

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola



A VÍZÜVEGES KÖTŐANYAGTARTALMÚ
HOMOKKEVERÉKBEN HŐTERHELÉS HATÁSÁRA
BEKÖVETKEZŐ VÁLTOZÁSOK VIZSGÁLATA

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Dargai Viktória

okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:

Dr. Varga László

egyetemi docens

Miskolc

2020

Témavezetői ajánlás

Dargai Viktória

*A vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékben hőterhelés hatására bekövetkező
változások vizsgálata*
című PhD értekezéshez

Dargai Viktória BSc-s hallgatóként kezdett el foglalkozni az öntődei formázóanyagok vizsgálatával. A terület iránti elhivatottságát jelzi, hogy a szakdolgozatát, majd pedig a diplomamunkáját is ebben a témában írta. MSc-s hallgatóként, cserediák program keretén belül egy szemesztert töltött a TU Bergakademie Freiberg egyetemen, ahol lehetősége volt a diplomamunkájához kapcsolódó mérések elvégzésére. A doktoranduszi tevékenysége alatt 3 évig Promotionstelle-n volt a Nematik Linz GmbH alumínium öntődében, ahol a kutatómunkájához kapcsolódóan végezte üzemi körülmények között a kutatásait.

A doktoranduszi tevékenysége alatt is aktívan részt vett a formázóanyagokkal kapcsolatos kutatásokban, amelyből számos előadás és folyóirat publikáció keretén belül is bemutatta tudományos eredményeit. A kutatómunkáját szisztematikusan felépítve végezte és kiemelkedő szorgalomról és céltudatosságról tett tanúbizonyságot.

A kutatási témája az ipar számára aktuális kérdéseket és a hiányosságokat tárja fel a vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékek alkalmazása során a hőterhelés hatására bekövetkező folyamatok vizsgálatával. Az eredményei mind tudományos, mind pedig gyakorlati szempontból hasznosítható, tudományos alapokra épülő új vizsgálati, elemzési módszereket és összefüggéseket dolgozott ki.

Kijelentem, hogy Dargai Viktória önálló kutatómunkára és a PhD fokozat megszerzésére alkalmas.

Miskolc, 2020. július 23.



Dr. Varga László
egyetemi docens
Témavezető

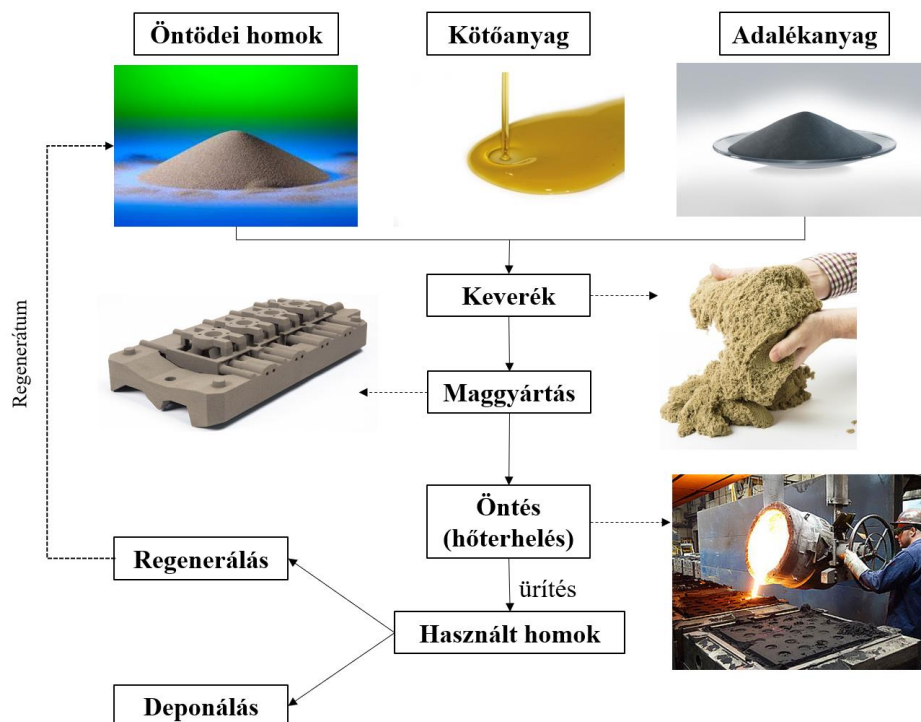
TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
2. AZ ÖNTÖDEI FORMÁZÓANYAGOK TÍPUSAI.....	8
2.1. AZ ALAPHOMOKOK TÍPUSAI	8
2.2. A FORMÁZÓKEVERÉKEK TÍPUSAI	9
2.2.1. A FIZIKAI- ÉS MECHANIKAI KÖTÉSEN ALAPULÓ FORMA- ÉS MAGGYÁRTÁSI FOLYAMATOK	10
2.2.2. A KÉMIAI KÖTÉSEN ALAPULÓ FORMA- ÉS MAGGYÁRTÁSI FOLYAMATOK	11
2.3. A SZERVES ÉS SZERVETLEN KÖTŐANYAGRENDSZEREK ALKALMAZÁSÁNAK IPARI HÁTTERE	11
2.4. A SZERVETLEN KÖTŐANYAGRENDSZEREK TÍPUSAI	16
2.4.1. AZ ALKÁLI-SZILIKÁT OLDATOK ELŐÁLLÍTÁSI FOLYAMATA	17
2.4.2. AZ ALKÁLI-SZILIKÁT OLDATOK KÉMIAI ÉS FIZIKAI TULAJDONSÁGAI.....	19
2.4.2.2. A vízüveg oldatok sűrűsége és viszkozitása.....	21
3. A VÍZÜVEGES FORMÁZÓANYAGOK KIKEMÉNYEDÉSE ÉS A FORMÁZÁSI TECHNOLÓGIÁK BEMUTATÁSA.....	21
3.1. AZ ALKÁLI-SZILIKÁT OLDATOK POLIMERIZÁCIÓJA	21
3.2. A VÍZÜVEGES FORMÁZÓANYAGOK KIKEMÉNYEDÉSÉNEK A FOLYAMATA.....	23
3.3. A VÍZÜVEGES MAGGYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁK	24
3.3.1. A VÍZÜVEG-CO ₂ -ELJÁRÁS.....	24
3.3.3. A MELEGEN KÖTŐ VÍZÜVEGES ELJÁRÁSOK.....	26
3.3.3.1.1. Az AWB®-eljárás.....	27
3.3.3.2. A vízüveges meleg levegős eljárások.....	28
3.3.3.2.1. Az Inotec® kötőanyagrendszer.....	28
3.3.3.2.2. A Cordis® kötőanyagrendszer.....	29
4. AZ ÖNTÖDEI HASZNÁLT HOMOKOK ÚJRA-HASZNOSÍTÁSA.....	29
4.1. A REGENERÁLÁSI TECHNOLÓGIÁK ISMERTETÉSE.....	30
4.1.3. A MECHANIKUS REGENERÁLÁS.....	31
4.1.4. A TERMÍKUS-MECHANIKUS REGENERÁLÁS	32
4.2. A REGENERÁLÁS HATÁSFOKÁT MINŐSÍTŐ TÉNYEZŐK	32
5. A KUTATÓMUNKÁM SORÁN ALKALMAZOTT ALAPANYAGOK, BERENDEZÉSEK ÉS AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK ÁTTEKINTÉSE	33
5.1. A KÍSÉRLETEIMHEZ ALKALMAZOTT ALAPANYAGOK.....	33
5.1.1. AZ ALAPHOMOK BEMUTATÁSA.....	33
5.1.2. A VÍZÜVEGES KÖTŐANYAG BEMUTATÁSA.....	34
5.2. A VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉKEK ÉS A HAJLÍTÓ PRÓBATESTEK ELŐÁLLÍTÁSA.....	34
5.3.1. A PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATOK BEMUTATÁSA.....	37
5.3.2. A VÍZÜVEGES KÖTŐANYAGTARTALMÚ OLDATOK ELEKTROMOS VEZETŐKÉPESSÉGÉNEK A MEGHATÁROZÁSA.....	37
5.3.3. AZ OLDHATÓ ALKÁLI-OXID TARTALOM MEGHATÁROZÁSA.....	38
5.3.4. A SZÁRÍTOTT VÍZÜVEG VIZSGÁLATA	39
5.3.4.1. A termogravimetrikus vizsgálatok	39

5.3.4.2. A röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálatok	40
<u>6. A VÍZÜVEGBEN HŐTERHELÉS HATÁSÁRA LEJÁTSZÓDÓ KRISTÁLYTANI ÁTALAKULÁSOK VIZSGÁLATA</u>	<u>41</u>
6.1. A SZÁRÍTOTT VÍZÜVEG TERMOGRAVIMETRIÁS BERENDEZÉSEL TÖRTÉNŐ VIZSGÁLATA.....	41
8.1. A KÖTŐANYAG KONCENTRÁCIÓ HATÁSA AZ ELEKTROMOS VEZETŐKÉPESSÉGRE ÉS AZ OLDHATÓ ALKÁLI-OXID TARTALOMRA	47
9.1. AZ ELVÉGZETT KÍSÉRLETSOROZATOK BEMUTATÁSA	51
9.2. A VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉK KÖRFOLYAMATBAN TÖRTÉNŐ FELHASZNÁLÁSA SORÁN BEKÖVETKEZŐ OLDHATÓ ALKÁLI-OXID TARTALOM VÁLTOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA	54
9.2.1. A kötőanyag tartalom vizsgálata a vízüveges homokkeverékek alkalmazása során .	54
9.2.2. A SAJÁT KÍSÉRLETEIM BEMUTATÁSA.....	56
9.3. A HŐTERHELTE VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉK KÖRFOLYAMATBAN TÖRTÉNŐ FELHASZNÁLÁSA SORÁN BEKÖVETKEZŐ GRANULOMETRIAI TULAJDONSÁGOK VIZSGÁLATA	61
9.3.1. A VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉK KÖRFOLYAMATBAN TÖRTÉNŐ VISSZAJÁRATÁSÁNAK A HATÁSA A GRANULOMETRIAI TULAJDONSÁGOKRA.....	61
9.3.2. A SAJÁT KÍSÉRLETEIM BEMUTATÁSA.....	63
9.4. A HŐTERHELTE VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉK HALOMSŰRŰSÉGÉNEK ÉS AZ EBBŐL KÉSZÍTETT HAJLÍTÓ PRÓBATESTEK TÉRFOGATSŰRŰSÉGÉNEK VIZSGÁLATA	68
9.5. A VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉK KÖRFOLYAMATBAN TÖRTÉNŐ FELHASZNÁLÁSA SORÁN BEKÖVETKEZŐ SZILÁRDSÁGI TULAJDONSÁGOK VÁLTOZÁSÁNAK A VIZSGÁLATA...	73
9.5.2. A SAJÁT KÍSÉRLETEIM BEMUTATÁSA.....	77
9.5.2.1. A hajlító próbatestek 30 másodperces tárolását követően mért hajlítószilárdság értékének és térfogatsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében	78
9.5.2.2. A hajlító próbatestek 1 órás tárolását követően mért hajlítószilárdság értékének és térfogatsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében	79
9.5.2.3. A hajlító próbatestek 1 órás hőterhelést követően mért hajlítószilárdság értékének és térfogatsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében	82
9.5.2.4. A hajlító próbatestek 30 másodperces és 1 órás tárolását követően mért hajlítószilárdság értékek összehasonlítása	84
9.5.2.5. A hajlító próbatestek 1 órás tárolását és 1 órás hőterhelését követően mért hajlítószilárdság értékek összehasonlítása	84
<u>10. ÖSSZEFOGLALÁS, AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA</u>	<u>86</u>
<u>11. SUMMARY</u>	<u>89</u>
<u>IRODALOMJEGYZÉK.....</u>	<u>102</u>
<u>SAJÁT KÖZLEMÉNYEK A TÉMÁBAN</u>	<u>107</u>
<u>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</u>	<u>108</u>
<u>MELLÉKLETEK.....</u>	<u>109</u>

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A formázó- és maghomok-keverékekből elvesző formák és magok készülnek, amelyek az öntést követően többnyire elvesztik szilárdságukat, ezáltal eltávolíthatók az öntvény belső üregeiből. Az eltávolítást követően ezt a használt formázó- és maghomok-keveréket az öntődék próbálják minél nagyobb arányban újra-hasznosítani az öntödei homokrendszer körfolyamatában [1]. Az öntödei homokrendszer körfolyamatát az 1. ábra mutatja be.



1. ábra Az öntödei homokrendszer körfolyamata (Képek: [2-8])

Manapság a formák és a magok gyártásához leggyakrabban a szerves kötőanyagrendszereket alkalmazzák, azonban az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb teret hódít a szervesetlen (vízüveges) kötőanyagrendszerek alkalmazása az alumínium-, a vas-, ill. az acél öntődékben is. Ennek háttérében a vevők és az állam által megkövetelt környezetvédelmi és egészségügyi elvárások és előírások állnak. Ezen elvárások teljesítése nagy kihívást jelent az öntődék és a kötőanyaggyártók (beszállítók) számára is. Az öntődék a vízüveges kötőanyagrendszerek alkalmazása során új maggyártási technológiával és teljesen új kihívással kerülnek szembe. A kötőanyaggyártók igyekeznek lépést tartani az öntődékekkel szembeni elvárások háttérből történő támogatására, ezért a felmerülő problémák és kihívások megoldására új típusú, modern vízüveges kötőanyagrendszereket fejlesztenek, ill. számos kutatási projektet indítanak el. Az 1. táblázatban a vízüveges kötőanyagok alkalmazása során felmerülő problémák

listája látható a szakirodalmi ismeretanyagok alapján az öntödékre jellemző részfolyamatok szerint csoportosítva.

1. táblázat A vízüveges kötőanyagok alkalmazása során felmerülő kihívások és problémák listája az öntödékre jellemző részfolyamatokra bontva

Részfolyamat	Kihívások, problémák
Maggyártás	<ul style="list-style-type: none"> – A maghomok-keverék készítéséhez alkalmazott vízüveges kötőanyagrendszer (kötőanyag és adalékanyag) típusa és a tulajdonságai – Az öntödei homok (újhomok, regenerátum) granulometriai tulajdonságai befolyásolják a megfelelő receptúra kiválasztását – A homokkeverék felhasználhatósági ideje (bench life) – A magok megfelelő mechanikai szilárdsága a magszekrényből való kivételt követően – A magok mérettartóssága
Tárolás	<ul style="list-style-type: none"> – A vízfelvétel miatt alacsony páratartalmú helyen kell tárolni a magokat
Öntés	<ul style="list-style-type: none"> – Az öntvény geometria és a fém eltérő hőmérséklet viszonyokat okoz a magon belül, ami befolyásolni fogja az üríthetőségi tulajdonságokat – A megfelelő mechanikai szilárdság a magok szállítása és kokillába helyezése során, ill. az olvadékkal való érintkezés közben – Homok feltapadása az öntvény felületére
Regenerálás	<ul style="list-style-type: none"> – A regenerálási technológia hatékonysága – Ingadozó maradék kötőanyagtartalom – Porfrakció képződése – Használt homok, ill. regenerátum újra-hasznosíthatósága
Minősítő módszerek	<ul style="list-style-type: none"> – Az ún. maradék kötőanyagtartalom meghatározása

Az 1. táblázatban összefoglalt problémákkal és kihívásokkal kapcsolatban a szakirodalmi ismeretanyagban bemutatott kísérletekben és eredményekben több ellentmondás, ill. hiányosság is fellelhető, amelyek egy része a kutatómunkám alapjául szolgált. A disszertációmban a következő vízüveges kötőanyagokkal kapcsolatos hiányosságok feltárásával foglalkozom.

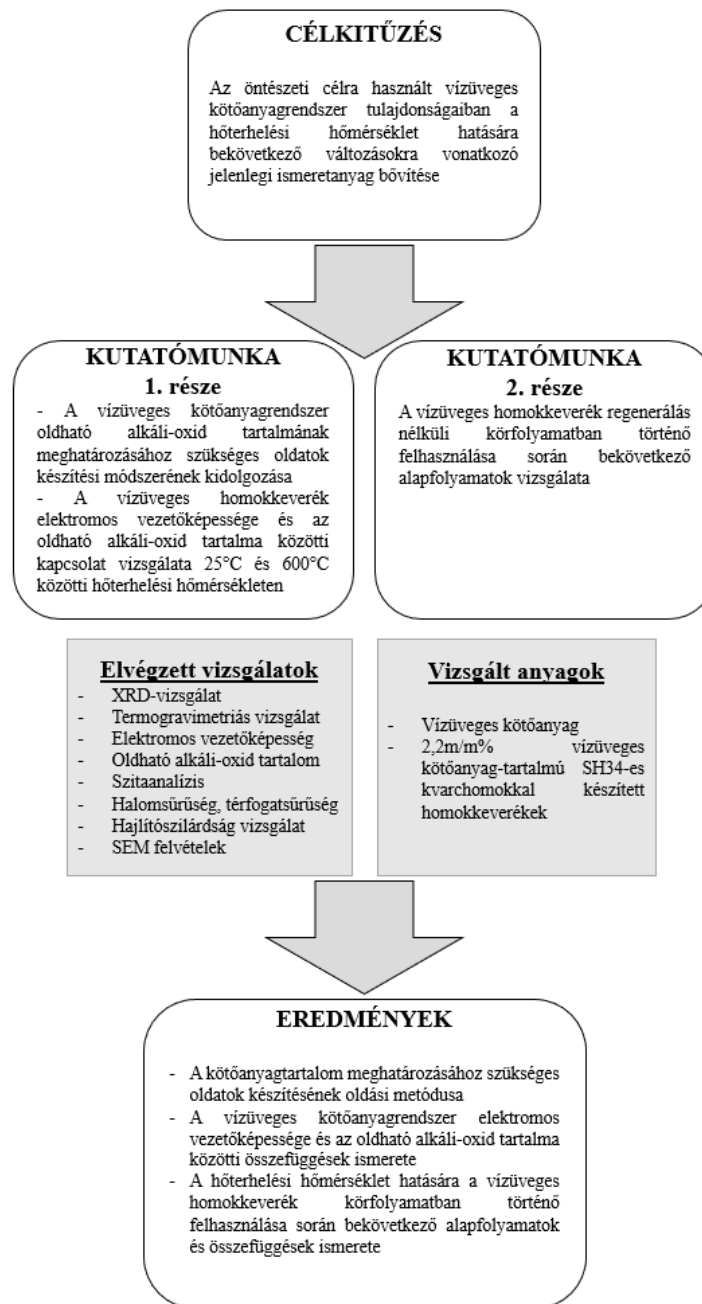
A vízüveges homokminták laborban történő minősítéséhez, úgymint a pH, az elektromos vezetőképesség, a kötőanyagtartalom, kiemelt fontosságú a megfelelő oldatkészítési módszer alkalmazása. A szakirodalmi ismeretanyagban nem található egyértelmű oldási módszer, arra vonatkozólag, miként készítik elő az oldatokat az egyes minősítő módszerek esetében, ezért a disszertációmban bemutatott kísérleteimhez kidolgoztam egy standard oldatkészítési módszert.

A vízüveges kötőanyagtartalmú használt homokkeverék és regenerátum ún. maradék kötőanyagtartalmának meghatározására a szakirodalomban az egyik elterjedt mérési metódus a Na_2O tartalom meghatározása mellett, az elektromos vezetőképesség mérése. A szakirodalomban bemutatott kísérleti eredmények alapján megállapítható az, hogy alumínium öntődeből (olvadék hőmérséklet max. $700-750^\circ\text{C}$) származó használt homok és mechanikus regenerátum esetében az elektromos vezetőképesség és a Na_2O tartalom változása között nem állapítható meg egyértelmű összefüggés. Ellenben a vas- és acél-öntődeből (olvadék hőmérséklet min. $1200-1300^\circ\text{C}$) származó mechanikus regenerátum esetében a 2 paraméter közel azonos trend szerint változik a regenerálási körök során. A szakirodalomban egyértelműen megfigyelhető az eredmények közötti ellentmondás és hiányzik annak vizsgálata, hogy az alumínium öntészet esetében az elektromos vezetőképesség valóban alkalmazható-e a vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékek minősítésére. A szakirodalmi ismeretanyagban megtalálható ellentmondás és hiányosság okát kísérleti úton kívántam feltárni a disszertációm első részében bemutatott méréseken keresztül.

A szakirodalmi ismeretanyagban elterjedt az újhomokkal és valamilyen regenerálási eljárásból származó regenerátum alkalmazásával készült magok (próbatetek) vizsgálata. Az újhomok alkalmazása esetén a vizsgálatok során a fő szempont az, hogy miként változnak az egyes formázóanyagokra jellemző tulajdonságok, meghatározott peremfeltételek mellett. Nagy hangsúlyt fektetnek arra, hogy vizsgálják a különböző adalékanyagok és a hőterhelési hőmérséklet hatását, ill. úgy végeznek vizsgálatokat, hogy magát a vízüveges kötőanyagot modifikálják. A különböző szakirodalmi adatokban közös pont az, hogy nem vizsgálják a homokrendszer összes paraméterét, mint például a granulometriai tulajdonságokat, a szilárdsági tulajdonságokat, a kötőanyagtartalmat, a szemcseösszetételt, hanem célirányosan kiemelnek egy-két paramétert és azzal foglalkoznak. A vízüveges kötőanyagtartalmú regenerátumok esetében a szakirodalomban megtalálható adatok alapján elmondható, hogy a kutatómunkák célja a legjobb minőségű regenerátum előállítása. Ezen kísérleteknél főként a szilárdsági tulajdonságok és a kötőanyagtartalom vizsgálata kerül előtérbe, azonban a teljes homokrendszert itt sem vizsgálják, továbbá a vizsgálatok eredményeit rengeteg tényező befolyásolja, úgymint a regeneráló berendezés hatékonysága, a regenerálási ciklusok száma, a regenerálás időtartama, az alkalmazott receptúra, az újhomokkal történő frissítés mértéke és a használt homok kötőanyagtartalma. A szakirodalmi ismeretanyagokban elsődlegesen a regenerálás fejlesztésével, optimalizálásával kapcsolatban végeznek

kutatásokat, azonban azzal kevesen foglalkoznak, hogy milyen folyamatok játszódnak le a használt (hőterhelt) homokkeverék körfolyamatában történő alkalmazása során. A disszertációmban bemutatott kísérletek második részében azzal foglalkozom, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék tulajdonságai, miként változnak a regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználás során, eltérő hőterhelési hőmérsékleten.

A disszertációmban bemutatott kutatómunka vázlatos felépítését az 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A kutatómunka vázlatos felépítése

2. AZ ÖNTŐDEI FORMÁZÓANYAGOK TÍPUSAI

2.1. Az alaphomokok típusai

A formázó- és maghomok-keverékek három fő alkotóból állnak: szemcsés tűzálló mátrixból (alaphomok), kötőanyagból és adalékanyagból. Az alkalmazott alaphomok tulajdonságai meghatározzák a szükséges kötőanyag mennyiségét, a formázókeverék tömöríthetőségét, a gázáteresztő-képességet, az elkészült magok és formák hőstabilitását. Az adalékanyagokat a formázókeverék felhasználási tulajdonságainak a javítására és az öntvényhibák keletkezésének megelőzésére alkalmazzák. Az öntészeti célokra használt alaphomoknak a következő követelményeknek kell megfelelnie [9] [10]:

- Megfelelő granulometriai tulajdonságok,
- Tűzállóság,
- Kompatibilitás az alkalmazott kötőanyagrendszerrel,
- Állandó kémiai összetétel és pH érték,
- Közömbös legyen az öntendő fémmel, annak alkotóival és az oxidjaival szemben.

Az alaphomok lehet természetben előforduló homok (kvarchomok), ill. speciális homok, melyek lehetnek mesterségesen előállított és természetes ásványi homokok. A gyakorlatban a különböző ötvözetek öntéséhez az arra legalkalmasabb alaphomok kiválasztása történik.

A kvarchomok

A magas SiO_2 tartalmú kvarchomok a legelterjedtebben alkalmazott homokfajta a magok és a formák gyártására. A kvarchomok a gránit bomlásterméke, amely a többszöri áttelepülés hatására aprózódik és kopik. A mállási folyamat során csillám és földpát is képződik, amely által a keletkezett kvarchomok egyéb ásványi szennyeződések is tartalmaz. A különböző szennyezők károsan befolyásolhatják a teljes forma- és maggyártási folyamatot, mint például elnyújthatja a kötési időt, ezáltal a mag/forma szilárdsága csökkenhet [9] [11]. A kvarchomok kiválasztása során az öntődék törekszenek arra, hogy legalább 98%-os SiO_2 tartalmú kvarchomokot használjanak.

A speciális homokok

A speciális homokok a következő tulajdonságokban térhetnek el a kvarchomoktól [12]:

- A kisebb hőtágulás 20°C és 600°C közötti hőmérséklet-tartományban,
- A nagyobb, ill. kisebb hővezetőképességben,
- A nagyobb tűzállóságban.

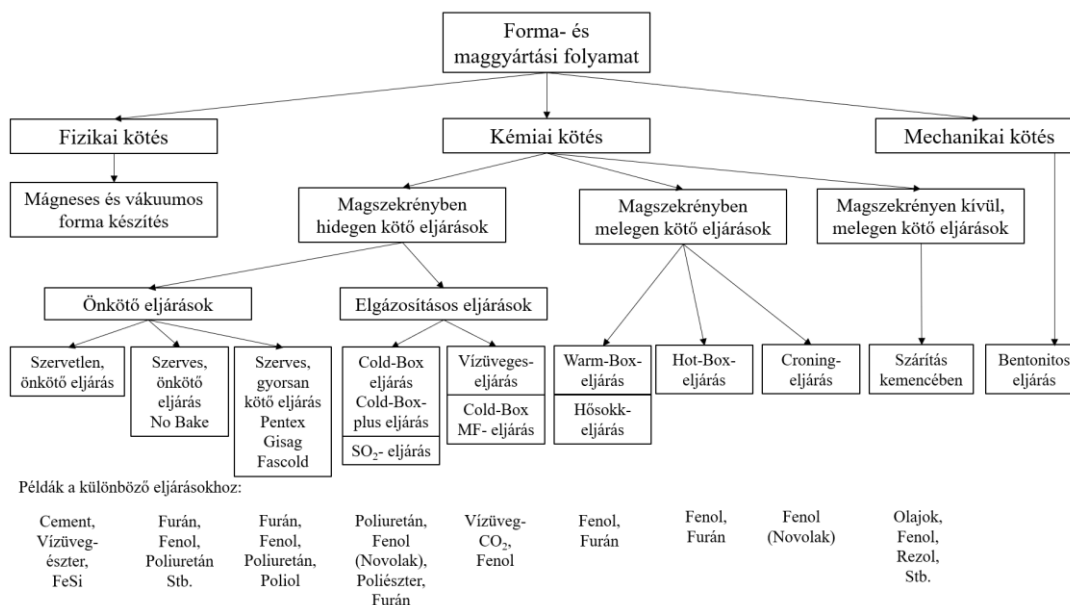
A speciális homokok kedvező tulajdonságait figyelembe véve alkalmazhatók célzottan az öntvény tulajdonságainak a javítására, ill. a különböző hibák megelőzésére. A következő esetekben célszerű a speciális homokok alkalmazása [12] [13]:

- A homok hőtágulása miatt keletkezett hibák elkerülése,
- A gázképző adalékanyagok hozzáadásának mellőzése,
- A fém és a formázókeverék reakciójának elkerülése,
- A penetráció elkerülése,
- A mag tömegének csökkentése,
- A formázókeverék folyékonyságának javítása,
- Az öntvény szövetszerkezetének befolyásolása,
- A vékonyfalú öntvények öntésénél megkívánt speciális igények biztosítása.

Az *M.1.* mellékletben megtekinthető a formák és a magok gyártásához alkalmazható speciális homokok típusai.

2.2. A formázókeverékek típusai

Az alaphomokhoz kötőanyagot adagolva különböző formázó- és maghomokkeverékek készíthetők, melyek egyik fő osztályozási módja azon alapszik, hogy a keverékben fizikai vagy kémiai kötés jön létre. A térhálósítás felgyorsításához katalizátorra, reagensre, vagy hő közlésre, ill. ezek kombinációjára van szükség [10]. A formázókeverékeket főként a maggyártási technológia alapján csoportosítják. A 3. ábrán látható a Bindernagel által összeállított forma- és maggyártási folyamatok csoportosítása.



3. ábra A forma- és maggyártási folyamatok a Bindernagel rendszerezése alapján [14]

Az öntöde kiválaszthatja a gyártandó öntvény típusához és a gyártott öntvénnel szemben támasztott követelményekhez, ill. az öntöde gyártási folyamatához legalkalmasabb kötőanyagrendszert. A formázókeverékekkel szemben támasztott elvárások a következők [10]:

- Megfelelő tömöríthetőség és szilárdság,
- Megfelelő kötési idő,
- Megfelelő hőstabilitás,
- Mérsékelt gázképződés,
- Az elkészített magok és formák jó gázáteresztő-képességgel rendelkezzenek,
- Jó üríthetőség,
- Regenerálhatóság.

2.2.1. A fizikai- és mechanikai kötésen alapuló forma- és maggyártási folyamatok

A fizikai kötésen alapuló gyártási folyamatokat kizárólag önthető vagy nagyon jó folyékonyságú formázókeveréknél alkalmazzák, amelyek függetlenek a kötés típusától. Ennek a kötési mechanizmusnak az alkalmazása a következő előnyökkel jár [15]:

- A homokszemcsék közötti kötés azonnal létrejön.
- A forma-, ill. a maggyártáshoz szükséges berendezések, továbbá az ezt követő gyártási folyamatok számát jelentősen csökkenteni lehet.
- A kötőanyagmentes formázókeverék újra-hasznosíthatósági foka biztosítja a gazdaságosságot és a kedvező ökológiai feltételeket.

A vákuumos eljárás egy kötőanyagmentes formakészítési technológia. A formázóhomok alakadása vagy nyomás alatt vagy pedig vákuummal történik [15] [16]. Ezen eljárás során a modell kontúrját egy műanyag fólia képezi és a kötőanyagmentes, jól önthető homok nyomás alatt biztosítja a megfelelő szilárdságot a formaszekrényben. Mindaddig nyomás alatt tartják a formát, míg az öntést követően az öntvény teljesen megszilárdul [15].

A mechanikai kötések esetében a bentonitot alkalmazó eljárásokról beszélhetünk. A bentonit jelentős mennyiségű montmorillonitot tartalmazó agyagfajta, mely a vulkáni utóműködések hatására hidrotermális úton jött létre. A természetes bentonitoknak az adszorbeált kation minősége szerint két fő csoportja van: a kalcium-bentonit és a nátrium-bentonit. A formák készítése a formaszekrényben, dögölés útján történik [1].

2.2.2. A kémiai kötésen alapuló forma- és maggyártási folyamatok

A kémiai kötésen alapuló kötőanyagokat két fő csoportra lehet osztani: a szerves és a szervesetlen kötőanyagokra. A szervesetlen kötőanyagok nagy előnye, hogy viszonylag olcsók és kevésbé környezetkárosító hatásúak, mint a szerves kötőanyagok, azonban öntés után nem minden esetben veszítik el a szilárdságukat, így a magok eltávolítása az öntvényből nehézségeket okozhat [1]. A szerves kötőanyagok előnye többek között az, hogy a kötőanyag kiégése által az öntvény ürítése és tisztítása jóval egyszerűbb folyamat. Az M.2. mellékletben látható, hogy mely kémiai kötésű kötőanyag fajták találhatók meg manapság, továbbá mely maggyártási folyamat társul hozzájuk. Alapvetően három csoportra lehet osztani a maggyártási folyamatokat, melyek az önkötő, a gáz-katalizátoros eljárások és a melegen kötő eljárások [1] [17].

2.3. A szerves és szervesetlen kötőanyagrendszerek alkalmazásának ipari háttere

A szerves és a szervesetlen kötőanyagrendszerek között az alapvető különbség egyebek mellett a kémiai összetételben van. Míg a szerves kötőanyagok alkohol, fenol, furán és más aromás, éghető vegyületekből állnak, addig a szervesetlen kötőanyagok (mint például a vízüvegek) nem éghető, kovasav, ill. alkáli-szilikátok vizes oldataiból.

Manapság a szerves kötőanyagrendszerek használata a legelterjedtebb a magok, ill. a formák gyártására, azonban jelentős környezet- és egészségügyi károsító hatással rendelkeznek, továbbá a szerves kötőanyagtartalmú használt homok veszélyes hulladéknak minősül. A magok és a formák gyártásához a szerves kötőanyagok alkalmazása a következő előnyökkel jár [9]:

- Az öntés során a szerves kötőanyag kiég, amely biztosítja a megfelelő üríthetőséget.
- A magok és a formák méretpontosak.
- A magok és a formák felületi minősége jó.
- A használt homok termikusan és mechanikusan is regenerálható.

A 4. ábrán a szerves és szervesetlen kötőanyagrendszer alkalmazásával készült magcsomag öntése látható.



4. ábra A szerves és szervesen kötőanyaggal készült magcsomagok öntése [18]

A 4. ábrán látható, hogy a szerves kötőanyaggal készült magcsomagok öntése során egészségre káros anyag kibocsátás történik, ezzel ellentétben a szervesen kötőanyaggal készült magcsomag öntése során nincs károsanyag kibocsátás [18] [19].

A szerves kötőanyag kiégése során az emisszió kibocsátás melléktermékeként kondenzátum kicsapódása is történik, amely erőteljes szennyeződést okoz a szerszámok felületén. Emiatt a kokillákat folyamatosan tisztítani és karbantartani szükséges, amely egy költséges és időigényes folyamat. Az 5. ábrán a cold-box-eljárással készült homokmagok esetében a kondenzátum képződés hatása látható a kokilla felületén.



5. ábra A cold-box-eljárás során jelentős mennyiségű kondenzátum képződik, amely erőteljesen szennyezi a kokilla felületét [20]

A szerves kötőanyaggal készített magok és formák nem csak az öntés közben okoznak egészségügyi problémákat, hanem már a maggyártás során is, mivel a lejátszódó kötési folyamatok már a szerszámban elkezdődnek vagy pedig teljesen le is játszódhatnak és erőteljes szagkibocsátással járnak. Ezért nem csak az öntőgépeknél, hanem a maggyártósorhoz is szükséges füstelszívó és levegőtisztító berendezéseket telepíteni a dolgozók egészségének védelmében. Az öntődéknek ezen berendezések beépítése és alkalmazása minden esetben többletköltséget jelent [9] [20]. Itt meg kell említeni azt is, hogy a kötőanyaggyártók kísérleteznek a szerves kötőanyagok módosításával, ill.

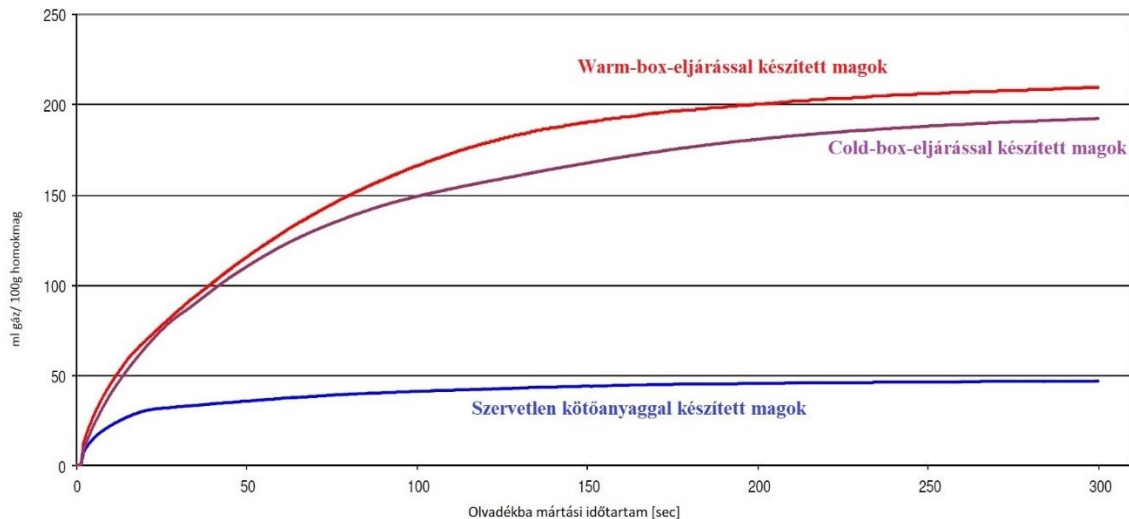
továbbfejlesztésével, annak érdekében, hogy csökkentsék az emisszió- és szagkibocsátást. Ennek háttérében nem csak a környezetvédelmi és munkavédelmi elvárások állnak, hanem a szerves kötőanyagokhoz alkalmazott alapanyagok beszerzésének egyre növekvő költsége is. Az M.3. mellékletben látható, hogy a szigorodó környezetvédelmi jogszabályozások hatására, az elmúlt 50 évben, miként változott a szerves kötőanyagok alkalmazása során a benzol és a formaldehid tartalom megengedett értékhatára [21] [22]. Az elmúlt évtizedekben a benzol és formaldehid tartalom megengedett értékhatára folyamatosan csökkent. A kötőanyaggyártók alkalmazkodva az előírásokhoz módosították a szerves kötőanyagrendszereket azért, hogy csökkentsék a formaldehid, a benzol, továbbá a különböző aromás oldószerek mennyiségét [22] [23] [24] [25].

A szerves kötőanyagokkal ellentétben a szervetlen kötőanyagrendszerek kevésbé környezetkárosító hatásúak. A magok és a formák gyártása, ill. öntése során alacsony vagy szinte semmilyen emisszió kibocsátása nem történik, ezáltal nincs kondenzátum képződés sem. A 6. ábrán látható, hogy az öntés során a szervetlen kötőanyaggal gyártott magcsomag esetén nincs kondenzátum képződés, aminek következtében a kokilla tiszta marad.



6. ábra A szervetlen kötőanyaggal készült magoknál nincs kondenzátum képződés [20]

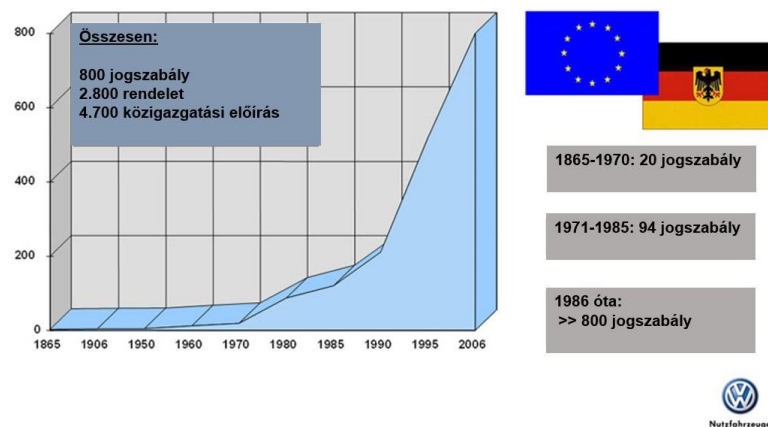
Attól függetlenül, hogy a szerves kötőanyagokat továbbfejlesztették, a szervetlen kötőanyagok alkalmazásával kedvezőbb eredmény érhető el a károsanyag kibocsátás és a gázképződés terén. A 7. ábrán a cold-box-rendszer, a warm-box-rendszer és a szervetlen kötőanyagrendszer gázképződésének COGAS berendezéssel mért eredménye látható [20].



7. ábra A szerves és szervesen kötőanyaggal készült homokmagok COGAS berendezéssel végzett mérésének az eredménye [20]

A 7. ábra alapján megállapítható, hogy az öntés során a szerves kötőanyagok (cold-box és warm-box) alkalmazása során jelentős mértékű gázképződés következik be, míg a szervesen kötőanyagot kismértékű gázképződés jellemzi.

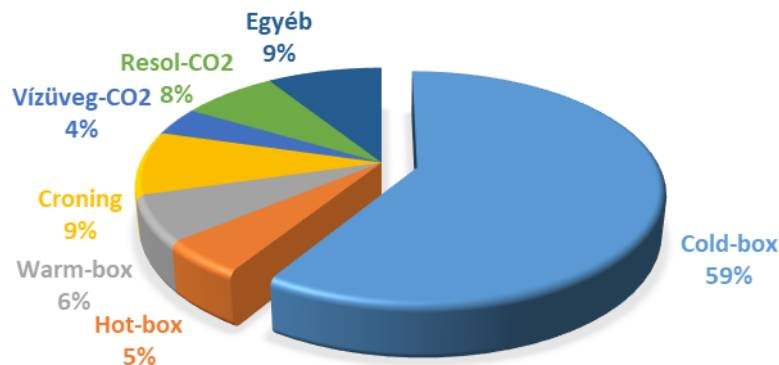
Az elmúlt évtizedekben a környezetvédelmi szabályozások jelentős mértékben szigorodtak, amelyek a dolgozók egészségvédelmére is kiterjedtek. A 8. ábrán látható, hogy Európában a környezetvédelmi jogszabályok száma miként változott az 1900-as évektől kezdődően. Az 1990-es évekhez képest a jogszabályok és rendeletek száma jelentős mértékben megnövekedett. Ennek köszönhetően mind a mai napig átalakulnak az öntődékben alkalmazott maggyártási technológiák és az alkalmazott kötőanyagrendszerek is.



8. ábra A környezetvédelmi jogszabályok számának változása az 1900-as évek óta [26]

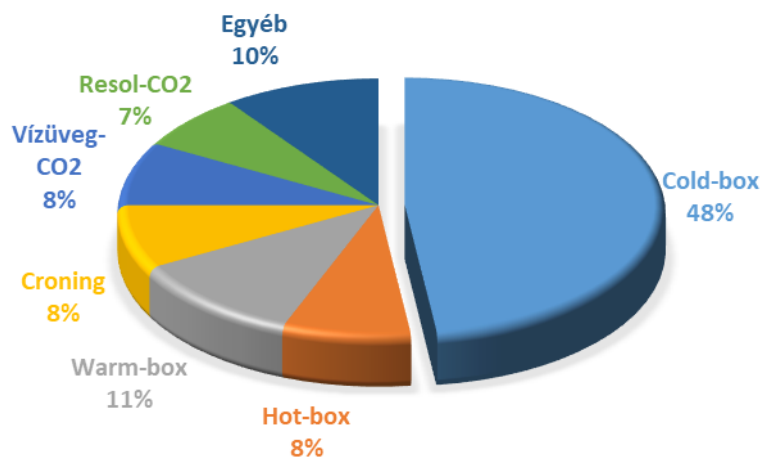
A 9. ábrán bemutatott diagramon látható, hogy a 2002-es évben miként oszlik meg a különböző maggyártási technológiák alkalmazása. Az öntődék a cold-box-eljárást

(szerves kötőanyagrendszert) alkalmazták a legtöbb esetben, amelynek háttérében fő tényezőként a termelékenység áll.



9. ábra A maggyártási technológiák alkalmazása a 2002-es években [27]

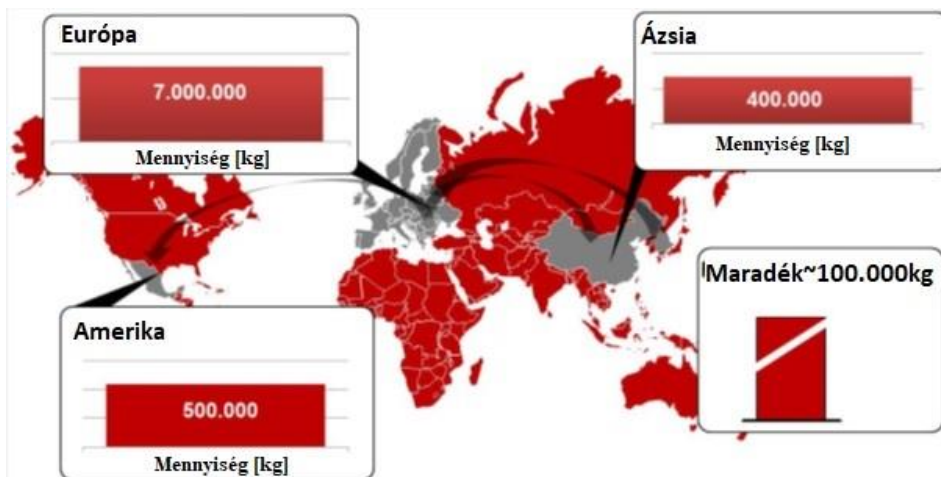
A jelentős mértékű szigorítások hatására az alkalmazott maggyártási technológiák, ill. alapanyagok alkalmazása lassan, de fokozatosan elkezdett megváltozni. A 10. ábrán bemutatott diagramon látható, hogy 2006-ban a cold-box-eljárás alkalmazása csökkent, ezzel egyidejűleg pedig a vízüveg-CO₂-eljárás alkalmazása a duplájára növekedett. Emellett meg kell említeni azt is, hogy a vízüveg-CO₂-eljárás mellett a meleg magszekrényes szerves kötőanyagot tartalmazó maggyártási technológiák, mint például a warm-box-, croning- és hot-box-eljárás, alkalmazása is növekedett.



