

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Középiskolás TDK

TDK dolgozat

**Hulladék rostanyagok építőipari hasznosíthatósága
könnyűbeton gyártásával**

Molnár Hunor

Konzulensek:

Dr.Balázs György

Dr.Sólyom Sándor

2023. november 2

Tartalomjegyzék

Kutatásom témája	5
1. Bevezetés.....	7
1.1 A papíriszap, mint papíripari hulladék anyag	9
Papíriszap képződése	10
A papíriszap hasznosítási lehetőségei	12
1.2 Hulladék eredetű papírbeton („Papercrete”), mint alternatív könnyűbeton	14
A papírbeton főbb fizikai tulajdonságai	17
Hőszigetelési tulajdonságok és éghetőség.....	19
Hangszigetelő tulajdonságok és hanggátlás	20
Nyomó- és húzószilárdság	20
Sűrűség.....	21
Víz- és páradiffúzió	21
2. Kísérletekhez felhasznált anyagok és eszközök.....	23
Papíripari hulladékok.....	23
Beton adalékok és egyéb kiegészítő anyagok.....	24
3. Kísérletek bemutatása	255
Szigeteléstechnikai kísérletek.....	31
Tesztelési fázis	33
Nyomószilárdság mérés	33
Hő- és éghetőségi vizsgálatok	35
Akusztikai mérések, hanggátlás ²⁸	37
Kísérleti eredmények összefoglalása és kiértékelése	411
5. Konklúzió	422
Köszönetnyilvánítás.....	43
Irodalomjegyzék.....	444

Összefoglaló

Könnyűbetonok gyártására számos példa található a szakmai irodalomban. Számomra a legérdekesebb azonban azoknak az anyagoknak a hasznosítása volt, melyek nagy mennyiségben szennyezik a környezetünket. Az újra használás után az újrahasznosítás a második legfontosabb hulladékkezelési módszer, ezért olyan hulladékot kerestem, ami anyagában nem hasznosítható, ezért lerakókba kerül vagy elégetik. Ilyen anyag az évente több ezer tonna hulladékként keletkező papírgyári iszap. Jellemző rá, hogy változó hosszúságú cellulóz rostokból áll, a kartongyártás mellékterméke, nedvesen keletkezik, ezért égetni nem lehet, biológiai lebomlása lassú és szagos, és kémiaiilag kapcsolódik a cement kötéshez. **Célom** volt munkám során tesztelni ennek az anyagnak a betonba ágyazásának lehetőségeit, a hasznosítás szemszögéből megítélve. Próbakeveréseket végeztem különböző arányú nedves és szárított papírgyári iszappal betonban, az öntési kísérleteket dokumentáltam, és következtettem a kész beton tulajdonságaiból a hasznosíthatóságra. A késztermék könnyűbeton papír rosttartalma függvényében változó testsűrűség, nyomószilárdság, vízfelvétel és hővezetés mérhető. Ezek a tulajdonságok jellemzőek lesznek a késztermékek ipari hasznosítási területeire.

Abstract

There are many examples of the manufacture of lightweight concretes in the professional literature. For me, however, the most interesting was the utilization of substances that pollute our environment in large quantities. After reuse, recycling is the second most important waste management method, so I was looking for waste that is not recyclable in its material, so it goes to landfills or is incinerated. Such material is thousands of tons of paper mill sludge generated annually as waste. It is characterized by the fact that it consists of cellulose fibers of variable length, it is a by-product of cardboard production, it is produced wet, therefore it cannot be burned, its biodegradation is slow and small, and it is chemically related to cement bonding.

My goal was to test the possibilities of embedding this material in concrete, judging from the point of view of utilization. I performed test mixes with different proportions of wet and dried paper mill sludge in concrete, documented the casting experiments and deduced the usability from the properties of the finished concrete. Depending on the fiber content of the finished lightweight concrete paper, variable body density, compressive strength, water absorption and heat conductivity can be measured. These properties will be characteristic of industrial utilization areas of finished products, such as thermal isolation, noise insulation, blind spot filling, concrete element pouring, etc.

Kutatásom témája

Kutatásom témája olyan anyagokban nem hasznosítható papíripari hulladékok, mint a papírgyári papíriszap, illetve a tiszta cellulóz rost könnyűbetonban történő alkalmazási lehetőségeinek feltárása. Dr. Csókai Viktor vezetésével olyan innovatív hulladékgazdálkodási módszer kifejlesztésén dolgoztunk, amely elsősorban a papíriszap hulladék hasznosítására koncentrált, és egy újfajta építőanyag, a papír beton kereskedelmi bevezetését célozta meg.

A korábbi habosított és rétegelt hangszigetelő anyagok kiváltását céloztuk meg anyagát tekintve heterogén, papír és egyéb cellulóz alapú rosterezetű anyagok fém-szilikátokkal és oxidokkal történő társításával, a hagyományos szilikát-hidroxi-karbonát kötések stabilitásának kihasználásával.

Mint ahogy a papír betont már évtizedek óta tanulmányozzák, mint könnyű szerkezeti- és hőszigetelő anyagot, újításunk olyan felhasználási lehetőséget feltételez, melynek terméke, vagy adalékolva, módosított felülettel ellátva, de eléri az építőiparban szabályozott szilárdsági jellemzőket, és a hőszigetelés-technikában való alkalmazhatóságot (időjárás-állóság, relatív alacsony hőátbocsátási tényező). Mindazonáltal a papír beton újdonság értéke mégis hangszigetelő képességében rejlik, mint ahogy önhordó, igen összetett pórusméret-eloszlásából és változó járatnagyságából adódóan kiválóan nyeli el a hangot, modulálható, és beltéri felhasználása esetén – mint például irodai gépszobák és nyomtatók hangszigetelése – azok légtartalmát is standardizálni tudja.

A Molnárbeton Kft. 2010 óta foglalkozik kutatás-fejlesztési tevékenységgel, és az elmúlt évtizedben többek között olyan kutatási területeken dolgozott eredményesen, mint a hulladék alapú könnyűbetonok, hulladék beton recycling eljárások, illetve szénzál erősítésű betonok fejlesztése.

Papír beton elemek előállításával azért kezdtünk el foglalkozni, mert hulladék alapú hang- és hőszigetelő elemeket szerettünk volna kifejleszteni. A papír hulladékok hasznosítása komplex feladat, mert még a teljes egészében hulladék papír alapanyagot feldolgozó papírgyártók is termelnek hulladék papírt, papíriszap formájában, melynek rost tartalma nagy, de a cellulóz láncok hosszúsága nem elégséges ahhoz, hogy újra papírtermékeket lehessen belőlük előállítani. Egészen alacsony szárazanyag tartalmuk nem engedi meg, hogy energetikai hasznosításra kerüljenek, de számunkra ideális alapanyagoknak tűnt. Tanulmányomban a

papírszap, mint papíripari hulladék, valamint a cellulóz por feldolgozásának lehetőségét fejtem ki elsősorban szigeteléstechnikai szemszögből.

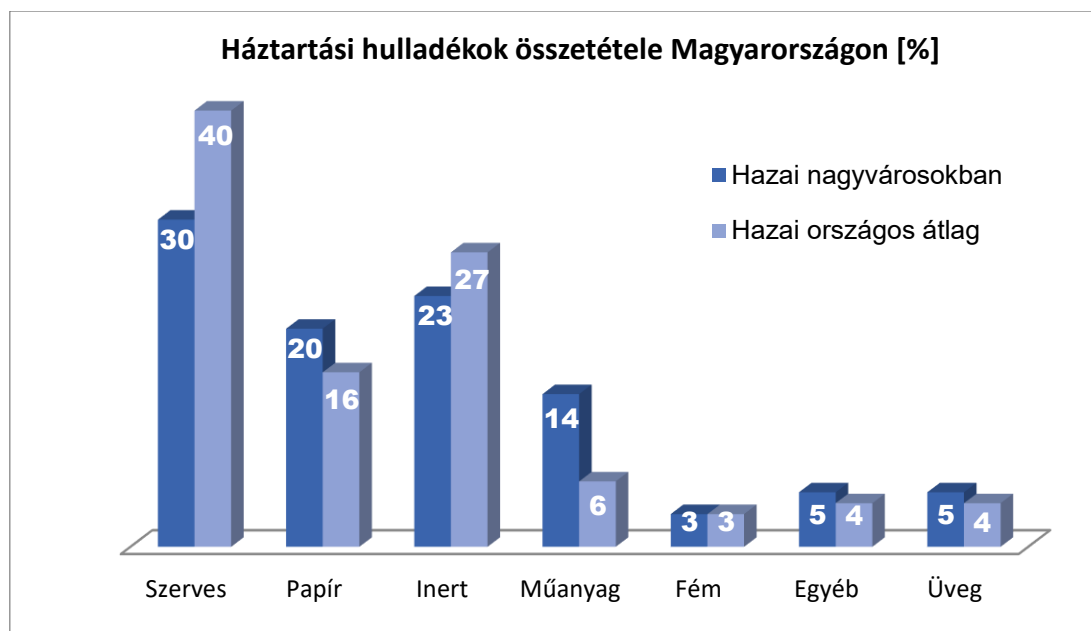
A kutatás során többek között részt vettem a különböző anyagkeverékek összeállításában, a keveréstechnikai és adagolási eljárások fejlesztésében, valamint a késztermékek tesztelési folyamataiban.

1. Bevezetés

A hulladék felhasználás egyik legfontosabb területe, ha a nem veszélyes hulladékok alapvető tulajdonságait felhasználva hozzáadott értéként, azokból hasznos tulajdonságú anyagokat készítünk. Az egyre növekvő mennyiségben felgyülemelő gyártási és felhasználás utáni hulladékok elhelyezése egyre nehezebb és költségesebb feladatot jelent a feldolgozó üzemek számára^{1,2}. Ez a probléma a papíripart is érzékenyen érinti, hiszen a papírgyártás során is keletkeznek olyan anyagok, melléktermékek, amelyek az adott gyárban közvetlenül nem használhatók fel, így környezetterhelő hatással bírnak³.

A papír alapvetően növényi eredetű rövid rostokból áll, azok vizes szuszpenzióból való kiszűrése, összekuszálása, prése és szárítása útján készül. A cellulóz- és papíripar legfontosabb nyersanyaga a fa, melyből részben vegyi úton cellulózt állítanak elő, részben pedig facsiszolatként adagolják a papírpéphez. A természetes papírt viszonylag gyorsan lebomló anyag lévén, hagyományosan környezetbarátnak tekintik.

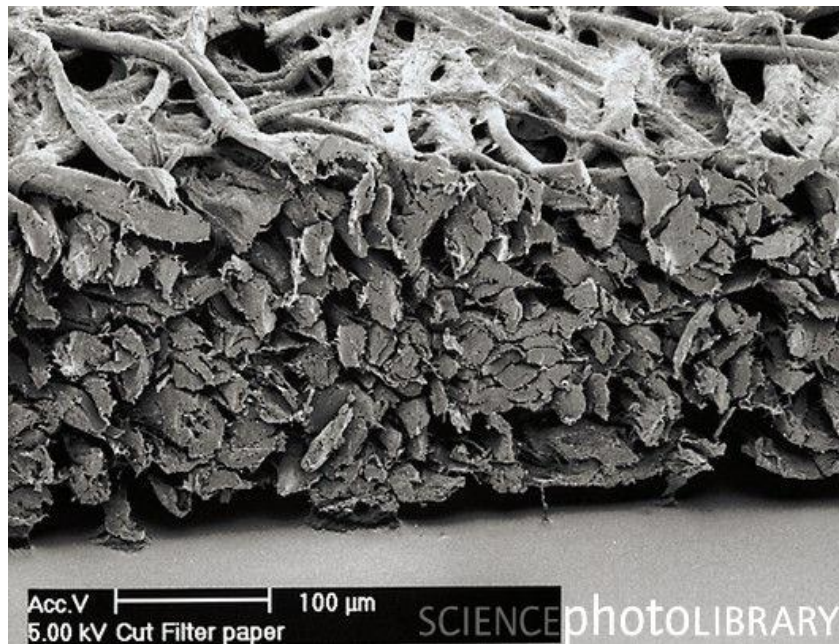
A háztartási hulladékok legnagyobb arányát a biológiailag lebontható szerves anyagok után alapvetően a papír- és inert hulladékok képezik (1. ábra). Hazánkban évente több százezer tonna papírhulladék keletkezik, melynek jelentős része csomagolóanyag, kisebb része újság és irodai papír.



1. ábra. Háztartási hulladékok összetétele⁴.

Az egyes papírfajtákat csoportosíthatjuk rostösszetétel szerint (pl. rongytartalmú, famentes, fatartalmú szintetikus), hamutartalom szerint (hamumentes, alacsony-, közepes- és magas

hamutartalmú), laptömeg szerint (180 g/m²-ig papír, 400 g/m²-ig karton, 400 g/m² felett lemez), rendeltetési cél szerint (pl. író-nyomó, csomagoló, műszaki, egészségügyi), valamint egyéb tulajdonságok alapján (vízálló, zsírálló, gőzálló, víztartó stb.) is. Az alábbi, Science Photo Library adatbázisában megtalálható mikroszkópos felvétel (2.ábra) a szűrőpapír bonyolult rostszerkezetét mutatja be.



2. ábra. A szűrőpapír felületének és keresztmetszetének pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) felvétele⁵.

