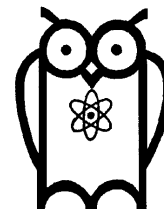




MISKOLCI EGYETEM MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
KERÁMIA- ÉS POLIMERMÉRNÖKI INTÉZET



Al_2O_3 -üvegcserép kompozit tulajdonságainak vizsgálata

Győrffy Bálint

Lipusz Dóra

Konzulens: Dr. Simon Andrea

Tudományos Diákköri Konferencia

2012

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS.....	3
2. LTCC TECHNOLOGIA BEMUTATÁSA	4
3. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK VIZSGÁLATA.....	7
3.1. Elvégzett vizsgálatok.....	7
3.2. Al_2O_3 por jellemzése, vizsgálata	8
3.3. A felhasznált üveg-cserép jellemzése, vizsgálata.....	10
4. Al_2O_3 -ÜVEG KOMPOZIT PRÓBATESTEK KÉSZÍTÉSE.....	13
4.1. Por keverékek készítése, sajtolása	13
4.2. Sajtolt próbadarabok kiégetése	15
5. PRÓBATESTEKEN VÉGZETT VIZSGÁLATOK.....	17
5.1. Égetési zsugorodás vizsgálata	17
5.2. Vízfelvétel vizsgálata	19
5.3. Porozitás vizsgálata	21
5.4. Nyomószilárdsági vizsgálatok	22
6. ÖSSZEFOGLALÁS	24
7. FELHASZNÁLT IRODALOM	25

1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Kerámia- és Polimermérnöki Tanszékén végzett laboratóriumi kísérletek során Al_2O_3 -üvegcserép kompozitokat állítanunk elő, amit jellemzően az LTCC (Alacsony Hőmérsékleten Hőkezelt Kerámia) technológiával lehet felhasználni úgy, hogy a kiégetés oxigéndús atmoszférában végezhető, alacsonyabb hőmérsékleten.

Az általunk előállított kompozitokhoz hasonló összetételben gyártanak mikrochip alaplapokat a következő termékekhez: optika, orvostudomány, WiFi, autóipar, szenzorok.

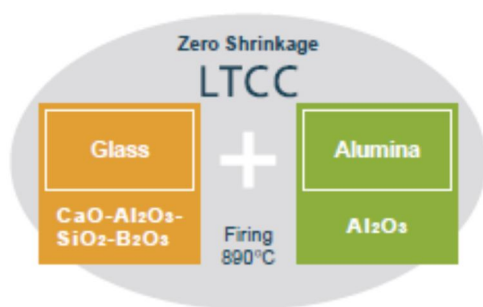
Mivel ezeket high-tech elektronikai iparban használják fel, az elterjedése mellett a tudományos háttér lassabban fejlődik az ipari titkok, szabadalmak miatt. De több kutató is foglalkozik a gyártási paraméterek fejlesztésével, az adalékanyagok mennyiségének hatásával. Valójában, még most fejlődik ki az a tudományos háttér, ami majd a későbbi generációkat segíti az üveg-kerámia kompozitok megismerésében.

A külföldi kutatók eredményeit megismerve, mi is megpróbáltunk párhuzamot vonni az általunk elkészített darabok mechanikai tulajdonságai és az összetevők arányainak változtatásában. Bár az LTCC technológiánál (2. fejezet) az üveg és alumínium-oxid mellett számos adalékanyagot használnak a termelési hatékonyság javítása vagy egyes tulajdonságok erősítésére, a mi célunk egyenlőre a megfelelő szubsztrát kialakítása, olyan optimális arány, szemcseméret, préselési tömeg és égetési hőmérséklet kialakítása, mellyel a legjobb tulajdonságokkal bíró darabokat tudjuk előteremteni. Ehhez a 3. fejezetben bemutatott alapanyagokat használtuk, melyeket a tanszéken található lézergranulometriás műszerrel elemeztünk, majd a présgépen sajtoltunk. Az elkészült daraboknál mértük a porozitást, vízfelvételt, nyomószilárdságot, valamint a tanszéken található pásztázó elektronmikroszkóp segítségével képeket készítettünk a töretfelületekről.

2. LTCC TECHNOLOGIA BEMUTATÁSA

Az LTCC (alacsony hőmérsékleten égetett kerámia) technológia az egyik legkorszerűbb eljárás a elektronikai hordozófelületek kialakításánál. Olyan chip-alapokat képesek létrehozni így, amibe könnyen impregnálhatóak a vezető alapanyagok, a bonyolult áramkörök, és mindezt a vékonytechnológiának köszönhetően mm-es vastagságú darabokkal érhető el [1].

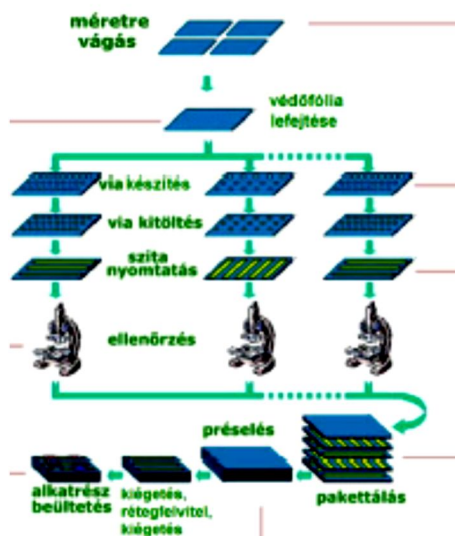
Az LTCC technológia egyesíti a vastagréteg-technika lehetőségeit és a HTCC technológia nyújtotta előnyöket, de további előnyt jelent, hogy a kiégetés oxigéndús atmoszférában is végezhető, alacsonyabb hőmérsékleten (850-1150°C).



1. ábra.

Az LTCC (alacsony hőmérsékleten kiégetett kerámia) alapanyagai [2].

Ahhoz, hogy a később bemutatott darabokból termék legyen, a 2. ábrán látható technológiai soron kell végig mennie a kompozitnak, hogy a végtermék az 1. táblázatban felsoroltak egyike legyen.



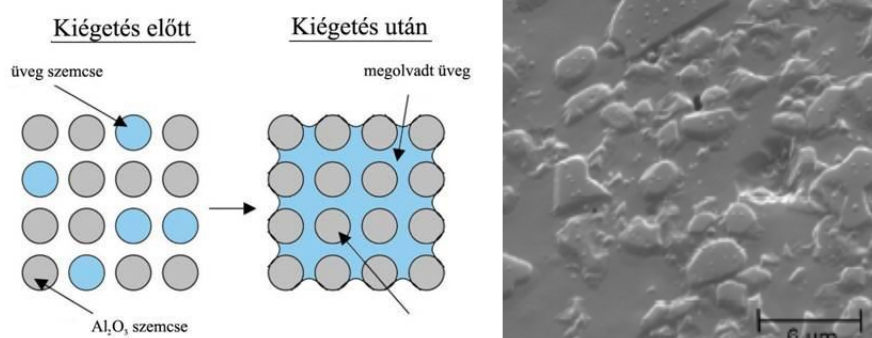
2. ábra.

A LTCC technológiával gyártott darabok megmunkálásának bemutatása [3].

1. táblázat. Az üveg-kerámia alapanyagból készült mikrochipek felhasználási köre [2] alapján.

wireless	T/R Modulok	autóipar
optika	érzékelők	teszt áramkörök
orvostudomány	multi Chip Modulok	wiFi
bluetooth	GPS	BGA/PGA
radar	digitális áramkörök	analóg áramkörök
űrpar	hadiipar	antennák

A darabokhoz elkészítéséhez rendszerint pontosan ismert összetételű üveget (ez lehet akár üveghulladék is) valamint adott tisztaságú alumínium-oxidot használnak fel. Az üveg komponenseit oly módon választják meg, hogy az abból előállított üveg 850 °C-on kristályosodjon, nagy hajlítószilárdsága és jó villamos tulajdonságai legyenek. A kiégetés során az üveg megömlik, és a 3. ábrán látható módon körbeveszi a kerámiadarabokat.



