedolgozhatósághoz tartozó v/c tényező növekedett a műanyag hulladék mennyiségének növekedésével (10. ábra)



10. ábra: Az optimális bedolgozhatósághoz tartozó v/c tényező

A 7. táblázatban megadott mennyiségű cementből, homokból, műanyag hulladékból és vízből az MSZ EN 196-1 szabványnak megfelelő Controls AUTOMIX típusú programozható bolygó lapátos keverőgéppel (12. ábra) készítettem a habarcsot, majd szabványos formába (11. ábra)

helyeztem. Ezt követően a szabvány szerint ejtőasztalon tömörítettem. Az MSZ EN 196-1 szabványban megadott 3 db 40x40x160 mm-es próbatestet állítottam elő. A próbatesteket 24 óra elteltével kiszaluttam és vízzel telt tárolókádba helyeztem. 28 napos korban a szabványnak megfelelően vizsgáltam a próbatestek szilárdságát. [17]



11. ábra: Cementshabarcs a formában



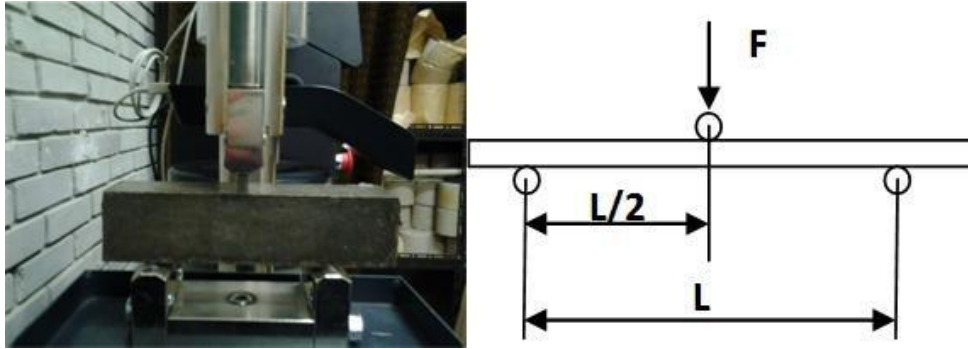
12. ábra: Controls AUTOMIX típusú programozható bolygólapátos keverő

2.4 A beton próbatestek vizsgálata

2.4.1 Szilárdságvizsgálat

A próbatestek hajlító- és nyomószilárdságát az MSZ EN 196-1 szabvány szerint vizsgáltam. A szilárdság meghatározásához a szabványnak megfelelő Controls Automax 5 törőberendezést használtam. Először a próbatestek hajlítószilárdságát vizsgáltam. A vizsgálatkor eltört fél hasábokon mértem a nyomószilárdságot. [17]

A hajlítószilárdság vizsgálatnál a próbatestet (a szabványnak megfelelően) a bedolgozási felületére merőlegesen helyeztem el (13. ábra). Az F terhelést átadó görgő a két támasztó görgő távolságának (L) felénél helyezkedik el.



13. ábra: Hajlítószilárdság meghatározása

Az alátámasztó görgők távolsága 100 mm és átmérőjük 10 mm.

A hajlítószilárdságot (σ_h) az **(1).** és a **(2).** képlettel határozhatjuk meg.

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

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (2)$$

ahol, σ_h a hajlítószilárdság MPa-ban, F a törőerő N-ban, L a támasztógörgők távolság mm-ben, W a keresztmetszeti tényező mm³-ben, b a próbatest keresztmetszetének oldalhosszúsága mm-ben és h a próbatest magassága (vastagsága) mm-ben. A **14. ábrán** látható a nyomószilárdság vizsgálathoz elhelyezett fél hasáb. Ebben az esetben is a bedolgozási felületre merőlegesen helyeztem el a próbatestet, és ügyeltem arra, hogy a fél hasáb közepén legyen a nyomógép nyomólapja. A szilárdságvizsgálatnál az egyenletes szabványos terhelést a próbatest töréséig fokoztuk.



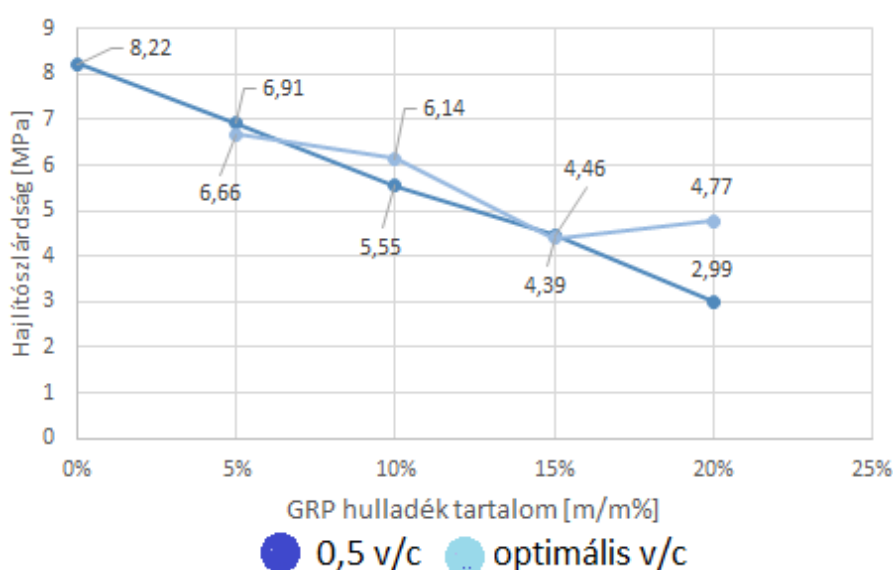
14. ábra: Nyomószilárdság meghatározása

A nyomószilárdságot a **(3) egyenlettel** számíthatjuk ki.