A papírhulladékok sokféleségére és felhasználásuk korlátozottságára jellemző, hogy ugyan a szelektív hulladékgyűjtő szigetekenél felhívják a figyelmet arra, hogy élelmiszer-maradványokat és egyéb szennyeződések (pl. olajat, zsírt, oldószert) tartalmazó papírt, használt zsebkendőt, szalvétát nem fogadhatnak a konténerek, ezt a lakosság még nem akceptálja kellőképpen. Ebből adódóan a feldolgozóiparok olyan előkezelési technikákat kell, hogy bevezessenek, melyek alkalmassá teszik a hulladékot a terméké alakításra. Az újrahasznosítás alapfeltétele ugyanis, hogy a hulladék ne legyen zsíros, ételmaradékos, fóliázott vagy kevert anyagú, illetve laminált vagy felületkezelt. A szétválogatáskor anyaguk szerint szortírozzák (újságpapír, kartonpapír stb.) őket, és mechanikus, illetve vegyszeres úton pépesítik. Ennek hátránya, hogy a rostsálak meggyengülnek. Az újra használt papírból főként csomagolóanyagok, papírzacsók, kartondobozok, konyhai papír törölkendők, írólapok és füzetek készülnek. A papírhulladékok hasznosítása tehát elsősorban egy előkezelés, feltárás utáni újra hasznosításban merül ki, vagyis újabb papír terméket készítenek belőlük.

Az idei évben meginduló hulladék koncesszió, melynek az elkövetkezendő 35 évre a MOL Nyrt. a tulajdonosa, jelentős változást hozhat a hulladék anyagok hasznosításában, köztük a papír forprofit kezelésében is.

1.1 A papírszap, mint papíripari hulladék anyag

A papíripar a *recycle* technológiák egyik mintapéldája, a használt papírt begyűjti, majd egy előkezelés után nagy mennyiségben fel is használja újra. A technológia során azonban hulladék is képződik, az úgynevezett papírszap, mely egy legnagyobb részben cellulóz rosttartalmú, nedves hulladék. Az igen magas víztartalom nem teszi lehetővé a direkt energetikai felhasználását, komposztálása zöldhulladékkal, vagy biogáz üzemekbe való beadagolása elképzelhető, de nem kifizetődő. Legnagyobb mennyiségben tojástartók gyártására használják, de ez a piac is a felvevő igényeitől függ, és a gyártást nem a hulladék mennyisége, hanem a piac limitálja⁶.

A papírszap összetétele jelentősen függ attól, hogy milyen termék gyártásánál keletkezett. Ásványianyag-, nedvesség-, és hamutartalma, valamint rostösszetétele (hosszú és rövid rostok aránya) egyaránt befolyásolja a későbbi felhasználási lehetőségeket^{3,7,8}.

1. táblázat. Különböző eredetű és típusú papírszapok szervesanyag-összetétele³.

Keletkezési hely		Nátronpapír-gyár	Finompapír-gyár	Hulladékpapírt felhasználó gyár
Izzítási	veszteség	76,0	62,2	46,7
	[%]			
	SiO ₂ [%]	6,0	20,1	27,4
	Al ₂ O ₃ [%]	13,0	11,9	16,5
	Fe ₂ O ₃ [%]	0,5	0,3	0,2
	CaO [%]	2,6	0,8	1,0
	MgO [%]	0,1	3,2	5,3
	Teljes anyag [%]	98,2	98,5	97,1

2. táblázat. Különböző papírszapok rostösszetétele és hamutartalma³.

Terméktípus	Hosszú rostok [%]	Rövid rostok [%]	Hamu [%]
Karton	30	45	13
Finompapír papírok	18	37	45
Zsebkendő	50	30	20

Az 1. táblázat különböző profilú papírgyáraknál keletkező iszapok szervesen anyagú összetételére vonatkozó adatait, míg a 2. táblázat háromféle papír termék esetében keletkező papírszap rostösszetételének és hamutartalmának százalékos értékeit mutatja be.

A fenti osztályozáson kívül a képződési hely szempontjából megkülönböztethetjük a technológiai folyamaton belül, illetve a szennyvíz keletkezése során keletkező iszapot. Ebből is következik, hogy a képződési hely szempontjából a papírgyártás során keletkező iszapok összetétele nagyon különböző. Ez természetesen befolyásolja a feldolgozási módszer kiválasztását, hiszen nem lehet egyforma eljárást alkalmazni két, gyökeresen eltérő iszap esetében. Felhasználás előtt az iszapot - megfelelő víztelenítési technológia alkalmazásával - alacsony szárazanyag-tartalma miatt be kell sűríteni, víztartalmát el kell távolítani vagy csökkenteni kell³.

Papírszap képződése

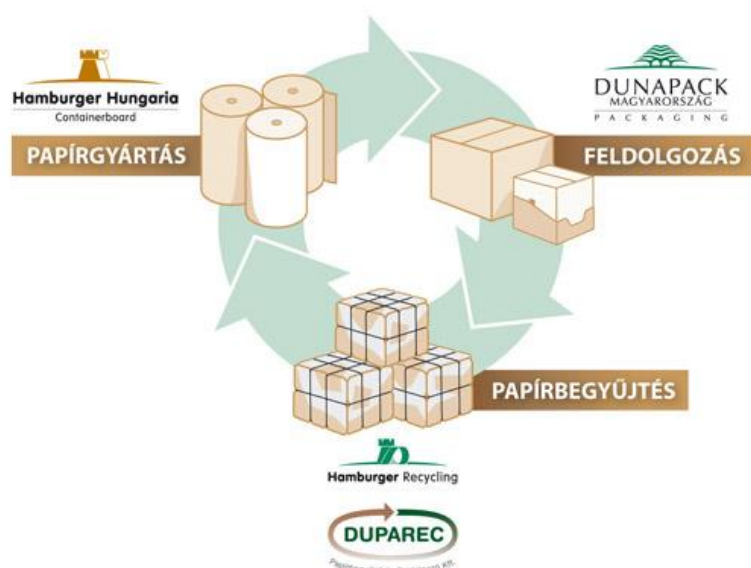
A Hamburger Hungaria Kft. dunaújvárosi papírgyár honlapján található, papírfeldolgozás folyamatát magába foglaló általános leírás alapján juthatunk a papírszap hulladékként történő képződésének okaihoz⁹. A Hamburger Hungaria Kft. Magyarországon messze a legnagyobb kapacitással állít elő papír termékeket, még hozzá kizárólag 100 %-ban hulladék papír feldolgozásával. Az alkalmazott eljárás szerint a válogatott papírhulladékot egy oldási eljárás alá vonják, melynek során a hulladékpapírt víz és mechanikus energia segítségével feloldják. Minthogy az alapanyag előkészítés során hulladékokat használnak, ezek olyan szennyeződések tartalmazzák, melyeket a feldolgozás további szakaszának esetleges káros hatása miatt el kell távolítani. Az oldás során készített pépből ezért a legdurvább szennyeződések egy drótfonat segítségével eltávolítják. Ezután a pépet osztályozzák, és a papírpépet két különböző osztályozási eljárás során durva- és finom alapanyaggá választják szét. Az osztályozási fokozatok egész sora után a hulladékot (*reject*) kiválasztják, és elvezetik a termelési folyamatból. A továbbiakban az osztályozott papírpépet egy felfutószekrény

egyenletesen eloszlatja egy szitasoron, melynek segítségével a rostoldatból kinyerik a nedves pépet.

A víztartalom csökkentése céljából a víztelenítő elemeken keresztül először vákuum segítségével töményítik, sűrűsítik a pépet, de ezzel csak 20%-os szárazanyag tartalomig jutnak el. Ezt követően a prés szakaszban éri el a megközelítőleg 50 %-os szárazanyag tartalmat, hidraulikus nyomás segítségével. Nagynyomású papucspréseken még 5 %-kal növelik a szárazanyag tartalmat, de e fölött már hevíteni kell a masszát. A szárítócsoportokban kb. 140 °C-os hengerhőmérséklet mellett párologtatással szárítják a papírt. Ezután történnek meg azok a papírfelület-kezelési eljárások, melyek a papír minőségét, ellenálló képességét és színét állítják be.

Az enyvezőprés az enyv/keményítő papírfelületre juttatását szolgálja. Keményítőt a papír színére és hátára, enyvet csak a színére visznek fel. Ezek az adalékanyagok azért fontosak, mert a hulladék fázisba kerüléskor a kiáztatás során ezek az anyagok a felhasználást befolyásoló tényezőkként szerepelnek. A felületkezelés során bevitt nedvességet az utószárító szakaszban távolítják el, beállítva a végső 7-9 %-os nedvességtartalmat. A papírgép végén a papírt egy tambúrra tekerik fel. A kész tambúrt tekercsvágógépbe helyezik, ahol az áttekeréskor kések segítségével a tekercset a kívánt szélességre vágják. A kész tekercset a vevő kérésének megfelelően dugóval, műanyag pánttal és tekercscímkével szerelik ki. A kész tekercsek automata szállítószalagon jutnak a raktárba, ahol fajtánként vagy vevőnként tárolják lehívásra készen.

A papírgyártás fő alapanyagai a fából és más növényekből kinyerhető rostanyagok, valamint a hulladékpapír. Ez utóbbi inkább a csomagolópapírok gyártása szempontjából fontos. A hulladékalapú papír előállítása, gyűjtése és feldolgozása a 3. ábrán is látható körfolyamatot alkotja⁹.



3. ábra. A dunaiújvárosi Dunapack Magyarország Packaging – Duparec Hamburger Recycling – Hamburger Hungaria cégcsoport termelői, újrahasznosítási és végtermék előállító tevékenységének szemléltető körfolyamat ábrája⁹.

Az ilyen típusú rendszerben a csomagolóanyagok előállításához használt elsődleges alapanyagok mennyisége jelentősen kisebb.

A Hamburger Hungaria gyakorlatilag teljes egészében másodlagos nyersanyagokból, tehát újrahasznosított papírból állítja elő termékeit. Ezzel a hagyományos, fa alapú papírgyártással szemben jelentősen kímélik a természeti erőforrásokat. Az újrahasznosítás jelentősége nem elhanyagolható a hulladékgazdálkodásban és a hulladékok környezetterhelésének csökkentésében.

A papírszapot, mint termelési hulladékot a Dunapack Rt. elszállíttatja, deponálja. A deponálásra épített papírszap tároló érvényes környezetvédelmi működési engedéllyel rendelkezik¹⁰.

A papírszap hasznosítási lehetőségei

Egészen az 1980-as évek végéig nem lehetett hallani a papírszap, mint papíripari melléktermék újra hasznosításáról. Legjellemzőbb és talán legolcsóbb elhelyezési módja ma is a deponálás, vagyis a lerakás (talajfeltöltés). Egyes esetekben – a lehetőségektől függően –

visszaforgatják a papírgyártásba vagy egyéb felhasználásra kerül. A papírgyári papíriszap mennyiségének gyors növekedésével azonban egyre nagyobb az igény az újabb hasznosítási módszerek kidolgozására, és ezzel egyre inkább előtérbe kerülnek olyan alternatív kezelési megoldások, mint például az építőipari felhasználás (pl. tűzálló és hőszigetelő anyagok készítése) vagy a belőle nyert metángáz előállítása^{3,11}.

Az irodalomban legáltalánosabban fellelhető elhelyezési és felhasználási módok a deponálás, újra felhasználás a papírgyártásban, elégetés, mezőgazdasági hasznosítás. A deponálás nem jár semmilyen haszonnal, ráadásul erősen károsítja a környezetet. A rendelkezésre álló területek csökkenése és a költségek növekedése miatt egyre kevésbé lesz megoldható a papíriszap elhelyezésének ezen módja. A papírgyártásba történő visszaforgatás esetében már nem használható ugyanazon termék előállítására, mint amiből keletkezett, de gyengébb minőségű papír, illetve karton gyártásához igen. Égetés során a szerves anyagok eloxidálásával a hulladéktérfogat és a környezeti terhelés csökken. Itt meg kell említenünk azonban, hogy ha az iszap hamutartalma csekély, akkor az nagy rosttartalomra utal, és így fordítva. Ha nagy hamutartalommal és így alacsony rosttartalommal bír, akkor az iszap víztelenítése nehezebb, és az égetést követően jelentős mennyiségű hamu elhelyezéséről kell gondoskodnunk. Az iszap hamu- és szárazanyag-tartalmától függően az égetés előtt szükséges víztelenítési és előszárítási költségek miatt potenciális energiaforrásként általában nem jöhet szóba. A hamutartalom nagysága tehát nagy mértékben befolyásolja a felhasználási terület kiválasztását. A mezőgazdasági felhasználás hosszadalmas és alapos elővizsgálatot igényel annak érdekében, hogy káros anyagok ne kerülhessenek ki a táplálékláncba^{3,7,8}.

A papíriszap építőipari felhasználását tekintve alkalmas lehet gipszbeton lapok készítésére, válaszfalak kialakítására; azbesztcementlapok gyártására; és alapvetően nagyobb hőszigetelésű és porozitású elemek gyártására, mindezt úgy, hogy a nyomószilárdság csökkenése is még a szabvány előírásain belül maradjon. A tűzálló, hőszigetelő anyagokhoz történő felhasználása akkor jöhet szóba, ha az iszap kaolintartalma meghaladja a 30%-ot³.

Egyéb, irodalmi forrásokban megemlített hasznosítási vagy kezelési módok a nedves oxidáció, komposztálás, metángáz előállítás és a pirolízis (száraz lepárlás), mely utóbbi a szerves hulladékoknak vagy jelentős szervesanyag-tartalmú hulladékoknak hő hatására, oxigénszegény vagy inert közegben végzett lebontását jelenti. Amerikában egy papírgyár és egy üveggyár közös fejlesztésében a papíriszapot üvegipari alapanyagként hasznosították. Egy speciális forgókemencében az iszapot megszáritották, majd földgáz bevezetésével elégették olyan hőmérsékleten, amelyen a szerves rész megolvad. Ezt vízbe beleengedve üvegszerű törmelék

keletkezett. A homokfinomságú anyag felhasználható volt például csiszolóeszközök gyártására, homokszórásra, útépitéshez, épületek tetőszigeteléséhez. Végül az acélgyártásban antioxidánsként és hőszigetelő anyagként történő alkalmazására is volt példa, ahol az olvadt fémeket az iszap hamujával óvták a lehűléstől^{3,7,8}.

3. táblázat. Cellulóz alapú hulladék anyagok „hasznosítási” lehetőségei és azok hatékonysága.