3. ábra.
A kompozit kialakulásának vázlata [2,3] és SEM felvétele [4].

Az üveg megolvadása miatt a térfogat zsugorodás a felület mentén 12-16%, míg a vastagsága akár 25%-os zsugorodást is produkálhat. Ez anizotrop tulajdonság, melyet a préselési erő befolyásolhat [5].

A HTCC technológiához képest alacsonyabb szinterelési hőmérsékletnek (850-1150 °C) [5] köszönhetően olyan nagy elektromos vezetőképességű fémzálak építhetők be, melyek a magasabb előállítási hőmérsékleten megolvadnának, ilyen a Cu, Au, Ag stb. Ugyanakkor fontos, hogy az alapanyagok, ezekkel a beépítendő vezetőkkel jó kompozitokat alkossanak.

A hordozónak jó hővezető képességekkel kellett rendelkeznie. A jelátadás nagy sebessége megkövetelte, hogy a kerámialap alacsony dielektromos állandóval rendelkezzen, ezt biztosítani lehet az Al_2O_3 -üveg kompozittal. Az alapanyagok kiválasztása előtt lássuk az LTCC technológia legfontosabb előnyeit [1,2] alapján:

- A hagyományos vastagréteg hordozóknál gazdaságosabb gyártási folyamat
- tömeggyártásra alkalmas, magas kihozattal (számos technológiai lépés automatizálható)
- gyártása egyszerű és költségkímélő
- lehetőség van a hordozó 3D-s méretének szabad megválasztására
- a rétegek száma korlátlan
- az alkatrészek hordozóba való eltemetésével méretcsökkentés érhető el
- magas üzemi hőmérsékleten is alkalmazható (350 °C)
- kompatibilis a vastagréteg technológia gyártóberendezéseivel
- a használható anyagok elektromos tulajdonságai kiválóak (arany, ezüst, stb).

Kutatásunk során Al_2O_3 présporhoz különböző szemcsefrakciójú üveget kevertünk különböző koncentrációkban, majd az elkészült keverékekből próbatesteket sajtoltunk. Ezek kiégetését követően vizsgáltuk különböző fizikai tulajdonságaikat. Az eredmények bemutatása előtt, a következő fejezetben elsőként jellemezzük a felhasznált alapanyagokat, majd bemutatjuk a próbatestek készítését, azok vizsgálatait.

3. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK VIZSGÁLATA

3.1. Elvégzett vizsgálatok

Az alapanyagok vizsgálatai során szemeloszlási vizsgálatokat, valamint az anyagszerkezeti vizsgálatokhoz pásztázó elektron mikroszkópos felvételeket készítettünk.

A szemcseméret meghatározását a Kerámia- és Szilikátmérnöki tanszék laboratóriumában található Horiba LA-950V2 típusú lézergranulométerrel (4. ábra) végeztük el.



4. ábra
Horiba LA-950V2 típusú lézergranulométer

A berendezés száraz eljárású módszerrel működik. A mérés során egy zárt rendszerben a vizsgálati anyag folyamatos keringetésben van levegőmozgás által. A mintakamrán átfolyó vizsgálati anyagot monokromatikus fény (lézersugár) világít meg, amely a részecskéken többféle szögben szóródik; ezt detektor érzékeli és dolgozza fel. A berendezés a mintán több száz mérést végez el, amelynek átlageredménye alapján a vizsgált térfogat részeit különböző méretosztályokba sorolja, ezáltal térfogati részecskeméret-eloszlás határozható meg.

Az anyagszerkezeti vizsgálatokra egy *Hitachi T-1000* típusú Scanning Elektronmikroszkópot használtunk. A berendezés lehetővé teszi tömbi és szemcsés anyagok anyagszerkezeti vizsgálatát, valamint azok energia diszperzív röntgen spektroszkópiáját (EDS). A berendezés képe az 5. ábrán látható.



5. ábra
Scanning Elektronmikroszkóp (SEM)

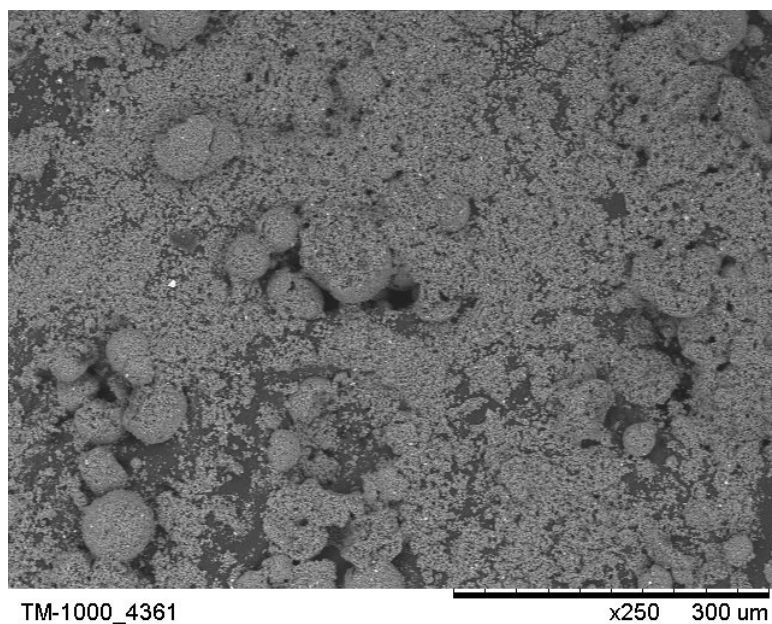
A vizsgálathoz szükséges vákuum egy vákuumszivattyú és egy diafragma szivattyú segítségével állítható elő, mely vákuumban az elektronsugár előállítására 15 kV konstans gyorsító feszültség segítségével történhet. A műszer konstrukciós kialakításából adódóan a vizsgálathoz speciális minta előkészítés nem szükséges, a visszavert elektronsugarak (*BSE*) segítségével a képalkotás során pedig 60 – 10000-szeres nagyítás érhető el. Kémiai elemzés is lehetséges a rendelkezésre álló energiadiszperzív mikroszkopikus detektor segítségével, melyben egy berillium-ablakos detektorral a *Na* és az annál nagyobb atomtömegű kémiai elemek meghatározása lehetséges.

3.2. Al_2O_3 por jellemzése, vizsgálata

Az alumíniumoxid az egyik legelterjedtebb, sokféle célra használható oxidkerámia, melynek főbb tulajdonságai [7] alapján:

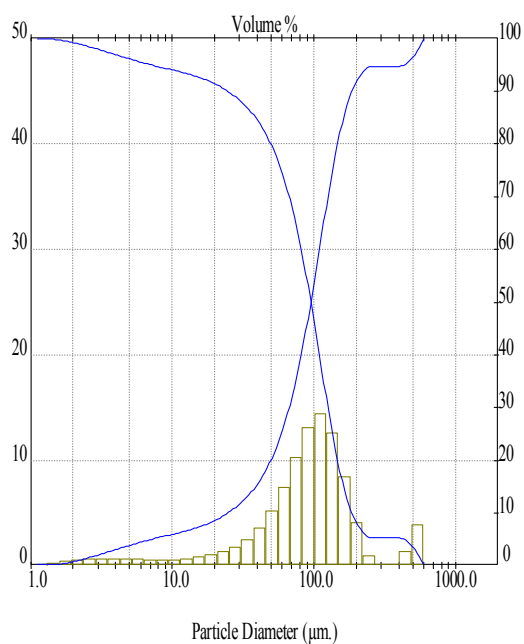
- nagy keménység (12-15 HV)
- sűrűség: 3,2-3,4 g/cm³
- hajlítószilárdság: 250 MPa
- nyomószilárdság: 2800 MPa
- Magas olvadáspont (2054 °C)
- jó elektromos- és hőszigetelő képesség
- Hőtágulása viszont aránylag nagy a többi kerámiához képest ($8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Különböző tisztaságú minőségben használják, mi a NABALTEC gyártmányú port használtunk, melynek SEM felvétele a 6. ábrán látható.