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

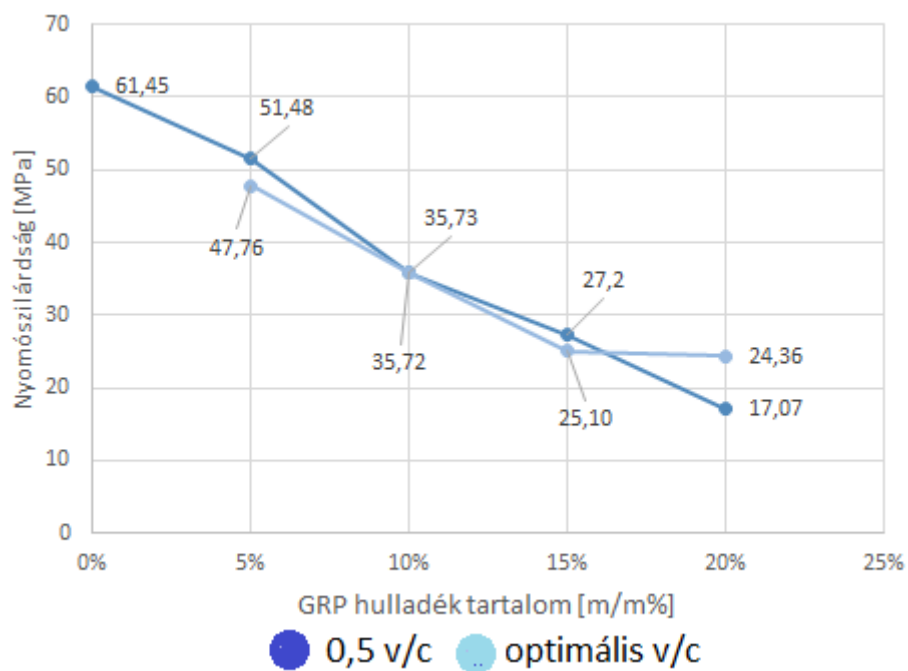
ahol, σ_{ny} a nyomószilárdság MPa-ban, F a törőerő N-ban, A a nyomólap felülete mm²-ben. A hajlítószilárdság rendkívül fontos a betonból készült építőelemek szempontjából. A hajlítószilárdságot eltérő módszerekkel és adalékanyagokkal tudják növelni. A vasbeton szerkezeteknél például egy vasháló növeli a hajlítószilárdságot.

A **15. és 16. ábrán** a 0,5 és növelt v/c tényezővel készült próbatestek hajlító- és nyomószilárdságát ábrázoltam.



15. ábra: A vizsgált próbatestek hajlítószilárdsága

A GRP hulladék mennyiségének növekedésével a próbatestek hajlítószilárdsága egyre erőteljesebben csökken (**15. ábra**). A növelt v/c tényező a 20%-os mintánál eredményez növekedést a hajlítószilárdságban. Az 5%, 10% és 15% műanyagtartalomnál a nagyobb v/c tényezővel is ugyanakkora a próbatestek hajlítószilárdsága.



16. ábra: A vizsgált próbatestek nyomószilárdsága

A próbatestek nyomószilárdsága a műanyagtartalommal hasonlóan változik, mint a hajlítószilárdságuk. A nyomószilárdság is csökkenő tendenciát mutat a műanyagtartalom növelésével. Ebben az esetben is a 20%-os minta esetében nőtt a nyomószilárdság a v/c tényező növelésével. Az 5%-os mintáknál mért nyomószilárdság a 42,5 N szilárdsági osztály 28 napos korra megadott szabványos előírásának eleget tesz **(2. táblázat)**. Elmondható, hogy a v/c növelése 20% műanyagtartalomnál a bedolgozhatóság mellett kedvező hatással van a szilárdságra is.