	Égetés	Rothasztás	Lerakás	Papírbeton gyártás
Beruházási költség	magas	magas	alacsony	alacsony
Energia hatékonyság	alacsony	alacsony	nincs	magas
Alapanyag minőségi érzékenysége	nincs	közepes	nincs	közepes
Termékminőség	nincs	alacsony	nincs	magas
Bevételi forrás	nincs – cellulóz esetében alacsony	biogáz + komposzt	nincs	magas

A fenti táblázatban összefoglaltam a cellulóz alapú papír hulladékok „hasznosítási” lehetőségeit a hatékonyság szempontjából (3.táblázat).

Hazai vonatkozásban itt kiemelném a Csepeli Papírcsőgyár Kft. működését is, miszerint a papíriszapot, mint „parketta alátét papír”, laminált parketták alatti szigetelőréteggént ajánlja és forgalmazza. Különleges gyártási technológiájának köszönhetően időálló, emellett elégséges mértékben vezeti a hőt és a lépészajt is csökkenti¹².

1.2 Hulladék eredetű papírbeton („Papercrete”), mint alternatív könnyűbeton

A papírbeton olyan könnyűbeton, amely hétköznapi és könnyen beszerezhető alapanyagokból egyszerűen és olcsón előállítható.

A papírbetonnal kapcsolatos kísérletek az 1920-as évekre nyúlnak vissza, de tudományos, kutatás-fejlesztési szempontból csak az 1990-es évek végén kezdtek el vele részletesebben foglalkozni. Az eddigi kísérletek és tapasztalatok alapján alacsony előállítási költségekkel

olyan termékeket lehet fejleszteni rostalapú betonból, melyek jó szigetelő képességgel rendelkeznek, és közepesen erős könnyűbeton alternatívát nyújtanak az építőiparban.

A papírbeton alkalmazása gazdasági szempontból még nem megoldott, ugyanis többféle összetételben készül, döntően papírhulladék, cement, homok és víz alkotja többféle receptúra alapján¹¹. Az egyik legnagyobb kihívás a papírbeton szabványos összetételének meghatározása, mivel a sokféle papírhulladék anyagi összetételében (pl. cellulóz finomsága, eredete) és minőségében (pl. szennyezettség típusa és mértéke) jelentősen eltér egymástól. Mindazonáltal az építőiparban meg kell felelni olyan követelményeknek, melyek biztosítják az egyes szerkezeti elemek minőségi követelményei szerinti felhasználást. Ezen felül nehéz olyan alapanyagot találni, mely nagy mennyiségben, olcsón hozzáférhető és állandó anyagáramban elérhető. A papír ilyen forrásnak számít, hiszen a háztartási hulladékok egyik legnagyobb mennyiségben előforduló összetevője (ld.1.ábra), emellett könnyű szelektíven gyűjteni, szelektálni⁶.

A rostbeton („fibrous concrete”) receptúrájának 1997-es kidolgozása Mike McCain, illetve Eric Patterson nevéhez fűződik, akik egymástól függetlenül dolgozták ki a klasszikus értelemben vett papírbeton általános építőipari felhasználási lehetőségeit. Nevükhöz olyan jó szigetelő, erős könnyűbeton kifejlesztése köthető, melynek legjelentősebb részét papírhulladék, föld és víz teszi ki. Készítéséhez a papírt vízben áztatták, össze turmixolták, majd homokkal és portland cementtel keverték¹³.

Jelenleg a papírbeton („papercrete”) készítésnek kifinomult gyakorlatai léteznek ökológiai építészeti körök tapasztalataira építve, döntően az Egyesült Államokban. A papír szigetelő tulajdonságait számos eljárás használja, azokat szendvicsszerkezet kialakításánál kamatoztatják, illetve töltőanyagként alkalmazzák alacsony térfogatsúly biztosítása érdekében. A teljesség igénye nélkül itt felsorolunk néhány szabadalmat is, amelyek kapcsolódnak ehhez a témához: US 2005275124¹⁴; US 20090065978¹⁵; US 20060022373¹⁶; US 5350451¹⁷; US 6942726¹⁸; US 5641584¹⁹.

A papírbeton készítésének legáltalánosabb alapmodellje szerint a papírt először vízben puhára áztatják, a papír minőségétől függően pépesítik, és egyedi vágóéles keverő-pépesítő berendezésben összemixelik, majd homokkal és portlandcementtel keverik²⁰.

A leggyakrabban alkalmazott technikák szerint legoptimálisabb, ha a papír aránya a receptúrában 50-80 % körüli, amíg a cement 10 % körüli értékben szerepel. A homok, mely a nyomószilárdság növelése érdekében kerül a heterogén rendszerhez, földdel vagy más

adalékanyagokkal is helyettesíthető. Előállítása nem érzékeny a víz mennyiségére, a víz adagolását nem lehet elrontani. Ennek oka, hogy a cellulóz rostok sok vizet vesznek fel, és a külső hőmérséklettől, illetve páratartalomtól függően adják le. A felesleges víz egyszerűen kicsorog, elpárolog vagy a földbe szivárog. A víz transzport folyamatai a papírbeton rendszer kötésében kiemelkedő fontosságúak, mert ezek biztosítják az anyag egyenletes szerkezetét. Keverés után a masszából sablonok segítségével bármilyen forma kialakítható. Ezeket kiszáritják, száradás alatt a cementkötések kialakulásával eléri végső keménységüket. Egyéb felhasználásokhoz szórással is felhordhatjuk valamilyen más felületre, masszaként beönthetjük zsaluelemek közé, vagy aljzatbetonként a massa ugyanolyan módon kezelhető, mint a hagyományos beton, tehát ki kell önteni és el kell simítani.

Kiváló kötési és hőszigetelő tulajdonságainak köszönhetően a papírbeton nemcsak szerkezeti elemek formájában, hanem falazóhabarcsként is felhasználható. Nyomószilárdsága homok hozzáadásával növelhető, míg jó hőszigetelési értéke jelentős hőtároló képességgel párosul (ld. („A papírbeton főbb fizikai tulajdonságai”). Mindemellett a papír ásványosítása révén tűz- és vízállóvá, valamint növényi és állati kártevőkkel, penészgombákkal szemben is ellenálló. Kiemelkedően jó páraáteresztő, ezáltal kellemes klímát biztosít az alkalmazási területeken. Kémiaailag semleges és nem korrozív.

Összességében elmondható, hogy a papírbeton esetén egy minden szempontból sokoldalú, rugalmas építőanyagról beszélhetünk. Felhasználási előnyeit tekintve többek között olyan szempontokat emelhetünk ki, mint az alacsony előállítási költség, a magas hőszigetelő és hőtároló képesség, valamint megfelelő receptúra esetén a kielégítő húzó-és nyomószilárdság.

A hulladék papíriszapból történő papírbeton gyártás környezetvédelmi szempontból mindenképpen jó megoldás lehet. Az egyre növekvő társadalmi és gyártási igényeknek megfelelően évente nagy mennyiségben keletkezik hulladékpapír iszap, melynek hulladéklerakókban való elhelyezése általában véve szennyezi a környezetet. A cementgyártás szén-dioxid kibocsátásával pedig hozzájárul a globális felmelegedéshez. Ennek eredményeként az ipari hulladékok újszerű felhasználása a cementkötések kiegészítő összetevőjeként segíthet a környezeti problémák enyhítésében¹¹.

Néhány átfogó jellegű, már anyagában hulladékpapír iszapot felhasználó papírbetonokkal kapcsolatos tudományos publikációt kiemelnék itt. Kore és mtsai.¹¹ hulladékpapír iszappal („waste paper sludge”, WPS) kevert betonok mechanikai tulajdonságait vizsgálták, melyek esetében a cement tömegének 5-20%-át iszappal helyettesítették. A

bedolgozhatóság, sűrűség, vízfelvétel, nyomó- és hajlítoszilárdság vizsgálatához betonkeverékeket készítettek, teszteltek és a kapott eredményeket összehasonlították a hagyományos betonkeverékek értékeivel.

Egy korábbi tanulmány részletesen ír a papírgyárak működése során keletkező papírhulladék iszap különböző betonkeverékekben történő hasznosításának vizsgálati eredményeiről²¹. Vizsgálták a hulladékanyag fizikai és kémiai tulajdonságait. Különböző hulladéktartalmú betonkeverékeket készítettek, és meghatározták az alapvető szilárdsági jellemzőket, mint a nyomó- és hajlítoszilárdságot, valamint a vízfelvétel és a sűrűség változását, majd összehasonlították a kontroll keverékekkel. Eredményeik kimutatták, hogy a hulladék adalékanyag mennyiségének növekedésével a beton mechanikai stabilitása csökkent.

Singh és mtsai^{1,2} úgy jellemzik a papíriszapot, mint olyan papírgyártás során keletkező hulladék, amely nehézfém tartalmából adódóan súlyos egészségügyi, környezeti és gazdasági problémákat generál a társadalomnak. Az utóbbi néhány évben több tanulmány is foglalkozott, és egyre több cikk jelent meg a hulladékpapír iszap hamuvá („waste paper sludge ash, WPSA) történő átalakításával, annak érdekében, hogy mérsékelje az iszappal kapcsolatos technológiai nehézségeket és károsító hatásokat. Tanulmányok kimutatták, hogy a WPS hamu kiegészítő anyagként történő hozzáadása a cementhez egy bizonyos határig megoldható, de megváltoztatja a beton mechanikai és tartóssági jellemzőit. Itt meg kell jegyezni, hogy hazai viszonylatban magas nehézfém-tartalomra utaló írásokat, illetve ezzel kapcsolatos problémákat a papíriszappal kapcsolatban nem találtam.

A papír-beton főbb fizikai tulajdonságai

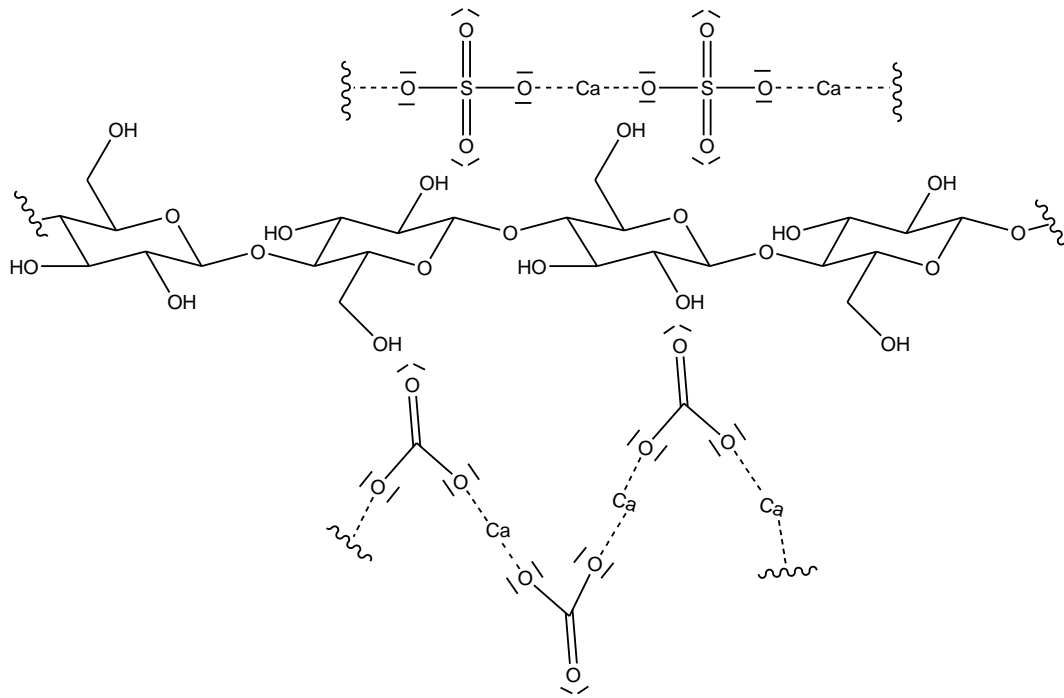
A papír-beton elsősorban jó hang- és hőszigetelési tulajdonságairól ismert. Szerkezeti felépítését tekintve a papír-beton az alapanyagok minőségi sokszínűsége miatt nem meghatározható és általánosítható morfológiai szempontból. Maga az anyag speciális kohézióval stabilizálódott, abszolút amorf, szilikát-cellulóz és karbonát-cellulóz másodrendű kötésekkkel.

Egy 60 %-ban papírból és a maradék 40 %-ban töltő- és kötőanyagokból készített papír-beton jellemzőit, főbb fizikai tulajdonságait az alábbi táblázat szemlélteti (4. táblázat).

4. táblázat. A papírbeton fizikai tulajdonságai néhány referenciaérték mellett feltüntetve ^{22,23}.

Összetétel: 60 % papír, 40 % töltő- és kötőanyagok		Referencia
Lapvastagság [mm]	80	
Sűrűség: ρ [kg/m ³]	750-1.000	beton: 2.300-2.400; mészkő: 2.000-2.900; puhafa: 480; keményfa: 720
Nyomószilárdság: σ_{ny} [N/mm ²]	1,8	beton: 30-50; téglá: 10; Liapor beton: 1,5-7
Húzószilárdság: σ_h [N/mm ²]	5-8	beton: 3 márvány: 15 fenyőfa: 40 (szálirányban)
Tömeg-közéérték [kg/m ²]	220-250	
Hővezetési tényező: λ [W/mK]	0,24	mészkő: 0,93, terméskő: 1,28-2,32; beton: 1,09-1,55; POROTHERM: 0,16 keményfa: 0,23; puhafa: 0,12; papír: 0,12 szigetelő anyagok: $\leq 0,065$; PUR hab: 0,035; üveggyapot: 0,04
Hővezetési ellenállás: Rt [m ² K/W]	1,24	
Hőátbocsátási tényező: U (k) [W/m ² K]	0,81	38cm vasbeton fal + 10cm DRYVIT: 0,37 60cm kőfal + 12cm DRYVIT: 0,28 B30-as téglá + 10cm DRYVIT: 0,34 POROTHERM 30: 0,35 POROTHERM 30 + 10cm DRYVIT: 0,27 YTONG 30: 0,40 YTONG 30 + 10cm DRYVIT: 0,17
Hőtehetlenségi tényező	3,3-3,5	
Páradiffúziós tényező: δ [10 ⁻⁶ g/m ² sPa]	0,9	Vasbeton: 0,08; salakbeton: 0,28; gázszilikát: 0,56; POROTHERM 30: 0,032-0,053 faforgácslap: 0,36; kohósalak: 0,44; ásványi gyapottermék: 1,3
Akusztikai porozitás: σ	min. 0,8	

A papírbeton szerkezeti felépítését, szupramolekuláris rendezettségét a 4. ábra mutatja.



