



Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
*Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai
Intézet*



**Tojáshéj és erőműi pernye előkészítésének és adagolásának
hatása az hőszigetelő üveghab
jellemzőire**

TDK dolgozat

Készítette:

Oláh Zsuzsanna

Környezetmérnök alapszakos hallgató

Konzulensek:

Prof.Dr.habil Mucsi Gábor

Egyetemi tanár

Fóris Ildikó

Phd hallgató

2022.

Eredetiségi Nyilatkozat

Alulírott Oláh Zsuzsanna, 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, 2022.10.21.

.....

a hallgató aláírása

Konzulensi nyilatkozat

Alulírott Prof. Dr. habil Mucsi Gábor, a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetének egyetemi tanára a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Egyéb megjegyzések, ajánlás:

Miskolc, 2022.10.21.

.....

a konzulens aláírása

Konzulensi nyilatkozat

Alulírott Fóris Ildikó, a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetének phd hallgatója a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Egyéb megjegyzések, ajánlás:

Miskolc, 2022.10.21.

.....

a konzulens aláírása

Tartalomjegyzék

1.Bevezetés	3
2. Szakirodalom áttekintés.....	3
2.1. Üveghulladék	3
2.2. Üveghab	5
2.2.1. Habosítást befolyásoló tényezők.....	5
2.3. Lehetséges alapanyagok üveghab esetén.....	6
2.3.1. Öblösüveg hulladék.....	6
2.3.2. Habosítószer-tojánhéj	6
2.3.3. Adalékanyag-Erőműi pernye	7
2.3.4. Kötőanyag- Na-bentonit.....	9
3. Nyersanyag feldolgozási módszerek	9
3.1. Mosás, tisztítás.....	9
3.2. Örlés.....	9
3.2.1 Hengeres törő	9
3.2.2. Golyósmalom	10
3.2.3. Laboratóriumi kerámiabéléses dobmalom	11
3.3. Osztályozás	11
3.4. Homogenizálás.....	11
3.5. Nyers tabletták gyártása.....	11
3.5.1. Hidraulikus dugattyús prégép.....	11
3.5.2. Tabletták alapanyagai.....	12
3.5.3. Tabletták összetevői	13
3.6. Szinterezési vizsgálatok	13
3.6.1. Statikus kemence.....	13
4. Mérési módszerek és anyagtulajdonságok	14

4.1. Izzítási veszteség (LOI)	14
4.2. Szemcseméret elemzés	14
4.3. Sűrűség mérés és porozitás számítása.....	14
4.4. Ejtési vizsgálat	15
4.5. Kopásállósági vizsgálat.....	16
4.6. Optikai mikroszkóp.....	16
4.8. Hővezető képesség.....	17
5. Eredmények.....	17
5.1. Röntgen fluoreszcencia spektrometria (XRF)	17
5.2. Szemcseméret elemzés	17
5.3. Izzítási veszteség.....	18
5.4. Sűrűségmérés és porozitás számítása	19
5.4.1 Porozitás eredmények	20
5.5. Ejtési vizsgálat	22
5.6. Kopásállósági vizsgálat.....	23
5.7. Szinterezési vizsgálatok	23
5.7.1. Előkísérletek.....	27
5.8. Mikroszkópos felvételek.....	29
5.9. Hővezetési tényező	34
6. Konklúzió	35
7. Köszönetnyilvánítás	36
8. Szakirodalom	37

1.Bevezetés

Napjainkban a hulladékkezelés problémájára már minden iparágban nagy hangsúlyt fektetnek, szem előtt tartva a körforgásos gazdaság modelljét. A hulladékokon belül az üveghulladék begyűjtése, elhelyezése, feldolgozása még mindig nem teljesen megoldott, hiszen 2012 óta uniós hatályos célszámok szerint az üveghulladékok minimum 60% -át kellene újrahasznosítani. Ennek ellenére 2018-ban mindössze ezek 35,3% -át dolgozták fel. Hazánkban, az elérendő célszám 2025-ig 70%, 2035- ig 75%. Hasonlóan a tojáshéj, mint szerves hulladék nagy mennyiségben keletkezik az élelmiszeripar területén. Továbbá az erőműi pernyéből éves szinten több, mint kétmillió tonna keletkezik Magyarországon (világviszonylatban több, mint 800 millió tonna), ami jelentős környezeti kockázatot jelent a környező felszíni és felszín alatti vizekre, a talajra, illetve a levegőre.

Az üveghulladék több területen is újrahasznosítható, ilyen például az építőiparban az aszfalt és betongyártás, a geopolimer illetve az üveghab előállítása. A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében már számos eredményt értek el üveghab gyártásra pelletálással vagy tablettázással előállítva mészkő, dolomit, szilícium-karbid, perlit és tojáshéj adagolásával különböző arányokban, mint habosítószer [1].

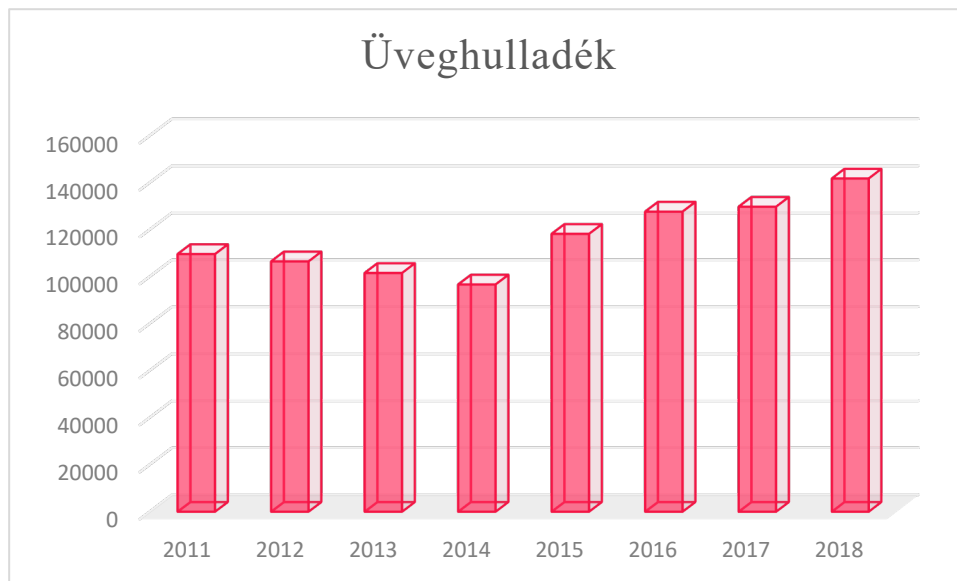
TDK dolgozatom célja nagy hozzáadott értékű hőszigetelő anyagot, üveghabot fejleszteni másodlagos alternatív nyersanyagok felhasználásával, megfelelő eljárás technikai műveletekkel, különös tekintettel az erőműi pernye és a tojáshéj hulladékok újrahasznosítására. További célom, hogy ezzel a folyamattal jelentős mennyiségű nyersanyagot és energiát spóroljak meg, illetve, hogy csökkentsem a lerakókba kerülő hulladék mennyiségét is.

2. Szakirodalom áttekintés

2.1. Üveghulladék

Legfrissebb adatok szerint Magyarországon 2018-ban a vegyesen gyűjtött települési hulladékoknak a 3,8%-a üveghulladék, ami 141 785 tonnának felel meg a települési hulladékok megoszlásából számolva [2].

A következő diagram jól mutatja, hogy az üveghulladék mennyisége 2014-ig csökkent, viszont utána exponenciális növekedésnek indult [2].



1. ábra Évenkénti üveghulladék mennyiség

A hazai újrafeldolgozó kapacitás meghaladja a 180 000 tonnát, de a kevés begyűjtött mennyiség miatt évek óta kihasználatlan. 2018-ban a kapacitásnak csupán a 21%-át használták ki (38 613 tonna). Az üveghulladékok gyűjtése érdekében különböző fejlesztések bevezetése szükséges, így az üveghulladékok begyűjtése érdekében bevezetésre került az ún. önkéntes visszaváltó rendszer [2].

Az üveghulladék építőiparban történő felhasználása nagyon elterjedt. A színes üvegtörmelék díszítésre használják, a szemcsék keménységéből adódóan az üvegpör pedig a fémfelületek tisztítására, polírozására alkalmas, valamint dörzspapír előállítására. A zúzalékot a töltések és alapozások készítésére töltőanyagként használják. Az üveghulladék felhasználásával készül az üvegyapot, ami egy hosszú, vékony üvegszálakból álló szigetelőanyag. Üveghulladékból készül az üveghab (amit később részletezek), amelyet padozat alatti teherhordó könnyű hőszigetelő töltésként alkalmaznak [3].

Mindemellett legtöbbször a betongyártás során figyelhető meg a felhasználása. Ez abból adódik, hogy a betongyártás során rengeteg nyersanyagra van szükség, ez a nyersanyag pedig helyettesíthető az üveghulladékkal. A cementhez üvegőrleményt adunk, ami pedig a betontestek szilárdságát jelentősen növeli [3].

2.2. Üveghab

Ennek az újrahhasznítási módnak az előnyei közé soroljuk például, hogy az üveghab könnyű, merev, hőszigetelő, fagyálló, nem gyúlékony, baktériumálló, víz-, és gőzálló tulajdonságokkal rendelkezik. A könnyen kezelhetőségéből adódóan kombinálható betonokkal, illetve egyre elterjedtebb az építőiparban szigetelőanyagként való hasznosítása. Jellemzően kicsi a sűrűsége, emiatt egyszerre 90-120 m³ is szállítható [4] [5].

Az üveghabot hulladéküvegből gyártják (sík- és öblösüvegből egyaránt), viszont előállítható kifejezetten üveghab gyártásához előállított üvegből is. Az üveget először liszt finomságúra őrlik, majd habosító anyagot hozzáadva magas hőmérsékleten hőkezelik. Táblás formában történő előállítása során alagútkemencében égetik ki az üveghabból és habosító anyagból álló port. A szemcseméretet jellemzően először kalapácsos törővel csökkentik, majd golyósmalommal őrlik. 700 – 900 °C a hőkezelési hőmérséklet, ugyanis ha magasabb lenne, az üveg teljesen folyékonnyá válna. Az üveghab gyártása során az üveg minimálisan megolvad, majd a habosító szer gázt képez benne, így jön létre a belső pórusszerkezet. A táblás üveghabot több lépésben hűtik le (szemben az üveghabgranulátummal). Erre a belső feszültségek elkerülése miatt van szükség [5] [6].

2.2.1. Habosítást befolyásoló tényezők

Az üveg habosodását több paraméter is befolyásolja ezek a következők:

- Az üveg és a habképző anyag kiindulási szemcsemérete, ami azért fontos mert egy adott szemcseméret tartomány felett nem a kívánt eredményt hozza (ez általában 100 µm alatti őrlést jelent).
- A fűtési sebesség, ami akkor optimális, ha 5-10°C/min a kemence felfűtési sebessége, mert a hirtelen túl magas hőfok repedéseket idéz elő az üveghabon.
- A habképzési hőmérséklet azért fontos, mert az üveg viszkozitása és a habosodás hőmérséklete nagymértékben összefügg.
- A hőkezelési idő pedig azért, mert az üveghab sűrűsége a hőkezelés időtartamától nagyban függ.
- Kémiai oldott oxigénigény az üveg habképző képességére van jelentős hatással, ami a redoxpotenciáljával hozható kapcsolatba, és redukációs reakciók révén is felszabadulhat.