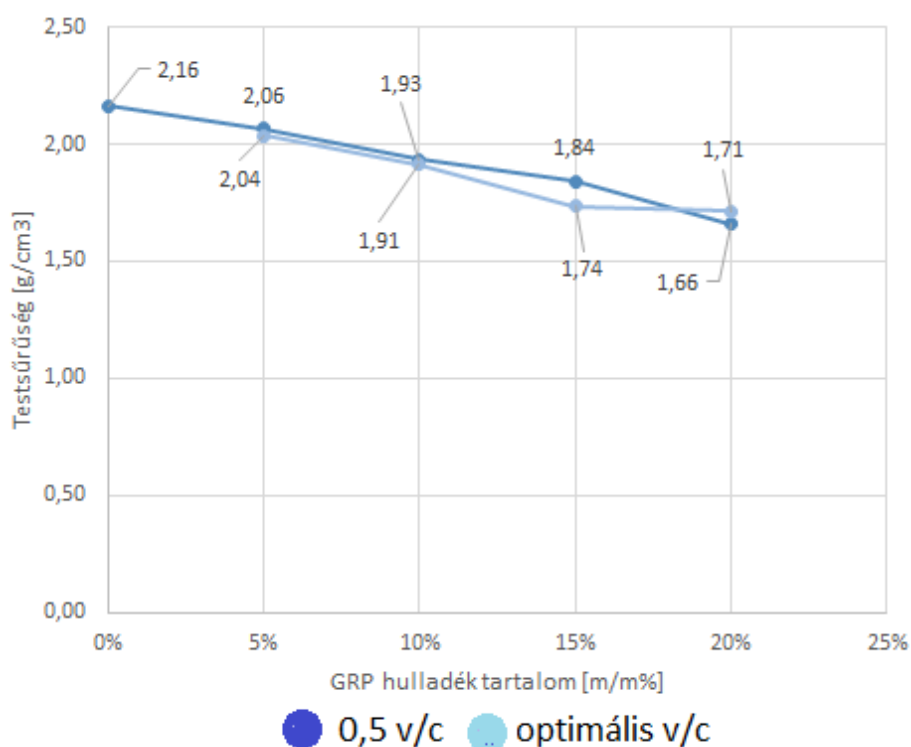
A hajlítószilárdság vizsgálat közben megfigyeltem, hogy a GRP hulladékot tartalmazó hasábok nem teljesen úgy törtek el, mint a referencia hasábok. A hajlító igénybevétel hatására keletkező repedés a hasáb keresztmetszetén végig futott, de a hasáb nem esett szét két részre.

2.4.2 Testsűrűség, vízfelvétel, látszólagos porozitás vizsgálata

A testsűrűséget, vízfelvételt és a porozitást az MSZ EN 12390-7 [18] szabvány alapján határoztam meg. A fél próbahasábokat 72 óráig desztillált vízben áztattam, majd táramérlegen lemértem a tömegét (m_1). Ezt követően a vízbe merített tömeget (m_2) hidrosztatikai mérleggel határoztam meg. Végül a száraz tömeget (m_3) a próbatestek tömegállandóságig 110°C-on szárítószekrényben végzett szárítását követően táramérlegen mértem meg.

A testűrűség (ρ_t) a pórusokkal együtt mért térfogategységnyi száraz test tömege. A mért adatok alapján a (4) képlettel számoltam ki.

$$\rho_t = \frac{m_3}{m_1 - m_2} \cdot \rho_{\text{víz}} \quad (4)$$



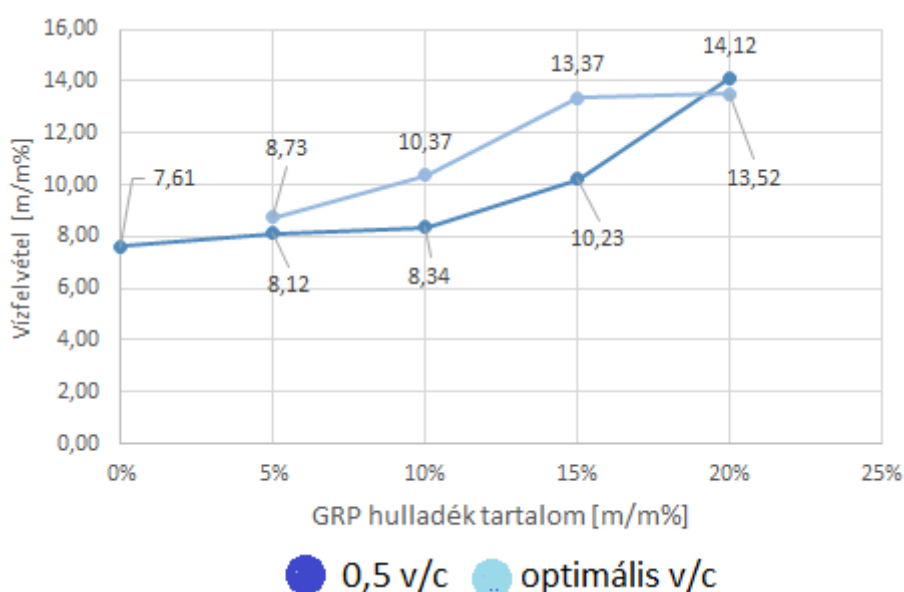
17. ábra: A próbatestek testsűrűsége a műanyagtartalom függvényében

A 17. ábra alapján megállapítható, hogy a próbatestek testsűrűsége a műanyagtartalom növekedésével fokozatosan csökken. A 0,5 és nagyobb v/c tényezővel készült próbatestek

testsűrűsége nem mutat lényeges eltérést. Könnyűbetonnak nevezzük a $2,00 \text{ g/cm}^3$ testsűrűséget el nem érő betonokat. Ennek alapján a 10%, V10%, 15%, V15%, 20% és V20% jelű mintáim a könnyűbeton kategóriába tartoznak. A kis testsűrűség köszönhető mind a referencia betonénál nagyobb porozitásnak, mind a hozzáadott (kis sűrűségű) műanyag hulladéknak [19, 20, 21].