4. ábra. A cementkötés koordinációs lehetősége a cellulóz polimerrel (Dr. Csókai Viktor adatszolgáltatása).

Hőszigetelési tulajdonságok és éghetőség

A papírbeton fal hőtechnikai szempontból eltérően viselkedik más, könnyített vagy pórusos betonelemekhez képest. Ennek oka, hogy a kifejezetten rossz hővezető képességű cellulóz rostok, illetve a betonkötés kialakulásakor keletkező légrések, pórusok megnehezítik a hőáramok terjedését. Ebből adódóan a fal jelentős tehetetlenséggel veszi fel, illetve adja le a hőt. Ez a késleltető, illetve csillapító hatás meglepően eredményes, a papírbeton fal egész nap elviseli a felmelegedést és egész este ellenáll a lehülésnek.

A papírbeton hővezetési tényezője egy nagyságrenddel nagyobb, mint a manapság használt szigetelő elemeké, de mégis töredéke a szerkezeti anyagokénak, mint a beton, a kő, vagy a tégl. Hőszigetelő képességére a hőátbocsátási tényező ad támpontot. A hőátbocsátás fordítottan arányos a falvastagsággal.

Éghetőségét tekintve a papírbeton erősen tűzálló. Különálló rostjai cementtel itatódnak át, ami megakadályozza az égést tápláló oxigén áramlását. *Éghetőségi osztályba való besorolásnál az „E”, vagyis nem éghető besorolást kapta.* A papírbeton nagy mennyiségű karbonát és hidrokarbonát anionú sókat tartalmaz, melyek erősen hőérzékenyek. Tűz, vagy magas hőmérséklet esetén ezek bomlanak, és CO₂ fejlődés közben a beton felülete izolálódik a tüztől.

Természetesen ez nem tart korlátlan ideig, de a tűzállósági vizsgálatok szerint a kritikus 2 órát jó hatékonysággal állja. Természetesen a tűzállóság ismételten függ az összetételtől, ugyanis a magas mész és cementtartalom nagyban elősegíti a tűzállóságot. Ezért nagyon érdekes lehet a papíripari mésziszap és a hulladék irodai papír felhasználhatósága.

Tűzbiztonságát tehát a papír mikronos mérettartományú mész és gipsz adalékai is fokozzák, mivel ezek intenzív hő hatására széndioxid fejlődése mellett bomlanak, az így felszabaduló széndioxid pedig az égést fojtja. Természetesen a papír beton lángállóvá tételét és égésgátlását csekély mennyiségű (<1%) bórsav adagolásával is biztosíthatjuk, amely elterjedten alkalmazott építőipari láng és kártevőgátló.

Hangszigetelő tulajdonságok és hanggátlás

A papír beton újdonság értéke hangszigetelő képességében rejlik, minthogy önhordó, igen összetett pórusméret-eloszlásából és változó járatnagyságából adódóan kiválóan nyeli el a hangot, modulálható, és beltéri felhasználása esetén - mint például irodai gépszobák és nyomtatók hangszigetelése – azok légtérének páratartalmát is standardizálni tudja. Mindazonáltal a papír beton hangszigetelésre való alkalmazhatóságára viszonylag kevés kísérlet valósult meg. Ennek több oka is van. Ezeket egyrészt a hangtechnikai vizsgálatok nagyon magas költségigénye, másrészt pedig az alapanyagok sokféleségéből adódó minőségi különbségek adják. Nagy általánosságban elmondható azonban, hogy jó hangszigetelő képességekkel rendelkezik.

A hanggátlást két, egymástól nem független folyamaton keresztül lehet definiálni. Egyik a hangelnyelés vagy abszorpció. Ebben az esetben adott frekvencián a hang forrásától az érzékelőig elnyelt hangnyomást, vagyis hangnyomás-csökkenést értjük, a hangforrás felé történő visszaverődés, vagyis reflexió nélkül. Ez utóbbi hatás érvényesül a hangtükörök alkalmazása esetén, mely esetekben nincs elnyelés, a hangszennyezés a forrás felé való visszaverődéssel irányított a védeni kívánt rendszer felől.

Nyomó- és húzószilárdság

A szilárdsági adatokat több paraméter befolyásolja. A préselés mértéke szintén hatással van a nyomószilárdság értékre, növeli azt. Mind a cementtartalom növelése, mind pedig a

zömítés és préselés a kötés kialakulása előtt szükségessé válik abban az esetben, ha szerkezeti anyagokat akarunk előállítani, falazóelemek előállításának érdekében.

A húzószilárdság átlagos értéke két-háromszorosa a beton húzószilárdságának, elérheti a márvány húzószilárdságát is. Ennek azért van jelentősége, mert a papírbeton elemek falazóelemként való hasznosítása esetén a hajlító szilárdság növelése érdekében nem szükséges vasalni, úgy mint a vasbeton esetén. A 8 N/mm^2 -es érték szerint egy $300 \times 600 \text{ mm}$ -es papírbeton elem 1.440 kN húzóerőt képes elviselni, míg a beton esetében vasalás nélkül ez mindössze 540 kN . A betonhoz képes megnövekedett húzószilárdság oka a papír rostjainak tulajdonítható. A rostok, mint természetes polimerek, rugalmasságot adnak a betonnak. A rostok mozgásával lehetővé válik, hogy az egyébként merev, törékeny pórusos beton cellái szakadás nélkül is fel tudják venni a húzó- és hajlító igénybevételnek kitett papírbeton formákat.

Sűrűség

Sűrűségét tekintve a papírbeton a könnyűbeton kategóriába tartozik. Jóval nagyobb térfogattömeggel rendelkezik, mint a puhafa, és a különlegesen kemény fafajták sűrűségkategóriájába sorolható. Természetesen a papírbeton sűrűsége attól függ, hogy mekkora a papírtartalma, és a pépesítés után a cement és homok hozzáadása után mekkora zömítést, vagy esetleg préselést is alkalmazunk, vagyis mekkora az az erő, mellyel minél nagyobb tömeget juttatunk ugyanabba a térrészbe. A cement- és homoktartalom direkt módon, a hozzáadott tömeggel arányosan növeli a sűrűséget.

A fenti táblázatban megjelölt $750\text{-}1.000 \text{ kg/m}^3$ sűrűség tartomány az átlagos sűrűséget adja meg, a papírbetonnak ennél lehet jóval alacsonyabb sűrűsége is, ha nem szerkezeti anyagot, hanem inkább fröcskölt habot készítenek belőle.

Víz- és páradiffúzió

Fontos kitérnünk még a papírbeton víz- illetve páraáteresztő képességére. A papírbeton vízállósága alacsony, ezért, habár sűrűsége kisebb, mint a vízé, a víz felszívárog a pórusokon keresztül, a papírrostok megduzzadnak, és a beton szétázik. Mivel a papírbeton tehát fel tud ázni, így fagypont alatti hőmérsékleten fel is tud fagyni, ezért esetében vízvédelemről mindenképpen gondoskodni kell, a papírbetont a víz kizárásának érdekében adalékolni kell.

Páraáteresztő képességét tekintve a cellulóz rostok fel tudják venni, és fizikailag meg is tudják kötni a vizet. Ezáltal a páradús terekben leköti a vizet, míg a száraz terekben leadja azt.

A páradiffúziós ellenállás és tényező egymás reciprokai. A páradiffúziós tényező megadja, hogy mekkora az a páramennyiség, mely az adott anyag két, egymással párhuzamos, egymástól egységnyi távolságra lévő sík rétege között, egységnyi nyomáskülönbség hatására, a réteg egységnyi felületén, egységnyi idő alatt áthatol. Ez a szám viszonzyszámként értelmezhető, és az adott nyílászárú rendszerek átjárhatóságára ad információt. A 4. táblázatban látható, hogy a papírbeton páradiffúziós tényezője például egy nagyságrenddel nagyobb a vasbetonénál. A polisztirol alapú szigetelő anyagok páradiffúziós tényezője gyakorlatilag nulla, mert a zártcellás habelemek páraátjárhatósága nem lehetséges. A papírbeton falak páraátjárhatósága kiváló, azon túl, hogy kiemelkedően jó a hőszigetelő képességük. Ki kell emelnünk, hogy a páraátjárhatóságon kívül van még egy olyan tulajdonsága a papírbeton elemeknek, mely egyetlen egy más alternatív építőelemnek sincsen, ez pedig a párapufferáló hatás.

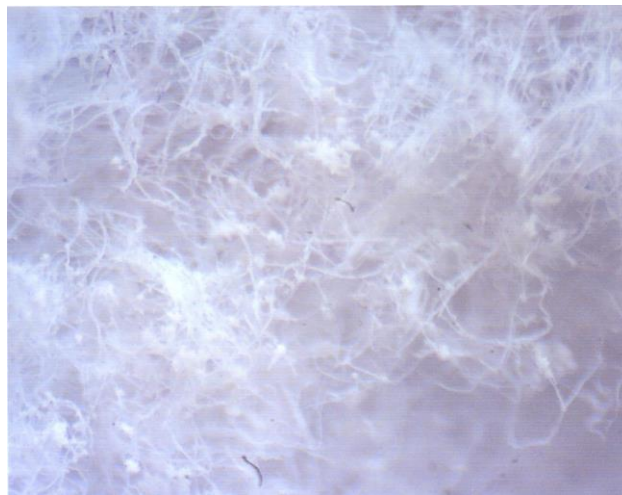
2. Kísérletekhez felhasznált anyagok és eszközök

Papíripari hulladékok

A papírbevonat alapanyagául két jellemző papíripari hulladékot használtunk fel. Az egyik a fent említett papíriszap, mely keletkezésekor alacsony szárazanyag tartalmú, tiszta cellulóz rostokból áll. A cellulóz rostok jellemzően kis lánchosszúságúak, közöttük a biológiai bomlás már megindult. Ez a hulladék típus sem hasznosításra, sem pedig energetikai felhasználásra nem alkalmas. Ipari mértékben történő kezelése egyelőre nem megoldott, ezért lerakóba kerül, ahol lassan és jelentős bűzhatással lebomlik. A papíriszap hulladék mennyisége folyamatosan nő, és ez szükségessé teszi olyan hasznosítási lehetőségek kiaknázását, amelyek képesek megoldani a vizes rostok okozta problémát.

Kísérleteink során a papíripari papíriszapot alapvetően kétféle minőségben használjuk fel, szárított előkezelt és nedves nyers formában.

Másik alapanyagunk a szintén gyártási hulladék eredetű tiszta cellulóz por. Megjelenését tekintve olyan, mint a frissen szétpattanó gyapot hófehér kóca, és tapintásra is nagyon hasonló (5. ábra). A cellulóz por olyan iparágak hulladékaiként jelenik meg, ahol olyan nedvszívó termékeket gyártanak, mint például női egészségügyi termékeket, ugyanis ezek nedvesség megkötő anyaga a tiszta cellulóz rost.



5. ábra. A tiszta „cellulóz por” szerkezetének negyvenszeres nagyítása (Dr. Csókai Viktor adatszolgáltatása).

Beton adalékok és egyéb kiegészítő anyagok

A hagyományos értelemben vett beton olyan mesterséges, hidratáció hatására megszilárduló építőanyag, melynek fő összetevői és alapanyagai a durva vagy finom szemcseméretű adalékanyag, mely kitölti a térfogat legnagyobb részét; a cement, mint kötőanyag; valamint a víz. Emellett gyakran egyéb adalékszer és kiegészítő anyagokat is használnak a beton bizonyos tulajdonságainak javítása érdekében. Az adalékanyag lehet természetes (pl. homok, kavics, zúzottkő vagy zúzalék) vagy mesterséges (pl. ipari vagy építőipari melléktermék) eredetű ásványi anyag²⁴. A finomra őrölt, mesterséges úton előállított szervesetlen eredetű cement olyan hidraulikus kötőanyag, amely vízzel keverve hidraulikusan megköt és szilárdul²⁵.

A betonkészítés során a megfelelő arányok beállítását követően az alapanyagokat egy keverőben egyesítik. A megszilárdult beton egy kémiai reakció, az ún. hidratáció eredménye a cement és a víz között, melyben az adalékanyag a megkeményedett cementpéppel össze van kötve²⁴.

Öntési kísérleteink során a papírhulladék és a víz mellé beton alapanyagként egyrészt Baumit B225 típusú szárazkeverékek, másrészt pedig portlandcementet használtunk. A Baumit B225 szárazbeton egy 4 mm maximális szemcseméretű, gyárilag előkevert készítmény²⁶. Összetételét tekintve cementből, 0-4 mm homokból és egyéb adalékszerből készül; a beton nyomószilárdsági osztálya: C20/25. A portlandcement a világon legszélesebb körben és legáltalánosabban használt cementtípus. Szürke vagy fehér színű. Kémiai összetételének korlátozottsága annyira szigorú, hogy a kalcium-oxid, a szilícium-, az alumínium- és a vas-oxid mennyiség csak egy szűk koncentrációtartományban kell, hogy jelen legyen a nyersanyagban, míg más alkotóelemek, mint a magnézium és az alkálifémek koncentrációja nem haladhat meg egy bizonyos értéket, amit definiál a 27 sz. irodalom²⁷.