10. ábra A maggyártási technológiák alkalmazása a 2006-os években [28]

Az adatok alapján elmondható, hogy az öntődék számára a gyártás során nem csak a termelékenység és gazdaságosság áll a középpontban, hanem a technológia fejlesztésével és a környezettudatos gondolkodás kombinálásával olyan kötőanyagrendszerek és technológiák alkalmazása, amelyek megfelelnek az adott környezetvédelmi irányelveknek és szigorításoknak.

A 11. ábrán látható, hogy 2016-ban a magok és a formák gyártása során milyen mennyiségben alkalmazták a vízüveges kötőanyagrendszert világszerte.



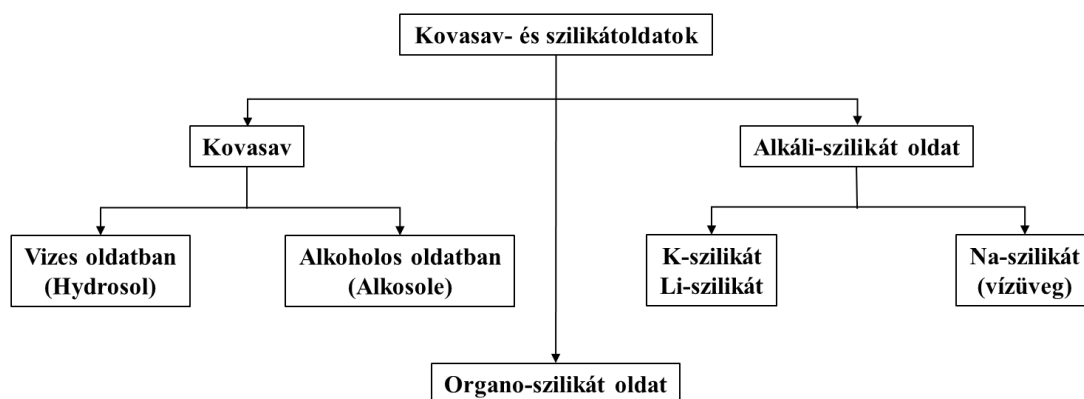
11. ábra. A víziúveges kötőanyagrendszerek alkalmazása világszerte 2016-os évben [29]

A 11. ábrán bemutatott adatok alapján megállapítható, hogy Európában használták a legnagyobb mennyiségben a szervetlen kötőanyagokat, amelynek háttérében a szigorúbb környezetvédelmi szabályozások állnak.

2.4. A szervetlen kötőanyagrendszerek típusai

Az öntvények gyártására több ezer éve alkalmaznak szervetlen kötőanyagokat (pl. agyag). Az egyik legrégebben használt kémiai kötésű szervetlen formázóanyag a cement, amelynek az első üzemi kísérletei az 1900-as években kezdődtek. Öntészeti szempontból a vízben kötő cementnek volt szerepe, amelyet az acélöntvények gyártásához is alkalmaztak [33] [34].

A másik, az öntészetben régóta használt szervetlen kötőanyagrendszer a kovasav-, a szilikátoldatok és ezek vizes oldatai, amelyeket három csoportra lehet osztani. Ezek a szilikaszol vagy kovaszol oldatok, az alkáli-szilikát oldatok és az organo-szilikát oldatok. A 12. ábrán a kovasav- és a szilikátoldatok csoportosítása látható.



12. ábra A kovasav és szilikátoldatok csoportosítása [35]

A kovasav a szilícium-dioxid vizes oldata (szilikaszol/kovaszol oldatok), amelyet a precíziós öntészetben is alkalmaznak a héjformák készítéséhez. A kovaszol kémiaiilag

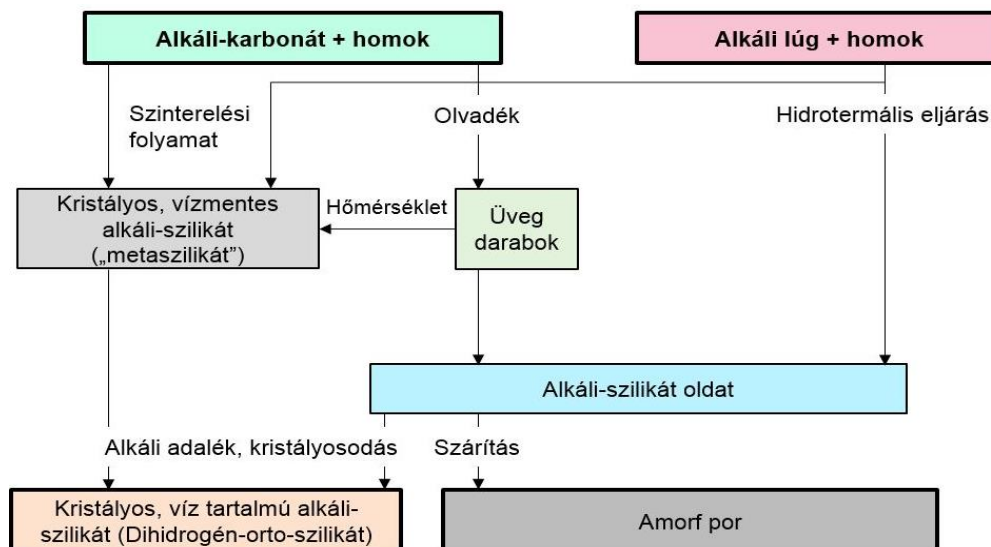
hasznoló az alkáli-szilikát oldatokhoz, azonban alacsonyabb alkáli-oxid tartalommal rendelkeznek. A precíziós öntészeti héjformák előállításánál a vizes rendszerek előnye az alkoholos rendszerrel szemben (etil-szilikát) a kevésbé környezetkárosító hatás, ami másrészt magasabb szárítási költséget is jelent [36].

Az alkáli-szilikát oldatokat (vízüveg) nagyjából az 1950-es évek óta használják öntészeti célokra. Az első szabadalom Petrzela nevéhez fűződik, aki 1947-ben a vízüveg-CO₂-eljárást szabadalmaztatta, amely megreformálta a magok és a formák előállítását [35] [36]. A vízüveg-CO₂-eljárás jelentős változást hozott az öntödék termelékenységében és a folyamat-biztonságban. Időközben több új, hidegen kötő eljárást fejlesztettek ki a vízüveges kötőanyagra. Az egyik ilyen a vízüveg-Pulverhärter-eljárás, ezt továbbfejlesztve a vízüveg-szilicid-eljárás (Nishiyama-eljárás) alakult ki. Egy másik önkötő eljárás a vízüveg-Ton-eljárás, ahol bentonitot vagy agyagot adagoltak a keverékhez a forma előállításánál. A legfontosabb önkötő formázó technológia a vízüveges kötőanyag esetében a vízüveg-észter-eljárás. Ez az egyedüli önkötő szervesen kötőanyag tartalmú eljárás a cement eljárás mellett, melyet manapság a nemvasöntvények gyártásánál a formák és magok előállítására is használnak [35].

Az organo-szilikát oldatok tartalmazzák organikus szilánokat, ahol az $R^xSi(OR)_{4-x}$ szilikáthoz az R helyére beépülhet az egyszerű metil-csoporttól kezdve az összetett szerves vegyületekig bármely szerves vegyület. Az organo-szilikátokat hibrid üvegek előállítására is alkalmazzák [38]. Az M.4. mellékletben megtekinthető az organo-szilikátok felépítése, szerves és szervesen kötő vegyületcsoport beépülése által a szilikát vázba.

2.4.1. Az alkáli-szilikát oldatok előállítási folyamata

Az alkáli-szilikát oldatok előállítására több gyártási folyamat ismert, amelyek a következők: a szinterelési folyamat, az olvasztási eljárás és a hidrotermális eljárás. A 13. ábrán az alkáli-szilikát oldatok előállításának folyamata látható, amelyet Gettwert állított össze [36].



13. ábra Az alkáli-szilikát oldatok előállításának elvi ábrája, Gettwert szerint [36]

A kötőanyagként alkalmazható alkáli-szilikát oldatok gyártásához az egyik legelterjedtebb eljárás az olvasztási eljárás, amellyel nátrium- és kálium-szilikátot állítanak elő. A kiindulási anyagok nagytisztaságú kvarchomok és alkáli-karbonát, amely a nátrium-vízüveg gyártása esetén szóda, míg a kálium-vízüvegnél hamuzsír [9] [36] [38] [34]. A keveréket 1300°C és 1500°C közötti hőmérséklet-tartományon egy kádmedencében megolvasztják, majd az olvadékot lecsapolják és lehűtik egy láncos szállítószalagon. A csapolást követően a vízüveg olvadékot lehűtik, amelynek következtében a vízüveg szilánkos, darabos formába kerül. Ezt a darabos vízüveget 140°C és 180°C közötti hőmérsékleten 4 – 9bar közötti nyomáson autoklávban megolvasztják, majd víz adagolásával beállítják a legyártott vízüveg oldat modulját és összetételét [39]. Az M.5. mellékletben az olvasztási eljárás folyamatábrája látható, amelyet a Wöllner GmbH alkalmaz a vízüveg gyártására.

A hidrotermális folyamat is alkalmas kötőanyagként alkalmazható vízüveg oldat előállítására, azonban ezt az eljárást csak bizonyos alkáli-szilikát összetétel esetében alkalmazzák [36]. Az M.6. mellékletben a Wöllner GmbH féle hidrotermális folyamat sematikus ábrája látható. Ezen folyamat során az autoklávban magas hőmérsékleten és nagy nyomáson nagytisztaságú kvarchomokot és nátronlúgot olvasztanak meg [39]. A hidrotermális folyamat energiatakarékosabb az olvasztási eljárásnál, azonban időigényes, mivel a komponensek oldódási sebessége alacsony [36].

A harmadik technológia a vízüveg oldat előállítására a szinterelési folyamat, amellyel vízmentes nátrium-meta-szilikátot állítanak elő, azonban gyakorlati jelentősége az öntészetben alkalmazott vízüvegek esetében nincs.

A nátrium- és kálium-vízüvegek előállítására mind a három eljárás alkalmas, azonban a lítium vízüvegeket csak hidrotermális úton vagy szintereléssel lehet előállítani [36].

2.4.2. Az alkáli-szilikát oldatok kémiai és fizikai tulajdonságai

A vízüveg nem tekinthető szabványos vegyületnek, mivel ez a gyűjtőneve az üvegesen megszilárdult, változó összetételű alkáli-szilikát olvadékoknak és oldatoknak. A vízüvegek nevezhetők még a kovasavak alkáli sóinak is [36]. A vízüveget a síküvegtől és az egyéb üvegektől a vízben való oldódása különbözteti meg. Ez az eltérő kémiai összetételen alapszik, mivel a síküveget szóda, kvarchomok és mész felhasználásával állítják elő, amely kihatással van a kémiai, a fizikai és a mechanikai tulajdonságokra [38].

A vízüveg karakterizálása a következő paraméterekkel történik [30] [36]:

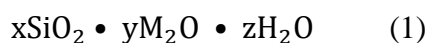
- A modullal,
- A viszkozitással,
- A sűrűséggel.

A vízüveg kötőanyagként való alkalmazása a következő előnyökkel rendelkezik [38]:

- Nagy hőstabilitás,
- Mentés a káros kemikáliáktól, savaktól és oldószertől,
- Magas a hőmérséklet-változással szembeni ellenállóképessége,
- Széleskörben elérhető alapanyag,
- Közepes árkategória,
- Tiszta szervesetlen anyag, ezáltal teljesen éghetetlen,
- Nincs szagterhelés,
- Mentés az illékony szerves vegyületektől (VOC)

2.4.2.1. A vízüveg oldatok modulja

A vízüveg oldat az alkáli-szilikátok vizes oldata, amelynek az általános összetételét a (1) egyenlet mutatja be:



A képletben az M jelöli az alkáli komponenst, amely lehet nátrium, kálium és lítium is [23]. A vízüveg oldatok jellemezhetők a szilícium-dioxid és az alkáli-oxid mól

arányával, ill. a tömegarányával, a szilárdanyag-tartalommal, a sűrűséggel és a viszkozitással.

Ezek közül a legfontosabb jellemző a modul, amely a szilícium-dioxid és az alkáli-oxid mól aránya alapján számolható. Az öntészetben, mint kötőanyag a nátrium-vízüveg terjedt el és a modulja, azaz a $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ aránya 2,0 - 3,3 közötti értéktartományban változhat [9] [36]. A (2) egyenlet bemutatja, miként határozható meg a vízüveg modulja a mól és/vagy a tömegszázalék alapján.

$$\text{Modul} = \frac{\text{Mol}\% \text{SiO}_2}{\text{Mol}\% \text{Na}_2\text{O}} = 1,03 \cdot \frac{\text{tömeg}\% \text{SiO}_2}{\text{tömeg}\% \text{Na}_2\text{O}} \quad (2)$$

A modul alapján megkülönböztetünk lúgos vízüveget (modul < 2,5), semleges vízüveget (modul = 2,5-3,4), ill. savas vízüveget (modul > 3,4) [36]. Az 50-es években számos olyan tanulmány jelent meg, amelyek a vízüveggel és a szilikát oldatokkal foglalkoztak. Hinz a tanulmányában a finoman diszpergált szilikátokkal, a kolloidokkal foglalkozott [36]. A művében összefoglalta, hogy a kötőanyagként alkalmazható szilikátoldat kémiai összetétele miként változik, amely a 2. táblázatban látható.

2. táblázat. A nátrium-szilikát oldat kémiai összetétele Hinz szerint [36]

Vízüveget alkotó komponensek	Összetétel
SiO_2	25-35%
Na_2O	8-15%
H_2O	50-60%

A modul befolyásolja a formázókeverék és a kötőanyagrendszer egyes technológiai tulajdonságait, mint például a keverék folyékonyságát, a kötőanyag viszkozitását stb. [38]. A modul változásának a hatása a vízüveg oldatra a 3. táblázatban látható.

3. táblázat A modul változásának hatása a vízüveg tulajdonságaira [38]

Modul változása	Paraméter
A modul nő (SiO_2 nő)	<ul style="list-style-type: none"> – A viszkozitás növekszik – Gyorsabb a száradási és a kötési sebesség – A vízüveg kémiai ellenállóképessége növekszik – Az alacsony hőmérséklettel szembeni érzékenység növekszik
A modul csökken (M_2O nő)	<ul style="list-style-type: none"> – A vízüveg sűrűsége növekszik – A vízüveg vízben való oldhatósága javul – A vízüveg oldat pH-értéke növekszik – A homokszemcsék között jobb tapadási és kötési erő jön létre – A vízérékenység növekszik

2.4.2.2. A vízüveg oldatok sűrűsége és viszkozitása

A modul mellett fontos a vízüvegek sűrűsége is, mivel ez is befolyásolja a formázókeverék technológiai tulajdonságait (keverék folyékonysága). A nátrium-vízüveg oldatok sűrűsége leginkább a modultól, azaz a $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ arányától függ [36]. A modul mellett szerepet játszik a vízüveg oldat szilárdanyag-tartalma is. A gyakorlatban használt vízüveg oldatok 30-50% körüli szilárdanyag-tartalommal rendelkeznek. Az ilyen oldatok sűrűsége $1,25\text{-}1,6\text{g/cm}^3$ közötti tartományban változik. Adott szilárdanyag-tartalom esetében, minél kisebb a modul, annál nagyobb lesz a sűrűség. A sűrűségnek a feldolgozási folyamatokra is hatása van mivel, ha az oldatnak nagy a sűrűsége, akkor az nehezíti a keverési folyamatot, ill. a magok és a formák alakadása is problémás lehet [36] [40].

A vízüveges kötőanyagrendszerek egyik legfontosabb tulajdonsága a viszkozitás, amely befolyásolja a formázókeverék viszkozitását is. A cél olyan alacsony viszkozitású kötőanyagrendszer alkalmazása, amely által javítható a formázókeverék tulajdonsága. A nátrium-szilikát oldatok viszkozitását a következő paraméterek befolyásolják [36]:

- A modul,
- Az oldat koncentrációja (a szilárdanyag-tartalom),
- A hőmérséklet,
- A szennyező anyagok típusa és mennyisége.

Az *M.7.* mellékletben látható, hogy adott modul esetében, változó alkáli-oxid tartalom mellett miként változik a vízüveg oldatok viszkozitása.

3. A VÍZÜVEGES FORMÁZÓANYAGOK KIKEMÉNYEDÉSE ÉS A FORMÁZÁSI TECHNOLÓGIÁK BEMUTATÁSA

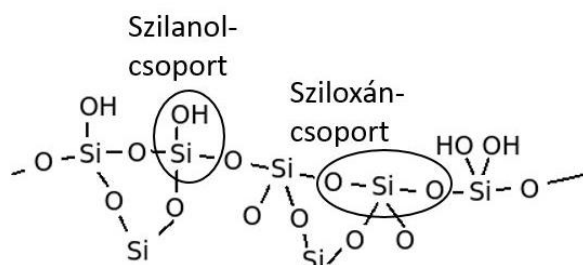
3.1. Az alkáli-szilikát oldatok polimerizációja

A szilikát oldatok polimerizációjával az elmúlt évtizedekben több tanulmány is foglalkozott. Iler a tanulmányában a vízüveg kikeményedésével és a szilikát oldatok polimerizációjával foglalkozott. Az *M.8.* mellékletben a polimerizáció mechanizmusának lehetséges kimenetele látható, amely bekövetkezhet savas, ill. bázikus közegben, továbbá a megfelelő közegben só adagolása által. Brinker is foglalkozott a munkássága során ezzel a témával, azonban ő a SiO_2 -részecskék előállításával foglalkozott [36] [42].

A szilikát oldatok polimerizációval monomer alakból részecskévé alakulnak át. A részecske szerkezetének a kialakulását befolyásolja a pH érték és a só jelenléte a

rendszerben. Ezek függvényében kialakulhat háromdimenziós gél szerkezet, amely által a kötőanyagfilm kikeményedik vagy folyamatosan növekvő szol-részecske keletkezik [36] [43]. A háromdimenziós gél szerkezet akkor alakul ki, ha a pH érték savas tartományba esik, ill., ha a rendszer lúgos pH-val rendelkezik és szervesen só adagolása történik [43]. Murakata és társai különböző szervesen sók (LiCl, KCl, CaCl₂, Na₂SO₄ stb.) és felületaktív anyagok hatását vizsgálták a háromdimenziós gél pórus méretének változására [43] [44]. Megállapították, hogy a szervesen sók csökkentik a mezopórusok kialakulását. A felületaktív anyagok pedig befolyásolják a nagy pórusok frakcionált pórusmennyiségének a növekedését [43] [44]. A háromdimenziós gélképződés reakciósebessége elég lassú ahhoz, hogy rendezett homogén szerkezet képződhessen. A részecskék egymással összekapcsolódnak és egy porózus szétágazó gél szerkezetet alakítanak ki [44]. Ha egy vizes kovasavoldat 7 fölötti pH-értékkel rendelkezik, akkor szol-szerkezet képződése következik be. A molekula növekedési sebessége nagyon gyors, amely megakadályozza, hogy hálózatos szerkezet alakuljon ki [36] [42].

A polimerizáció során a rendszer arra törekszik, hogy O-Si-O-csoport, azaz sziloxán-csoport és SiOH-csoport, azaz szilanol-csoport keletkezzen [36]. A 14. ábrán a polimerizáció során képződő csoportok elhelyezkedése látható a kötőanyagvázban.



14. ábra A szilanol- és sziloxán-csoportok a vízüveges kötőanyagvázban [45]

Flemming és Tilch tudományos munkájukban vízüveg oldatok szerkezetével foglalkoztak. Az alkáli-szilikát oldatok alkáli-ionokból és különböző szilikát-ionokból, ill. kolloid ionokból, az ún. kovasavmicellákból tevődnek össze [15]. Az M.9. mellékletben megtekinthető a nátrium-szilikát felépítésének vázlata. A rendszerben a következő szilikátionok találhatók meg [15]:

- Monomer ionok növekvő SiO₂ koncentrációval ([SiO₃]²⁻ vagy [Si₂O₅]²⁻),
- Olyan kondenzált szilikátionok keveréke, amelyek több-kevesebb előrehaladott térhálósodással rendelkeznek.

A szilikácionok szerkezetének képződése és a szerkezeti változásai a szilikácionok egyensúlyáig tart a kondenzációs- és hidrolízis reakciók során. Az egyensúlyi állapot megfelel az anion komplexek mennyiségi eloszlásának. Az egyensúlyi állapot függ a $\text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$ mólaránytól, ill. a SiO_2 koncentrációtól [15] [36].

A vízüveg oldat stabilitása összefüggésben áll a felépítésével és a meglévő kovasavmicellák kolloid kémiai viselkedésével, ezáltal megakadályozva a kicsapódást. A kovasavmicellák különböző alakban vannak jelen a kötőanyagvázban, mégpedig $(\text{SiO}_2)_m \times (\text{SiO}_3)_x^{2-}$ granulátumként, illetve H^+ - ionból álló adszorpciós réteggént [36].

A részecskék negatív töltése akadályozza a kicsapódást és az oldat szolvációs burkának az erősségét. A részecskék külső rétege és a diszperziós szer között egy elektrokinetikus potenciálkülönbség áll fenn, azaz az ún. zéta-potenciál. A kolloid rendszer annál stabilabb, minél nagyobb a potenciál különbség. Az oldat stabilitását növelik az alkáli tartalmú adalékok és az OH-ionok is. Elektrolitok és savak hozzáadásával ki lehet egyenlíteni a potenciál különbséget. Az izo-elektromos pont elérésével a részecske kicsapódása elkezdődik. A kolloidrészecskékből nagyobb részecskekötések képződnek, amelyek a formázókeverék szemcséinek az összetapadásához vezetnek. Ez jellemzi a vízüveges kötőanyag kikeményedési mechanizmusát [36].

3.2. A vízüveges formázóanyagok kikeményedésének a folyamata

A vízüveges formázóanyagok kikeményedése többféleképpen történhet. Maga a kötés a szol-gél átalakuláson alapszik [15]. Az *M.10.* mellékletben a három kikeményedési folyamat látható, amely a fizikai és kémiai folyamat, ill. ezek kombinációja lehet. Ezen csoportokon belül is megkülönböztethető az alkalmazott alapanyag alapján többféle csoport. A manapság legelterjedtebb vízüveges eljárások a vízüveg-CO₂-, a vízüveg-észter- és a meleg magszekrényes, szárításon alapuló eljárások [36]. A vízüveges formázóanyagok esetében a megfelelő szilárdsági tulajdonságok eléréséhez, továbbá a szol-gél folyamat megfelelő lefutásához, ill. az adhézios és kohézios kötőanyaghidak eléréséhez a megfelelő gyártási technológia kiválasztása szükséges.

A magok és formák szilárdsága és a kikeményedési karakterisztika alapvetően a következő befolyásoló tényezőktől függ:

- A maggyártási technológia, ill. a kötési reakció típusa,
- A kötőanyag minősége (modul, sűrűség stb.),
- Az alaphomok tulajdonságai (szemcseszerkezet, alak stb.)

- A formázókeverék összetétele és előkészítése.

3.3. A vízüveges maggyártási technológiák

Manapság a vízüveges magok-, ill. formák gyártására még használatban lévő technológiák a vízüveg-CO₂-eljárás, a vízüveg-észter-eljárás, amelyek a klasszikus eljárásoknak tekinthetők, továbbá a meleg magszekrényes eljárások, amelyeket a modern módosított vízüvegek használata esetében alkalmaznak. Az *M.11.* mellékletben látható a szervesetlen maggyártási technológiák csoportosítása. A technológiát tekintve a melegen kötő eljárások alapvetően hasonlóak, azonban fontos kiemelni őket külön-külön is, mivel ezen a területen, ill. ezen eljárások esetében nagyon intenzív fejlesztési és alkalmazási potenciál rejlik.

3.3.1. A vízüveg-CO₂-eljárás

A nedves formázókeverékek kikeményítése történhet CO₂ gázzal való gázélarasztással, ill. szobahőmérsékleten levegővel. Ez az eljárás már több mint 60 éve ismert, ill. alkalmazzák is az öntödék [15] [36]. Az eljárást 1947-ben Petrzela szabadalmaztatta, mint „szénsavas kötésű eljárást”. Az eljárás a szervesetlen kötőanyagú cold-box-technológiák csoportjába is sorolható, mivel hideg szerszámban történik a mag, ill. a forma gyártása. A szerves kötőanyag bázisú cold-box-eljárások kifejlesztésével ez a technológia lassan kiszorult a termelésből (nagyjából az 1980-as évektől), mivel a szerves kötőanyagrendszerek mind termelékenységi szempontból, mind pedig az üríthetőség szempontjából jobbak voltak [14]. Ennek ellenére a kis és közepes méretű öntödékben továbbra is alkalmazzák, amelynek oka, hogy az eljárás nagy rugalmasságot biztosított. A vízüveg-CO₂-eljárás alkalmazása több hátránnyal is rendelkezik, amely a termelékenység növekedése miatt gondot okozhat, ennek következtében az öntödék a szerves kötőanyagok irányába fordultak, ezáltal háttérbe szorítva az eljárást [15] [36] [48]. Az eljárás alkalmazásával kapcsolatos előnyök és hátrányok listája az *M.12.* mellékletben megtekinthető.

A vízüveg-CO₂-eljárással gyártott magokban polimerizációs folyamatok zajlanak le, amelyet részletesen Flemming és Tilch foglaltak össze. A formázókeverék kikeményedése három lépésben történik [15]. Az első lépésben a gázélarasztást követően a CO₂ gáz feloldódik a szilikát kötőanyagban lévő vízben, amely során szén-sav képződik. Ezt követően a keletkezett szén-sav és a nátrium-szilikát reakcióba lép egymással és instabil dikovászav vegyület képződik. A reakció mellékterméke a víz lesz. A második

lépésben keletkezett dikovásav a vízzel kolloid oldatot képez. Ez a reakció a kovásavmicellák kicsapódásához és az elektromos potenciál csökkenéséhez vezet. A harmadik lépésben pedig a rendszer egyre nagyobb mértékben semlegesítődik, amely által SiO_2 -gél csapódik ki, amely szőlő alakot, méhsejt alakot vagy pedig lemezes alakot vehet fel. A keletkezett SiO_2 -gél adja a formázókeverék szilárdságát, továbbá nátrium-karbonát is képződik [15]. A túl nagy mennyiségű CO_2 adagolásával erőteljes amorf kovásav képződés következik be és a kovásav elvonja a nedvességet a kolloid oldatból. A kovásav mellett nátrium-hidrogén-karbonát képződik, ami a magok szilárdságának a csökkenéséhez vezet [15] [36].

A magok kezdő és végszilárdságát meghatározza a maggyártás során a formázókeverékbe befűjt CO_2 gáz mennyisége és a gázélasztás időtartama. A növekvő gázélasztási idő hatására a szilárdsági értékek növekednek, azonban, ha a maximum érték fölé megyünk, azaz túlfúvatás történik, akkor a szilárdság értékek csökkennek, mivel a képződött gélszerkezet széttörik. Ennek oka a képződő nátrium-karbonát tük, amelyek a kedvezőtlen geometriájuk miatt a kötőanyaghidakban bemetsző hatást hoznak létre, ami szilárdság csökkenéséhez vezet [36]. Ha a formázókeverék a gázélasztás során kevés CO_2 gázt kap, akkor a kezdő szilárdság csökken, de ezt követően a tárolás során a szilárdságértékek növekedni fognak (utókeményedés). Ebben az esetben az előállított magokat először 24 óra elteltével lehet az öntéshez alkalmazni.

3.3.2. A vízüveg-észter-eljárás

A vízüveg-észter-eljárás az önkötő eljárások közé tartozik. Ennél az eljárásnál a szervesen kötőanyag (vízüveg) egy szerves katalizátorral (észter) lép reakcióba. Az észter lehet ecetsav, monoacetin-, diacetin, triacetin - és más észter vegyületek, úgymint etilén-glikol-acetát vagy glioxál. Az adott észter kiválasztásával célzottan lehet a formázókeverék tulajdonságait befolyásolni. A keverék feldolgozhatósági ideje 5-20 perc, a formák kivétele a formaszekrényből 20 perctől több óra múlva is megtörténhet. A gyártott magok és formák regenerálása problémás, továbbá más formázóanyagrendszerrel összeférhetetlen [15] [36].

A vízüveg-észteres formázókeverék kikeményedése során különböző folyamatok játszódnak le. A vízüveg az észter hatására hidrolizálódik és ecetsav keletkezik. Az észter hidrolízisét egy egyensúlyi állapot követi és a víz áthelyeződik a szilikát-kolloid oldatba. A keletkező ecetsav csökkenti a rendszer pH értékét, ezzel együtt az elektromos potenciált, ezáltal kiválik az $(\text{SiOH})_4$ gél és a kikeményedési folyamat megindul.

Ezenkívül az oldhatatlan nátrium-acetát kicsapódik [15]. Az *M.13.* mellékletben megtekinthetők az eljárás alkalmazásával kapcsolatos előnyök és hátrányok listája.

3.3.3. A melegen kötő vízüveges eljárások

A melegen kötő eljárások esetében két altípust lehet megkülönböztetni. Az egyik a meleg magszekrényes és meleg levegős átfűvósos eljárás, a másik pedig a meleg magszekrény mellett mikrohullámmal történő utókeményítés.

3.3.3.1. A vízüveges mikrohullámú eljárás

A szilikát bázisú kötőanyagrendszerek kötési folyamatait nem csak meleg levegővel, ill. szén-dioxidos elgázosítással lehet beindítani, hanem mikrohullámú energiával is. Ennek az eljárásnak az első alkalmazása a 60-as évekre tehető [36]. Ezzel a témával többen is foglalkoztak az elmúlt évtizedekben, ezek közül a legjelentősebb munkásságok a következők.

Grassmann vetette fel annak a lehetőségét, hogy a vízüveges formázókeverékek kikeményítését magas frekvenciájú szárítással végezzék el. A bemutatott tanulmányában kimutatta, hogy egy csőgenerátor által biztosított magas frekvenciájú feszültséggel a magok a teljes keresztmetszetükben egyenletesen átmelegedtek, ill. néhány perc alatt megkötöttek, ellentétben a hagyományos szárítással, ahol a magnál először a külső felület melegszik át és a hő a mag belseje felé halad [49]. A kísérletei során megállapította azt, hogy a magas frekvenciájú energiával történő egyenletes szárítás hatására jó eredmény érhető el a magok szilárdságát, méretpontosságát és felületi minőségét tekintve [36] [49].

Schreyer is foglalkozott a vízüveges formázókeverékekből magas frekvenciával történő maggyártással, amely alapján megállapította, hogy a magas frekvenciájú mezőben a hőkibocsátás átviteli képessége 20.000-szer nagyobb, mint a hagyományos szárításnál [36] [50].

Tripsa a kutatása során a vízüveges kötőanyag mellett a precíziós öntészetben a héjak készítéséhez alkalmazott szervesetlen kötőanyagot is vizsgálta. A magok szárításához egy 1kW-os berendezést alkalmazott és megállapította, hogy így jelentősen nagyobb szilárdság érhető el, mint a többi eljárás esetében [36].

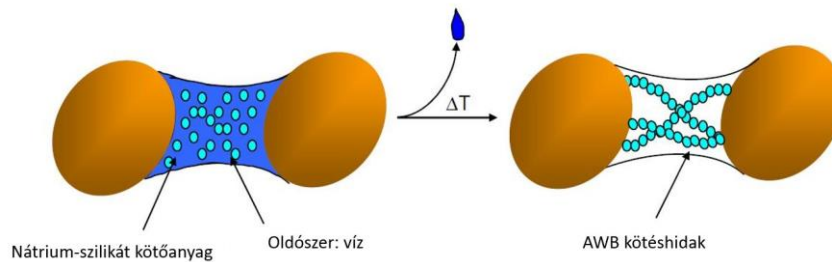
Flemming és Mende arról számoltak be, hogy a 2,5-ös modullal rendelkező vízüvegek a legalkalmasabbak a mikrohullámú szárítási technológiára. Flemming és Tilch megállapította, hogy a mikrohullámos eljárással érhető el a legnagyobb szilárdságérték [36] [51]. További kutatások is készültek ezen tématerületen belül, amelyek vizsgálták a

vízüveg moduljának és a vízüveg oldószertartalmának a hatását a mikrohullámmal megkötött magok tulajdonságaira. Vizsgálták a különböző adalékanyagok hatását, a környezet nedvességtartalmának a hatását, ill. az esetleges kombinációk lehetőségét más típusú vízüveges eljárásokkal [36]. Ezen kívül vizsgálták a mikrohullám hatására milyen változások következnek be a kötőanyag minőségében és a szerkezetében [51] [52]. Polzin és Flemming megállapították, hogy a mikrohullámmal megkötött kötőanyagok esetében homogén, egyenletes kötőanyag képződnek, ill. itt nem tapasztalható tüskés nátrium-karbonát képződés, mint a CO₂-eljárás esetében, amely a szilárdság értékek csökkenéséhez vezet [36] [52].

Összefoglalva elmondható, hogy a mikrohullámú szárítást alkalmazva, a vízüveges formázóanyagokból készült magok szilárdsága jelentősen nagyobb, mint a többi eljárás esetében, továbbá a kötőanyag mennyisége is jelentős mértékben csökkenthető, viszont a mikrohullámú kemencék nagyon drágák és a megfelelő működéshez napi karbantartás szükséges. Több öntőde is alkalmaz mikrohullámú berendezéseket a magon lévő fekecs kiszárítására, tehát maga a technológia alapvetően alkalmazható az öntődékben. A kihívás a megfelelő magszekrény alapanyag megtalálása, mivel olyan szerszám alapanyag szükséges, ami mikrohullám transzparens, mint például a teflon, a kvarcüveg vagy a beton, azonban ezek nem kopásállóak vagy pedig nehezen megmunkálhatóak [36].

3.3.3.1.1. Az AWB®-eljárás

Ez a vízüveges eljárás Wolff és Steinhäuser nevéhez fűződik. Ennél az eljárásnál a magokat meleg magszekrényben készítik, majd ezt követi a mikrohullámú utókeményítés. Az *M.14.* mellékletben megtekinthető az AWB®-eljárás folyamatábrája. A magok készítéséhez módosított vízüveget alkalmaznak, amelyet nátronlúggal hígítottak fel, annak érdekében, hogy a formázókeverék alakadása a magszekrényben kiváló legyen [36] [53]. Az eljárás a fizikai kötésen alapszik, amely azt jelenti, hogy a mikrohullámú szárítás hatására dehidratáció lép fel a homokszemcsék felületén lévő kötőanyagban. A 15. ábrán látható, hogy az AWB®-féle kötőanyagban hőmérséklet hatására az oldószer kiválik és a homokszemcsék között létrejönnek a kötőhidak.



15. ábra Az AWB®-eljárás során lejátszódó folyamat [54]

3.3.3.2. A vízüveges meleg levegős eljárások

3.3.3.2.1. Az Inotec® kötőanyagrendszer

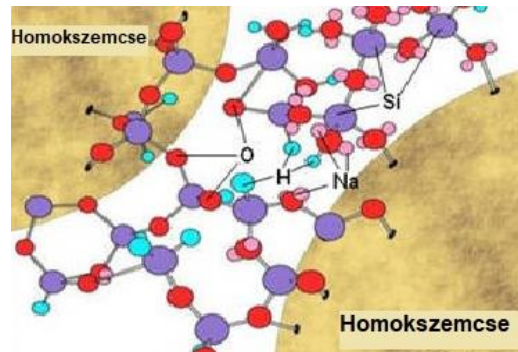
Az ASK féle Inotec kötőanyag egy emissziómentes szilikát bázisú rendszer, amelyet főként az alumínium öntvények gyártásához alkalmaznak. A kötési folyamat a szárítási folyamat és a kémiai reakció kombinációján alapszik, ennél fogva a magok gyártása meleg magszekrényben történik. Az *M.15.* mellékletben megtekinthető az Inotec® kötőanyaggal történő maggyártási folyamat technológiai lépései.

A magszekrény hője által (150°C-200°C) a magból a víz (a kötőanyagban lévő oldószer) egy része kicsapódik, ill. a kémiai reakció is elindul, ezáltal a szilikát molekula elkezd térhálósodni. A térhálósodás mellékterméke a kondenzációs reakció során kicsapódó víz lesz [20] [36]. A kémiai-fizikai kötési folyamatot forró levegős átfúvással segítik, ezáltal a magkészítés során a ciklusidő jelentős mértékben csökkenthető, ami a termelékenység szempontjából kedvező. A kötési reakció részben reverzibilis folyamat, ami azt jelenti, hogy a nedvesség felvételével a lejátszódó reakció visszafordítható és a szilikát molekula térhálósodása megakadályozható, ezáltal a magok szilárdsága csökken, és könnyen szétesnek. Ez a folyamat meggátolható úgy, hogy a legyártott magokat száraz környezetben tárolják, de mivel a megfelelő környezetben való tárolás (klimatizált, zárt teremben) a gyakorlatban nem mindig megoldható, ezért adalékanyagokat alkalmaznak ahhoz, hogy az újabb nedvességfelvételt gátolják, ezáltal a magok folyamat-biztosan kezelhetők legyenek [44].

Az adalékanyag hálózatképző szerepet tölt be a kötőanyagrendszerben. A kötési reakciók során az adalékanyag beépül a kötőanyagvázbába (*M.16.* melléklet), ill. részt vesz a háromdimenziós kötőanyag váz kiépítésében, így a kötőanyag a homokszemcséket nagyon gyorsan képes egymással összekötni [44] [55] [56]. Az adalékanyag összetételének függvényében több tulajdonság is befolyásolható, mint például az üríthetőség.

3.3.3.2.2. A Cordis® kötőanyagrendszer

A Hüttenes-Albertus-féle Cordis® kötőanyagrendszer oldószerből és szervesetlen kötőanyagmátrixból áll, amely módosított foszfát-, szilikát- és borát csoportokat tartalmaz [26] [36]. A 16. ábrán a Cordis® kötőanyagrendszer molekuláris felépítése látható a homokszemcsék felületén.



16. ábra A Cordis® kötőanyag felépítése a homokszemcsék között [26]

Az alkalmazott só csoportok kombinációjával lehetséges a különböző tulajdonságok javítása, ill. optimalizálása [57]. A következő tulajdonságok befolyásolhatók:

- a formázókeverék folyékonysága és a reaktivitása,
- a mag olvadék által történő nedvesítése,
- a magok tárolhatósága.

Az *M.17.* mellékletben megtekinthető a Cordis® kötőanyaggal történő maggyártás technológiai folyamata. A magszekrény hőmérséklete függ a mag geometriájától, ill. a forró levegős átfűtás is opcionális [36]. A kötőanyagban található víz a magszekrény hőjének hatására elpárolog, amelynek következtében a magok kikeményedése végbemegy [26].

4. AZ ÖNTÖDEI HASZNÁLT HOMOKOK ÚJRA-HASZNOSÍTÁSA

Amióta az öntödék kvarchomokot alkalmaznak alapanyagként a formák és a magok előállításához, nagy szerepet játszik a használt homok regenerálása (ill. újra-hasznosíthatósága), amely gazdasági és környezetvédelmi szempontból is fontos technológiai folyamat. Az öntés során keletkező használt homok kezelése három úton történhet, mégpedig úgy, hogy az öntöde a használt homokot üzemen belül vagy üzemen kívül újra-hasznosíthatja, ill. deponálhatja. Az új környezetvédelmi irányelvek arra sarkalják az üzemeket, hogy a keletkező hulladékot minél nagyobb arányban üzemen

belül újra-hasznosítsák [15] [58]. Az *M.18.* mellékletben megtekinthető a használt homok újra-hasznosításának lehetséges kimenetele [58].

A használt homokot a regenerálhatóság szempontjából két csoportra lehet bontani, mégpedig a mono rendszerre (a használt homok egy egységes formázótechnológiából származik) és a kevert rendszerre (a használt homok eltérő típusú formázó- és maghomokból képződik) [60]. A használt homok attól függően tartalmaz szennyezőanyagot, hogy milyen formázókeverék-rendszerből származik és milyen a termikus múltja. A használt homok amíg ténylegesen visszajáratva eljut a magkészítéshez, különböző részfolyamatokon megy keresztül. Az *M.19.* mellékletben megtekinthető a használt homok regenerálási ciklusa.

A regenerálás során az a cél, hogy a használt homokot újra fel lehessen használni a magok, ill. a formák gyártásához, továbbá a regenerátumból készült homokkeverékek az újhomokhoz hasonló tulajdonsággal rendelkezzenek. A következő okok nagy szerepet játszanak a regenerálási folyamat bevezetésében [15] [61]:

- A jó minőségű újhomok ára növekszik, különösen a speciális kezelések (szárítás, monofrakciók válogatása és a kívánt granulometria összeállítása) miatt.
- A homok szállítási költsége a homok teljes árának a jelentős részét képezi, amelybe beletartozik a használt homok deponálásának a költsége is.
- Az újhomok lelőhelyeinek a száma korlátozott, ugyanis az öntészeti célokra megfelelő minőségű homokot (minimum 98% SiO₂) nem lehet minden lelőhelyen bányászni és kitermelni.
- A homokot más ipari ágazatokban is alkalmazzák, mint például az üveggyártásban és az építőiparban is.
- A maggyártáshoz alkalmazott keverékek exportálását (veszélyes hulladék) szigorúan korlátozzák és alaposan ellenőrzik. A keverékek számos szennyezőanyagot tartalmaznak a kötőanyagokból és adalékanyagokból (fenol, Na₂CO₃, ammóniumsók és egyéb vegyi anyagok), amelyek lemosódhatnak és a talajvízbe, folyókba kerülhetnek.

4.1. A regenerálási technológiák ismertetése

Különböző regenerálási technológiák alkalmazhatók az öntödei használt homokok regenerálására. A formázóanyag típusától függően eltérő regenerálási eljárás alkalmazható az újhomokhoz hasonló regenerátum gyártásához. Az *M.20.*, az *M.21.* és

M.22. mellékletekben megtekinthetők, hogy mely regenerálási rendszer alkalmazható a mono és a kevert rendszerű formázóanyag típusokhoz.

A szervesetlen kötésű maghomok-keverékek regenerálása nagy kihívásnak számít az öntödék számára, mivel a szerves kötőanyagokkal ellentétben ezeknél a rendszereknél nem ég ki a kötőanyag az öntés során. A legelterjedtebb regenerálási eljárás a szervesetlen vízüveges kötőanyagrendszerek esetében a mechanikus, ill. a mechanikus-termikus regenerálás kombinációja [27].

4.1.1.A nedves regenerálás

A nedves regenerálás csak azon kötőanyagok esetében alkalmazható, amelyek vízben oldódnak, mint például a vízüveges kötőanyagok, ill. a bentonitos homokkeverékek. A nedves regenerálás során a használt homokot többlépcsős rendszerben átmoszák. A vízüveges kötőanyag esetében ilyen berendezések Európában ipari használatban nem terjedtek el, ill. nem történt fejlesztés ebben az irányban [62]. Ennek oka, hogy a berendezés működtetéséhez nagy mennyiségű víz és helyigény szükséges, továbbá a szennyeződött víz tisztítása és az iszap deponálása is problémás [15] [36] [63].

4.1.2.A termikus regenerálás

A termikus regenerálást főként szerves kötőanyagrendszerek esetében alkalmazzák, azonban a vízüveg-észter-eljárással készített magok/formák öntése során keletkezett használt homoknál is alkalmazható, ahol is az égés során a szerves alkotók a homok felületéről leégnek, továbbá a termikus és mechanikus regenerálás kombinációja esetében ez az egyik regenerálási lépcső. A termikus regenerálás során a homokszemcsék felületéről a maradék szerves kötőanyag leég, ezáltal újhomokhoz hasonló regenerált homok keletkezik [64]. Ez a regenerálási eljárás nagy energia és helyigényű, emiatt csak nagy széria gyártása esetén lehet kifizetődő [62] [65].