A vízfelvétel (W%) a test nyílt pórusaiba felvett víz mennyiségét jelenti a száraz test tömeg százalékában megadva. Az **(5) képlettel** számítottam.

$$W\% = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \cdot 100 \quad (5)$$

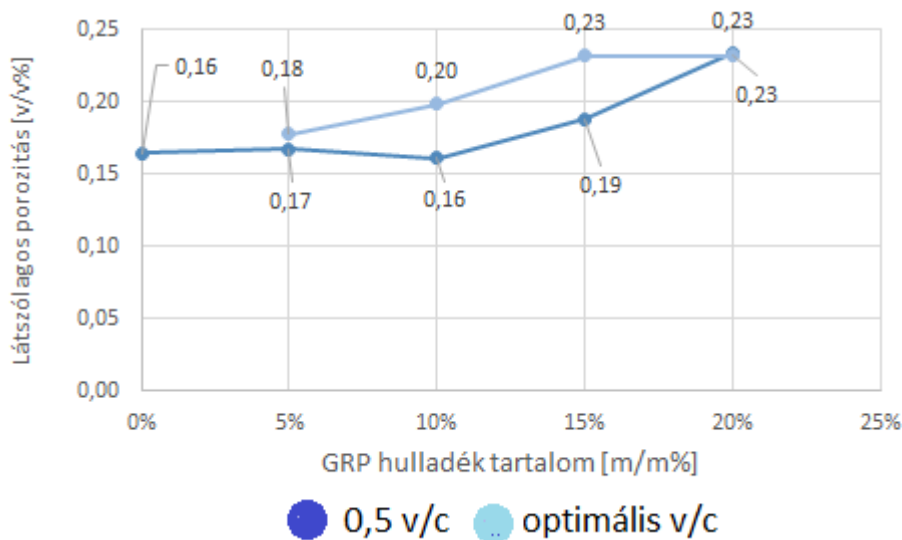


18. ábra: A próbatestek vízfelvétele a műanyagtartalom függvényében

A **18. ábrán** látható, hogy a próbatestek vízfelvétele a műanyag hulladék mennyiségének növelésével növekszik. Érdekes, hogy a nagyobb v/c tényező az 5%, 10% és 15% műanyagtartalomnál nagyobb vízfelvételt eredményez.

A látszólagos, vagyis nyílt porozitás (P_L) a vízzel telített pórustérfogat a száraz test térfogatszázalékában kifejezve. Számítása a **(6) képlettel** történt.

$$P_L = \frac{\rho_t \cdot W}{\rho_{\text{víz}}} \quad (6)$$



19. ábra: A próbatestek látszólagos porozitása a műanyagtartalom függvényében

A próbatestek látszólagos porozitása a műanyagtartalom növekedésével egyre erőteljesebben nő (**19. ábra**). A vízfelvételnél tapasztaltakhoz hasonlóan itt is a nagyobb v/c tényező az 5%, 10% és 15% műanyagtartalomnál nagyobb porozitást eredményez.

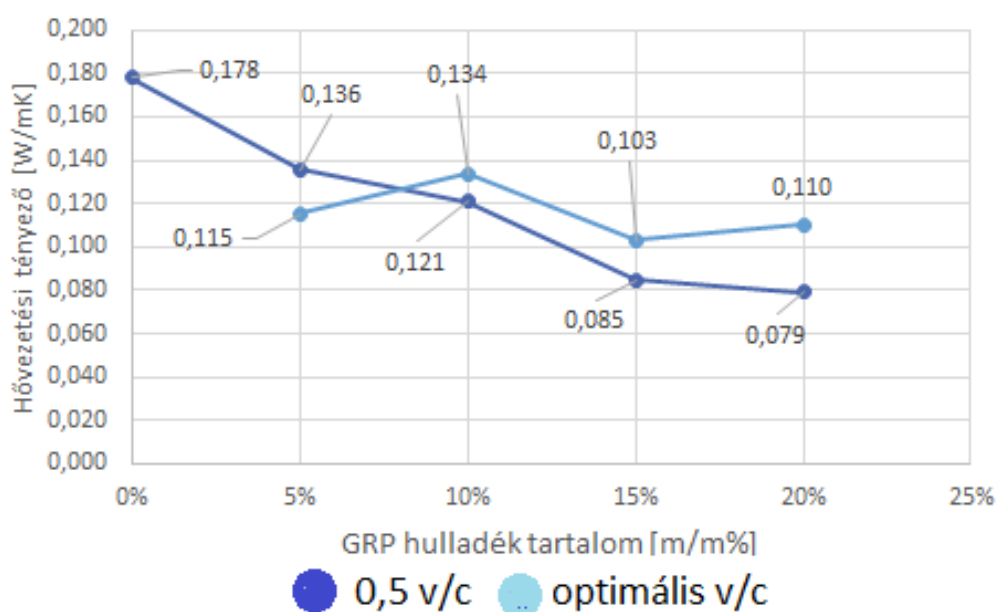
A 10% és 15% műanyagtartalmú minták látszólagos porozitásának és vízfelvételének növekedése a v/c növelésével a nagyobb hozzáadott vízmennyiségnek köszönhető, ami a szilárdulás után pórusokat hagyott az anyagrendszerben.