6. ábra
Általunk felhasznált Al₂O₃ por SEM felvétele

A felvételen jól láthatóak a présor gyártásakor gömbökké összeállt por szemcsék. A szemcseméret eloszlás eredménye a 7. ábrán látható.



7. ábra
Lézergranulometriás vizsgálat eredménye

A 7. ábrán az látható, hogy a porszemcsék jelentősebb része a 100 mikronos szemcsetartományba esik.

A kompozitokhoz azok gyártása során mullit vagy spinell formában adagolják a megfelelő mennyiségű alumínium-oxidot, hogy megakadályozzák az üveg SiO₂ tartalmának krisztobalittá történő átalakulását, aminek veszélyt jelentene a kompozitra nagy repedéshajlamával [8, 9].

A felhasznált Al₂O₃ por oxidos összetételét a 2. táblázat tartalmazza:

2. táblázat. A kompozitokhoz felhasznált alapanyagok oxidos összetétele

m/m%	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO
Üveg	79,78	12,3	2,33	4,8	0,77	-	-	-
Al ₂ O ₃	0,03	-	99,78	0,06	-	0,01	0,02	0,03

3.3. A felhasznált üveg-cserép jellemzése, vizsgálata

Az üveg kemény, rideg, nagy sűrűségű (kb. 2,5g/cm³), kis szilárdságú anyag. Jó hő- és elektromos szigetelő. Az üveg vegyi ellenálló képessége jó, csak a hidrogén-fluorid (HF) és a forró, tömény lúg (NaOH, KOH) oldja [6].

Az üvegcserep összetétele, így a tulajdonságai is nagyban függenek a gyártási technológiától, illetve a felhasznált alapanyagok százalékos összetételétől, és a szennyeződésektől is.

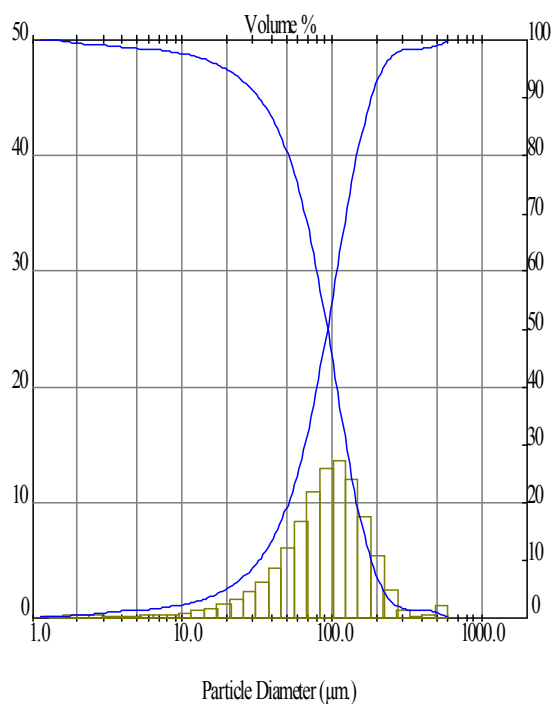
Az LTCC technológiánál fontos, hogy az üveg komponensei 850 °C-on kristályosodjanak, és a lehető legkisebb legyen a hőtágulásuk, mely az összetételtől függ.

A kompozitunkhoz 3 szemcsefrakciót használtunk fel a boroszilikát-hulladéküvegből, melyet aprítás után, szitálással választottunk szét (8. ábra).

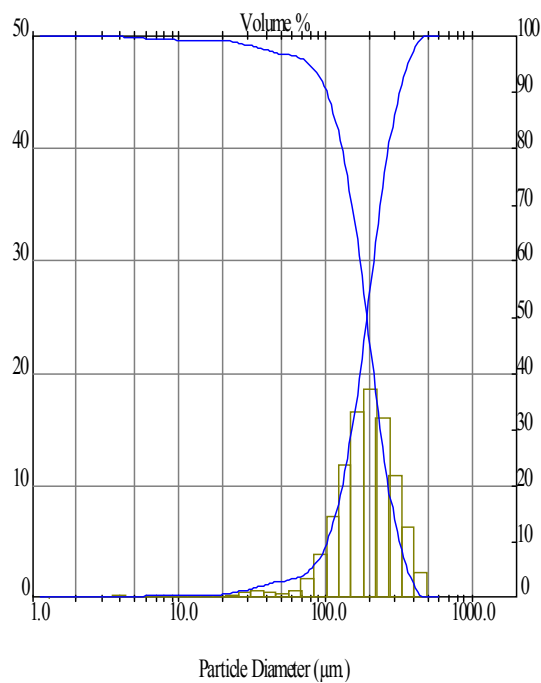


8. ábra
Aprított majd különböző frakciókra szétválasztott üveg hulladék

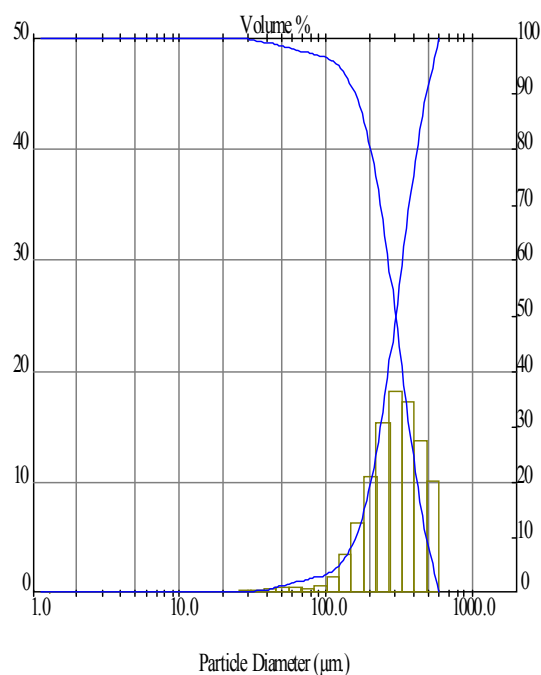
A lézer granulométerrel az üveg egyes frakcióiról készült áthullási görbéket a 9. 10. és 11. ábra szemlélteti.



9. ábra
 $d < 0,125 \text{ mm}$



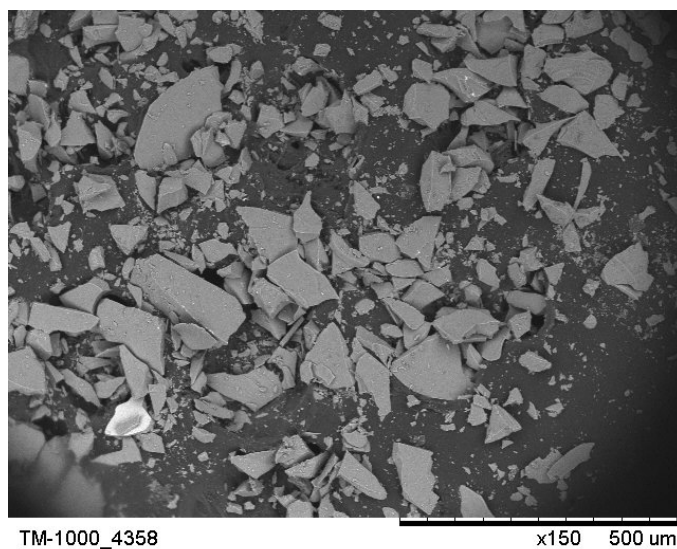
10. ábra
 $d = 0,125 \text{ mm}$



11. ábra
 $d = 0,2 \text{ mm}$

Az áthullási görbéken látható hogy az közel megegyezik az általunk szétválasztott frakciókkal. A 9. ábrán valóban a 0,125 mm-től kisebb szemcsék dominálnak. A 10. ábrán a 0,125 mm-esek és végül a 11. ábrán a szemcsék nagy része a 0,2 mm körüli tartományba esik.