- Hűtési sebesség: a tablettákban a maradék feszültség megszüntetése érdekében a hűtés során a nagyon alacsony hűtési sebességre kell törekedni az üveg átalakítási tartományán belül [7].

2.3. Lehetséges alapanyagok üveghab esetén

2.3.1. Öblösüveg hulladék

Az üveg olyan nem kristályos szilárd építőanyag, amely izotróp, azaz makroszkopikus fizikai tulajdonságai a tér minden irányában azonosak, de belső szerkezete nem annyira rendezett, mint a kristályos anyagoké. Ezeket az anyagokat fő képviselőjükről, a szilikátüvegről üvegszerű vagy amorf anyagoknak nevezik [8].

Az üveget homokból energiaigényes eljárással állítják elő, amelyet elsősorban a csomagolóanyag iparban és az építőiparban használnak, így jelentősebben a háztartási és az építőipari hulladékok között jelenik meg.

1100-1300 °C hőmérsékleten a szóda + mészkő + kvarc olvadékban a következő kémiai reakció megy végbe:



Az üvegesedés folyamata 800-1400 °C hőmérsékleten játszódik le és akkor tekinthető befejezettnek, amikor a rendszerben egyetlen oldatlan kvarcsemcse sincs [9].

Az üveghulladékokat fajtájuktól függően vagy visszaforgatják, és újból felhasználják, mint csomagoló anyag, vagy hulladéklerakókban helyezik el, és mint nyersanyag hasznosítják. Kísérleteim során zöld, barna és fehér öblösüveg hulladékot használtam (aprítottam, őröltem) az üveghabok gyártásához.

2.3.2. Habosítószer-tojáshéj

A habosítószer, amelyet jellemzően kisebb mennyiségben adnak hozzá a porított üveghez, bomlási reakció, vagy redoxi-reakció alapján gázokat állít elő a keverékben és így keletkezik az üveghab. Viszont a habképző anyagok csak egy bizonyos hőmérsékleten

bocsátanak ki gáznemű molekulákat a termikus bomlásuk következtében. Habképző anyag lehet a tojáshéj (CaCO_3), SiC, szén és MnO_2 [6].

Tojáshéj

A tojáshéj, mint melléktermék az élelmiszerhulladékok 48-49%-át teszik ki (ami hozzávetőlegesen 18 kg/fő/év), melynek jelentős része hulladéklerakóba kerül, éppen ezért ennek habosítószerként való használatával megoldást találhatunk a tojáshéj anyagában való visszaforgatására. A tojáshéj kiválóan alkalmas habosításra, hiszen égése során CO_2 gáz keletkezik, amely segít a pórusos szerkezet kialakításában az üveghab esetén. Fő alkotója a kalcium-karbonát 94-95%, amely kristályos formában, kalcitként van jelen. Ezen kívül tartalmaz kalcium-foszfátot (kb 1%), magnézium foszfátot (kb 1 %), és egyéb szerves anyagokat (4 %) [10] [11].

Számos kísérlet született már a tojáshéj habosítószerként való felhasználásával. 2014-ben Fernandes és társai 8 μm -es szemcseméret tartományban használták a tojáshéjat 40MPa nyomással tablettázva 650-750°C-os hőmérsékleten hőkezelve [26], illetve 2017-ben Souza és társai a keveréket 20MPa-on tablettázva 900°C-on hőkezelve 30 perc tartózkodási idővel alkalmazták [12].

2.3.3. Adalékanyag-Erőműi pernye

Az erőműi pernye olyan porszerű anyag, amely puccolános (a habarcs egy fejlettebb változata) tulajdonságokkal, ill. puccolános aktivitással rendelkezik, vízzel összekeverve önmagában nem, de oldott – például cement hidratációja során keletkezett – kalcium-hidroxid [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] jelenlétében megköt, lényegében vízben oldhatatlan reakcióterméket képezve, azaz hidraulikusan megszilárdul [13].

Magyarországon a szilárd tüzelőanyagok (kőszén, barnaszén, lignit) fontos szerepet töltenek be az energia-termelésben. Éves szinten körülbelül 4 millió tonna pernye és salak keletkezik, melyből 3,5 millió tonna az elektrofilterekben leválasztott finom pernye [14]. Példaként említhetjük, hogy egy 1000 MW-os erőmű körülbelül 12 000 tonna szenet és naponta körülbelül 2000 tonna pernyét termel [15]. Hátránya, hogy környezeti kockázatot jelent a környező felszíni és felszín alatti vizekre, értékes földterületeket von el a településtől, a mezőgazdaságtól és az ipartól. Előnye viszont, hogy a hánnyók értékes építőipari nyersanyag-források. A hánnyók anyagának hasznosításához tehát jelentős környezetvédelmi és nemzetgazdasági érdekek fűződnek [16].

A pernye újrahasznosítási lehetőségeire több megoldás is született már, mint például aszfalt töltőanyagént, szerkezetek töltéseként, talaj-adalékként, csiszoló porként való felhasználása. Újkeletű újrahasznosítási módja az üveghabként történő felhasználás és ez a pernye sajátos tulajdonságai (pl. SiO_2 és Al_2O_3 tartalma) miatt kiválóan alkalmas is a szilárdság növeléséhez.

Jianguang Bai és társai 2014-ben üveg, SiC, pernye keverékét alkalmazták 84,75% üveget felhasználva, 0,5% SiC -ot habosításra, és 14,75% pernyét adalékanyagként. Az üveghulladékot planétamalomban őrölték majd 120 μm -es lyukbőségű szitán osztályozták, a hőkezelés pedig 950°C-on 20 perc tartózkodási idővel történt [17]. Egy másik tanulmányban, amit Chen és társai 2012-ben végeztek el a pernye szemcsemérete 300 μm alatti volt, és ők az üveghab 70%-át pernye hozzáadásával vizsgálták, habosításra pedig CaCO_3 -t és Na_2HPO_4 -t alkalmaztak. A tablettázás során 15 MPa nyomáson préselték az anyagot majd a hőkezelést 850°C-on végezték [18].

1. táblázat Tojánhéj és pernye tulajdonságai

	Tojánhéj	Pernye
Összetétel	94 % CaCO_3 , 4 % szerves anyagok, 1% $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 1% $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, nyomelemek pl.: cink	SiO_2 , Al_2O_3 , CaO -t tartalmaz, Fe, Na, K, Ca, P, Ti és S, Fő komponense az amorf alumínium-szilikát (üveg), ezen kívül különböző ásványok, mint pl. mullit, kvarc, hematit, magnetit, mész, anhidrit és földpát is előfordulnak [19]
Bomlás	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	-
Bomlási hőmérséklet	~600°C	-
Tisztaság	~94%	-
Előny	Könnyen beszerezhető	Gazdaságos/könnyen beszerezhető

Hátrány	Kevésbé homogén (főként mennyiségtől függ)	Lassabb kötési folyamat
----------------	--	-------------------------

A tojáshéjat a későbbiekben ES (eggshell), az erőműi pernyét FA (flyash) néven rövidítem.

2.3.4. Kötőanyag- Na-bentonit

A bentonit az agyagnak egy fajtája, aminek több változata is létezik, attól függően, milyen domináns elemek találhatók benne. Ezek az elemek lehetnek alumínium, kálium, kalcium és nátrium. A nátrium-bentonit a bentonit egyik fajtája, mely térfogatának többszörösének megfelelő mennyiségű vizet képes megkötni. Többnyire olajkutak fúrásánál ún. fúróiszapként alkalmazzák [20][21]. Nagy vízfelvevő képessége miatt használtam ezt az anyagot kötőanyagként, és 2,5 %-os arányban alkalmaztam.

3. Nyersanyag feldolgozási módszerek

3.1. Mosás, tisztítás

A kívánt eredmények eléréséhez rendkívül fontos a minták tisztasága. Az üveghulladékot előtört formában kaptam ennek a tisztítása mosódob alkalmazásával történt. Ezután az üveget tömegállandóságig szárítószekrényben szárítottam. A tojáshéj esetében mivel szervesanyagról beszélünk különösen fontos, hogy megfelelő tisztaságú legyen a minta, mivel nagyobb egészségügyi kockázatot jelenthet a nem megfelelő tisztítás. Első lépésként a tojáshéjat folyó víz alatt megtisztítottam, ezzel a nagyobb részét eltávolítva a benne lévő szerves anyagot tartalmazó membránnak. Második lépésként forrásban lévő vízben hőkezeltam 30 percig, majd hasonlóan az öblösüveghez szárítószekrényben tömegállandóságig szárítottam.

3.2. Örlés

3.2.1 Hengeres törő

Az üveghab előállításához az első lépés a nyersanyagok előkészítése, azon belül a habosodáshoz a megfelelő szemcseméret elérése. A kísérleteimhez szükséges öblös üveget 2 lépcsős aprítási folyamatban készítettem elő.

Elsőként hengeres törő segítségével 1mm-es rés méret mellett folyamatos adagolás mellett adtam fel az anyagot. A hengeres törő fő igénybevétele a nyomás, nyírás, ütés-ütközés. Működési elve szerint két vízszintes tengelyű sima henger közel azonos sebességgel forog egymás felé. A kerületi sebesség kis törőkre jellemzően 1–5 m/s, nagyobbakra ($D > 0,9 \text{ m}$) 10–15 m/s.

3.2.2. Golyósmalom

A második lépcső a golyósmalommal történő őrlés volt, melynek során az anyagot 180 percig őrltem, ugyanis golyósmalomban történő üveg őrlése során ez az optimális beállítás figyelembe véve a gazdasági előnyeit, mint például az alacsony energiaigény és az alacsony fajlagos őrlési munka. Továbbá, az így kapott fajlagos felület viszonylag nagy, és abban az esetben, ha ipari mennyiségű üveghulladék őrlésére van szükség, megállapíthatjuk, hogy a golyósmalom lényegesen magasabb kapacitással rendelkezik a rezgőmalomhoz és a planéta malomhoz képest [22].

A golyósmalom feladata, hogy az őrlendő anyagot nagyon finom szemcseméretűre őrölje. A malom $305 \times 305 \text{ mm}$ -es belső átmérővel és hosszal rendelkezik. Az acélgolyó maximális mérete 40 mm. A malom hatásfoka a kemény kristályos szerkezetű anyagoknál a legjobb. Mivel az őrlési folyamat lassú, ezért a kívánt eredmény eléréséhez időre van szükség [23].