4.1.3. A mechanikus regenerálás

A mechanikus regeneráló berendezések manapság széles körben elterjedtek a szervesetlen kötőanyag tartalmú használt homokok regenerálására. Ezen berendezésekben a mechanikus koptatás különböző őrlőgolyókkal vagy a szemcsék egymáson történő dörzsölésével történik. A berendezések kis helyigényűek, az üzemeltetésük olcsóbb, és nagy előnyük, hogy rugalmasan illeszthetők az adott öntöde kialakításához [15] [36]. Az M.23. mellékletben megtekinthető a mechanikus regenerálás alkalmazásának az előnyei és a hátrányai.

4.1.4. A termikus-mechanikus regenerálás

Ennél a típusnál a mechanikus regenerálás mellé egy termikus regenerálási lépcsőt is a regenerálási rendszerbe állítanak. Ezt a kombinációt több cég is alkalmazza nagyszériás gyártás esetében, például a BMW cégcsoport és a Scheuchel GmbH cég is. A beruházási költségek, a termikus regenerálási blokk miatt magasak [63]. Az *M.24.* mellékletben megtekinthető a termikus-mechanikus regenerálás alkalmazásának az előnyei és a hátrányai.

A két regenerálási technológia kombinációjának az oka, hogy a szervesetlen kötőanyagok regenerálása során nagyobb regenerálási hatékonyság érhető el. Ugyanis a szervesetlen kötőanyagok esetében a termikus regenerálás során a homokszemcsék felületén lévő maradék kötőanyag a hőterhelés hatására deaktiválódik, amelynek a folyamata az *M.25.* mellékletben megtekinthető [20]. A termikusan regenerált regenerátumhoz új kötőanyagot adagolva, az új keverék, újhomokhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkezhet. Ezzel ellentétben a mechanikus regenerálás során a homokszemcsék felületén aktív maradék kötőanyag található, amely az *M.26.* mellékletben is látható. A mechanikus regenerátumhoz adagolt új kötőanyag befolyásolja az új keverék folyékonyságát és a felhasználhatósági időt is, amely a maggyártásban problémákat okozhat.

4.2. A regenerálás hatáskát minősítő tényezők

Az alkalmazott regenerálási technológia hatáskának a minősítésére különböző minősítő tényezők alkalmazhatók.

Az egyik a regenerátumot minősítő tényező a regenerálási fok. A különböző szakirodalmakban a regenerálási fokot többféleképpen is jelölik. Megtalálható, mint α_R , mint β_R és mint U_R [36] [58] [60] [66], habár a regenerálási fok definíciója nem változik egyik esetben sem, azaz a regenerátum egy jellegzetes mért minősítő értékének a százalékos csökkenése a használt homok kiinduló mért minősítő értékéhez képest. Ideális esetben ez az érték 100%, azonban a gyakorlatban ez ritkán kivitelezhető, ugyanis függ az alkalmazott regenerálási rendszer hatékonyságától [36].

$$\alpha_R = \frac{(PA-PE)}{PA} * 100 [\%] \quad (3)$$

Ahol α_R = a regenerálási fok [%]

PA = a használt homok esetében mért minősítő érték,

PE = a regenerátumnál mért minősítő érték.

A regenerálási fok meghatározásához a szerves kötőanyagoknál az izzítási veszteség a legalkalmasabb vizsgálati paraméter, ill. a vízüveges kötőanyagoknál pedig az alkáli-oxid tartalom. Minősítő tényezőként alkalmazzák a regenerátum kihozatalt is, amelyet „A”-val jelölnek. A regenerátum kihozatal a regenerátum és a használt homok százalékos aránya. Ideális esetben a regenerátum kihozatal 90% fölötti értéken van [36].

$$A = \frac{M_1}{M_2} * 100 [\%] \quad (4)$$

Ahol A= a kihozatal [%],

M₁= a regenerátum mennyisége [kg],

M₂= a használt homok mennyisége [kg].

A regenerálás hatékonysága és a regenerálás foka nagymértékben függ a formázókeverék tulajdonságaitól, amely kihat az öntvény minőségére is. A regenerátum minőségét a formázókeverék kötőanyagtartalma határozza meg, hiszen a nagyobb mennyiségű kötőanyagból több maradék kötőanyag keletkezhet, ami hatással lesz a kötési mechanizmusra [58].

5. A KUTATÓMUNKÁM SORÁN ALKALMAZOTT ALAPANYAGOK, BERENDEZÉSEK ÉS AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK ÁTTEKINTÉSE

5.1. A kísérleteimhez alkalmazott alapanyagok

5.1.1. Az alaphomok bemutatása

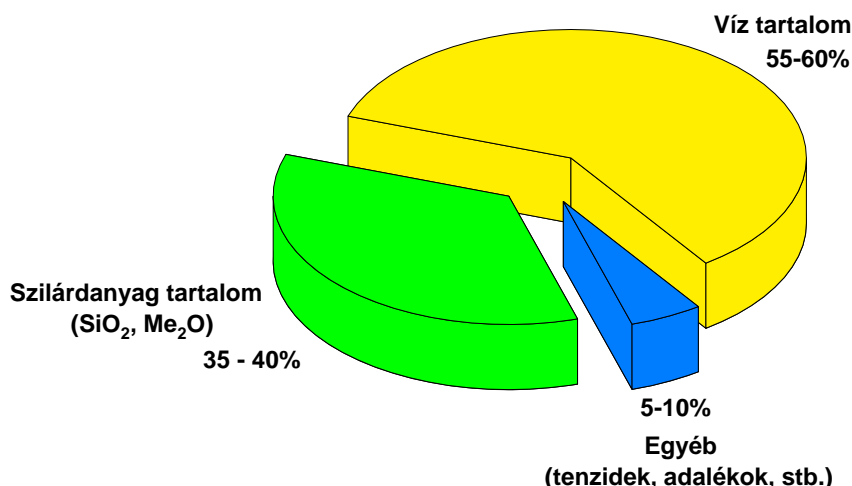
A kísérleteimhez SH34-es szlovákiai kvarchomokot használtam, amely egy három alkotós, közepes szemcseszerkezetű alaphomok. A kvarchomokra jellemző tulajdonságok és a szemcseméret eloszlása az M.27. és az M.28. mellékletben megtekinthetők. A kvarchomokot legömbölyített, krumpli alakú szemcse alak és egyenetlen, barázdált felület jellemzi, amely megkönnyíti a kötőanyag feltapadását és a kötэшhidak képződését a homokszemcsék felületén. A 17. ábrán az SH34-es alaphomok pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvétele látható.



17. ábra Az SH34-es alaphomok pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvétele

5.1.2. A vízüveges kötőanyag bemutatása

A vízüveges homokkeverékek készítéséhez az ASK féle Inotec EP4158 módosított szilikát kötőanyag keveréket alkalmaztam, amelyet főként az alumínium öntvények gyártásához használnak. Ez a vízüveges kötőanyag 2,2-es modulú, amely a $\text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$ arányát fejezi ki. A vízüveges kötőanyag tulajdonságai az M.29. mellékletben megtekinthető. A 18. ábrán a vízüveges kötőanyag általános összetétele látható.



18. ábra Az Inotec EP4158 vízüveges kötőanyag összetétele [20]

Ennél a típusú vízüveges kötőanyagnál a kötési folyamat a szárítási folyamat (dehidratáció) és a kémiai reakció kombinációján alapszik, ennél fogva a magok gyártása meleg magszekrényben történik meleg levegős átfúvással. A magszekrény hője által a kötőanyagban lévő víz, amely oldószerként van jelen, kicsapódik, továbbá elindul a kémiai reakció is, amely a szilikát molekula térhálósodásához vezet. A meleg levegős átfúvás arra szolgál, hogy a kémiai-fizikai kötési folyamatot elősegítse, ezáltal a maggyártási ciklusidő csökkenthető legyen [23].

5.2. A vízüveges homokkeverékek és a hajlító próbatestek előállítása

A formázókeverékek vizsgálata során központi szerepet tölt be a szilárdsági tulajdonságok meghatározása [68] [69]. A szilárdsági vizsgálatok esetében a kötőanyagrendszerhez alkalmazkodva (bentonitos keverékek, szerves bázisú keverékek, szervesetlen kötőanyagrendszerek stb.) választják ki a megfelelő vizsgálati módszert. Ezek közül a legelterjedtebb vizsgálati módszer a szerves és a szervesetlen formázókeverékek esetében a hárompontos hajlítószilárdság vizsgálat.

A kísérleteim során a vízüveges homokkeverékeket a Multiserw Typ LMB-U laboratóriumi keverővel készítettem el. A homokkeverékek készítése során azonos

receptúrát alkalmaztam, amely azt jelenti, hogy 2,2m/m% vízüveges kötőanyagot adagoltam a homokhoz. A kötőanyag adagolását követően a homokkeveréket 2 percig homogenizáltam.

A hajlító próbatestek előállításához a meleg levegős átfúvással a warm-box-eljárást alkalmaztam. A szabványos hajlító próbatesteket a Multiserw Universal Core Shooter maglövő berendezéssel készítettem. A hajlító próbatestek gyártása során mindig azonos előállítási paramétereket alkalmaztam, amelyet a 4. táblázat mutat be.

4. táblázat A hajlító próbatestek előállítási paraméterei

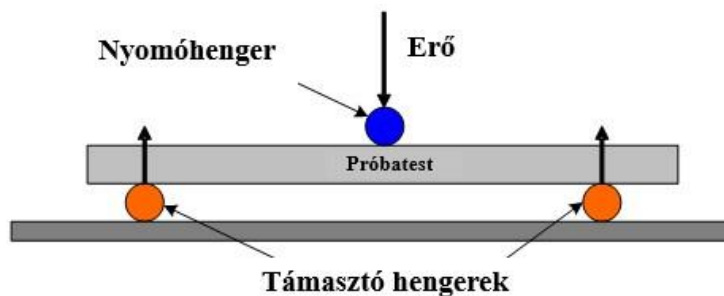
Paraméter	Érték
Magszékreny hőmérséklet	180°C
Átfúvási idő	30s
Átfúvási hőmérséklet	100°C
Lövő nyomás	3bar

A maglövő berendezéssel a VDG-Merkblatt P72 szabvány szerinti hajlító próbatestek előállítása történik, amelynek a méretei 22,4×22,4×172mm [67] [70] [84]. A 19. ábrán a szabványos hajlító próbatestek láthatók az előállítást követően.



19. ábra A szabványos hajlító próbatestek pihentetése a szilárdság mérések előtt

A hajlító próbatestek vizsgálatához a Multiserw Universal Strength Testing Machine berendezést használtam. Ezzel a típusú berendezéssel a hagyományos három pontos hajlítószilárdság vizsgálat végezhető el és a szilárdság érték a digitális kijelzőn N/cm² mértékegységben olvasható le. A hárompontos hajlítóvizsgálat lényege, hogy a próbatestet két alátámasztási ékre (hengerre) ráhelyezve és a középpontján nyomóékkal terhelve, eltörjük. A vizsgálandó próbatestet felülről egy, alulról pedig két ponton éri erőhatás. A terhelés nulláról indulva folyamatosan növekszik, míg a próbatest el nem törik, eközben a próbatest közepén mérésre kerül az erő (F), amely alapján számolható a hajlítószilárdság. A hajlítószilárdság az a maximális feszültség, amelynél a próbatest eltörik [71] [72]. A 20. ábrán a hajlító próbatest vizsgálatának sematikus ábrázolása látható.



20. ábra. A hajlítóvizsgálat során a próbatestre kifejtett erő sematikus ábrája [73]

A hajlító próbatestek előállítását követően a tárolási idő és a hőterhelési hőmérséklet függvényében határoztam meg a hajlítószilárdság értékeit. A disszertációmban bemutatott hajlítószilárdság értékek minden esetben négy mérésből származó átlagértéket jelentenek. A kísérleteim során az 5. táblázatban bemutatott hajlítószilárdság értékeket határoztam meg.

5. táblázat A vizsgálataim során meghatározott szilárdság értékek

Hajlító szilárdság	Leírás
Kezdő szilárdság	A hajlító próbatest mag szekrényből való kivétele utáni harmincadik másodpercben meghatározott szilárdság érték.
Végzilárdság	Egy óras tárolást követően mért szilárdság érték.
Maradó szilárdság	A kemencében való egy óras hőterhelést követően, a hőterhelt próbatestek egy óras pihentetését követően mért szilárdság érték

Az újhomok és a homogenizált hőterhelt homokkeverékek granulometriai tulajdonságainak a meghatározásához a Fritsch Analysette 3 Pro szitagépet alkalmaztam. A szitaanalízis során 100g homokmintát 15 percig 2mm-es rezgés amplitúdóval szitáltam le. Ezt követően a szitamaradékok visszamérése által meghatároztam a homokminták szemcseméret eloszlását, ill. számoltam az átlagos szemcseméretet a (5) egyenletben bemutatott képlet alapján. Az átlagos szemcseméret értéke megegyezik annak az elméleti szitának a méretével, amelyen a vizsgált homok 50 %-a átesik, ill. 50 %-a fennmarad [9] [11] [67]. Az átlagos szemcseméret meghatározása az (5) egyenlet alapján a következő:

$$\bar{A}_{sz} = \frac{\sum G_n}{\sum G_n S_{kn}} \quad (5)$$

ahol: \bar{A}_{sz} = az átlagos szemcsenagyság [mm],

S_{kn} = a svéd kutatók által meghatározott állandó,

G_n = az egyes szitákon visszamaradt homokszemcsék tömege [g].

Az M.30. mellékletben a vizsgálataimhoz alkalmazott szabványos szitasor szitaátmérőinek a listája látható.

5.3. A kísérleteimhez szükséges vizsgálatok áttekintése

5.3.1. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok bemutatása

A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) alkalmazásával lehetőség adódik az alaphomokok és a kötőanyagtartalmú homokkeverékek felületének, a kötőhidak és a próbatestek töretfelületének vizsgálatára, ill. elemzésére [52].

A felvételek elkészítéséhez az összemorzolt, homogenizált használt homokkeverékekből vettem mintákat, amelyek hőterhelési hőmérséklettől függetlenül az 5. vizsgálati ciklusból származnak. A felvételek elkészítése előtt a homokminták felületét vékony rétegben arannyal vontuk be. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek elkészítésének a célja az volt, hogy megvizsgáljam a hőterhelési hőmérséklet hatására a hőterhelt, homogenizált használt homokkeverékek felületén bekövetkező változásokat. A hőterhelt homokminták vizsgálatához a Fémteni és Képlékeny-alakítástani Intézeti Tanszéken lévő Zeiss EVO MA10 típusú pásztázó elektronmikroszkópot használtam. Ezzel a típusú pásztázó elektronmikroszkóppal lehetőségem volt EDAX analízisre is, amellyel megvizsgáltam a homokszemcsék felületén lévő kötőanyag elemi összetételét.

5.3.2. A vízüveges kötőanyagtartalmú oldatok elektromos vezetőképességének a meghatározása

Az elektromos vezetőképesség meghatározása egy gyakori, üzemben is alkalmazott vizsgálati módszer a vízüveges homokkeverékek laborban történő minősítésére [11] [12] [78] [79]. A vízüveges homokmintákból készített oldatok elektromos vezetőképesség értékének a mérése a VDG Merkblatt P26 és a DIN EN 27888 szabványok alapján történik. Az elektromos vezetőképesség meghatározásához a WTW Tetracon 325 mérőberendezést alkalmaztam, amelyet 0,01 mol/l KCL standard oldattal kalibráltam. Az előkészített oldatokat minden esetben szobahőmérsékleten (25°C-on) vizsgáltam.

A kísérleteim célja az volt, hogy megvizsgáljam miként változik az elektromos vezetőképesség értéke a vízüveges kötőanyag koncentráció függvényében, ill. a hőterhelést követően a vízüveges kötőanyagtartalmú hőterhelt homokkeverékből készített oldatokban. Az elektromos vezetőképesség méréséhez 100g homokmintát 200ml, 60°C-os desztillált vízzel 5 percig egy fűthető mágneses keverő segítségével kevertem, majd az oldatot szűrőpapíron átszűrtem és az oldatban megmértem az elektromos vezetőképességet. Az oldatok készítése során a keverőhöz csatlakozó hőmérséklet-érzékelővel mértem az oldat hőmérsékletét.

5.3.3. Az oldható alkáli-oxid tartalom meghatározása

A vízüveges homokkeverékek és a regenerátum laborban történő minősítésének egyik módja az oldható alkáli-oxid tartalom meghatározása. Ezen értéknek a meghatározása történhet sav-bázis titrálással [75] [76], ill. bármely elemanalitikai módszer alkalmazásával [77]. A disszertációmban bemutatott oldható alkáli-oxid értékek meghatározásához lehetőségem volt a sav-bázis titrálás, ill. az atomabszorpciós spektrofotometria alkalmazására is. A vizsgálni kívánt vízüveges oldatok előkészítéséhez 100g homokkeveréket 60°C-os desztillált vízben 5 percig egy mágneses keverő segítségével kevertem, ügyelve arra, hogy az oldat hőmérséklete ne változzon. Ezt követően szűrőpapíron átszűrtem az oldatot és a lehűlést követően elvégeztem a méréseket.

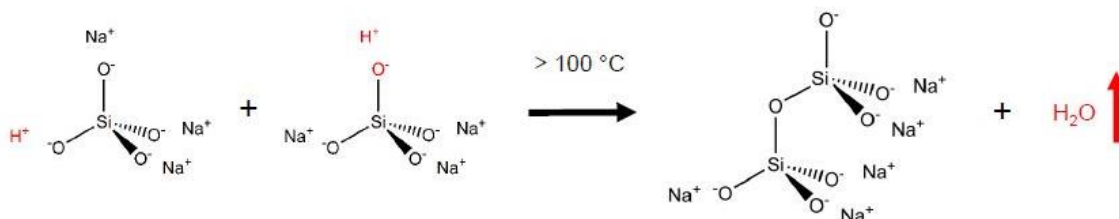
A vízüveges rendszereknél lehetőség van arra, hogy titrálással meghatározzuk az Na_2O és SiO_2 tartalmat adott oldat koncentráció esetében. A vízüveges oldatok sav-bázis titrálását a NemaK Linz GmbH-nál volt lehetőségem elvégezni, egy Mettler Toledo féle automata titrátorral. A titrálás két lépésben történik, az első lépésben direkt titrálással meghatározható a nátrium-oxid tartalom, majd a második lépésben indirekt módon, visszatitrálással történik a szilícium-dioxid tartalom meghatározása. A disszertációmban csak az oldható alkáli-oxid tartalommal foglalkozom, ugyanis ez a komponens befolyásolja többek között a homokszemcsék között kialakuló kötőhidak erősségét [38].

A sav-bázis titrálást annál a kísérletsorozatnál alkalmaztam, amelynél a hőterhelés hatását vizsgáltam a vízüveges homokkeverék elektromos vezetőképességére és az oldható alkáli-oxid tartalomra. Az összes többi kísérletsorozat esetében az atomabszorpciós spektrofotometriát (AAS) alkalmaztam.

A titrálás során OH-csoport meghatározása történik, amely ennél a rendszerben NaOH és KOH vegyületek lesznek, amely alapján a reakcióképes alkáli-ionok koncentrációja meghatározható az oldatban. A titrálás során figyelembe kell venni, hogy a mért értékek esetében nem lehet megkülönböztetni azt, hogy az oldat alkáli-ion tartalma miként oszlik meg a nátrium és a kálium között. Ennek pontos meghatározásához atomabszorpciós spektrofotometria szükséges, ahol pontosan meghatározható az oldat nátrium és kálium tartalma, ill. a rendszerben lévő alkáli tartalom.

Az atomabszorpciós spektrofotometriás vizsgálatokhoz a Járműipari Öntészeti Intézet Tanszéken lévő Analytik Jena Novaa 400 atomabszorpciós elemanalitikai berendezést alkalmaztam. A mérések kivitelezése előtt különböző koncentrációjú nátrium

kicsapódásával jár. A 22. ábrán látható, hogy a szilanol-csoportok víz kiválása mellett összekapcsolódnak.



22. ábra A szilanol-csoportok összekapcsolódása a kondenzációs reakciók során [88]

Feltételeztem, hogy a szárítás során a vízűveg oldatból csak a szabad víz (oldószer) távozik, azonban kristályvíz még nem távozott a mintából. Ennek további vizsgálatára a szárított vízűveg mintát megvizsgáltam a Derivatograph-C MOM Budapest típusú berendezéssel. A vizsgálat célja az volt, hogy feltárjam történik-e további tömegváltozás a szilárd mintában (kristályvíz kiválása) és ez mely hőmérséklet-tartományon következik be.

5.3.4.2. A röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálatok

A különféle röntgendiffrakciós technikákkal lehetőség van kristályos és amorf anyagok, folyadékok és gázok szerkezetének a vizsgálatára [90]. A kristályos anyagok esetében az ún. egykristály és a polikristályos (vagy pordiffrakciós) diffrakciós módszereket használják [91].

A szárított vízűveg röntgendiffrakciós vizsgálatának elvégzéséhez lehetőségem volt az Ásvány és Kőzettani Tanszéken található Anton Paar HTK 1200N röntgen diffraktométer alkalmazására. Ez a típusú berendezés lehetővé teszi, hogy a minták szerkezetét és a fázisátalakulásokat magas hőmérsékleten (max. 1200°C-ig) is megvizsgálhassuk [92]. A röntgendiffrakciós vizsgálataim célja az volt, hogy meghatározzam a vízűveges kötőanyagban, hőterhelés hatására lejátszódó kristálytani átalakulásokat és a kialakuló fázisok összetételét, továbbá ezzel kívántam modellezni az öntés során a vízűveges kötőanyagban lejátszódó átalakulásokat is. Az *M.31.* mellékletben a szárított vízűvegminta kristálytani átalakulásainak vizsgálatához alkalmazott hőterhelési hőmérsékletek listája látható.

A 6. táblázatban a disszertációmban bemutatásra kerülő vizsgálatok láthatók a vizsgált minta alapján csoportosítva.

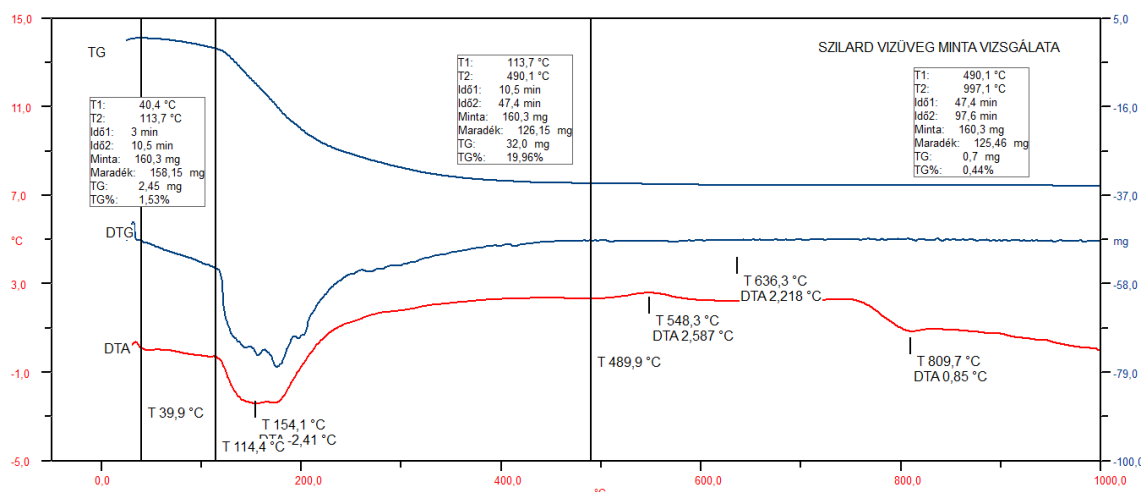
6. táblázat Az elvégzett vizsgálatok összefoglalása

Vizsgált minta	Elvégzett vizsgálatok
Vízüveges kötőanyag	- Elektromos vezetőképesség - Oldható alkáli-oxid tartalom
Szárított vízüveg	- XRD-vizsgálat - Derivatográfus vizsgálat
Szárított vízüvegből készített oldat	- Oldható alkáli-oxid tartalom
Hajlító próbatest	- Tömeg - Hajlító szilárdság
Hajlító próbatestből készített oldat	- Elektromos vezetőképesség - Oldható alkáli-oxid tartalom
Homogenizált hőterhelt homokkeverék és újhomok	- Szitaanalízis - Halomsűrűség - SEM vizsgálat

6. A VÍZÜVEGBEN HŐTERHELÉS HATÁSÁRA LEJÁTSZÓDÓ KRISTÁLYTANI ÁTALAKULÁSOK VIZSGÁLATA

6.1. A szárított vízüveg termogravimetriás berendezéssel történő vizsgálata

A szárított vízüveg mintát derivatográfus vizsgálatot végeztem, amellyel a mintában bekövetkező tömegváltozást határoztam meg a hőmérséklet függvényében. A 22. ábrán a szárított vízüveg minta derivatogramja látható.

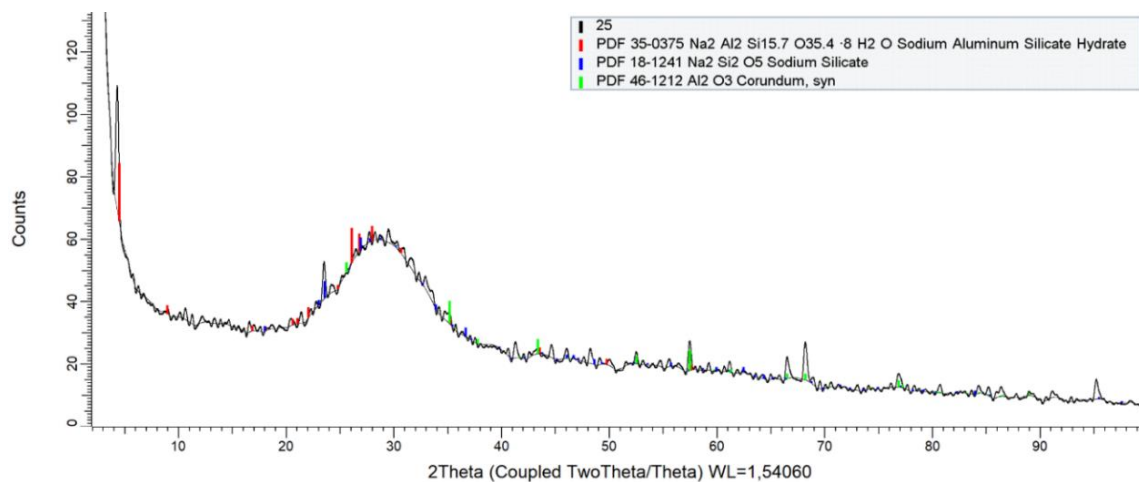


23. ábra A 105°C-on szárított vízüveg minta derivatogramja

A 23. ábrán látható, hogy a tömegállandóságig szárított vízüveg mintában a hevítés hatására 22%-os tömegcsökkenés következik be 110°C és 490°C közötti hőmérsékleten. A legnagyobb mértékű tömegcsökkenés azonban 115°C és 300°C között tapasztalható. Ez a tömegcsökkenés a kristályvíz eltávozásával magyarázható. További tömegcsökkenés 800°C környékén következik be, ahol a vízüveg már átalakul üvegszerű fázissá.

6.2. A szárított vízűveg röntgen diffraktométerrel történő vizsgálata

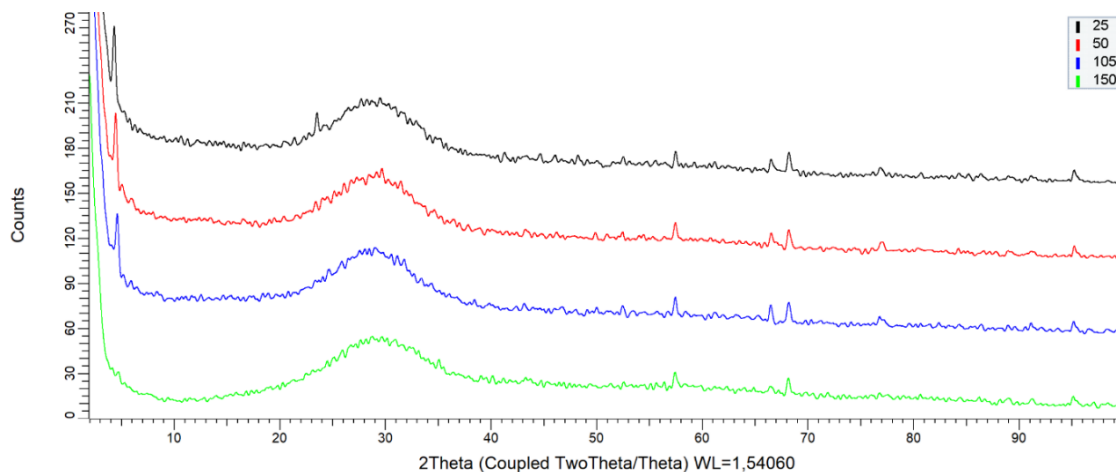
A szárított, kristályos vízűveg mintát röntgen diffraktométerrel vizsgálva több reflexiós csúcs is meghatározható. A 24. ábrán a 105°C-on tömegállandóságig szárított vízűveg minta szobahőmérsékleten (25°C) meghatározott diffraktogramja látható.



24. ábra A 105°C-on szárított vízűveg 25°C-on felvett diffraktogramja

Az elemzés kimutatta, hogy 105°C-on a vízűvegben a vízveszteség által olyan kristályosodási folyamatok zajlanak le, amelyek során metastabilis hidratált nátrium-alumínium-szilikát fázis képződik, amely tartalmaz még kristályvizet, továbbá nátrium-szilikát és alumínium-oxid is képződik.

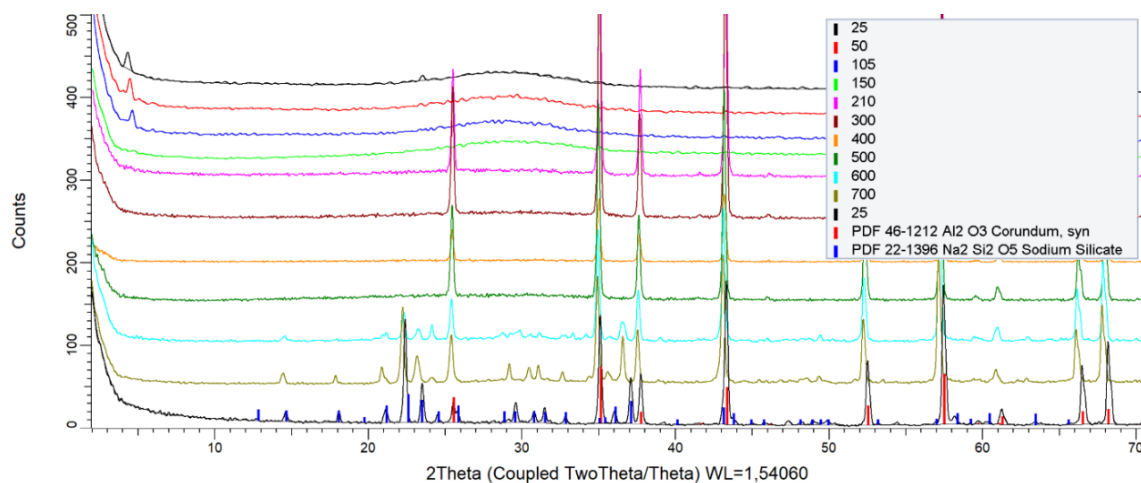
A szárított vízűveg minta szerkezetét 700°C-ig vizsgáltam meg, amely az alumínium öntészetben a maximális hőterhelési hőmérsékletet jelenti, amit a mag felületi hőmérséklete elérhet. Ezen hőmérséklet-tartományon belül több hőmérsékletet vizsgáltam meg. A 25. ábrán a szárított vízűveg minta 25°C-on, 50°C-on, 105°C-on és 150°C-on meghatározott diffraktogramja látható.



25. ábra A szárított vízűveg röntgendiffrakciós vizsgálata 25°C, 50°C, 105°C, 150°C

A szárított vízűveg összetétele a hőterhelés hatására változáson megy keresztül. A 25. ábrán látható, hogy a 25°C-on tapasztalt nátrium-szilikát fázis a hevítés hatására eltűnik a mintából. A metastabilis hidratált nátrium-alumínium-szilikát fázis továbbra is jelen van 50°C-on, ill. 105°C-on is. A diffraktogramon látható, hogy 105°C-on ennek a fázisnak a mennyisége csökken, majd pedig 150°C-on szinte teljesen eltűnik. A metastabilis fázis eltűnése a növekvő hőmérséklet hatására kiváló kristályvízzel áll összefüggésben.

A szárított vízűveg mintát megvizsgáltam magasabb hőmérséklet-tartományokon is, mégpedig 210°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C és 700°C-on, ill. a minta lehülését követően szobahőmérsékleten is. A 26. ábrán a szárított vízűveg minta diffraktogramja látható további hevítés hatására.



26. ábra A szárított vízűveg diffraktogramja további hevítés hatására

A 26. ábrán látható, hogy 150°C és 500°C közötti hőmérséklet-tartományon nem tapasztalható kiugró reflexiós csúcs, mivel a vízűveg minta röntgen amorf tulajdonságú anyagként viselkedik, ezáltal a röntgen diffraktométer nem talál elemezhető kristályos szerkezetet. 150°C és 210°C között olyan gyors tömegveszteség (kristályvíz kiválás) következik be, hogy a minta összezsugorodik és megjelenik a mintatartó anyaga (a korund) a diagramokon. További hevítés hatására, 600°C-on az amorf tulajdonságú anyag felbomlik és újabb kristályos átalakulás következik be a rendszerben. Ezen hőmérséklettől kezdődően megjelenik újra a nátrium-szilikát fázis. A rendszer visszahűtését követően a szobahőmérsékleten vizsgált mintában továbbra is látható a nátrium-szilikát fázis, azonban a minta szerkezete nem tartalmaz metastabilis nátrium-alumínium szilikátot, amelyet ezen a hőmérsékleten korábban mértünk.

7. A VÍZÜVEGES KÖTŐANYAG OLDÁSI MÓDSZERÉNEK BEMUTATÁSA

Az oldási kinetikai vizsgálataim célja egy olyan oldási módszer kidolgozása volt, amellyel a vízüveg tartalmú homokmintában lévő oldható alkáli-oxid tartalom pontosan meghatározható. Ennek fontossága a használt homok, ill. a regenerálási körfolyamatban van, mivel a homokszemcsék felületén lévő ún. maradék kötőanyag részt vesz az új kötések kialakításában, amely befolyásolni fogja a magok szilárdságát az öntés előtt, ill. azt követően [93].

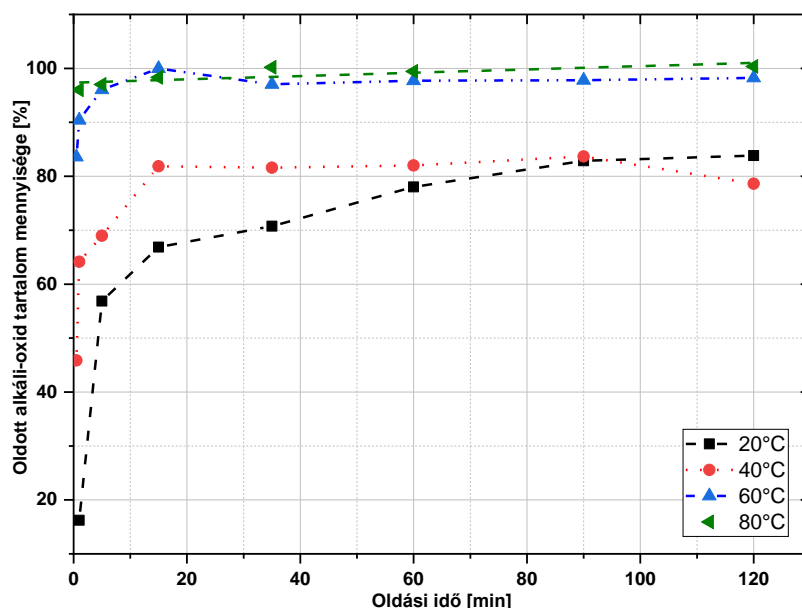
A vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékek kötőanyagtartalmának meghatározása történhet sav-bázis titrálás útján, ill. bármely elemanalitikai módszer alkalmazásával. Ahhoz, hogy ezeket a minősítő módszereket megfelelően alkalmazni lehessen, szükséges egy olyan egységes oldat készítési módszer kidolgozása, amellyel a mérések során pontosan meghatározható a vízüveg oldható kötőanyag tartalma.

Az oldat készítési módszer kidolgozásához a szárított és aprított vízüveg mintát használtam, amelyet különböző hőmérsékletű desztillált vízben különböző időtartamig oldottam fel. A 7. táblázatban a szárított vízüveg vizsgálatához alkalmazott oldási paraméterek láthatók.

7. táblázat A szárított vízüveg vizsgálatához alkalmazott oldási paraméterek

Az oldási paraméterek a szárított vízüveg vizsgálatához								
Oldási idő (min)	0,5	1	5	15	35	60	90	120
Oldási hőmérséklet	20°C; 40°C; 60°C; 80°C							
Desztillált víz mennyisége	100ml							
Oldott minta tömege	0,5g							

A vizsgálataimhoz az atomabszorpciós spektrofotometria (AAS) módszert alkalmaztam. A 27. ábrán a 105°C-on szárított vízüveg oldatban lévő oldott alkáli-oxid tartalom mennyiségének változása látható az oldási hőmérséklet és az oldási idő függvényében.



27. ábra A szárított vízüveg oldott alkáli-oxid tartalom mennyiségének a változása az oldási hőmérséklet és az oldási idő függvényében

A 27. ábrán bemutatott eredményekből látható, hogy a 20°C-on végzett kísérletek során viszonylag jelentős időszükséglete van a szárított vízüveg minta oldható alkáli-oxid tartalmának oldódásához. Ezen a hőmérsékleten 120 perc oldási időt követően az oldható alkáli-oxid tartalom 83,8%-a oldódik fel. A hőmérséklet emelkedésével ez a folyamat nagymértékben felgyorsul. A 40°C-os oldatok esetében 15 perctől kezdve az oldható alkáli-oxid tartalom 82%-a feloldódik, amely az oldási idő növelésével nem változik. A 60°C-os oldatok esetén már 5 perc alatt feloldódik a mintában lévő oldható alkáli-oxid tartalom 96%-a. A 80°C-os oldási hőmérsékleten a vízben feloldódott alkáli-oxid mennyisége már 1 perc oldódási időn belül eléri a 96 %-ot, ezért az oldódási kinetika részleteit nem tudtam vizsgálni. A 27. ábra alapján a szárított vízüveg oldható alkáli-oxid tartalma (C) a következő egyenletek szerint változik a különböző hőmérsékletű desztillált vízben történő különböző oldási idő (t) hatására.

- A 20°C-os oldási hőmérsékleten az oldható alkáli-oxid tartalom a következő két egyenlet szerint változik az oldási idő függvényében:

$$C = 16,2 \cdot t^{0,779}, \text{ ha } 0 \leq t \leq 6,13 \quad (6)$$

$$C = 65,5 + 0,171 \cdot t, \text{ ha } 6,13 \leq t \leq 120 \quad (7)$$

- A 40°C-os oldási hőmérsékleten az oldható alkáli-oxid tartalom a következő két egyenlet szerint változik az oldási idő függvényében:

$$C = 56,1 \cdot t^{0,154}, \text{ ha } 0 \leq t \leq 12,0 \quad (8)$$

$$C \cong 82,3 \pm 1,0, \text{ ha } 12,0 \leq t \leq 90 \quad (9)$$

- A 60°C-os oldási hőmérsékleten az oldható alkáli-oxid tartalom a következő két egyenlet szerint változik az oldási idő függvényében:

$$C = 88,3 \cdot t^{0,0565}, \text{ ha } 0 \leq t \leq 4,4 \quad (10)$$

$$C \geq 96, \text{ ha } t \geq 4,4 \quad (11)$$

A szárított vízüveg oldási kinetikája alapján szabadon kombinálható az oldási hőmérséklet és az oldási idő a kívánt értékek meghatározásához. A disszertációmban bemutatott kísérletekhez a vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékeket 60°C-os desztillált vízben 5 perc oldási időtartammal oldottam.

8. A VÍZÜVEG OLDHATÓ KÖTŐANYAGTARTALMÁNAK VIZSGÁLATA

A használt homokminták és a regenerátum minősítése az ún. maradék (oldható) kötőanyagtartalom mennyiségének a meghatározásával történik. Az alkalmazható minősítő módszerek előnye és hátránya az *M.32.* mellékletben megtekinthető.

Az elektromos vezetőképesség, mint vízüveges kötőanyagrendszerhez alkalmazott minősítő módszer, azért terjedt el ipari alkalmazásban, mivel gyors és egyszerű mérési módszernek tekinthető. A különböző szakirodalmi hivatkozásokban az elektromos vezetőképesség mérések eredményeit a regenerálás hatásfokának a minősítéséhez is alkalmazzák.

Polzin, Jaruszewski és Müller-Späth a kutatómunkájukban alumínium öntödéből származó, többkörben visszajáratott vízüveg-észter-eljárásból származó használt homok és mechanikus regenerálásból származó regenerátum tulajdonságait vizsgálták meg [65]. A kísérletek során tanulmányozták az elektromos vezetőképesség és az Na₂O tartalom változását a regenerálási körök függvényében. A szakirodalmi adatok alapján megállapítható, hogy a regenerálás hatására a mechanikus regenerátum elektromos vezetőképessége és az Na₂O tartalma csökken a használt homok értékeihez képest. A mechanikus regenerátum esetében a két paraméter között nem állapítható meg összefüggés, ugyanis míg az Na₂O tartalom ugyan ingadozik a regenerálási körök alatt, addig az elektromos vezetőképesség nem változik a 2. körtől kezdődően. A használt homoknál és a mechanikus regenerátumnál mért elektromos vezetőképesség és Na₂O tartalom között nem állapítható meg trendszerűség.

Polzin és Tilch a munkájukban vízüveges mechanikus regenerátum visszajáratásával kapcsolatos kísérletsorozatot mutatnak be, amelyet három öntöde bevonásával végeztek el [79]. Az öntödékben olyan fémmel dolgoznak, amelyek öntési hőmérséklete 1100°C

feletti hőmérséklet-tartományba esik, ami azt jelenti, hogy a vízüveges forma, ill. mag legalább 1000°C-os hőterhelést kaphat. A kísérletek során megvizsgálták a mechanikus regenerátum elektromos vezetőképességét és az Na₂O tartalmát is. A bemutatott eredmények alapján a regenerálás hatására a „W”, a „D” és a „Q” típusú regenerátumok elektromos vezetőképessége és az Na₂O tartalma a használt homok értékeihez képest csökkennek az 1. regenerálási körben. Mindkét paraméter értékei az 1. regenerálási körtől kezdődően növekednek és közel azonos trend szerint változnak.

A szakirodalmi adatok alapján megállapítható az, hogy ha a vízüveges magok és formák maximum 600°C-os hőterhelést kapnak (alumínium öntészet), akkor az elektromos vezetőképesség és az Na₂O tartalom között nem egyértelmű az összefüggés. Ezzel a jelenséggel és az okaival a szakirodalomban nem foglalkoznak. A legalább 1000°C-os hőterhelésnél a vízüveges regenerátum esetében az elektromos vezetőképesség és az Na₂O tartalom közel azonos trend szerint változik a regenerálási körök növekedésével, azonban nem állapítható meg egyértelműen, hogy a két érték között van-e korrelációs összefüggés.

A szakirodalomból egyértelműen hiányzik annak a vizsgálata, hogy az elektromos vezetőképesség valóban alkalmazható-e az alumínium öntészetben a regenerátum, ill. a használt homok minősítésére. A kutatómunkám egyik célja az volt, hogy a különböző hőmérséklet-tartományon hőterhelt homokkeverékek esetén vizsgáljam az elektromos vezetőképesség és az oldható alkáli-oxid tartalom közötti kapcsolatot.

8.1. A kötőanyag koncentráció hatása az elektromos vezetőképességre és az oldható alkáli-oxid tartalomra

A kísérleteim során elsőként megvizsgáltam a vízüveges kötőanyag elektromos vezetőképességének és az oldható alkáli-oxid tartalmának a változását különböző kötőanyag koncentrációjú oldatokon. A kötőanyag mennyiségét 20g homokhoz számoltam, mintha homokkeveréket készítenék. A kötőanyagot 200ml desztillált vízben oldottam fel. A vizsgált kötőanyag koncentrációk listája a 8. táblázatban látható.