2.4.3 Hővezető-képesség vizsgálata

A hővezetési tényező (λ) az építőanyagok fontos tulajdonsága. A hővezetési tényezőt C-Therm TC_i Thermal Conductivity Analyzer műszerrel mértem. A hővezető-képesség jellemzi azt, hogy az anyag a hőmérsékletkülönbség hatására létrejövő hőáramot milyen mértékben engedi át.

A hagyományos értelemben vett hőszigetelő anyagok a konvekcióval és a vezetéssel történő hőterjedést jelentősen csökkentik. Az egyik legjobb tulajdonságú hőszigetelő „anyag” a nyugvó levegő. Azonban a nem szilárd anyagok, így a levegő is, a fellépő hajtóerő hatására konvekciós áramlásba kezdenek, ami rontja a hőszigetelő hatást. A hőszigetelésnek az egyik leghatékonyabb módja az, ha olyan vázrendszert (nagy porozitású testet) alakítunk ki, ami magába zárja a légpórusokat.

A beton építőanyagként való alkalmazása során a hőszigetelő-képesség fontos tulajdonság.



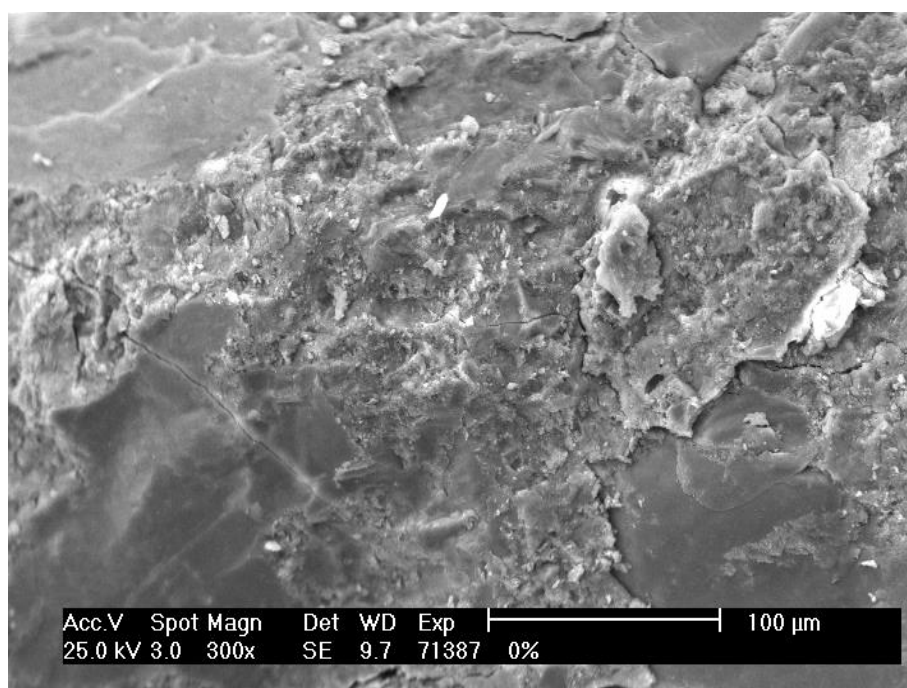
20. ábra: A próbatestek hővezetési tényezője a műanyagtartalom függvényében

A 0,5 v/c tényezőjű próbatestek hővezető-képessége meredeken csökken a hozzáadott műanyag mennyiségének növekedésével (20. ábra). A növelt v/c tényezőjű minták hővezetési tényezője kisebb mértékben csökken a műanyagtartalom növekedésével. A nagyobb hőszigetelő-

képesség valószínűleg mind a referencia betonénál nagyobb porozitásnak, mind a hozzáadott (hőszigetelő) műanyag hulladéknak köszönhető. A 0,5 v/c tényezővel rendelkező, 15%, 20%-os próbatestek hőszigetelő-képessége a legnagyobb. Ezeknél az összetételeknél érdemes megvizsgálni a hőszigetelő betonként való alkalmazhatóságukat [19, 20, 21].