A golyósmalomba töltendő őrlőgolyó mennyiségét a használt töltési fok ismeretében a következő képlet segítségével határoztam meg:

$$V_{\text{őrlőtest}} = \varphi_t V_{\text{malom}} [\text{cm}^3]$$

ahol a:

φ_t = a malom töltési foka (ez általában 30...45%)

V_{malom} = a malom hasznos térfogata (cm^3)

$$m_{\text{őrlőtest}} = \rho_{\text{őrlőtest, laza}} V_{\text{őrlőtest}}$$

A feladási anyagmennyiség a malom őrlőtest (ε porozitás ismeretében) pórusainak 1,1-szeresét teszi ki.

$$V_{\text{pórus}} = \varepsilon V_{\text{őrlőtest}}$$

$$V_{\text{anyag}} = V_{\text{pórus}} 1,1$$

$$m_{\text{anyag}} = \rho_{\text{anyag, laza}} V_{\text{anyag}}$$

Az őrlés után az őrlés során befektetett munka és a feladott anyag száraz tömegét ismerve meghatároztam a fajlagos őrlési munkát (Wh/g):

$$W_{fajl} = \frac{W_{befektetett} - W_{üresjárat}}{m_{anyag}}$$

3.2.3. Laboratóriumi kerámiabéléses dobmalom

Tojáshéj őrlésére használtam a kerámiadobot kerámiagolyókkal 120 percig, majd a kész üveghabok kopásállóságának vizsgálatára

A dob egyik végén egy üreges hengerből áll, és mindkét végén szorosan illeszkedő fedéllel van ellátva. A tengely 30 fordulat / perc sebességgel forog [24].

3.3. Osztályozás

Az öblösüveg és a tojáshéj őrlése után nedves szitálásra került sor 32 µm méretű szitán, majd az alapanyagokat szárítószekrényben 105°C-on tömegállandóságig szárítottam. Az áthullott mennyiséget használtam fel kísérleteim során. Az erőműi pernyét szintén egy 32 µm-es szitanyílással rendelkező szitán osztályoztam, ezúttal szárazon.

Az alapanyagok átszitálására azért volt szükség, hogy mindegyik alapanyag közel azonos mérettartományba essen, így az elkészült üveghab tabletták pórus szerkezete homogénebb legyen, ezt több tanulmány is bizonyítja [12] [25].

3.4. Homogenizálás

A 100g tömegű keverékeket állítottam össze, a különböző habosítószer és adalékanyag arányokból, majd a összeállítás után a keverék homogenizálása következett, ami a dobmalom segítségével történt golyótöltet nélkül, minden arány esetében 3x10 percig. Majd a nyers tabletták gyártásának előkészítéseként 10 g tömegű tablettákat mértem ki.

3.5. Nyers tabletták gyártása

3.5.1. Hidraulikus dugattyús prés gép

A keverékek tablettázását a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete által kifejlesztett, és legyártott hidraulikus dugattyús présgéppel végeztem el. A kísérleteim során 25mm átmérőjű tablettákat készítettem 30MPa nyomáson. A dugattyúk sebességei szabályozhatók, a présdugattyú maximális sebessége 34 mm/s [24].

3.5.2. Tabletták alapanyagai

2. táblázat Tabletták alapanyagainak összefoglaló táblázat

	Tojáshéjjal habosított tabletták esetén	Tojáshéjjal+ pernyével habosított tabletták esetén
Kötőanyag	Na-bentonit	Na-bentonit
Habosítószer	Tojáshéj	Tojáshéj,erőművi pernye
Üveg	Vegyes üveghulladék	Vegyes üveghulladék

A tabletták készítéséhez két fő irányt tűztem ki célul. Az első irány az üveg alapanyagként, a tojáshéj habosítószerként illetve a Na-bentonit kötőanyagként való felhasználása. A másik irány az előző kombinációhoz erőművi pernye adagolása a szilárdság növeléséhez. Mindkét esetben különböző arányokkal dolgoztam, viszont a Na-bentonitból minden esetben 2,5%-ot adagoltam. Az előkísérletek során 0,1-1 % -ig készítettünk tablettákat tojáshéj adagolásával azonban ezek bár habosodtak ugyan de nyitott szerkezetet eredményeztek, a célom pedig zárt szerkezetet előállítani. A 0,1% tojáshéj tartalmú és adalékanyagként hozzáadott 7,5%-40% pernye tartalommal ellátott tablettáknál a magasabb arányú pernye hozzáadásával nem lépett fel kellő mértékű habosodás, vagy már egyáltalán nem habosodtak a tabletták, így ezek nem hozták a kívánt eredményeket.

Mind a két esetben különböző arányokban adagoltam a habosítószer az üveghez. A tabletták 10 g-osak voltak és 25 mm-es átmérővel rendelkeztek, azonban a tablettázás során minimális anyagvesztés lép fel, ezzel minden esetben számoltam, és megmértem a tömegüket laboratóriumi mérleg segítségével.

Tojáshéj esetében a következő keverési arányokat alkalmaztam: 0,01%, 0,05%, 0,075%, 0,1%

Tojáshéj+ pernye esetében pedig 1%, 3%, 5% -os tablettákat készítettem 0,1% -os tojáshéj mennyiség mellett. Azért ezt az arányt választottam, mert ennél figyelhető meg a legnagyobb testsűrűség csökkenés.

3.5.3. Tabletták összetevői

3. táblázat Tabletták összetevőit összefoglaló táblázat

Kísérletek	Tojánhéj [%]	Na-Bentonit [%]	Erőműi pernye [%]
Sikeres: a tabletták kellő mértékben habosodtak	0,01%	2,5%	-
	0,05	2,5	-
	0,075	2,5	-
	0,1	2,5	-
	0,1	2,5	1
	0,1	2,5	3
	0,1	2,5	5

3.6. Szinterezési vizsgálatok

3.6.1. Statikus kemence

A tabletták kiégetéséhez és habosításához a C/2-es műhelycsarnokban található Nabertherm L(T) 3 típusú laboratóriumi statikus kemencét használtam. A kemencét 1150 °C-os maximális hőmérsékletre lehet felfűteni. A kemence programozható, adott hőmérsékletre megadott időtartam alatt fűt fel, és szintén egy megadott időtartamig megtartja azt a hőmérsékletet.

A kemencét a kísérletek során 900 °C-os hőmérsékleten használtam, 1 óra 30 perces felfűtési idővel és 30 perc tartózkodási idővel. A tablettákat akkor vettem ki a kemencéből, ha annak hőmérséklete 150 C° alá csökkent, ugyanis a gyors kihűlés a tabletták számára nem volt optimális, mivel könnyen szétrepedtek.

4. Mérési módszerek és anyagtulajdonságok

4.1. Izzítási veszteség (LOI)

Az izzítási veszteség célja a mintaanyagokban lévő szerves anyagok kimutatása, ezt az anyag szerves anyagtartalmának a tömegvesztésével jellemezzük. A módszer alapja az, hogy a szerves anyagok, szemben az ásványos alkotórészekkel, éghetőek. A száraz anyagra vonatkoztatott izzítás előtt és után megmért tömegek különbsége a szerves anyag mennyiségét adja meg. A vizsgálatot a következőképpen hajtottam végre: 1 g anyagot kerámia csónakokba kimértem a mintából, majd a statikus kemencében hőkezelttem 900°C fokon. A kiszáritott mintának megmértem a tömegét (m_0) kemencébe helyezés előtt, majd lehűlés után újból lemértem a minta tömegét (m_i) és a következő képlet szerint számoltam az izzítási veszteségét:

$$I_v = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \cdot 100 [\%]$$

4.2. Szemcseméret elemzés

A szemcseméret elemzést Horiba LA-950V2 lézer diffrakciós készülékkel végeztem el, amely előnyös, mivel az elemzést kevés idő alatt hajtja végre és kis mennyiségű mintaanyagot igényel, illetve nagy mérettartományt fed le [26][27]. A mérés alapja, hogy adott méretű szemcsék adott szögben hajlítják a fényt, 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. Az érzékelők által észlelt fényintenzitásból a szemcseméret kiszámítására két optikai modellt szokás használni: a Mie-elméletet és a Fraunhofer diffrakciót [27]. A méréseim során a Mie módszert alkalmazva az adott anyagra jellemző fénytörési mutatókat használva határoztam meg.

4.3. Sűrűség mérés és porozitás számítása

A szemcsesűrűség meghatározásához piknométert használtam, ami az egyik legpontosabb sűrűségmérési módszer. A porozitás számításához az őrlemény szemcsesűrűségére, illetve a már elkészült üveghab tabletták testsűrűségére volt szükség.

Szemcsesűrűségnek azt a látszólagos sűrűséget nevezzük, amikor a zárt térbeli alakzatot egy a halmazból kivett szemcsére vonatkoztatjuk, és azzal osztjuk a szemcse tömegét. A mérés során a piknométert két anyaggal, a mérendő szemcsékkel és ismert sűrűségű folyadékkal, azaz mérőközeggel [ρ_k] töltjük ki, ami esetemben isopropil-alkohol $0,79 \text{ g/cm}^3$ sűrűséggel.

A vizsgálat során szükség van a száraz, üres piknométer tömegére [m_1], a száraz piknométer és a beletöltött szilárd anyag tömegére [m_2], a piknométer, a száraz anyag és a feltöltött mérő közeg tömegére [m_3], valamint a mérőközeggel teljesen feltöltött piknométer tömegére [m_4]. A mért tömegekből a következő egyenlet szerint kapjuk meg a szemcsesűrűséget [24]:

$$\rho_{sz} = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_3 + m_2 - m_1)} \times \rho_k \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

A mérés során minden minta anyagon három párhuzamos mérést végeztem, a kész tabletták magasságának és szélességének méréséhez tolómérőt alkalmaztam.

Ezekből az adatokból határoztam meg a tabletták testsűrűséget az alábbi képlet alapján:

$$\rho_t = m / V = 4 m / (D^2 \times \pi \times h), \text{ ahol}$$

ρ_t a tabletta sűrűsége,

m a tabletta tömege,

V a tabletta térfogata,

D a tabletta átmérője,

h a tabletta magassága

4.4. Ejtési vizsgálat

Az ejtési vizsgálat fontos minden agglomerátum esetében, aminek a szállítás, illetve adagolás során bekövetkező esetleges szabad esést törés nélkül ki kell bírniuk.

Az ejtési vizsgálatot minden adott összetételű tablettán elvégeztem tojásbéj tartalomtól (0,01%; 0,05%; 0,075%; 0,1%) és mindegyik tojásbéj (0,1%) + pernye tartalomtól (1%; 3% ; 5%), minden esetben 2 m magasból. A tablettákat addig ejtettem (élére), amíg el nem törtek.

4.5. Kopásállósági vizsgálat

Az üveghab tabletták mechanikai stabilitását laboratóriumi kerámiabéléses dobmalom segítségével vizsgáltam (golyótöltet nélkül). A dobba egységesen 30 g tablettát adtam mindegyik tojáshéj tartalomból (0,01%; 0,05%; 0,075% ;0,1%) és mindegyik tojáshéj (0,1%) +pernye tartalomból (1% ; 3% ; 5%). Ezt követően 30 fordulat/perc sebesség mellett járatam a készüléket 10 percig, majd egy 1 mm-es lyukbőségű szitán átszítáltam az anyagot és meghatároztam az ennél finomabb anyag tömegfrakcióját. A keletkezett törmelék tömegéből és a kiindulási anyag tömegéből lehet kiszámítani a kopás mértékét.