Az üvegről is készítettünk Scanning elektronmikroszkóp segítségével SEM felvételeket. A 12. ábrán ez látható.



12. ábra
 Üvegről készült SEM felvétel

A 12. ábrán jól látható, hogy a porrá aprított üveg szilánkosan tört. Ez az üveg rideg tulajdonságaiból adódik.

4. Al_2O_3 -ÜVEG KOMPOZIT PRÓBATESTEK KÉSZÍTÉSE

4.1. Por keverékek készítése, sajtolása

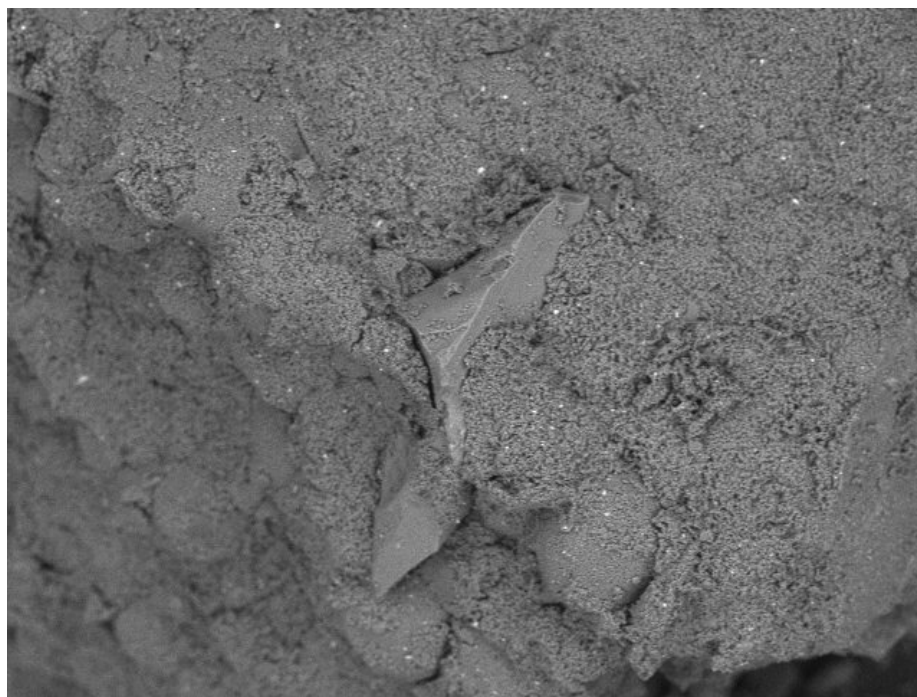
Különböző porkeverékeket készítettünk, úgy, hogy a sajtolóporhoz 0, 2, 4, 6, 8 és 10 m/m % ban kevertünk egy-egy frakcióból üveget, majd ezeket a keverékeket használtuk fel a tanszéki laboratóriumban található porsajtoló-berendezéshez.

5 és 10 tonnás préserőt alkalmazva 2 fféle próbatestet (henger és hasáb) készítettünk a porkeverékekből, így összesen 180 próbatest készült (13. ábra), hogy a későbbiekben minden vizsgálathoz elég legyen, illetve az átlagszámításoknál is több értéket kapjunk, a pontosabb mérési eredményekért.



13. ábra
Sajtolással készített próbatestek

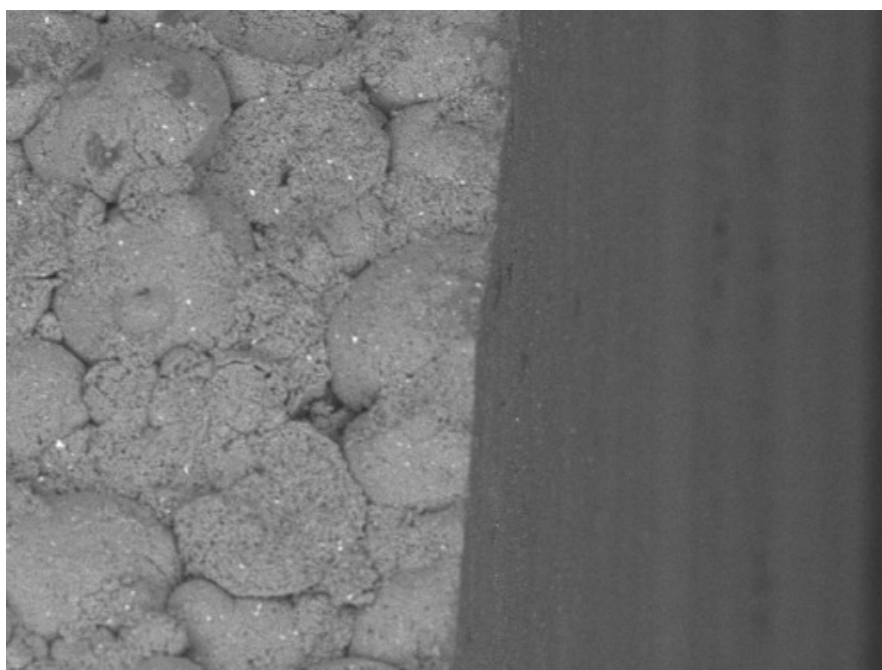
A sajtolott próbatestekről szintén készítettünk SEM felvételeket. Ezeket a 14. és 15. ábra szemlélteti.



