

Miskolci Egyetem
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai
Intézet



Építési-bontási hulladék porfrakció cementpép
kötésidejének és reológiájának szabályozása
mechanikailag aktiválással

Készítette: Bárány Péter Tamás,
nyersanyagelőkészítési szakirányos hallgató
Konzulensek: Dr. Szabó Roland, tudományos munkatárs
Prof. Dr. Mucsi Gábor, egyetemi tanár

Miskolc, 2022

Eredetiségi nyilatkozat

Eredetiségi nyilatkozat

Alulírott Bárány Péter Tamás, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2022. 10. 24.

.....
a hallgató aláírása

A konzulens nyilatkozata

Konzulensi nyilatkozat

Alulírott Dr. Szabó Roland, a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnika Intézetének tudományos munkatársa a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Egyéb megjegyzések, ajánlás:

Miskolc, 2022. 10. 24.

.....
a konzulens aláírása

Tartalom

1. Bevezetés	5
2. Szakirodalmi áttekintés	6
2.1. Cement	6
2.1.1. A cement történelme	6
2.1.2. A cement előállítása	7
2.1.2.1. A cement összetétele	7
2.1.2.2. A cement előkészítése	8
2.2. Beton	9
2.2.1. A beton történelme	10
2.2.2. A beton előállítása	11
2.2.2.1. Köttöanyag	11
2.2.2.2. Adalékanyag	11
2.2.2.3. Hozzáadandó keverővíz	12
2.2.2.4. Adalékszerek	12
2.3. Építési-bontási hulladék	13
2.3.1. Körforgásos gondolkodásmód	13
2.3.2. Építési-bontási hulladékok fajtái	14
2.3.3. Építés-bontási hulladék újrahasznosítása	15
2.3.3.1. Újrahasznosítás külföldön	15
2.3.3.2. Újrahasznosítás Magyarországon	15
2.3.3.3. Építési-bontási hulladék újrahasznosításának módjai	17
2.3.3.3.1. Aggregátumok újrahasznosítása	17
2.3.3.3.2. Finomrész újrahasznosítása	18
2.3.3.3.3. Reológia vizsgálata	19
2.4. Tanszéki előzmények	20
3. Anyagok és mérési módszerek	21
3.1. Alapanyagok	21
3.2. Mérési módszerek, műszerek	22
3.2.1. Mintakisebbités	22
3.2.2. Mikro-Deval forgódobbal való koptatás és előőrlés	23
3.2.3. Mechanikai aktiválás	24
3.2.4. Lézeres szemcseméret elemzés	26
3.2.5. Függőleges tengelyű keverő berendezés	27

3.2.6. Vicat-féle kötési idő vizsgálat	28
3.2.7. Reológia vizsgálat	30
4. Mérési eredmények	32
4.1. Mikro-Deval forgódobbal való koptatás és előőrlés	32
4.1.1. Szemcseméret-eloszlás koptatás előtt és után	32
4.1.2. Előőrlésből szerzett 200 µm alatti szemcsék tömegaránya	33
4.2. Mechanikai aktiválás.....	33
4.3. Vicat-féle kötési idő vizsgálat	36
4.4. Reológia vizsgálat	37
5. Konklúzió	37
6. Javaslattevés.....	38
7. Összefoglalás	39
8. Summary	39
9. Köszönetnyilvánítás	40
10. Mellékletek	40
11. Hivatkozásjegyzék.....	43

1. Bevezetés

A technológia, az ipar életünk szerves részét teszi ki, hatásuk a mindennapjainkban mindenhol megtalálhatóak. Az emberiség állandó fejlődésben van, melynek folyamatát nem lehet megállítani, viszont összefüggésben van az iparral. Nem haladt volna előre az egészségügy, a közlekedés, a számítástechnika, a kommunikáció, ha az ipar el lett volna hanyagolva és nem hoztak volna be újításokat e téren. A mai világban előtérbe került a fenntarthatóság is, mint szempont, hiszen a túlzott fogyasztással járó életmód ok-okozati összefüggésben van a nyersanyagok, alapanyagok, az energia akár krízishelyzetbe torkolló elhasználásával; a hulladékok keletkezésével és felhalmozódásával; illetve élőhelyünk veszélyeztetésével. A beton sem különb ennél, bár ismerték már az ókorban, de így is fontos terméke a modern társadalom számára: épületeket, utakat, sínekhez vasbetonaljakat és sok más dolgot készítenek belőle. A beton egyik fő alkotóeleme a cement. Évente több, mint 4 milliárd tonna cementet készítenek, mely a világ CO₂ kibocsátásának 8%-át teszi ki! A Párizsi megegyezés alapján az éves kibocsátásnak legalább 16%-kal csökkennie kell 2030-ig, amit még jobban redukálni abban az esetben, ha a szén-dioxid-leválasztás és -tárolás (CCS: Carbon Capture and Storage) technológiák sikeresebbek lesznek [1]. A kibocsátók motiválására vagy készítésére bevezették a CO₂ kvótát, ami azt jelenti, hogy van egy meghatározott kibocsátási mennyiség, amit, ha átlépnek, fizetni kell érte, viszont, ha a mennyiség alá viszik a szén-dioxid kibocsátásukat, akkor profitot is szerezhettek ebből. A kvóta 2018 óta drasztikusan emelkedik és a tervek szerint ez a tendencia folytatódni fog. Érdekes lehet tehát a cement (klinker) gyártását csökkenteni, helyette építési-bontási hulladékból kinyerni a cementport. Azért is érdemes a beton alapanyagát, a cementet pótolni építési-bontási hulladékkal, mivel a megnevezett hulladékból hazánkban 2015. óta hozzávetőlegesen 7,15 millió tonna került lerakásra, amely értékes, felhasználható másodnyersanyagforrásként is funkcionálhat [2].

Kutatásom során építési-bontási hulladék beton 0-22 mm-es frakciójából koptatással és szitálással visszanyert finomfrakciót használtam, amelyet különböző őrlési idők mellett mechanikailag aktiváltam. Ezt követően vizsgáltam portlandcementhez 20%-os arányban hozzáadva a cementpép kötésejét és reológiáját.

A dolgozatom célja a cementanyag reológiai és kötésidőbeli szabályozása az alapanyag mechanikai aktiválása révén, mely lehetőséget biztosít olyan betongyártási technológiák alkalmazására is, mint az additív gyártás (3D nyomtatás).

2. Szakirodalmi áttekintés

Ebben a fejezetben szót ejtek a cementről, a betonról, illetve az építési-bontási hulladékokról, azok fajtáiról, felhasználási módjairól, országos viszonylatokban vett helyzetéről.

2.1. Cement

A cement egy hidraulikus kötőanyag, amely finomra őrlés után vízzel keverve bizonyos időn belül megszilárdul, majd egy vízben nem oldódó szilárd, kőszerű képződményt alkot, a betont [3].

A cementgyártás az 1950-es évek óta harmincszorosára, az 1990-es évekhez képest pedig négyszeresére nőtt [4]. A víz után a cement a legnépszerűbb alkotóanyag a világon [5].

2.1.1. A cement történelme

A történelem során fontos szerepet játszott, széleskörűen alkalmazták a cementáló anyagokat az ókorban. Az egyiptomiak kalcinált agyagot használtak cementnek, a görögök és a rómaiak mészkő melegítésével és homok hozzáadásával készítettek pépet, majd durvább kövekkel társították a betonhoz. A rómaiak rájöttek, hogy vízben rejlő kövekkel készíthetnek egyfajta cementet és a kikötőiket így építették. A cementjük úgy lett előkészítve, hogy vulkanikus tufát őröltek, adtak hozzá mészkövet, így lett a „puccolán” cement, amit a Vezúvhoz közeli Pozzuoli nevű faluról neveztek el [6]. Egy 2014-es kutatás azt bizonyította, hogy a rómaiak cementje a mai cementektől is erősebb, a vulkanikus tufa és a mészkő közötti reakció miatt. Amikor a beton megköt, olivin ásványok alakulnak ki a homok és a vulkanikus salak között [7]. Britanniában ritkább a vulkanikus tufa, így ott zúzott téglá vagy csempe felhasználása volt elterjedve. A rómaiak után visszafejlődött az építési fejlettség Európában, főleg a cement technológiával kapcsolatos. A habarcs főleg csak mészkő karbonizálásával készült, ami egy lassabb művelet. A puccolán újbóli felfedezése csak a késő középkorban valósult meg. A nagy középkori katedrálisok, mint Durham, Lincoln és Rochester Angliában és Chartres és Reims Franciaországban egyértelműen magas szintű kőművesek munkája volt. Ennek ellenére nem volt elérhető számukra az a technológia, amit a rómaiak használtak évezredekkel ezelőtt.

A reneszánsz és a felvilágosodás kora más felfogást és gondolkodásmódot hozott, ami az ipari forradalomhoz vezetett. Angliának a XVIII. században párhuzamosan érdeke volt az ipar és a

birodalom, például a gyarmatosított területeire és területeiről való szállítások során a hajózási veszteségek elkerülése végett világítótornyok építése. A szállítmányos hajók és csatahajók elvesztése élesztette a cementipart újra. Smeaton 1759-ben a harmadik Eddystone-világítótorony építésénél Cornwall partján, Dél-Kelet Angliánál fedezte fel, hogy mészkő, agyag és zúzott kohósalak együttese olyan pépet állított elő, amely megkötött a vízben. Joseph Aspdin szabadalmaztatta 1824-ben az úgynevezett „portlandcementet”, azaz finomra őrölt agyagot és mészkövet égetett a mészkő kalcinálásáig. Azért nevezte portlandcementnek, mivel a belőle készült beton hasonlított a portland-kőhöz, amit széles körben alkalmaztak Angliában. Aspdin cementje még nem volt tökéletes, a manapság alkalmazott technológiához hasonlót 1845-ben Isaac Johnson használt először, aki az agyagot és mészkövet sokkal nagyobb hőfokon égette (1400-1500°C-on) [6].

2.1.2. A cement előállítása

A cement előállítása a 2.1.1. pontban összefoglaltak alapján egy régóta alkalmazott folyamat. Ahhoz, hogy a beton CO₂ kibocsátását csökkentsük új módszerekkel, ahhoz ismernünk kell magának a cement készítésének folyamatait, hogy miért is keletkezik szén-dioxid az előállítás során.

2.1.2.1. A cement összetétele

A portlandcement lényegében égetett mész (CaO), kvarc (SiO₂) és alumínium-oxid (Al₂O₃) keverékéből áll. A mész kalcitos nyersanyagból van kinyerve, a kvarc és alumínium-oxid pedig agyagásványokból. Hozzáadható homok, vas-oxid (Fe₂O₃) és bauxit -amiben alumínium-hidroxid (Al(OH)₃) van- kis mennyiségben az elvárt összetétel érdekében.

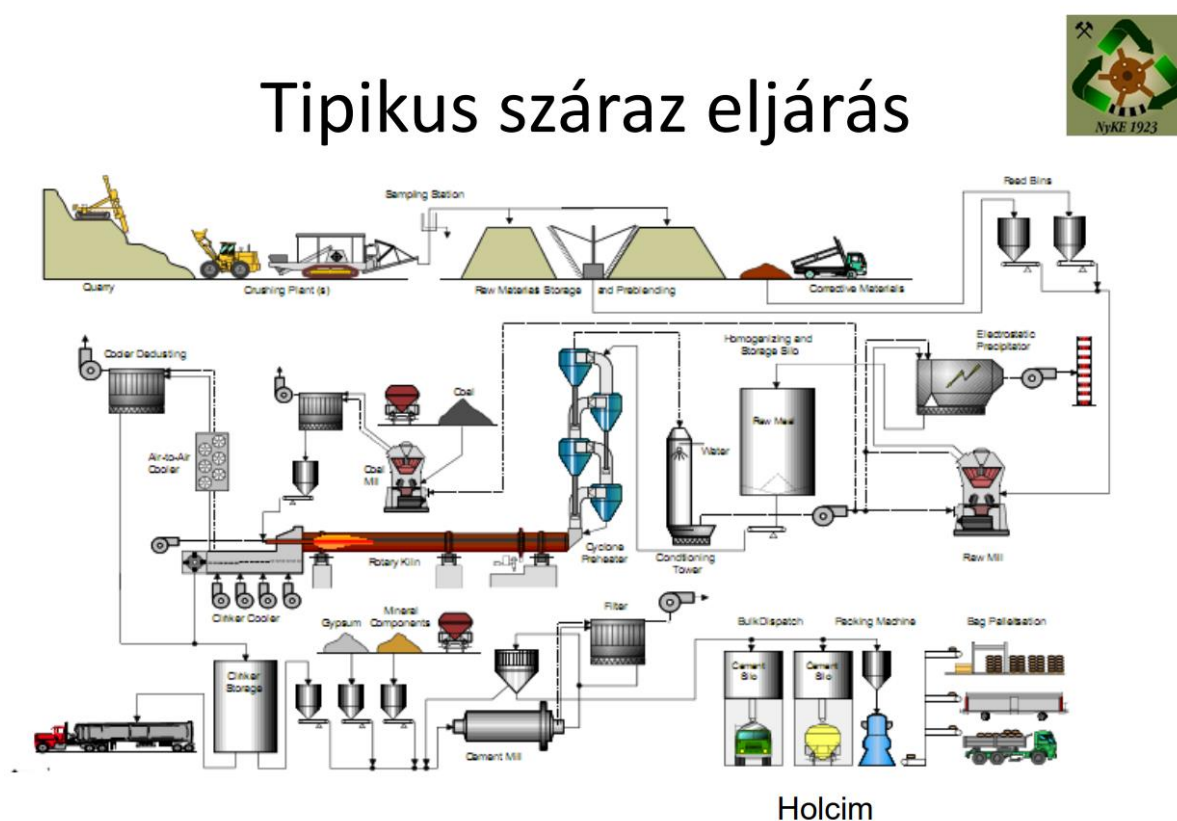
Általában a kalcitos nyersanyagok mészkövek vagy kréták szoktak lenni, de van, ahol korall és kagyló üledékeket is használnak, az agyagot pedig néha palával, agyagpalával helyettesítik. A márga rendelkezik mind agyaggal, mind mészkővel, és néha a cementhez megfelelő arányban. A kohósalak is népszerű helyettesítő anyag. A kaolint használják a portlandcement agyagos összetevőjeként. Ipari melléktermékek, mint például a pernye vagy kémiai úton előállt kalcium karbonát is használható nyersanyag lehet, de sokkal ritkábban használják a természetesen fellelhető anyagokhoz képest.