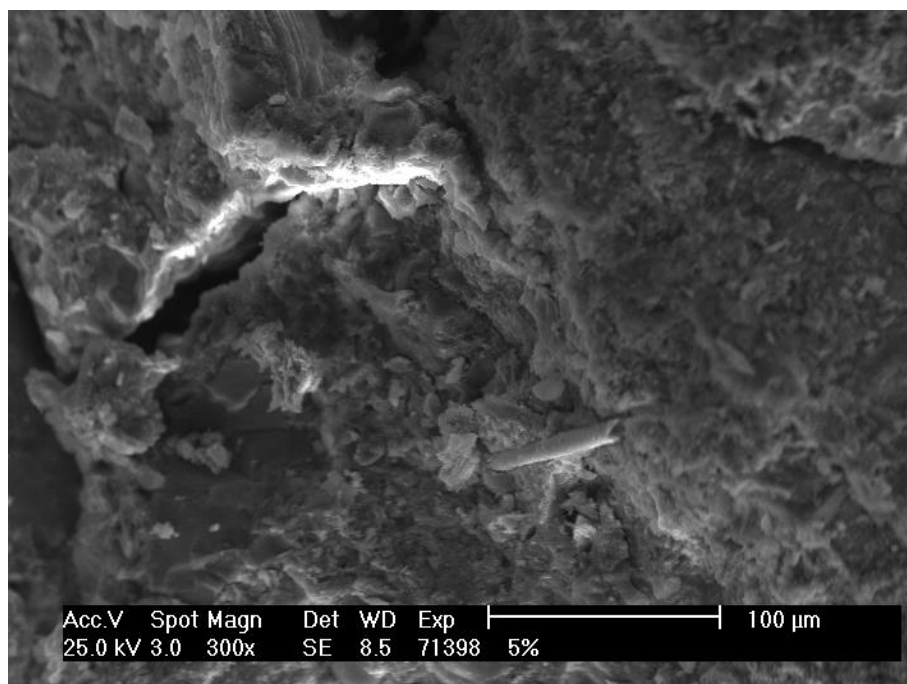
2.4.4 Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

Az eltört próbatesteket Philips XL 30-ESEM típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk nagyvákuum üzemmódban. A képalkotáshoz szekunder elektron detektort (SE) alkalmaztam.



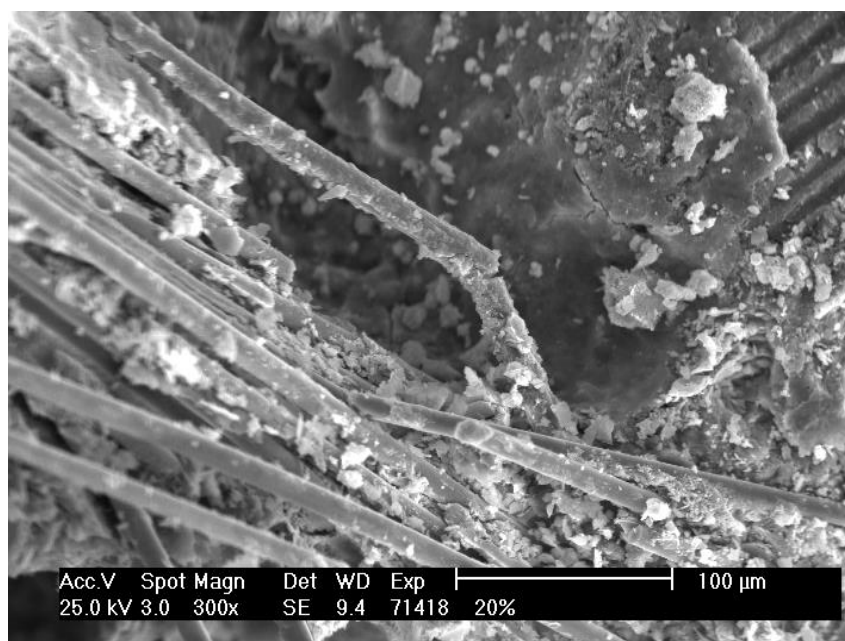
21. ábra: A 0% jelű próbatest SEM felvétele

A 21. ábrán látható a GRP hulladékot nem tartalmazó próbatest SEM felvétele. A próbatest tömör szerkezetet mutat, amely megfelel a mért nagyobb szilárdságoknak.



22. ábra: A 5% jelű próbatest SEM felvétele

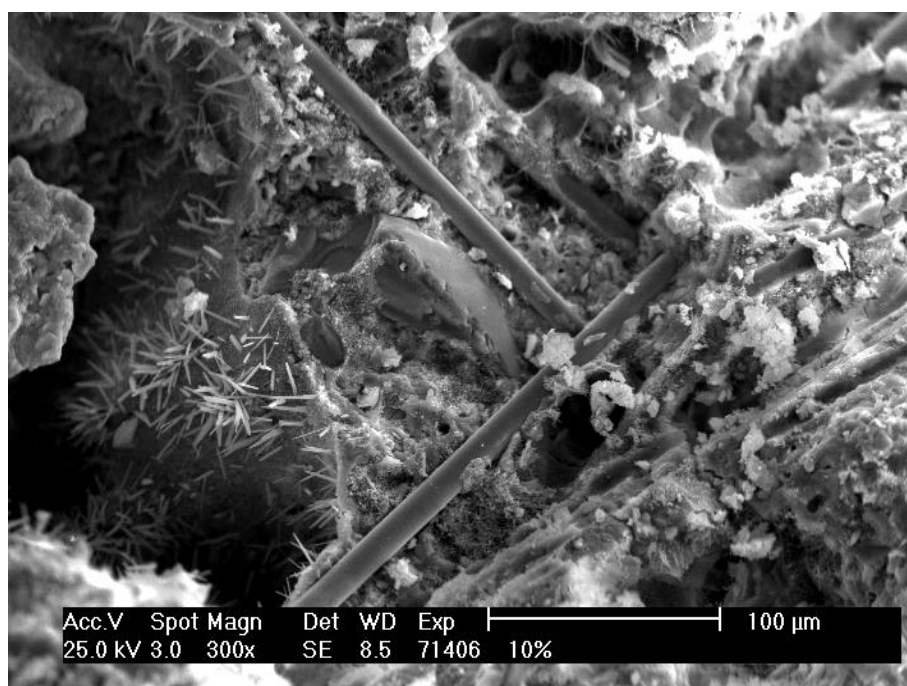
Az 5% műanyagtartalmú és 0,5 v/c tényezővel készült próbatest SEM felvételén (22. ábra) is látható, hogy szerkezete tömör kevés pórust tartalmaz. Az üvegszálak és a GRP hulladék jól illeszkedik a cementes mátrixba.