Szigeteléstechikai kísérleteink esetén hozzáadott adalékanyagként mindenképpen fontos itt kiemelni a kerámia port vagy őrleményt, melynek pozitív hatásait elsősorban a hangszigetelési kísérletek során tapasztaltuk és írtuk le (ld. „Tesztelési fázis”).

3. Kísérletek bemutatása

Próbabetonozások

Az alapanyagként választott és általunk felhasznált papíripari papíriszap változó víztartalommal bírt. Mivel a készbeton előállításánál a víztartalom meghatározó, olyan kísérleti sor is el kellett végeznünk, ahol a felhasznált papírrrost a betonhoz adagolás előtt szárításon ment át. Ezzel a módszerrel meg tudtuk határozni annak átlagos nedvesség tartalmát, amely a nedves papíriszap beadagolásánál fontos tényezőnek bizonyult.

Az öntési kísérletek során az olyan keverékek öntőformájaként, melyek esetén a nyomószilárdság mérésére is szükség volt a 6. ábrán látható fából készült formát használtuk. A fa, mint öntőforma azért tűnt előnyösnek, mert a felesleges víz az illesztések mentén el tud távozni, és a fa fel is vesz nedvességet, amit a kötés során a papírbeton kocka oldalán és alján lévő felületeknek vissza tud adni. Minden 200 x 200 x 200 mm-es formában 8 liter térfogatra tudjuk préselni a betonmintákat.



6. ábra. Papírbeton tesztforma a préseléshez (200 x 200 x 200 mm).

Az 1. kísérlet során előállított papírbeton keverékhez felhasznált anyagok és anyagmennyiségek:

- szárított, előkezelt papíripari papír iszap hulladék, 1 kg
- víz, 4 liter
- Baunit B225 szárazbeton, 2 kg

Ezekhez a kis mennyiségű mintákhoz nem használtunk betonkeverőket, a kis térfogat miatt keverőszárral végeztük a betonkeverékek előállítását. A papíriszap előszárítása miatt a rostanyagot a cement hozzáadása előtt 10 percen keresztül keverőszárral kevertetve

nedvesítettük, majd a szárazbetont a homogén, nedves papírszaphoz adtuk. A kész elegyet további keverőszárral végzett keveréssel homogenizáltuk. A kész termékelegyet 200 x 200 x 200 mm-es öntőformába töltöttük, 5 percen keresztül 100 kg / 40.000 mm² (25 kN/m²) nyomással préseltük, majd egy éjszakán át 50 kg / 40.000 mm² (12,5 kN/m²) nyomással tömörítettük.

Azt tapasztaltuk, hogy a 4. nap elteltével a forma még mindig képlékeny, a megszáradt papír rostok kezdenek szétesni. Ebből arra következtettünk, hogy a papírrosthhoz képest a kötőanyag mennyisége kevés, nem alakul ki a várt konzisztencia, így a további kísérletekhez nagyobb mennyiségű kötőanyagot kell használjunk. A papírrost és a cement közötti kötés megghiúsulását okozhatta a rostok alacsony felvett víztartalma is, ezért a betonkeverék előállítása előtt hosszabb idejű pépesítés is szükséges lehet.

A 2. kísérlet során már nagyobb anyagmennyiségekkel és hosszabb pépesítési idővel dolgoztunk. A kísérlethez felhasznált anyagok és anyagmennyiségek:

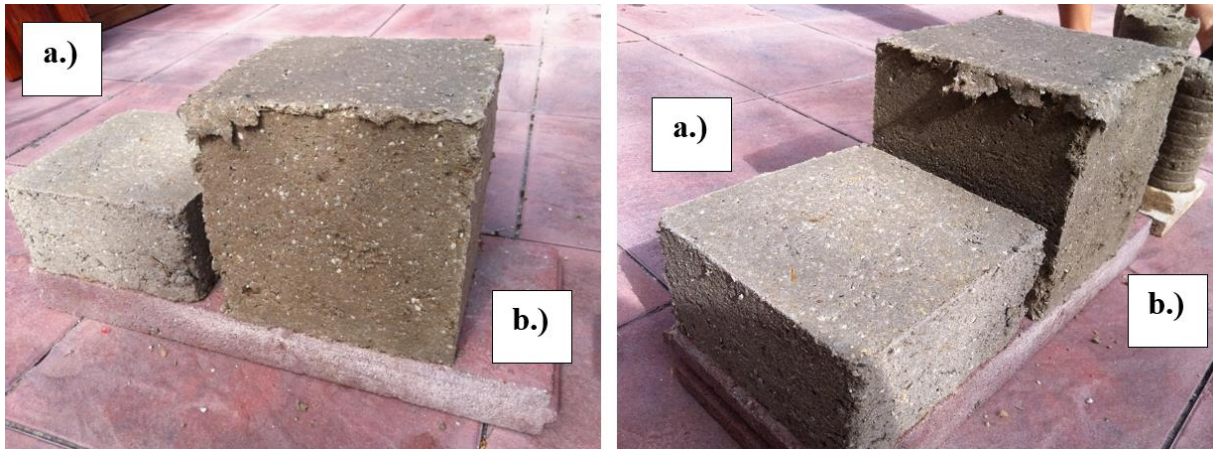
- szárított, előkezelt papíripari papír iszap hulladék, 2 kg
- víz, 6 liter
- Baumit B225 szárazbeton (összetételt ld. fentebb), 4 kg

A bemért papírszaphoz hozzáöntöttük a 6 liter vizet, majd állni hagytuk. Rövid keverőszáras pépesítés után a nedves elegyet egy éjszakán át ázni hagytuk. Az áztatás követően keverőszárral újra pépesítettük az elegyet. A papírpép sűrűsége préselés nélkül: $\approx 1.000 \text{ kg/m}^3$, a pépesítés során kialakuló hézagterefogatokat figyelembe véve: $\approx 500 \text{ kg/m}^3$. A kiöntött formákból egy éjszaka szikkadás után kivettük a mintákat, és száradni hagytuk. A 10. napon 50 %-os tömegcsökkenést tapasztaltunk. Az átlagos sűrűség 800 kg/m³-nek adódott. A továbbiakban a nyers, kezeletlen papírszapot 800 kg/m³ testsűrűséggel, és 50%-os víztartalommal számítottuk.

A pépesítés ugyanannak a keverék elegynek kétszeres mennyiségével könnyebben ment, hamarabb elértük a homogén nyersbeton keverék elegyet. Az öntéshez az 1. kísérletben bemutatott öntőformát használtuk. Az öntés és tömörítés után az 1. kísérletben leírt préseléssel (25 kN/m² 5 percen keresztül, majd 12,5 kN/m² egy éjszakán át) stabilizáltuk a kockát.

Másnapra a próbakockába öntött massa még nedves volt. A második napon kibontottuk, majd még két napot vártunk a száradásra, de a kocka kötése nem volt megfelelő. Ezek szerint a kötőanyag-rosttartalom arány nem megfelelő, és nem a rost nedvesítésével vagy feltárással van probléma. Felmerült az igénye annak is, hogy ne száraz készbetont használjunk kötőanyagként, hanem cementet, és az így képződő masszát adalékoljuk.

A 7. ábrán látható téglá-, illetve kockatestek az 1., illetve a 2. öntési kísérlet papírbeton termékeinek formába öntése után képződtek.



7. ábra. Az 1. kísérlet (a. 4 l-es téglá) és a 2. kísérlet (b. 8 l-es kocka) késztermékei.

A 3. kísérletnél a kötőanyag arányának növelése mellett az előző (2.) kísérletben meghatározott nyers, papíripari papíriszapot használtuk 50% nedvességtartalmat feltételezve. Ebben a kísérletben még az volt a cél, hogy a száraz készbetont használhassuk fel, de már értékelhető próbakockát tudjunk gyártani. A papírbeton keverékekhez felhasznált anyagok és anyagmennyiségek:

- nedves, nyers papíriszap, 1 kg
- víz, 1 liter
- Baumit B225 szárazbeton, 3 kg

A nedves papíriszapot ebben az esetben is először a vízzel pépesítettük. A szárazbeton hozzáadása a homogenitás érdekében kis adagokban történt. A magas szárazbeton arány miatt a kész masszában jól látható a szárazbeton kavics tartalma. A korábban is alkalmazott öntőformát és préselést alkalmaztuk (25 kN/m² 5 percen keresztül, majd 12,5 kN/m² egy éjszakán át). A száradási idő nagy mértékben nem csökkent, de a második napon, az öntőforma bontásakor már érezhető volt a kötés hatékonyságának jelentős növekedése. A száradás még két napig tartott, és a kapott kocka tapintásra kemény, masszív anyaggá kötött. A szárazbeton kavics tartalma a széleknél kihullott a kész, magas rosttartalmú próbakockából.

Már látható, hogy ahhoz, hogy a papír kellően homogén pépet szolgáltatson, több vizet kell adagolni, mint amennyi a betonkötéshez kell. Ezért a cementált papíriszap tartalmú beton masszát a préseléskor vízteleníteni kell, figyelve arra, hogy cementet a kipréselt víz ne vigyen

magával. Ezért alkalmazunk kétlépcsős préselést a tömörítés után, és az egész éjszakás préseléshez már kisebb nyomást használunk.

A 4. kísérletben szintén a 2.kísérlet során meghatározott nyers, papíripari papíriszapot használtuk 50% nedvességtartalmat feltételezve, de a 3. kísérlettel ellentétben nemcsak a kötőanyag arányának növelésével, de annak minőségi változtatásával is. Mivel a száraz készbeton kavics tartalma kipereg a papírbeton széleiről és oldaláról, nem értékeltük hasznosnak a stabil konzisztencia kialakulása érdekében. Ezért a kötőanyag arányának meghatározásával folytattuk a munkát. A papírbeton keverékekhez felhasznált anyagok és anyagmennyiségek:

- nedves, nyers papíriszap, 1 kg
- víz, 1 liter
- portland cementpor, 2 kg

A nyers, kezeletlen papíriszap vízfelvétele és keverése meghatározó lépés a homogenitás szempontjából, mert a cementpor nem tud szét nem esett papír darabokat megkötni, rostokra szétesett masszához szabad csak keverni a cementport. A keverőszárral homogenizált papírrrost massa már könnyen elegyedett a cementporral, és a keverőszáras homogenizálás is viszonylag gyorsan ment. A korábban használt 200 x 200 x 200 mm-es fa öntőkockát használtuk, tömörítés után a korábban bevált préseléssel formáztuk a próbatestet. A második napon bontottuk ki, a kocka nedves volt még, de kemény, homogén egységet alkotott. Ennek a kísérletnek az eredménye volt az első, olyan papírbeton próbakocka, aminek a továbbfejlesztését megcéloltuk. A fejlesztési lépések a korábbiakhoz képest már nem voltak jelentősek, a papíriszap mennyiséget és a víztartalmat állandónak vettük, de a cement mennyiségét változtattuk. A 4. kísérlet szerinti receptúra a kívánt kezelhetőség legkisebb mennyiségű cementtartalmával készült el, de az optimumot a következő mennyiségekkel értük el:

- nedves, nyers papíriszap, 1 kg
- víz, 1 liter
- portland cementpor, 2,5 kg

Ezzel a nedves keverékkel az öntés is sokkal könnyebben ment, a présformában az öntés után már nem préseltünk, azonnal formatartó maradt. A 10. napon a tömegveszteség 53 % volt. A kész présformákból halványszürke, majdnem fehér, 1.120 kg/m^3 átlagos sűrűségű, nagy szilárdságú betonhoz jutottunk. Az alábbi képeken (8. ábra) látható, már formatervek szerint elkészült dizájn elemeken látszik, hogy a keverék homogenitása javult.



8. ábra. A 4. öntési kísérlet papírbeton termékei.

Az 5. öntési kísérletet papíripari papíriszap felhasználása helyett tiszta cellulóz porral, mint hulladék alapanyag, végeztük. A papírbeton gyártásához a cellulóz rostok forrása fontos volt számomra, hogy hulladékból legyen, mivel a korábban már kifejtett fenntartható alapanyagú, nem hasznosítható hulladék anyagforrások felhasználását tűztük ki célul. Olyan iparágak, mint a kiemelt minőségű papír gyártás (release paper) és a csomagolás technika alkalmaznak kitöltő anyagként vagy gyártásközi adalékként tiszta cellulózt, többnyire pamutból. Ezek az anyagok egyszer használatosak, a gyártásközi hulladékok és a kicsomagolt töltőanyagok égetőbe kerülnek. Szerencsére van olyan partnerünk, aki nagy mennyiségű cellulóz porként elnevezett hulladékot kezel, és környezettudatos lévén keresi a hasznosítási lehetőségeket.

A cellulóz porból készített próbaöntések meglepően szép, homogén, jól alkalmazható anyagkeveréket eredményeztek. A keverékekhez felhasznált anyagok és anyagmennyiségek:

- tiszta „cellulóz por” hulladék, 1 kg
- víz, 4 liter
- cement (későbbi bekeveréssel 2 liter vízzel), 3 kg

A cellulóz por másképpen viselkedett, mint a papíriszap. Száraz anyag lévén nehezen nedvesedett, elő kellett áztatnunk. A 4 liter hozzáadott vízmennyiséget egy éjszakás állás mellett teljes mértékben magába szívta, és a kész massa még vizet igényelt ahhoz, hogy keverni lehessen. Ezért a cementet nem szárazon, hanem előre nedvesítve, még 2 l vízzel bekeverve adtuk a hófehér, nehezen mozgó masszához. A keverőszár nem vitte, ezért kézzel, manuális módon kevertük, homogenizáltuk 2 órán keresztül. A formába öntés során nem

távozott belőle víz, éjszakára formában hagytuk. Az éjszakai szikkadás után kivettük a formákból, és levegőn szárítottuk. A 10. napon szinte teljesen fehér mintákat kaptunk, a tömegcsökkenés értéke 60 %-os volt. Összességében nagy szilárdságú, 900 kg/m^3 átlagos sűrűségű kész papírbetonhoz jutottunk.



9. ábra. Az 5. kísérlet próbatestei.