A magnézium-oxid (MgO) tartalomnak alacsonynak kell lenni, portlandcementben a 4-5% a felső határ. Szigorúan leválasztandó szennyezőanyagok a fluorit tartalmú anyagok, a foszfátok, a fém-oxidok és szulfidok is [8].

2.1.2.2. A cement előkészítése

A cementgyárak közelében gyakran szokott mészkő- és agyagbánya lenni, hogy az alapanyagokhoz gyorsabban és költséghatékonyan hozzá lehessen férni. Ezeket őrlik golyós, illetve görgős malomban [9].

Az anyagunkat össze kell keverni, homogenizálni, ehhez a száraz eljárásban silót használnak a tárolásra, és keveréssel, élénk centrifugális szél befújásával biztosítják a homogenizáláshoz.



Dr. Mucsi Gábor

Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

1. ábra: Tipikus száraz eljárás a cement készítésében [3]

A 2.1.2.1. pontban leírt ásványokból készül a nyersliszt, amely magas hőfokon kezelve (1450 °C) klinkerré alakul. Az 1. ábrán látható példához hasonlóan a klinkerkészítés során a magas

hőfokos kezelés során -akár 200 méter hosszú nedves eljárás esetén- forgókemencés hengeren keresztül vezetik az anyagot, ahol a távozó forró füstgázok már a forgókemence előtt lévő hőcserélőbe vezetve folyamatosan melegítik az anyagáramot, hogy a köztes terméket el lehessen távolítani a kemencébe érkezés előtt és kevesebb hőveszteséget is nyerünk vele. Az 1450 °C-os hőmérsékleten olvadék képződik, a technológiai folyamat végére olyan kémiai folyamatokon megy keresztül, ami hidraulikussá, szintetikussá alakítja az ásványokat. A por emisszió probléma tud lenni, szükséges lehet porciklon, szűrőzsák rendszerek vagy elektrosztatikus porleválasztók alkalmazása a kemence és a kémény között. A cementkészítés emissziójának több, mint 50%-a a klinkerkészítéshez fűzhető, ami a kémiai folyamatok során keletkezik. A klinkert ajánlatos alternatív anyagokkal keverni, hogy kevesebb klinkerre legyen szükség a cementgyártás során, ezzel csökkentve a környezet terhelését [8].

A klinkerkészítés után 4-5% kötőszabályozót (gipszkő, REA-gipsz), illetve egyéb adalékanyagokat (granulált kohósalak, pernye, trasz, tiszta mészkő) adunk a klinkerhez, majd újabb őrlést végzünk el. Fontos a folyamat közben állandóan ellenőrizni a cement minőségét korszerű laborteknikai berendezésekkel [9].

A cementeket silókban tároljuk különböző minőségek alapján. A római számok (például CEM II) a cement összetételét mutatja, a CEM I a tiszta portlandcement, a CEM II-ben már a portlandcement mellett vannak más anyagok, amik a cement megszilárdulása miatt fontos alkotóelemek. A CEM III kohósalakcement, a CEM IV puccoláncement, a CEM V pedig kompozitcement. A római szám után egy „A” vagy „B” betű mutatja a klinkeren kívül adagolt hasznosanyag mennyiségét (A: 5...20%; B: 20...35%), a következő betű a cement fajtáját mutatja. Szilárdsági osztály szerint lehet 52,5; 42,5; 32,5 MPa. A végén lévő szám a cement szilárdulási ütemét jelzi: R: rapid, tehát gyorsan szilárduló; illetve N: normál ütemben szilárduló cement [10].

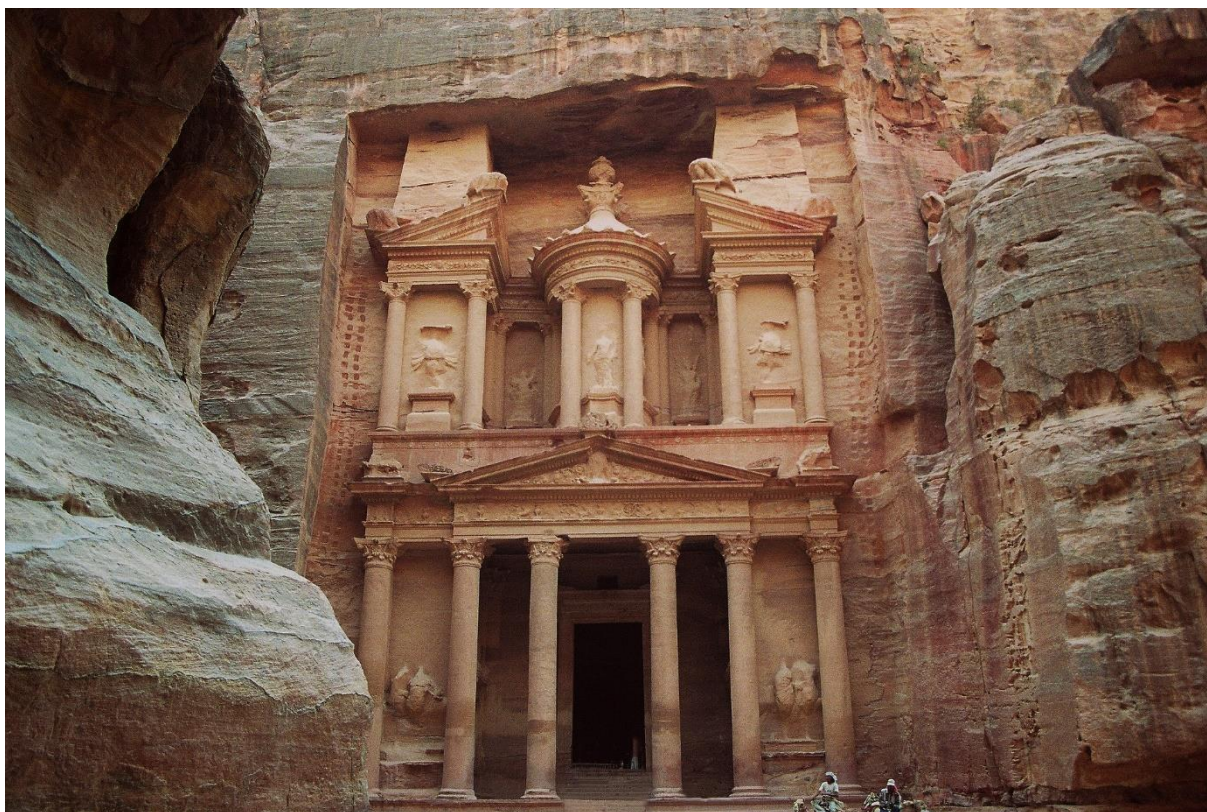
2.2. Beton

A beton fontos készítmény. A világháborúk után sok várost segített felújítani, visszaállítani épületeit, infrastruktúráját. A Sydney-i operaház, Delhi Lótusz temploma, Dubaj Burj Khalifája, mint ahogy Róma Pantheonja – ami büszkélkedhet a világ legnagyobb, szerkezeti támogatás nélküli kupolájával – mind ennek az anyagnak köszönheti létét, formáját [11].

A világháború utáni beton-divat hozta el a brutalista művészeti építészeti irányzatot, amelynek Le Corbusier munkái is, követve a futurisztikus Oscar Niemeyer és a finomabb Tadao Ando alkotásai [12].

2.2.1. A beton történelme

A beton cementből készül, megfelelő szemeloszlású kavics és homok, illetve víz hozzáadásával. Krisztus előtt 700 évvel Dél-Szíria és Észak-Jordánia területén a nabateusok (Petra, romváros) már kemencét is használtak, hogy pépet készítsenek kőházak felépítéséhez, beton lépcsőkhöz és földalatti szivárgásbiztos víztárolókhoz (2.ábra). A víztározók titkosak voltak és segítették a nabateusok elélhetését a sivatagban.



2. ábra: egy templom Petra romvárosában. Forrás: [14]

Pár betonépítmény az elmúlt 120 évből: 1904-ben készült el az első toronyház Ohio-ban, Cincinnati városban; 1911-ben készítették a Risorgimento hidat Rómában; az első zsák készbeton az Amerikai Egyesült Államokban, Baltimore városban lett kiszállítva. A Hoover-gát 1935-ben készült és több, mint 3 millió m³ betont használtak fel. Akkoriban volt egy szabványosítás bevezetve, ami nélkül 125 év kellett volna ekkora mennyiség elkészítéséhez.

A Burj Khalifa a világ legmagasabb épülete, ami szintén betonból készült. Befogadóképessége 35000 ember, 57 lifttel rendelkezik, amelyből van, ami 64 km/h sebességgel megy, hogy gyorsabban célba érjen a 160 emeleten belül [13].

2.2.2. A beton előállítása

A beton előállításához szükség van védőfelszereléshez (kesztyű, szemüveg); megfelelő mennyiségű kötőanyag, adalékanyag, víz (vízellátás), akár adalékszer is hozzáadható; a beton keverésére szolgáló eszköz és ehhez áramellátás.

Tilos fagypont alatti időben betonozni, mert az fagyást és a betonban való kárt okozhatja, a túl meleg a beton vízmennyiségét ronthatja, így hőségben sem ajánlatos, illetve esőben sem, mert akkor túl sok víz lesz a keverékben, elmossa az anyagot.

A beton általános összetétele 60-75% homok és kőzúzalék, 15-20% víz és 10-15% cement [15].

2.2.2.1. Kötőanyag

A beton kötőanyagai természetes és mesterséges anyagok, amelyek hidratálva kezdetben pépszerű, jól formálható masszát, majd szilárd mesterséges közzé alakul a lejátszódó kémiai és fizikai folyamatok után. Építési célra csak adalékanyaggal használható.

A beton kötőanyaga általában a cement. A cement jelentősen befolyásolja a beton tulajdonságait, így fontos a feladathoz célravezető cement fajtáját kiválasztani [16].

2.2.2.2. Adalékanyag

A beton adalékanyaga a folyókból, bányákból kitermelt természetes aprózódású homok és kavics, de lehet aprítással előállított zúzottkő vagy zúzott homok is.

A homok a 4 mm-nél kisebb szemcseméret tartományba eső, a kavics a 4 mm-nél nagyobb szemnagyságú adalékanyag [17].

Az MSZ 18293:1979 homok, homokos kavics és kavics termék szabvány alapján nyerste terméknek nevezik a kitermelés során nem módosított szemmegoszlású, természetes anyagot. Ha eltávolítják az előírt méreten felüli szemeket, és mossák, a nyerste termékéből természetes szemmegoszlású termék (homok vagy homokos kavics) áll elő. Ennek legkisebb szemnagysága zérus, szemmegoszlási görbéje pedig az előírt határgörbék közé esik.

A hazai homokok, kavicsok és kavicsos homokok javarészt nagyon ellenálló a Mohs-féle keménységi skálán 6,5...7,0 értékű kvarc szemek alkotják.

A betonok adalékanyagaként használt kőanyaghalmozok minőségét többféle minőségi tényezők határozzák meg, mint a közettani összetétel, a szemmegoszlás, a finomrész-tartalom, Los Angeles és ütési aprózódása, fagyállósága, stb [18].

2.2.2.3. Hozzáadandó keverővíz

Az MSZ EN 1008 „Keverővíz betonhoz. A betonkeverékhez szükséges víz mintavétele, vizsgálata és alkalmasságának meghatározása, beleértve a betongyártási folyamatból visszanyert vizet is” című szabvány alapján keverővíz lehet

- Ivóvíz, iható víz (bár a szabvány szerint korlátozás nélkül használhatunk ilyen vizet, de a magyar artézi vizek, gyógy- és ásványvize káros lehet a betonra).
- A betongyártási, betontechnológiai folyamatokból visszanyert egyéb víz (a szabványban lévő előírásoknak meg kell felelnie).
- Felszín alatti víz és/vagy ipari víz, MSZ EN 1008 szabvány szerinti bevizsgálás után.
- Tengervíz és vegyes, tenger mellék-torkolati víz, MSZ EN 1008 szabvány szerinti bevizsgálás után [19].

2.2.2.4. Adalékszerek

Magyarországon az alkalmazható adalékszereket az európai EN 934-2 betonadalékszer szabvány szerint kell figyelembe venni.

A szabvány érvényes a helyszínen, transzportbetonként és az előregyártó üzemben előállított, vasalatlan betonhoz, vasbetonhoz és feszített betonhoz alkalmazott adalékszerekre.

Fontos figyelembe venni az adalékszerek teljesítőképességét, tehát azt, hogy alkalmazási célnak megfelelően hatékony legyen, káros hatások nélkül; a megfelelő adagolást, amely adalékfajtánként változó mennyiség, a cement tömegszázalékában kifejezett adagolása, és az ajánlott adagolási tartományon belül van, amit a gyártó határoz meg a termékére; illetve hogy az adalékszereknek létezik főhatásuk és mellékhatásuk, egyes szereknek pedig több főhatása is van, ezeket többhatású adalékszereknek hívjuk.

A betonadalékszer nem haladja meg a beton cementtartalmának 5 m/m%-át [20].