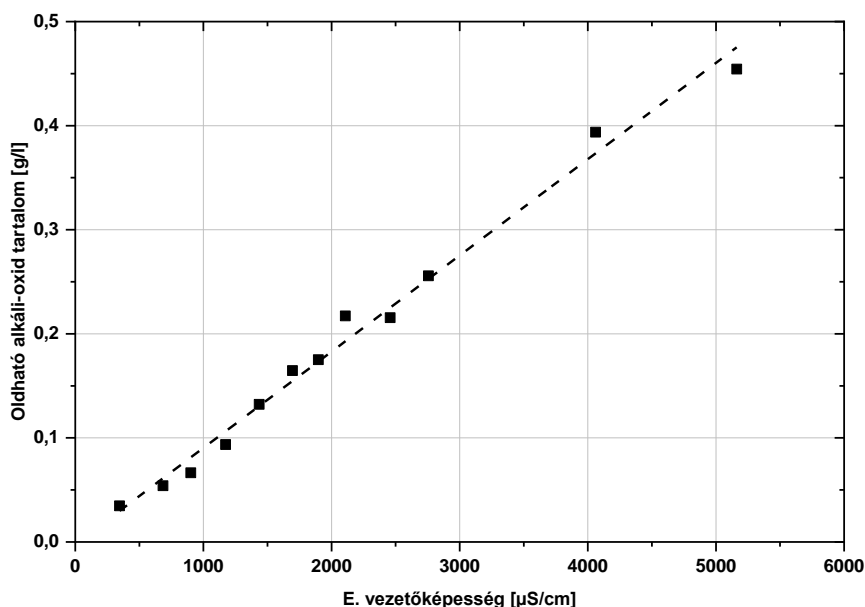
8. táblázat A vizsgált kötőanyag koncentrációk listája

A vizsgált kötőanyag koncentrációk											
1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	15%	20%
200ml desztillált víz											

Az oldható alkáli-oxid tartalom meghatározásához az atomabszorpciós spektrofotometriát alkalmaztam. Az M.33. mellékletben az elektromos vezetőképesség és az oldható alkáli-oxid tartalom változása látható a vízüveges kötőanyag koncentráció

függvényében, amely alapján megállapítottam, hogy a növekvő vízüveges kötőanyag koncentráció növekedésével az elektromos vezetőképesség és az oldható alkáli-oxid tartalom lineárisan növekszik.

A 28. ábrán az elektromos vezetőképesség változása látható az oldható alkáli-oxid tartalom függvényében.



28. ábra Az elektromos vezetőképesség változása az oldható alkáli-oxid tartalom függvényében

A 28. ábra alapján megállapítottam, hogy a növekvő oldható alkáli-oxid tartalom esetében az elektromos vezetőképesség is nő. A két paraméter között lineáris kapcsolat állapítható meg a (12) regressziós egyenlet szerint:

$$C \cong 9,24 \cdot 10^{-5} \cdot k \quad (\pm 1 \%) \quad (12)$$

ahol k = az elektromos vezetőképesség [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

C =az oldható alkáli-oxid tartalom [g/l]

$$R^2=0,98$$

Fontos kiemelni, hogy ez a lineáris kapcsolat abban az esetben áll fenn, ha a vízüveges kötőanyagrendszer nem érte még hőterhelés.

8.2. A hőterhelés hatása a vízüveges homokkeverék elektromos vezetőképességére és az oldható alkáli-oxid tartalmára

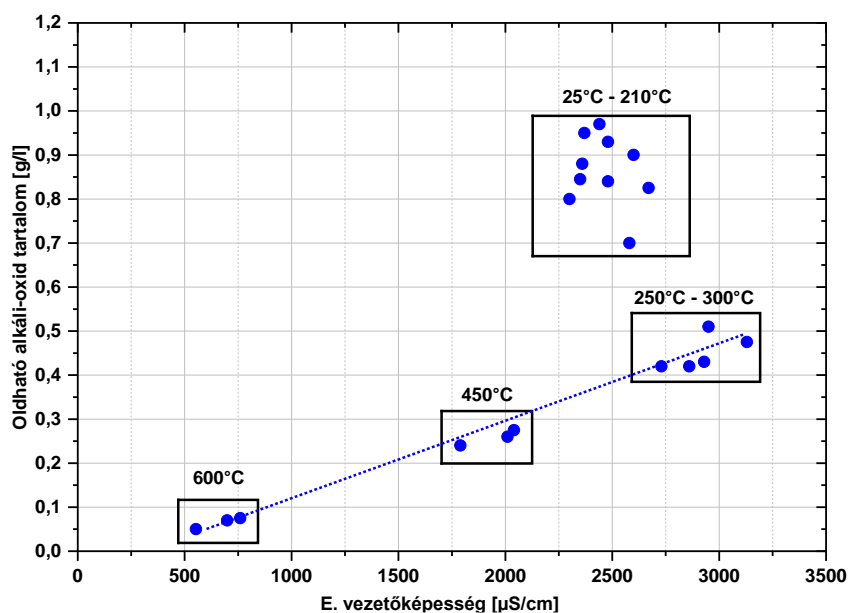
Megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék elektromos vezetőképességének és az oldható alkáli-oxid tartalmának változását. A kísérleteim során 100g homokkeveréket 200ml 60°C-os desztillált vízben 5 percig oldottam, majd megmértem az oldatok elektromos vezetőképességét és az oldható alkáli-oxid tartalmát. Az oldható

alkáli-oxid tartalom meghatározását sav-bázis titrálással végeztem el. A 9. táblázatban a kísérleteimhez alkalmazott hőterhelési hőmérséklet-tartományok listája látható.

9. táblázat A kísérleteimhez alkalmazott hőterhelési hőmérséklet-tartományok

Hőterhelési hőmérséklet	Hőterhelési idő
25°C	1 óra
150°C	
180°C	
210°C	
250°C	
280°C	
300°C	
450°C	
600°C	

A 29. ábrán a hőterhelés hatására bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom és az elektromos vezetőképesség változása látható.



29. ábra A hőterhelés hatására bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom és elektromos vezetőképesség változása

A 29. ábra alapján megállapítható az, hogy a hőterhelés hatására a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma és az elektromos vezetőképessége 25°C és 210°C közötti hőmérséklet-tartományon széles intervallumban változik. Ezen a hőmérséklet-tartományon az oldható alkáli-oxid tartalom 0,7g/l és 1g/l közötti értéktartományban, míg az elektromos vezetőképesség 2300μS/cm és 2700μS/cm között változik. A 6.2. fejezetben bemutatott röntgendiffrakciós eredményeket felhasználva, megállapítható, hogy 150°C-ig a vízüvegben hidratált nátrium-alumínium-szilikát vegyület van jelen. Szobahőmérséklettől kezdődően a hőterhelés hatására ennek a

vegyületnek a mennyisége csökken, azonban nem tudjuk, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverékben ez milyen arányban oszlik meg. Ez befolyásolni fogja a hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmát és az elektromos vezetőképességet is.

A 250°C és 600°C közötti hőmérséklet-tartományon a 29. ábra alapján növekvő oldható alkáli-oxid tartalom mellett nő az elektromos vezetőképesség a (13) lineáris regressziós egyenlet szerint:

$$C \cong 1,72 \cdot 10^{-4} \cdot k \quad (\pm 2 \%) \quad (13)$$

ahol k =az elektromos vezetőképesség [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

C =az oldható alkáli-oxid tartalom [g/l]

$R^2=0,98$

A 29. ábra alapján továbbá megállapítható, hogy 250°C és 300°C közötti hőmérséklet-tartományon 0,4g/l és 0,5g/l oldható alkáli-oxid tartalomnál az elektromos vezetőképesség 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ és 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ értéktartományban változik. 450°C esetében az oldható alkáli-oxid tartalom 0,2g/l és 0,3g/l között változik, az elektromos vezetőképesség pedig 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ és 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ között. 600°C-os hőterhelést követően 0,1g/l alatti oldható alkáli-oxid tartalomnál 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ és 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ érték között változik az elektromos vezetőképesség.

Abban az esetben, ha a hőterhelt vízüveges homokrendszer csak 250°C és 600°C közötti hőmérséklet-tartományon hőterhelt homokkeveréket tartalmazna, akkor az elektromos vezetőképesség alkalmas lenne a hőterhelést követően bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom meghatározására. Ellenben üzemi körülmények között, az öntés során a homok/fém aránya fogja meghatározni a hőterhelt homokrendszer összetételét. Az öntödei homokrendszer körfolyamatában folyamatosan változik az azonos hőterhelést elszenvedett hőterhelt homokkeverékek aránya, ezáltal az elektromos vezetőképesség nem alkalmas a hőterhelést követően bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom meghatározására.

9. A HŐTERHELTELT VÍZÜVEGES HOMOKKEVERÉK KÖRFOLYAMATBAN TÖRTÉNŐ FELHASZNÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A vízüveges kötőanyagrendszerek alkalmazásával kapcsolatban az 1. táblázatban bemutattam, hogy a szakirodalmi ismeretanyagokban számos probléma és kihívás

megoldásával foglalkoznak. Ezek közül a használt (hőterhelt) vízüveges homokkeverék alkalmazásával kapcsolatban találtam a legnagyobb hiányosságokat.

A szakirodalmi ismeretanyagokban számos kutatási adat található meg az újhomokkal készült homokkeverékek és a vízüveges kötőanyagtartalmú regenerátum alkalmazásával kapcsolatban. Ezen kutatási projektek közös jellemzője, hogy a bemutatott kísérletek során célzottan egy-két paramétert vizsgálnak meg és figyelmen kívül hagyják a teljes homokrendszer vizsgálatát. Az újhomokkal végzett kísérletekben ugyan vizsgálják a hőterhelés hatását a szilárdsági tulajdonságokra, azonban a hőterhelést követően nem történik visszajáratás, ezáltal nem vizsgálják a hőterhelt homokkeverék tulajdonságait. A regenerátum esetében a kísérletek célja az, hogy a lehető legjobb minőségű regenerátumot állítsák elő, ezáltal a kísérletek során történik többek között újhomokkal frissítés, receptúra változtatás, ill. a regenerálási folyamatok optimalizálása is. Összességében elmondható az, hogy a szakirodalmi ismeretanyagban bemutatott eredményeket több zavaró tényező együttesen befolyásolja, amelynek következtében nem lehet egyértelműen meghatározni az egyes paraméterek hatását a homokrendszerre. Emellett hiányzik a tiszta zavaró tényező mentes használt (hőterhelt) homokrendszer tulajdonságainak a vizsgálata.

A kutatómunkám második részében a hőterhelt vízüveges homokkeverék regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználásának hatását vizsgáltam a homokkeverék alapfolyamataira. A hőterhelt homokkeveréket öt vizsgálati ciklusban vizsgáltam meg különböző hőterhelési hőmérsékleten. A kísérleteimben vizsgáltam az oldható alkáli-oxid tartalom, a granulometriai tulajdonságok, a halomsűrűség, a térfogatsűrűség és a hajlítószilárdság változását, ill. ezen paraméterek közötti összefüggéseket.

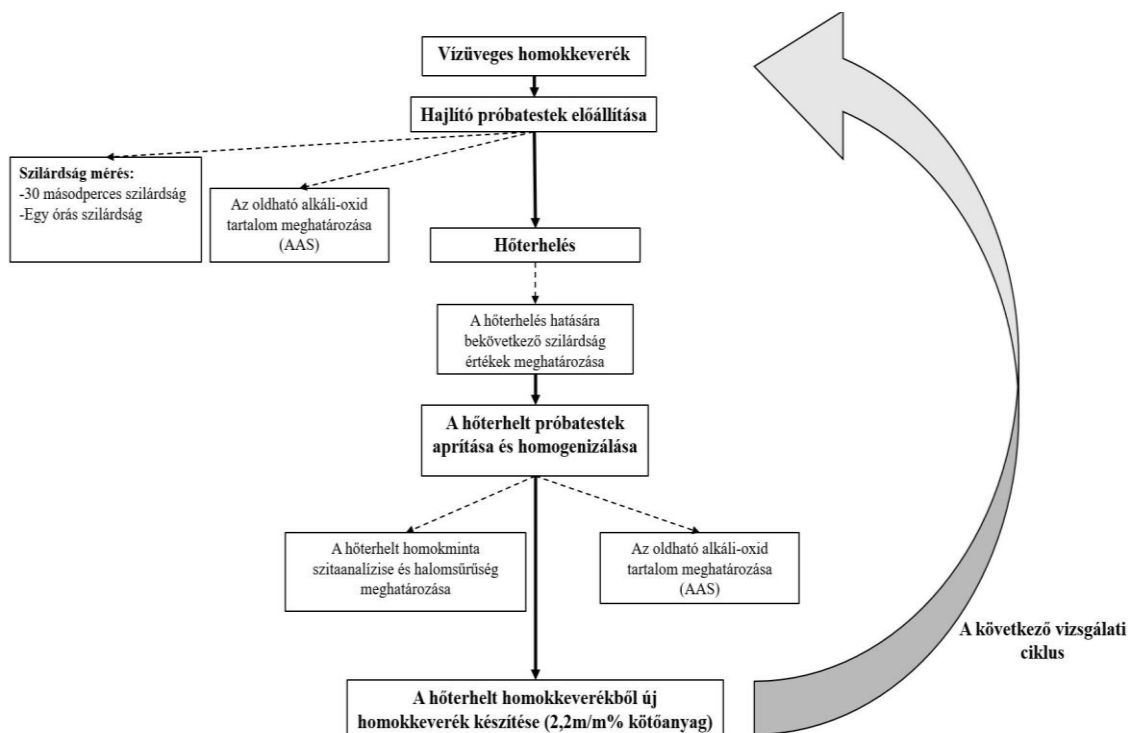
A kutatómunkám számos paraméter vizsgálatára terjed ki, ezért a szakirodalmi ismeretanyagban feltárt hiányosságokat az egyes részfejezetekben fejtem ki részletesen.

9.1. Az elvégzett kísérletsorozatok bemutatása

A kísérleteimben megvizsgáltam a regenerálás nélküli körfolyamatban visszajáratott vízüveges homokkeverék granulometriai tulajdonságait, az oldható alkáli-oxid tartalmát, a halomsűrűséget, továbbá az ebből előállított hajlító próbatestek hőterhelés előtt és után bekövetkező szilárdsáérték és a térfogatsűrűség változását.

A vizsgálati ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékhez minden esetben 2,2m/m% vízüveges kötőanyagot adagoltam. A hajlító próbatestek előállításához a meleg

levegős átfűvadású warm-box-eljárást alkalmaztam és a 4. táblázatban (5.2. fejezet) bemutatott előállítási paramétereket használtam. A 30. ábrán a hőterhelt vízüveges homokkeverék körfolyamatban történő felhasználásának a folyamatábrája látható.



30. ábra A hőterhelt homokkeverék körfolyamatban történő felhasználásának folyamatábrája

A kísérleteimhez alkalmazott hőterhelési hőmérséklet-tartományok listája a 10. táblázatban látható. A hőterhelési idő minden esetben 1 óra volt, amelyet 1 órás pihentetés követett a szilárdságvizsgálatok elvégzése előtt.

10. táblázat A vizsgált hőterhelési hőmérséklet-tartományok

Hőterhelési hőmérséklet	Hőterhelési időtartam
150°C	1 óra
300°C	
450°C	
600°C	

A hőmérséklet-tartományok kiválasztásának egyik szempontja az volt, hogy a kísérleteimhez alkalmazott vízüveges kötőanyag a könnyűfém (alumínium) öntészeti eljárásokhoz lett kifejlesztve, amelyeknél a magok külső felületi rétege maximum 600°C-700°C-ot érheti el. A hőmérséklet-tartományok meghatározása során figyelembe vettem a röntgendiffrakciós vizsgálatok eredményeit is, valamint a röntgendiffrakciós vizsgálatokból meghatározott hőmérséklet-tartományokon bekövetkező fázis átalakulásokat, amelyeket a 11. táblázat szemléltet.

11. táblázat A kísérleteimhez alkalmazott hőmérsékleteken bekövetkező fázis átalakulások

Hőterhelési hőmérséklet	XRD-vel meghatározott fázis
150°C	Eltűnik a metastabilis nátrium-alumínium-szilikát fázis
300°C	Amorf fázis jelenik meg.
450°C	Az amorf fázis továbbra is jelen van.
600°C	Nátrium-szilikát kristályosodik ki.

A kísérleteim egyes fázisainak könnyebb kezelhetősége végett kidolgoztam egy jelölési rendszert, amelyet a 12. táblázat tartalmaz.

12. táblázat A kísérleteimhez alkalmazott jelölési rendszer bemutatása

Vizsgálati ciklus	Jelölés	Leírás
1.ciklus	M1	SH34-es újhomok + 2,2m/m% vízüvegből készített homokkeverék adott vizsgált paraméterének az átlag értékét jelöli.
	H1	Az 1. hőterhelést követően vizsgált paraméterek átlag értékeit jelöli, továbbá a második ciklus hőterhelt homokkeveréke lesz.
2.ciklus	M2	1.ciklusból származó hőterhelt homokkeverék + 2,2m/m% vízüveg adagolásával előállított új homokkeverék adott vizsgált paraméterének az átlag értékét jelöli.
	H2	A 2. hőterhelést követően vizsgált paraméterének az átlag értékeit jelöli, továbbá a harmadik ciklus hőterhelt homokkeveréke lesz.
3.ciklus	M3	A 2.ciklusból származó hőterhelt homokkeverék + 2,2m/m% vízüveg adagolásával előállított új homokkeverék adott vizsgált paraméterének az átlag értékét jelöli.
	H3	A 3. hőterhelést követően a vizsgált paramétereinek az átlag értékeit jelöli, továbbá a negyedik ciklus hőterhelt homokkeveréke lesz.
4.ciklus	M4	A 3.ciklusból származó hőterhelt homokkeverék + 2,2m/m% vízüveg adagolásával előállított új homokkeverék adott vizsgált paramétereinek az átlag értékét jelöli.
	H4	A 4. hőterhelést követően vizsgált paramétereinek az átlag értékeit jelöli, továbbá az ötödik ciklus hőterhelt homokkeveréke lesz.
5.ciklus	M5	A 4.körből származó hőterhelt homokkeverék + 2,2m/m% vízüveg adagolásával előállított új homokkeverék adott vizsgált paraméterének az átlag értékét jelöli.
	H5	Az 5. hőterhelést követően vizsgált paraméterének az átlag értékeit jelöli.

9.2. A vízüveges homokkeverék körfolyamatban történő felhasználása során bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom változásának vizsgálata

9.2.1. A kötőanyag tartalom vizsgálata a vízüveges homokkeverékek alkalmazása során

A vízüveges homokkeverék és a regenerátum laboratóriumban történő minősítésének egyik módja a kötőanyagtartalom (regenerátum esetében az ún. maradék kötőanyagtartalom) meghatározása. A vízüveges kötőanyagrendszerek alkalmazása során a kötőanyagtartalom (Na_2O tartalom) vizsgálatával kapcsolatban a következő összefüggések állapíthatók meg a szakirodalomban publikált eredményekből.

Schwickal és társai üzemi körülmények között különböző típusú regenerálási technológiák hatékonyságát vizsgálták a vízüveges kötőanyag alkalmazásával [63]. Vizsgálták a regenerátum Na_2O tartalmát, az előállított magok szilárdsági tulajdonságait, a homokkeverék feldolgozhatósági idejét és a szemcseösszetételét. A szerzők részletesen a mechanikus-termikus regenerálással, 5 regenerálási körben visszajáratott regenerátum mérési eredményeit mutatják be. A szerzők az eredmények alapján azt a megállapítást tették, hogy a használt homok Na_2O tartalmához képest az első regenerálást követően a regenerátum Na_2O tartalma jelentős mértékben csökken. A csökkenés oka a regenerálás során a használt homok felületéről lekopott kötőanyagtartalommal van összefüggésben. A regenerátum Na_2O tartalma a 4. regenerálási körig nő, majd az 5. regenerálási kört követően csökken [63]. A kísérletek körülményeinek a bemutatásában nem derül ki egyértelműen, hogy történt-e újhomokkal frissítés, amennyiben igen, akkor az milyen arányban történt. Nem ismert továbbá a magok öntése során a homok/fém aránya, melynek következtében nem ismert a hőterhelés mértéke és a regenerálási körönként alkalmazott receptúra sem.

Polzin és társai a kutatómunkájukban a vízüveg-észter-eljárással előállított mechanikus regenerátumot vizsgálták, amelyet egy őrlésen és koptatáson alapuló regeneráló berendezéssel állítottak elő [65]. A kísérleteik során vizsgálták a mechanikus regenerátum Na_2O tartalmát, a szilárdsági tulajdonságokat, az átlagos szemcseméretet, az iszaptartalmat, a szinterelődési hőmérsékletet és készítettek SEM felvételeket is. A regenerálást követően a magok gyártásakor a használt homokrendszerhez 10% újhomokot is adagoltak. Emellett minden körben csökkentették a homokkeverékhez adagolt kötőanyag mennyiségét is. Az 1. körben 2,5m/m% kötőanyagot adagoltak, a 7. regenerálási körben pedig 1,5m/m% kötőanyag mennyiséggel dolgoztak. A szerzők a

következő megállapításokat tették. A használt homok Na_2O tartalma a 2. regenerálási körig nő, majd ezt követően a 6. regenerálási körig csökken, amelyet követően a használt homok Na_2O tartalma beáll egy stabil értékre. A mechanikus regenerátum esetében a használt homok Na_2O tartalmához képest csökkenés tapasztalható minden regenerálási körben, amelyet a regeneráló berendezés koptató hatása okoz. A regenerátum Na_2O tartalma a 6. körtől kezdődően beáll egy stabil értékre [65].

Dankó és társai kísérleteket végeztek különböző típusú szerves és szervetlen kötőanyagtartalmú használt homokrendszer regenerálásával kapcsolatban [94]. Az elvégzett kísérletek célja az volt, hogy megtalálják azt a regenerálási technológiát, amellyel a legjobb minőségű regenerátumot tudják előállítani. A szervetlen kötőanyag esetében üzemből származó önkötő vízüveg-észter-eljárással előállított használt homokkal és regenerátummal dolgoztak. A kísérletek során vizsgálták a regenerátum izzítási veszteségét, Na_2O tartalmát és a regenerátumból előállított próbatestek szilárdsági tulajdonságait [94]. A szerzők azt a megállapítást tették, hogy minél több lépcsős a regenerálás, annál kisebb a regenerátum Na_2O tartalma [94]. A kísérletek bemutatásában nem derül ki, hogy a regenerálási eljárás során a regenerálási ciklusok között történt-e maggyártás, vagy pedig a ciklusokkal azt jelzik, hogy a használt homok a regeneráló berendezésben egymást követően 30 alkalommal járt körbe a zárt rendszerben. Emellett nem ismert a regenerálási ciklus időtartama és a berendezés hatékonysága sem.

Dankó és társai egy üzemben alkalmazott regeneráló berendezésből származó regenerátum és az általuk alkalmazott laboratóriumi regenerálóval előállított regenerátum Na_2O tartalmát hasonlították össze [94]. A laboratóriumi regenerálóval előállított regenerátumból az 1., az 5. és a 10. regenerálási ciklusból vettek mintákat. A szerzők nem térnek ki részletesen a kísérleti eredmények kiértékelésére, azonban az eredményeik alapján megállapítható, hogy a laboratóriumi regeneráló berendezéssel a regenerálási ciklusok számának növekedésével csökken a regenerátum Na_2O tartalma, továbbá alacsonyabb Na_2O tartalmat értek el, mint az üzemi regeneráló berendezéssel. A kiértékelésből nem derül ki, hogy az üzemi regenerátumot milyen körülmények között állították elő, továbbá az sem, hogy a laboratóriumi regenerálóval az üzemi regenerátumot kezdték el regenerálni, vagy pedig használt homokot alkalmaztak.

A szakirodalomban megtalálható eredmények alapján elmondható az, hogy a kötőanyagtartalmat (Na_2O tartalom) főként a regenerátum minősítésére és a regeneráló berendezés hatékonyságának a meghatározására alkalmazzák. A publikált eredmények

alapján a regenerálás hatására a regenerátum Na_2O tartalma csökken a használt homok Na_2O tartalmához képest, azonban a visszajáratás során több tényező együttes hatása fogja a regenerált homokrendszer Na_2O tartalmát meghatározni. A következő paraméterek befolyásolják a regenerátum kötőanyagtartalmát:

- a regenerálási technológia, a regenerálási ciklus időtartama, a ciklusok száma,
- a használt homokrendszer Na_2O tartalma,
- a regenerátumhoz alkalmazott receptúra (kötőanyagtartalom csökkentése regenerálási körönként),
- az újhomokkal történő frissítés mértéke,
- az öntés során a homok/fém aránya, amely befolyásolni fogja a használt homokrendszerben lévő eltérő hőterhelést kapott zónák arányát és ezáltal az oldható Na_2O tartalmat.

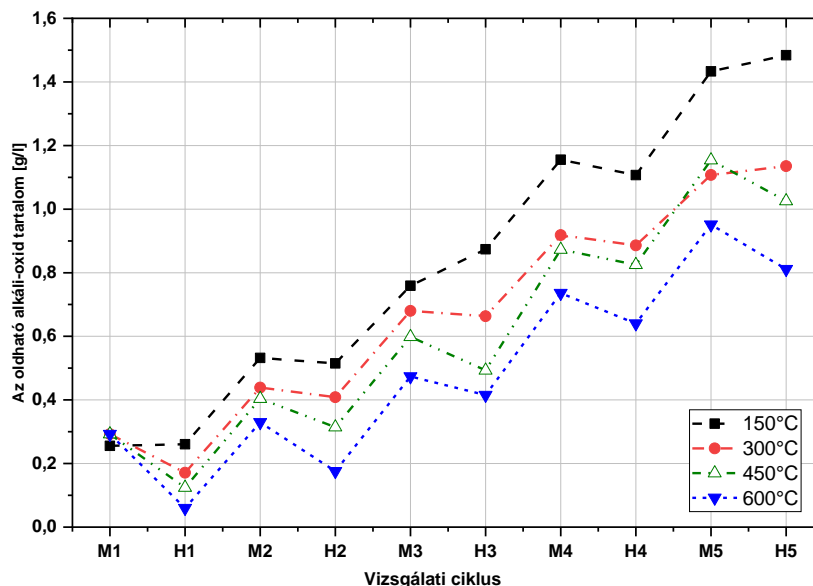
A publikált eredményekből egyértelműen hiányzik a zavaró tényezőktől mentes használt (hőterhelt) homokrendszer kötőanyagtartalmának a vizsgálata, amellyel a kötőanyagtartalom változásának alapfolyamatai megismerhetők lennének és alapot szolgáltatnának a regenerált homokrendszer kötőanyagtartalmában bekövetkező változások megismeréséhez. Emellett fontos lenne ismerni, hogy az eltérő hőterhelési hőmérséklet zónák milyen hatással vannak az öntést követően a használt homok kötőanyagtartalmára.

9.2.2. A saját kísérleteim bemutatása

A vízüveges homokkeverék regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználása során meghatároztam a hőterhelt vízüveges homokkeverékek oldható alkáli-oxid tartalmának a változását is. Minden hőterhelési ciklusban az eltérő oldható alkáli-oxid tartalmú hőterhelt vízüveges homokkeverékhez 2,2m/m% vízüveges kötőanyagot adagoltam, amelyből előállítottam a meleg levegős átfűvűsű warm-box-eljárással a 4. táblázatban bemutatott gyártási paraméterek alkalmazásával a hajlító próbatesteket. Az előállítást követően meghatároztam a próbatestek alkáli-oxid tartalmát, majd a különböző hőmérsékleten végzett 1 órás hőterhelést követően az aprított és homogenizált hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmát is.

Az oldatok készítéséhez 100g homokkeveréket 200ml 60°C-os desztillált vízben 5 percig oldottam, majd a szűrést követően mértem az oldatok oldható Na és K tartalmát. A megmért Na és K koncentrációk alapján kiszámoltam az oldatban lévő oldható Na_2O és K_2O tartalmat, ill. az ebből adódó összes oldható alkáli-oxid tartalmat is.

A 31. ábrán a hőterhelési ciklusonként előállított vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek (M) és a hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverékben (H) bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom változása látható a vizsgálati ciklusok és a hőterhelési hőmérséklet függvényében.



31. ábra A vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek (M) és a hőterhelt vízüveges homokkeverékben (H) bekövetkező oldható alkáli-oxid tartalom változása

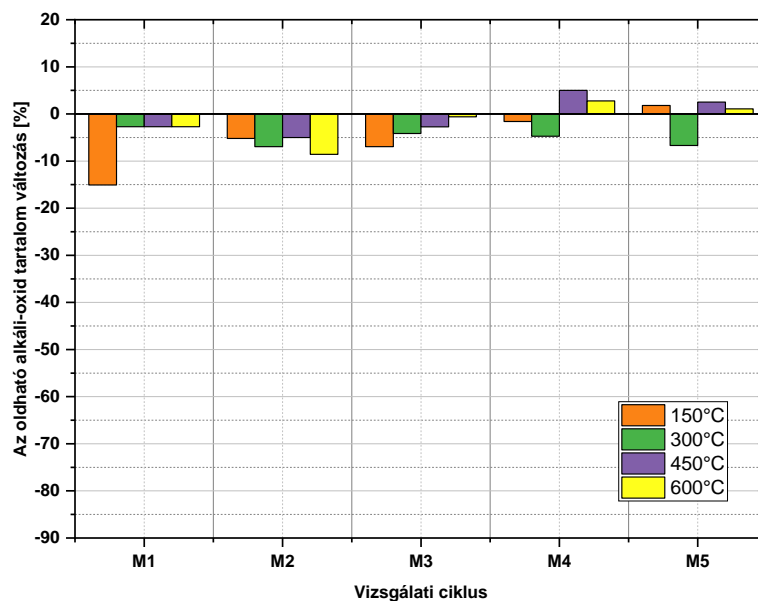
A 31. ábrán látható, hogy a vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek oldható alkáli-oxid tartalma a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest (kivéve 150°C-on a harmadik ciklusnál) minden egyes ciklusban nagyobb. Ennek oka a ciklusok elején a hőterhelt vízüveges homokkeverékhez adagolt 2,2m/m% vízüveges kötőanyag. Az adott ciklushoz tartozó vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek oldható alkáli-oxid tartalmához képest a hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmában bekövetkező csökkenés mértékét a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus száma határozza meg.

A 31. ábra eredményeiből kiemeltem és megvizsgáltam miként változik a meleg levegős átfűvadású warm-box-eljárással (maggyártás) bevitt hőenergia hatására az adott vizsgálati ciklus vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatetek oldható alkáli-oxid tartalma a hőterhelési hőmérséklet és a hőterhelési ciklus során. Az M.34. mellékletben megtekinthető a vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatetek oldható alkáli-oxid tartalmának változása a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus függvényében. Az eredmények alapján megállapítható, hogy vizsgálati ciklusonként a

vízüveges homokkeverék előállításakor adagolt (2,2m/m%) vízüveges kötőanyag miatt növekszik a hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalma, azonban a különböző hőterhelési hőmérsékletek miatt a növekedés eltérő mértékben következik be.

A kísérleteim során az eltérő oldható alkáli-oxid tartalmú hőterhelt vízüveges homokkeverékhez minden vizsgálati ciklus elején 2,2m/m% vízüveges kötőanyagot adagoltam, amelynek előzőleg meghatároztam az oldható alkáli-oxid tartalmát. Ezáltal a vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma minden ciklusban ismert volt és ez az érték szolgált referenciaként a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus hatására a vízüveges homokrendszer oldható alkáli-oxid tartalmában bekövetkező változások vizsgálatához.

Megvizsgáltam az egyes ciklusonként előállított vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalom változásának a mértékét, amely a 32. ábrán százalékos értékben kifejezve látható, amely a maggyártás során bekövetkező alkáli-oxid tartalom változásáról ad információt.



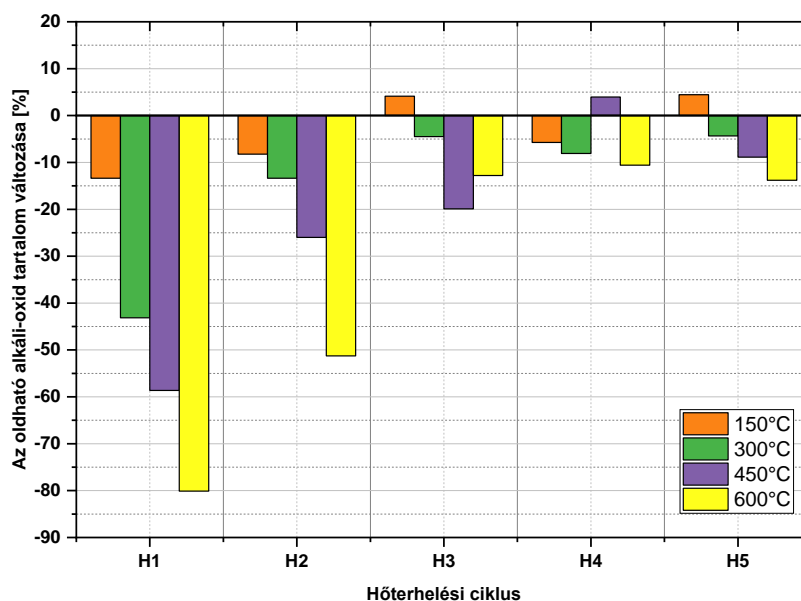
32. ábra A vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalmának változása százalékos értékben kifejezve

A 32. ábra alapján megállapítottam, hogy a meleg levegős warm-box-eljárással bevitt hőenergia hatására az egyes ciklus elején előállított vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest a hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalma csökken. A csökkenés mértéke a harmadik vizsgálati ciklusig 0% és 15% között változik. A

negyedik ciklustól nincs jelentős változás és a csökkenés mértéke 0% és 7% között változik.

A 31. ábra eredményeiből kiemeltem és a továbbiakban megvizsgáltam, miként változik a hőterhelést követően az adott ciklusban a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma a hőterhelési hőmérséklet hatására. Az M.35. mellékletben a hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának változása tekinthető meg. A vizsgálati ciklusonként a vízüveges homokkeverék előállításakor 2,2m/m% adagolt vízüveges kötőanyag következtében a hőterhelést követően növekszik a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma, azonban a különböző hőterhelési hőmérsékleteken a növekedés mértéke eltérő.

Megvizsgáltam az egyes ciklusonként előállított vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest, miként változik a hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma, amely a 33. ábrán százalékos értékben kifejezve látható a hőterhelési hőmérséklet és a hőterhelési ciklus függvényében.



33. ábra A hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának változása százalékban megadva

A 33. ábra alapján megállapítottam, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának változását a hőterhelési hőmérséklet jelentős mértékben befolyásolja. Minden hőterhelési hőmérsékleten az első és a második hőterhelést követően tapasztaltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmában a legnagyobb mértékű csökkenést. A harmadik hőterheléstől kezdődően a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának változása jelentősen

csökken és nem haladja meg a 20%-ot. A hőterhelt vízüveges kötőanyagrendszer oldható alkáli-oxid tartalmában egyensúly áll be. A hőterhelési ciklus számának növekedésével a hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalom változásának a mértéke csökken.

Az első és a második hőterhelést követően az oldható alkáli-oxid tartalomban bekövetkező jelentős mértékű (hőterhelési hőmérséklettől függően 8% és 80% között) csökkenés magyarázatára a 105°C-on szárított vízüveg XRD-vel meghatározott kristálytani fázisátalakulását vettem alapul. A szárított vízüvegben 25°C és 105°C közötti hőmérséklet-tartományon ún. metastabilis hidratált nátrium-alumínium-szilikát fázis van jelen. A szakirodalomban a hőterhelés hatására keletkező ehhez hasonló reakciótermék az alkáli aktivált, cement bázisú kötőanyagrendszerek esetében található meg. Ezen kötőanyagrendszerek egyik csoportjába tartozik az ún. kalciumoxid-szegény rendszer, amelynek az általános képlete $(\text{Na,K})_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ [94]. Ez a rendszer túlnyomórészt szilíciumot és alumíniumot tartalmaz. A reakció beindításához erősen lúgos (>8M NaOH) közeg és 60°C – 200°C-os hőterhelési hőmérséklet szükséges. A rendszer fő reakcióterméke a háromdimenziós szervesetlen polimer hálózat, az ún. alkáli-alumino-szilikát-hidrát gél ((N,K)-A-S-H), amelyet geopolimernek vagy szervesetlen polimernek is neveznek [95]. A kalciumoxid-szegény rendszer leírása, ill. a hőterhelés hatására lejátszódó reakció és a reakciótermék nagyon hasonlít a vízüveges kötőanyagrendszerrel elvégzett kísérleteimnél tapasztaltakhoz, ugyanis a vízüveges kötőanyag erősen lúgos pH-jú, továbbá a szilícium-dioxid, a nátrium-oxid és a kálium-oxid mellett tartalmaz szennyezőként alumínium-oxidot (XRD és SEM vizsgálatok) is, amelyet az SH34-es kvarchomok is tartalmaz szennyezőelemként [82]. Ezek alapján feltételezhető az, hogy optimális körülmények között, azaz a megfelelő hőterhelési hőmérséklet és a rendszer SiO_2 és Al többlete miatt hasonló reakció játszódik le, mint a geopolimer térhálósodása során. A háromdimenziós alumínium-szilikát (geopolimer) háló jön létre a SiO_4 és az AlO_4 tetraéderek felváltva történő összekapcsolódásából azáltal, hogy a tetraéderek minden oxigénatomot megosztanak. A szerkezeti üregekben pozitív ionok jelenlétére van szükség, úgymint a Na^+ és a K^+ ionok, hogy az Al^{3+} ionok okozta negatív töltéstöbbletet kiegyenlítsék [95] [96]. Feltételezhető tehát, hogy az első hőterhelési cikluson az oldható alkáli-oxid tartalom erőteljes csökkenésének a mértéke a geopolimer képződésen alapszik, amelyet a hőterhelési hőmérséklet is befolyásolni fog. A 2. hőterhelést követően a geopolimer képződéshez szükséges körülmények nem, vagy csak részben teljesülnek a SiO_2 (kvarchomok) és Al többlet hiányában. Az első és

második hőterhelési cikluson bekövetkező esetleges geopolimer képződés gyakorlatban történő bizonyítására további vizsgálatok szükségesek.

Összefoglalásként a bemutatott kísérleteimmel a következő megállapításokat tettem. Vizsgálati ciklusonként a vízüveges homokkeverék előállításakor 2,2m/m% adagolt vízüveges kötőanyag miatt növekszik az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek és a hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus függvényében. Mindkét esetben a növekedés mértéke eltérő a különböző hőterhelési hőmérséklet miatt.

A meleg levegős warm-box-eljárással bevitt hőenergia hatására (maggyártás) a hőterhelési ciklusonként előállított vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest az előállított hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalma csökken, melynek a mértéke 0 és 15% között változik. Minden hőterhelési hőmérsékleten az első és a második hőterhelést követően következik be a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmában a legnagyobb mértékű csökkenés, amely a hőterhelési hőmérséklettől függően 8% és 80% között változik. A harmadik hőterheléstől kezdődően a hőterhelt vízüveges homokrendszer oldható alkáli-oxid tartalom változásában beáll az egyensúly és a csökkenés mértéke nem haladja meg a 20%-ot.

9.3. A hőterhelt vízüveges homokkeverék körfolyamatban történő felhasználása során bekövetkező granulometriai tulajdonságok vizsgálata

9.3.1. A vízüveges homokkeverék körfolyamatban történő visszajáratásának a hatása a granulometriai tulajdonságokra

Az öntödei homokok granulometriai tulajdonságainak a meghatározása az egyik alapvető minősítő módszer, amelyet a formázóanyagok tulajdonságainak a vizsgálata során alkalmaznak. A vízüveges kötőanyagrendszerek alkalmazása során fellépő szemcsefrakció változásával kapcsolatban a következő összefüggések találhatók meg a szakirodalomban fellelhető kutatómunkákban.

Steinhäuser a kutatómunkájában AWB-eljáráson alapuló vízüveges kötőanyaggal előállított mechanikus regenerátum felhasználásával foglalkozott [53]. A kísérletei során vizsgálta a mechanikus regenerátum szilárdsági és granulometriai tulajdonságait. A bemutatott szemcseeloszlás diagramok alapján megállapítható az, hogy a H32 újhomok szemcseeloszlásához képest a mechanikus regenerátum szemcseeloszlása eltolódik a

durva szemcsefrakció irányába. A szerző az eredmények kiértékelése során nem foglalkozik részletesen a szitaanalízis eredményeivel, mivel a vizsgálatainak a célja a szilárdsági tulajdonságok változásának a vizsgálata volt. A kutatómunka eredményeinek a kiértékelésében a szerző nem tér ki arra, hogy vizsgálták-e a mechanikus regenerálás előtt a használt homok szemcseeloszlását. A használt homok szemcseeloszlásának ismeretében lehetne megállapítani a mechanikus regenerálás hatását a szemcseeloszlásra.

Schwickal és társai üzemi körülmények között különböző típusú regenerálási technológia hatékonyságát vizsgálták meg a vízüveges kötőanyag alkalmazásával [63]. A szerzők a mechanikus-termikus regenerálással előállított regenerátumot 5 regenerálási körben vizsgálták. Megvizsgálták a regenerátum kötőanyagtartalmát, az előállított magok szilárdsági tulajdonságait, a homokkeverék feldolgozhatósági időtartamát és végeztek szitaanalízist is. Az eredmények alapján a szerzők azt a megállapítást tették, hogy a regenerálás hatására a finomabb szemcsefrakciók mennyisége növekszik, amely eltűnik egy erőteljesebb portalanítási folyamat beillesztésével [63]. A finom szemcsefrakció megjelenése mellett megfigyelhető a durva szemcsefrakció megjelenése is ($>0,5\text{mm}$). A kiértékelésből nem derül ki egyértelműen, hogy történt-e újhomokkal frissítés és ha igen, akkor milyen arányban.

Polzin és társai a kutatómunkájuk során vízüveg-észter-eljárással előállított mechanikus regenerátumot vizsgálták, amelyet egy őrlésen és koptatáson alapuló regeneráló berendezéssel állítottak elő [65]. A kísérleteik során vizsgálták a mechanikus regenerátum kötőanyagtartalmát, a szilárdsági tulajdonságokat, az átlagos szemcseméretet, az iszaptartalmat, a szinterelődési hőmérsékletet és készítettek SEM felvételeket is. A regenerálást követően a magok gyártásakor a homokkeverékhez 10% újhomokot adagoltak. A kiértékelés során az alaphomok szemcseösszetétele és az átlagos szemcseméret értéke nem ismert. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a 2. regenerálási körben az átlagos szemcseméret értékében jelentős mértékű csökkenés következik be, amelyet a szerzők a pontatlan mintavétellel indokolnak. A regenerátum átlagos szemcsemérete a regenerálás hatására a használt homokkeverék átlagos szemcseméret értékéhez képest csökken. A szerzők azt a megállapítást tették, hogy már a kísérletek elején tapasztalható átlagos szemcseméret csökkenést az alkalmazott regeneráló berendezés koptatóhatása okozza [65]. Az átlagos szemcseméret változását mindkét mintánál regenerálás körülményeinek (regenerálási ciklusidő, regeneráló hatékonysága, működési elve) és az újhomokkal történő frissítésnek az együttes hatása

okozza. A teljes folyamat megismeréséhez azonban hiányzik a regenerálás nélküli homokrendszer vizsgálata és nem ismertek a hőterhelés pontos körülményei sem.

Összeségében elmondható az, hogy a szakirodalomban bemutatott eredményekben megfigyelhető a szemcsefrakció eltolódásának az effektusa, azonban ezek az eredmények a regenerálási körülményeknek, a regenerálás időtartamának, a regeneráló berendezés hatékonyságának, működési elvének és az esetleges újhomokkal történő frissítés együttes hatásaként jelentkeznek. Nem ismert a regenerálás nélküli használt homokrendszer szemcseösszetételének a visszajáratás során bekövetkező, zavaró hatások nélküli változása.