A kopás kiszámítása a következő képlet segítségével történt:

$$\Delta m_{abr} = \frac{m_{fine}}{m_{feed}} 100 [\%]$$

ahol a Δm_{abr} a kopás mennyisége (%), m_{fine} az 1 mm-es szitán átesett lekopott anyagmennyisége (g), és m_{feed} a kopásállósági teszt (30 g) feladási tömege.

4.6. Optikai mikroszkóp

A kész üveghab tabletták pórusméret elemzését a Zeiss AXIO Imager M2m típusú optikai mikroszkóppal vizsgáltam. A mikroszkóp 5, 10, 20, 50 és 100 szoros nagyítással üzemeltethető. A mikroszkóp rendelkezik egy speciális funkcióval, az ún. Z-stack vagy más néven „szeletelő” opcióval. A módszer lényege, hogy a megadott vertikális (z tengely mentén) tartományban a számítógép meghatározott számú (beállítható) felvételt készít bizonyos gyakorisággal, majd ezeket a szoftver összerendezi. Ezáltal egy közel háromdimenziós felvételt kapunk a szórt mintákról, így a szemcse alakját könnyebben behatárolhatjuk egy élesebb kép alapján [24].

4.7. Röntgen fluoreszcencia spektrometria (XRF)

A röntgenfluoreszcencia spektroszkópia (XRF) a mintából kibocsátott jellegzetes röntgensugarakat méri, miután nagy energiájú sugárzás bombázta. Használják a szilárd és fém anyagok alapösszetételének vizsgálatára. Az XRF nagy energiájú röntgensugarakkal bombázza a mintát, ami a minták atomjainak ionizációját okozza, és elektronokat dob ki a pályájukról. A kibocsátott röntgensugarak energiájának és mennyiségének mérésével lehet

megállapítani, hogy milyen elemeket tartalmaz az adott mintában. A kísérleteim során a tojáshéj és az üveg kémiai összetételét határoztam meg ezzel a módszerrel [28].

4.8. Hővezető képesség

A kész üveghabok hővezetési tényezőjének a mérése a C-Therm TCi típusú hővezetésmérő berendezésen történt. Ahhoz, hogy a mintákon megfelelően lehessen mérni a berendezéssel, párhuzamos felületet alakítottam ki az üveghabokon, csiszolópapír segítségével.

5. Eredmények

5.1. Röntgen fluoreszcencia spektrometria (XRF)

Az anyagok kémiai összetételére irányuló vizsgálat röntgenfluoreszcencia spektroszkópia (XRF) segítségével történt, aminek az eredményei a következők:

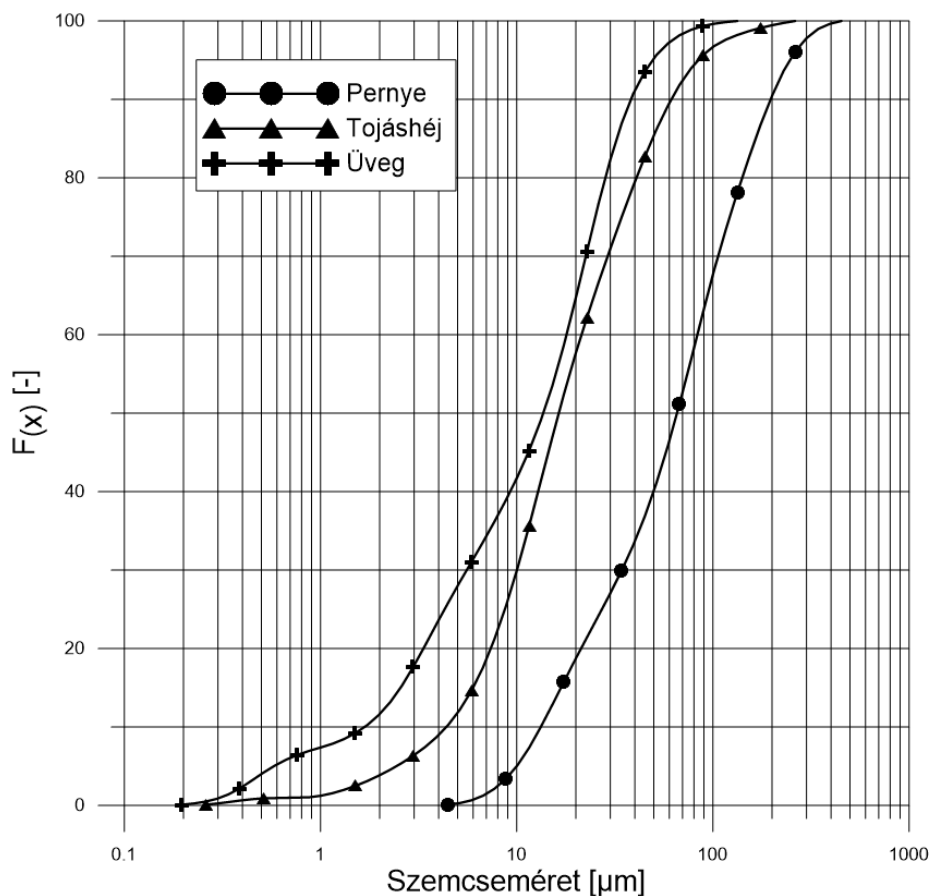
4. táblázat A vizsgált anyagok összetétele (m/m %)

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	MnO	S	F
Mérték egység	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%	m/m%
Tojáshéj	0,0	0,03	0,3	0,002	0,13	0,62	54,4	0,499	0,13	0,001	0,21	<0,3
Üveg	1,2	0,47	73,6	0,049	11,9	2,25	9,89	0,014	0,62	0,008	0,20	<0,3
Pernye	14	11,2	39,8	0,495	0,54	3,41	12,1	0,346	1,61	0,176	6,5	<0,3

Ha összehasonlítjuk a három anyag összetételét, akkor megfigyelhetjük, hogy jelentősebb eltérés az Al₂O₃, az Fe₂O₃ tartalomban van a pernye esetén, illetve a CaO-ban még ettől is magasabb eltérést tapasztalunk a tojáshéj esetében, viszont a legszembetűnőbb eltérés a SiO₂ tartalom esetén mutatkozik meg. A tojáshéjban csupán 0,03 m/m% található , míg a pernye esetében 39,8 m/m% , az üvegben pedig 73,6 m/m% . A többi összetétel esetében csak pár %- os eltérést tapasztalhatunk.

5.2. Szemcseméret elemzés

Az erőműi pernye, a tojáshéj és az üvegőrlemény esetén végeztem a kiindulási anyagokról szemcseméret eloszlás vizsgálatot, a Horiba LA-950V2 lézer diffrakciós készülék segítségével. A mérések eredményei az alábbi ábrán látható.



2. ábra Üveg,tojánhéj,erőműi pernye szemcseméret eloszlása

5.táblázat Nevezetes szemcseméreték

Nevezetes szemcseméreték	Erőműi pernye [μm]	Tojánhéj őrlemény [μm]	Üvegőrlemény [μm]
X_{10}	13,2508	4,3658	1,6715
X_{50}	65,5098	16,3711	13,6338
X_{80}	140,9829	40,7619	28,3056

A 2. ábrán, illetve a nevezetes szemcseméretet összefoglaló táblázatból láthatjuk, hogy a legdurvább szemcsemérettel rendelkező anyag az erőműi pernye volt, ezt követte a tojánhéj, majd láthatjuk, hogy az üvegőrlemény rendelkezik a legfinomabb szemcsemérettel.

5.3. Izzítási veszteség

A tojánhéj, az eredeti pernye és a pernye <32 μm alatti anyagokból is 3 párhuzamos mérést végeztem, aminek a mérési eredmények a következők:

Tojáshéj: $I_v = 45,71$ [%]

Pernye eredeti: $I_v = 5,67$ [%]

Pernye $< 32 \mu m = I_v = 4,28$ [%]

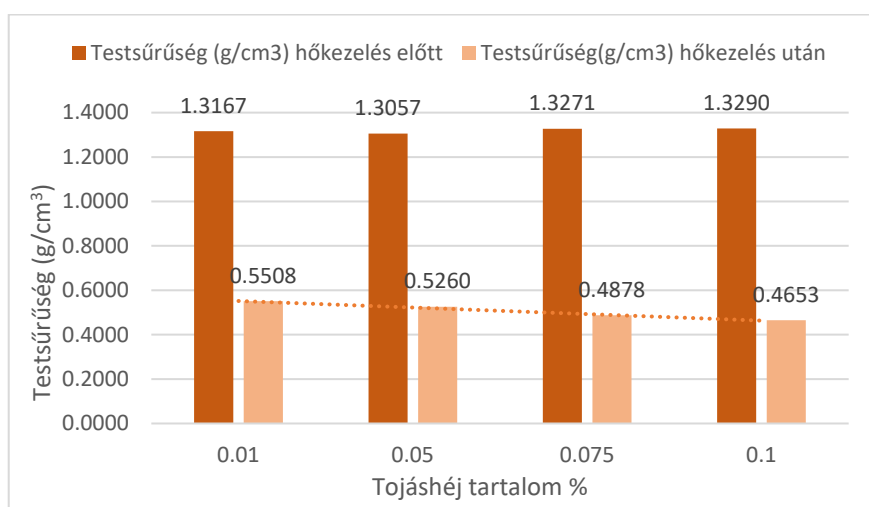
Egyértelműen megállapítható a $CaCO_3$ bomlása miatti tömegcsökkenés, és, hogy a tojáshéj rendelkezik a legnagyobb szervesanyag tartalommal.

5.4. Sűrűségmérés és porozitás számítása

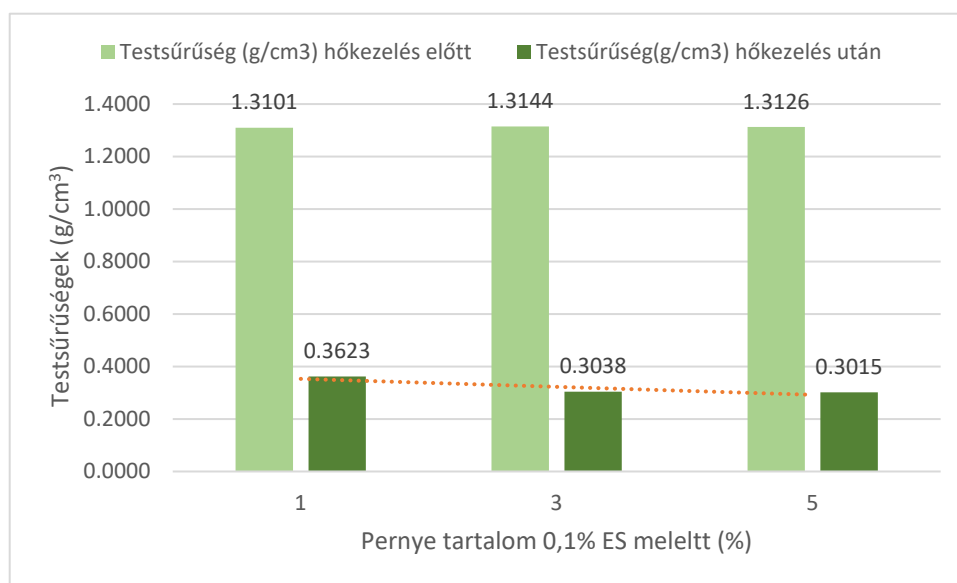
A sűrűség vizsgálatok során 5-5 véletlenszerű tabletta került kiválasztásra habosítószer tartalom alapján, és ezeknek az átlagával számoltam ki a sűrűséget, illetve ezeknek az adott tablettáknak a habosítás előtti illetve a habosítás utáni sűrűsége került megmérésre.