2.3. Építési-bontási hulladék

Az ÉBH rendelet alapján építési-bontási hulladék az építmények építőipari kivitelezése során keletkező kitermelt talaj, betontörmelék, aszfalttörmelék, fahulladék, fémhulladék, műanyag hulladék, vegyes építési-bontási hulladék, valamint az ásványi eredetű építőanyag-hulladék. A Ht. fogalom meghatározása alapján az építésibontási hulladék az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény szerinti építési tevékenységből származó hulladék [21].

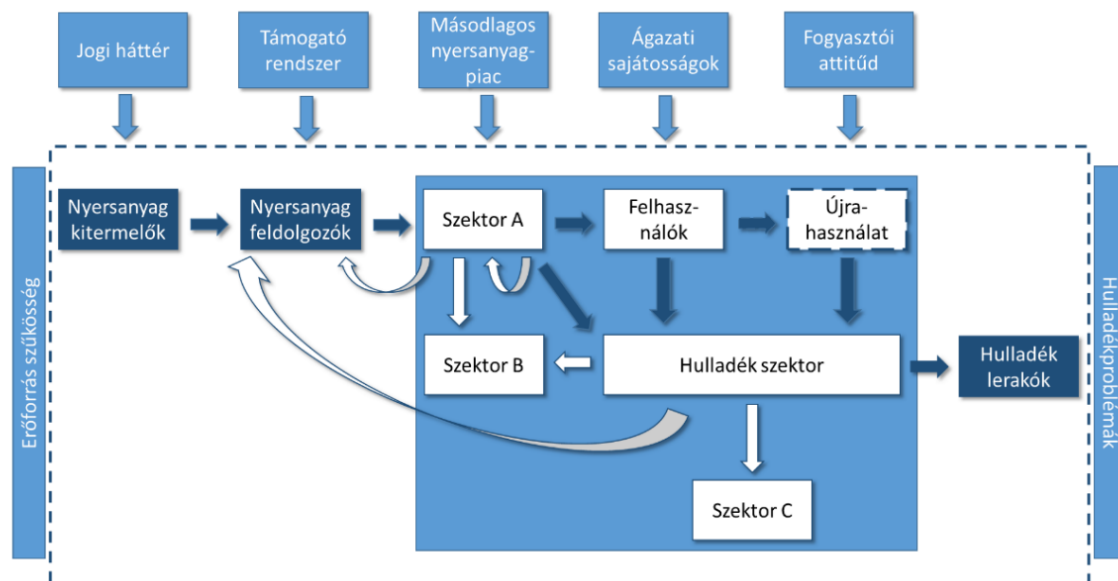
Csak az Európai Unióban évente 900 millió tonna építési-bontási hulladék keletkezik, ami a hulladékok 30%-át teszi ki [22].

2.3.1. Körforgásos gondolkodásmód

Az elmúlt időkben egyre inkább jellemző az a probléma, hogy az iparban egyre nagyobb az erőforrásszűkösség, míg a hulladék is egyre nagyobb mértéket ölt.

A fenntartható erőforrásgazdálkodás és a környezeti fenntarthatóság elveinek való megfelelés új megoldásokat, új szemléletet kíván mind a vállalatoktól, mind a fogyasztóktól. Ennek fényében született a körforgásos gazdaság koncepciója, ami egyszerre jelenthet megoldást az erőforrás szűkösség és a hulladék kezelés problémájára.

A körforgásos gazdaság célja, hogy kevesebb energiát és anyagot használjunk fel a termelések során, illetve, hogy minél több anyagot tudjunk visszaforgatni a termelésbe, a hulladékok minél nagyobb részét lehessen újrahasznosítani. A körforgásos gazdaság koncepciójához képest a gyakorlat egyértelműen nehezebb. Ahogy a 3. ábra mutatja, szükséges a jogi háttér, kellő támogatás, nagyon fontos, hogy a fogyasztók is a koncepció mentalitását megismerjék és támogassák, illetve a területi koncentrációkra is figyelni kell.



3. ábra: a körforgásos gazdálkodás. Forrás: [23]

Az ipari szimbiózis során az ipar vállalatai összefognak, hogy a lehető leghatékonyabban kezeljék hulladék- és nyersanyagproblémáikat. Összefogással csökkenhet a hulladék mennyisége, nem kell számolni plusz költségeket ártalmatlanításra, tárolók létesítéséhez, más vállalatoknál plusz nyersanyagforrást jelent az együttműködés, megtakarítás jelenhet meg a primer nyersanyag felhasználásnál, csökkenhet a CO₂ kibocsátás [23].

2.3.2. Építési-bontási hulladékok fajtái

- **Kitermelt föld:** természetes ásványi anyagokból álló maradékanyagok, a talaj humuszos rétegén kívüli talaj, követ nem tartalmaznak. Részarányban az építési-bontási hulladékok többségét teszi ki.
- **Építési törmelék:** Építés során és az építmények részleges vagy teljes elbontásukkor keletkezett szilárd anyagok. Főként ásványi eredetű, illetve magas- és mélyépítésben alkalmazott építőanyagok jelentik alkotórészüket. Összetételük változó, az építmények korától, rendeltetési módjától és az építés módjától függ.
- **Útbontási törmelék:** Maradékanyagok közlekedési felületen. Szilárd anyagból állnak, összetevői lehetnek hidraulikus kötőanyagú beton, bitumenkötésű anyagok, aszfaltok, burkoló és szegélykövek.
- **Kevert építési és bontási hulladékok:** Minden olyan hulladék, amely az építés, épület felújítás különböző tevékenységei során, anyagát tekintve keverten képződik. Főként

könnyebb anyagok (papír, karton, fólia és csomagolóanyagok, fa- és műanyag hulladékok, esetenként festékmарadványok, vagy azbeszt szigetelőanyagok is előfordulnak) ásványi eredetű vegyes törmelékkel együtt. Általában a vegyes települési hulladékkal együtt kezelik [21].

2.3.3. Építés-bontási hulladék újrahasznosítása

Az építési-bontási hulladék keletkezik a legnagyobb mennyiségben a kommunális hulladék után. Újrahasznosításukra a műszaki lehetőségek adottak. A fejlett európai országokban a 80-as évektől kezdtek intenzíven feldolgozni [24].

2.3.3.1. Újrahasznosítás külföldön

Európában Németország, Hollandia és Ausztria jár az élen az építési és útépitési bontási hulladékok újrahasznosításában [24].

Az átlagos újrahasznosítási ráta Európában építési-bontási hulladékból 50% felett van, sőt, néhány országban, mint Dánia, Észtország vagy Hollandia, a 90%-ot is eléri. Sajnos nincs ez így minden országban, Spanyolországban például a teljes építési-bontási hulladék 15%-a kerül újrahasznosításra [22].

Indiában a hivatalos becslés szerint 150 millió tonna építési-bontási hulladék keletkezik évente, viszont bizonyos kutatások 3-5-szörösére becsüli ezt az értéket. 2017-ben 53 városhoz lett hirdetve előkészítőmű, ahol újrahasznosítanák a hulladékot. Határidőn belül csak 13 városban valósult meg. Nincs egységesítés a városok között ahhoz, hogy számon tudják tartani és karakterizálhassák az építési-bontási hulladékokat, nem tudják, mit és hogyan kéne szegregálni. A hulladékmennyiség 33%-a elkerülhető lenne, ha a mérnökök az építkezés előzetes szakaszában számolnának hulladékkezeléssel is [25].

2.3.3.2. Újrahasznosítás Magyarországon

A Magyarországon keletkezett hulladékok közül a 2017-18 évi mennyiségi növekedést kizárólag az építési-bontási hulladékok okozták. Ez amiatt van, hogy hazánk építőipari termelése 2016-tól hatalmas növekedésnek indult, és 2017-től kezdve még 2019-ben is az előző évi növekedést mindig túlszárnyalva az építőipar lett a magyar gazdaság egyik húzóágazata (2017-ben 47%-os növekedés következett be a hulladékok mennyiségében) [21].

Magyarországon az ÉBH rendelet alapján 2010. január 1-jétől kezdve egy meghatározott küszöbérték feletti mennyiségben képződő építési-bontási hulladékot elkülönítetten kell gyűjteni a többi hulladéktól.

Magyarországon 2020-ig elérték az építési-bontási hulladék 70%-ának újrahasznosítására való előkészítését, újradolgozását, vagy egyéb hasznosítását (például feltöltési műveleteknél más anyagok helyettesítése).

Az Országos Hulladékgazdálkodási Terv alapján ezt a 70%-ot tartani akarják, illetve a feldolgozási arány növeléséhez a helyszíni hasznosítást elősegítő beruházások fokozott támogatása szükséges, mint ahogy a regionális hasznosító központok létrehozása is. A 2021-2027-es tervezési időszakhoz megfogalmazott cselekvési irányokban szerepel többek között a lakosságnál keletkező építési-bontási hulladék leadásának lehetőségét bővíteni, az effajta hulladék eltérítése a hulladéklerakóktól, illetve az ellenőrzés, felügyelet, minőség-ellenőrzés (laborvizsgálatok) fejlesztése [21].

Tárgyév	Anyagában hasznosított mennyiség (t)	Feltöltés (t)	Összes anyagában hasznosított mennyiség (t)	Keletkezett mennyiség (t)	Hasznosítási arány (%)
2010.	1 589 742	125 329	1 715 071	3 053 144	56,2
2011.	1 632 841	161 975	1 794 816	3 269 451	54,9
2012.	1 665 995	175 601	1 841 596	3 161 398	58,3
2013.	1 619 020	219 645	1 838 665	3 004 355	61,2
2014.	1 761 542	-	1 761 542	2 806 918	62,76
2015.	1 844 562	-	1 844 562	2 897 854	63,7
2016.	1 970 550	-	1 970 550	3 020 992	65,2
2017.	2 547 459	-	2 547 459	3 795 210	67,1
2018.	2 382 175	-	1 382 175	3 475 503	68,5

1. táblázat: Építési-bontási hulladékok hasznosítási aránya a HKI 11. cikkében rögzített célok vonatkoztatásában 2010-2018 között. Forrás: [21]

2.3.3.3. Építési-bontási hulladék újrahasznosításának módjai

Az építési-bontási hulladék elérte a 3 milliárd tonna/éves mennyiséget, ami súlyos mennyiség, többek között emiatt az ENSZ országai 2015-ben elfogadták a Fenntartható Fejlődési Keretrendszert, az Agenda 2030-at, vagy „2030 Agenda for Sustainable Development of the United Nations General Assembly”. Ennek egy része a „Fenntartható Városok” modell, azaz 2030-ig lecsökkentik a negatív környezeti hatásokat, nagy figyelmet fordítva a keletkezett hulladékok feldolgozására is.

Az építési-bontási hulladékok két részre bonthatóak: újrahasznosítható és nem újrahasznosítható. Utóbbiba a veszélyes hulladéknak minősíthető építési-bontási hulladék tartozik, amit nem szabad újrahasznosítani, hanem ártalmatlanítani kell [26].

2.3.3.3.1. Aggregátumok újrahasznosítása

Martínez és munkatársai [22] tanulmányukban 3 fajta aggregátumot hasznosítottak újra habarcs készítéséhez. Az „RA-1” jelölésű aggregátum kerámia készítéséből származó újrahasznosított anyag, az „RA-2” kevert újrahasznosítási technológia és az „RA-3” pedig beton újrahasznosításából lett visszanyerve.

Az aggregátumok előszításon is átesetek, végül beállították a frakciót 0,063 mm és 4 mm közé. Az UNE-EN-13139:2002 „Aggregates for mortar” szabvány alapján dolgoztak, ami meghatározta az alsó és felső határát a maximumát a finomrésznek a habarcsához. Szabványos szítási módszert alkalmaztak és röntgendiffrakció analízist (XRD) is használtak. Két fajta kötőanyag hozzáadásával végezték a tesztelést: CEM II/B-L 32.5 N és CEM IV/B (V) 32.5. A természetes homok 50, 75 és 100%-ban helyettesítették és a cement-aggregátum arány 1:3 és 1:4 volt. Az UNE-EN 1015-2:1998 szabvány alapján a víz mennyiségét kísérlettel határozták meg, hogy elérjék a 175 ± 10 mm konzisztenciát, amennyi szükséges volt a szabvány számára a habarcsához. Az RA több vizet abszorbeált, ezért kellett több vizet adni az RA-t nagyobb arányban helyettesített anyagoknál. A kötési erő vizsgálat egy 400 x 500 x 50 mm kerámia tartóban lett végezve, egy mintatest 50 mm-es átmérő értékkel és 10 mm bevonati vastagsággal készült az UNE-EN 1015-12:2000 szabvány alapján. Nyomó- és hajlító szilárdság is vizsgálva lett. Az RA anyagok sűrűsége alacsonyabb volt a természetes homokhoz képest, míg az RA anyagok vízfelvétele nagyobb lett. Nagyobb cement és víz szüksége van az újrahasznosított anyagú habarcsnak. Az RA-1-nek 7,48% a vízfelvételi aránya; az RA-2-nek 6,88%; az RA-3-nak pedig 6,12%; míg a nem újrahasznosított anyagnak 0,92%. Nincs konkrét szabvány az ilyen

fajta habarcsok korlátozására, viszont az EHE-08:2008 szabvány szerint a maximum vízfelvétel a szerkezeti betonhoz 7% lehet. Több kutatások szerint a 10%-os vízfelvétel még elfogadható lehet az RA használatával az építőiparban.

A röntgendiffrakciós vizsgálatok alapján a kvarc és a kalcit a fő ásványianyag bennük. Nagy szilikát tartalmat mutattak, főként kalcium és alumínium szilikátokat. Probléma az SO_3 tartalom (3.12%) a kerámia RA-nál, ami 1,248% kénnek felel meg. Az UNE.EN 13139:2002 „Aggregates for mortar” szabvány szerint csak 1% lehet ez az érték. A nagyobb érték a mechanikai erő veszteségét és gyengébb tartósságot eredményezhet. A nyomó- és kötési szilárdság vizsgálatok alapján használhatóak újrahasznosított aggregátumok az építőiparban. A fagyást kevésbé bírják az újrahasznosított aggregátumok, mint a természetes homokkal készített beton. A legjobb szilárdságvizsgálati értékeket a CEM IV/B (V) 32.5N cementtel használt anyagok, illetve a beton RA mutatott, ami a 3 újrahasznosított anyag közül a legjobb eredményeket mutatta a mérések során [22].