TM-1000_4367

x300 300 um

*14. ábra
Sajtoló próbatestben látható nagyobb üveg szemcse*



TM-1000_4392

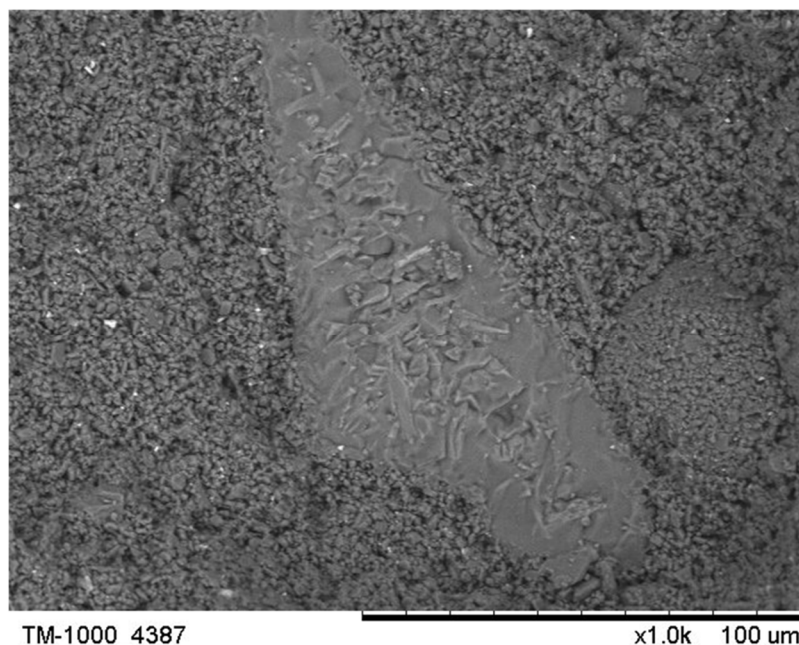
x300 300 um

*15. ábra
Préselt anyag a prészerszám fala mentén*

4.2. Sajtolt próbadarabok kiégetése

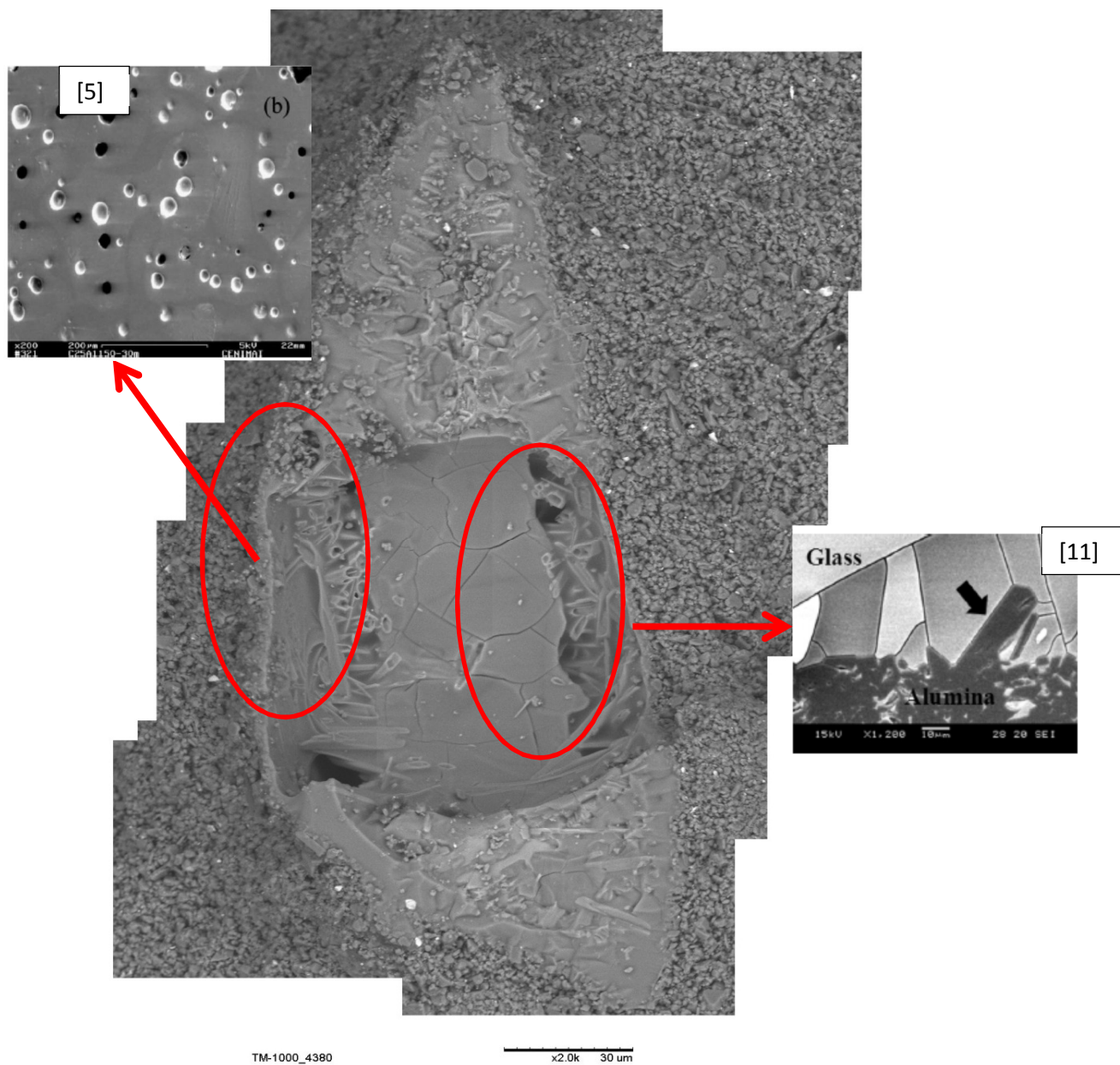
Mielőtt kiégettük volna az összes próbadarabot, próbaégetéseket végeztünk 3-3 mintán, hogy megtaláljuk a megfelelő hőmérsékletet. 900, 1100 és 1300°C-on, 100°C/órás felfűtéssel végeztük a próbaégetéseket.

A próbaégetett darabokról SEM felvételeket készítettünk. Ezek elemzésekor azt vettük észre, hogy a 900°C-on szinterelt daraboknál nem történt elváltozás, az üveg nem olvadt meg, így nem tudott kialakulni a kompozit, valójában maradt az eredeti préselt darab mikrostruktúrája, mechanikai szilárdsága is, mert kézzel el tudtuk törni. Az 1100°C-on égetett daraboknál (16. ábra) már látható az esetleges üvegolvadék, de még ez sem nagymértékű, viszont az 1300°C-on égetett daraboknál (17. ábra) már megjelenik a nagyobb arányú olvadékfázis. A próbaégetés eredményeként az 1300°C-os szinterelést választottuk a többi darabhoz, mert itt már jól felismerhető volt a változás mértéke. Ez ugyan magasabb, mint a gyártás során alkalmazott 1150°C, de számunkra elsősorban most egy jó tulajdonságokkal bíró kompozit képzése a cél, melynek szinterelési hőmérsékletét a későbbiekben adalékanyagok hozzáadásával csökkenthetők.



16. ábra
1100 °C-on szinterelt próbadarab SEM felvétele

Az alábbi ábrán az 1300°C-on kiégetett darab SEM felvétele látható. Ezen már jól látható az üvegmátrixú Al_2O_3 kompozit, melyet több kutató is publikált már [5,11].



17. ábra

Az 1300°C-on kialakult kompozit SEM felvétele összehasonlítva más kutatók eredményeivel

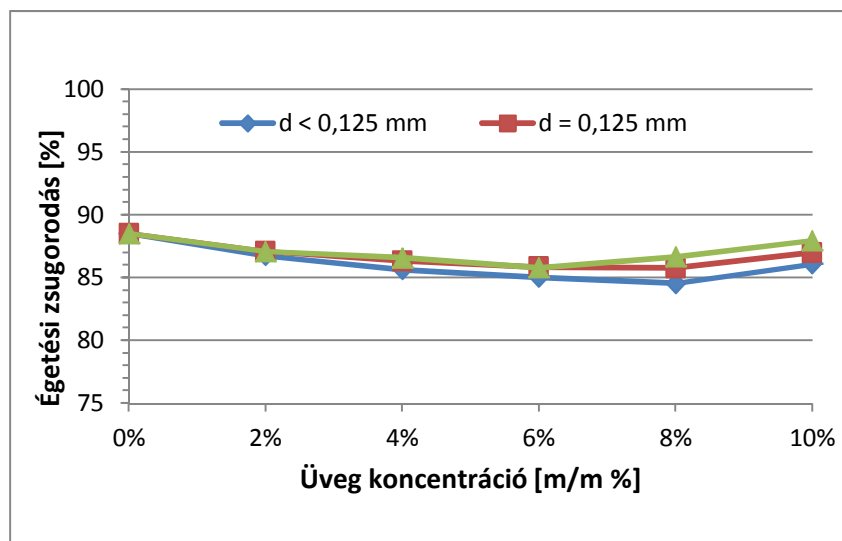
5. PRÓBATESTEKEN VÉGZETT VIZSGÁLATOK

A kiégetett mintadaraboknak különböző tulajdonságait vizsgáltuk. Kíváncsiak voltunk, miként változik a kompozit égetési zsugorodása, vízfelvétele, porozitása illetve nyomószilárdsági értéke a bekevert üveg koncentrációjának függvényében.