6. táblázat Piknométeres szemcsesűrűség eredményei

Habosítószer arány	Szemcsesűrűség [g/cm ³]
0,01 % ES	2,49
0,05% ES	2,49
0,075% ES	2,45
0,1% ES	2,52
1% FA	2,5
3 %FA	2,54
5% FA	2,54



3. ábra Testsűrűség tojáshéj tartalom esetén habosítás előtt és habosítás után



4. ábra Testsűrűségek tojáshéj+pernye tartalom esetén habosítás előtt és után

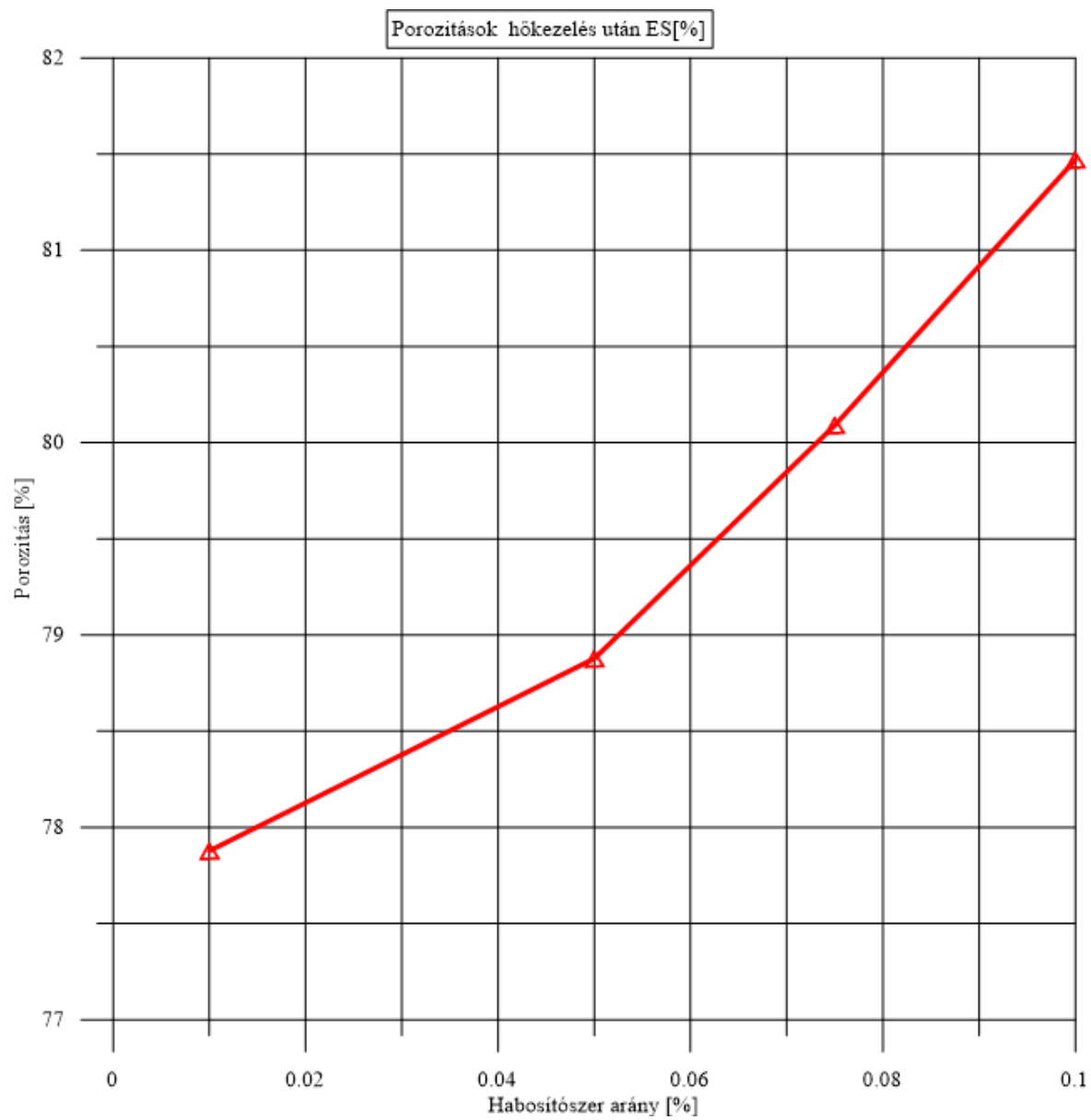
A testsűrűséget a $\rho = m/V$ összefüggéssel számíthatjuk ki, ahol ρ a test sűrűsége [kg/m^3], m a test teljes tömege [kg], V a test teljes térfogata [m^3]. Megállapítható, hogy a hőkezelés után a testsűrűség a tojáshéj arányának növelésével csökken. A 4. ábrán megfigyelhető, hogy a pernye hozzáadásával a testsűrűség csökken. Minél nagyobb arányban adunk hozzá pernyét, annál kisebb lesz a testsűrűsége az üveghabnak.

5.4.1 Porozitás eredmények

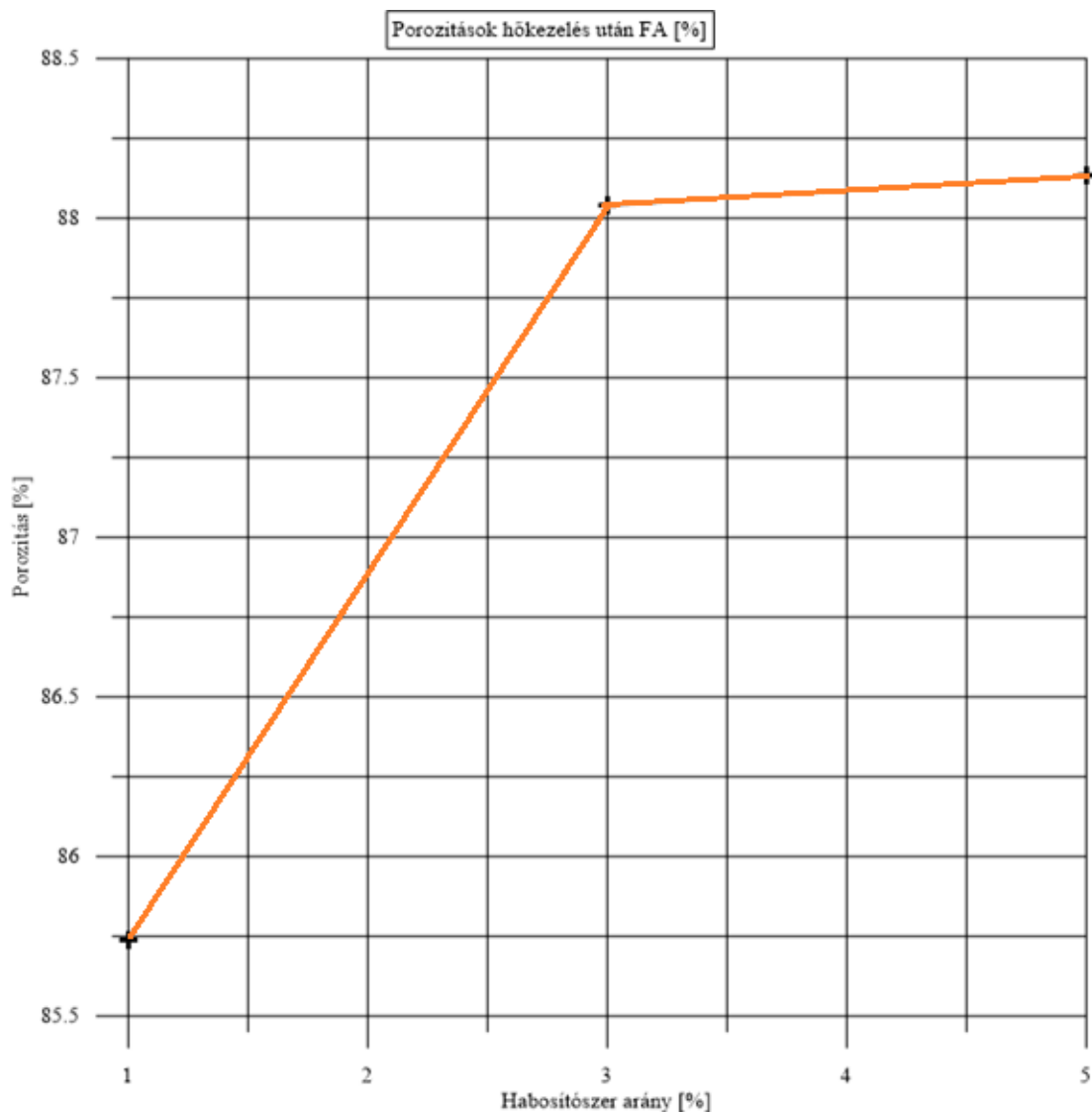
A porozitás meghatározása fontos üveghabok esetében. A homogenizált keverék szemcsesűrűségének, illetve a hőkezelés utáni tabletták látszólagos sűrűségének a segítségével meghatározható a tabletták porozitása az alábbi képlet alkalmazásával.

$$P_0 = (1 - d_a/d_t) * 100 \quad (d_a: \text{látszólagos sűrűség}, d_t: \text{szemcsesűrűség})$$

Ha a 5. és 6. ábrát összehasonlítjuk megfigyelhetjük, hogy a 5. ábrán tojáshéj esetében a porozitás értékek kisebb százalékos aránnyal rendelkeznek, mint a 6. ábrán a tojáshéj+erőműi pernye keverék porozitás értékei, ebből kikövetkeztethető, hogy a tojáshéjjal+pernyével készített tablettáknak nagyobb pórusmérettel rendelkeznek.



5. ábra Porozitás értékek tojáshéj tartalom esetén hőkezelés után



6. ábra Porozitás értékek tojáshéj+pernye tartalom esetén hőkezelés után

5.5. Ejtési vizsgálat

Az ejtési vizsgálat eredményeiből láthatjuk, hogy a pernye hozzáadásával a tabletták egyre kevésbé vagy nem is törtek az ejtés hatására. A legjobb értéket a 0,1 % tojáshéj+ 5% pernye tartalmú üveghab mutatott.