2.3.3.3.2. Finomrész újrahasznosítása

Pešta és munkatársai [27] tanulmányukban a környezettudatosság jegyében az újrahasznosított cementpor alkalmazását, mint a cement helyettesítését vizsgálták.

A negatív környezeti hatás eltörpül az aggregátumoknál a cementhez képest, amely a beton energiaszükségletének 90%-át követeli, és a már említett CO_2 kibocsátás is gondot okoz.

Az újrahasznosított betonpor (recycled concrete powder, RCP) a beton építési-bontási hulladék kezelése, szitálása után nyerhető ki. A vizsgálat során 0, 10, 20, 30, 40 és 50%-ban helyettesítették RCP-vel a hagyományos portlandcementet.

A Blaine-féle fajlagos felület kisebb volt az RCP-nél a portlandcementhez képest, illetve az átlagos szemcseméret is nagyobb az újrahasznosított cementpornál. Sajnos az izzítási veszteség jóval nagyobb értéket mutatott az RCP-nél. Tehát teljesen nem lehet helyettesíteni a portlandcementet RCP-vel.

Környezeti hatásukat a keverékeknek az LCA (Életciklus) elemzéssel vizsgálták. Az ISO 14040 alapján 4 pontban kell haladni a vizsgálatban: a cél és irány meghatározása; a készlet vizsgálata; a hatásainak értékelése; összehasonlítás.

Az RCP-vel adagolt cementek jobb értékeket mutattak a klímaváltozás, savasság, fotokémikus szmog és nyersanyagszükséglet terén, azonban a megmunkálhatóság, sűrűség és szilárdsága egyenesen arányosan romlott, minél nagyobb arányban helyettesítve lett a cement az RCP-ben

található organikus szennyezőanyagok miatt. Bár limitálva van a használhatósága az újrahasznosított cementpornak, mégis nagyon fontos a környezetünk megóvása érdekében.

Tang és munkatársai [28] azt vizsgálták, hogy a megfelelő előkészítés milyen változást fog okozni az RCP-nek és RBP-nek (recycled brick powder, újrahasznosított téglapor). Statisztikai adatok alapján a legjobb aktivitás és nyomószilárdság eléréséhez 30 µm alatti átlagos szemcseméret kell és maximum 30%-kal lehet helyettesíteni újrahasznosított porral a cementet. Az újrahasznosított cementpor az őrölés hatására jobb eredményeket mutat a kötési időben, illetve, ha az RCP finomabbra van őrölve a cementhez képest, akkor csökken a víz és klorid behatolása a betonba, ha pedig kevésbé van őrölve, akkor rosszabb eredményt mutat az általános cementhez képest. Az RCP-t hőkezelték, alkáli aktiválást végeztek rajta, CO₂ kezelést és dupla keverést, amik javították az RCP-t. Mégis az őrlés mutatta a legnagyobb hatásosságot az RCP kezelésében. Az RCP kezelése kevesebb energiát, CO₂ kibocsátást eredményez a hagyományos cementhez képest [27] [28].

2.3.3.3.3. Reológia vizsgálata

A reológia vizsgálatának lehet célja az anyag 3D nyomtatáshoz való optimalizálása.

A 3D nyomtatás használatát a betoniparral ötvözve 30-60%-kal csökkenhet az építési hulladék, 50-80%-kal csökkenhet a munkaerő költség, illetve 50-70%-kal gyorsabban készülhetnek el a munkálatok.

A reológiát fontos vizsgálni a 3D nyomtatás során, mivel a nagyobb viszkozitás és a kisebb nyírófeszültség a betonban jobb megmunkálhatóságot és formálhatóságot eredményez. A kisebb kötési idő és a nagyobb korai szilárdság is fontos tényezők.

Hogy ne kelljen vasszerkezetet használni a 3D nyomtatáshoz, Zhang és munkatársai [30] szálerősítést alkalmaztak. 1% karbonszál megerősíti a cementpép hajlítószilárdságát 18,5 MPa-lal, de a nyomószilárdságon nem változtat.

Soltan és munkatársai [31] a friss és szilárdulás utáni tulajdonságait vizsgálták a szálerősített cement kompozitoknak. Azt vették észre, hogy a hidroxipropil-metil-cellulóz javítja a cement kezdeti folyékonyságát, de nem hat negatívan a kötési időre.

A reológiai vizsgálatok során először Tattersall fejezte ki [32], hogy a friss cementpép nem-newtonian viselkedik [29] [30] [31].

2.4. Tanszéki előzmények

2015-ben Bense Bence Dávid, nyersanyagelőkészítési szakirányos hallgató szakdolgozata Geopolimer szilárdságának szabályozásáról szólt, melyben többek között a geopolimer pasztat kötési idejét és szilárdságát vizsgálta [33]. Király Boglárka Enikő, környezetmérnök szakos hallgató 2021-ben már építési-bontási hulladékkal foglalkozott, szakdolgozatában [34] az előkészítés hatását a szén-dioxid megkötésére vizsgálta szakdolgozatában. Egy malom és egy törő finomfrakcióját vizsgálta. A megkötési kísérleteknek az építési-bontási hulladék szerkezetére és összetételére gyakorolt hatásait XRD, FT-IR és LOI vizsgálatokkal figyelték, végül azt állapították meg, hogy a reakció idő növelésével növekedett a megköthető CO₂ mennyisége is és hogy döntő szerepe van az előkészítésnek a lejátszódó folyamatokban.

2022-ben Szűcs Máté szakdolgozatában [35] építési és bontási hulladék finomfrakciójának újrahasznosítási lehetőségeit vizsgálta (amiről ez a szakdolgozat is szól). A mérésekkel azt szerette volna bemutatni, hogy a mechanikailag aktivált cementpor helyettesíthető a portlandcementtel. A mérési eljárásainak első fele hasonló, mint amiket én végeztem a 3. fejezetben. A mechanikailag aktivált cementport 28 napos nyomószilárdsági vizsgálat alá helyezte. A kutatása során kiderült, hogy a 20%-os arányban építési-bontási hulladék aktivált finomszemcséivel kevert cement adta a legjobb szilárdságvizsgálat eredményeket, illetve a keverőmalomban a 10 perces őrlés már nem hoz annyira jó eredményt, mivel agglomerálnak a szemcsék annyi idő után. A próbatesteinek mindegyike elérte a minimális követelményt, amit a felhasznált rapid cement szabványa ír elő.

Mucsi és munkatársai tanulmányukban [36] építési-bontási hulladék finomrész frakcióját vizsgálták, a reaktivitásukat növelve mechanikai aktiválással egy keverőmalomban. A reaktivitás mértékét mérőszerekkel vizsgálták, a szemcseméret-eloszlást, a fajlagos felület meghatározása mellett, SEM, FTIR spektroszkópia, röntgendiffrakció is a mérések része volt. A mechanikai aktiválás hatásai mészfelvétel vizsgálattal és szilárdság teszttel is mérték. A mérések eredményei azt mutatták, hogy az építési-bontási hulladék finomrész frakciójának reaktivitása kezelhető a keverőmalomban végzett mechanikai aktiválással.

3. Anyagok és mérési módszerek

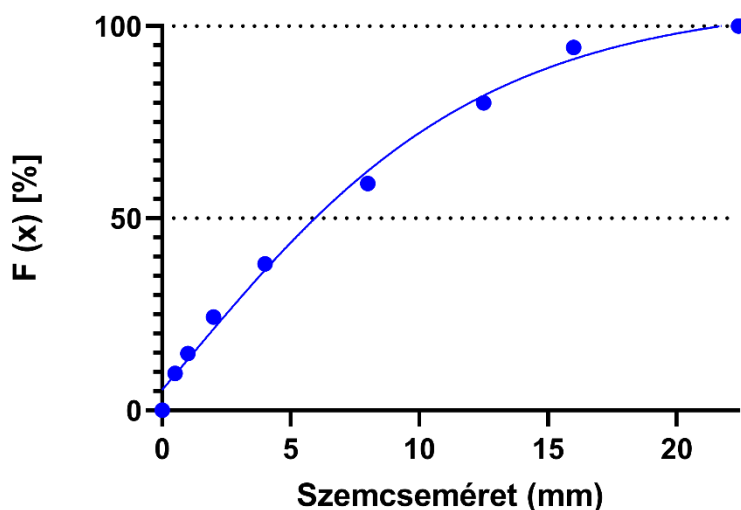
Ebben a fejezetben ismertetem a mintaanyag tulajdonságait és előkészítésének módját. A mintaanyagból a cementpor kinyerése céljából választottam meg az előkészítési módszereket. A cementport 4 részre osztottam és különböző időtartamig őröltem, végül 20%-ban portlandcementhez kevertem, amivel reológiai és kötésidő vizsgálatokat végeztem.

3.1. Alapanyagok

A TDK dolgozatban felhasznált építési-bontási hulladék a Mento Kft. Bodrogkeresztúrbán található telephelyéről származott, 0-22 mm frakciójú tört beton formájában.

A mintaanyag szemcseméret-eloszlásához az alábbi lyukbőségű szitákat használtam: 22,4 mm; 16 mm; 12,5 mm; 8 mm; 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,5 mm.

A kiindulási anyag szemcseméret-eloszlását a 4. ábrán szemléltetem.



4. ábra: A mintaanyag kiindulási szemcseméret-eloszlása [a szerző saját szerkesztése]

A 4. ábrán látható, hogy az eloszlása egészen egyenletes, az anyag 22,4 mm alatt van.

A medián szemcsemérete: 5,9 mm.

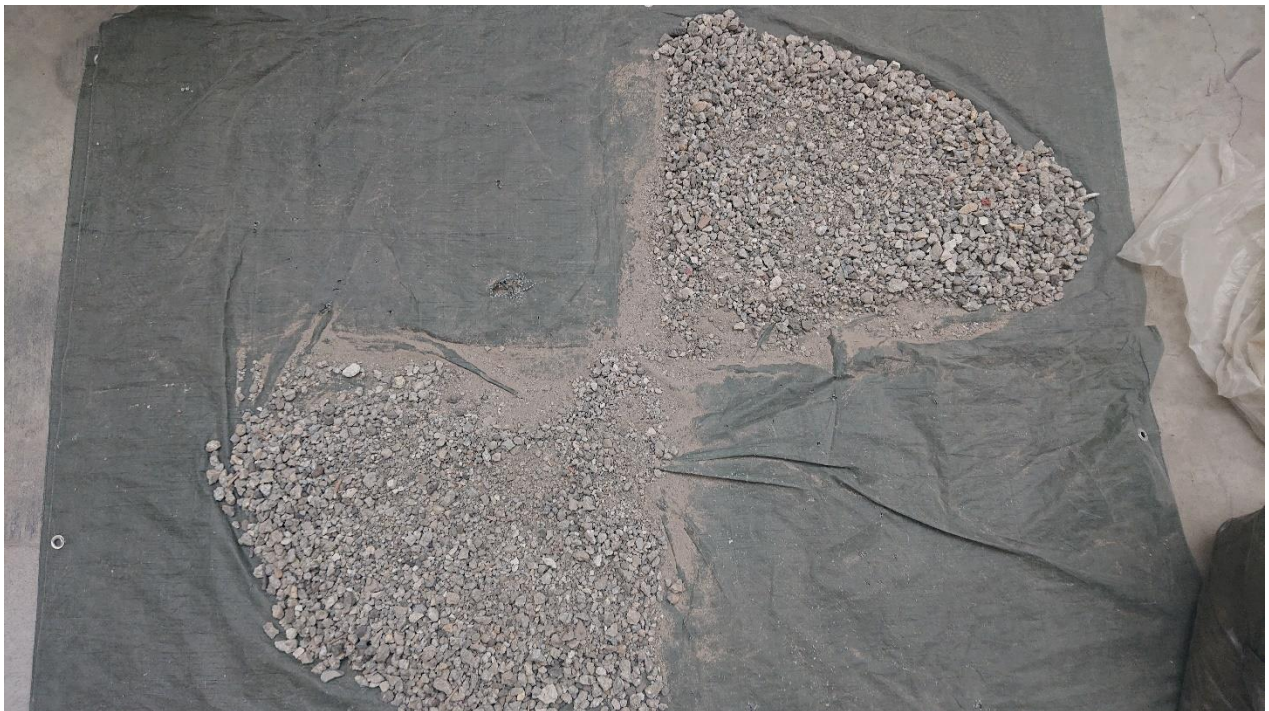
A reológia és kötésidő mérésekhez CEM II/A-S 42,5 R típusú szürke rapid kohósalak-portlandcementet használtam. Nagy kezdőszilárdsága van, kötési idejének kezdete 210 perc. Az MSZ EN 197-1 szabványnak megfelel [37].

3.2. Mérési módszerek, műszerek

Ebben az alfejezetben bemutatom a mintaanyag előkészítéséhez alkalmazott műszereket, illetve a mérésekhez használt módszereket.

3.2.1. Mintakisebbités

Több, mint fél mázsa mintaanyag a rendelkezésemre állt, amivel pontos és precíz laboratóriumi méréseket nehezebb és időigényesebb végezni. A részmintát el kell különíteni az átlagmintából. Az „átlós negyedelés” módszerét használtam, amely nagyobb tömegű anyagoknál elvégezhető munkagépek segítségével. Szerencsére az esetben kisebb tömegekről van szó, így kézzel, lapátok, edények, seprűk segítségével végeztem a mintakisebbitést.