Ezen értékek kiszámításához, számos mérést végeztünk a próbatesteken: égetés előtt, illetve után térfogat és tömeg mérések, desztillált vízben való forralás utáni tömeg, valamint vízben mért tömeg mérése.

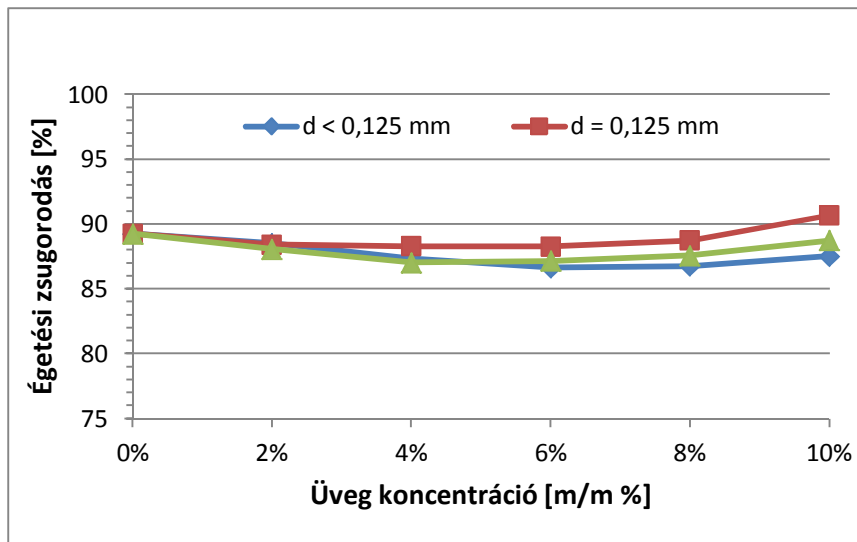
5.1. Égetési zsugorodás vizsgálata

A zsugorodás kiszámításához szükséges méreteket (átmérő, magasság) a hengeres próbatesten mértük égetés előtt és után. A 18. ábrán látható, hogy az üveg koncentrációjának növekedésével csökken a zsugorodás egy ideig, majd a 10 %-osnál már újra emelkedés figyelhető meg. Ez az üveg elrendeződésével és alakíthatóságával magyarázható.

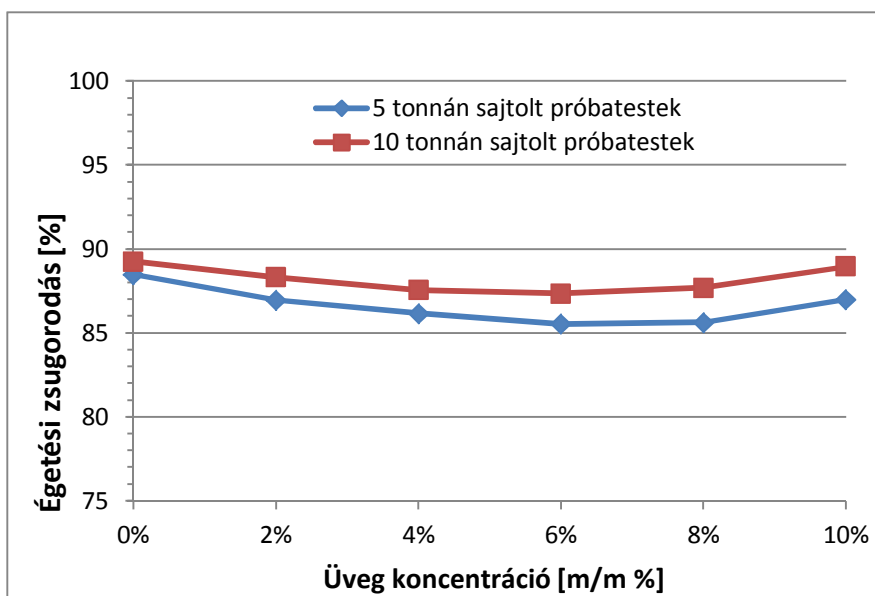


18. ábra
Égetési zsugorodás alakulása 5 tonnás erővel sajtolt próbatestek esetén

A 10 tonnás sajtoló erővel készült próbatesteknél ez a tendencia még jobban látható (19. ábra), a két diagramot összevetve pedig, elmondható, hogy a zsugorodás mértéke nagyobb a kisebb erővel sajtolt daraboknál (20. ábra).



19. ábra
Égetési zsugorodás alakulása 10 tonnás erővel sajtolt próbatestек esetén



20. ábra
Égetési zsugorodás alakulása a különböző sajtoló nyomások esetén

5.2. Vízfelvétel vizsgálata

Ehhez a vizsgálathoz a hasáb próbatesten végeztünk méréseket, és az alábbi képlettel számoltuk ki a vízfelvétel értékét [6]:

$$V_k = \frac{m_v - m_2}{m_2} \times 100 \quad [\%]$$

Ahol:

V_k : vízfeltevő képesség [%]

m_v : a próbatest tömege 3 órás forralás után [g]

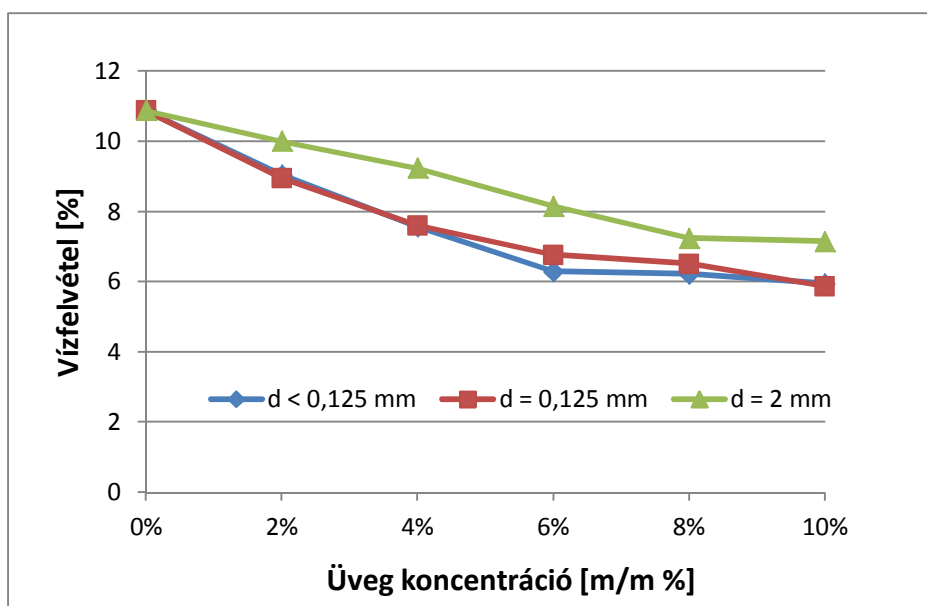
m_2 : a próbatest tömege égetés után [g]

A 21. ábrán a próbadarabok vízben való forralása látható.