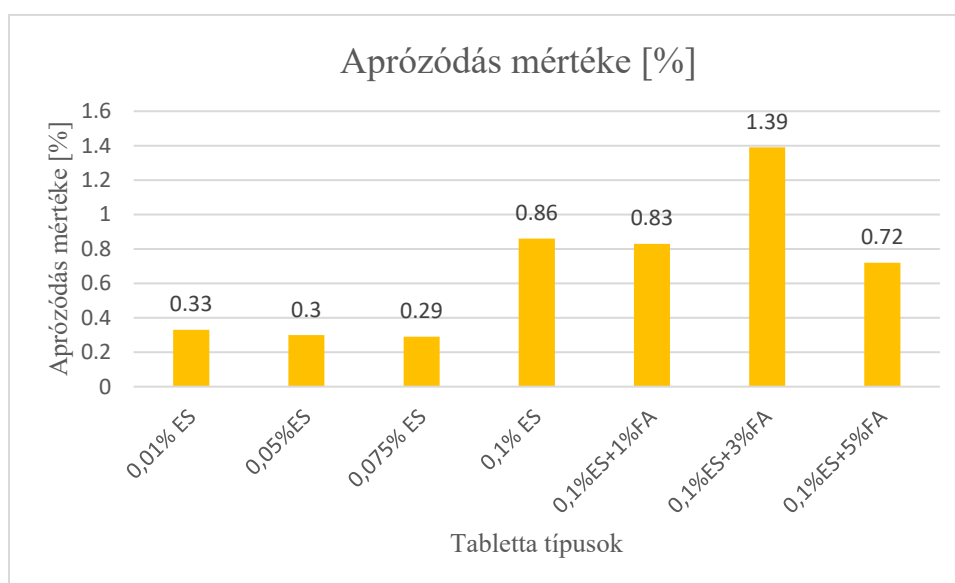
7. táblázat Ejtési vizsgálat eredményei

Ejtett tabletta	Ejtések száma
0,01% ES	8
0,05%ES	8

0,075% ES	2
0,1% ES	12
0,1%ES+1%FA	12
0,1%ES+3%FA	50(kopott,de nem tört)
0,1%ES+5%FA	50(kopott,de nem tört)

5.6. Kopásállósági vizsgálat

A kopásállósági vizsgálat szerint a 0,01% tojáshéj tartalmú tabletta a legnagyobb mértékben kopásálló, a pernyével való kísérletek közül pedig a 0,1% tojáshéj + 5% pernye tartalmú tabletta mutatta a legjobb eredményt.



7. ábra Kopásállósági vizsgálat eredménye

5.7.Szinterezési vizsgálatok

A kemencét a kísérletek során 900 °C-os hőmérsékleten használtam, 1 óra 30 perces felfűtési idővel és 30 perc tartózkodási idővel. A tablettákat akkor vettem ki a kemencéből, ha annak hőmérséklete 150C° alá csökkent, ugyanis a gyors kihűlés a tabletták számára nem volt optimális, a hősök hatására a tabletták nagy mértékben megrepedtek. A következő képeken a különböző tojáshéj és pernye tartalommal rendelkező tablettákat láthatjuk.



8. ábra Üveghab tabletta 0,01% ES (eggshell) habosítószerrel 30 MPa nyomáson tablettázva 900°C fokon szinterezve 30 min tartózkodási idővel



9. ábra Üveghab 0,05% ES (eggshell) habosítószerrel 30MPa nyomáson tablettázva 900°C -onszinterezve 30 min tartózkodási idővel



10. ábra Üveghab 0,075% ES (eggshell) habosítószerrel 30 MPa nyomáson tablettázva 900°C -onszinterezve 30 min tartózkodási idővel



11. ábra Üveghab 0,1% ES (eggshell) habosítószerrel 30 MPa nyomáson tablettázva 900°C -onszinterezve 30 min tartózkodási idővel

A 8-11. képen megfigyelhető az eredmények, illetve a tabletták alapján, hogy a kisebb százalékban hozzáadott tojáshéj alkalmazásával a pórusok kisebbek, így a tabletták is kisebb mértékben habosodtak. A nagyobb százalékban hozzáadott habosítószer tartalmú üveghabok pedig nagyobb pórusszerkezettel rendelkeznek. Kívül pedig minden esetben zártak a pórusok, ami számunkra optimális.

A szerkezetünk homogén szerkezetet mutat az összes tableta esetén. A legmegfelelőbbnek a 0,1% -os arány bizonyult. Ezt bizonyítja, hogy a porozitás eredményeknél közel 81,5%-os értékkel rendelkeznek, az ejtési vizsgálatok során pedig csak 12. ejtésre történt törés, így ezt az arányt alkalmaztam a pernyés kísérletek során.



12. ábra Üveghab 0,1% ES(eggshell) habosítószerrel+ 1% FA(flyash) hozzáadásával 30MPa nyomáson tablettázva 900°C - onszinterezve 30 min tartózkodási idővel



13. ábra Üveghab 0,1% ES(eggshell) habosítószerrel+ 3% FA(flyash) hozzáadásával 30MPa nyomáson tablettázva 900°C - on szinterezve 30 min tartózkodási idővel



14. ábra Üveghab 0,1% ES(eggshell) habosítószerrel+ 5% FA(flyash) hozzáadásával 30MPa nyomáson tablettázva 900°C - on szinterezve 30 min tartózkodási idővel

A 12. 13. és 14. ábrán 0,1% tojáshéj aránnyal habosított tablettákat látunk, melyek 30MPa tablettázó nyomással, 1 óra 30 perc felfűtési idővel 900 °C szinterezési hőmérsékleten 30 perc tartózkodási idővel 0,1% ; 0,3% ; 0,5% erőművi pernye hozzáadásával készültek.

A felvételeken jól látható, hogy a pernye felhasználásával történő üveghab készítés sikeresnek bizonyult, hiszen a tabletták habosodtak. Mivel a nagyobb arányban hozzáadott pernye nagyobb pórusokat eredményezett (ezáltal nagyobb tablettákat is) elmondható, hogy kis mértékben habosít, azonban a pórusméret a nagyobb százalékoknál már kevésbé homogén. Az előző kísérletekhez hasonlóan kívül zárt belül nyitott pórusszerkezetet figyelhetünk meg.

5.7.1.Előkísérletek

Az előkísérletek során alkalmazott 7,5 % ; 10 % arányú pernyés tablettáknál még megfigyelhető kisebb mértékű habosodás azonban itt már nem sikerült elérni a kívánt szerkezetet. 20-40% pernyetartalomnál pedig már egyáltalán nem habosodtak a tabletták.



15. ábra Üveghab 0,1% ES(eggshell) habosítószerrel+ 7,5% FA(flyash) hozzáadásával 30MPa nyomáson tablettázva 900°C-on szinterezve 30 min tartózkodási idővel



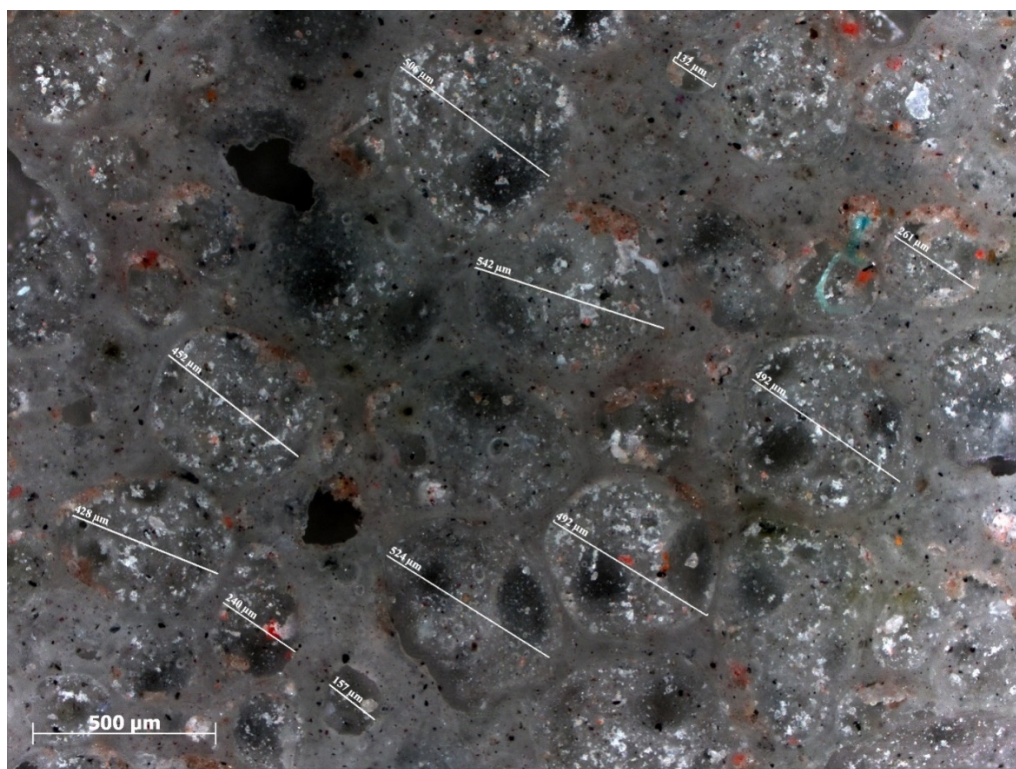
16. ábra Üveghab 0,1% ES(eggshell) habosítószerrel+ 10% FA(flyash) hozzáadásával 30MPa nyomáson tablettázva 900°C-on szinterezve 30 min tartózkodási idővel



17. ábra Üveghab 0,1% ES(eggshell) habosítószerrel+ 20-40% FA(flyash) hozzáadásával 30MPa nyomáson tablettázva 900°C-on szinterezve 30 min tartózkodási idővel

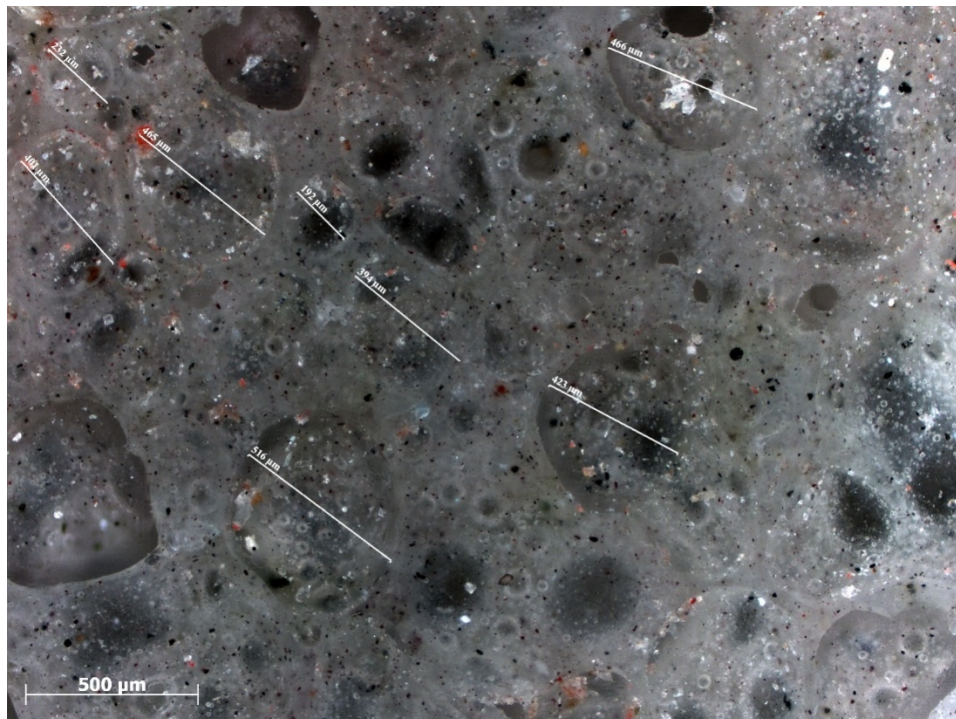
5.8.Mikroszkópos felvételek

A szemcséket ötszörös nagyítással porozitás vizsgálatnak vetettem alá. A vizsgálat során több különböző frakcióba tartozó cellákat vizsgáltam meg.