5. ábra: Mintakisebbités [szerző saját fényképe]

A kisebbités első lépése az anyag körszimmetrikus, azaz lehetőleg egyenes körkúp formába való átrakása. Arra kell vigyázni, hogy az átrakáskor mindig egy pontba – a kúp csúcspontjába – kell az anyagot juttatni, így a szegregáció körszimmetrikus lesz. Ezt követi a kúp – szintén

körszimmetrikus – szétterítése, majd az átlók kijelölése. Az átlók kijelölésének a legjobb eszköze a függőleges síkú lemezből készített egyenlő szárú, 90°-os kereszt, de használható pl. két keresztben elhelyezett lapát nyele is. A kijelölt négy negyedből két átellenes helyzetűt eltávolítunk, ahogy az 5. ábrán látható. Fontos, hogy még a finom szemcséket is felseperjük, a maradék, azaz a kiindulási anyag kb. fele az egy lépésben kisebbített minta. A lépések ismételhetők, így átlós negyedeléssel minden egyes lépésben megfelelhetjük a feldolgozandó mintát [38].

A mintakisebbítés célja az volt, hogy várhatóan 7 kg körülire redukáljam a mintám tömegét, de így is közel reprezentatív mintát kapjak.

3.2.2. Mikro-Deval forgódobbal való koptatás és előőrlés

A 6. ábrán látható mikro-Deval forgódobot a méréseim során koptatáshoz és előőrléshez is használtam.

A koptatásra azért volt szükség, mivel a mintaanyag építési-bontási hulladékból készített tört-beton halmaz, a törés pedig nem távolítja el a cementport 100%-osan az inert szemcsékről. Első körben így a szemcsékről lekoptattam autogén módon a cementport. Ügyelni kell arra, hogy az inert szemcse már ne aprózódjon, de a cementport a lehető leghatékonyabban lekoptassa. A koptatást 4 frakción végeztem 1 óráig, I. fokozatban, 80 fordulat/perc sebességgel. A frakcióim 2 kg alatt voltak, nem volt szükség egy frakciót több alkalommal feladni a dobba. A koptatások után újra átszítáltam az anyagaimat és megnéztem a szemeloszlást.



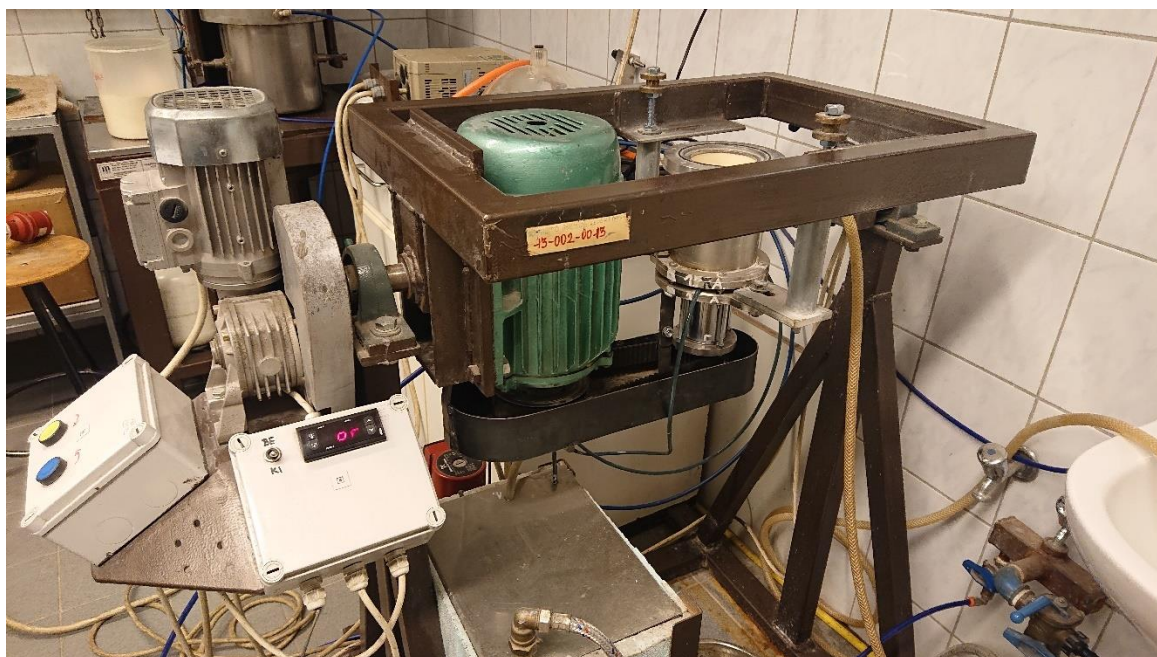
6. ábra: mikro-Deval forgódob használatban [szerző saját fényképe]

Később, az őrlési folyamatok előtt közvetlenül, előőrlést alkalmaztam, mivel a 0,5 mm alatti szemcsék között még lehet cement által megkötött inert adalékanyag, amit fel kell tártani, majd 200 µm-es szitán szétválasztani. Ezt már nem saját magával, autogén módon őrltem, hanem 5 kg össztömegű, 10 mm átmérőjű acél őrlőtestet használtam. A malomtérbe 500 g-ot töltöttem a mérések során. Itt már csak 20 percig őrltem. A 200 µm-es szítálásra ezután is szükség volt, mivel tényleg maradtak inert szemcsék a 0,5 mm alatti frakcióban.

3.2.3. Mechanikai aktiválás

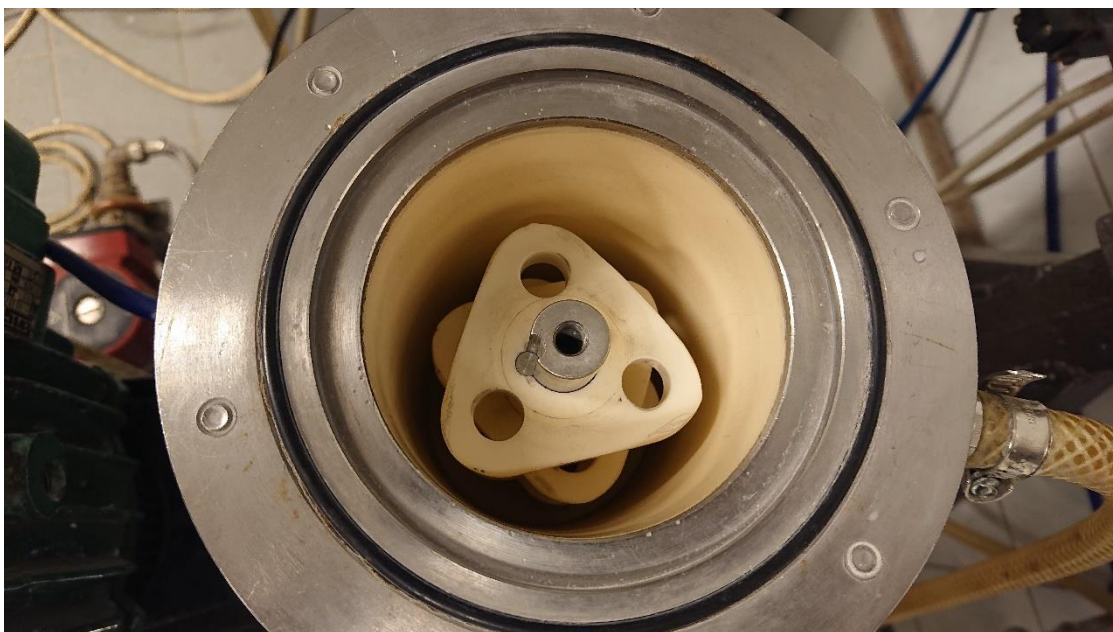
A cementpor mechanikai aktiválásához keverőmalmot érdemes használni [36]. Az ultrafinom és nanoőrlés területén egyre szélesebb körben használják az ún. keverőmalmokat, amelynek egy változata egy USA-ban élő magyar származású kutató nevéhez kötődik az 1930-as évekből. Ezt az eredeti típust feltalálója után „Szegeváry-atritornak” nevezték el. Azóta számtalan féle keverőmalmot fejlesztettek ki világszerte. A következőkben a legfőbb típusokat ismertetjük. Az őrlőtér és keverő geometriája alapján három keverőmalom típust különböztetünk meg:

- tárcsás keverőmalom,
- pálcás keverőmalom,
- gyűrűs rés keverőmalom



7. ábra: Laboratóriumi keverőmalom az NyKE Intézetben [szerző saját fényképe]

A tárcsás változat a legegyszerűbb keverőmalom-kialakítás. Itt főként súrlódással történik a keverő és az őrlőtestek közötti energiaátadás. A tárcsákat lehet lyukakkal, nyílásokkal ellátni és/vagy excentrikusan felhelyezni a rotorra. (8. ábra) Ilyenkor a helyváltoztató erők is hozzájárulnak az energiaátadásba a keverő és az őrlőtestek között. [38]



8. ábra: a tárcsák nyílásai segítik az aktiválást [szerző saját fényképe]

A méréshez a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet által kifejlesztett tárcsás, szakaszos üzemű, golyós keverőmalomát használtam (7. ábra).

A 0,2 mm alatti mintám, miután a mikro-Deval dobon való előőrlésen átesetek, 1; 3; 5 percen keresztül száraz őrléseket végeztem a megnevezett malmon. Ügyeltem a rotor megfelelő kerületi sebességének beállítására.

Az őrléshez esszenciális a feladási mennyiség ismerete a cementpor és az őrlőgolyók számára is, hogy optimálisan dolgozzon. A mennyiség kiszámításához ezek a számítási adatok voltak megadva:

- malom hasznos térfogata: $V_m = 530 \text{ cm}^3$
- anyag töltési fok: $\varphi_a = 0,7$
- őrlőtest töltési foka: $\varphi_g = 0,7$
- őrlőtest anyagsűrűség: $\rho_{gt} = 4,1 \text{ g/cm}^3$
- őrlőtest halmazsűrűség: $\rho_{gh} = 2,42 \text{ g/cm}^3$

Az őrlőtestek ZS típusú, 1...1,2 mm átmérőjű cirkónium-szilikát őrlőgolyók voltak.

Az adatokkal rendelkezve az alábbi képlettel kiszámoltam a felhasználandó őrlőtestek tömegét:

$$m_g = V_m \times \varphi_g \times \rho$$

A szükséges cementpor mennyiségéhez ezt a két összefüggést kell alkalmazni:

$$\varepsilon_g = 1 - \left(\frac{\rho_{gh}}{\rho_{gt}} \right)$$

$$m_{sz} = V_m \times \varepsilon_g \times \varphi_a \times \varphi_g \times \rho_{hsz}$$

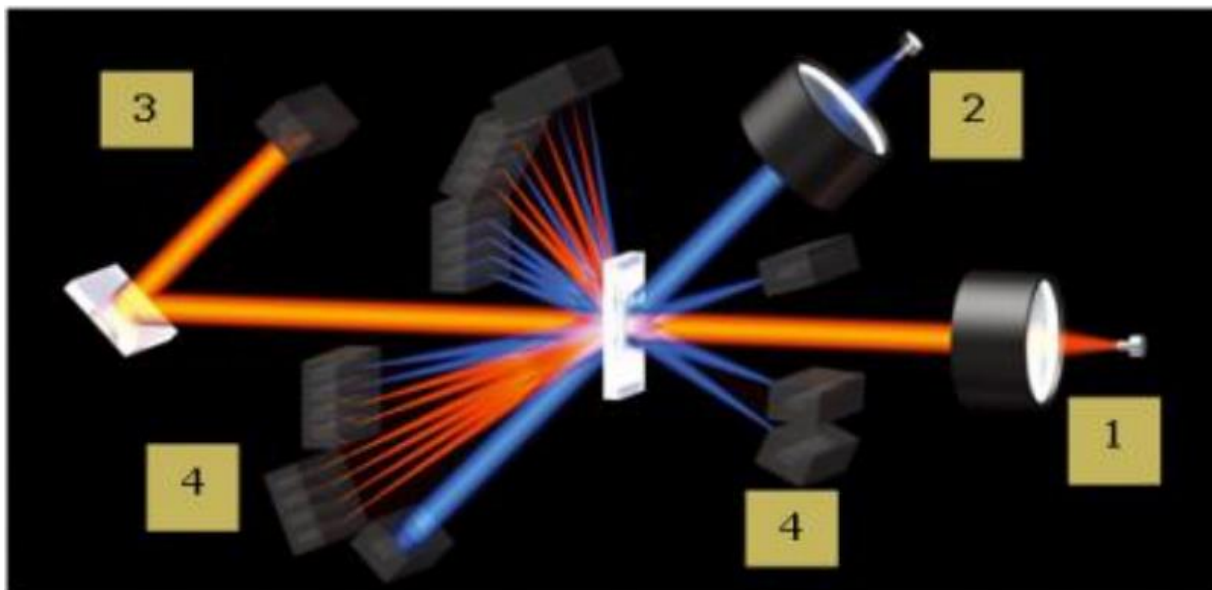
Ahol ρ_{hsz} az anyag halmazsűrűsége, ε_g pedig az őrlőtest porozitása.

5 m/s kerületi sebességet adtunk a keverőmalomnak, ehhez a frekvenciaváltót 24,03 Hz-re kell beállítani. Ügyelni kell minden őrlés után az őrlőmalomban maradt anyagok megfelelő eltávolítására, a malom tisztán tartására. A malmot vízszintes pozícióba állítva indítjuk el, és a vízűtést is mindig használatban kell tartani!

Az őrlőtestet a mintaanyagtól 500 μm -es szitán választottam szét.

3.2.4. Lézeres szemcseméret elemzés

A lézeres szemcsenagyság-elemző egy lézersugár-elhajlásokon alapuló spektrométer. Alkalmazási területe széles körű, többek között a gyógyszeriparban, vegyiparban, élelmiszeriparban, ásványelőkészítés területén használják a szemcsék és emulziókat alkotó cseppek méreteloszlásának meghatározására.