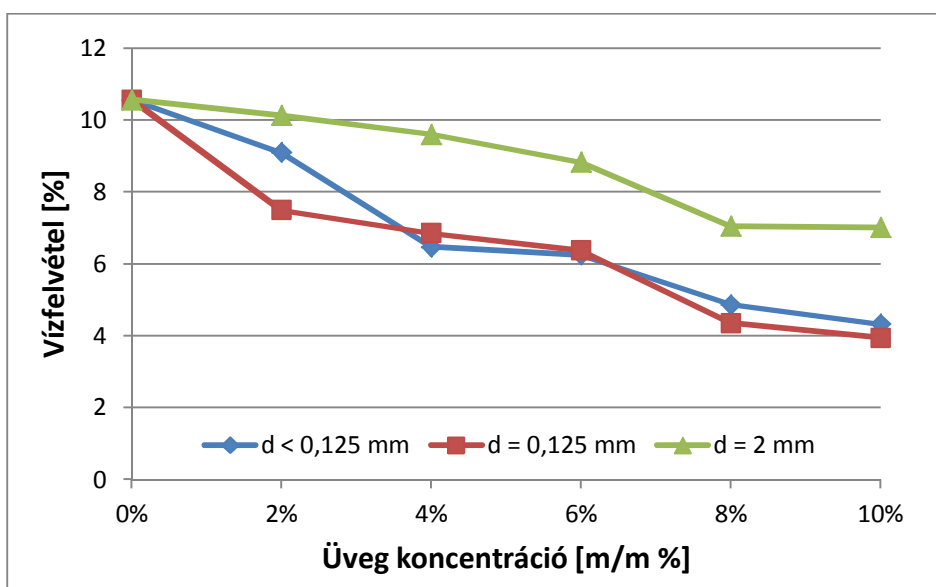


21. ábra
Próbadarabok forralása a vízfelvétel számításához

A kiszámított vízfelvelek értékeit a különböző nyomásokkal sajtolt próbadarabok esetén a 22. és 23. ábra szemlélteti.



22. ábra
Vízfelvétel alakulása az 5 tonnával sajtolt próbadarabok esetén



23. ábra
Vízfelvétel alakulása az 10 tonnával sajtolt próbadarabok esetén

A vízfelvétel jól látható módon mind az üveg szemcsenagyságával mind a koncentrációjának növelésével csökken.

5.3. Porozitás vizsgálata

A porozitás meghatározásához hidrosztatikai mérleget használtunk. A felforrt próbadarabokat tömegmérés után a mérleg desztillált vízbe lógó karjára tettük, és mértük a víz alá merülő testek tömegét. Ebből a porozitás a következő képlettel adódik [6]:

$$P = \frac{m_v - m_2}{m_v - m_3} \times 100 \text{ [%]}$$

Ahol:

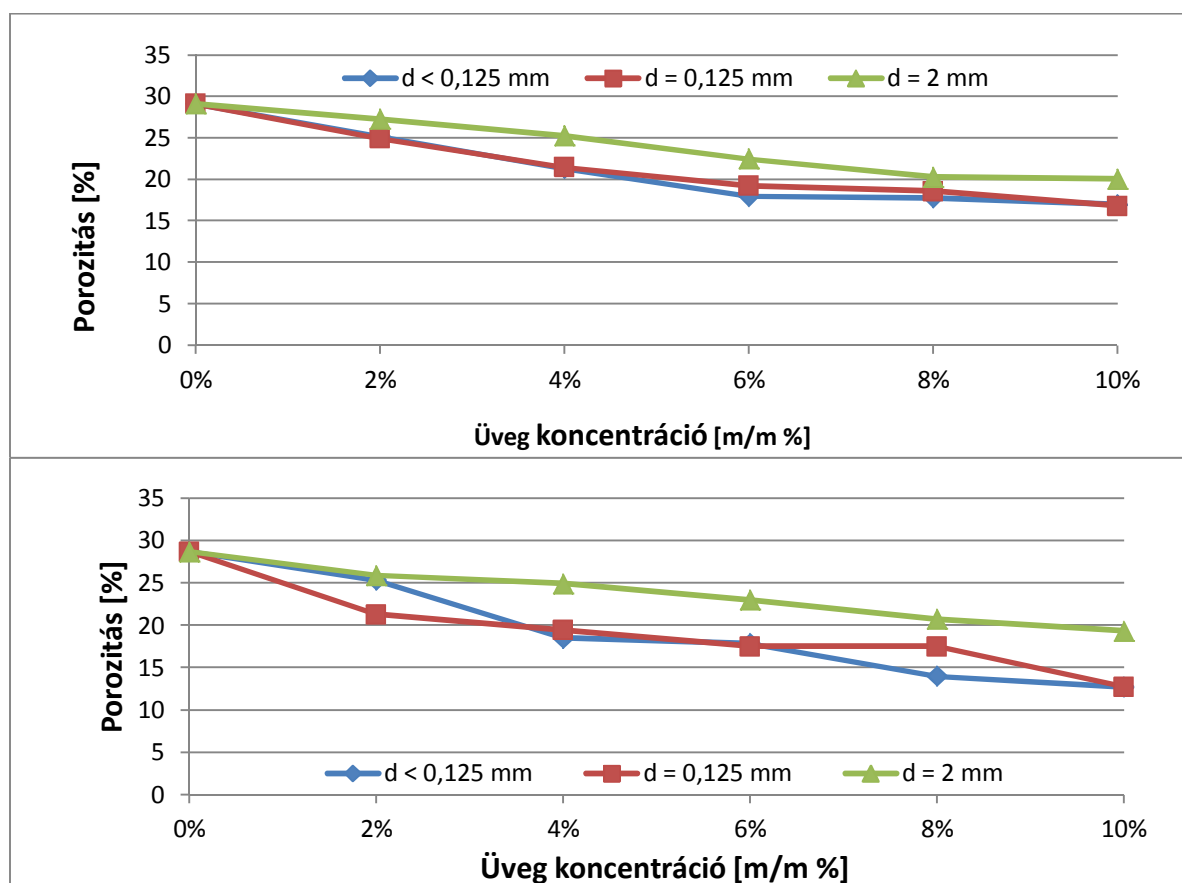
P: porozitás [%]

m_v : a próbatest tömege a forralás után [g]

m_2 : a próbatest tömege égetés után [g]

m_3 : a próbatest vízben mért tömege [g]

A számított eredményeket a 24. ábra szemlélteti.



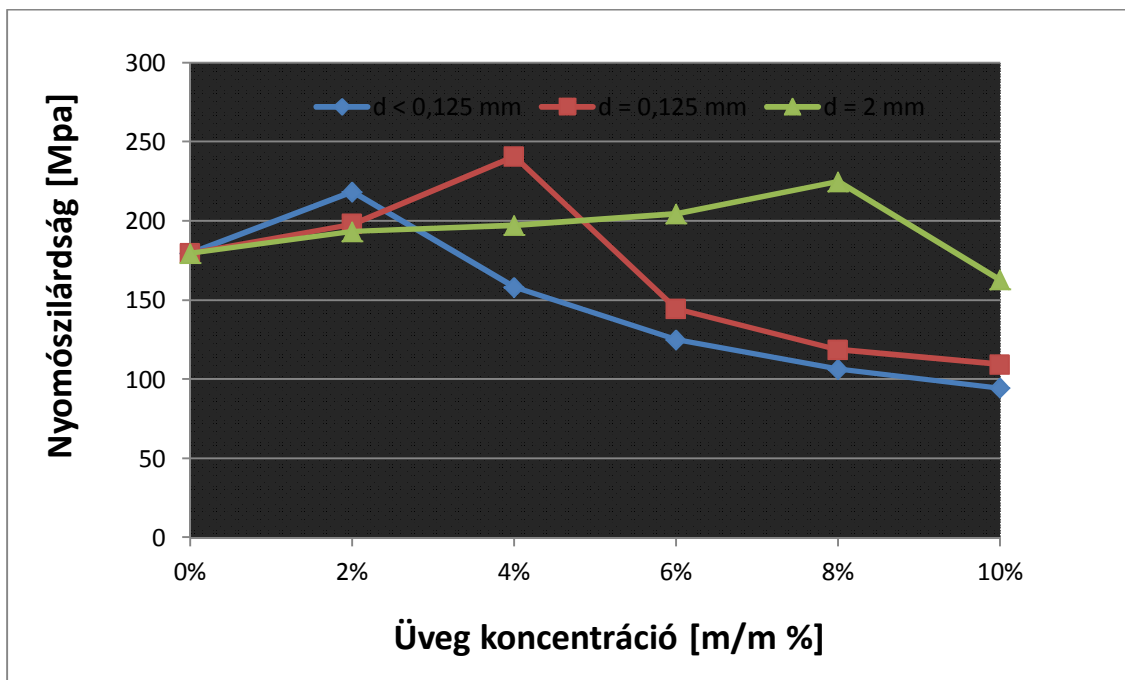
24. ábra

Porozitás az üveg mennyiségének függvényében: Fent: 5 tonnás sajtoló erőnél, lent 10 tonnás sajtoló erőnél

A 24. ábrán az látható, hogy a porozitás a vízfelvétellel azonos módon változik az üveg szemcseméretének és koncentrációjának függvényében.