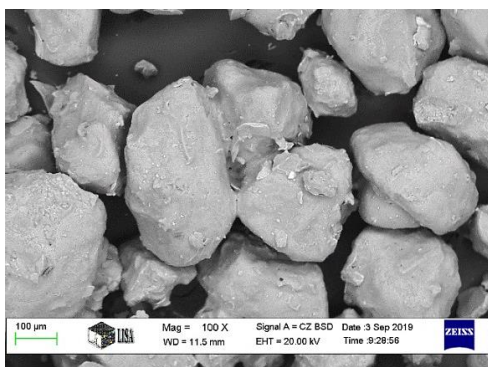
9.3.2. A saját kísérleteim bemutatása

A szakirodalomban fellelhető hiányosságok feltárása érdekében megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék regenerálás nélküli körfolyamatában történő felhasználása során, miként változik a hőterhelt vízüveges homokkeverék szemcseösszetétele a vizsgálati ciklusok során a különböző hőterhelési hőmérsékletek hatására. A hajlító próbatesteket a hőterhelést követően, egymáson összedörzsöltem és így végeztem az aprítási folyamatot. Ezzel az egyszerű megoldással biztosítottam, hogy minden aprításnál közel azonos mechanikai behatásnak legyenek kitéve a próbatestek, és így kaptam meg a hőterhelt homokkeveréket. Ezt követően az egyes mintákat átszitáltam egy 1mm-es átmérőjű szitán, amellyel a kisebb-nagyobb magtörmeléseket távolítottam el a homokkeverékből. Ezt követően 100g homokot átszitáltam a szabványos szitasoron és a visszamérés során az egyes szitákhoz tartozó szitamaradékokat kaptam meg.

A szitamaradékok alapján meghatároztam a vízüveges homokkeverékek átlagos szemcseméretét a (4) egyenlet alapján, amelynek az eredménye az *M.36.* mellékletben megtekinthetők. Az M1 az SH34-es alaphomok átlagos szemcseméretét jelöli, amely referencia értéként szolgált. A mérési eredményeim alapján megállapítható, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete az SH34-es kvarchomok (M1) átlagos szemcseméret értékéhez képest növekszik. 150°C-os hőmérsékleten tapasztalható a legkisebb mértékű átlagos szemcseméret növekedés. A 300°C és 450°C-os hőmérsékleten a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete közel azonos értéktartományon változik és 600°C-on tapasztalható a legnagyobb mértékű átlagos szemcseméret növekedés, amely a harmadik ciklusig tart, ezt követően minimális csökkenés tapasztalható.

Megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméret értékének változását az előző ciklus értékéhez viszonyítva, amely az *M.37.* mellékletben található. Megállapítható, hogy a harmadik hőterhelési ciklustól kezdődően az átlagos szemcseméretben nem következik be jelentős mértékű változás, tehát az átlagos szemcseméret változásának a mértéke beáll egy szűk értéktartományba.

A granulometriai tulajdonságok vizsgálata során azt tapasztaltam, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék szemcseösszetétele az SH34-es kvarchomok szemcseösszetételéhez képest eltolódik a durva szemcsefrakció irányába. Ezt az effektust mind az átlagos szemcseméret, mind pedig a durva szemcsefrakció (315 μ m) növekedése is alátámasztja. Annak érdekében, hogy kimutassam, hogy mi okozza az átlagos szemcseméret változását, pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokat végeztem. A vizsgálatokhoz az 5. hőterhelési ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverékeket használtam fel. A 34. ábrán a 150°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele látható. A 35. ábrán a 300°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele látható.

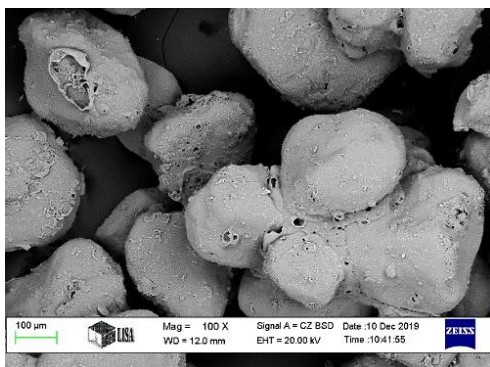


34. ábra A 150°C-on hőterhelt 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele

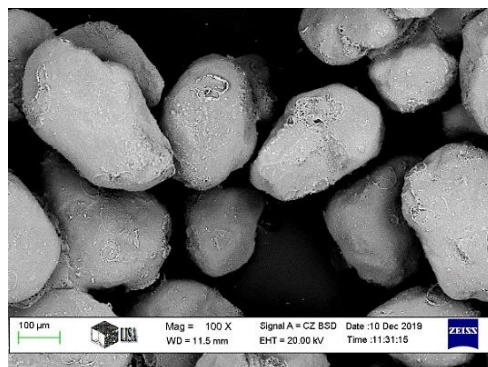


35. ábra A 300°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele

A 36. ábrán a 450°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele, a 37. ábrán pedig a 600°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele látható. További SEM felvételek az *M.38.* mellékletben találhatóak.



36. ábra A 450°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele



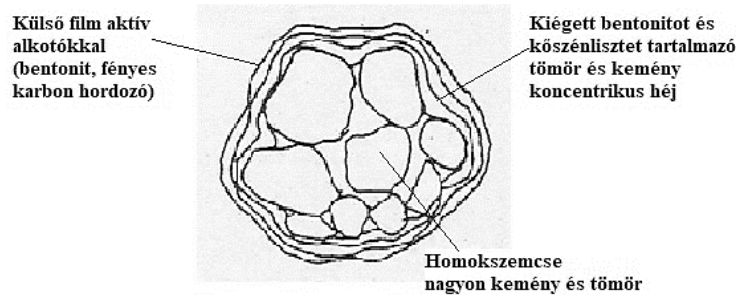
37. ábra A 600°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele

A hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvételei alapján megállapítható, hogy 150°C-on átlagosan két-három homokszemcse tapad össze egy agglomerátummá, ami megmagyarázza az ezen a hőmérsékleten tapasztalt kisebb mértékű átlagos szemcseméret növekedést. Ezzel ellentétben 300°C-on és 450°C-on legalább öt homokszemcse tesz ki egy agglomerátumot, ami az erőteljesebb átlagos szemcseméret növekedést okozza. Mivel a 37. ábrán a 600°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó vízüveges homokkeverékről 100x nagyításon nem jól látható az összetapadt szemcsék agglomerációja, ezért ezt egy 25x nagyításon készült SEM felvételen az M.38. mellékletben megtekinthető.

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az átlagos szemcseméret növekedését az agglomerátum képződés okozza. Az agglomerátum képződési hajlam függ a hőterhelési hőmérséklettől és a vizsgálati (hőterhelési) ciklusok számától, továbbá a harmadik ciklustól a rendszerben beáll a granulometriai egyensúly.

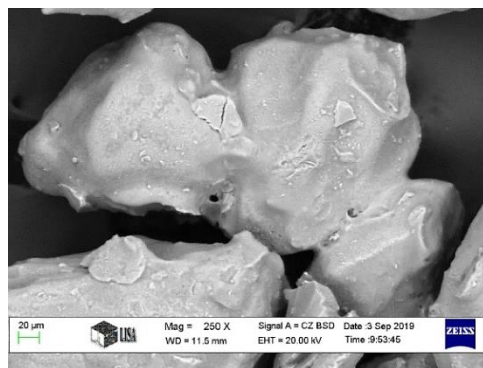
Más formázókeverék típusokat megvizsgálva, a bentonitos formázókeverékek újrahasznosítása során tapasztalható hasonló változás a homokrendszer granulometriai tulajdonságaiban. Az öntés során a bentonitos kötőanyaghéj magas hőmérsékletre hevülve ráég a homokszemcsék felületére és többé-kevésbé szilárd réteget alkot. Ezek a kiégett kötőanyaghéjjal rendelkező homokszemcsék kisebb-nagyobb mennyiségben újra visszakerülnek a homokrendszer körfolyamatába, ami által a ráégett kötőanyaghéj körül újabb kötőanyag réteg alakul ki, amely az öntést követően ismét ráég a felületre. Minden ciklusnál (előkészítés, formázás, öntés, ürítés, újra előkészítés) újabb és újabb kötőanyag réteg alakul ki a homokszemcse körül. Ez koncentrikus, réteges növekedéshez vezet és több szemcse összetapadása is előfordulhat. Ezt a folyamatot oolitosodásnak nevezik [11] [15] [36]. Az oolitosodás folyamatának következtében a szemcsefrakció durvul, ezzel

együtt pedig homokszemcsék gömbölyűvé válnak [11]. A 38. ábrán a bentonitos kötőanyaghéjjal bevont homokszemcsék összetapadása látható, amely körül újabb kiégett kötőanyag rétegek alakulnak ki.



38. ábra A kiégett bentonitos kötőanyaghéjjal bevont összetapadt homokszemcsék [59]

A 38. ábrán bemutatott effektus a hőterhelt vízüveges homokkeverék pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata során is megfigyelhető, bár a jelenség oka nem azonos a bentonitos rendszernél tapasztalható oolitosodás okával. A 39. ábrán a 150°C-on hőterhelt, 5.ciklusból származó hőterhelt homokkeverék SEM felvétele látható.



39. ábra A 150°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó hőterhelt vízüveges homokkeverék SEM felvétele

A 39. ábrán látható, hogy az agglomerátumok felületét teljesen beborítja a kötőanyaghéj, amely befolyásolja a homokszemcsék sarkosságát. Az M.39. mellékletben megtekinthető a hőterhelt vízüveges homokkeverék EDAX analízisének eredménye, amelyen látható az, hogy a vízüveges kötőanyag komponensei a homokszemcsék teljes felületén kimutathatók.

A bentonitos formázóanyagokkal foglalkozó szakirodalmakban az oolitosodás mértékét a próbatestek tömege alapján határozzák meg és ez alapján avatkoznak be a homokrendszer körfolyamatába [11] [15] [59]. Az M.40. mellékletben az oolitosodás mértéke látható a próbatest tömege alapján meghatározva. Az adatok alapján megállapítható, hogy ha a bentonitos formázóanyaggal készített normál próbatest tömege csökken, akkor az oolitosodás mértéke növekszik és ez megköveteli az újhomok

hozzáadását. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatetek tömegének vizsgálata során is hasonló effektust tapasztaltam.

A hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatetek tömegének a változása az *M.41.* mellékletben látható a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus függvényében. Az eredmények alapján megállapítható, hogy azonos körülmények között a hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek tömege csökken az M1 értékéhez képest. A 150°C-os hőmérséklet esetében folyamatos tömegcsökkenés tapasztalható az 5. ciklusig. A 300°C, a 450°C és a 600°C-os hőterhelések esetében a hajlító próbatetek tömege csökken a harmadik ciklusig, majd beáll egy egyensúlyi tartományba. A hajlító próbatetek tömegcsökkenésének a mértéke függ a hőterhelési hőmérséklettől és a vizsgálati ciklus számától is. Az átlagos szemcseméret növekedése esetében az azonos gyártási paraméterrel (lövő nyomás, magszekrény hőmérséklet, elgázosítási hőmérséklet és idő) előállított hajlító próbatetek tömege csökken.

Üzemi körülmények között, a bentonitos példát követve, a hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított próbatetek tömegváltozása alapján, vagy akár az átlagos szemcseméret szórás függvényét felhasználva meghatározható az újhomokkal történő frissítés mértéke.

Az elvégzett kísérleteim alapján megállapítottam, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék szemcseösszetétele az SH34-es kvarchomok szemcseösszetételéhez képest eltolódik a durva szemcsefrakció irányába, amelyet az agglomerátum képződés okoz. A durva szemcsefrakció mennyiségének növekedésével az átlagos szemcseméret is nő. Az átlagos szemcseméret változása, ezáltal az agglomerátum képződési hajlam függ a hőterhelési hőmérséklettől és a vizsgálati ciklus számától. Ha nő a hőterhelési hőmérséklet és a ciklusok száma, akkor nő az átlagos szemcseméret. A hőterhelt vízüveges homokkeverékek granulometriai tulajdonságai a harmadik vizsgálati ciklustól kezdődően eléri a granulometriai egyensúlyt.

A granulometriai tulajdonságok befolyásolják a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségét, a hőterhelt vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatetek térfogatsűrűségét és a szilárdsági tulajdonságokat. Ezen változások mértékének meghatározása céljából végeztem a további vizsgálataimat.

9.4. A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének és az ebből készített hajlító próbatestek térfogatsűrűségének vizsgálata

A szitaanalízis mellett meghatároztam a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségét és az ebből azonos gyártási paraméterrel (4. táblázat) előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségét is. A halomsűrűség a hőterhelt vízüveges homokkeverék tömörítés nélküli térkitöltőképességéről ad információt, az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége pedig a formakitöltőképességéről.

A halomsűrűség definíció szerint valamely szemcsés vagy darabos anyag tömegének és a hézagokat, üregeket, pórusokat is tartalmazó térfogatának hányadosa [97] [102]. A halomsűrűség meghatározása egy merev falú, ismert térfogatú edény alkalmazásával történik. Ebbe az edénybe kell meghatározott távolságból a mérni kívánt szemcsés anyagot szórni, majd a felesleget fémvonalzóval lehúzni. A homokminta halomsűrűségét a (14) képlettel lehet meghatározni [97] [102].

$$\rho_H = \frac{m}{V} \quad (14)$$

ahol: ρ_H = a halomsűrűség [g/cm^3],

m = a homok tömege az edényben [g],

V = az edény térfogata [cm^3].

Az *M.42.* mellékletben a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűség értékének a változása látható a hőterhelési ciklus és a hőterhelési hőmérséklet hatására. A bemutatott halomsűrűség értékek három mérés értékének az átlagát jelölik. Az M1 az SH34-es kvarchomok halomsűrűség értéke (referencia érték). Látható az, hogy az SH34-es kvarchomok halomsűrűség értékéhez (M1) képest a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége csökken. A 150°C-on hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége közel lineárisan csökken. A 300°C és 450°C-os hőmérséklet esetében a halomsűrűség értéke közel azonos tartományban változik csökkenő tendencia mellett. A 600°C-os hőmérsékleten tapasztalható a legnagyobb mértékű halomsűrűség csökkenés. Megállapítható az, hogy a halomsűrűség változását a hőterhelési hőmérséklet és a hőterhelési ciklus száma befolyásolja.

Megvizsgáltam továbbá a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének a változását az előző ciklushoz képest, amelynek eredményei az *M.43.* mellékletben

találhatók. Megállapítható, hogy a harmadik ciklust követően a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége csak kismértékben változik.

A halomsűrűség meghatározása mellett számoltam a hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségét is. A térfogatsűrűség definíció szerint a szemcsés anyag tömegének és az össztérfogatának a hányadosa. A hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a meghatározásához a (15) képletet alkalmaztam.

$$\rho_V = \frac{m}{V} \quad (15)$$

ahol: ρ_V = a térfogatsűrűség [g/cm³],

m = a hajlító próbatest tömege [g],

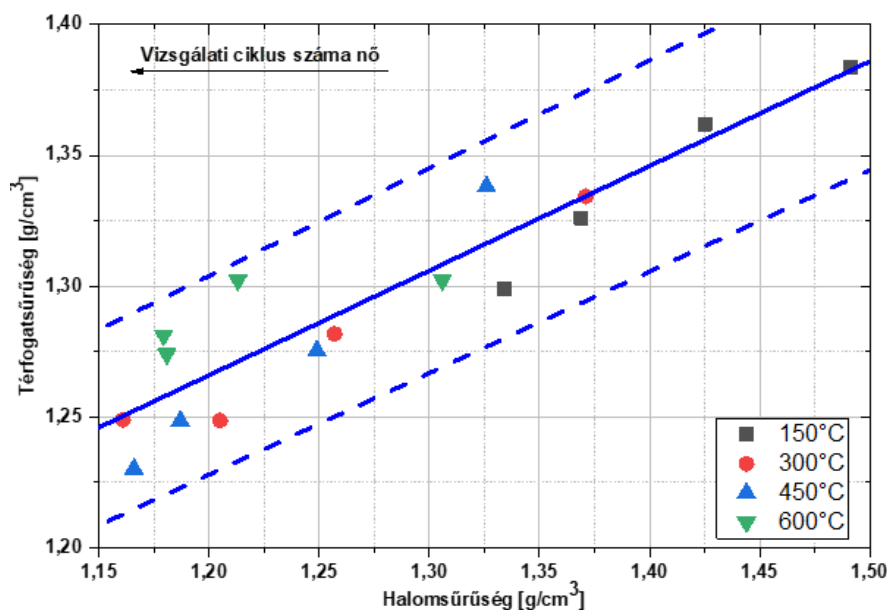
V = a hajlító próbatest térfogata [cm³].

Az *M.44.* mellékletben a hajlító próbatestek átlagos térfogatsűrűségének a változása látható a vizsgálati ciklus és a hőterhelési hőmérséklet hatására. Az M1 az újhomokból készített hajlító próbatestek térfogatsűrűségét jelöli, amely referenciaként is szolgált. A bemutatott térfogatsűrűség értékek négy hajlító próbatest esetében számolt térfogatsűrűség átlagát jelentik. Az *M.44.* mellékletben bemutatott mérési eredmények alapján megállapítottam, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége az M1 referencia értékhez képest csökkenő tendenciát mutat. 150°C-on tapasztalható a legkisebb mértékű (4. ciklusra 11%) térfogatsűrűség változás. A 300°C és 450°C-os hőmérsékleten a térfogatsűrűség közel azonos értéktartományon változik csökkenő tendencia mellett. 600°C-os hőterhelés esetében a hajlító próbatestek térfogatsűrűsége kismértékben változik a vizsgálati ciklus számának növekedésével.

Megvizsgáltam továbbá a hőterhelt vízüveges homokkeverék azonos előállítási paraméterrel készített hajlító próbatestek térfogatsűrűségének változását az előző ciklushoz képest, amelynek az eredményei az *M.45.* mellékletben találhatók. Megállapítható, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűség értékei a harmadik ciklust követően kis mértékben változnak és beállnak egy állandó értékre.

Megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége és az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége közötti kapcsolatot. A 40. ábrán a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének és az

ebből előállított hajlító próbatetek térfogatsűrűségének a változása látható a hőterhelési hőmérséklet-tartományokon.



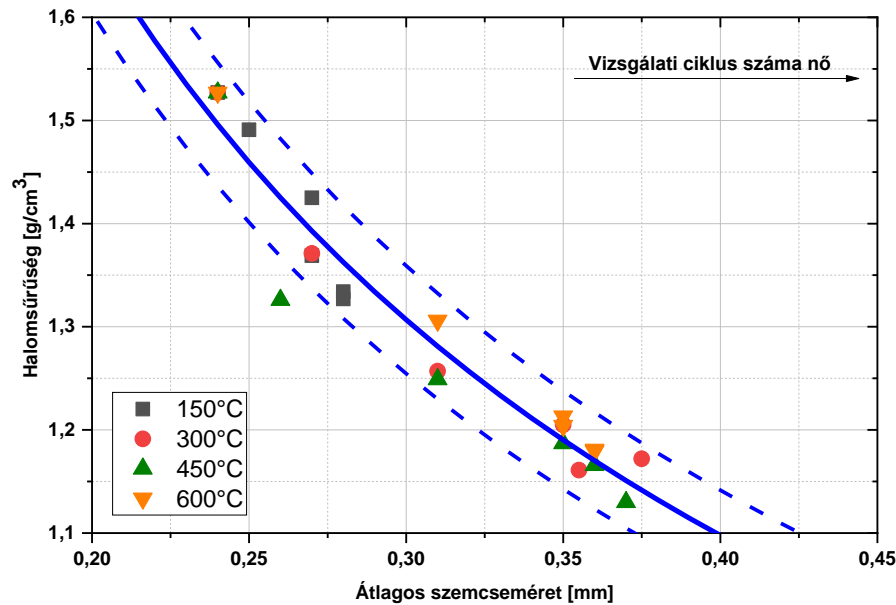
40. ábra A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének és az ebből készített hajlító próbatetek térfogatsűrűségének a változása

A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége és az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek térfogatsűrűsége közötti változást a 40. ábra szerint a következő egyenlet írja le, ahol ρ_V jelöli a térfogatsűrűséget [g/cm^3], az ρ_H pedig a halomsűrűséget [g/cm^3]:

$$\rho_V = 0,786 + 0,400 \cdot \rho_H \quad (\pm 3\%) \quad (16)$$

Az M.46. mellékletben megtekinthető a halomsűrűség és a térfogatsűrűség változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében. A diagram alapján megállapítható, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége és a hajlító próbatetek térfogatsűrűsége között közel lineáris kapcsolat áll fenn. A hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklusok számának növekedésével mindkét érték csökkenő tendenciát mutat.

A formázóanyagok granulometriai tulajdonságai befolyásolják a homokkeverékek minőségét, ezért megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete és a halomsűrűsége közötti viszonyt is. A 41. ábrán a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és a halomsűrűségének a változása látható a hőterhelési hőmérséklet-tartományokon.



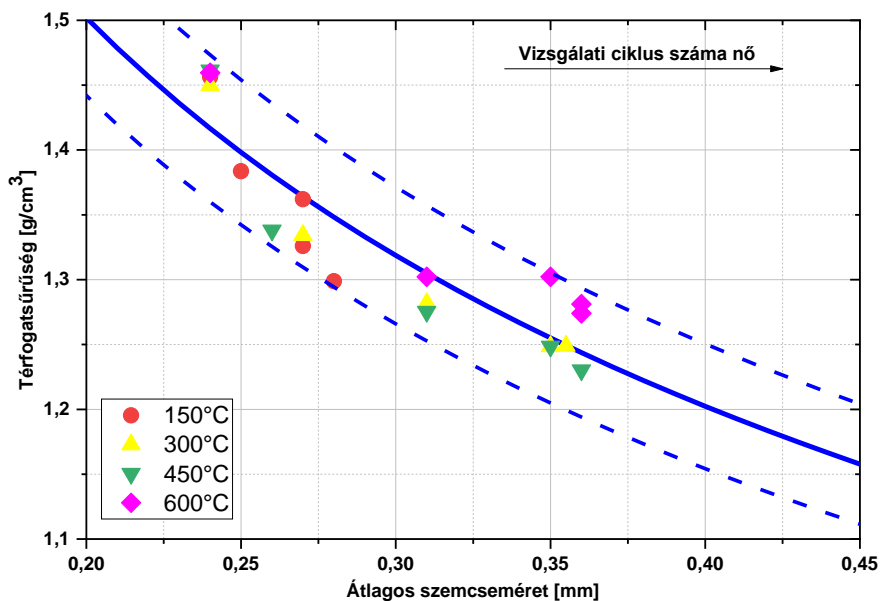
41. ábra A hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és a halomsűrűségének a változása

A halomsűrűség és az átlagos szemcseméret közötti változást a 41. ábra szerint a következő egyenlet írja le, ahol a d jelöli az átlagos szemcseméretet [mm], az ρ_H pedig a halomsűrűséget [g/cm³]:

$$\rho_H = \frac{0,630}{d^{0,606}} \quad (\pm 4\%) \quad (17)$$

Az M.47. mellékletben a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és a halomsűrűségének változása látható a hőterhelési hőmérséklet függvényében. Megállapítható az, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete és halomsűrűsége között közel lineáris kapcsolat állapítható meg. Abban az esetben, ha nő a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete, akkor csökken annak a halomsűrűsége. Ennek a jelenségnek a hátterében a homokszemcsék összetapadása, az agglomerátum képződés áll.

Megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a változását is, amely a 42. ábrán látható.



42. ábra A hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a változása

A térfogatsűrűség és az átlagos szemcseméret közötti változásokat a 42. ábra szerint a következő egyenlet írja le, ahol a d jelöli az átlagos szemcseméretet [mm], az ρ_V pedig a térfogatsűrűséget [g/cm³]:

$$\rho_V = \frac{0,896}{d^{0,321}} \quad (\pm 4\%) \quad (18)$$

Az M.48. mellékletben a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a változása látható a hőterhelési hőmérséklet függvényében. Megállapítható, hogy ha a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete nő, akkor az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége csökkenő tendenciát mutat.

A körfolyamatban visszajáratott hőterhelt vízüveges homokrendszer halomsűrűségének és a szórás függvényének ismeretében meghatározható az újhomokkal történő frissítés mértéke. A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének az ismeretében a 40. ábra szerint előre jelezhető az azonos gyártási paraméterrel előállított magok térfogatsűrűsége. A 42. ábra szerint az átlagos szemcseméret (szitaanalízis) is alkalmas a magok térfogatsűrűségének becslésére, azonban a homok halomsűrűségének a meghatározása a termelésben is gyorsan elvégezhető és nem igényel speciális berendezést sem.

A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének és az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a vizsgálata során a következő megállapításokat tettem. Az SH34-es kvarchomok halomsűrűség értékéhez képest a hőterhelt vízüveges

homokkeverék halomsűrűsége csökken. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek térfogatsűrűsége a vizsgálati ciklus során csökkenő tendenciát mutat. Mindkét paraméter változása függ a hőterhelési hőmérséklettől és a ciklusok számától. A hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete befolyásolja a halomsűrűséget és a hajlító próbatestek térfogatsűrűségét. Abban az esetben, ha a hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete növekszik, akkor a halomsűrűsége és az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége csökken.

9.5. A vízüveges homokkeverék körfolyamatban történő felhasználása során bekövetkező szilárdsági tulajdonságok változásának a vizsgálata

9.5.1. A hőterhelés hatása a vízüveges homokmagok szilárdsági tulajdonságaira

A maghomok-keverékek alkalmazása során az egyik legfontosabb követelmény, hogy a magok az öntést követően lehetőleg elveszítsék a szilárdságukat és eltávolíthatók legyenek az öntvény belső üregeiből. A magok eltávolíthatóságának (űrítetőségének) vizsgálata a hőterhelést követően a hajlítószilárdság értékek meghatározásával történik.

A klasszikus vízüveges eljárások esetében az egyik legjelentősebb munka a hőterhelés közben bekövetkező szilárdság változásokra Jelinek nevéhez fűződik, aki vizsgálta, miként változik a vízüveges keverékből előállított hajlítópróbatestek szilárdságértéke szobahőmérséklet és 1300°C közötti hőmérsékleten. A hőmérséklet skálát széles intervallumban adta meg, amely arra fókuszált, miként fog viselkedni a vízüveges homokkeverék eltérő hőmérsékletű fémolvadékkal való érintkezést követően. Vizsgálta a könnyűfém (500°C-600°C), a nehézfém (850°C-1000°C), a vas- (1000°C-1150°C) ill. az acél öntészetben (1150°C-1300°C) tapasztalható hőmérséklet-tartományokat. Az *M.49.* mellékletben a Jelinek által mért hajlítószilárdság értékek változása látható a vízüveg-CO₂-eljárás alkalmazásával, különböző hőmérséklet-tartományon. Megállapítható, hogy 150°C körüli hőmérsékleten tapasztalható a vízüveges homokkeverékből készített próbatestek első maximum szilárdság (I) értéke. Ezen a tartományon a vízüveges oldatban jelen vannak még olyan alkotók, amelyekben a kémiai reakció csak részlegesen játszódott le. 600°C-on újabb dehidratációs folyamat megy végbe, amikor még a jelen lévő SiO₂ gél elfogy. Ennek következtében a hajlítószilárdság érték eléri a minimum értéket (II). Ezt követően olvadék fázis fog kialakulni, amelynek

hatására újabb kötések jönnek létre a formázókeverékben, amely a második szilárdság maximumot fogja okozni (III) [15].

Yaw A. Owusu az egyik kutatómunkájában a vízüveges homokkeverékből forró levegős átfúvással előállított próbatestek hőterhelés hatására bekövetkező szilárdságértékének a változását vizsgálta [98]. A kutatómunka eredményeinek a bemutatása során nem derül ki a vizsgált receptúra (kötőanyag és alaphomok típusa), a próbatestek gyártási paraméterei, továbbá a vizsgálatokhoz alkalmazott berendezések sem. A szerző azt a megállapítást tette, hogy a kezdő szilárdságot a hidratált szilikát gél okozza, amelynek a szilárdsága 100°C-300°C-ig növekszik az első szilárdság maximumig. Ezen hőmérsékleten szabad víz párolog el a kötőanyagból. Ezt követően szilárdság csökkenés történik, mivel 315°C környékén a kristályvíz elkezd felszabadulni a kötésekből. 450°C - 550°C körüli hőmérsékleten a képződött gél részben folyékony állapotú lesz, ami a minimum szilárdság értéket eredményezi. 550°C feletti hőmérsékleten a szilárdságérték nő, mivel üvegszerű kötések képződnek a homokszemcsék között. 800°C körüli hőmérsékleten az üvegfázis mennyisége nő, ami nagy viszkozitással rendelkezik, ezáltal nagy szilárdságértéket fog okozni [98].

Egy másik kutatómunkában Izdebska-Szanda, M. Szanda és Matuszewski nátrium vízüveges kötőanyaghoz szerves adalékanyagokat (polimer alapú észter származékokat) adagoltak, és vizsgálták a homokkeverékekből készített próbatestek szakítószilárdságát és a hőterhelést követően a hajlítószilárdság változását, továbbá a károsanyag-kibocsátás vizsgálatára gázkromatográfiás vizsgálatokat is végeztek [99]. A szerzők nem térnek ki a próbatest gyártási paraméterekre, ill. a pontos receptúra és az alaphomok sem ismert. A bemutatott eredményekből megfigyelhető, hogy az adalékanyagot tartalmazó és az adalékanyagmentes vízüveges homokkeverékből és a műgyantás homokkeverékből készített hajlító próbatestek hőterhelést követően meghatározott szilárdság értékei közel azonos értéktartományon változnak [99].

Flemming és társai vízüveg-CO₂-eljárás alkalmazásával vizsgálták a módosított és módosítatlan vízüveges kötőanyaggal előállított homokkeverék szilárdsági tulajdonságait [36] [100] [101]. Többek között vizsgálták az átfúvási idő, a tárolási idő és a hőterhelési hőmérséklet hatását a nyomószilárdsági tulajdonságokra. 3m/m% vízüveges kötőanyaggal állítottak elő tisztán újhomokból homokkeveréket, amiből hengeres próbatesteket készítettek, amelyet 20 perces hőntartással hőterheltek különböző hőmérsékleten [36] [100]. A kísérletek leírásában nem szerepel, hogy milyen adalékokat

alkalmazták a vízüveges kötőanyag modifikálásához, továbbá az sem derül ki, hogy a vizsgált kötőanyagok, miként viselkednek a körfolyamatban való visszajáratás hatására. A szerzők azt a megállapítást tették, hogy az N1 jelölésű módosítatlan vízüveg maradószilárdság értékek görbéje hasonló a Jelinek féle maradószilárdság görbéhez. Az N2 féle módosítatlan vízüveges kötőanyag esetében a szilárdságértékek jelentősen alacsonyabbak, mint az N1 esetében. A módosított vízüveges kötőanyagoknál a maradószilárdság értékek hasonló értéktartományon változnak, mint az N2 féle kötőanyaggal mért értékek. A legalacsonyabb maradószilárdságot a módosított vízüveges kötőanyag alkalmazásával lehet elérni [36] [100].

Izdebska-Szanda, Szolc és Smoluchowska a munkájukban egy önkötő típusú és egy CO₂ gázkatalizátoros szervesetlen kötőanyaggal végeztek kísérleteket [101]. Úgy vizsgálták a mechanikus regenerátumból készített próbatestek hőterhelést követően mért szilárdság értékeit, hogy a regenerátumot több körön keresztül visszajáratták a homok körfolyamatában, továbbá a 2. regenerálási körtől kezdődően, minden körben 50% újhomokot adagoltak azonos kötőanyagtartalom (2,5% kötőanyag) mellett. A bemutatott vizsgálatokban a hajlító próbatestek 24 órás tárolását követően történt a 30 perces hőterhelés. A regenerátum kihozatal 90-95% volt, azonban a regenerálás időtartama, a regeneráló berendezés pontos működési elve és a regenerálás körülményei nem ismertek. A szerzők által bemutatott kutatómunkában nagyon sok paraméter keveredik össze, amelyek együttes hatása fogja a szilárdságérték változásokat eredményezni. A bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy a vízüveges önkötő kötőanyaggal előállított próbatestek az 1. regenerálási körben 300°C-on elérik a szilárdság maximumot, amelyet a hőterhelés növekedésével szilárdságérték csökkenés követ. A 2. regenerálási körben szobahőmérséklettől kezdődően lineáris szilárdságcsökkenés következik be, amely 700°C-ig tart. A 3., a 4. és az 5. köröknél 200°C-nál tapasztalható a maximum szilárdságérték, továbbá az 1. körhöz képest 300°C és 400°C-on jelentős mértékű szilárdság csökkenés (~50%) következik be. Minden regenerálási körben 700°C felett szilárdságérték növekedés történik. A szerzők nem térnek ki arra, hogy mi okozza a 2. regenerálási körben bekövetkező jelentős mértékű szilárdság csökkenést. Továbbá megállapítható, hogy a CO₂ elgázosítással, mechanikus regenerátumból előállított hajlító próbatestek szilárdságértékei közel azonos görbe mentén változnak a visszajáratás során. A regenerálási körök hőterhelést követően mért szilárdságértékei között nincs jelentős mértékű eltérés. A görbék lefutása hasonló a Jelinek féle diagramon bemutatott görbéhez, azonban a szilárdságértékek jelentősen nagyobbak [101].

Becker, Schwickal és Magerl egy projekt munka keretén belül üzemi körülmények között kétlépcsős regenerálási technológia kombinálásával állítottak elő vízüveges regenerátumot és vizsgálták az ebből készített homokmagok tulajdonságait [76]. A kísérleteik célja az volt, hogy megállapítsák a regenerálási technológia lépéseinek a megfelelő sorrendjét és a szükséges regenerálási körök számát, amellyel a legjobb minőségű regenerátumot tudják előállítani. Megvizsgálták a regenerátum kötőanyagtartalmát, a szemcseösszetételét, az előállított magok tömegét, a szilárdsági tulajdonságokat, a gázáteresztőképességet és a melegdeformációs tulajdonságokat is. A maggyártási technológia a vízüveg-warm-box eljárás volt. A magszekrényt úgy tervezték meg, hogy a maggyártás során a magokkal együtt a hajlító próbatesteket, a gázáteresztőképességhez a hengeres próbatesteket és a melegdeformációs vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket is előállítsák. Minden regenerálási körben 2% vízüveges kötőanyaggal és 0,8% adalékanyaggal készítették a magokat. Emellett újhomokot is adagoltak a regenerátumhoz, amelynek az arányát a szerzők nem adják meg. Az előállított magokat alacsony nyomású öntőgép alkalmazásával és alumínium olvadékkal öntötték körbe [76]. A regenerátum előállítása során három különböző kísérletsorozatot végeztek el. Referencia értéknek az újhomokkal készült magcsomagok tömegét és a hengeres próbatestek gázáteresztőképességét használták. A szerzők a bemutatott eredmények alapján azt a megállapítást tették, hogy az M és S kísérletek esetében minden regenerálási körben előállított regenerátumból készített magcsomagok tömege kisebb, mint az újhomokkal előállított magcsomagok tömege [85]. Az U kísérletsorozat esetében érték el az újhomokkal készült rendszerhez hasonló tömeg értéket, kivéve a 4. regenerálási körben. A gázáteresztőképesség vizsgálatok eredményeinél az U kísérletsorozat esetében tapasztalták az újhomokkal készült rendszerhez közeli értékeket. A hajlítoszilárdság értékek alapján a szerzők azt a megállapítást tették, hogy a regenerátummal előállított hajlító próbatestek hajlítoszilárdság értéke az egy órás tárolást követően nagyobbak, mint az újhomokkal készült hajlító próbatestek szilárdsága. Az U kísérletsorozatnál az azonnali szilárdság értékek közel olyan értéktartományon változnak, mint az újhomokkal készült próbatestek azonnali szilárdságértékei, továbbá a 30 perces hajlítoszilárdság 14%-kal, az egy órás szilárdság pedig 12%-kal nagyobb, mint az újhomok esetében meghatározott értékek. Az M és az S kísérletsorozatok esetében az azonnali szilárdság érték csökkenő tendenciát mutat a regenerálási körök számának a növekedésével, amelyek jóval az újhomokkal készített keverékből előállított hajlító próbatestek

szilárdság értéke alatt van [76]. A szerzők a kiértékelésben nem térnek ki arra, hogy megvizsgálják a szilárdsági tulajdonságok és a magok tömegének a kapcsolatát.

Összeségében elmondható az, hogy a szakirodalomban bemutatott kutatómunkákban egyrészt tisztán újhomokot alkalmazó homokrendszert vizsgálnak különböző peremfeltételek mellett, továbbá egy már meglévő regenerálási rendszert alkalmazva próbálnak ismereteket szerezni a regenerátum alkalmazhatóságáról. A vízüveges homokkeverékek vizsgálatai főként a szilárdságértékek meghatározására alapszanak, azonban a teljes homokrendszer tulajdonságainak a feltárásához hiányzik a további paraméterek vizsgálata is, úgymint a granulometria tulajdonságok, a kötőanyagtartalom, a hőmérsékleti zónák hatása a teljes rendszer tulajdonságaira. Emellett az elvégzett kísérletekben több zavaró, ill. hiányzó tényező is van, úgymint a próbatestek előállítási paraméterei (gyártási technológia), az újhomok adagolása a regenerátumhoz (frissítés), a regenerálás időtartama, a regenerálás körülményei, a regeneráló berendezés hatékonysága, amelyek együttesen fogják befolyásolni a mérési eredményeket. Alapvetően az egyes paraméterek hatása nem határozható meg egyértelműen, mivel hiányzik a teljes homokrendszer alapfolyamatainak az ismerete. A kísérletekhez maggyártási technológiaként a vízüveg-önkötő, a vízüveg-észter és a vízüveg-CO₂ átfűvós eljárást alkalmazzák és kevés irodalmi adat található a meleg levegős átfűvós warm-box-eljárással alkalmazott homokrendszerek vizsgálatairól.

A kutatómunkám következő célja az volt, hogy megvizsgáljam milyen alapfolyamatok játszódnak le a hőterhelést követően a vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékben, továbbá a regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználásnak milyen hatása van a hőterhelt homokkeverék és a próbatestek tulajdonságaira.

9.5.2. A saját kísérleteim bemutatása

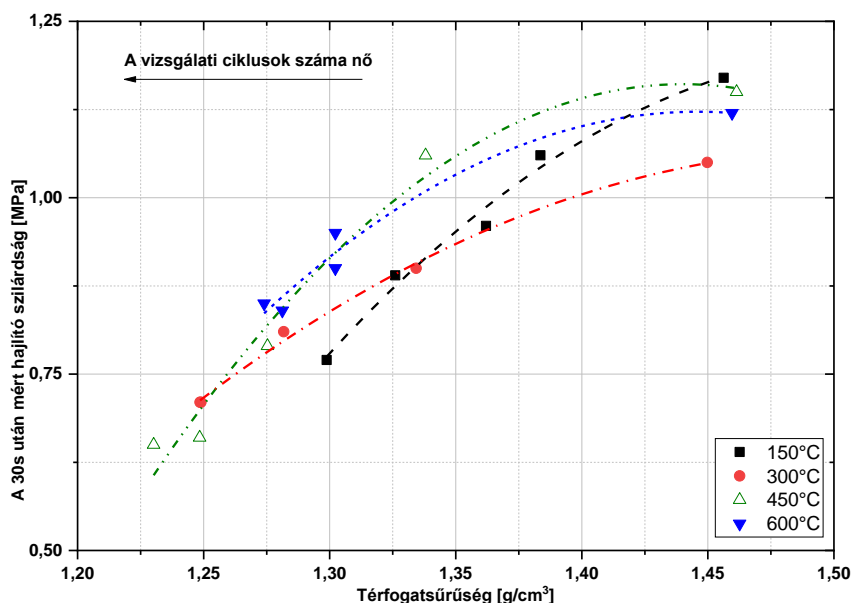
A zavaró (komplex) tényezőktől mentes effektusoknak a feltárása érdekében megvizsgáltam a hőterhelt vízüveges homokkeverék regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználása során a vizsgálati ciklusonként előállított hajlító próbatestek szilárdsági tulajdonságait. Minden vizsgálati ciklusban 2,2m/m% vízüveges kötőanyagot adagoltam az eltérő hőmérsékleten (150°C, 300°C, 450°C, 600°C) hőterhelt vízüveges homokkeverékhez, majd a meleg levegős átfűvós warm-box-eljárással a 4. táblázatban bemutatott gyártási paraméterekkel elkészítettem a hajlító próbatesteket. Ezt követően megvizsgáltam a magszekrényből való kivételről számítva a szobahőmérsékleten 30 másodpercig és 1 órán át tárolt hajlító próbatestek szilárdságértékét, majd minden

hőterhelési ciklust követően meghatároztam az 1 órán át hőterhelt hajlító próbatestek szilárdságértékét is.

9.5.2.1. A hajlító próbatestek 30 másodperces tárolását követően mért hajlítoszilárdság értékének és térfogatsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében

A 30. másodpercben mérhető hajlítoszilárdság értékének változása a gyakorlatban a mag kezelhetőségéről, kezdeti szilárdságáról ad információt [36]. Jelentősége az automatizált maggyártási folyamatban van, ahol ipari robot kezeli a magokat. Ha a magok szilárdsága nem éri el a szükséges minimum szilárdság értéket, akkor a magszekrényből való kivételt követően a magok eltörnek és ez ahhoz vezet, hogy a maggyártási folyamat leáll és külső beavatkozás szükséges [76]. Az *M.50.* mellékletben a vizsgálati ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből 2,2m/m% vízüveges kötőanyaggal készített vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdság értékének a változása látható a hőterhelési hőmérséklet és a ciklusok számának a függvényében. Megállapítottam, hogy a hőterhelt homokkeverékből előállított hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdsága minden hőterhelési hőmérsékleten és a vizsgálati ciklus növekedésével csökken az M1 referencia értékhez képest. A 150°C-os hőterhelési hőmérsékleten a hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdsága közel lineárisan csökken a vizsgálati ciklus növekedésével. A 300°C, a 450°C és a 600°C-os hőterhelési hőmérsékleten a hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdsága a negyedik ciklusig csökken, majd ezt követően a szilárdságérték nem változik jelentős mértékben. A különböző hőterhelési hőmérsékletek miatt a hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdság értéke eltérő mértékben csökken a vizsgálati ciklus során.

Az azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek szilárdsági tulajdonságait befolyásolják az alkalmazott homokkeverék granulometriai tulajdonságai (átlagos szemcseméret) és a térfogatsűrűsége is, ezért megvizsgáltam a térfogatsűrűség és a hajlítoszilárdság kapcsolatát. A 43. ábrán a hőterhelési ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének és a 30 másodperces hajlítoszilárdságának a változása látható.



43. ábra Az azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének és a 30 másodperces hajlítószilárdságának a változása

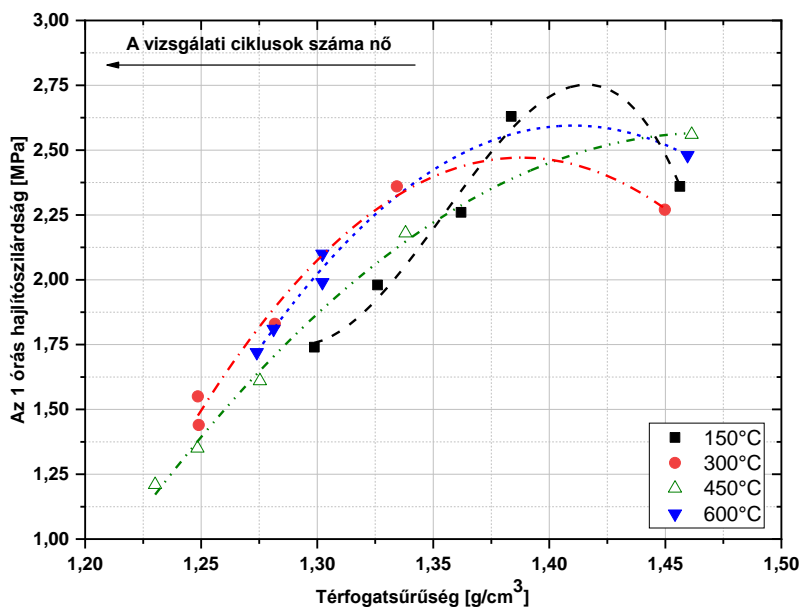
A 43. ábra alapján megállapítottam, hogy a hőterhelési ciklus számának a növekedésével a hajlító próbatestek térfogatsűrűsége és a 30 másodperces hajlítószilárdság értéke csökken. A hajlítószilárdság annak ellenére csökken, hogy a hőterhelési ciklusok számának növekedésével minden vizsgálati ciklus elején hozzáadott kötőanyag miatt növekszik a kötőanyagtartalom is. A hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítószilárdság értékének a csökkenését a térfogatsűrűség csökkenése okozza, amely szorosan összefügg az agglomerátum képződés okozta granulometriai tulajdonságok (átlagos szemcseméret növekedés) megváltozásával.