9. ábra: A lézeres szemcsenagyság-elemző működési elve. Forrás: [38]

A mérés elve a következő: a szemcsét érő fénysugár elhajlási szöge a szemcse méretével fordítottan arányos, intenzitása pedig a szemcsék gyakoriságával hozható összefüggésbe. A mérés során az érzékelők fogják fel a lézersugarakat, majd kiértékelés céljából a jelet továbbítják a számítógépbe. A Horiba LA-950 lézer diffrakciós készülék a 9. ábrán látható módon két fényforrásból (1 és 2), egy mintakezelő rendszerből és számos fotodiódából (3 és 4) áll a tört fénysugár minél szélesebb szögben történő érzékeléséhez. A detektorokon összegyűjtött tört fénysugarat használjuk a szemcseméret-eloszlás számításához a Mie- vagy a Fraunhofer-elméletet alkalmazva.

A szoftver segítségével képesek vagyunk a mért anyag fajlagos felületének, darab-, ill. felületi eloszlásának a meghatározására is.

A gyakorlatban nedves és/vagy száraz üzemű berendezéseket használnak. A szuszpenzió formában történő mérés elősegíti a szemcsék diszpergálhatóságát, és így elkerülhetjük a szemcsék tapadását. Vízben oldódó anyagok vizsgálata esetén desztillált víz helyett használhatunk denaturált szeszt vagy nagy tisztaságú alkoholt is. Alternatív megoldás lehet még egy száraz üzemű berendezés. A berendezés mérési tartománya széles: 10 nm-től 3 mm-ig terjed.

A jobb diszpergálás érdekében a minták mágneses keverőn szuszpenzióban diszpergálásra kerültek. A mérések során minden minta esetén 1 ml Napirofoszfát diszpergáló szert adagoltunk a szuszpenzióhoz. Minden minta esetén 3 mérést végeztünk. Az őrlményeknek nedves (alkohol) közegben határoztuk meg a szemcseméret-eloszlását [38].

3.2.5. Függőleges tengelyű keverő berendezés

Az őrlés után az őrleményeket Szűcs Máté szakdolgozatának eredményei alapján 20% arányban kevertem a megnevezett portlandcementtel, mivel ebben az esetben érhető el legjobb szilárdság [35].

A cementpéphez 25% víz, 75% cementpor kell, azaz a víz-cement tényező: $v/c = 0,33$.

Az 500 g cementporból 100 g a 0 percen (Deval-dobban előőrölt), illetve az 5 percen őrölt RCP anyag volt, amit hozzákevertem 400 g portlandcementhez.



10. ábra: Függőleges tengelyű keverő berendezés használatban

A Vicat-féle kötési idő vizsgálat előtt a cementport cementpéppé kell keverni. A maximális homogenitás eléréséhez (és a kötési idő vizsgálat is kimondja, hogy) keverőgépet szükséges használni. A Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet Szilikát tartalmú ipari hulladék laboratóriumában található a függőleges tengelyű keverő berendezés (habarcsmixer) (10. ábra). A megfelelő mértékű komponenseket beletöltjük az edénybe, amit felrögzítünk a biztonsági tartóba, majd a start gomb megnyomásával keverjük. A cement esetében 1 perc elegendő volt a megfelelő bekeveréshez.

3.2.6. Vicat-féle kötési idő vizsgálat

A Vicat-féle kötési idő vizsgálatot az MSZ EN 196-3:1990 alapján írt, a Betonopus szakmai havilap által megjelentetett „Kötőanyagpépek kötési idejének vizsgálata” című tanulmány alapján készítettem a 0 és az 5 perces őrlemények felhasználásával, hogy megvizsgáljam az újrahasznosított cementpor aktivizáltságának összefüggését a kötési idővel.

A Vicat-készüléket a hozzá tartozó tüvel a vizsgálat előtt be kell állítani; ehhez a tűt le kell engedni az alájuk helyezett üveglapig, és a mutatót a skála nullpontjára kell állítani (11. ábra). A tű egy mozgó részre van felszerelve, amely súrlódásmentesen tud mozogni függőleges irányban.

Szükséges eszközök:

- A Vicat műszer
- műanyag gyűrű, amibe a cementpép kerül
- legalább 2,5 mm vastag és a gyűrű átmérőjénél nagyobb méretű üveglap
- keverőgép, az EN 196-1:1987 szabvány 4.4. fejezete szerint
- mérleg, 1 g mérési pontossággal
- a vizsgálati minta, amely mérésenként 500 g tömegű cement
- a szabványos folyósságú cementpépet eredményező víz keveréke (esetemben 165 g). A próbatestek előállítására desztillált vagy ionmentesített, illetve ezekkel azonos hatású vizet kell használni.



11. ábra: a skála a nullpontra állítva [szerző saját fényképe]

A habarcsmixerrel előállított cementpépet beledolgoztam a műanyag gyűrűbe, ügyeltem előtte, hogy be legyen kenve olajjal a műanyag felület, hogy ne maradjon a megkeményedett cementpép a gyűrűben. Az anyag, ha már a gyűrűben van, akkor az üveglapot finoman az asztalhoz kell ütügetni, hogy az esetleges légbuborékokat eltávolítsuk a mintaanyagból.

A kötés kezdetének meghatározása: A tűt addig kell óvatosan leereszteni, míg a cementpép felületével érintkezésbe kerül. A tűnek ebben a helyzetben kell 1-2 másodpercig maradnia a besüllyedésnél fellépő gyorsulásának vagy a mozgó alkatrészek jelentősebb gyorsulásának elkerülésére. Ezután a mozgó részeket hirtelen el kell engedni úgy, hogy a tű függőlegesen a cementpépbe süllyedhessen.

A besüllyedési mélységet (a tű alsó vége és az üveglap közötti távolság) akkor kell a skálán leolvasni, amikor a tű már nem süllyed tovább a cementpépben, legkésőbb azonban 30 másodperc elteltével.

Fontos, hogy a tű minden mérés után meg legyen törölve!

A behatolás mérését ugyanazon a cementpépmintán, megfelelően megválasztott időközökben, a kötés kezdetének meghatározása során például 5 vagy 10 percenként, legalább 10 mm távolságban a gyűrő szélétől és a korábbi beszúrási helyektől, kell megismételni.

A cementkötés (kötési idő) kezdete az az 5 perc pontossággal megadott időtartam, amely a cement keverőbe töltésének befejezésétől (nulla idő) addig az időpontig telik el, amikor a tű és az üveglap közötti távolság 4 ± 1 mm és az egymást követő mérési eredmények már nem térnek el egymástól jelentős mértékben.

A cementkötés (kötési idő) vége az a 15 perc pontossággal megadott időtartam, amely a cement keverőbe töltésének befejezésétől (nulla-idő) addig az időpontig telik el, amikor a gyűrű alakú feltétell ellátott tű már csak legfeljebb 0,5 mm-re süllyed be a megszilárdult cementpépbe. (A tű és az üveglap közötti távolság legalább 39,5 mm.).

Az MSZ EN 197-1:2000 szerint a 42,5 szilárdsági osztály esetén a kötési idő kezdete nem kezdődhet 60 percnél korábban [39].

3.2.7. Reológia vizsgálat

A folyási viselkedés mérésének a célja, hogy a folyadék meghatározott és egymáshoz képest elmozduló rétegei között az elmozdulás sebességét és az ébredő nyírófeszültséget megmérjük. A rotációs reométerek mérési elve szerint a mérendő folyadékot két koaxiális hengerfelület (Couette-áramlás) között helyezik el. Az egyik hengert állandó szögsebességgel megforgatva, a falak és a folyadék közötti súrlódás, ill. a folyadékon belüli súrlódás következtében az álló hengerre jól mérhető forgatónyomaték hat. A forgatott henger szögsebessége a nyírás sebességével, az álló hengerre ható forgatónyomaték pedig a folyadékban ébredt nyírófeszültséggel arányos. A rotációs reométerrel történő méréskor lamináris áramlást kell a két henger között létrehozni.

Az Anton-Paar Physica MCR 51 (12. ábra) reométer henger-henger és lap-kúp geometriájú mérőrendszerrel is felszerelhető. A henger-henger mérőrendszer esetén a forgó hengert (bob) egy gyorscsatlakozó segítségével lehet a forgató motor tengelyéhez rögzíteni. Ez a motor számítógéppel vezérelhető, így a fordulatszám az idő függvényében beállítható, miközben a behajtó nyomaték mérése is megtörténik. Kis viszkozitású folyadékok esetén nagyon kicsi a szükséges forgató nyomaték, nagyon érzékeny nyomatékmérőre van szükség. Az álló henger egy kivehető edény, amelybe a mérendő folyadékot kell tölteni az edény belsejében körbefutó jelig. Az álló henger körül termosztáló rendszer található, így a mérendő közeg hőmérséklete beállítható [38].



12. ábra: az Anton-Paar Physica MCR 51 használatban [a szerző saját fényképe]

A 12. ábrán látható Anton-Paar Physica MCR 51 mérőgéphez a műanyag kúp tartályba helyezett, 0,33-mas értékű v/c tényezővel készített cementpép nem volt alkalmas, mivel nem sikerült lefuttatni a mérést. Ezért egy minimális higítással, 0,38-as v/c tényezőt számoltam, így 80 g cementkeverékhez (amiben 16 g volt az építési-bontási hulladékból származó cementpor) 30,4 g mennyiségű desztillált vizet használtam. A méréseket kétszer végeztem el. A mérések eredményeit átlagoltam, és a 2. mellékletben összefoglaltam.

4. Mérési eredmények

Ebben a fejezetben összefoglalom a méréseim során szerzett eredményeket.

4.1. Mikro-Deval forgódobbal való koptatás és előőrlés

A koptatótöltet nélkül, autogén módon őrlött mintaanyag 1 órán keresztül lett koptatva, 80 fordulat/perc sebességgel, I.-es fokozatban. A koptatás után átszitáltam a mintaanyagomat, aminek a szemcseméret-eloszlása a 13. ábrán látható.

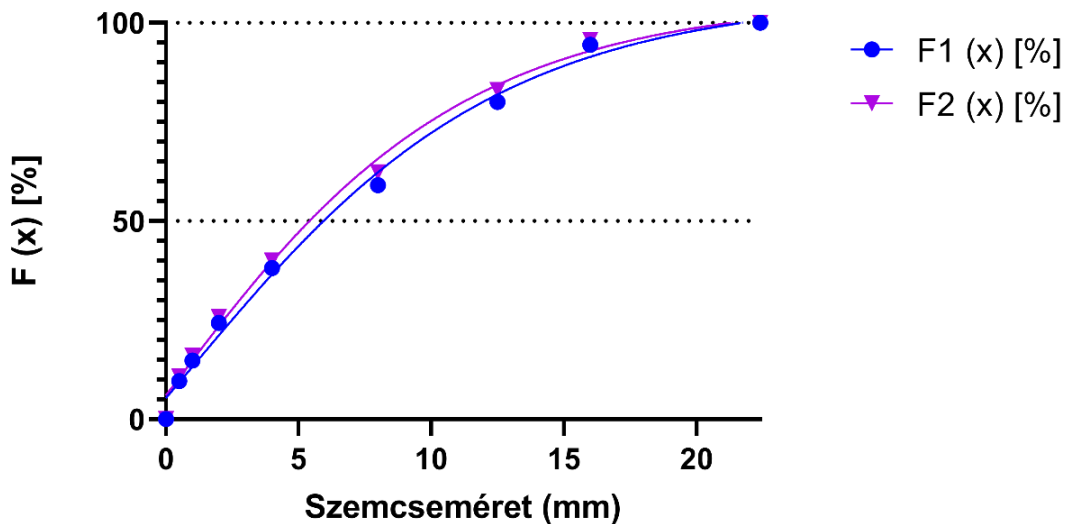
A koptatáshoz használt 4 frakciót és a koptatás előtti frakciótömeget, illetve a koptatásból nyert finomfrakció (száraz, majd nedves szitáláson leválasztott) tömegét a 2. táblázat foglalja össze.

x [mm]	anyag tömege koptatás előtt [g]	lekoptatott (<0,5 mm) anyag mennyisége [g]	
		Száraz szitálás után	Nedves szitálás után
16...22,4	388,64	0,42	8,28
12,5...16	1021,65	0,1	30,09
8...12,5	1481,45	15,25	11,65
4...8	1475,27	2,13	11,11

2. táblázat: A koptatáson átesett anyagok [a szerző saját szerkesztése]

4.1.1. Szemcseméret-eloszlás koptatás előtt és után

A 4. ábrán már ábrázoltam a koptatás előtti, kiindulási szemcseméretet. A koptatás utáni szemcseméret-eloszlás ($F2(x)$) a 13. ábrán látható összevetve a kiindulási szemeloszlással ($F1(x)$):



13. ábra: a szemcseméret-eloszlás koptatás után összevetve a koptatás előtti szemeloszlással.

$F1(x) [\%]$: koptatás előtti; $F2(x) [\%]$: koptatás utáni szemeloszlás [szerző saját szerkesztése]

4.1.2. Előőrlésből szerzett 200 µm alatti szemcsék tömegaránya

Az előőrlésben részt vett 0,5 mm alatti szemcsék tömege: 1516,46 g

Ebből 200 µm alatti: 1317,10 g

Az őrlött anyag 86,85%-a lett 200 µm alatt, 13,15%-a pedig inert szemcse volt.