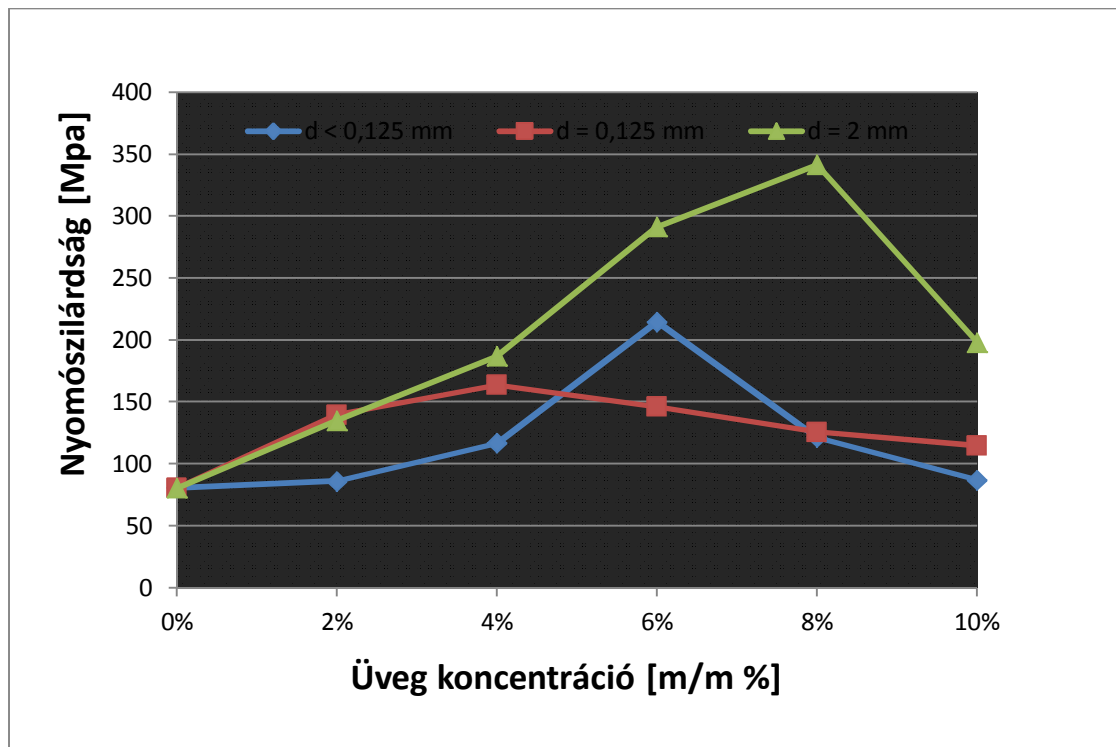
5.4. Nyomószilárdsági vizsgálatok

A tanszéki laborban található mechanikus présgépen végeztük el a nyomószilárdsági vizsgálatokat is, melynek eredménye a 25. és 26. ábrán láthatóak.



25. ábra

Nyomószilárdsági értékek alakulása az 5 tonnás nyomással sajtolt próbatestek esetén



26. ábra

Nyomószilárdsági értékek alakulása az 10 tonnás nyomással sajtolt próbatestek esetén

A diagramokon jól látható, hogy a bekevert üveg csak egy bizonyos koncentráció értékig növelte a nyomószilárdság értékét egy bizonyos koncentráció értékig, ezután csökkentette azt. Így maximumos jelleggörbét kapunk, melynek csúcspontja függ a szemcseméretektől.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A high-tech kerámiák kutatása és fejlesztése a mai napig is lendületes, gyors, és mindig újabb kérdéseket vet fel maga után. Az LTCC technológia a HTCC technológia alapján kifejlesztett új eljárás, amivel még vékonyabb rétegeket lehet létrehozni, befolyásolható a vertikális és horizontális zsugorodás, ami nagyfokú anizotrópiára utal. Újabb kutatási irányt jelenthet az anizotrópia vizsgálata valamint a bevezetőben említett adalékanyagok hatása. Az adalékanyagok hőmérsékletcsökkentő hatásúak lehetnek, melyek 800-900°C-ra csökkenthetik az 1300°C-os égetési hőmérsékletet.

Az eddigi vizsgálatainkat összefoglalva elmondható, hogy sikerült előállítanunk a célként kitűzött kompozitot, ugyanakkor további kérdés és mellékág felderítése még a feladatunk, hogy a tulajdonságok és előállítási paraméterek között további összefüggéseket állapíthassunk meg.

Az előállított darabokról készült SEM felvételek bemutatták a kompozitunkat. A mért fizikai tulajdonságok mind összefüggésben vannak az üveg fázis koncentrációjával és szemcseméretével. A vízfelvétel és porozitás az üveg koncentrációjának növelésével csökken, míg az égetési zsugorodás parabola jelleggel változik. A nyomószilárdságnál maximumos jelleggörbét kaptunk, melynek csúcspontja az adagolt üveg koncentrációjának függvénye.

További vizsgálatként szeretnénk hajlítószilárdsági vizsgálatokat végezni, valamint röntgendifrakciós vizsgálattal meghatározni az alkotó fázisok mennyiségét.

A dolgozat a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 "A Miskolci Egyetemen működő tudományos képzési műhelyek összehangolt minőségi fejlesztése" projekt támogatásával készült.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1.] Charles Q. Scrantom: LTCC Technology Where We Are And Where We're Going (2000)
- [2.] LTCC-Multilayer Ceramic For Wireless And Sensor Applications
<http://www.ltcc.de>
- [3.] Horváth Eszter: Alacsony Hőmérsékleten Kiégetett Kerámia-LTCC, BME
- [4.] Dr. U. Schmid: LTCC Technology: Current Status And Future Perspectives
Universität Des Saarlandes
- [5.] R.C.C. Monteiro*, M.M.R.A. Lima: Effect Of Compaction On The Sintering Of Borosilicate-Glass / Alumina Composites.
Journal Of The European Ceramic Society 23 (2003) 1813–1818
- [6.] Dr. Tamás Ferenc: Szilikátipari Kézikönyv
Műszaki Könyvkiadó, 1982 (553-668)
- [7.] Lipusz Dóra- A, „Sokarcú” Műszaki Kerámia- Szakmai Gyakorlat Beszámoló (2011)
- [8.] A.A. El-Kheshena*, M.F. Zawrahb: Sinterability, Microstructure And Properties Of Glass/Ceramic Composites.
Ceramics International 29 (2003) 251–257
- [9.] M.M.R.A. Lima A, R.C.C. Monteiro A, M.P.F. Graça B, M.G. Ferreira Da Silva C: Structural, Electrical And Thermal Properties Of Borosilicate Glass–Alumina Composites
Journal Of Alloys And Compounds 538 (2012) 66–72
- [10.] Alumina Hyung Bong Lim, Won-Seung Cho, Cheol Y. Kim: Effect Of Particle Size Distribution Of Alumina On Strength Of Glass-Infiltrated
Ceramics International 38 (2012) 3069–3074