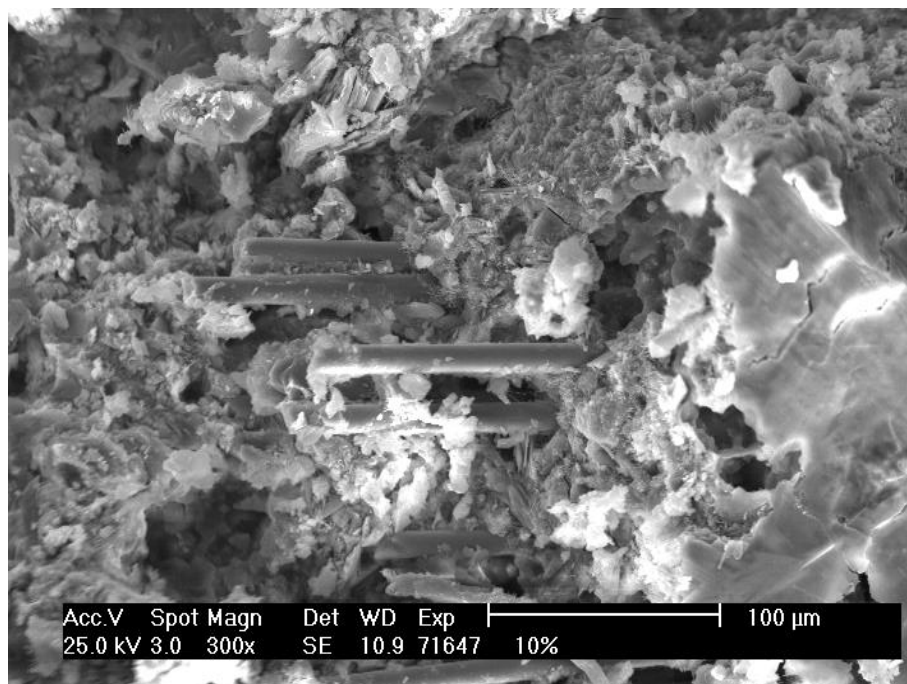
23. ábra: A 20% jelű próbatest SEM felvétele

A **23. ábrán** a 20% jelű legrosszabb szilárdsággal rendelkező próbatest SEM felvétele látható. Megfigyelhető, hogy a próbatest porózus szerkezetű és 50-200 μm méretű pórusokat tartalmaz. Az üvegszálak és a műanyag darabok több helyen elválnak cementes mátrixtól. Az irodalommal **[1]** összhangban, a 20% műanyagtartalom nagymértékű porozitás növekedéssel jár, és ez a szilárdság jelentős csökkenését eredményezi.

A **24. és 25. ábrákon** a 10% műanyagtartalmú 0,5 és 0,62 v/c tényezővel készült próbatestek SEM felvétele látható. A SEM felvételeken látszik, hogy a v/c tényező növelése növeli a próbatest porozitását. A nagyobb víztartalommal készült mintában (V10%) az üvegszálak, a műanyag darabok lazábban kötődnek a porózusabb cementes mátrixban.



24. ábra: A 10% jelű próbatest SEM felvétele



25. ábra: A V10% jelű próbatest SEM felvétele

3 Összefoglaló

Dolgozatomban 5%, 10%, 15%, 20% üvegszál erősítésű poliészter műanyag hulladékkal (a homok részleges helyettesítésével) készítettem szabványos 0,5 és növelt v/c tényezőjű beton próbatesteket. Vizsgáltam a műanyag hulladék adagolás hatását a nyomó- és hajlítószilárdságra, illetve a beton próbatestek szerkezetére, testsűrűségére, porozitására, és hővezető-képességére.

A műanyag hulladék mennyiségének növelésével a szilárdság jelentős mértékben csökkent, ami a próbatestek nagyobb porozitásnak és a cementmátrix és a műanyag hulladék rosszabb kötődésének köszönhető. A 20% műanyagtartalommal készült próbatest esetében a szilárdság csökkenés már drasztikusnak mondható volt.