4.2. Mechanikai aktiválás

Ahhoz, hogy tudjam, mennyi cementport érdemes a malomba helyezni, a 3.2.5. pontban leírt képleteket használtam:

$$m_g = V_m \times \varphi_g \times \rho = 897,82 \text{ g}$$

$$\varepsilon_g = 1 - \left(\frac{\rho_{gh}}{\rho_{gt}} \right) = 1 - \left(\frac{2,42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{4,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \right) = 0,4097 \approx 0,41$$

$$m_{sz} = V_m \times \varepsilon_g \times \varphi_a \times \varphi_g \times \rho_{hsz} = 93,17$$

A ρ_{hsz} a halmazsűrűsége az anyagnak, ami 0,875 g/cm³-rel egyenlő.

A keverőmalomba az újrahasznosítandó cementporból 93,17 g fér.

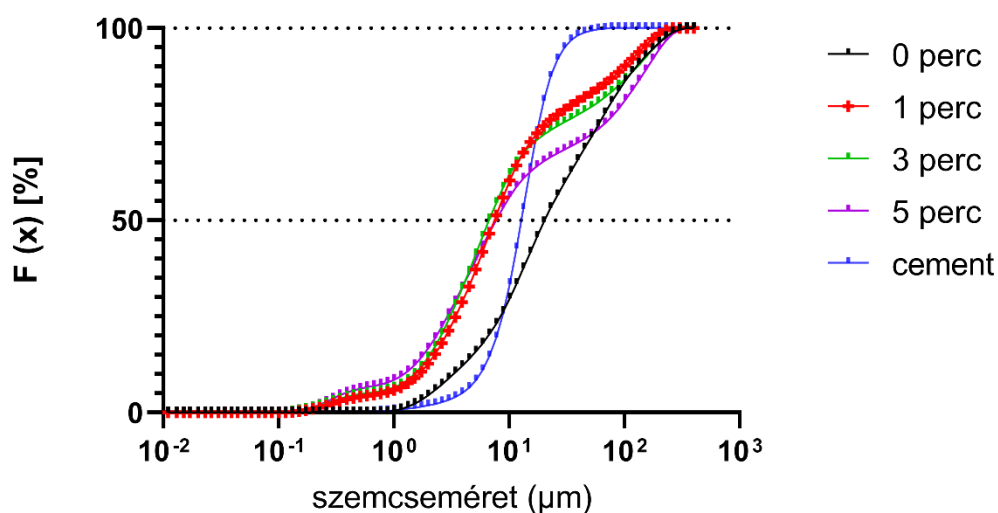
Az őrléshez szükséges energiaértéket egy Carlo Gavazzi WM1-DIN típusú digitális energiaméter segítségével olvastam le minden őrlés után.

A 3. táblázatban látható a szükséges energia minden méréshez:

Idő [perc]	Energia [Wh]
1	3
1	3
1	2
3	12
3	10
3	8
5	16
5	16
5	15

3. táblázat: A mérések ideje és energiafelvétele [szerző saját szerkesztése]

A keverőmalmi őrlés során kapott őrlemények szemcseméret eloszlását a 14. ábrán ábrázoltam, amihez lézeres szemcsenagyság elemzővel kaptam meg az adatokat. Az eloszlások között a portlandcement eloszlása is megtalálható.



14. ábra: Szemcseméret-eloszlások [szerző saját szerkesztése]

A 14. ábrán látható, hogy a cementhez képest az építési-bontási hulladékok nagyobb szemcseméretekkkel is rendelkeznek. Az őrlési idő nem változtatja meg a szemeloszlást számottevően. A 3 és az 5 perces őrlemények legnagyobb szemcseméreteinél látható, hogy az őrléstől aggregálódtak egy bizonyos szinten.

	$x_{50} [\mu\text{m}]$	Fajlagos felület [cm^2/cm^3]
Cement	12,74 μm	6570,9
0 perces őrlemény	20,22 μm	6706,8
1 perces őrlemény	7,42 μm	21580
3 perces őrlemény	6,67 μm	24673
5 perces őrlemény	7,65 μm	27026

4. táblázat: az anyagok átlagos szemcseméretei és fajlagos felületük [szerző saját szerkesztése]

A 4. táblázat alapján az őrlés a szemnagyságot tényleg befolyásolja, az őrlési idő növelésével a fajlagos felülete jelentősen növekedett.

Az őrleményeknek a szemcsesűrűségét is megvizsgáltam, ami az 5. táblázatban olvasható értékeivel. A portlandcement, az előőrölt, illetve az 1, 3 és 5 percig őrlött mintaanyagoknak a szemcsesűrűségét piknométerrel határoztam meg. A 4 anyagon 2-2 mérést végeztem, a folyadék (alkohol) (m_3 és m_4) sűrűsége: 0,79 g/cm^3 .

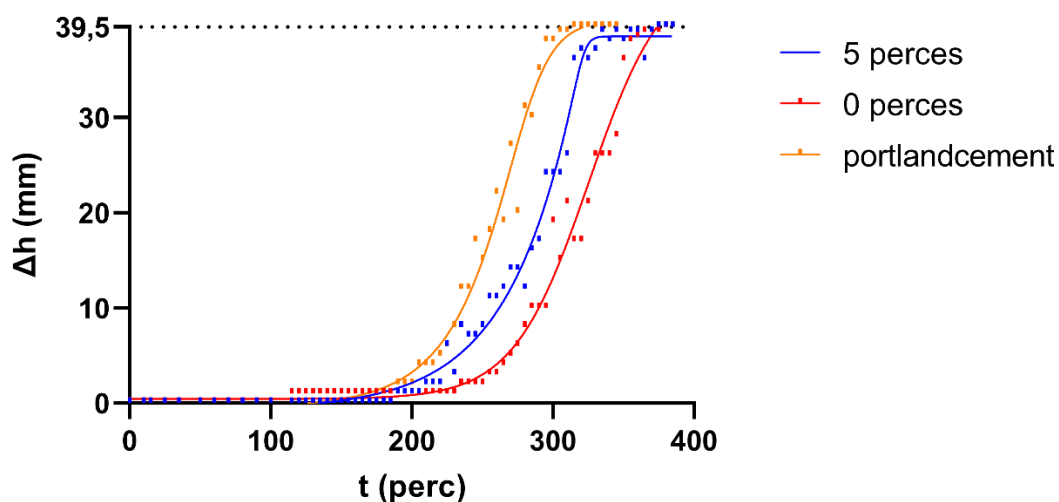
Piknométeres sűrűség vizsgálat										
	0 perces		1 perces		3 perces		5 perces		Cement	
	1. mérés	2. mérés	1. mérés	2. mérés	1. mérés	2. mérés	1. mérés	2. mérés	1. mérés	2. mérés
m_1	29,49	31,18	30,95	30,50	30,24	24,39	29,54	24,24	33,10	29,44
m_2	36,20	37,68	40,73	39,98	34,75	27,97	32,92	26,30	43,52	44,27
m_3	55,44	76,30	78,11	77,33	55,37	46,85	54,13	45,33	80,28	80,75
m_4	50,88	71,94	71,23	71,04	52,31	44,43	51,84	43,91	72,68	70,01
ρ (g/cm^3)	2,47	2,40	2,66	2,35	2,46	2,44	2,45	2,54	2,92	2,86
$\Sigma\rho$ (g/cm^3)	2,435		2,505		2,450		2,495		2,890	

5. táblázat: Piknométeres sűrűségmérés [szerző saját szerkesztése]

4.3. Vicat-féle kötési idő vizsgálat

A kötési idő vizsgálatát a 0 perces őrölt, illetve az 5 perces őrölt építési-bontási hulladék cementpor 20%-os keverékeken végeztem. Az 1. melléklet tartalmazza a két mérés eredményét, illetve a kötési idő görbéje látható a 15. ábrán.

A vizsgálatok során a 3-5 mm közötti értékig beszélünk cementkötés (kötési idő) kezdetéről, a cementkötés vége pedig akkor következik be, amikor a tű már csak fél mm-t hatolt a mintatestbe, azaz a tű legalább 39,5 mm távolságban van az üveglaptól.

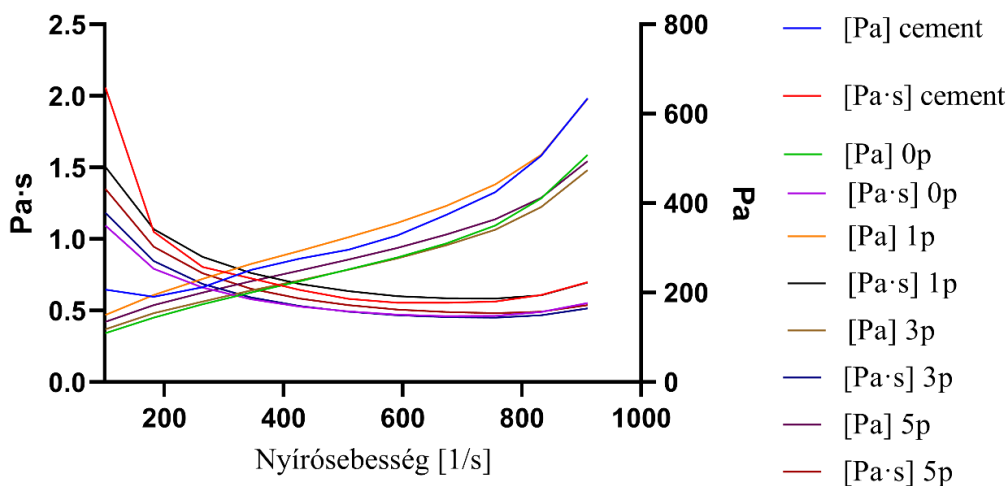


15. ábra: A kötési idő összehasonlítása a két anyag között [a szerző saját szerkesztése, 1. melléklet alapján]

A 15. ábrán és az 1. mellékletben is észre lehet venni, hogy bár az 5 perces mintánál később lett az érték 0 mm felett, mégis hamar behozta a lemaradását a 0 perces őrölt mintához képest. A kötési idő végét a 39,5 mm-es értéknek vesszük a szabvány alapján, tehát a mechanikailag aktivált anyag 5 perccel korábban megköt, mint a nem aktivált építési-bontási hulladék cementpor, de gyakorlatilag sokkal jobb eredményt értünk el az aktivált cementpornál, hiszen a 335. percnél az 5 perces mintaanyag már 39 mm-es értéknél járt, ezt a nem aktivált, azaz a 0 perces mintaanyag csak fél órával később éri el. A portlandcementnek rövidebb kötési ideje volt az újrahasznosított cementporral kevert cementpépektől. Habár az 5 perces mintaanyag egy órával később kötött meg a portlandcementhez képest, a portlandcement kötésének befejezésekor, azaz amikor elérte a 39,5 mm-es értéket a mérésben, csak 3,5 mm különbség volt az 5 perces mintaanyaggal szemben.

4.4. Reológia vizsgálat

Az Anton-Paar Physica MCR 51 mérés eredményei az 2. mellékletben olvashatóak, a 16. ábrán pedig ezek az értékek láthatóak illusztrálva.



16. ábra: A nyírófeszültség és a viszkozitás változása a nyírósebesség függvényében [szerző saját szerkesztése, 2. melléklet alapján]

A cementhez képest az építési-bontási hulladék anyagoknak alacsonyabb a kezdeti viszkozitási értéke. Az 1 percig őrölt anyagnak hasonlítanak a leginkább az értékei a portlandcementhez, ezekhez képest a 0, a 3 és az 5 percig őrölt saját cementpor kisebb nyírófeszültséget eredményezett. A nyírófeszültség és a viszkozitás két fontos reológiai paraméter, azaz az anyag folyósságának mértékét szabja meg. Minél nagyobb a nyírófeszültség és minél nagyobb a viszkozitás értéke, annál kevésbé lesz folyós az anyag.

Érdekesség, hogy a nyírósebesség nullértékénél is jelen volt a nyírófeszültség.

5. Konklúzió

- A vizsgálataim azt bizonyítják, hogy érdemes az építési-bontási hulladékot előkészíteni és mechanikailag aktiválni, nem csak azért, mert a hulladék újrahasznosításával nagy mennyiségben járulhatunk hozzá a környezetre káros, ember okozta hatások

csökkentéséhez, de új technológiák számára is ajtót nyithatunk, amelyek megkönnyíthetik az életünket és felgyorsíthatják az építőipari folyamatokat.

- A mechanikai aktiválással kezelt őrlmények szélesebb szemcseméret-eloszlás eredményeket mutatnak a portlandcementhez képest.
- Bár munkámnak nem része, mégis érdemes megemlíteni, hogy a reológia (legfőképpen a viszkozitás, a nyírófeszültség) és kötési idő meghatározása a 3D nyomtatással való kutatásnak fontos része, hiszen olyan anyagot akarunk előállítani, ami egyszerre tud elég folyós maradni, hogy a nyomtató képes legyen használni, mégis tudjon minél hamarabb megkötni, nem elfolyni.
- A kötési idő vizsgálat azt mutatja, hogy az építési-bontási hulladék finomrésze, ha mechanikailag aktiválva van, gyorsabban meg tud kötni, mint aktiválás nélkül. Ez a nagyobb fajlagos felület miatt is lehet, amit az őrlési idővel egyenesen arányosan tudtunk emelni. Az aktivált mintadarab már jóval korábban közelebb volt a megkötéshez, amit kisebb finomításokkal vélhetően még optimálisabbá lehet tenni, akár a portlandcementtel megegyező vagy jobb kötési idővel.
- A reológiai vizsgálatok megmutatták, hogy az építési-bontási hulladék használata csökkentette a cementpép viszkozitását, ezáltal a pép kevésbé volt viszkózus. Itt a 0 és 3 perces őrlemény keverékek érték el a legalacsonyabb értékeket, amiből feltételezhetjük, hogy a mechanikai aktiválás és a szemcseméret mellett más tényezők is közrejátszhatnak ezekhez az eredményekhez.