Megállapítottuk, hogy a cellulóz por ugyan alkalmas a papírbeton gyártására, de más technológiát igényel, mint a papíriszap. Megfelelő nedvesítéséhez jelentősen nagyobb mennyiségű vízre van szükség, előkezelése vízigényes, a homogenizálása nehezebb, de a kész papírbeton anyaga masszívabb, esztétikusabb, keményebb és ellenállóbb a mechanikai és biológiai behatásokkal szemben, mint a papíriszapból készített könnyűbetonok esetén.

Szigetelőtechnikai kísérletek

A szigetelő panelek előállításánál 40-50-60-70-80 % cellulózt tartalmazó papíripari papíriszapot 5-15 % vízzel elegyítettünk. Nagy általánosságban elmondható, hogy ezek a papír alapú hulladékok már a beszállításkor nagy mennyiségű vizet tartalmaztak. Amennyiben szükségesnek ítéltük, a rostos anyag jellege miatt a masszát feltártuk, majd intenzív, 60–120 liter/perc fordulatszámú keverőben történő keverés mellett 5-10-20-30-40% szerves szilikát alapú cementtel, valamint gipsszel, mint kötőanyaggal összekevertük. Ezt követően a még képlékeny keveréket formába öntöttük, végül 5-25 °C-on szárítottuk. Néhány esetben szilárdító, illetve felületkezelő anyagként kerámia port is adagoltunk a rendszerhez (10.ábra).

Az eljárás során keletkező vízgőz eltávolítása, illetve a kialakuló forma hézagterfogatának növelése érdekében porózus formát alkalmaztunk és a formába öntött terméket 5-20 percenként levegőztettük vagy szellőző formában szárítottuk. Az eljárással kapott elemet, formatestet mind hőszigetelő, mind pedig hangszigetelő elemként kívántuk tesztelni. Célunk az volt, hogy egy épület belső falára, mennyezetére rögzítjük kötőelemekkel, vagy minthogy szilikát-karbonát kötésekről van szó, önmagában, ismert építőipari ragasztóanyaggal.



10. ábra. Az általunk készített a.) papírbeton és b.) kerámiával borított papírbeton mintaformák.

Célunk, hogy a fent említett eljárással készíthető, nagy variabilitású minőségi- és fizikai-kémiai tulajdonságokkal rendelkező elemeket, paneleket gyártsunk, melyek segítségével helyettesíthetők a drága és tűzveszélyes szigetelő anyagok, mint a habosított polisztirol, valamint a közet- illetve üveggyapot. A papírost adagolása a betonhoz nyílt és zárt cellákat egyaránt tartalmazó szilikát erősítésű panelek gyártását teszi lehetővé. Ezek papír-, illetve

rosttartalmából adódóan a szénhidrátok funkciós csoportjai részt tudnak venni a szilikátos kötések másodlagos kötéseiben, ezáltal stabilizálják a struktúrát.

A fent említett rostok könnyen duzzadnak vizes rendszerekben, így a nedvesítés fázisában a duzzadt rostok víztartalma a szilikát-hidroxi-karbonát kötések kialakulása során átadódik a szervesetlen közegnek. Ennek következtében a karbonátosodás során már egy, a rostok kontrakciójából adódó pórus alakul ki. Attól függően, hogy milyen forrásból származik a rost, a pórus lehet savas vagy lúgos karakterű. Mivel a papír hulladékok töltő és szilárdító anyagai (nátrium- és kalcium karbonátok és hidrogén karbonátok) alapvetően lúgos karakterűek, és azonosak a szilikát kötés során kialakuló karbonátokkal, ezek elősegítik a papír, mint cellulóz forrás homogenizálását a mátrixban. A cellulóz a száradásból adódóan térfogatkontrakción esik át, melynek során nem válik el a már száradó szilikát-hidroxi-karbonát (általában cement alapú beton) struktúráról, és kompatibilitásából adódóan az egyik, üreget határoló felületen ragad fel. Ki kell emelni, hogy a beton, mint pórusos szerkezet, nem áll ellen a nedvesedésnek, és ennek következtében fagyásveszélynek van kitéve. Ezen tulajdonsága előnyként jelentkezik beltéri alkalmazása esetén. A cellulóz kiválóan köti meg a vizet, majd alacsony páratartalmú környezet esetén ez a nedvességtartalom újra mobilizálódik. Ennek hatása beltéri alkalmazás esetén a levegő páratartalmának kiegyenlítését segíti elő. Kültéri alkalmazhatósága is széles körű, de nem szabad kitenni közvetlen vízhatásnak. Ezt egy egyszerű vakolással vagy egyéb, a hagyományos építészetben alkalmazott falazatkezeléssel ki lehet védeni. A magasabb páratartalom nem okoz gondot, mert a szerkezetbe bediffundált víz azonnal szolvatálja a hidrofil funkciós csoportokat a mátrixban, ezáltal fagyáspontja drasztikusan csökken.

Az előállított papír-beton paneleket beltéri falfelületek, elválasztó elemek kialakítása céljából teszteltük. Ennek célja az volt, hogy minimalizáljuk a panelek vastagságát addig, amíg az elemek önhordósága még teljesíthető, és zajos tereket válasszunk le velük hangszigetelés céljából.

A papír-beton panelek gyártása során olyan présformákat használtunk, melyek nagy mennyiségű vizet távolítottak el a mintákból még a száradás és kötés előtt, ezért a száradás utáni tömegvesztés nem volt olyan mértékű, mint a kisebb mintadarabok készítése során (ld. 1-5. öntési kísérlet). A kész panelek előállítása után statikai, hő- és hangszigetelési tesztek végeztünk. Ezen eredmények bemutatását az alábbiakban fejtem ki.

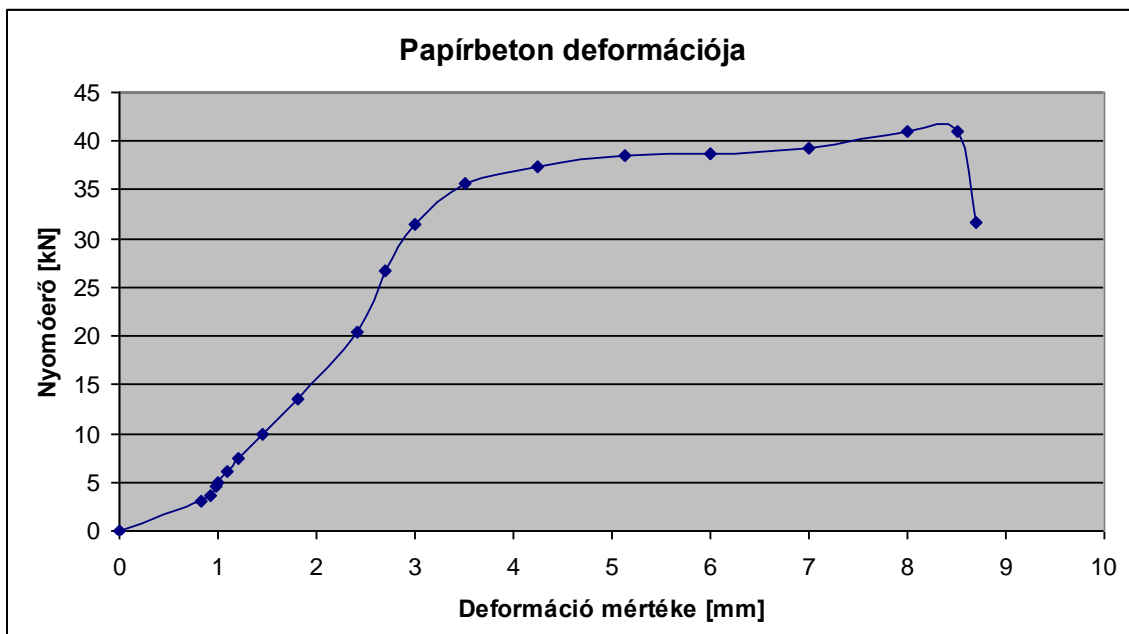
Tesztelési fázis

Az általunk előállított késztermék fizikai tesztjeit a nyomószilárdságra, hővezetésre, tűzállóságra és hanggátlásra korlátoztuk.

Nyomószilárdság mérés

A törésvizsgálatokhoz, és így a nyomószilárdság méréshez felhasznált panelt a 4.öntési kísérlet receptúrája alapján készítettük (ld. 27. oldal). A vizsgált papírbeton mintadarab mérete 300 mm x 80 mm x 500 mm.

Vizsgálataink során kapott értékeket a 11. ábra mutatja.



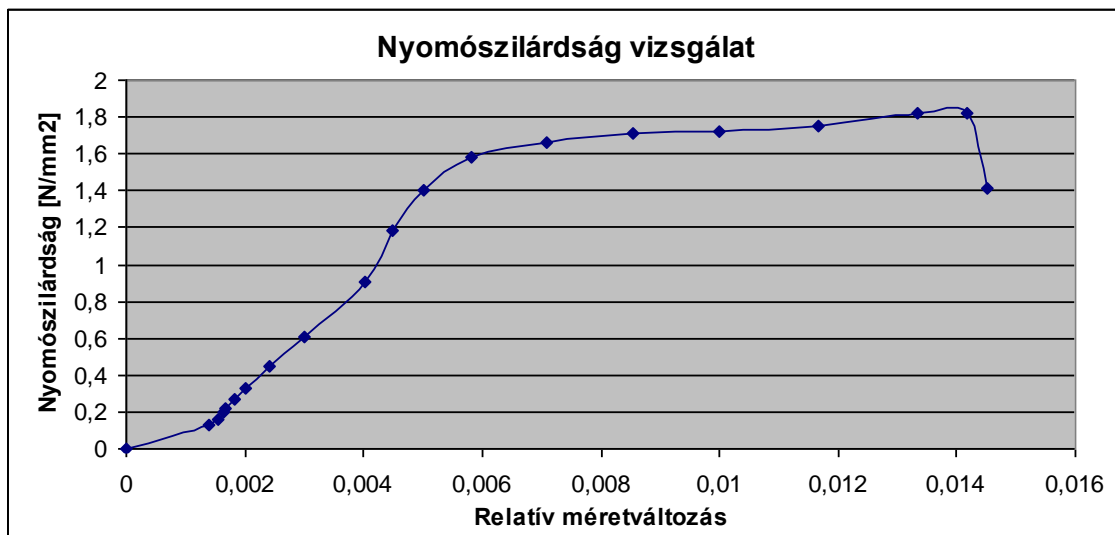
11. ábra. Papírbeton mintadarab deformációjának mértéke [mm] a nyomóerő [kN] függvényében (4. öntési kísérlet szerinti receptúra).

Az ábrán jól látszanak a szerkezeti anyagokra jellemző deformációs folyamatok:

1. A mintadarab 1-1,2 mm-es zsugorodást szenved 5 kN nyomóerő hatására, ezt a szakaszt még rugalmas szakasznak, vagyis 100 %-os reverzibilitással működő mozgásnak tekinthetjük. A mintadarab nem szenved maradandó kontrakciót.
2. Ezután egy meredekebb, és számos inflexióval rendelkező szakasz látszik, ebben a kontrakciós folyamatban már folyást, vagyis maradandó változásokat detektálhatunk.

3. A fokozódó nyomóerő hatására a mintadarab meghatározott felületén már nagyobb magasságsökkenést tapasztalunk (plató), végül 43 kN erősségű behatásnál egy szakadás (letörés) történik, vagyis esetünkben a folytonosság megszűnése, törés következik be.

A nyomószilárdság meghatározása érdekében ezt a vizsgálatot ábrázolhatjuk σ_{ny} feszültség (nyomóerő [N] / felület [mm^2]) - ε relatív méretváltozás (l_0-l/l_0) diagramon is (12.ábra).



12. ábra. Papírbeton mintadarab nyomószilárdság vizsgálata (4. öntési kísérlet szerinti receptúra).

A fenti diagram alapján az általunk előállított papírbeton elem nyomószilárdsága 1,8 N/mm², mely alkalmas lehet tartófalak önhordó szigetelő falazatának kialakítására.

A kapott 1,8 N/mm² húzószilárdság érték a könnyűbetonok esetén elfogadható, annak ellenére, hogy a hagyományos betonhoz képest egy nagyságrenddel alacsonyabb. Ez azt jelenti, hogy egy 1 mm²-es papírbeton felületre ható 1,8 N erő hatására a papírbetonban lévő kötések maradandó deformációt szenvednek, vagyis összeroskadnak. Ez egy 300 mm x 600 mm-es betonelem esetében 324 kN, vagyis valamivel több, mint 32 tonna. Ennél lehet jóval nagyobb értékeket is elérni abban az esetben, ha a homok és cement mennyiségét a papírhoz viszonyítva megnöveljük. Mindemellett a nyomószilárdság értékeket a préselés is növeli, tehát mind a cementtartalom növelése, mind a zömítés és préselés a kötés kialakulása előtt szükségessé válik abban az esetben, ha szerkezeti anyagokat akarunk előállítani, falazóelemek előállításának érdekében.