9.5.2.2. A hajlító próbatestek 1 órás tárolását követően mért hajlítószilárdság értékének és térfogatsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében

Megvizsgáltam, miként változik a vizsgálati ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből 2,2m/m% vízüveges kötőanyaggal készített vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek hajlítószilárdsága az 1 órás tárolást követően. Ennek a hajlítószilárdságnak a meghatározása arról ad információt, hogy a mag az öntés során képes-e deformáció mentesen elviselni a metallosztatikus nyomást, ill. a magok szállítása során repedésre vagy magtörésre mennyire hajlamos az adott homokmag. [39]. Ezen kívül a definiált tárolási idővel a vizsgált homokkeverék ún. utókeményedésére is lehet következtetni [76]. Az utókeményedés azt jelenti, hogy a tárolási idő hatására a mag teljes keresztmetszetében lejátszódnak a kötési folyamatok, amely által a mag eléri a közel

maximális szilárdságát. Az M.51. mellékletben a vizsgálati ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből előállított hajlító próbatetek 1 órás tárolását követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása látható a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus számának a függvényében. Megállapítottam, hogy 150°C és 300°C-os hőterhelési hőmérsékleten a második ciklusig az 1 órás tárolást követően meghatározott hajlítószilárdság érték növekszik, amelyet a vizsgálati ciklus elején adagolt vízüveges kötőanyag (2,2m/m%) okoz. Mindkét hőmérsékleten a harmadik vizsgálati ciklustól kezdődően csökkenő tendencia tapasztalható, amelyet a granulometriai tulajdonságok változása (átlagos szemcseméret növekedése) okoz és ezt a kötőanyagtartalom növekedése sem képes kompenzálni. A 450°C és 600°C-os hőmérsékleten az 1 órás tárolást követően mért hajlítószilárdság az M1 referencia értékhez képest a második ciklustól csökkenő tendenciát mutat. A legnagyobb mértékű szilárdság csökkenés 450°C-os hőmérsékleten tapasztaltam.

Megvizsgáltam a hajlító próbatetek térfogatsűrűségének és az 1 órás tárolást követően meghatározott hajlítószilárdság közötti kapcsolatot is. A 44. ábrán a vizsgálati ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatetek térfogatsűrűségének és az 1 órás tárolást követően meghatározott hajlítószilárdságának a változása látható.

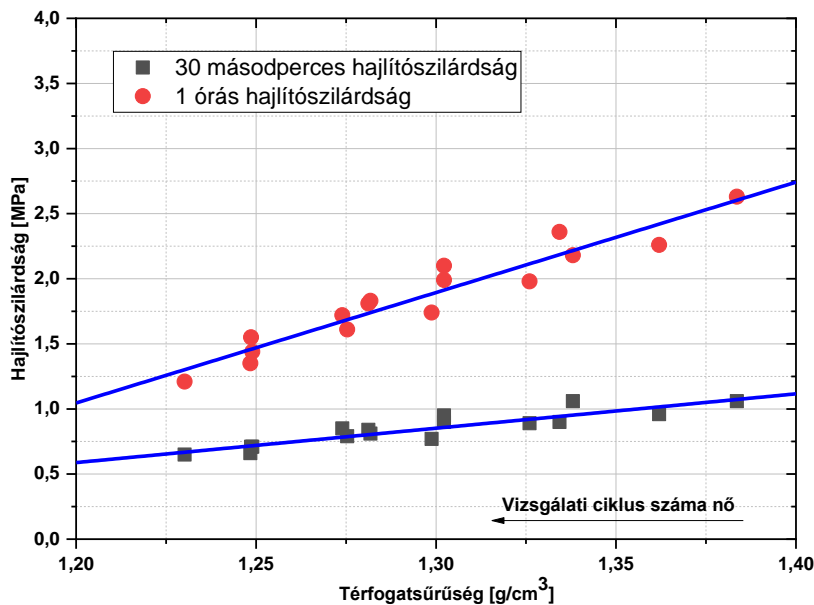


44. ábra Az azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek térfogatsűrűségének és az 1 órás tárolást után mért hajlítószilárdságának a változása

A 44. ábra alapján megállapítottam, hogy az azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek térfogatsűrűsége és az 1 órás tárolást követően meghatározott hajlítószilárdság értéke csökken a vizsgálati ciklus számának a növekedésével. 150°C-os

és 300°C-os hőmérséklet-tartományon az *M.51.* melléklet szerint a második vizsgálati ciklusig szilárdságérték növekedést tapasztaltam, amely a 44. ábrán kiugró értéként is megjelenik. Korábban megállapítottam, hogy a szilárdságérték növekedését a kötőanyagtartalom növekedése okozza, mivel nem érvényesül még a térfogatsűrűség (agglomerátum képződés miatti átlagos szemcseméret növekedés) változásának a hatása. Ennek oka az, hogy az M1 referencia értékhez képest a második cikluson a hajlító próbatestek térfogatsűrűsége 150°C-on 5%-kal, 300°C-on pedig 8%-kal csökken az M1 referencia értékhez képest, amellyel még nem éri el azt a kritikus térfogatsűrűség értéket, amely a szilárdsági tulajdonságok befolyásolásához szükséges lenne. Ellenben 450°C és 600°C-os hőmérsékleten a térfogatsűrűség a második ciklustól kezdődően eléri azt a kritikus értéket, amellyel a térfogatsűrűség csökkenésének következtében a szilárdság érték a második vizsgálati ciklustól kezdődően csökken. 300°C és 450°C esetében a második cikluson ugyan nincs jelentős eltérés a térfogatsűrűség csökkenésében (300°C-on 8% és 450°C-on 8,4% csökkenés az M1 értékhez képest), azonban a hőterhelési hőmérséklet mértéke is befolyásolni fogja, hogy mennyire érvényesül a térfogatsűrűség (granulometriai tulajdonságok) változásának a hatása a kötőanyagtartalom növekedésével szemben. Ennek hátterében az áll, hogy minél nagyobb hőterhelést szenved el a vízüveges homokrendszer, annál inkább megváltozik a homokszemcsék közötti kötőhidak karakterisztikája és a homokszemcsék felületi minősége, amely a körfolyamatban történő felhasználás során kihatással lesz a lejátszódó kötési folyamatokra és a térfogatsűrűségre is. Az *M.52.* mellékletben megtekinthető a 150°C, 300°C, 450°C és 600°C-on hőterhelt homokkeverékek SEM felvételei, amelyek bemutatják, miként változik a homokszemcsék felülete a hőterhelési hőmérséklet hatására.

Megvizsgáltam továbbá a hőterhelt vízüveges homokkeverékekből készített hajlító próbatestek 30 másodperces és az 1 órás tárolást követően mért hajlítószilárdság értékek és a térfogatsűrűség közötti viszonyt függetlenül a hőterhelési hőmérséklet-tartományoktól, amely a 45. ábrán látható.



45. ábra A hajlító szilárdság és a térfogatsűrűség változása függetlenül a hőterhelési hőmérséklettől

A hajlító próbatetek 30 másodperces és az 1 óras tárolást követően mért hajlítószilárdság értéke és a térfogatsűrűsége közötti változást a 45. ábra szerint függetlenül a hőterhelési hőmérséklet-tartományoktól a következő egyenletek írják le.

- A próbatetek 30 másodperces hajlítószilárdsága következőképpen függ a hajlító próbatetek térfogatsűrűségétől:

$$E_{30s} = -2,58 + 2,64 \cdot \rho_V \quad (19)$$

ahol E_{30s} (MPa) a 30 másodperccel az elkészülést követően mért hajlítószilárdság, ρ_V (g/cm³) a térfogatsűrűség.

- A próbatetek az 1 óra tárolás után mért hajlítószilárdsága a következőképpen függ a hajlító próbatetek térfogatsűrűségétől:

$$E_{1h} = -9,13 + 8,48 \cdot \rho_V \quad (20)$$

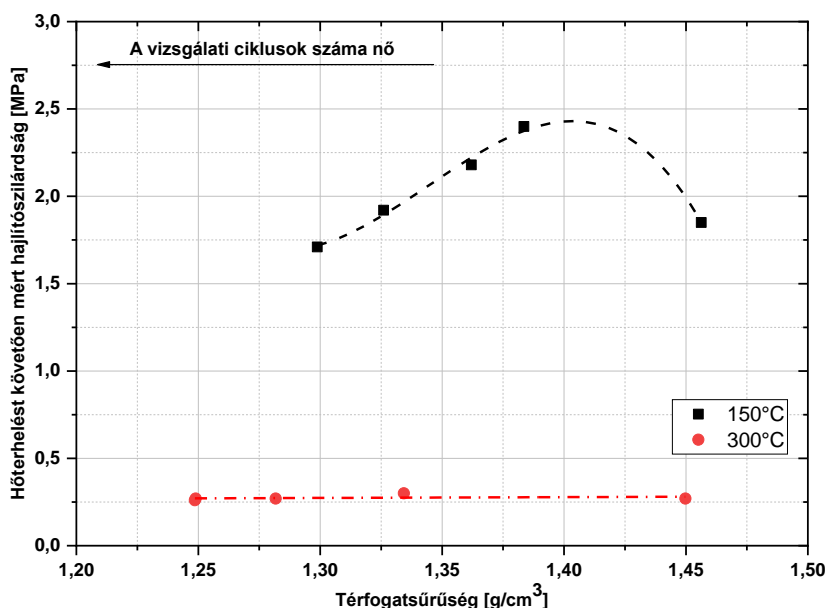
ahol E_{1h} (MPa) az 1 órával az elkészülést követően mért hajlítószilárdság, ρ_V (g/cm³) a térfogatsűrűség.

9.5.2.3. A hajlító próbatetek 1 óras hőterhelést követően mért hajlítószilárdság értékének és térfogatsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet függvényében

Megvizsgáltam, miként változik az 1 óras hőterhelést követően a hajlító próbatetek hajlítószilárdsága a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus hatására. A gyakorlatban ez a szilárdság érték a magok öntés utáni eltávolíthatóságáról

(üríthetőségéről) ad információt [38]. Minél alacsonyabb a hőterhelést követően meghatározott szilárdsáérték, annál nagyobb a valószínűsége, hogy a mag könnyen eltávolítható az öntvény üregeiből. Az M.53. mellékletben a ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből előállított hajlító próbatestek 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása látható a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus számának a függvényében. Megállapítható, hogy a 150°C-on történő 1 órás hőterhelést követően a hajlító próbatestek hajlítószilárdsága a második ciklusig növekszik, majd a harmadik ciklustól kezdődően csökkenő tendenciát mutat. A második ciklusig tapasztalható szilárdság növekedést a kötőanyagtartalom növekedése okozza, amelynek a hatása a harmadik körtől a granulometriai tulajdonságok (agglomerátum képződés és átlagos szemcseméret növekedés) és a térfogatsűrűség változása miatt már nem érvényesül. A 300°C-on az 1 órás hőterhelést követően a hajlító próbatestek hajlítószilárdsága azonos értéktartományon változik és nem befolyásolja a vizsgálati ciklus számának a növekedése. A 450°C és 600°C-on az 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdság a vizsgálati ciklusok számától függetlenül nulla (nem mérhető), mivel a hőterhelést követően a hajlító próbatestek szétesnek.

Megvizsgáltam a hajlító próbatestek térfogatsűrűségének és az 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdság közötti kapcsolatot. A 46. ábrán a ciklusonként előállított hőterhelt homokkeverékből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének és az 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdságának a változása látható.



46. ábra A hajlító próbatestek térfogatsűrűségének és az 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása

A 46. ábrán látható, hogy a 150°C-os hőterhelést követően meghatározott hajlítoszilárdság a második ciklusig történő növekedése miatt kiugró érték tapasztalható a térfogatsűrűség függvényében is, amelyet a kötőanyagtartalom növekedése okoz, azonban a harmadik ciklustól csökken a hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a csökkenése miatt. A hajlító próbatestek térfogatsűrűségének csökkenése nem befolyásolja a 300°C, a 450°C és a 600°C-os hőterhelést követően a hajlítoszilárdságot.

9.5.2.4. A hajlító próbatestek 30 másodperces és 1 órás tárolását követően mért hajlítoszilárdság értékek összehasonlítása

Összehasonlítottam a hajlító próbatestek 30 másodperces és 1 órás tárolást követően meghatározott hajlítoszilárdság értékeit. Az *M.54.* mellékletben az eltérő hőterhelési hőmérsékletből származó hőterhelt vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatestek 30 másodperces és az 1 órás tárolást követően meghatározott hajlítoszilárdság értékének a változása látható. Megállapítottam, hogy minden hőterhelési hőmérsékleten és vizsgálati cikluson a hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatestek 1 órás tárolását követően mért hajlítoszilárdság értékei az utókeményedés miatt jelentősen nagyobbak, mint a 30 másodperces hajlítoszilárdság értékek.

9.5.2.5. A hajlító próbatestek 1 órás tárolását és 1 órás hőterhelését követően mért hajlítoszilárdság értékek összehasonlítása

Összehasonlítottam a hajlító próbatestek 1 órás tárolását és 1 órás hőterhelését követően meghatározott hajlítoszilárdság értékeket. Az *M.55.* mellékletben az eltérő hőterhelési hőmérsékletből származó hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatestek 1 órás tárolását és az 1 órás hőterhelését követően meghatározott hajlítoszilárdság értékének a változása látható. Megállapítottam, hogy a harmadik ciklustól kezdődően a 150°C-os hőterhelést követően a hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatestek magszekrényből való kivételétől számított 1 órás tárolást követően mért hajlítoszilárdsága és az 1 órás hőterhelést követően mért szilárdsági értékei között nincs jelentős különbség. A mérési eredményeket gyakorlati szempontból megvizsgálva, az öntvények megfelelő üríthetőségéhez a magoknak minimum 300°C-os hőterhelése szükséges.

Összefoglalásként a regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználása során hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatestek szilárdsági tulajdonságainak a vizsgálata során a következő megállapításokat tettem.

A különböző hőterhelési hőmérséklet hatására a hőterhelt homokkeverékből 2,2m/m% vízüveges kötőanyaggal előállított vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek hajlítoszilárdság értéke eltérő mértékben változik a vizsgálati ciklus növekedésével. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdság értéke minden hőterhelési hőmérsékleten csökken a vizsgálati ciklus növekedésével és a térfogatsűrűség csökkenésével. A 45. ábra szerint a magok térfogatsűrűségének az ismeretében következtetni lehet az azonos gyártási paraméterrel előállított magok hajlítoszilárdság értékére, amellyel elkerülhető az ebből adódó magtörés és magselejt keletkezése. A körfolyamatban történő felhasználás során a hőterhelt homokkeverék halomsűrűségének a vizsgálatával megbecsülhető a 40. ábra alapján a térfogatsűrűség, ill. a 41. ábra szerint az átlagos szemcseméret is. Egy szórás görbe alapján a térfogatsűrűség és/vagy halomsűrűség becslésével megállapítható, hogy azonos gyártási paraméterek mellett a magok szilárdsági tulajdonsága optimális lesz-e.

A 150°C és 300°C-on hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatestek 1 órás tárolását követően meghatározott hajlítoszilárdsága a második ciklusig nő a kötőanyagtartalom növekedése miatt, majd a harmadik ciklustól kezdődően csökken a granulometriai tulajdonságok erőteljes változása következtében. Mindkét hőmérséklet-tartományon a hajlító próbatestek a harmadik vizsgálati ciklustól érik el azt a kritikus térfogatsűrűség értéket, amelynek hatására a szilárdság értékek csökkenő tendenciát mutatnak. A 450°C és 600°C-os hőmérsékleten az 1 órás tárolást követően mért hajlítoszilárdság értékek csökkennek a térfogatsűrűség csökkenése miatt. Ezen hőmérsékleten nem csak a kritikus térfogatsűrűség értéke játszik fontos szerepet, hanem a magas hőterhelés következtében a kötőhidak karakterisztikájában bekövetkező változások, ill. a homokszemcsék felületi minőségében bekövetkező változása is.

A hőterhelést követően meghatározott szilárdság értékek esetében 150°C-on a második ciklusig tapasztalható növekedés, amelyet a kötőanyagtartalom mennyiségének a növekedése okoz, azonban a harmadik ciklustól a szilárdság csökken a térfogatsűrűség csökkenése miatt. A 300°C, a 450°C és a 600°C-os hőterhelést követően a térfogatsűrűség nem befolyásolja a hajlítoszilárdság értékeket.

10. ÖSSZEFOGLALÁS, AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTHATÓSÁGA

A disszertációmban bemutatott kutatómunkámban a vízüveges kötőanyagrendszer tulajdonságaiban a különböző hőterhelési hőmérséklet hatására bekövetkező változásokat tanulmányoztam. A kutatómunkám fő iránya és módszerei megfelelnek a téma aktuális kutatási trendjének.

A használt (hőterhelt) homokkeverék és a regenerátum ún. maradék kötőanyagtartalmának meghatározására az oldható Na_2O tartalmat és az elektromos vezetőképességet alkalmazzák, azonban a két paraméter közötti összefüggések ellentmondásosak, ill. hiányosságok fedezhetők fel a szakirodalmi ismeretanyagban. Elsősorban nincs egyértelmű oldatkészítési metódus, amely biztosítja a vízüveges kötőanyagtartalom pontos meghatározását. A kutatómunkám során használt minősítő módszerek megfelelő alkalmazásához kidolgoztam egy standard oldatkészítési módszert. A kutatómunkám első részében a kötőanyag koncentráció és a hőterhelés hatását vizsgáltam meg az elektromos vezetőképességre és az oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalomra. A standard körülmények között elvégzett vizsgálataim eredményeként megállapítottam, hogy a hőterhelés nélküli vízüveges kötőanyagrendszer esetében növekvő kötőanyagkoncentráció mellett nő az elektromos vezetőképesség. A 25°C és 600°C közötti hőmérséklet-tartományon hőterhelt vízüveges homokkeverék elektromos vezetőképessége és az oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalma között nem állapítható meg egyértelmű összefüggés, ugyanis 25°C és 210°C közötti hőmérséklet-tartományon a két érték széles intervallumban változik, miközben 250°C és 600°C között a két paraméter között lineáris kapcsolat áll fenn. Üzemi körülmények között az öntés során a homok/fém aránya határozza meg a használt (hőterhelt) homokkeverék hőterhelési zónák szerinti összetételét, amely a homokrendszer körfolyamatában folyamatosan változni fog. Ennélfogva az elektromos vezetőképesség nem alkalmas a hőterhelést követően bekövetkező oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalom meghatározására.

A szakirodalmi ismeretanyagban több tisztán újhomokot használó homokrendszert vizsgálnak különböző peremfeltételek mellett, ill. egy már meglévő regenerálási rendszert próbálnak optimalizálni. A kísérleti eredményekben több zavaró, ill. hiányzó tényező van jelen, amelyek együttesen befolyásolják a mérési eredményeket. Az egyes paraméterek hatása nem határozható meg egyértelműen, mivel hiányzik a teljes használt (hőterhelt) homokrendszer alapfolyamatának az ismerete, amely magában foglalja a granulometriai tulajdonságokat, a kötőanyagtartalom, a szilárdsági tulajdonságok

vizsgálatát és az egyes paraméterek közötti összefüggések feltárását is. A kutatómunkám második részében megvizsgáltam a zavaró tényezőktől mentes effektusoknak a feltárása érdekében a vízüveges homokkeverék regenerálás nélküli körfolyamatban történő felhasználása során, miként változik a vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalma, a granulometriai tulajdonságok, a halomsűrűség, továbbá az előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége, a hajlítószilárdsága, ill. feltártam ezen paraméterek közötti összefüggéseket.

A kutatómunkámban az oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalom vizsgálata során kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy a vizsgálati ciklusonként a vízüveges homokkeverékhez 2,2m/m% adagolt vízüveges kötőanyag miatt nő az ebből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek és a hőterhelést követően a hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalma a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklusok függvényében. Minden hőterhelési hőmérsékleten az első és második hőterhelést követően következik be a hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid (Na_2O , K_2O) tartalmában a legnagyobb mértékű csökkenés, amely a hőterhelési hőmérséklettől függően 8% és 80% között változik.

A vízüveges homokkeverék granulometriai tulajdonságainak vizsgálata során megállapítottam, hogy a hőterhelt vízüveges homokkeverék szemcseösszetétele az SH34-es alaphomok szemcseösszetételéhez képest eltolódik a durva szemcsefrakció irányába, amelyet az agglomerátum képződés okoz. A durva szemcsefrakció mennyiségének növekedésével az átlagos szemcseméret is nő. A hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcsemérete befolyásolja a halomsűrűséget és a hajlító próbatestek térfogatsűrűségét is. A vizsgálati ciklus növekedésével a hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége és a hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek térfogatsűrűsége csökken, amelynek a mértéke függ a hőterhelési hőmérséklettől. Üzemi vonatkozásban a körfolyamatban visszajáratott hőterhelt vízüveges homokrendszer halomsűrűségének és a szórás függvényének ismeretében meghatározható az újhomokkal történő frissítés mértéke, ill. előre jelezhető az azonos gyártási paraméterrel előállított magok térfogatsűrűsége is.

A regenerálás nélküli körfolyamatban a hőterhelt vízüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatestek szilárdsági tulajdonságainak a változása alapján megállapítottam, hogy a különböző hőterhelési hőmérséklet hatására a hőterhelt homokkeverékből 2,2m/m% vízüveges kötőanyaggal előállított vízüveges

homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek hajlítoszilárdság értéke eltérő mértékben változik a vizsgálati ciklus növekedésével. A hőterhelt homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek 30 másodperces hajlítoszilárdság értéke minden hőterhelési hőmérsékleten csökken a vizsgálati ciklus növekedésével és a térfogatsűrűség csökkenésével. Ezáltal üzemi körülmények között egy szórás görbe alapján a térfogatsűrűség és/vagy halomsűrűség becslésével megállapítható, hogy azonos gyártási paraméterek mellett a magok szilárdsági tulajdonsága optimális lesz-e. A 150°C-on és 300°C-on hőterhelt homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek egy óras tárolását követően mért hajlítoszilárdsága a második ciklusig nő a kötőanyagtartalom növekedése miatt, majd a harmadik ciklustól kezdődően csökken a granulometriai tulajdonságok erőteljes változása következtében. A 450°C és 600°C-os hőmérséklet-tartományon az egy óras tárolást követően mért hajlítoszilárdság értékek csökkennek a térfogatsűrűség csökkenése miatt. Az egy óras hőterhelést követően meghatározott szilárdság értékek esetében 150°C-on a második ciklusig tapasztalható növekedés, amelyet a kötőanyagtartalom mennyiségének a növekedése okoz, azonban a harmadik ciklustól a szilárdság csökken a térfogatsűrűség csökkenése miatt. 300°C, 450°C és 600°C-os hőterhelést követően a térfogatsűrűség nem befolyásolja a hajlítoszilárdság értékeket.

A disszertációmban megfogalmazott tudományos eredmények bővítik a vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékek alkalmazásával kapcsolatos ismereteinket.

11. Summary

The research which I presented within my dissertation includes experiments with the changing attributes in water glass systems due to thermal differences. This research I conducted during the years of my study are meeting the current trends of industrial research and development.

To determine the residual binder remaining in the mix of sand and regenerated sand, in practice the detection of soluble Na_2O and electrical conductivity is being used. However, the relationships within these two different methods are rather contradictory, moreover there is a large gap in the available literature considering them. There is no concrete method which describes the mixing method perfectly, thus during my experiments I have developed a standard solution making recipe to be able to deploy the right qualification methods.

Within the first part of my work, I have studied the effect of the binder concentration and thermal load on the electrical conductivity and on the alkali oxide content. In a standard procedure, if there is no thermal load on the system, the raising binder concentration also increases the electrical conductivity. In a temperature interval of 25°C and 600°C there is no clear relationship between the electrical conductivity of the thermal loaded water glass mix and its alkali oxide content, because in the interval of 25°C - 210°C the two values are changing in a different manner, while in the interval of 250°C - 600°C these two have a parallel relationship. In actual operating conditions, the sand/metal ratio will specify the composition of the thermal loaded (used sand) zones, which will continuously change during the process. Thus, the electrical conductivity analysis will not be a sufficient method to define the changing value of the alkali oxide content.

The available literature states many different systems which are running on pure new sand and each investigation use different boundary conditions. Besides that, there are a lot of research that revolves around the optimization of existing sand regenerating systems. These researches contain many confounding factors which are influencing the process simultaneously. The effects of each individual factor cannot be stated clearly, because the basic knowledge needed to understand the mechanisms of the total used (thermal loaded) sand is missing. The second part of my work revolved around this topic. The main goal was to filter out these confounding factors and make a clear picture about the actual effects which are needed to understand the non-regenerative water glass cycle. The determination in the changes of the alkali oxide content, the granulometry, pile

density, furthermore the bulk density and tensile strength of the bending specimens took a huge part of my research, and I also demonstrated the relationships between these values.

After getting the results from my experiments on the alkali oxide content, I concluded that the added 2.2m/m% water glass binder each cycle is the reason why the soluble alkali oxide content is rising within the bending specimens. This phenomenon is also influenced by the heat value of the thermal load and the number of the test cycles. Within every thermal loading cycle, after the very first and the second load will the alkali oxide content change the most.

As the conclusion of my granulometrical experiments, I stated that the grain composition of the water glass sand mix will shift towards to the rougher values, in comparison of the SH34 base sand. This phenomenon occurs because agglomerates will form in the system. As the value of the rough grain fraction increases so will the average grain size. The thermal loaded sand's average grain size will influence pile density and the bulk density of the bending specimens. These values steadily started to decrease parallel with the increased number of cycles. As an actual operational aspect regarding the regeneration cycle, knowing the pile density of the mix and its deviation, we can specify the value of the new sand's refresh rate, moreover we can forecast the average density of the actual cores manufactured by this particular method.

I have also made research in the field of manufacturing cycles where there is no regeneration deployed within the process. There, from the changes of the mechanical properties in the bending specimens, I have concluded that each different thermal loading values will yield different value changing trends with using different cycle numbers. This was done using 2.2m/m% water glass sand mix, on bending specimens. The specimens made from these thermal loaded sand mix, yielded a decreasing value in 30s bending strength experiment, which was caused by the increased amount of cycle numbers and the decreased bulk density. Thus, during actual operations it can be forecasted if the mechanical properties will be sufficient or not, using the estimation of the bulk density and pile density. After storing the specimens for an hour on both 150°C and 300°C thermal load value will yield an increased value for bending strength up until the second cycle. This occurs because the binder will slowly accumulate in the system, and from the third cycle this very effect causes a decrease in the strength value, because the granulometrical properties will drastically change. The same storing technique applied to

the specimens made on 450°C and 600°C these bending values changed according to the decrease in bulk density.

Following a 1-hour thermal loading session, the specimens made on 150°C will yield an increase up to the second cycle because the binder accumulates and will have a positive effect on the mechanical values, however this same effect will ruin the strength in the form of decreasing bulk density. On 300°C, 450°C and 600°C, after the thermal loading, the bulk density will no longer influence the bending strength values.

12. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Kutatásaim során vízüveges kötőanyagtartalmú homokkeverékeket vizsgáltam. A vízüveg 2,2-es modulú ($= \text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$ tömegarány) volt, amiben az alkáli-oxidok tömegaránya azaz az $\text{Na}_2\text{O}:\text{K}_2\text{O} = 7,4/1$; a víz pedig kb. 50 tömeg% volt (a későbbiekben „vízüveg”). Az első kísérletsorozatban ezt $105\text{ }^\circ\text{C}$ -on tömegállandóságig szárítottam, majd a szárított vízüvegből 0,5 g-ot 100 ml desztillált vízben oldottam $20 \dots 80\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékleteken és különböző ideig (0,5 ... 120 perc) mágneses keverés mellett, majd atomabszorpciós spektrofotometriával vizsgáltam az alkáli-oxid oldódási kinetikáját, ahol 100 %-nak tekintetem az alkáli-oxidok teljes (13,5 tömeg%) feloldódását (1. tézis).

A második kísérletsorozatban vízüveges kötőanyagot adagoltam 200 ml desztillált vízbe, mégpedig úgy, hogy az oldandó kötőanyag mennyiségét 20 g homokhoz számoltam, mint ha homokkeveréket készítenék. Atomabszorpciós spektrofotometriával vizsgáltam az így előállított különböző kötőanyag koncentrációjú (1 ... 20 %) vizes oldatok oldható alkáli-oxid tartalmát és elektrokémiai mérőcellával az oldatok elektromos vezetőképességét (2.1.tézis). A további kísérletekben az SH34-es kvarchomokhoz (a későbbiekben „újhomok”) 2,2 tömeg%-ban vízüveges kötőanyagot adagoltam. Ebből a vízüveges homokkeverékből készítettem a meleg levegős warm-box-eljárással a hajlító próbatesteket a következő maggyártási paraméterekkel: 3 bar lövő nyomás, $180\text{ }^\circ\text{C}$ magszekrény hőmérséklet, 30 s átfűvási idő, 100°C átfűvási hőmérséklet (a későbbiekben „hajlító próbatestek”). Ezeket az hajlító próbatesteket 1 órán át különböző hőmérsékleten ($25 \dots 600\text{ }^\circ\text{C}$) hőterhelésnek vettem alá, az így egyszer hőterhelt homokmintákból 100g-ot 200 ml desztillált vízben oldottam (az 1. tézisben optimálisnak talált $60\text{ }^\circ\text{C}$ -on 5 perc oldási idővel, mágneses keverés mellett) és mértem az így nyert vizes oldat elektromos vezetőképességét és oldható alkáli-oxid tartalmát (amelyet sav-bázis titrálással mértem), ill. vizsgáltam a két paraméter közötti kapcsolatot (2.2 – 2.3 tézispontok).

A harmadik kísérletsorozatban vizsgáltam a regenerálás nélküli körfolyamatban visszajáratott vízüveges homokkeverék granulometriai tulajdonságait (átlagos szemcseméret), az oldható alkáli-oxid tartalmát, a halomsűrűséget, továbbá az ebből előállított hajlító próbatestek hőterhelés előtt és után bekövetkező hajlítószilárdság és a térfogatsűrűség változását.

Minden ciklus elején az eltérő oldható alkáli-oxid tartalmú hőterhelt vízüveges homokkeverékhez 2,2 tömeg% vízüveges kötőanyagot adagoltam, amelyből előállítottam a fenti maggyártási technológiával a hajlító próbatesteket. Az adott ciklus elején

elkészített vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma szolgált a vizsgálataim során a kiinduló oldható alkáli-oxid tartalomnak, amely a vizsgálati ciklusok és a hőterhelési hőmérséklet függvényében változott. A fentiek szerint elkészített hajlító próbatesteket manuálisan összetörtem, ezekből kis mennyiségű homokmintát vettem, azt desztillált vízben oldottam (az 1. tézisben optimálisnak talált 60 °C-on 5 perc oldási idővel) és mértem az oldat oldott alkáli-oxid tartalmát atomabszorpciós spektrofotometriával (3. tézis). Megvizsgáltam az oldható alkáli-oxid tartalom változását a maggyártás során bevitt hőenergia hatására (3.1. tézispont), ill. a különböző hőterhelési hőmérsékletek (150 – 300 – 450 – 600 °C) hatására is öt hőterhelési ciklusban (3.2. tézispont).

Ezt követően az újhomoknak lemértem a halomsűrűségét és az átlagos szemcseméretét (M1-hőterhelés nélküli adatok). Majd az újhomokhoz 2,2 tömeg% vízüveges kötőanyagot kevertem és ebből a fenti maggyártási technológiával hajlító próbatesteket készítettem, amiknek 30 másodperc és 1 óra elteltével mértem a hajlítószilárdságát és meghatároztam a tömegük alapján a térfogatsűrűséget, majd hőterheltem azokat 1 órán át 150 – 300 – 450 – 600°C hőmérsékleten, lemértem a hajlítószilárdságot, végül manuális aprítás után a halomsűrűséget és az átlagos szemcseméretet is (1. hőterhelési ciklus utáni adatok). Ezt a folyamatot még négyszer megismételtem és így kaptam összesen 5 hőterhelési ciklus után térfogatsűrűség, halomsűrűség és átlagos szemcseméret adatokat (4. tézis), illetve hajlítószilárdság adatokat (5. tézis).

1. Tézis. Az alkáli-oxidok szárított vízüvegből desztillált vízbe történő oldódásának kinetikai mérése során a mérés pontossága $\pm 2\%$, ezért teljesen feloldottnak tekintem azt a mintát, amire a mérés 96 % feletti értéket ad. A hőmérséklet függvényében a következő eredményeket kaptam:

1.1. A 20°C-os oldási hőmérsékleten az oldódási kinetikát két egyenlettel lehet közelíteni:

$$C = 16,2 \cdot t^{0,779} \quad \text{ha } 0 \leq t \leq 6,13 \quad (1.1.a)$$

$$C = 65,5 + 0,171 \cdot t \quad \text{ha } 6,13 \leq t \leq 120 \quad (1.1.b)$$

ahol C (%) a vízben feloldódott alkáli-oxid hányada, t (perc) az oldási idő. A 96% elérésének időigénye az (1.1b) egyenlet extrapolációjával minimum 176 perc, de a maximális mért érték 120 perc után mindössze 83,8 %.

1.2. A 40°C-os oldási hőmérsékleten az oldódási kinetikát két egyenlettel lehet közelíteni:

$$C = 56,1 \cdot t^{0,154} \quad \text{ha } 0 \leq t \leq 12,0 \quad (1.2.a)$$

$$C \cong 82,3 \pm 1,0 \quad \text{ha } 12,0 \leq t \leq 90 \quad (1.2.b)$$

ahol C (%) a vízben feloldódott alkáli-oxid hányada, t (perc) az oldási idő. A mért maximális oldott hányad 83,7 %-ra adódott 90 perc eltelte után, majd 120 perc után a mért érték 78,6 %-ra csökkent. Ezért a mért eredményekből nem lehet a teljes feloldódás időigényére következtetni.

1.3. A 60°C-os oldási hőmérsékleten az oldódási kinetikát két egyenlettel lehet közelíteni:

$$C = 88,3 \cdot t^{0,0565} \quad \text{ha } 0 \leq t \leq 4,4 \quad (1.3.a)$$

$$C \geq 96 \quad \text{ha } t \geq 4,4 \quad (1.3.b)$$

ahol C (%) a vízben feloldódott alkáli-oxid hányada, t (perc) az oldási idő. A 96 % feloldódott hányad időigénye tehát 4,4 perc.

1.4. A 80°C-os oldási hőmérsékleten a vízben feloldódott alkáli-oxid hányada már 1 perc oldódási időn belül eléri a 96 %-ot, ezért az oldódási kinetika részleteit nem tudtam vizsgálni.

2.tézis. A hőterhelés nélküli vízüveges kötőanyag, ill. az egy hőterhelési ciklusban hőterhelt (és aprított) hajlító próbatestek vízben való oldása után kapott vizes oldatok elektromos vezetőképességének és oldható alkáli-oxid tartalmának vizsgálatából a következő eredményeket kaptam:

2.1. A hőterhelés nélküli esetben az elektromos vezetőképesség a következő egyenlet szerint nő az oldott alkáli-oxid tartalom (0,01 ... 0,5 g/l) növelésével:

$$k = 1,08 \cdot 10^4 \cdot C \quad (\pm 1 \%) \quad (2.1a)$$

ahol k ($\mu\text{S}/\text{cm}$) az elektromos vezetőképesség, C (g/l) a vízben oldott alkáli-oxid tartalom. A megfordított (2.1a) egyenlet alkalmas az oldható alkáli-oxid tartalom becslésére a mért elektromos vezetőképesség adatokból hőterhelés nélküli esetre:

$$C \cong 9,24 \cdot 10^{-5} \cdot k \quad (\pm 1 \%) \quad (2.1b)$$

2.2. Igazoltam, hogy 25 ... 210°C között hőterhelt esetre az elektromos vezetőképesség értéke 2300 ... 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tartományban van, amihez 0,7 ... 1 g/l közötti oldható alkáli-oxid tartalom tartozik, de a (2.1a) egyenlethez hasonló szoros korrelációval jellemezhető egyenlet ebben az esetben nem írható fel. Így a mért elektromos vezetőképességből nem lehet megbízhatóan az oldható alkáli-oxid tartalomra

következtetni a 25 ... 210 °C között hőterhelt esetben, vagy ha a homokkeverék ilyen frakciót is tartalmaz. Ezt azzal magyarázom, hogy a vízüveg hidratált nátrium-alumínium-szilikátot tartalmaz (a röntgendiffrakciós mérések szerint), aminek mennyisége szobahőmérsékletéről történő hevítés hatására csökken, majd 150°C-on teljesen eltűnik (a minta röntgen-amorffá vált).

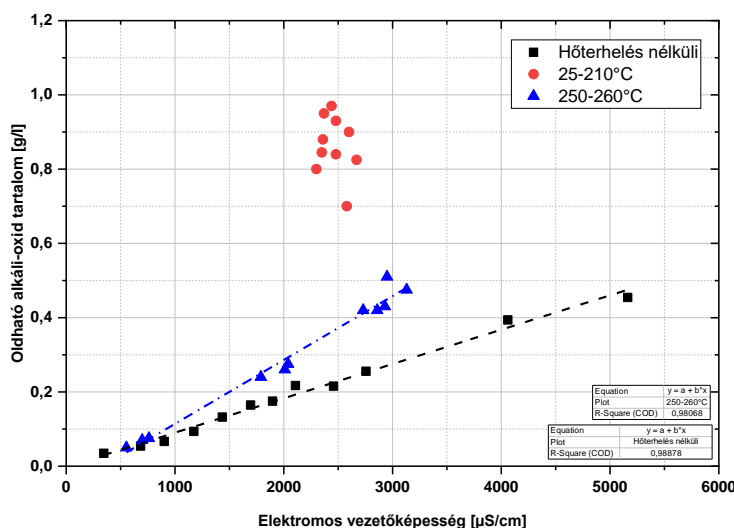
2.3. A 250 ... 600°C közötti hőmérséklet-tartományon belül hőterhelt vízüveges homokkeverék oldása után kapott oldatok elektromos vezetőképessége a következő egyenlet szerint nő az oldott alkáli-oxid tartalom növelésével:

$$k = 5,81 \cdot 10^3 \cdot C \quad (\pm 2 \%) \quad (2.2a)$$

ahol k ($\mu\text{S}/\text{cm}$) az elektromos vezetőképesség, C (g/l) a vízben oldott alkáli-oxid tartalom. A megfordított (2.2a) egyenlet alkalmas az oldható alkáli-oxid tartalom becslésére a mért elektromos vezetőképesség adatokból 250 ... 600°C között hőterhelt esetre:

$$C \cong 1,72 \cdot 10^{-4} \cdot k \quad (\pm 2 \%) \quad (2.2b)$$

Ugyan ebben az esetben kellőképpen szoros korrelációt kaptunk az elektromos vezetőképesség és az oldható alkáli-oxid tartalom között (lásd 2. ábra), ennek ellenére valószínű, hogy az alkáli-oxid tartalom legalább részben ebben az esetben is szilikát-komplex-ionok formájában oldódott fel a vízben, és ez magyarázza meg a (2.1a-b) és (2.2a-b) egyenletek különbözőségét (2. ábra). Ezek a komplexek azonban különböznek azoktól, amelyek 25 ... 210°C között hőterhelt minták oldása során keletkeztek.

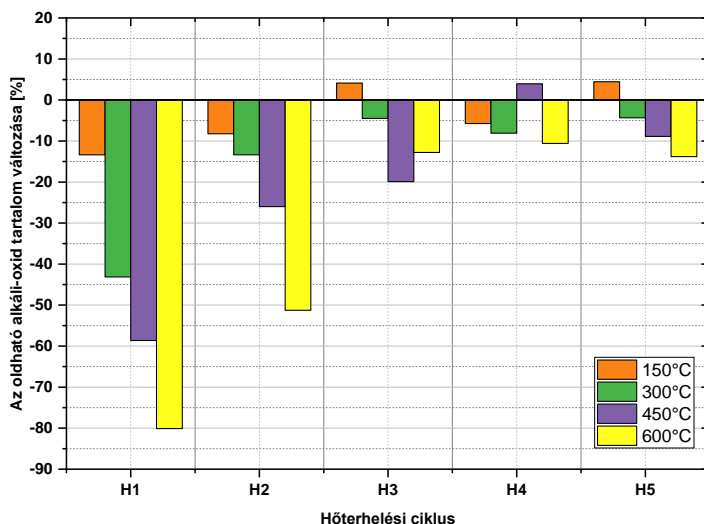


2. ábra A mért elektromos vezetőképesség értékek függése az oldható alkáli-oxid tartalomtól a hőterhelés nélküli és a 25 ... 600 °C-on hőterhelt minták desztillált vízben való feloldása után (pontok: mért értékek, vonalak: (2.1a) és (2.2a) egyenletek)

3. Tézis. Megvizsgáltam öt vizsgálati ciklusban az adott ciklus elején előállított vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalmának változását a maggyártás során bevitt hőenergia hatására, ill. az 1 órás hőterhelését követően, amelyek alapján a következő megállapításokat tettem:

3.1. A ciklusok elején előállított vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest az ebből készített hajlító próbatestek oldható alkáli-oxid tartalma csökken a maggyártás során bevitt hőenergia hatására. A csökkenés mértéke 0% és 15% között változik.

3.2. A ciklusok elején előállított vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmához képest a hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalma változik a hőterhelési ciklus számának növekedésével (lásd 3. ábra). Minden hőterhelési hőmérsékleten az első és a második hőterhelést követően következik be a hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmában a legnagyobb mértékű csökkenés. A harmadik hőterhelési ciklustól kezdődően a hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának változása már nem haladja meg a 20%-ot.



3. ábra A hőterhelt homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának változása a hőterhelési ciklusok számának függvényében

4. Tézis. A hőterhelési ciklusok függvényében mért átlagos szemcseméret, halomsűrűség és térfogatsűrűség értékek között a következő összefüggéseket állapítottam meg:

4.1. A hőterhelt vízüveges homokkeverék szemcseösszetétele az SH34-es kvarchomok szemcseösszetételéhez képest eltolódik a durva szemcsefrakció irányába a hőterhelési hőmérséklet és a hőterhelési ciklusok számának növelésével, aminek oka az agglomerátumok képződése. A durva szemcsefrakció részarányának növekedésével az

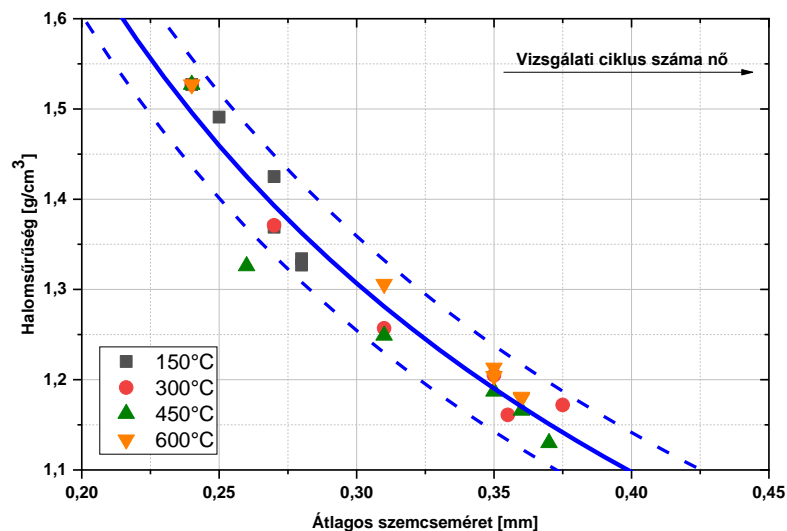
átlagos szemcseméret is nő. Megállapítottam, hogy 300 – 450 – 600 °C-os hőterhelés esetén az átlagos szemcseméret a 3. hőterhelési ciklus után a kiindulási 0,24 mm átlagos szemcsemérettől azonosan a $0,36 \pm 0,02$ mm átlagos szemcseméret tartományba kerül, míg a 150 °C-os hőterhelés esetén ez a durvulási folyamat lényegesen lassúbb.