6. Javaslatétel

A kötési idő vizsgálatot el kell végezni az 1 és 3 perces őrleményeken is. A kötési idő és a reológia vizsgálatokat is érdemes lehet elvégezni adalékszerek hozzáadásával. A mechanikai aktiválást más időtartamokban, vagy frekvenciákon is lehetne vizsgálni. Az újrahasznosított cementkőporoknak a mechanikai aktiválásuk után a portlandcementhez képest jóval szélesebb tartományú a szemcseméret-eloszlásuk, ennek a problémának a kiküszöbölésére egy zárt körfolyamatot érdemes létesíteni, μm -es tartományban lévő, a célszemcsemérethez optimalizált méretű sziták használatával, vagy akár szélosztályozó működtetésével. Az építési-bontási hulladékot lehetne akár geopolimerré alakítva is vizsgálni. A mechanikai aktiválást más időtartamokban, vagy frekvenciákon is lehetne vizsgálni, esetleg másféle malomban. Lehetne összehasonlítani a kémiai és mechanikai aktiválást is, vagy akár egy kémiai-mechanikai

összetett aktiválást készíteni. A reológia és kötési idő vizsgálatoknál is érdemes lehet a víztartalomra is hangsúlyt fektetni, a vízmennyiség hatását figyelni.

7. Összefoglalás

OTDK témám az építési-bontási hulladék újrahasznosításának vizsgálata, azon belül is a cementpép reológiai tulajdonságainak és kötési idejének szabályozási kísérlete mechanikai aktiválással.

A munkámhoz szükséges volt a szakirodalmi háttér. A „Szakirodalmi áttekintés” fejezetben bemutatom a cement, a beton, illetve az építési-bontási hulladékról szóló tudnivalókat, esetleges kutatásokat.

Az újrahasznosított cementpor mechanikai aktiválásához vezető előkészítéstechnikai folyamatokat, azaz a mintakisebbités, szítálás, koptatás, előőrlés is bemutatom, majd keverőmalomban 1, 3 és 5 perc időtartamig van a finomfrakció őrölve. Az őrlés nélküli finomfrakció, illetve az építési-bontási hulladéktól mentes portlandcementtel összevetve vizsgálom az összesen 5 különböző mintaanyag reológiáját, ahol az újrahasznosított cementporokat 20%-osan keverem a portlandcementhez. Kötési időt is vizsgállok, amit a TDK elkészítési ideje alatt csak a portlandcementtel, illetve a 0 és az 5 perces mintaanyagon tudtam elvégezni, így főként azt vizsgáltam, hogy a mechanikai aktiválás hatással van-e a kötési időre, illetve kötési időben mennyire tér el az újrahasznosított anyagot felhasznált cement a portlandcementtől.

8. Summary

My OTDK topic is about examining the recycling of Construction and Demolition Waste (C&DW), more specifically controlling the setting time and rheology of of said waste dust fraction cement paste by mechanical activation.

It was necessary for my work to be clear in the topic by scientific literature. My work required using scientific literature. The chapter of 'Szakirodalmi áttekintés' is devoted to information and possible research on cement, concrete and also construction and demolition waste. I also present the technical preparation processes leading to the mechanical activation of recycled cement powder. Processes like sample reduction, jigging, attrition and pre-grinding. After that I focus on the fine-fraction which is grinding in the mixer mill for 1, 3 and 5 minutes. I examine

and compare the fine-fraction without grinding and the portland cement free from construction and demolition waste with the rheology of 5 different sample materials, in which I blend 20% of recycled cement powders with portland cement. I also tested setting time but at the time of the TDK I was only being able to test it on the portland cement and the sample materials of zero and 5 minutes. That is why I mainly focused on whether mechanical activation has an effect on the setting time and how big is the difference of the setting time between RCP and portland cement.

9. Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönettel tartozok elsősorban konzulenseimnek, Dr. Szabó Roland tudományos munkatársnak és Prof. Dr. Mucsi Gábor Tanár Úrnak a segítségükért, tanácsaikért és a türelmükért.

Szeretném megköszönni a Mento Kft-nek is a szemléleti és alapanyagbeli segítségnyújtásukat is.

Hálával tartozok a családomnak is, akik támogattak engem a tanulmányaim során.

10. Mellékletek

1. melléklet: A Vicat-féle vicatkötési idő vizsgálatok eredményei

	0 perc:	5 perc:	cement:		0 perc:	5 perc:	cement:
t (perc)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)	t (perc)	Δh (mm)	Δh (mm)	Δh (mm)
0	0	0	0	225	1	6	6
10	0	0	0	230	1	3	8
20	0	0	0	235	2	8	12
30	0	0	0	240	2	7	12
40	0	0	0	245	2	7	17
50	0	0	0	250	2	8	15
60	0	0	0	255	3	11	18
70	0	0	0	260	3	11	22
80	0	0	0	265	4	12	19

90	0	0	0	270	5	14	27
100	0	0	0	275	6	14	20
115	1	0	0	280	8	12	31
120	1	0	0	285	10	16	30
125	1	0	0	290	10	17	35
130	1	0	0	295	10	24	38
135	1	0	0	300	19	24	38
140	1	0	0	305	15	24	39
145	1	0	0	310	21	26	39
150	1	0	0	315	17	36	39,5
155	1	0	0	320	17	37	39,5
160	1	0	1	325	21	36	39,5
165	1	0	1	330	26	37	39,5
170	1	0	1	335	26	39	39,5
175	1	0	1	340	26	38	39,5
180	1	0	1	345	28	39	39,5
185	1	0	1	350	36	38	40
190	1	1	2	355	38	39	40
195	1	1	2	360	38,5	39	40
200	1	1	2	365	39	36	40
205	1	1	4	370	39	39	40
210	1	2	4	375	39	39,5	40
215	1	2	4	380	39,5	39,5	40
220	1	2	5	385	40	39,5	40

2. melléklet: Reológia vizsgálat, Az Anton-Paar Physica MCR 51 mérés eredményei.

Cement	Sorszám	Nyírósebesség [1/s]	Nyírófeszültség [Pa]	Viszkozitás [Pa·s]	Sebesség [1/min]	Nyomaték [μNm]
	1	636	734	1,15	452	124 000
	2	910	635	0,698	647	107 000

	3	832	506	0,609	591	85 700
	4	755	425	0,563	536	71 900
	5	673	374	0,556	478	63 300
	6	591	328	0,556	420	55 600
	7	509	296	0,582	362	50 200
	8	427	276	0,645	304	46 600
	9	345	251	0,726	245	42 400
	10	264	212	0,805	187	35 900
	11	182	191	1,05	129	32 400
	12	101	207	2,06	71,5	35 100
0 perces őrlemény	1	916	713,5	0,781	651	120500
	2	919	508	0,5525	653	85950
	3	837	411	0,491	594,5	69500
	4	755	350	0,464	536	59300
	5	673	310	0,461	478	52500
	6	591	279	0,472	420	47200
	7	509	252	0,4945	362	42600
	8	427	225,5	0,5275	304	38200
	9	345	200,5	0,58	245	33900
	10	264	174	0,6605	187	29500
	11	182	144,5	0,793	129	24400
	12	100	109,5	1,095	71,1	18500
1 perces őrlemény	1	545,5	738	1,395	387,5	125000
	2	911,5	633,5	0,696	647,5	107300
	3	837	508	0,607	594,5	86000
	4	755	442	0,585	536	74800
	5	673	394	0,5855	478	66650
	6	591	356	0,602	420	60250
	7	509	324	0,636	362	54800
	8	427	293,5	0,6865	304	49650
	9	345	264	0,7635	245	44700
	10	264	231	0,8765	187	39100
	11	182	195	1,07	129	33050

	12	100	150,5	1,505	71	25500
3 perces órlemény	1	880,5	590	0,6775	626,5	99700
	2	919	474	0,516	653	80250
	3	837	391,5	0,468	594,5	66300
	4	755	341	0,452	536	57750
	5	673	306	0,4545	478	51750
	6	591	277	0,4685	420	46850
	7	509	251,5	0,4935	362	42550
	8	427	227,5	0,5325	304	38550
	9	345	205	0,5925	245	34650
	10	264	180,5	0,686	187	30600
	11	182	154	0,8465	129	26050
	12	100	118,5	1,185	71,1	20150
5 perces órlemény	1	891	701	0,801	633,5	118500
	2	919	494,5	0,5385	653	83700
	3	837	412,5	0,4935	594	69900
	4	755	364,5	0,483	536	61650
	5	673	330	0,49	478	55850
	6	591	300	0,508	420	50800
	7	509	274	0,538	362	46350
	8	427	249,5	0,584	304	42250
	9	345	225,5	0,6525	245	38200
	10	264	200,5	0,761	187	34000
	11	182	172	0,946	129	29100
	12	100	135	1,35	71,1	22850

11. Hivatkozásjegyzék

[1] [<https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>]

[2] <https://www.duol.hu/helyi-gazdasag/2020/09/mi-is-az-a-szen-dioxid-kvota>

[3] Prof. Dr. Mucsi Gábor, „Cementipari előkészítés-technika. Cementgyártás technológiája”.

Építőipari Előkészítéstechnika tárgy, Miskolci Egyetem.

- [4] <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>
- [5] <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- [6] <https://www.understanding-cement.com/history.html>
- [7] Jackson M. D., Landis E. N., Brune P. F., Vitti M., Chen H., Li Q., Kunz M., Wenk H. R., Monteiro P. J. M., és Ingraffea A. R. (2014): „Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar” <https://doi.org/10.1073/pnas.1417456111>
- [8] <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material/History-of-cement#ref76638>
- [9] <https://www.cembeton.hu/tudasbazis/cement>
- [10] <https://www.dalostuzep.hu/blog/milyen-cementet-használjon-az-építkezéshez/>
- [11] <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>
- [12] <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- [13] <https://www.nachi.org/history-of-concrete.htm#ixzz31V47ZuuJ>
- [14] <https://pixabay.com/photos/treasure-house-khazne-al-firaun-173507/>
- [15] <https://utepitesakademia.hu/beton-keveresi-aranyok/>
- [16] Forrai Jánosné: A beton összetétele, a beton alkotóelemei (kiadó: Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet)
- [17] <https://betonozas.info/2010/09/a-betonok-adalekanyagai/>
- [18] <https://www.duna-drava.hu/hu/kisokos-kavics>
- [19] <https://betonnet.hu/keveroviz-az-ujrahasznosított-víz-es-a-mosovíz-boros-sándor/>
- [20] <https://www.cembeton.hu/tudasbazis/adalekszer>
- [21] Innovációs és Technológiai Minisztérium (2021): „Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2021-2027”
- [22] Saiz Martínez, P., González Cortina, M., Fernández Martínez, F., & Rodríguez Sánchez, A. (2016). *Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. Journal of Cleaner Production, 118, 162–169.* doi:10.1016/j.jclepro.2016.01.059

- [23] Bereczk Á. és Horváth Á. (2021): *A körforgásos gazdaság és az ipari szimbiózis megoldások, mint a fenntartható erőforrásgazdálkodás eszközei. Multidiszciplináris tudományok, 11. kötet. (2021) 2 sz. pp. 224-234* <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.2.29>
- [24] Prof. Dr.Csóke Barnabás: Ipari hulladékok előkészítése és hasznosítása
- [25] <https://www.cseindia.org/india-manages-to-recover-and-recycle-only-about-1-per-cent-of-its-construction-and-demolition-10326>
- [26] Robayo-Salazar, R. A., Valencia-Saavedra, W., & Mejía de Gutiérrez, R. (2020). *Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling—As Both Binder and Aggregates—In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use Concept. Sustainability, 12(14), 5775.* doi:10.3390/su12145775
- [27] Pešta, J., Ženíšek, M., Kočí, V., & Pavlů, T. (2021). *Environmental perspectives of recycled concrete powder as cement replacement. SPECIAL CONCRETE AND COMPOSITES 2020: 17th International Conference.* doi:10.1063/5.0042093
- [28] Tang, Q., Ma, Z., Wu, H., & Wang, W. (2020). *The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. Cement and Concrete Composites, 103807.* doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103807
- [29] Skare E. L., Sheiati S., Cepuritis R., Mortsell E., Smeplass S., Spangenberg J. & Jacobsen S. (2022): *Rheology modelling of cement paste with manufactured sand and silica fume: Comparing suspension models with artificial neural network predictions* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126114>
- [30] Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). *A review of the current progress and application of 3D printed concrete. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 105533.* doi:10.1016/j.compositesa.2019.105533
- [31] DG Soltan, VC Li. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites.* 2018; 90: 1-13.
- [32] Rubio-Hernández, F.-J. (2018). Rheological Behavior of Fresh Cement Pastes. *Fluids, 3(4), 106.* doi:10.3390/fluids3040106
- [33] Bense B. D. (2015), Geopolimer szilárdságának szabályozása különböző pernyék megfelelő arányú keverésével. Szakdolgozat, Miskolci Egyetem.
- [34] Király B. E. (2021), CO₂ megkötése építési és bontási hulladékok segítségével. Szakdolgozat, Miskolci Egyetem.
- [35] Szűcs M. (2022), Építési és bontási hulladékokból visszanyert cementkő puzzolános reaktivitásának fokozása mechanikai aktiválással. Szakdolgozat, Miskolci Egyetem.

- [36] Mucsi G.; Halyag Papné N.; Ulsen C.; Figueiredo Paula O.; Kristály F. (2021). Mechanical Activation of Construction and Demolition Waste in Order to Improve Its Pozzolanic Reactivity. ACS Sustainable Chem. Eng. 9(9), 3416–3427
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05838>
- [37] <http://www.cemmac.sk/dev/language/hu/cement-cem-ii-a-s-425r-2/>
- [38] Faitli J.; Gombkötő I.; Mucsi G.; Nagy S.; Antal G.; (2017), Mechanikai eljárás technikai praktikum, Miskolci Egyetemi Kiadó
- [39] <https://www.betonopus.hu/notesz/labor-ismeret/kotesi-ido.pdf>
- [40] <https://www.prodyogi.com/2020/06/rheology-of-concrete-bingham-model.html>