A műanyagtartalom növelésével jelentősen romlik a habarcs bedolgozhatósága, amit a v/c tényező növelésével javítottam. A növelt v/c tényező a 20% műanyagtartalommal készített próbatest szilárdságát növelte, ami feltehetően annak köszönhető, hogy a cement hidratációs folyamatai a nagyobb víztartalomnál jobban végbe tudtak menni. A kisebb műanyagtartalmú minták esetében a v/c tényező növelése elsősorban a porozitás növekedését eredményezte, amely a jobb bedolgozhatóság ellenére nem növelte a szilárdságot.

Az 5% GRP hulladékkal készült próbatestek szilárdsága megfelel a 42,5 N szilárdsági osztály követelményeinek. Ebben az esetben az üvegszál és a műanyag jól beépül a cementes mátrixba tömör szerkezetet képezve. Az elvégzett vizsgálatok alapján tehát az 5% műanyag hulladék használata javasolható hagyományos építőipari alkalmazásokra.

A 10% műanyagtartalommal készült betonoknál a testsűrűség, porozitás és a mechanikai szilárdság értékek alapján érdemes a továbbiakban megvizsgálni a könnyűbetonként való alkalmazhatóságát.

A 15% és 20% műanyagot tartalmazó 0,5 v/c tényezővel készült minták hővezető-képessége és mechanikai tulajdonságai alapján érdekes megvizsgálni hőszigetelő betonként történő felhasználhatóságukat.

4 Irodalomjegyzék

- [1] Nabajyoti Saika, Jorge de Brito: Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials* 34, **2012**, 385-401
- [2] Pukánszky, B., Móczó, J.: *Műanyagok*. Typotex Kiadó, **2011**.
- [3] Brent, S.: *Plastics: Materials and Processing*. Pearson Prentice Hall, **2006**.
- [4] Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I.: Use of Plastic in concrete: A review, *Waste Management* 28, **2008**, 1835-1852.
- [5] Dora Foti: Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers, *Construction and Building Materials* 25, **2011**, 1906-1915
- [6] E. Rahmani, M. Dehestani, M.H. A. Beygi, H. Allahyari, I.M. Nikbin: On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles, *Construction and Building Materials* 47, **2013**, 1302-1308
- [7] Nabajyoti Saikia, Jorge de Brito: Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as partial substitution of natural aggregate, *Construction and Building Materials* 52, **2014**, 236-244
- [8] M.C.S. Riberio, A. Fiúza, A. C.M. Castro, F. G. Silva, M.L. Dinis, J. P. Meixedo, M.R. Alvim: Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials, *Composite Structures*, 105, **2013**, 300-310
- [9] P. Asokan, Mohamed Osmani, ADF Price: Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic powder filled concrete, *Construction and Building Materials*, 24, **2010**, 448-460
- [10] Joao R. Correia, Nuno M. Almeida, Joao R. Figueira: Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures, *Journal of Cleaner Production* 19, **2011**, 1745-1753
- [11] P. Asokan, M. Osmami, A. D.F. Price: Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites, *Journal of Cleaner Production* 17, **2009**, 821-829
- [12] MSZ EN 197-1:2000: *Az általános felhasználású cementek összetétel követelményei és minőségi feltételei*.
- [13] Opoczky, L.; *Cementkiegészítő anyagok*, **2001**.
- [14] Riesz, L.: *Cement- és Mészgyártás Kézikönyv*, Építésügyi Tájékoztatási Központ, **1989**.
- [15] Parra, D., F. Mercuri, L., P.; Matos, J. R. Brito, H. F. Romano, R. R. Thermal behavior of the epoxy and polyester powder coatings using thermogravimetry/differential thermal analysis coupled gas chromatography/mass spectrometry (TG/DTA–GC/MS) *The Thermochimica Acta* 386 **2002**, 143–151
- [16] MSZ EN 1015-3:2000: *Falszerkezeti habarcsok vizsgálati módszerei*. 3. rész: A friss habarcs konzisztenciájának meghatározása (ejtőasztallal)
- [17] MSZ EN 196-1:1996: *Cementvizsgálati módszerek*, 1. rész: A szilárdság meghatározása.

- [18] MSZ EN 12390-7: *A megszilárdult beton vizsgálata. 7. rész: A megszilárdult beton testsűrűsége.*
- [19] RILEM, *Functional classification of lightweight concrete*, Recommendation of RILEM LC 2, **1978**, 281–283.
- [20] Chandra S, Berntsson L. *Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications*. 2002, Norwich, New York, USA: William Andrew Publishing; **2002**, ISBN:0-8155-1486-7
- [21] EuroLightCon. *Proposal for a recommendation on design rules for high strength LWAC, economic design and construction with light weight aggregate concrete*. Document no BE96-3942/R39; **2000**.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Kristófné dr. Makó Éva tanárnőnek a segítségét, türelmét és hasznos tanácsait. Valamint szeretném megköszönni Papné Schmidt Évának, és az Anyagmérnöki Intézet azon dolgozóinak a segítségét, akik munkájukkal és tanácsaikkal hozzájárultak a dolgozatom létrejöttéhez.

Dolgozatom a TÁMOP-4.2.2. A-11/1/KONV-2012-0071 projekt keretében készült. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.