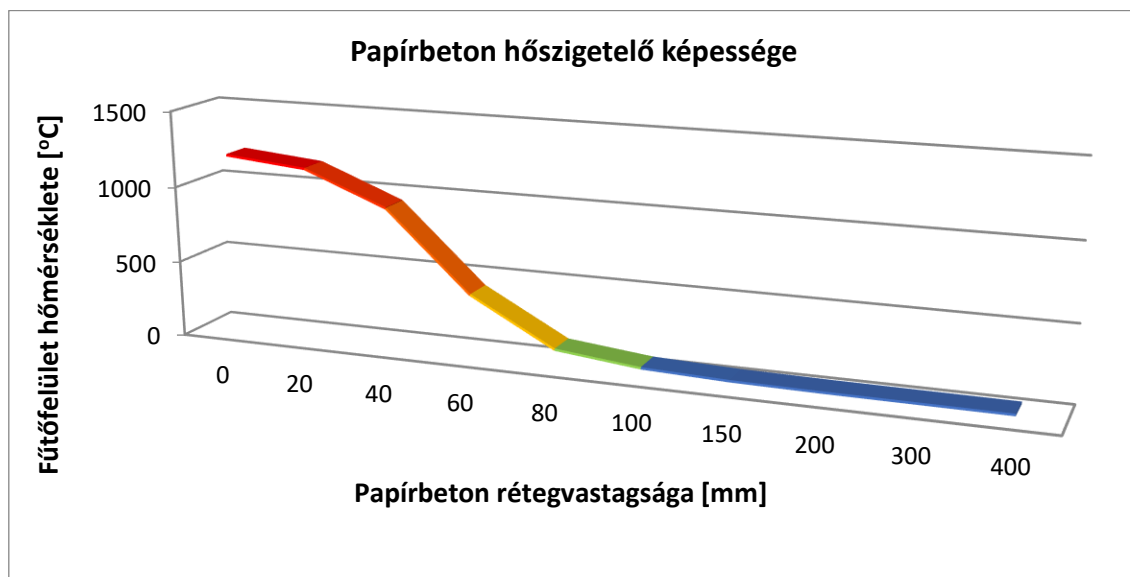
Hő- és égésgátlási vizsgálatok

A hővezetési tényező meghatározását ez esetben is a 4. öntési receptúra alapján erre a célra készített 300 x 80 x 500 mm méretű papírbeton munkadarab vizsgálatával végeztük. A 14. ábrán látható diagram mérőpontjait egy általánosan alkalmazott, hővezetés mérésére használható, termométerekkel felszerelt berendezéssel határoztuk meg, 20-30-40-60-80 mm-ként elhelyezett mérőcellákkal. Egy ilyen, hővezetési tényező mérésére alkalmas berendezés látható a 13. ábrán.

A felfűtési ciklus során 10W-os fűtést alkalmaztunk, majd 30 perc elteltével mértük a leadott fűtési teljesítményt és a mintadarab hőmérsékletét a különböző mérési pontokon.



13. ábra. Hővezetési tényező mérésére alkalmas berendezés.

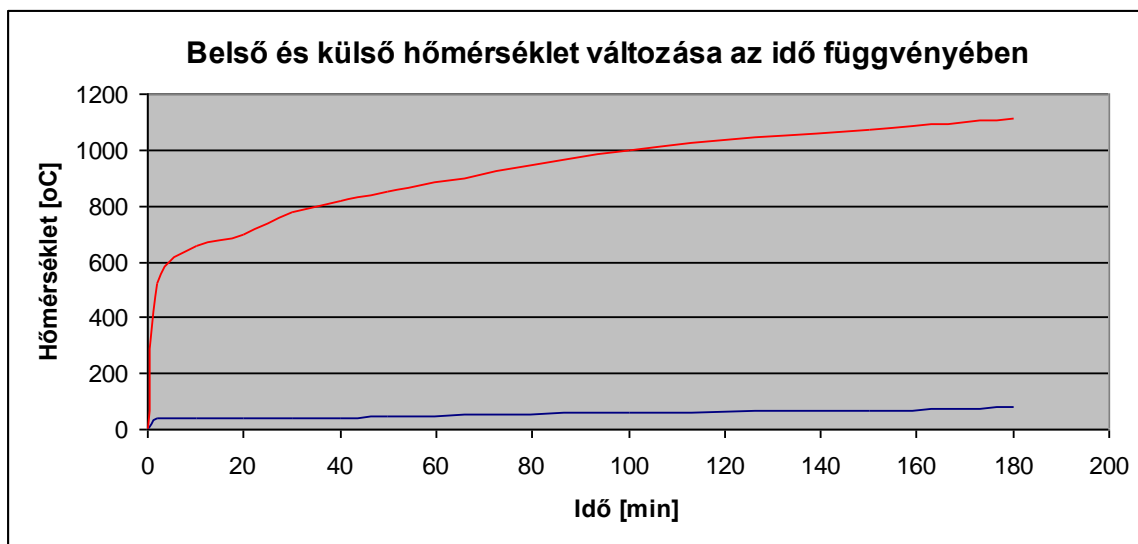


14. ábra. Papírbeton mintadarab hőtechnikai vizsgálatának eredménye.

A 14. ábrán a mintadarab felfűtése során láthatjuk a mérési pontok által szolgáltatott hőmérséklet-profilt, mely a vártnak nem megfelelően nem lineáris lefutású. Ez hőtani szempontból ellentmond a szilárd testek hővezetésére alkalmazott megközelítésnek. Ennek számos oka lehet, de legfőképpen a papírbeton szerkezetéből adódik, melynek inhomogenitása miatt a tesztelem egyes pontjain mérhető hőmérsékletek nem egy egyenesre illeszthetők. Mégis alapvetően elmondható, hogy a hőközléstől kiindulva a mintadarabban kifelé haladva a hőmérséklet gyorsan esik.

Az eredmények alapján számítható a papírbeton hővezetési tényezője, mely esetünkben $\lambda=0,24$ W/mK.

A hőszigetelés hatékonyságának időbeli tesztjét kazánszigeteléssel végeztük. A fenti vizsgálat 80 mm-es mintadarabja már hatékonynak bizonyult az extrém magas hőmérséklet elviselésére, ennek időbeli változását tanulmányoztuk. Minthogy a tesztkazán belső hőszigetelő egységei mobilisak, a gyárilag beépített kerámiabetéteket 80 mm-es papírbeton panelekkel helyettesítettük. A 15. ábrán látható piros görbe jelöli a kazán belső hőmérsékletét, míg a kék a szigetelés külső felületén mérhető hőmérsékletet. A diagramon jól látszik a kazán felfűtési ciklusa, miszerint 600 °C-ig viszonylag gyorsan fűt fel, majd egy lassú felfűtésű szakasz következik egészen 1 150 °C-ig.



15. ábra. Papírbeton mintadarab hővezetési értékei az idő függvényében.

Látható, hogy 3 óra elteltével sem detektálható 1000 °C-nál magasabb hőmérséklet a szigetelés külső felületén, ami azt jelenti, hogy igen magas hőmérséklet esetén is stabil hőszigetelést érhetünk el mindössze 80 mm-es papírbeton szigeteléssel.

Égés gátlási vizsgálatainkat moderált készülékigénnyel valósítottuk meg. A 10.a. ábrán is bemutatott, kerámia por nélkül készített papírbeton mintadarab égés gátlását úgy teszteltük, hogy azt égő gázégőre helyeztük, és vizsgáltuk a vezetett hőt, illetve a felületi károsodást. A kísérlet eredménye szerint 20 perc aktív láng esetén sem tapasztaltunk méretcsökkenést. A felület kormozódott, de jelentősebb égés okozta struktúra-változást a mintadarab nem szenvedett. A mintadarab az említett 20 perc elteltével is tapintható volt, hőmérséklete a felső felületen nem érte el a 40 °C-ot.

Akusztikai mérések, hanggátlás²⁸

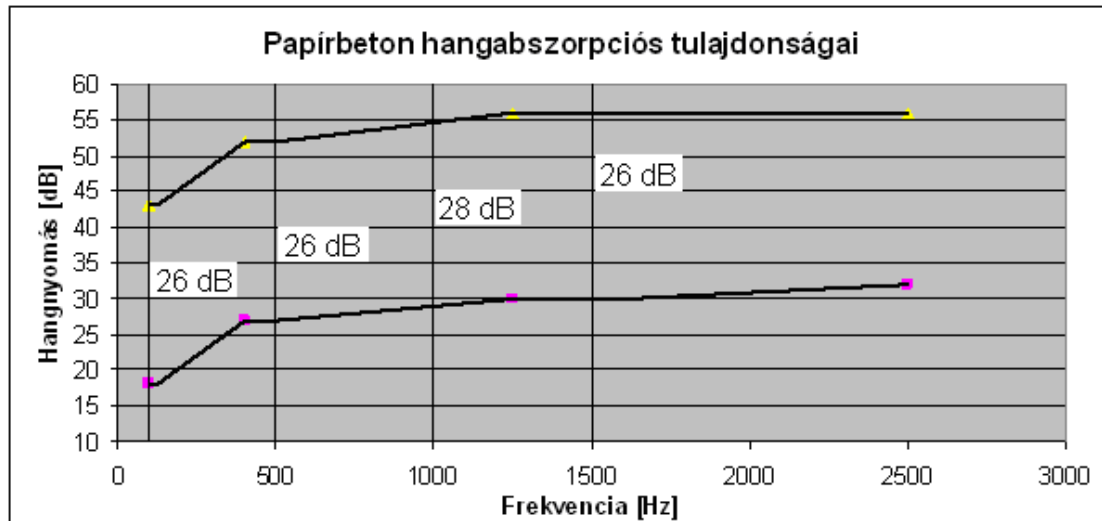
Az akusztikai mérésekre szolgáló műszerek logaritmus függvénynek megfelelő mérési karakterisztikával rendelkeznek. A vonatkoztatási szinthez kapcsolódó dB-ben kifejezett értékeket szintértéknek nevezzük, és a logaritmus mennyiségeknek megfelelően számolunk velük. A p_0 vonatkoztatási érték a hallásküszöb értéke, melyhez, mint hallható legkisebb alapértékhez viszonyítjuk a gyakorlatban előforduló hangerősség értékeket (hangerősödés esetében; a hangtompítás ennek inverze). Az ennek megfelelő hangnyomású hangforrásokból kibocsátott hangintenzitás (a hangforrásból térben és időben a felületegységen áthaladó hangenergia), a mértékskála I_0 vonatkoztatási értéke. A hallásküszöb értékét a levegő molekuláinak Brown mozgása szabja meg. Ha fülünk egy nagyságrenddel érzékenyebb volna, ez a termodinamikai mozgás állandó hangszennyezéssel terhelné szervezetünket! Ugyanakkor tudnunk kell, hogy a hangszennyezés és zajhatások maradandó, és irreverzibilis hatásként a hallásküszöb eltolódását okozzák. 20 dB eltolódás már jelentős, 40 dB vagy ennél nagyobb eltolódás pedig súlyos, maradandó halláskárosodáshoz vezet.

A szintértékekkel meghatározott hangtér összetevők együttes hatásának meghatározásakor figyelembe kell venni a logaritmus mennyiségek összeadásának előírásait. Azaz az egyes összetevőket előbb lineáris hangnyomás értékekre kell átszámítani, így azokat összegezni, majd az összeg hangnyomás szintértékét a vonatkoztatási szint figyelembevételével megadni. Ennek megfelelően, ha egyszerre adott pontban $L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$ hangtér összetevők hatnak, az eredő hangnyomásszint értéke $= 10 \log [(\sum_{k=1..n} 10^{0,1L_k})/p_0]$.

A léhanggátlás teszteket a korábban már bemutatott 80 mm vastag panelekkel végeztük. A panelek az eddigiekhez hasonlóan a 4. öntési receptúra alapján készültek.

Az ISO 717-1 számú szabvány szerinti meghatározással kaptuk az alábbi ábrán feltüntetett diagrammot (16. ábra). Két frekvencián (400 Hz és 1.250 Hz) mért hangnyomás adat is egyezett

a standard, sárga pontokkal jelölt görbe meredekségével, ezért nagy biztonsággal végezhetjük el a szabvány szerinti görbeeltolást. Ennek alapján az emberi fül által érzékelhető 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz és 1,5 kHz frekvenciákon 26, illetve egy esetben 28 dB hangnyomás csökkenést tapasztaltunk.



16. ábra. Hangnyomás csökkenése 80 mm-es papírbeton esetén.

A diagramon látható, hogy az emberi fül számára érzékelhető hangtartományban egy 80 mm vastag panel esetén a léghanggátlás mértéke $R_w=26$ dB. Ki kell emelni, hogy nem végeztünk a zajcsökkenést analizáló méréseket, és ellenteszteket, hogy meg tudjuk állapítani, vajon mekkora a hangcsillapítás abszorpciós és reflexiós mértéke.

Viszonyításként néhány, különféle hangforrások esetén mért hangnyomás-adat a mindennapjainkból:

- Lakott terület éjjel: 40 dB
- Csendes kisvendéglő: 50 dB
- Erős forgalom 5 méterről: 70 dB

Mínt hogy a legnagyobb hangcsillapítási értékünk sem volt magasabb 33 dB-nél, állíthatjuk, hogy értékelhető hangcsillapítást értünk el. Magyarozatképpen meg kell jegyezni, hogy 3 dB hangnyomás csökkenés a logaritmus számítás miatt eredményezi a zaj intenzitásának felére történő csökkenését, az általunk bemutatott adat pedig 26 dB (16. ábra).

A szerkezeti és szigetelőanyagok területén van ennél jobb, de ezek mind olyan kompozitok, szendvicspanelek vagy töltött beton elemek, melyek drágák, nehezen előállíthatóak, nem tudják

követni a már beépített felületeket, vagy csak bizonyos feltételek mellett tudják teljesíteni a katalógusaikban megjelölt hanggátlási értékeket.

A 80 mm-es mintadarab hangcsillapító hatását pozitívan értékelve olyan összehasonlító elemzéseket készítettünk, melyek képet adhatnak a zajcsökkentés mértéke és az összetétel, illetve rétegvastagság összefüggéseiről.

A tesztfázisban a hangtechnikai tesztek költségigénye miatt az eljárásunk szerinti, vizsgálni kívánt termékeink számát minimalizáltuk. Kísérleteink során az előáztatott, magas cellulóz tartalmú papírszap hulladékot (60-70-80 %) cementporral (20-30 %) és kerámia őrléménnyel (2 %) elegyítettük, majd intenzív keverés során az egész mátrixot homogenizáltuk, és préselés után öntőformákban levegőn szárítottuk.

A vizsgálatokhoz tehát kétféle méretben (80 és 100 mm) különböző rosttartalmú papírbeton elemeket készítettünk. Mindkét méret esetén öntöttünk 60-70-és 80% papírszapot tartalmazó papírbetont, illetve minden típusból készítettünk olyat is, amely még 2% kerámia őrléményt is tartalmaz anyagában. A késztermékek maximum 5 % vizet tartalmaztak.