4.2. A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűsége az SH34-es kvarchomok halomsűrűség értékéhez képest csökken a növekvő hőterhelési hőmérséklet és hőterhelési ciklusok számának következtében, aminek oka az agglomerátumok képződése. Megállapítottam, hogy 300 - 450 - 600°C-os hőterhelés esetén a halomsűrűség a 4. hőterhelési ciklus után a kiindulási $1,53 \text{ g/cm}^3$ halomsűrűségtől azonosan a $1,16 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ halomsűrűség tartományba kerül, míg a 150°C-os hőterhelés esetén ez a folyamat lényegesen lassúbb.

4.3. Megállapítottam, hogy - gyakorlatilag függetlenül a 150 ... 600°C-os hőmérséklet-tartományban végzett hőterheléstől - a halomsűrűség és az átlagos szemcseméret közötti összefüggést 0,24 ... 0,375 mm tartományban (egy kiugró mért értéket leszámítva) a következő egyenlet írja le (lásd 4.3 ábra):

$$\rho_H = \frac{0,630}{d^{0,606}} \quad (\pm 4\%) \quad (4.2)$$

ahol ρ_H (g/cm^3) a halomsűrűség, d (mm) az átlagos szemcseméret.



4.3. ábra A halomsűrűség függése az átlagos szemcsemérettől
vonal: (4.2) egyenlet, szaggatott vonalak: ± 4 %-os sáv az (4.2) egyenlet körül.

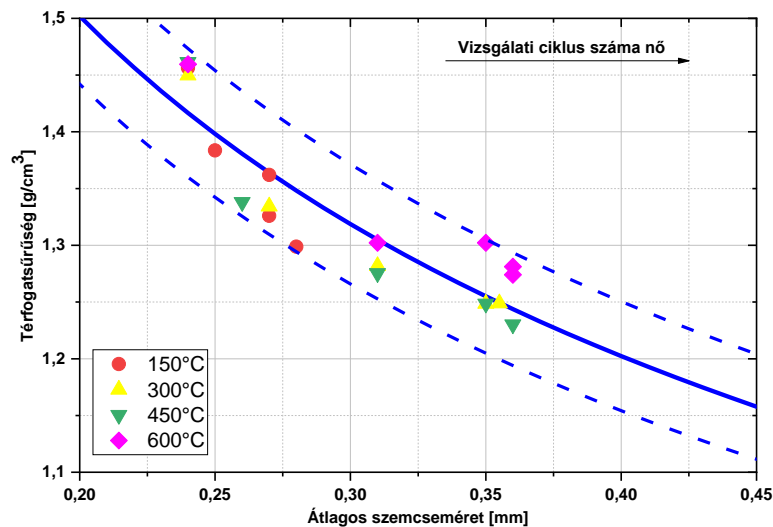
4.4. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatestek térfogatsűrűsége csökken a növekvő hőterhelési hőmérséklet és hőterhelési ciklusok számának következtében, aminek oka az agglomerátumok képződése. Megállapítottam, hogy minden hőterhelési hőmérséklet-tartományon a térfogatsűrűség

az 5. hőterhelési ciklusra a kiindulási $1,45 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ térfogatsűrűségtől azonosan a $1,25 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ térfogatsűrűség tartományba kerül.

4.5. Megállapítottam, hogy - gyakorlatilag függetlenül a $150 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérséklet-tartományban végzett hőterheléstől - a térfogatsűrűség és az átlagos szemcseméret közötti összefüggés a $0,24 \dots 0,36 \text{ mm}$ tartományban a következő egyenlettel írható le (lásd 4.5 ábra):

$$\rho_V = \frac{0,896}{d^{0,321}} \quad (\pm 4\%) \quad (4.3)$$

ahol $\rho_V \text{ (g/cm}^3\text{)}$ a térfogatsűrűség, $d \text{ (mm)}$ az átlagos szemcseméret.

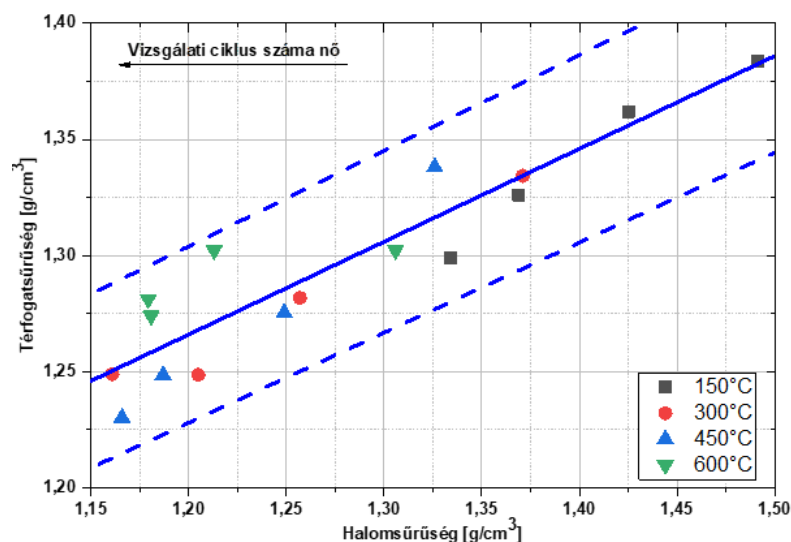


4.5.ábra A térfogatsűrűség függése az átlagos szemcsemérettől
vonal: (4.3) egyenlet, szaggatott vonalak: ± 4 %-os sáv a (4.3) egyenlet körül

4.6. Az öt hőterhelési cikluson átesett hőterhelt homokkeverék halomsűrűsége és az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűsége közötti összefüggés gyakorlatilag független a hőterhelés hőmérsékletétől a vizsgált $150 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ tartományban (lásd 4.4 ábra), és a következő egyenlettel írható le:

$$\rho_V = 0,786 + 0,400 \cdot \rho_H \quad (\pm 3\%) \quad (4.4)$$

ahol $\rho_H \text{ (g/cm}^3\text{)}$ a halomsűrűség, $\rho_V \text{ (g/cm}^3\text{)}$ a térfogatsűrűség. A (4.4) egyenlet szerint a halomsűrűség és a térfogatsűrűség megegyezik $\rho_H = \rho_V = 1,31 \text{ g/cm}^3$ érték mellett. Ha $\rho_H < 1,31 \text{ g/cm}^3$, akkor $\rho_V > \rho_H$, ha azonban $\rho_H > 1,31 \text{ g/cm}^3$, akkor $\rho_V < \rho_H$.



4.6. ábra A térfogatsűrűség függése a halomsűrűségtől az első négy hőterhelt mintára vonal: (4.4) egyenlet, szaggatott vonalak: ± 3 %-os sáv a (4.4) egyenlet körül.

5.Tézis. A mért hajlítószilárdság és térfogatsűrűség, illetve a vizsgálati ciklusszám és a hőterhelési hőmérséklet között talált összefüggések:

5.1. A 150 – 300 – 450 – 600 °C-os hőterhelést követően a hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatestek magzsekrényből való kivételétől számított 30. másodpercben mért hajlítószilárdsága csökken a vizsgálati ciklusok számának növekedésével. Megállapítottam, hogy a kiinduló $1,1 \pm 5$ MPa szilárdság értékhez képest, 150°C-os hőmérséklet esetében a hajlítószilárdság az 5. ciklusra 0,77 MPa értéktartományba, a 300 – 450 °C-os hőmérsékletek esetében a negyedik vizsgálati ciklustól kezdődően $0,7 \pm 2$ MPa értéktartományba, továbbá a 600°C-os hőmérséklet esetében a negyedik ciklustól pedig $0,85 \pm 2$ MPa értéktartományba kerül.

A próbatestek hajlítószilárdsága a magzsekrényből való kivételétől számított 30. másodpercben a következőképpen függ a hajlító próbatestek térfogatsűrűségétől:

$$E_{30s} = -2,58 + 2,64 \cdot \rho_V \quad (5.1)$$

ahol E_{30s} (MPa) a 30 másodperccel a magzsekrényből való kivétel követően mért hajlítószilárdság, ρ_V (g/cm^3) a térfogatsűrűség. Az (5.1) egyenlet közelítőleg a teljes 150 ... 600 °C hőmérséklet-tartományban elszenvedett hőterhelésre érvényes, a teljes mért $1,23 \dots 1,46 \text{ g/cm}^3$ térfogatsűrűség tartományban (lásd 5. ábra).

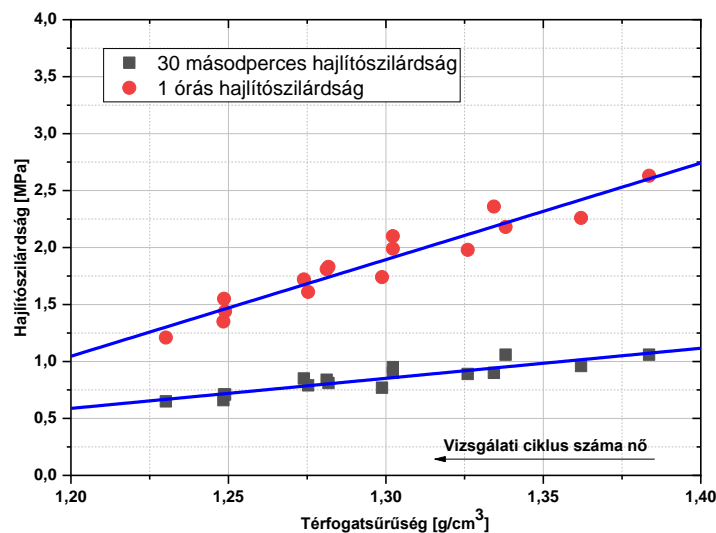
5.2. A 150 – 300°C-os hőterhelést követően a hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatestek magzsekrényből való kivételétől számított 1 órás tárolását követően mért hajlítószilárdság értéke a második ciklusig nő, majd a kiinduló $2,4 \pm 10$ MPa értékből a 3. ciklustól kezdődően csökken míg $1,6 \pm 15$ MPa értéktartományba kerül. A második ciklusig tapasztalható szilárdság növekedést a kötőanyagtartalom növekedése

okozza, amelynek a hatása a harmadik ciklustól a granulometriai tulajdonságok változása (agglomerátum képződés és átlagos szemcseméret növekedés) miatt már nem érvényesül. A 450 – 600 °C-os hőmérsékletek esetében a készített hajlító próbatestek magszekrényből való kivételétől számított 1 órás tárolást követően mért hajlítószilárdsága csökken a vizsgálati ciklusok számának a növekedésével. A kiinduló értékhez képest 450°C esetében az 5. ciklusra 1,2 MPa tartományba, a 600°C esetében pedig 1,75 MPa értéktartományra esik.

A próbatestek hajlítószilárdsága a magszekrényből való kivételtől számított 1 órás tárolását követően a következőképpen függ a hajlító próbatestek térfogatsűrűségétől:

$$E_{1h} = -9,13 + 8,48 \cdot \rho_V \quad (5.2)$$

ahol E_{1h} (MPa) az 1 órával a magszekrényből való kivételt követően mért hajlítószilárdság, ρ_V (g/cm^3) a térfogatsűrűség. Az (5.2) egyenlet közelítőleg a teljes 150 ... 600°C hőmérsékleten elszennvedett hőterhelésre érvényes, a teljes mért 1,23 ... 1,40 g/cm^3 térfogatsűrűség tartományban (lásd 5. ábra).



5. ábra A hajlító próbatestek hajlítószilárdsága és térfogatsűrűsége közötti összefüggés, a hőterhelési hőmérséklettől (150 ... 600°C) függetlenül, (a vonalak az (5.1-2) egyenletekkel számítva).

5.3. Az öt vizsgálati ciklus során a hőterhelt homokkeverékből előállított hajlító próbatestek 150°C-on 1 órás hőterhelést követően mért hajlítószilárdság értéke a következő egyenlet szerint változik az 1 órás tárolást követően mért hajlítószilárdság értékéhez képest:

$$\Delta E_{1h} = -\frac{22,5}{N^{1,423}} \quad (6.3)$$

ahol ΔE_{1h} (%) a hajlítószilárdság változása, N (-) a vizsgálati ciklus sorszáma.

5.4. A 150°C-os hőterhelést követően a hőterhelt vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatestek magszekrényből való kivételétől számítva a 150°C-on 1 órás hőterhelését követően mért hajlítószilárdság értéke a második ciklusig nő, majd a harmadik ciklustól kezdődően csökkenő tendenciát mutat. A második ciklusig tapasztalható szilárdság növekedést a kötőanyagtartalom növekedése okozza, amelynek a hatása a harmadik ciklustól a granulometriai tulajdonságok változása (agglomerátum képződés és átlagos szemcseméret növekedés) miatt már nem érvényesül.

5.5. A 300°C-os hőterhelési hőmérsékleten hőterhelt homokkeverékből előállított próbatestek 300°C-on 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdsága azonos értékű (0,25 MPa), függetlenül a hajlító próbatestek térfogatsűrűségétől és a ciklusszámtól.

5.6. A 450°C és 600°C-os hőterhelési hőmérsékleten hőterhelt homokkeverékből készült próbatestek az 1 órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdság értéke a hőterhelési ciklusok számától függetlenül olyan alacsony, hogy azok a hőterhelést követően minimális terhelés hatására is szétesnek.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Tóth L.: Környezetvédelem az öntészetben, öntödei hulladékok, Miskolci Egyetem
- [2] Kép forrás (2019): <https://www.boesner.ch/conception-plastique/bois-argile-steatite-2/sable-cinetique-sable-a-fa-onner>
- [3] Kép forrás (2019): <https://www.lkabminerals.com/en/products/foundry/zircon/>
- [4] Kép forrás (2019): <https://www.farbeundlack.de/Markt-Branche/Unternehmen-und-Maerkte/Cytec-kuendigt-Verkauf-vom-Harz-Geschaef-an>
- [5] Kép forrás (2019): https://www.hcstarck.com/additive_fertigung_w_mo_ta_nb
- [6] Kép forrás (2019): <https://www.ressourcesmetallurgiques.com/unlimited-possibilities-making-sand-molds-cores-3d-printing-technology/>
- [7] Kép forrás (2019): <https://www.kolbus.de/unternehmen/kolbus-maschinenbau/giesserei-bei-kolbus/>
- [8] Kép forrás (2019): <http://www.directindustry.com/prod/klein/product-57835-1997482.html>
- [9] Dr. Tóth L.: Forma és magkészítési ismeretek oktatási segédlet, 2011
- [10] Tóth Judit: Formázóanyagok hőfizikai tulajdonságainak vizsgálata, doktori értekezés Miskolc 2016
- [11] Bakó K.: Öntödei formázóanyagok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1976
- [12] Dahlman, Recknagel: Spezialsande-Formgrundstoffe für die moderne Kern- und Formherstellung, Giesserei-Rundschau 56/2009 Heft1/2
- [13] <http://www.huettenes-albertus.com/produkte/spezialsand/index.html>
- [14] Bindernagel: Formstoffe und Formverfahren in der Giessereitechnik, Düsseldorf,
- [15] Flemming, Tilch: Formstoffe und Formverfahren, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart, 1993
- [16] Vakuum-Formverfahren mit Stahlsand, Clausthal-Zellerfeld, 1997
- [17] Taschenbuch der Gießerei Praxis 2019, Schiele & Schön kiadó
- [18] Böhm: Der Weg zu einer wirtschaftlichen und emissionsfreien Gießerei, Giesserei-Rundschau 60, 2013 Heft ¾, S. 75-77
- [19] VDI Wissensforum: Innovative anorganische Kernfertigung, Veranstaltungsunterlagen, 2015
- [20] ASK Chemicals GmbH (2016). Inotec process. Retrieved on 2. Feb. 2016.
- [21] Dr. Bacanu: Herausforderungen und Trends in der Giessereiindustrie, 2015 HA Düsseldorf
- [22] Müller, Koch, Priebe, Neun, Brotzki: Die neuen HE-Systeme, Hocheffiziente Cold-Box-Binder zur Prozess- und Kostenoptimierung, Giesserei-Praxis 9/2010 S. 277-281.
- [23] Benz, Fourberg: Umweltfreundliche Furan-Kaltharze mit einem freien Furfurylalkoholanteil kleiner 25 Prozent, 2012 HA Düsseldorf
- [24] Gieniec, Müller, Vacelet: Innovative binders for eco-friendly and highly productive processes, Casting Plant & Technology 4/2013
- [25] Dr. Psimenos, Eder, Dr. Sipos: Emissions- und geruchsarme Cold-Box Systeme-komplett frei von aromatischen Lösemitteln, Giesserei-Rundschau 57 2010 Heft ¾ S. 34-40
- [26] Boehm: Erfahrungen bei der Regenerierung anorganischer Binder, 2008
- [27] Weicker, Chmielewski: Es war Zeit für etwas Neues – Gesamtheitliche Betrachtung eines optimierten Cold-Box-Systems, Giesserei-Rundschau 51 (2004) Heft 7/8 Oldal:133-135
- [28] Psimenos, Sipos, Eder, Neustadt: Neue emissionsarme PUR-Cold-Box-Systeme mit hoher Beständigkeit gegenüber Wasserschichten, Giesserei 93 6/2006 S.72-79

- [29] Anorganische Kernbinder-Technologie: Von Deutschland in die Welt, 2016 HA Düsseldorf
- [30] Polzin, Tilch: Form- und Kernformverfahren, Vorlesungsunterlagen TU BaF Rev.3-2013
- [31] Adam: Heißhärtende Bindemittel-Einsatz- und Anpassungsmöglichkeiten, Giesserei-Rundschau 49 2002 Heft 9/10, S. 146-149
- [32] VDG Taschenbücher 12, Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik, Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf 1983
- [33] Winnacker-Weingartner: Chemische Technologie Band II, Hanser-Verlag München 1950 S. 311
- [34] J. N. von Fuchs: Bereitung, Eigenschaften und Nutzenanwendung des Wasserglases, Dinglers Polytechnisches Journal, Nr. 17 1825
- [35] Polzin, Tilch: Modul Formstoffe- Teil I. Grundlagen der Formstoffe 2013 Vorlesungsunterlagen- Freiberg, TU Bergakademie
- [36] Polzin: Inorganic binders for mould and core production in the foundry 2014 Schiele & Schön Kiadó
- [37] Oliver: Molecular origins of mechanical properties in hybrid glasses, Stanford University 2010
- [38] Voight: Untersuchungen zum Einsatz anorganischer Formstoffbinder zur Grossserienproduktion komplexer Aluminium-Zylinderköpfe, Dissertation TUBaF 2008
- [39] Wöllner GmbH Co KG: Anwendung von Silikaten und Flotationshilfsmitteln in der Papierindustrie, 2015
- [40] Kooyers: Beeinflussung der technologischen Eigenschaften von wasserglasgebundenen Formstoffsystemen durch chemische Modifizierung, Dissertation TUBaF 2011
- [41] Foseco: Anorganische Formstoffbindemittel-Silikate
- [42] Günther: Zum Fällungsprozess und Wachstum kugelförmiger SiO₂-Partikel, Dissertation Otto-von-Guericker-Universität Magdeburg 2008
- [43] Vansant, Van Der Voort, Vrancken: Characterization and chemical modification of the silica surface, Studies in Surface Science and Catalysis 93, 1995 Elsevier Science B.V.
- [44] Murakata, Sato, Ohgawara, Watanabe, Suzuki: Control of pore size distribution of silica gel through sol-gel process using inorganic salts and surfactants as additives, Journal of Materials Science 27 (1992) 1567-1574
- [45] Dr. Wallenhorst: Grundlagen zum Verständnis der anorganischen Kernfertigung, Gießerei-Praxis 6/2010 S. 181-184
- [46] Polzin, Tilch: Herstellung von Kupferguss- und Gusseisen-Bauteilen mit anorganischen Formstoffen, Giesserei 91 10/2004 S. 34-43
- [47] Taschenbuch der Gießerei Praxis 2016, Schiele & schön kiadó
- [48] Polzin, Tilch, Kooyers: Fortschritte in der Entwicklung des Wasserglasformverfahrens 2006/6 Giesserei-Praxis S.169-174
- [49] Grassman: Hochfrequenztrocknung wasserglasgebundener Kerne, Giesserei 49, 1962 Nr. 17, S.580-582
- [50] Schreyer, Erbs, Hofer: Herstellung von Giesserei Kernen, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1965
- [51] Polzin, Flemming: Untersuchungen zur Mikrowellenverfestigung von wasserglasgebundenen Giessereiformstoffen, Teil 1. Giesserei Praxis 12/1999 S.569-581

- [52] Polzin, Flemming: Untersuchungen zur Mikrowellenverfestigung von wasserglasgebundenen Giessereiformstoffen, Teil 2. Giesserei Praxis 2/2000 S.58-71
- [53] Steinhäuser: Regenerierung von AWB-Kernsand, Giesserei 96 08/2009 S. 70-73
- [54] AWB-the binder system for clean casting, AFS Conference on Advancements in Low Emission Casting Technology, March 14, 2006 Cincinnati
- [55] Kasperowski, Körschgen, M. Frohn, C. Wallenhorst: Steuerung der Prozessstabilität bei der anorganische Kernfertigung, Giesserei 97 12/2010 58-61
- [56] Appelt, Voss: Einfluss der Temperaturleitfähigkeit organisch und anorganisch gebundener Formkerne auf die Gefüge Eigenschaften von Aluminiumlegierungen, Gießerei 103 8/2016 S. 22-27
- [57] Voight, Bischoff, Ristau, Georgi, Sill, Lustig: Einsatz neuer anorganischer Formstoffbindemittel in der Produktion von Aluminium-Zylinderköpfen, Giesserei 93 03/2006 S. 44-49
- [58] Détári A. disszertációja: Forma- és fém kölcsönhatásainak vizsgálata, különös tekintettel a formázóanyagok újrahasznosíthatóságára, Miskolc 2009
- [59] Dr. Varga: Formázóanyagok és technológiák előadás anyag, 2018
- [60] Danko, Danko: Effektive Regenerierungstechnologien, Giesserei-Praxis, 5/2007 S.177-180
- [61] Beňo, Jelínek, Špirutová: Moulding mixtures, VŠB - Technical University of Ostrava Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Ostrava 2015
- [62] Steinhäuser, B. Wehren, Regenerierung von anorganisch gebundenen Kernsand Gießerei 99 03/2012 Seite 58-61.
- [63] Schwickal, Hoffman, Blümlhuber, Weissenbek: Regenerierung von anorganisch gebundenen Gießereikernsand Gießerei 96 11/2009 S. 40-44
- [64] <http://www.f-a-t.de/produkte/geschaeftsbereich-giesserei/thermisch-regenerieren/>
- [65] Polzin, Jaruszewski, Müller-Spáth: Die Regenerierung von Wasserglas-Esteraltsanden in einer mittelständischen Aluminium Gießerei, Gießerei 99 04/2012 S.70-81.
- [66] Wijnker: Erfahrungen beim Regenerieren von Grünsand-Kernsandgemisch im Grünsandformverfahren, Giesserei-Praxis 10/2014 S.447-458
- [67] Jónás, Tóth: Formázóanyagok vizsgálata és öntödei gépek (laboratóriumi gyakorlatok gyűjteménye) Nehézipari Műszaki Egyetem, 1986
- [68] VDG-Merkblatt P73; Bindemittelprüfung (1996)
- [69] VDG-Merkblatt P74; Bindemittelprüfung (2000)
- [70] VDG-Merkblatt P72; Bindemittelprüfung: Prüfung von klathärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen mit Härterzusatz (1999)
- [71] Szakács, Varga, Nagy: Polimerek mérés technikája, Pannon Egyetem 2012
- [72] Hajlítószilárdság forrás (2019):https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_1632497a-4975-4feb-ba4d-1dd363000ff7_a210225a-9394-4434-8c57-7b327932371d_4763a9bb-6fe1-4022-93bf-edc49e2e7986_dc94e4b0-375c-4b9e-bf6d-f10ecd497311_31f0d03c-cf84-4808-a79b-da7cc067cc18_fa680166-aa9d-42c8-9119-7d455f264c3c
- [73] Kép forrás (2019):
http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=3-point_flexure.png

- [74] Stauder, Kerber, Schumacher: Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation, *Journal of Materials Processing Technology* 237 (2016) S. 188-196
- [75] Szabadalom: DE 102011075631A1 Vefahren zur Prüfung der Qualität von Regeneratsand
- [76] Becker, Schwickal, Magerl: Qualitative und wirtschaftliche Bewertung eines neuartigen Regenerationsverfahrens für anorganische Bindersysteme, Abschlussbericht 2011
- [77] Dokumentum forrás (2019): <https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/atomabszorpcios/atomabszorpcios.docx>
- [78] Hüttenes-Albertus GmbH: Analytik der neuen anorganischen Kernbinder, Cordis-Binder
- [79] Polzin, Tilch: Neue Erkenntnisse zum Umlaufverhalten regenerierter Wasserglasformstoffe, *Giesserei-Praxis*, 11/2004 S. 415-420
- [80] Vízkémia, forrás (2019): <https://slideplayer.hu/slide/2123807/>
- [81] Berecz: Kémia műszakiaknak, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1998
- [82] Quarzsand SH34 Datenblatt www.kerkosand.sk
- [83] Inotec EP4158 Sicherheitsdatenblatt <https://www.ask-chemicals.com/home>
- [84] VDG-Merkblatt Bindemittelprüfung: Prüfung von kalthärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen mit Härterzusatz, P72 Oktober 1999
- [85] Forrás (2019): <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/sieving/vibratory-sieve-shakers/details/product/analysette-3-pro/>
- [86] Termoanalitikai módszerek (Termoanalízis) (2019): <http://www.chem.elte.hu/departments/anal/perenyi/muszi%20II/TA/TERMOANALITIKA%20ELTE.pdf>
- [87] Hüttenes Albertus GmbH: Erfahrungsaustausch zum Verhalten von AOB-Kernen bei erhöhter Luftfeuchtigkeit, 2017
- [88] Forrás (2019) <http://mom.hu/en/derivatograph-c-pc-2/>
- [89] Szakáll Sándor: Ásvány- és közetan alapjai, 2009
- [90] Röntgendiffrakció működési elve (2019): <http://www2.sci.u-szeged.hu/inorg/MOMA/ch07s03.html>
- [91] Röntgendiffraktogram (2019): <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/high-temperature-oven-chamber-htk-1200n/>
- [92] Dargai, Varga: The Examination of mechanical properties of inorganic core sands, XXXI. microCAD, Miskolc 2017
- [93] Danko, Danko, Holtzer: Reclamation of used sands in foundry production, *Metalurgia* 42 (2003) 3, 173-177
- [94] Soósné Balczár I: A. disszertációja: Alkáli aktivált, szerves polimer bázisú kötőanyagrendszer fejlesztése, Pannon Egyetem Mérnöki Kar Anyagmérnöki Intézet, 2011
- [95] Mucsi, Csőke, Molnár: Alkáli aktivált pernyealapú kötőanyag vizsgálata, Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárásoktechnikai Intézet
- [96] Forrás (2019): https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_ee85c6bc-112c-4445-aa74-0565e2d946aa_16873b65-adac-4ea3-9c31-5f2bb3bcac68_cf8cef31-eaf0-41b1-bff9-6b185d732f77_d45cff9a-39fd-4c8e-93c0-cd53add6bd95_1723e6d3-b971-4ed2-a929-a4c10d12fd61_03caa148-c632-4a51-80ad-62eb983000db_1ee20cca-c098-4c3a-91fc-9535cd5ff448

- [97] Yaw Owusu: Physical-chemical study of sodium silicate as a foundry sand binder, *advances in Colloid and Interface Science*, 18 (1982) Oldal 57-91
- [98] Izdebska-Szanda, Szanda, Matuszewski: Technological and ecological studies of moulding sands with new inorganic binders for casting of non-ferrous metal alloys, *Archives of foundry engineering ISSN (1897-3310) Volume 11 Issue 1/2011*
- [99] Flemming, Polzin, Kooyers: Beitrag zum Einsatz verbesserter Formstechnologien auf er Basis von Alkali-Silikat-Binderlösungen, *Giesserei_praxis* 1996 nr. 9/10 S. 177-183
- [100] Zaretskiy: Modified silicate binders new developments and applicaations, *International Journal of Metalcasting*, Volume 10 Issue 1 2016 S. 88-99
- [101] Izdebska-Szanda, Szolc, Smoluchowska: Investigating the reclaimability of moulding sand with new, ecological inorganic binders, *Archives of foundry engineering, ISSN (1897-3310) Volume 10 Issue Special1/2010*, 217-220
- [102] VDG-Merkblatt P27: Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der granulometrischen Kennwerte, 1999 Oktober

SAJÁT KÖZLEMÉNYEK A TÉMÁBAN

Dargai V., Varga L.: Investigation of the Granulometric and Mechanical Properties of Inorganic Used Sand, *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 5. (2020). No. 2., 302-308. oldal*

I. Vasková, L. Varga, I. Prass, V. Dargai, M. Conev, M. Hrubovčáková, M. Bartošová, B. Bul'ko, P. Demeter: Examination of Behavior from Selected Foundry Sands with Alkali Silicate-Based Inorganic Binders c. cikk. *Metals* 2020, 10, 235

Dargai V., Varga L. Kulcsár T.: A vízüveges homokmagok maradó szilárdságát befolyásoló paraméterek vizsgálata c. kiadvány cikk, *XXI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia*, Nagybánya, 2019.05.9-12.

V. Dargai, H. Polzin, L. Varga: Die Bestimmung der granulometrischen Eigenschaften von Gießereisanden mittels dynamischer Bildanalyse c. cikk *Gießerei-Praxis* 4 2018 S.19-22.

Dargai V., Varga L. Az előállítási paraméterek hatása a szilárdsági tulajdonságokra vízüveges kötőanyagrendszer alkalmazásával c. konferencia kiadvány 20. *Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia* 2018

Budavári I., Bejczy B., Dargai V., Varga L.: Szervetlen kötésű vízüveges maghomokkeverékek meleg deformációs vizsgálatai, c. kiadvány cikk, *19. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia*, Kolozsvár, 2017.03.30 -2017.04.01.

Dargai V., Varga L.: Szervetlen kötőanyagrendszerű homokkeverékek szilárdsági tulajdonságainak vizsgálata, c. kiadvány cikk, *19. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia* Kolozsvár, 2017.03.30 -2017.04.01.

Budavári I., Dargai V., Varga L.: Vízüveges maghomokkeverékek meleg deformációs tulajdonságainak vizsgálata "Hot - distortion" készülékkel, kiadvány cikk, *Bányászati, és kohászati lapok - Kohászat* 2017/5

Dargai V., H. Polzin, Varga L.: The determination of the properties of foundry sands with dynamic spectral analysis c. cikk *Materials Science and Engineering*, Miskolc, 42:(1) pp. 21-28. (2017)

Dargai V., Varga L.: The Examination of mechanical properties of inorganic core sands c. cikk XXXI. *microCAD*, Miskolc 2017

Dargai V., Varga L.: Az öntödei homokok granulometriai tulajdonságainak meghatározása dinamikus képelemzéssel c. cikk *Bányászati és kohászati lapok* 149. évfolyam 2016/5-6

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek Dr. Varga Lászlónak a szakmai iránymutatásáért a doktoranduszi éveim alatt, ill., hogy a disszertáció készítése során folyamatosan a segítségemre volt és mindvégig támogatott. Köszönöm továbbá a Miskolci Egyetem Öntészeti Intézet oktatóinak és munkatársainak segítségét, kiváltképp Dr. Kulcsár Tibornak a magas színvonalú szakmai segítségért.

Köszönetemet szeretném kifejezni a NEMAK Linz GmbH-nak a szakmai támogatásért.

Köszönettel tartozom Dr. Kristály Ferencnek és Kovács Árpádnak a szakmai segítségért és konzultációért.

Köszönetemet szeretném kifejezni még Dr. Kaptay György professzor úrnak a disszertációmmal kapcsolatban nyújtott segítségéért.

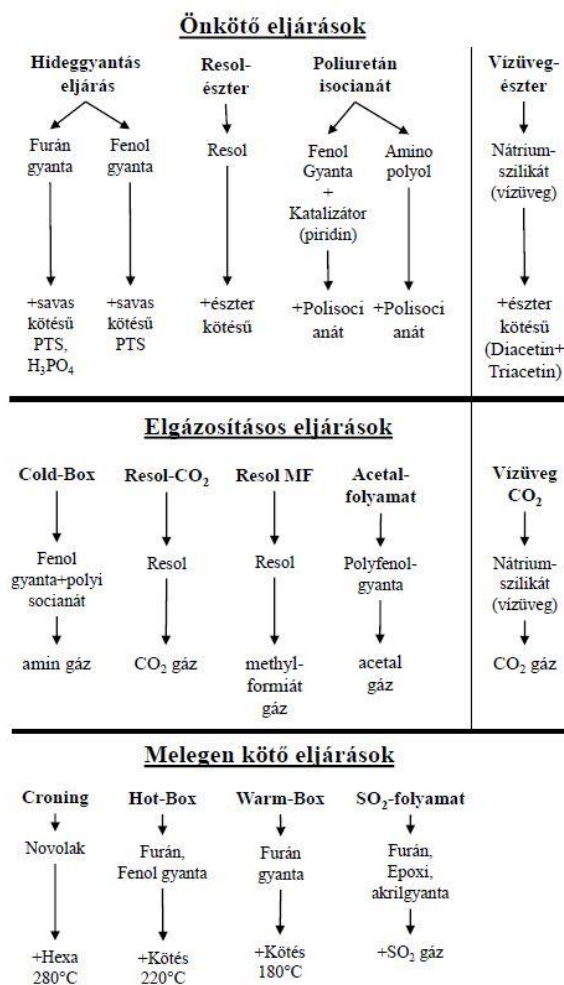
Köszönet illeti természetesen a családomat és a barátaimat is a támogatásért és a megértésért.

Mellékletek

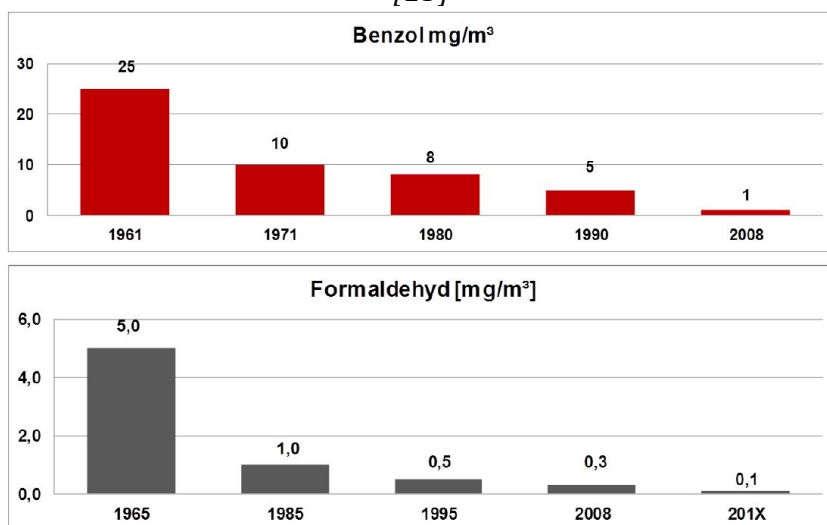
M.1. Speciális homokok a formák és a magok gyártásához [12] [13]

Alumínium-szilikát	Anyag típus
J-homok	Természetes ásványkeverék
Kerphalite KF	Természetes ásvány
Nehézásvány	
Kromit	Természetes ásvány
Cirkon	Természetes ásvány
R-homok	Természetes ásvány
Műszaki kerámiák	
Naigai Cerabeads™	Szinterezett kerámia
Samott	Szinterezett kerámia
M-homok	Oxid kerámia
Alodur RBT 9	Oxid kerámia
Bauxit homok	Oxid kerámia
SiC	Nem oxid kerámia

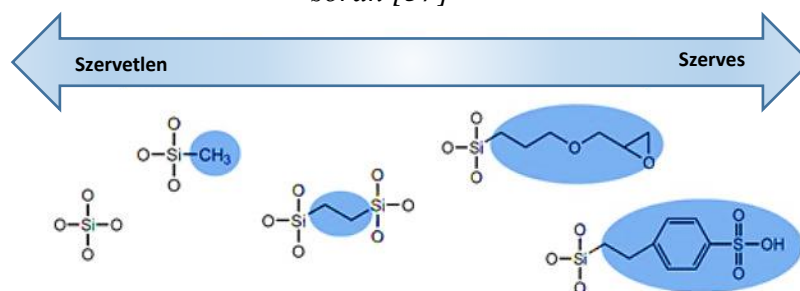
M.2 A kémiai kötésű kötőanyagok és a kapcsolódó maggyártási technológiák [1]



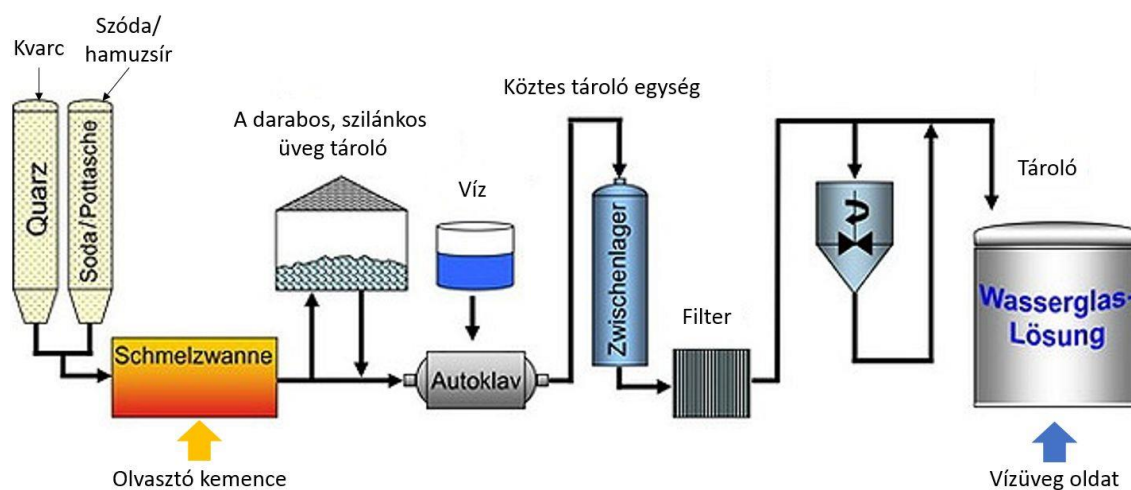
M.3. Az évek során változó benzol és formaldehid tartalom megengedett értékhatára [21]



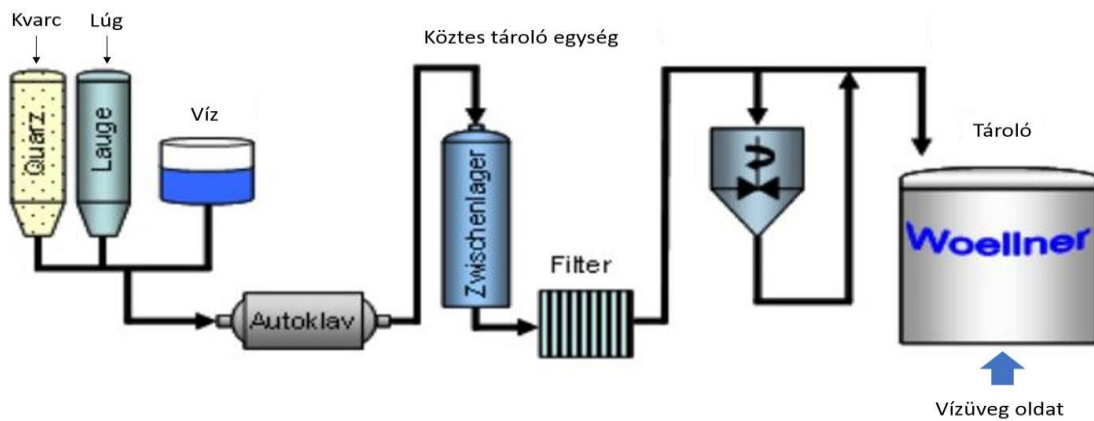
M.4. Az organo-szilikátok felépítése a szerves és a szervetlen vegyületek beépülése során [37]



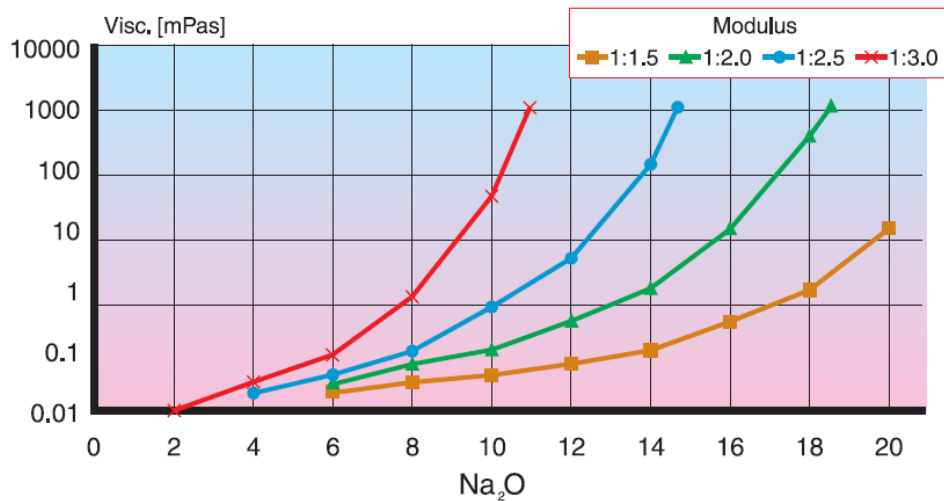
M.5. Az olvasztási eljárás folyamata a Wöllner GmbH-nál [39]



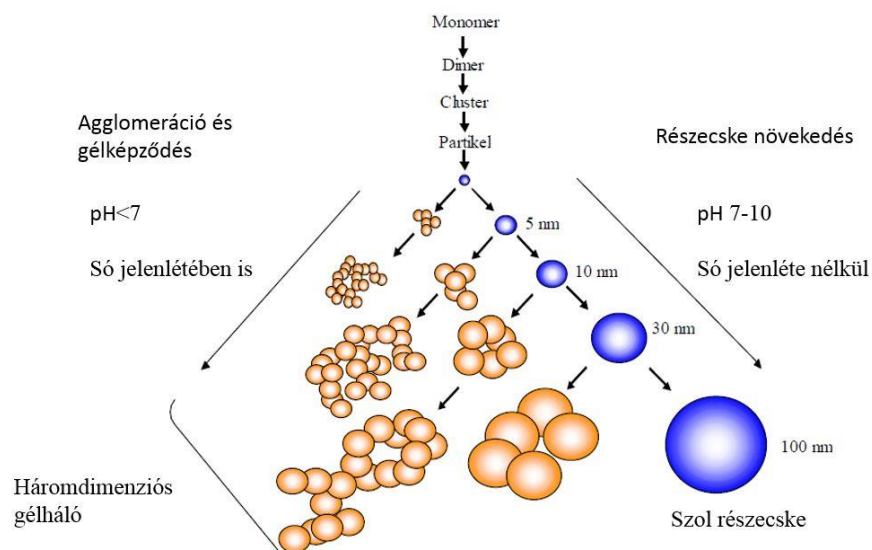
M.6. A hidrotermális folyamat sematikus ábrája a Wöllner GmbH-nál [39]



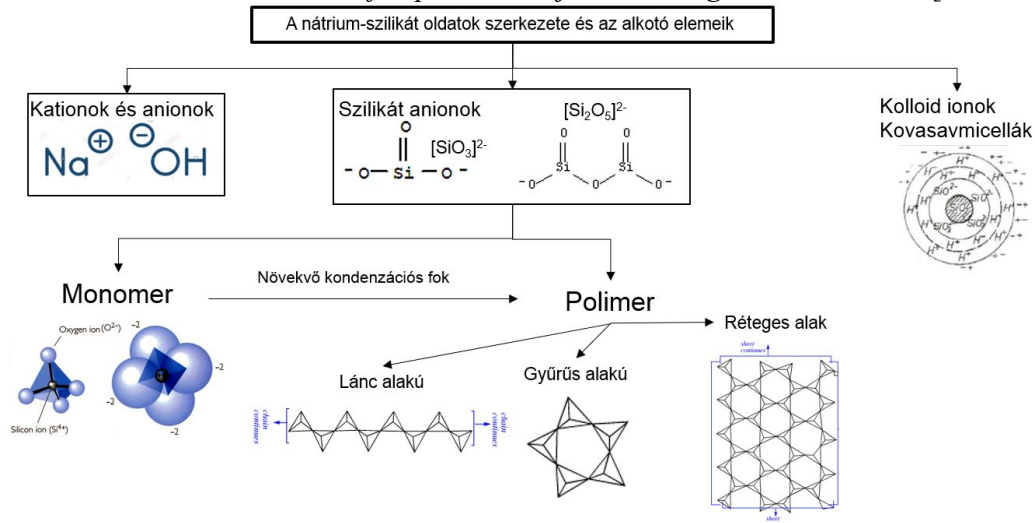
M.7. A vízüveg oldatok viszkozitásának összefüggése a szilárdanyag-tartalommal adott modul esetében [41]



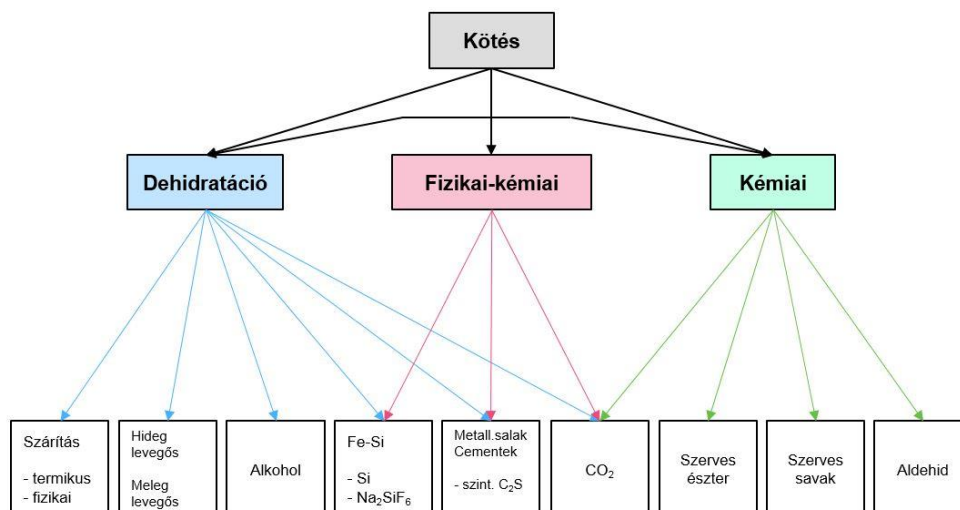
M.8. A vízüveg polimerizációjának lehetséges kimenete savas, ill. lúgos közegben Iler és Brinker szerint [36] [42]



M.9. A nátrium-szilikát felépítési sémája Flemming és Tilch szerint [15]



M.10. A vízüveges kötőanyagok kikeményedésének a típusai [46]



M.11. A szervesen kötőanyag bázisú maggyártási technológiák csoportosítása [47]

Hidegen önkötő maggyártási technológia	Gázélarasztással történő maggyártási technológia	Melegen kötő maggyártási technológia
Cementes eljárás	Vízüveg- CO_2 -eljárás	Vízüveges kötőanyag szárítással kombinálva
Vízüveg-észter-eljárás	Vízüveg meleg levegős eljárás	AWB [®] -eljárás
Maggyártási technológia geopolimer kötőanyaggal		Inotec [®] -eljárás
		Cordis [®] -eljárás
		Sóköötőanyag rendszerek
		Precíziós öntészet, kovasav gél kötőanyag

M.12. A vízüveg-CO₂-eljárás alkalmazásának az előnyei és hátrányai [15] [36] [48]

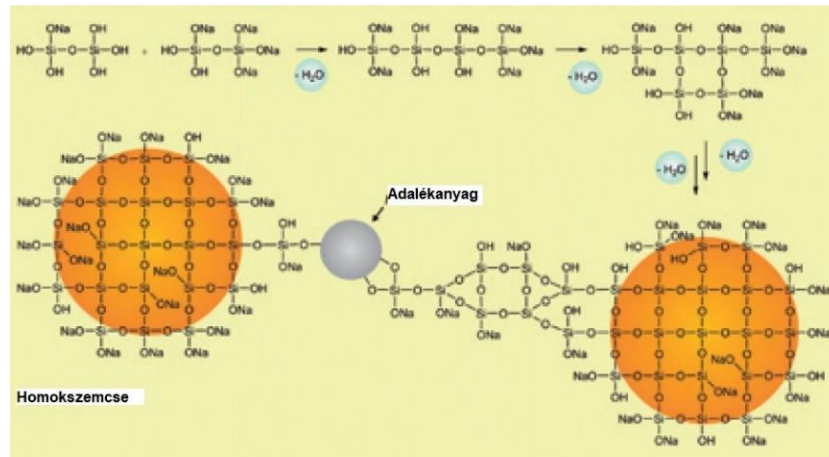
A vízüveg-CO ₂ -eljárás előnyei	A vízüveg-CO ₂ -eljárás hátrányai
Magok előállítása szobahőmérsékleten	A formázókeverék rossz folyási tulajdonságai miatt alkalmatlan a vékony falú, komplikált magok készítésére.
Egyedi magok, kis és nagy szériás öntvénygyártásra alkalmas	A magok kezdő és végszilárdsága alacsony
Nincs szagterhelés és emisszió kibocsátás	A magok merevek, nagy a repedésre való hajlam
	a magok tárolhatósága korlátozott a magok nedvességfelvétele miatt
	Rossz üríthetőségi tulajdonságokkal rendelkeznek.
	A használt homok regenerálása problémás.