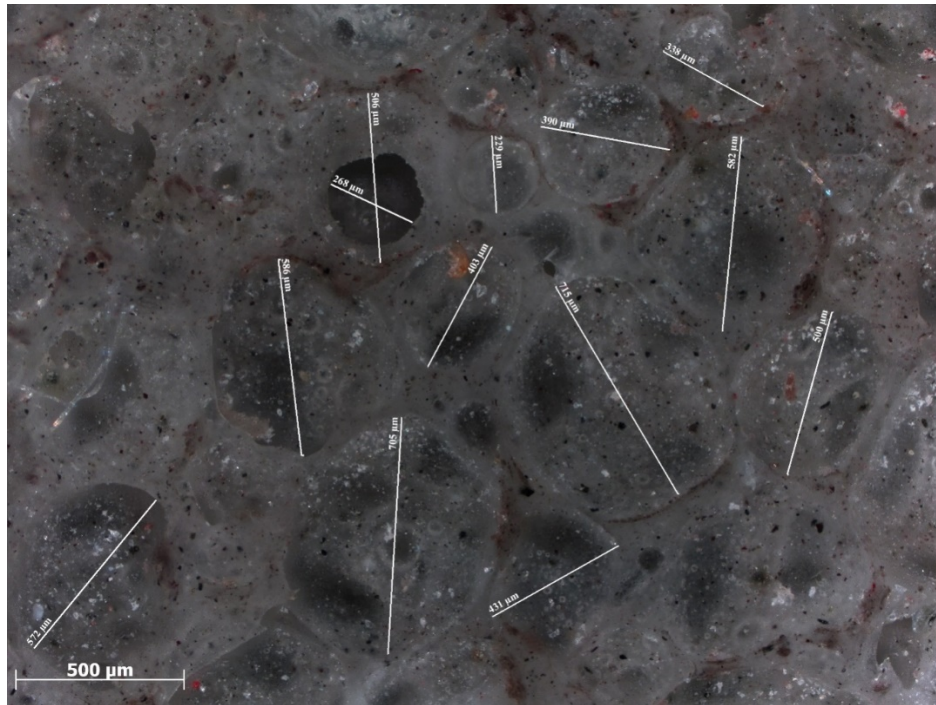
18. ábra 0,01% ES (eggshell) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

A 18. ábrán lévő felvétel egy nagyon tömör szerkezetű üveghabról készült. Jól láthatóak a 132-542 μm között mozgó különböző nagyságú szférikus pórusok.



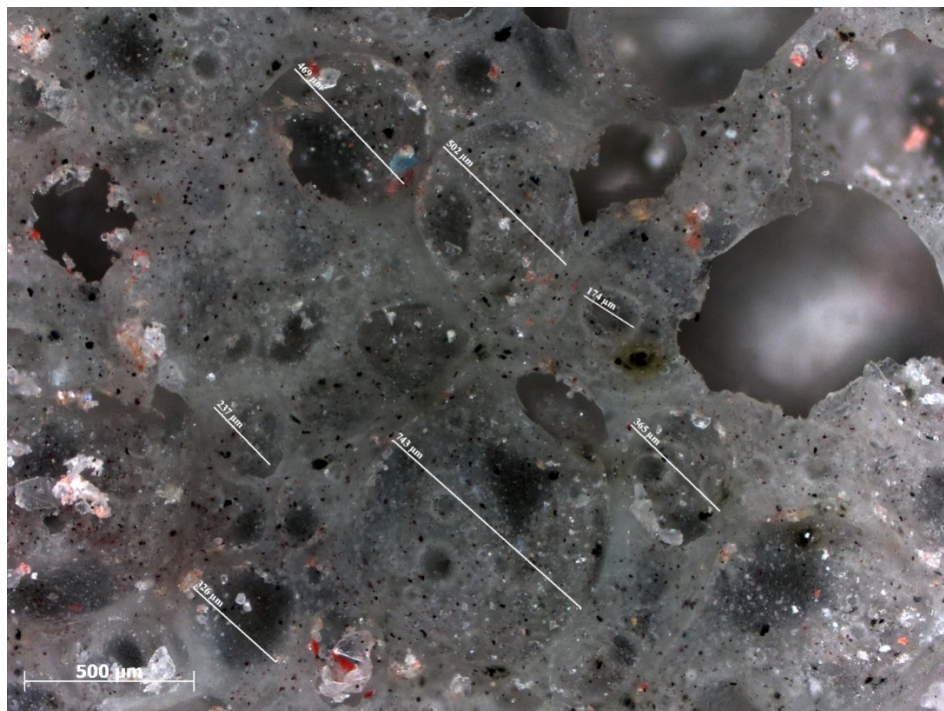
19. ábra 0,05% ES (eggshell) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

A 19. ábrán hasonlóan tömör pórusokat láthatunk, mint az előző felvételen. Itt a legkisebb pórusméret már nagyobb az előzőhöz (18. ábra) képest, 192- 516 μm között mozog.



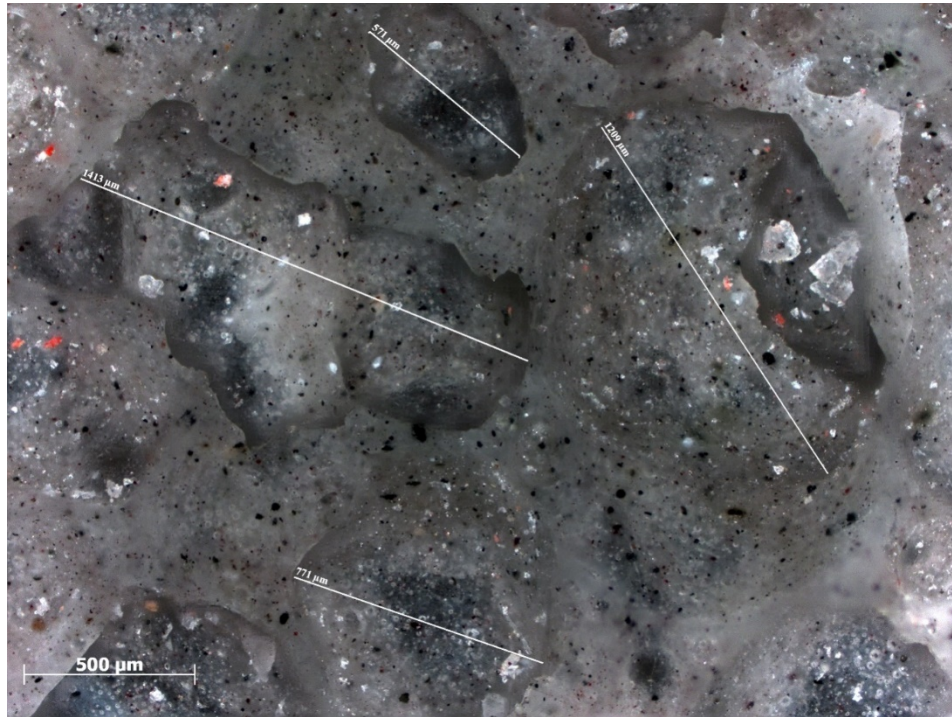
20. ábra 0,075% ES (eggshell) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

A 20. ábrából egyértelműen kikövetkeztethetjük, hogy a tojáshéj hozzáadásával nő a pórusméret, hiszen itt már 268-715 μm között mozognak a szférikus pórusok. Azt is láthatjuk, hogy a pórusokban is találhatóak kisebb pórusok.



21. ábra 0,1% ES (eggshell) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

Az előző mintához hasonlóan itt is tapasztalható, hogy a pórusok nőnek és egyre ritkább az előfordulásuk, ez a tojáshéj habosító tulajdonságának köszönhető. Ismét látható a pórus a pórusban jelenség. A pórusméret 174 μm és 743 μm között mozog. A továbbiakban ehhez a tojáshéj tartalomhoz adagoltam pernyét.



22. ábra 0,1% ES (eggshell) habosítószerrel+ 1% FA(flyash) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

A 22. ábrán látható, hogy a pernye hozzáadásával jelentős változás tapasztalható. A pórusok számottevően megnöttek és ritkább a gömbszerű alak. Helyette megnyúlt pórusok tapasztalhatóak. Kikövetkeztethető a felvétel alapján is, hogy a pernye egy adott mértékben habosító hatású. A pórusméret 771 μm és 1413 μm között mozog.



23. ábra 0,1% ES (eggshell)+3% FA(flyash) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

Az előző felvételhez hasonlóan az egyre nagyobb, kevésbé szabályos pórusok dominálnak, amit a nagyobb százalékban hozzáadott pernye eredményezett.



24. ábra 0,1% ES (eggshell)+5% FA(flyash) tartalmú üveghab mikroszkópos felvétele

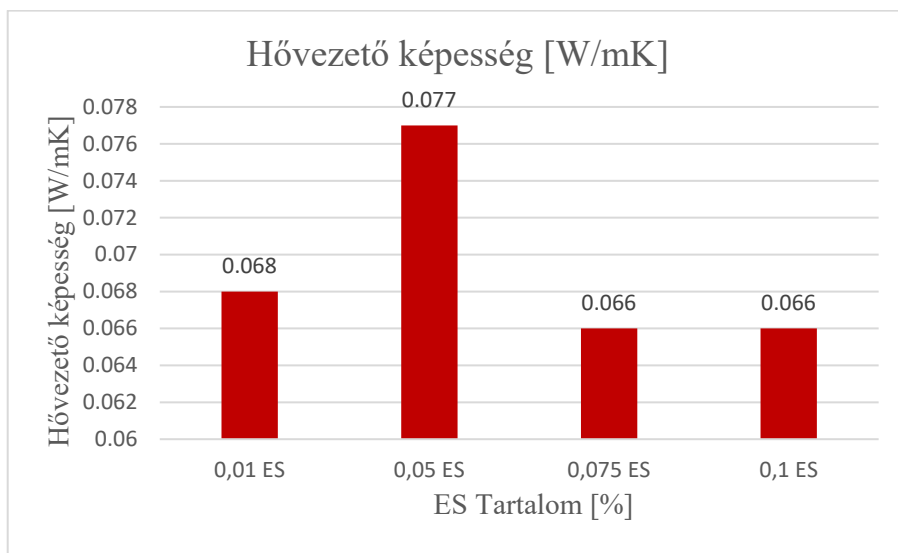
A 24.ábrán lévő felvételen már a kisebb tömör pórusok teljesen eltűntek, felváltják őket a nagyobb, szélesebb pórusok.