5. táblázat. A papírbeton zajcsökkentő hatása, és néhány referencia érték bemutatása (saját mérések alapján).

Sorszám	Rostanyag-tartalom - Felület	Panel vastagsága	Léghanggátlás (500 Hz)
1	60% papír	80mm	26dB
2	70% papír	80mm	28dB
3	80% papír	80mm	28dB
4	60% papír – 2% kerámia őrlemény	80mm	28dB
5	70% papír – 2% kerámia őrlemény	80mm	30dB
6	80% papír – 2% kerámia őrlemény	80mm	30dB
7	60% papír	100mm	33dB
8	70% papír	100mm	34dB
9	80% papír	100mm	34dB
10	60% papír – 2% kerámia őrlemény	100mm	34dB
11	70% papír – 2% kerámia őrlemény	100mm	34dB
12	80% papír – 2% kerámia őrlemény	100mm	34dB
A kontroll	Hangszigetelő filc	125mm	45dB
B kontroll	Lyukas téglá 2x1cm vakolattal	120mm	43dB
C kontroll	2 réteg gipszkarton	25mm	7dB

Méréseinkkel vizsgáltuk az így készített beton mintadarabok zajcsökkentő hatását. Saját öntéseinket és a mérési eredményeket a fenti táblázat (5. táblázat) szemlélteti, amelyben összehasonlításként három referencia értéket is feltüntettünk (ld. A, B és C kontroll).

Jól látható, hogy leginkább a rétegvastagság dominál, az összetétellel nem nő drasztikusan a zajcsökkenés. Ki kell emelni, hogy a korábban már meghatározott statikai jellemzők, mint a nyomószilárdság akkor éri el a szerkezeti anyagok nagyságrendjét, ha maximum 70 % papírt alkalmazunk egyéb, a stabilitást és keménységet növelő töltő- és kötőanyagokkal. Ami nagyon érdekes és figyelemre méltó, hogy a kerámia őrléménnyel lefedett felületű mintadarabok hangelnyelése nem csökkent, vagyis a külső felületkezelés nem rontja a jövőbeni papírbeton panelek hatékonyságát. Ennek két oka lehet, az egyik az, hogy ennek a komplex rendszernek inkább a hangelnyelésben, vagyis abszorpcióban teljesedik ki a hanggátló hatása, mintsem a visszaverődésben (reflexió), illetve a másik lehetőség, hogy a felület lefedésével éppen annyira tevődik át a hanggátlás a reflexióra, mint amennyire leromlik az abszorpciós hatás. Erre a kérdéskörre ebben a tanulmányban külön nem térek ki.

Kísérleti eredmények összefoglalása és kiértékelése

A papírbeton öntési kísérletek során a 4. kísérlet adta meg végül számunkra a megfelelő keverési receptúrát, amelyet a későbbiekben, a tesztelési fázis egyes pontjaiban a próbatestek öntésénél alkalmaztunk. Eszerint a receptúra szerint 1 kg nedves, nyers papíriszapot kell összekeverni 1 liter vízzel és 2,5 kg portlandcementtel. Ezzel a nedves keverékkel az öntés is sokkal könnyebben ment, a présformában az öntés után már nem préseltünk, azonnal formatartó maradt, és a keverék homogenitása javult.

A törésvizsgálatok eredményei alapján az általunk 4. kísérleti receptúra alapján előállított papírbeton elem nyomószilárdsága $1,8 \text{ N/mm}^2$, mely már megfelelő lehet tartófalak önhordó szigetelő felületeinek kialakítására.

A következő kísérleti fázisban kiszámítottuk a 4. receptúra alapján készített papírbeton test hővezetési tényezőjét, mely esetünkben $\lambda=0,24 \text{ W/mK}$. Ezt követően a hőszigetelés időbeni hatékonyságának tesztelését kazánszigeteléssel végeztük. A vizsgálat során a mintadarabunk már hatékonyan bizonyult az extrém magas hőmérséklet elviselésére.

Égésgátlási vizsgálatainkat a 10.a. ábrán bemutatott papírbeton mintadarab felhasználásával végeztük. 20 perces kezelés hatására a felület kormozódott, de jelentősebb égés okozta struktúra-változást nem tapasztaltunk. A mintadarab nem forrósodott fel, tapintható maradt, hőmérséklete a felső felületen nem érte el a 40 °C -ot.

A hangszigetelési vizsgálatok során a 80 mm-es mintadarab (4. receptúra) hangcsillapító hatását pozitívan értékelve összehasonlító elemzéseket végeztünk a beton összetétel, valamint rétegvastagság és a zajcsökkenés mértékének összefüggéseit vizsgálva. Ehhez változtattunk az eddigi betonreceptúrán, és azt tapasztaltuk, hogy leginkább a rétegvastagság dominál, az összetétellel nem változik drasztikusan a zajcsökkenés mértéke.

A legyártott mintaelemek hézagterfогata változatos, és sűrűségük sem tekinthető homogénnek, de adataink szerint elmondható, hogy releváns összefüggések szerint mutatnak hő- és hanggátló hatásokat. Ezen hatékonyságok azonban változhatnak a papír minőségétől és mennyiségétől, valamint a felhasználási igényeknek megfelelően az adalék- és töltőanyagok alkalmazásától.

A papírhulladék magas nedvességtartalmából adódóan a beton kémiai átalakulása során végbemenő víztranszportot kiegyenlíti, ezáltal a beton nem melegszik túl és nem töredezik. A

termék optimális mérete és a modulálását elősegítő profilok kialakítása a felhasználási igénytől függően változhatnak

5. Konklúzió

A fent kifejtett gyártási folyamat széles körű alkalmazhatóságot, és a kereskedelmi forgalomban megtalálható konkurens termékek hang- és hőszigetelő tulajdonságait meghaladó, de legalábbis megközelítő szigetelő tulajdonságokat eredményezhet.

Kutatás-fejlesztési eredményeinket értékelve, jelentős előrelépéseket értünk el mind az építőipar-, mind pedig a hulladékgazdálkodás területén.

A környezetterhelés csökkentésének tekintetében fontos kiemelnünk, hogy az általunk alkalmazott papírbeton gyártó technológia terméke zöld termékként jellemezhető. Ennek oka, hogy a késztermék igen magas koncentrációban (min. 50 %) tartalmaz biológiailag lebomló összetevőt, cellulóz rostot. A betonelemek tartósságát nem teszteltük, azonban a cellulóz természetes anyag, biológiai degradációja lehetséges, a betonelemek természetes lebontása nem gátolt, vagyis környezeti terhelése igen alacsony. Amikor egy ilyen nem homogén rendszer lebomlik, és az összetartó rostok eltávoznak a komplex rendszerből, akkor az ezen rostokat összekötő cement kötések széthullanak és a rostbetonelem szétesik. Ennek köszönhetően a papírbeton hulladékot, a hagyományos betonnal ellentétben nem kell törni, aprítani, darálni, porrá hullik magától a biológiai lebomlás során.

Környezeti szempontból az egyéb hasznosítással nem rendelkező hulladékok felhasználásával a hulladékgazdálkodás fellelgezhet. Minden hulladékgazdálkodással érdemben foglalkozó társaság célja, hogy az általa kezelt hulladékok minél magasabb arányban kerüljenek hasznosításra, ezáltal lehetőség szerint csökkentsék az égetésre és még inkább a lerakásra kerülő hulladékok arányát. Kutatásaink igazolták, hogy a papírgyári iszapból, mint gyártási hulladékból is készíthető olyan könnyűbeton, mely – a kívánt felhasználási területtel összhangban - minőségét, így teherbírási, illetve hő-és hangszigetelési tulajdonságait tekintve megfelelhet a támasztott kritériumoknak.

Másodlagos hatásként nem feledkezhetünk meg a gazdasági vonatkozásról sem, hiszen a papírbetonból épülő házak olcsóbbak, mint a betonból vagy téglából épülő ingatlanok. Emellett szigeteléstechikájuk is jelentős költségsökkentéssel járhat, mivel ez esetben nem szükséges a ma használatos igen drága, de kétségkívül hatékony polisztirol hab vagy kőzetgyapot szigetelések alkalmazása, tehát a papírbeton szigetelőréteg hőállóság szempontjából kedvezőbb, mint a polisztirol hab.

Az általunk felhasználni kívánt cellulóz alapú alapanyagok felhasználási alternatívái között ki kell emelnünk az égetést, azonban ez nem számít hasznosításnak. Természetesen a papíriszap égetése annak magas víztartalma miatt nem lehetséges, ellentétben a cellulóz porral. A papíriszap esetében egyéb megoldásként a lerakás jöhet szóba, melynek alapvetően nincsen előnye, illetve a biogáz üzem, de ez esetben alapanyagként nem számít előnyösnek.

A papír beton termékek gyártása elsősorban hő- és hangszigetelési tulajdonságaik kihasználásában rejlik, tehát azért készítünk a hulladékokból paneleket, falazó elemeket, mert olyan hőszigetelő tulajdonságokat érhetünk el, melyek az épületek energiateljesítményére jótékony hatással vannak. Nemzetközi szinten is jelentős az érdeklődés a falazóelemek alternatívái és a hőszigetelés hatékonyság-növelése, valamint a természetes alapanyagok hasznosítása, így a papír beton előállítására.

Kutatásunk célja volt, hogy hasznosítási alternatívát nyújtsunk olyan hulladék alapanyagoknak, melyek hasznosítása Magyarországon még nem megoldott. Az általunk javasolt papír beton gyártó technológia olyan eljárás, mely képes hasznosítani a cellulóz port és a papíriszapot.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni mindazoknak, akik munkámat segítették, támogattak.

A kísérleti lehetőségért, a helyszínek, anyagok és eszközök biztosításáért a Molnárbeton Kft.-nek

Munkám teljes folyamatának szakmai felügyeletéért, a bemutatott anyaghoz szükséges adatszolgáltatásért Dr.Csókai Viktornak, a Molnárbeton Kft. vezető kutatójának

Dr.Balázs György és Dr.Sólyom Sándor konzulenseimnek

Irodalomjegyzék

1. Singh, R. & Patel, M. (2022). Contribution of Waste Paper Sludge on the Mechanical and Durability Attributes of Concrete: A Review. In: Ashish, D.K. & de Brito, J. (eds) Environmental Concerns and Remediation, pp. 77–90.
2. Singh, R., Patel, M. & Sohal, K.S. (2022). The Potential Use of Waste Paper Sludge for Sustainable Production of Concrete - A Review. In: Laishram, B. & Tawalare, A. (eds) Recent Advancements in Civil Engineering, ACE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 172.
3. Hernádi, S. (2009). A papírszap hasznosításának lehetőségei. *Papíripar, 2009. április*, LIII. évf. 2.sz., pp. 42-48.
4. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium – Hulladékgazdálkodási és Technológiai Főosztály (2003). A hulladékgazdálkodás általános kérdései, alapelvei. Hulladékgazdálkodási Szakmai Füzetek 1.
5. <https://www.sciencephoto.com/>
6. <https://www.recycling-guide.org.uk/>
7. Isépy, A. & Hernádi, S. (1999). A papíripari szennyvíziszap újrahasznosítása - Irodalmi összefoglaló. p.40.
8. Göttching, L. & Hamm, U. (2004). Sludge management of the Paper Industry. Bled, p.8.
9. <https://www.hamburger-containerboard.com/hu>
10. Közép-Dunántúli Régió Területi Hulladékgazdálkodási Terve – II/A.fejezet: Ipari és egyéb gazdálkodói nem veszélyes hulladékok.
11. Kore, S.D., Rajput, B., Agarwal, A. & Pawar, A. (2023). Concrete made from waste paper sludge (WPS): a sustainable material. *Technological Sustainability*, 2(2): 188-205.
12. <https://papircso.hu/parketta-alatet-papir/>
13. <https://www.greenhomebuilding.com/papercrete.htm>
14. Franklin, K. (2005). Insulated Concrete Form Systems and Methodes for Making and Using the Same. US 2005/0275124 A1.
15. Hargrove, J. W. & Rabon, Z. K. (2009). Load Bearing Insulation and Method of Manufacture and Use. US 2009/0065978 A1.

16. Ward, D. (2006). Mobile Straw Beam Fabricator. US 2006/0022373 A1.
17. Patterson, E. W. (1994). Building Material Made from Waste Paper and Method for Producing the Same. 1994/005350451.
18. Cook, J. T., Schoggel, H. L., Bell, R. I., Smith, D. J. & Morton, G. H. (2005). Cementitious Material Reinforced with Chemically Treated Cellulose Fiber. US 2005/006942726 B2.
19. Andersen, P. J. & Hodson, S. K. (1994). Highly Insulative Cementitious Matrices and Methods for their Manufacture. 1994/005641584
20. <https://zoldujsag.hu/papirbeton-az-igazi-konnyubeton>
21. Ahmadi, B. & Al-Khaja, W. (2001). Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 2 (2): 105-113.
22. Halász, A. Feltöltések Liapor duzzasztott agyagkavics vagy az abból készült pórusbeton segítségével; www.liapor.hu
23. Katalógus: POROTHERM HS Termékcsalád, pdf (<https://www.wienerberger.hu/>)
24. Setareh, M. & R. Darvas (2017). Concrete Structures. 2 ed. Springer International Publishing.
25. Pankhardt, K. & Kovács, J. (2013). Építőanyagok. TERC Kft., Budapest.
26. <https://baumit.hu/termekek/betonok/baumit-szarazbeton>
27. Rác, K. (2012). Betontechnológiai gépek I. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Typotex Kiadó, Budapest.
28. Masjuki, S. A., Mohammed, B. S. & Al-Mattarneh, H. M. A. (2008). Hybrid Composite Wall System by Using Local Waste: Panel of cement Bonded Wood In Filled with Papercrete. *International Conference on Construction and Building Technology*, 22: 239-250.