Összességében már a 5. illetve a 6.ábrán lévő exponenciális növekedést mutató porozitás értékekből is valószínűsíthető, hogyan változnak a pórusméretek annak függvényében, hogy egyre nagyobb arányban adagoltunk hozzá tojánhéjat, illetve pernyét.

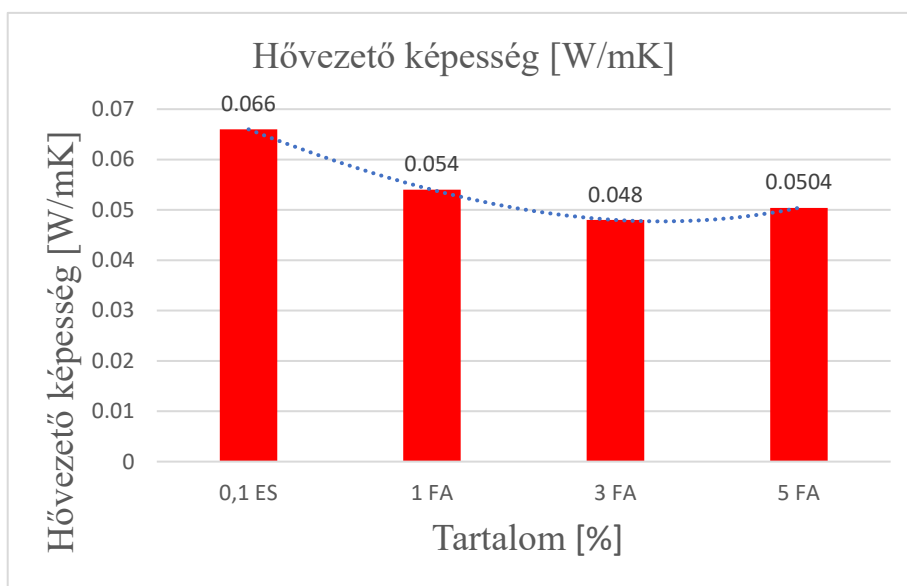
5.9. Hővezetési tényező

A hővezetési tényező megállapításához minden tablettán 5 mérés zajlott le, ezeknek az eredményeit átlagoltam és ábrázoltam. Célértékként szakirodalom alapján, amiben szintén habosítószerként tojánhéjat használtak, a 0,177-0,055 W/mK értéket tűztem ki [29]. Ipari üveghabok esetén SiC -dal habosítva az átlagos hővezetési tényező pedig 0,086 W/mK értékkel bír [30].

Esetemben a hővezetési tényező eredmények 0,048-0,077 W/mK között mozogtak.



25. ábra Hővezetési tényező a tojánhéj tartalom függvényében



26. ábra Hővezetési tényező eredmények tojáshéj és pernye tartalomnál

A 26. ábrán megfigyelhető, hogy az erőműi pernye hozzáadásával csökkent a hővezetőképesség.

6. Konklúzió

A szisztematikus laboratóriumi vizsgálataim alapján a következő megállapításokat teszem.

- A pernye adagolásának növelésével csökken az üveghabok testsűrűsége, viszont az 5% feletti aránynál már túl magas lesz a porozitás, illetve túlhabosodás történik, ami rontja a mechanikai ellenállóképességet.
- Az ejtési vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy a tojáshéjat és a pernyét magasabb százalékban tartalmazó üveghaboknak jobb az ütő igénybevétellel szembeni ellenállóképességük.
- Az optikai mikroszkópos vizsgálat során megfigyelhető, hogy azoknál a tablettáknál, amelyeknél kisebb arányban alkalmaztam tojáshéjat több, kisebb, tömörebb és szférikus pórusok keletkeztek, mint azoknál a tablettáknál, ahol nagyobb arányban alkalmaztam habosítószer vagy adalékanyagot, ez azért van, mert az egyre több százalékban hozzáadott habosítószer több CO₂ gáz felszabadulását eredményezi
- A pernye hozzáadásával nő a tabletták hőszigetelő képessége, ami a pernye porózus szerkezetével magyarázható.
- Az optimális eredményeket a 0,1% tojáshéj őrlemény és + 5% erőműi pernye tartalomnál tapasztaltam, így ezeket javaslom további kísérletekre a hőszigetelő üveghabként való felhasználásra vonatkozóan.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek Prof. Dr. habil Mucsi Gábornak, aki segített a számomra legjobb és legérdekesebb témát megtalálni, és szaktudásával ellátott, illetve Fóris Ildikónak, aki a kezdetektől támogatott és mind kísérleti mind szakmai tapasztalatait türelemmel átadta. Az ő segítségükkel jutottam el a TDK dolgozatom létrejöttéig. Továbbá szeretném megköszönni a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet laboránsának, Bernáth Szilveszterné Melindának, hogy méréseim során a szükséges eszközöket a rendelkezésemre bocsátotta, illetve kérdéseimmel bármikor fordulhattam hozzá. Szeretném megköszönni Kurusta Tamásnak, hogy megtanította az optikai mikroszkóp használatát, továbbá a műhelycsarnokban dolgozó technikusoknak, a berendezések szakszerű karbantartásáért, így azokat akadálymentesen használhattam. Végül köszönetet szeretnék mondani Dr. Simon Andreának az üveghabokon végzett hővezetési tényező megállapításáért, illetve Dr. Móricz Ferencnek az XRF vizsgálat elvégzéséért.

8.Szakirodalom

- [1] Fóris Ildikó, Prof.Dr.habil Mucsi Gábor: ALTERNATIVE FOAMING AGENTS FOR FABRICATION OF GLASS FOAM , Multidiszciplináris tudományok, 11. kötet. (2021) 5 sz. pp. 39-48, doi.org/10.35925/j.multi.2021.5.4
- [2] Országos Hulladékgazdálkodási terv (2021-2017)
- [3] Seregély Emese: Az üveghulladék és annak újrahasznosításának lehetőségei az építőiparban (2016)
- [4] Michael Scheffler, Paolo Colombo: CellularCeramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (2006)
- [5] Szendefy János,Bán Zoltán , Lődör Kristóf, Waleed S. Mustafa Az üveghab-granulátum útépitésben való alkalmazásának vizsgálata DOI: 10.36246/UL.2020.2.06
- [6] G. Scarinci, G. Brusatin, E. Bernardo: Glassfoams: (2005), pp. 158-176
- [7] Michael Scheffler, Paolo Colombo: CellularCeramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications (2006)
- [8] Balázs György: Építőanyagok és kémia. Tankönyvkiadó, 1984.
- [9] Spence, William P.; Kultermann, Eva: Construction Materials, Methods and Techniques, Cengage Learning, 2016
- [10] Matej Baláz: Ball milling of eggshell waste as a green and sustainable approach: A review, Advances in Colloid and Interface Science, Volume 256, 2018, pp. 256-275
- [11] <https://www.szabadeuropa.hu/a/elelmiszer-pazarlas-allam/31610551.html>
- [12] Marcelo T. Souza, Bianca G. O. Maia, Luyza B. Teixeira, Karine G. de Oliveira, Alexandre H. B. Teixeira, Antonio P. Novaes de Oliveira: Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes, 2017, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 111, pp. 60-64
- [13] Opoczky Ludmilla A pernyék szilikátkémiai tulajdonságai (2001)
- [14] Prof.Dr. habil Csőke Barnabás A pernyehasznosítás eljárástechnikai kérdései (2001)
- [15] H.R. Fernandes , D.U. Tulyaganov , J.M.F. Ferreira : Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents (2007)
- [16] Prof.Dr. habil Csőke Barnabás A pernyehasznosítás eljárástechnikai kérdései (2001)
- [17] Jianguang Bai,Xinghua Yang,Shaochun Xu,Wenjia Jing,Jianfeng Yang Preparation of foam glass from waste glass and fly ash, (Materials Letters 136 (2014) 52–54)

- [18] Hao Wang, Ziwei Chen, RuJi, Lili Liu, Xidong Wang : Integrated utilization of high alumina flyash for synthesis of foam glass ceramic (2018,Ceramics International)
- [19] Pereira, C. F.; Galiano, Y. L.; Piñero, M. A. R.: Utilisation of zeolitised coal flyash as immobilising agent of a metallurgical waste. (Pernyéből szintetizált zeolittal stabilizált kohászati hulladék.) = Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 77. k. 3. sz. 2002. p. 305–310.
- [20] Szakáll Sándor: Ásvány- és kőzettan alapjai (2011)
- [21] Chris Pellant: Kőzetek és Ásványok (1998) Egyetemi Nyomda Kft, Budapest, 100,241
- [22] Ildikó Fóris, Gábor Mucsi; Comparative investigation of glass waste grinding in various mills (DOI: 10.17794/rgn.2022.3.3)
- [23] Prof. Dr. Csőke Barnabás: Előkészítéstechnika- Aprítás és osztályozás Miskolci Egyetem (2005)
- [24] Fajtli József; Gombkötő Imre; Mucsi Gábor; Nagy Sándor; Antal Gábor- MECHANIKAI ELJÁRÁSTECHNIKAIPRAKTIKUM (2017)
- [25] Hugo R. Fernandes, Diana D. Ferreira, Fernanda Andreola, Isabella Lancellotti, Luisa Barbieri, José M. F. Ferreira : Environmental friendly management of CRT glass by foaming with waste eggshells, calcite or dolomite (2014, Ceramics International, pp. 13371-13379)
- [26] Storti F., Balsamo F.: Particle size distributions by laser diffraction: sensitivity of granular matter strength to analytical operating procedures, 2010, pp. 25-48, Solid Earth
- [27] Gee G.W.-Or D. 2002: Particle size analysis.-In: Dane J.H.-Topp G.C. (Szerk.): Soil science society of America book series. Vol. 5, Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods, pp. 255-293, Madison, WI.
- [28] Eurolab Laboratory Services
- [29] Marcelo T. Souza, Bianca G. O. Maia, Luyza B. Teixeira, Karine G. de Oliveira, Alexandre H. B. Teixeira, Antonio P. Novaes de Oliveira: Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes Process Safety and Environmental Protection 111 (2017) 60–64
- [30] Danielle Ipari Kft. Energocell <https://www.energocell.hu/hoszigetelo/>