M.13. A vízüveg-észter-eljárás alkalmazásának előnyei és hátrányai [15] [36]

A vízüveg-észteres eljárás előnyei	A vízüveg-észteres eljárás hátrányai
Nincs szagterhelés a forma- és maggyártás során, ill. az öntés közben	A magok/formák felülete a koptató hatással szemben rossz ellenálló-képességgel rendelkezik
A formázókeverék jól formázható	A magok/formák érzékenyek a nedvességre, ezáltal korlátozott ideig tárolhatók
Környezetbarát	A vizes alapú fekecsék nem alkalmazhatók, ill. azonnali szárítás szükséges
Alacsony kötőanyag költség	Rossz üríthetőségi tulajdonságokkal rendelkeznek
	Rossz regenerálhatóság, alacsony újra-felhasználhatóság
	A lúgossága miatt más formázóanyagokkal korlátozott a kompatibilitása

M.14. Az AWB®-eljárás folyamat ábrája [17]**M.15.** Az Inotec® kötőanyaggal történő maggyártási folyamat sematikus ábrája [17]

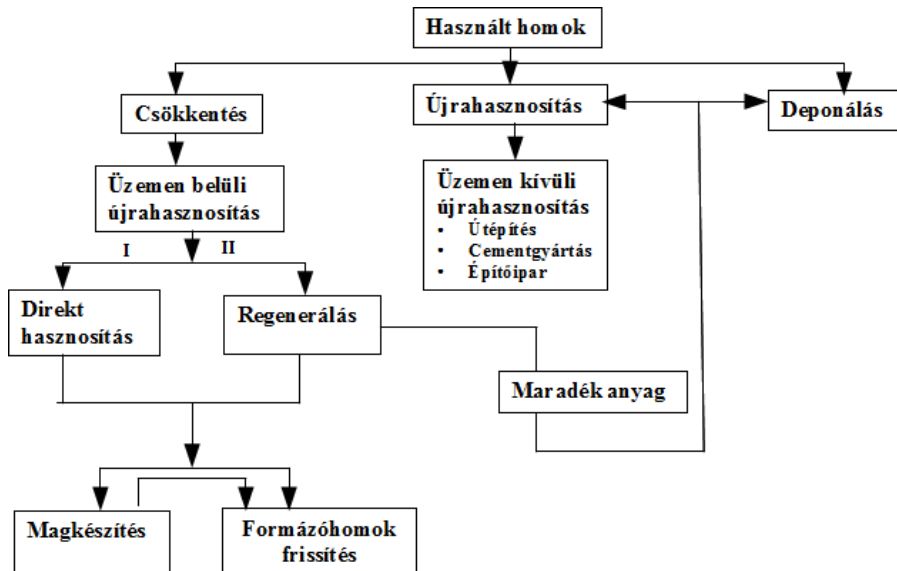
M.16. Az adalékanyag beépülése a szilikáthálóba [55]



M.17. A Cordis® kötőanyagrendszerrel történő maggyártás sematikus ábrája [17]



M.18. A használt homok újra-hasznosításának a lehetőségei [59]



M.19. A használt homok körfolyamata az ürítést követően [60]**M.20. A mono és a kevert kötőanyagrendszerek regenerálása [60]**

	Egyszerű mechanikus rendszer	Mechanikus		Nedves regenerálás	Termikus regenerálás	Kombinált regenerálás
		Órlés	Pneumatikus sűrűlódás			
Mono rendszerek						
Hidegen kötő	X	X	X	X	X	0
Cold-Box, Hot-Box, Croning	0	X	X	0	X	0
Szilikát (CO ₂ , észter)	0	0	X	X	0	0
Bentonitos (primér)	X	0	0	0	0	0
Bentonitos (szekundér)	0	X	X	X	0	0
Kevert rendszerek						
Szerves keverék rendszer	0	X	X	0	X	0
Keverék rendszer bentonit+szerves	0	X	X	X	0	X
Megjegyzés: X=alkalmazható; 0=nem alkalmazható						

M.21. A regenerálási technológiák szerves mono rendszerekhez [60]

Formázóanyag típus	Regenerálási technológia	Regenerálás főelemei	Alkalmazás	Peremfeltételek	Teljesítmény (t/h)
Szerves mono rendszerek					
Bentonit	Mechanikus	Centrifugális dörzsölés	A bentonit körforgáshoz frissítő homok	Előszárítás szükséges Finom frakció felhasználása	0,75
	Pneumatikus	Pneumatikus dörzsölés			
Vízüveges formázóanyag	Mechanikus	Centrifugális dörzsölés	Csak mag- és formagyártáshoz a vízüveges eljárással	A kötőanyaghidak elridegítése 200°C-on	0,5
	Pneumatikus	Pneumatikus dörzsölés			
	Termikus	Forgó kemence, Fluid ágy			

M.22. Regenerálási technológiák szerves mono rendszerekre [60]

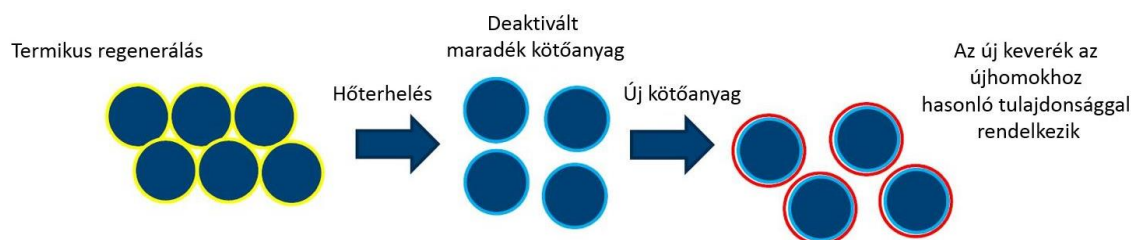
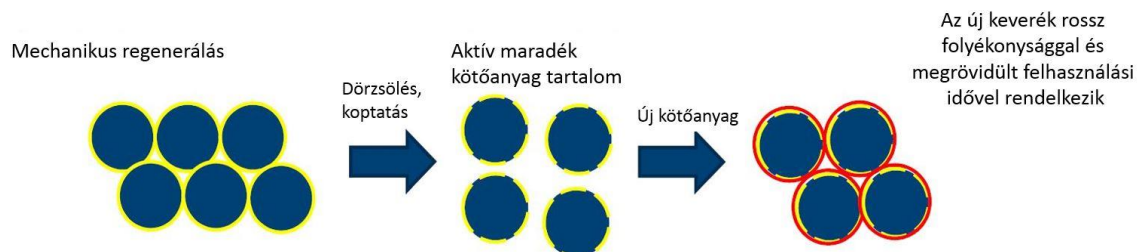
Formázóanyag típus	Regenerálási technológia	Regenerálás főelemei	Alkalmazás	Peremfeltételek	Teljesítmény (t/h)
Szerves mono rendszer					
Hideg műgyantás formázóanyag	Mechanikus	Dörzsölés, ütés	Hideg műgyantás formagyártás	Mechanikus: a kötőanyaghidak az öntés során elridegülnek	1,5
	Termikus	Forgókemence fluid ágy	Újhomok helyettesítése a hideg műgyantás magokhoz		
Cold-Box, SO ₂ , Hot-Box, Croning	Mechanikus	Pneumatikus dörzsölés, fluid ágyas dörzsölés	Újhomok helyettesítés a maggyártásban	Mechanikus: a kötőanyaghidak az öntés során elridegülnek	75
	Termikus	Forgó kemence, Fluid ágy			

M.23. A mechanikus regenerálás alkalmazásának az előnye és hátránya

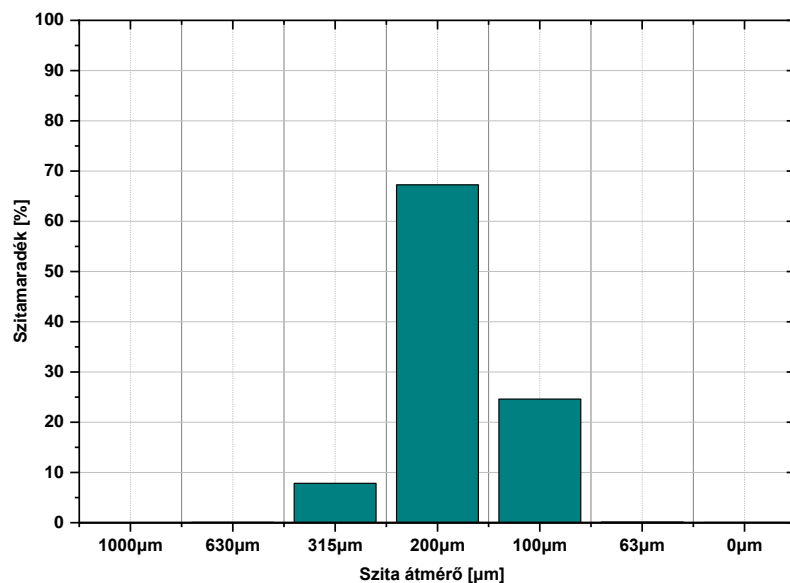
Előny	Hátrány
Kisebberuházási költségek	A maradék kötőanyag feldúsulhat, amely tárolhatósági problémákat okozhat
Rugalmas üzemű	Kisebberuházási költségek
	Roszbabb a regenerátum minősége
	Nagyobb arányban szükséges az újhomok adagolása a magok/formák készítése során

M.24. A termikus-mechanikus regenerálás alkalmazásának előnye és hátránya

Előny	Hátrány
Magasabb a regenerátum kihozatal	Magasabb beruházási és üzemi költségek
Jobb a regenerátum minősége	Folyamatos üzemű és kevés beavatkozási és változtatási lehetőség
A keletkező porfrakció és egyéb leválasztott anyagok semlegesek, ezáltal deponálhatók	Több hulladékanyag termelődik (por), amit nem lehet felhasználni

M.25. A termikus regenerálás során a vízüveges használt homok felületén lévő maradék kötőanyag deaktiválható [20]**M.26. A mechanikus regenerálás során a homokszemcsék felületén aktív maradék kötőanyag található [20]**

M.27. Az SH34-es alaphomok szemcseméret eloszlása oszlopdiaagramban ábrázolva



M.28. Az SH34 kvarchomokra jellemző tulajdonságok [82]

Tulajdonság	Érték
Sűrűség	2,65t/m ³
Átlagos szemcsenagyság	0,24mm
AFS-szám	56
Izzítási veszteség	<0,3%
Szinterelési hajlam kezdete	~1420°C

M.29. A vizsgálataimhoz alkalmazott vízüveges kötőanyag tulajdonságai [83]

Tulajdonság	Érték
Sűrűség	1,4-1,5g/cm ³ (20°C-on)
pH-érték	12-13 (20°C-on)
Viszkozitás	25-50mPas (25°C-on)

M.30. A szitaanalízishez alkalmazott szabványos szitasor

Szabványos szitasor
1000µm
630µm
315µm
200µm
100µm
63µm

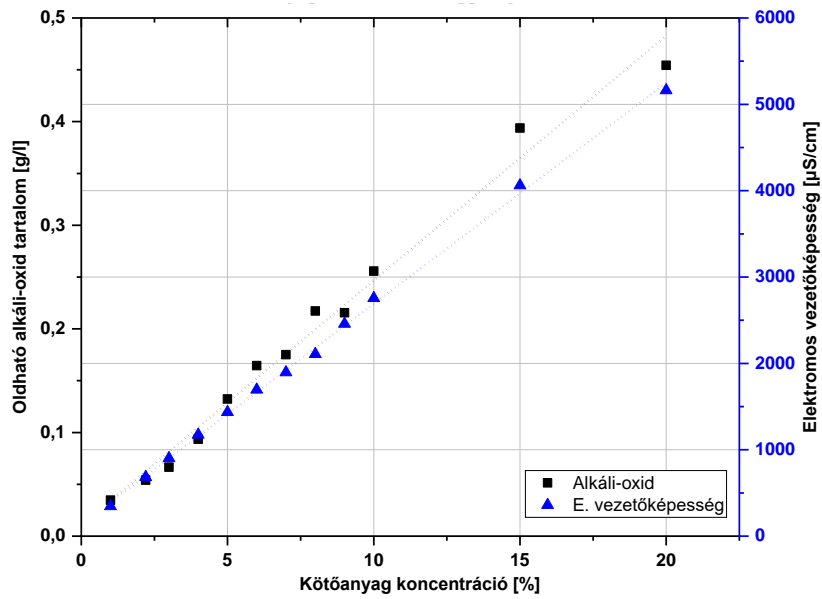
M.31. A szárított vízüveg minta vizsgálatához alkalmazott hőmérsékletek

A vizsgált hőmérséklet tartományok
25°C
50°C
105°C
150°C
210°C
300°C
400°C
500°C
600°C
700°C
Visszahűtést követően 25°C-on

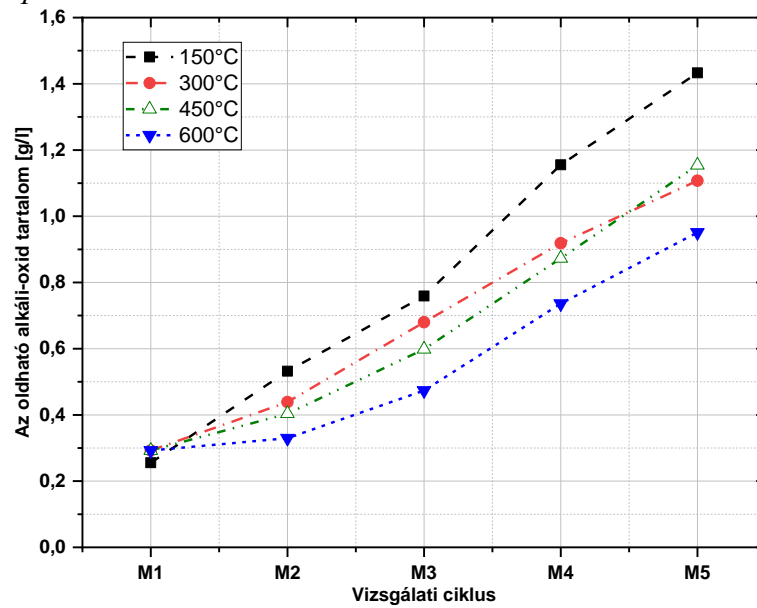
M.32. A vízüveg alkotóelemeinek meghatározására alkalmas minősítő módszerek

Minősítő módszer	Előny	Hátrány
Sav-bázis titrálás	<ul style="list-style-type: none"> – Szabadalmaztatott módszer – Viszonylag gyors – Egyszerű mérési módszer (titráló berendezés alkalmazása!) – SiO₂ meghatározható 	<ul style="list-style-type: none"> – Teljes alkáli tartalom mérése anélkül, hogy ismernénk a vízüvegben található, különböző alkáli komponensek mennyiségét is – Költséges beruházás – Megfelelő képzettségű szakember szükséges
AAS	<ul style="list-style-type: none"> – Külön meghatározható a vízüvegben található különböző alkáli komponensek mennyisége – Gyors és egyszerű vizsgálati módszer 	<ul style="list-style-type: none"> – Költséges beruházás – SiO₂ nem határozható meg – Gyakori kalibráció szükséges – Megfelelő képzettségű szakember szükséges
Elektromos vezetőképesség	<ul style="list-style-type: none"> – Gyors – Egyszerű – Bárki használhatja 	<ul style="list-style-type: none"> – Pontatlan – Olcsó műszer – Gyakori kalibráció szükséges

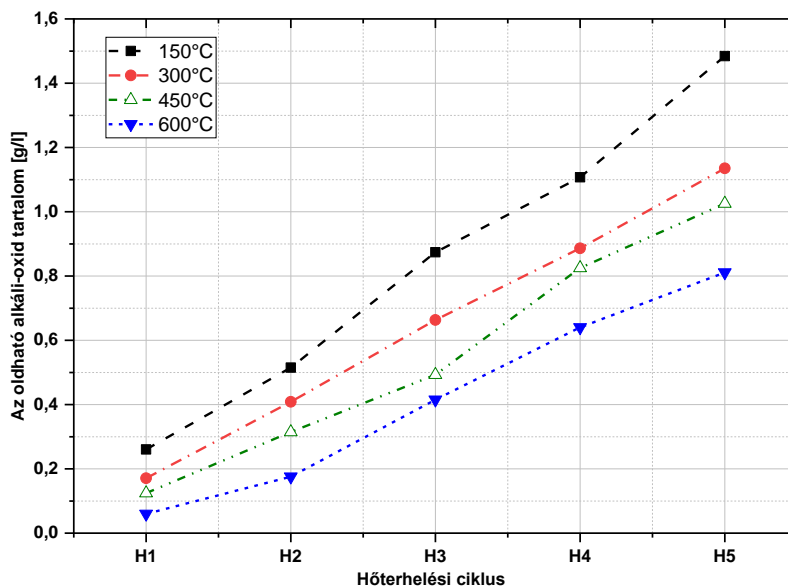
M.33. Az elektromos vezetőképesség és az oldható alkáli-oxid tartalom változása a kötőanyag koncentráció függvényében



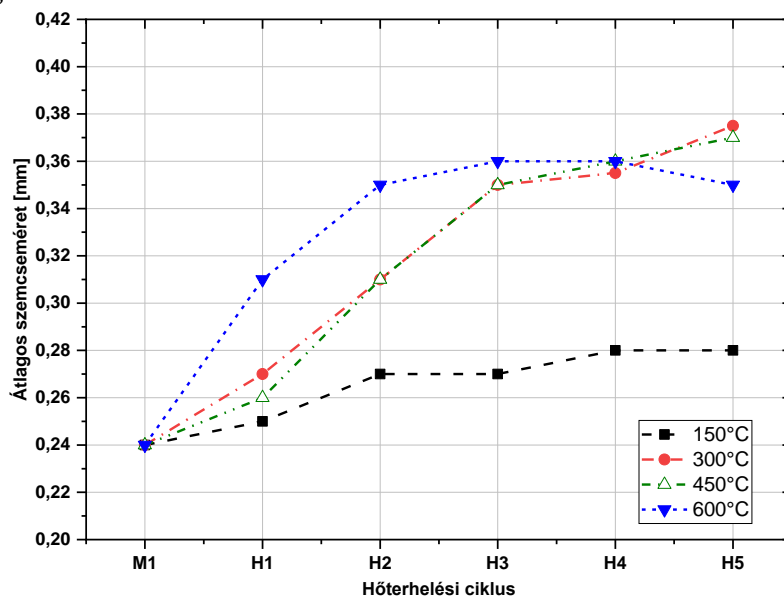
M.34. A vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatetek oldható alkáli-oxid tartalmának a változása



M.35. A hőterhelt vízüveges homokkeverék oldható alkáli-oxid tartalmának a változása a hőterhelési hőmérséklet és a hőterhelési ciklus során



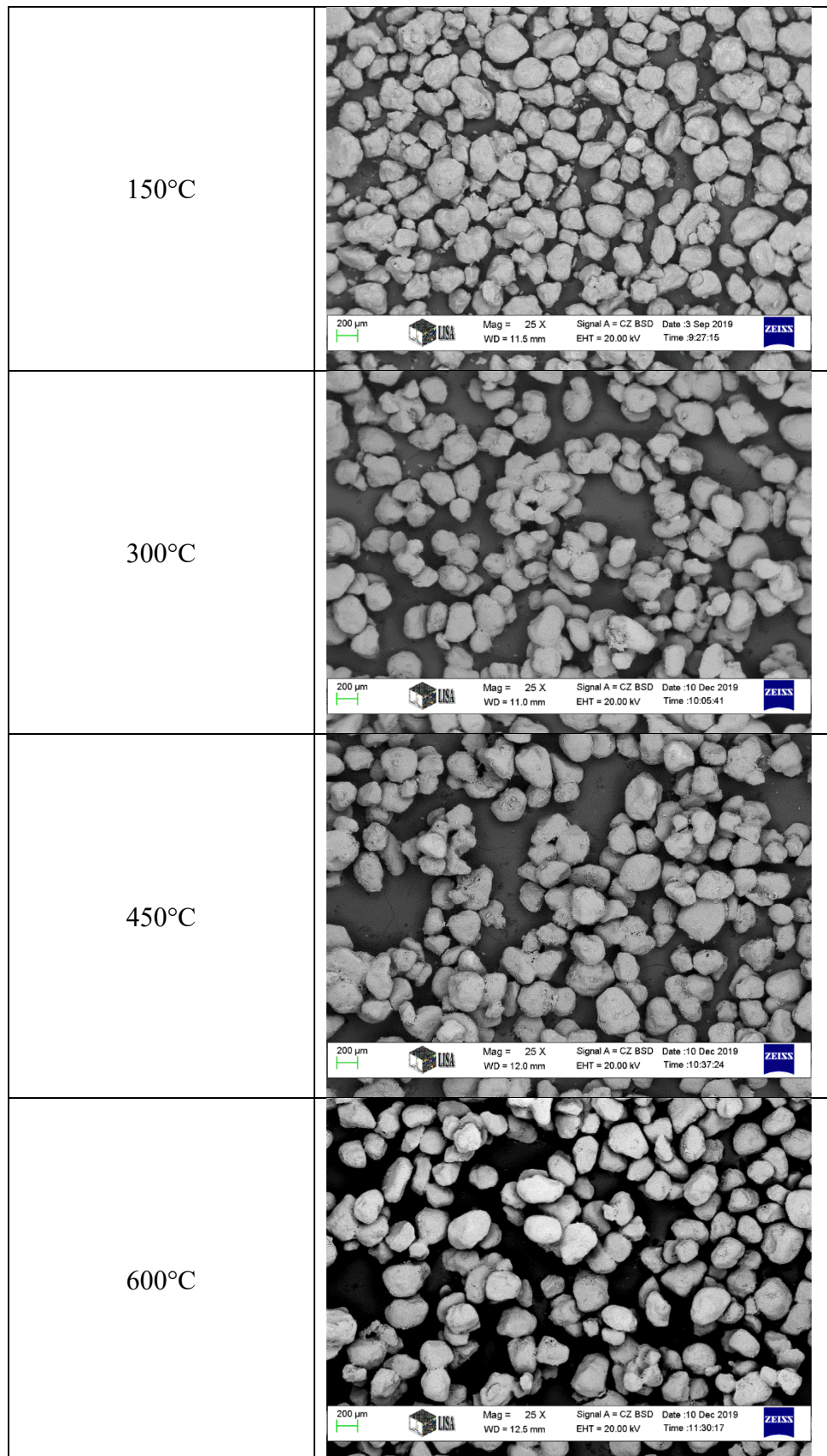
M.36. A hőterhelt vízüveges homokkeverék hőterhelési ciklusok során bekövetkező átlagos szemcseméret változása a különböző hőterhelési hőmérsékleteken



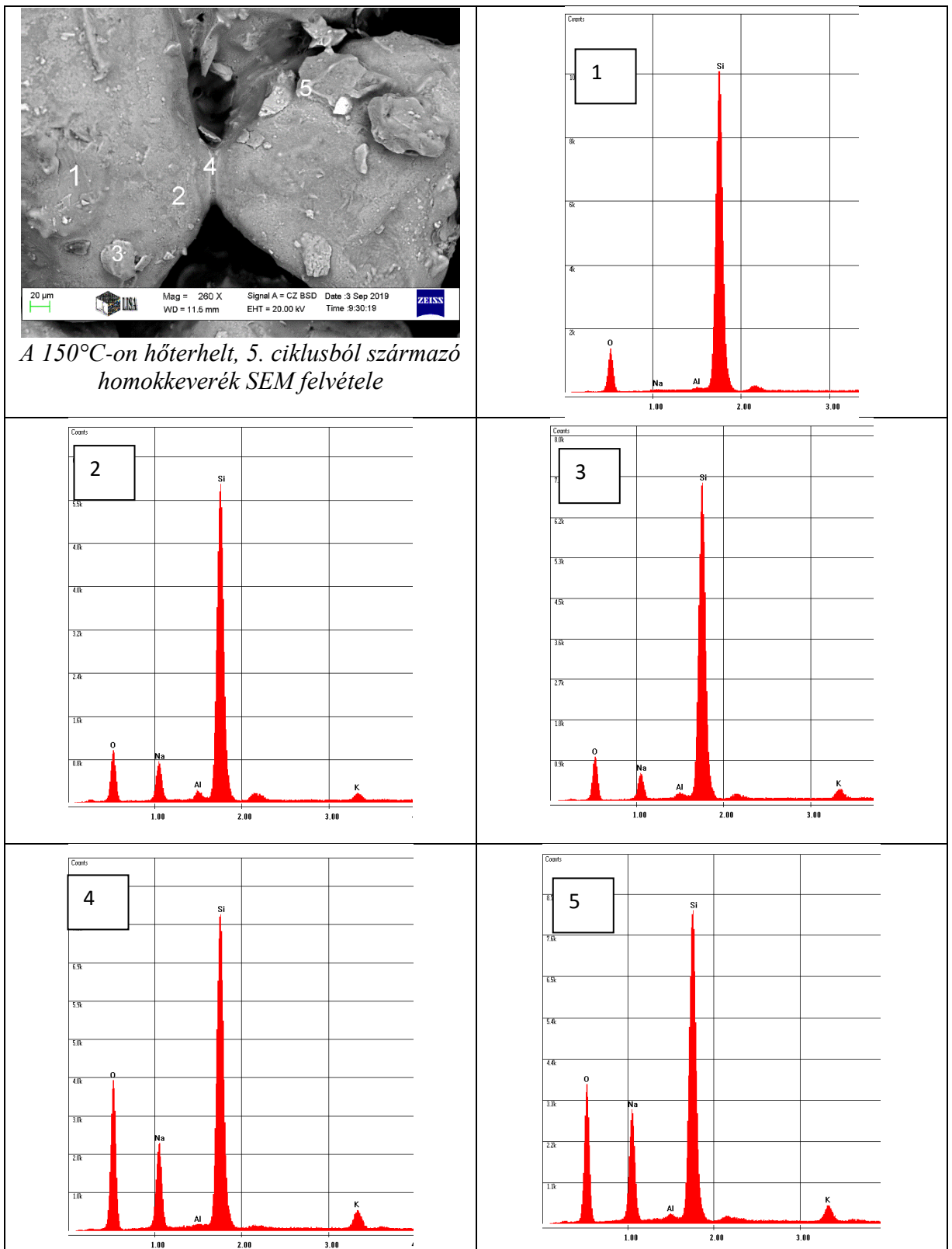
M.37. A hőterhelt homokkeverék átlagos szemcseméret értékének változása az előző ciklus értékéhez képest

Hőmérséklet	1.ciklus	2.ciklus	3.ciklus	4.ciklus	5.ciklus
150°C	4,0%	7,4%	0,0%	3,5%	0,0%
300°C	11,1%	12,9%	11,4%	1,4%	5,33%
450°C	7,6%	16,1%	11,4%	2,7%	2,7%
600°C	22,5%	11,4%	2,7%	0,0%	-2,8%

M.38. A 150°C-on, 300°C-on, 450°C-on és 600°C-on hőterhelt 5. körből származó, hőterhelt homokkeverékek SEM felvételei

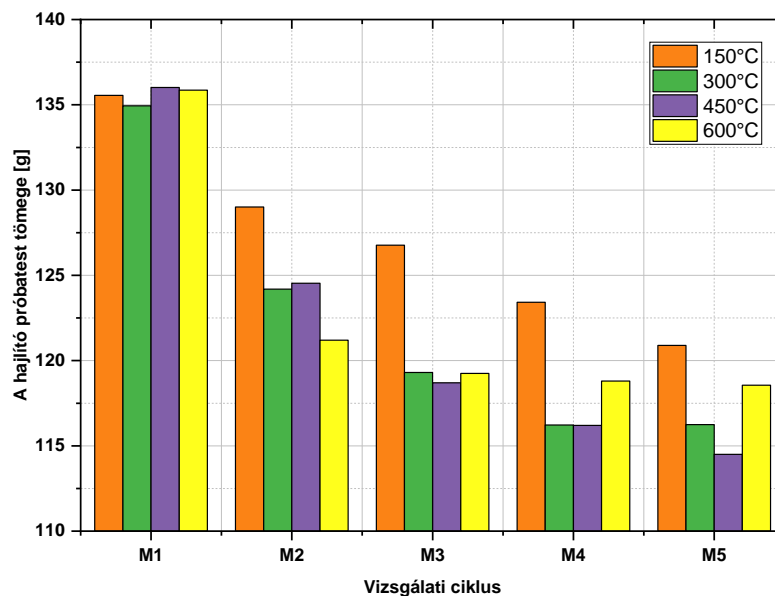
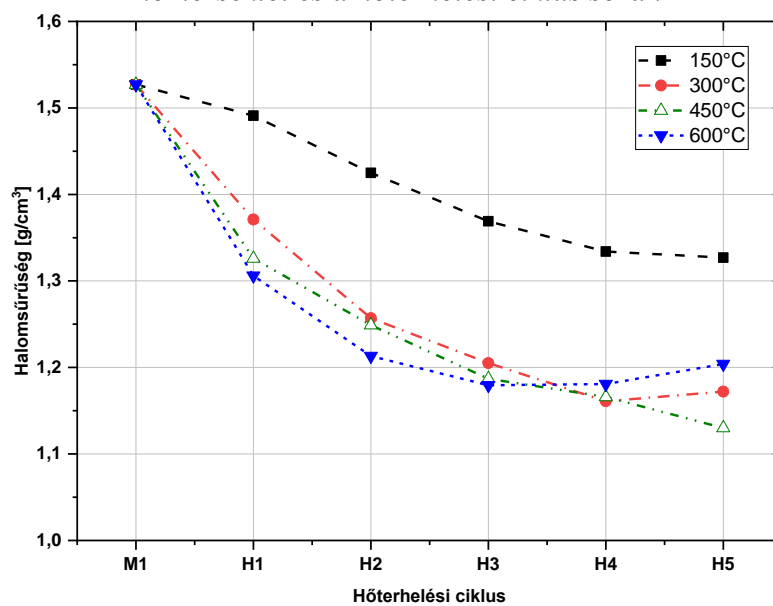


M.39. A 150°C-on hőterhelt, 5. cikusból származó homokkeverék EDAX analízise



M.40. Az oolitosodás mértéke [60]

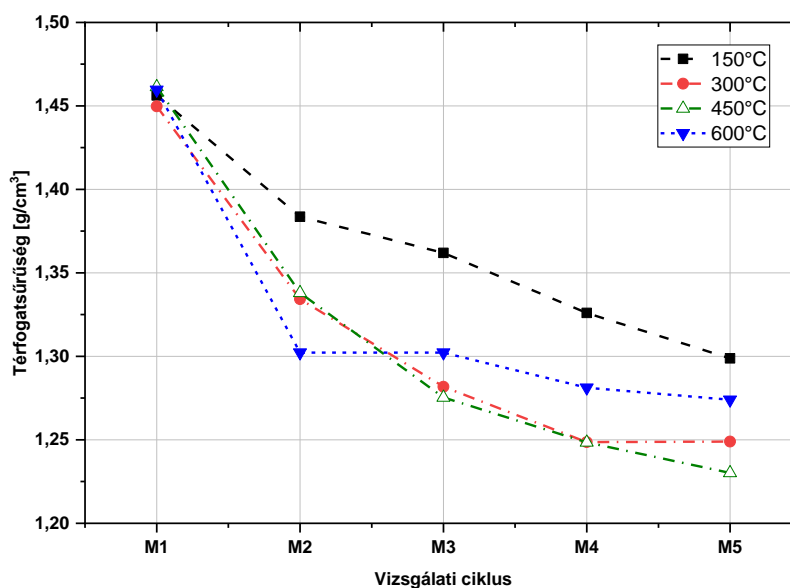
Normál próbatesszt tömege	Oolitosodás mértéke
<135g	Erős oolitosodás, új homok hozzáadás növekszik
135-140g	Közepes oolitosodás, kevesebb újhomok hozzáadás szükséges
140-145g	Közepestől-alacsonyig, optimális formázóanyag összetétel
>145g	Nincs oolitosodás, újhomok hozzáadása lecsökken

M.41. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből készített hajlító próbatessztok tömegének vizsgálati ciklusonként bekövetkező változása**M.42. A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének változása a hőterhelési hőmérséklet és a hőterhelési ciklus során**

M.43. A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének ciklusonkénti változása az előző ciklushoz képest

Hőmérséklet	1.ciklus	2.ciklus	3.ciklus	4.ciklus	5.ciklus
150°C	-2%	-4%	-4%	-3%	-1%
300°C	-10%	-8%	-4%	-4%	1%
450°C	-13%	-6%	-5%	-2%	-3%
600°C	-15%	-7%	-3%	0,1%	2%

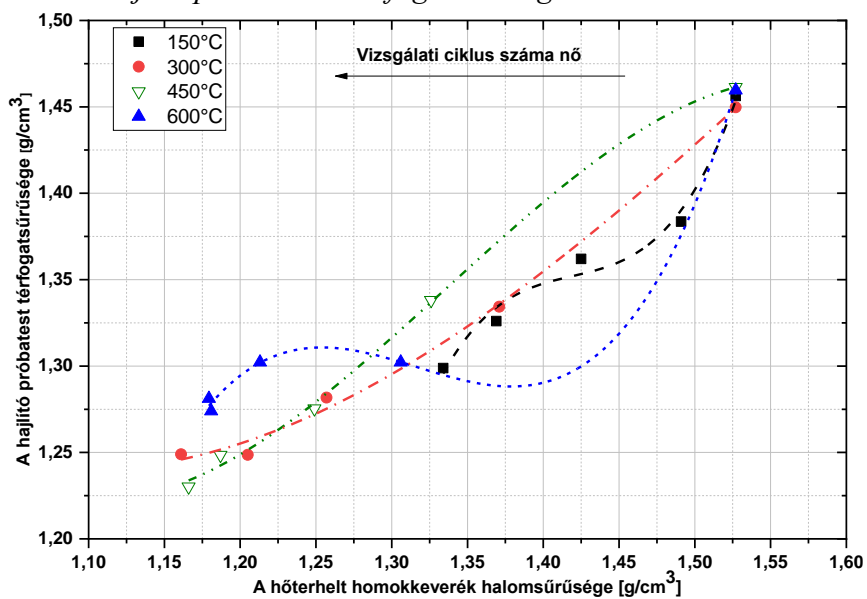
M.44. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos előállítási paraméterekkel előállított hajlító próbatestek átlagos térfogatsűrűség értékének a változása



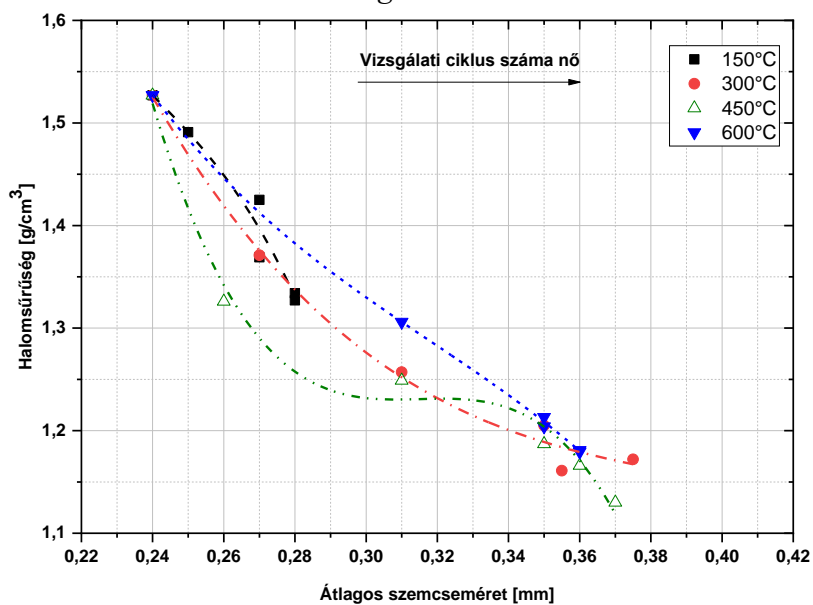
M.45. A hőterhelt vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének ciklusonkénti változása az előző ciklushoz képest

Hőmérséklet	1.ciklus	2.ciklus	3.ciklus	4.ciklus
150°C	-5%	-2%	-3%	-2%
300°C	-8%	-4%	-3%	0%
450°C	-8,4%	-5%	-2%	-2%
600°C	-11%	0%	-2%	-0,6%

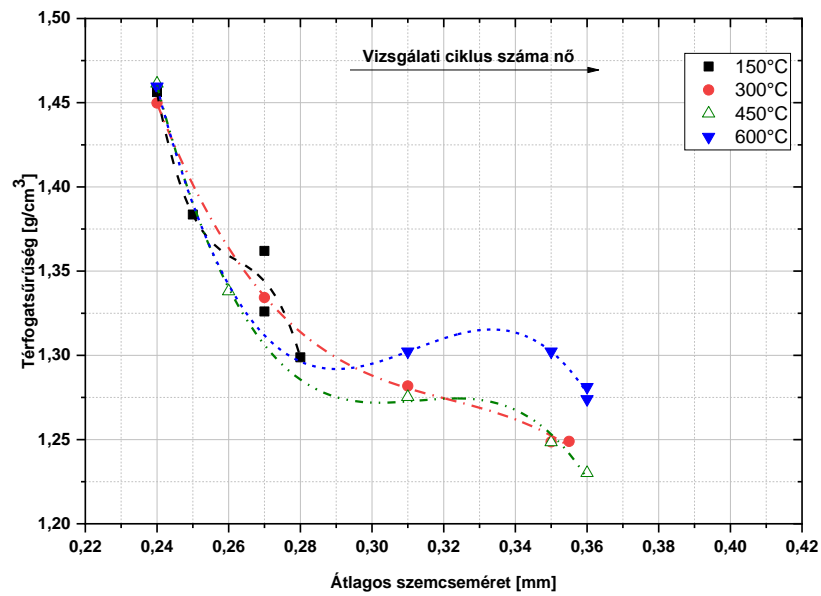
M.46. A hőterhelt vízüveges homokkeverék halomsűrűségének és az ebből készített hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a változása



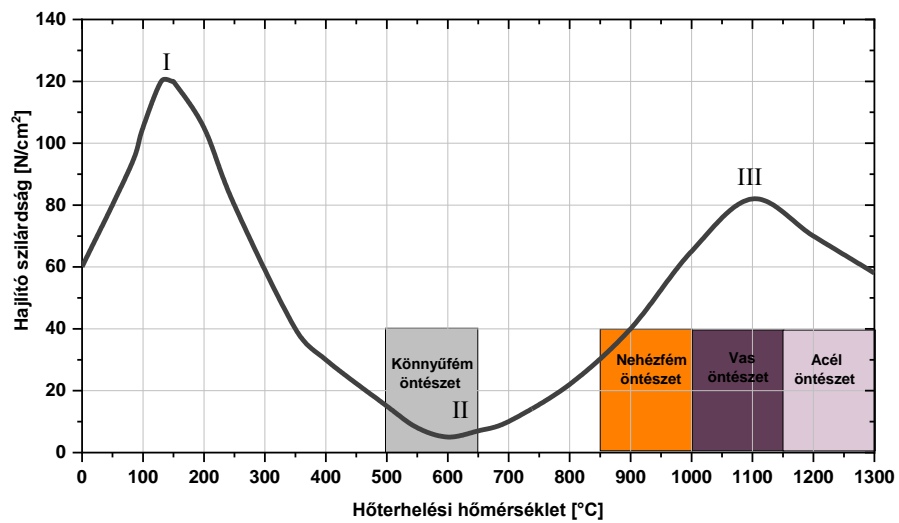
M.47. A hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és a halomsűrűségének a változása



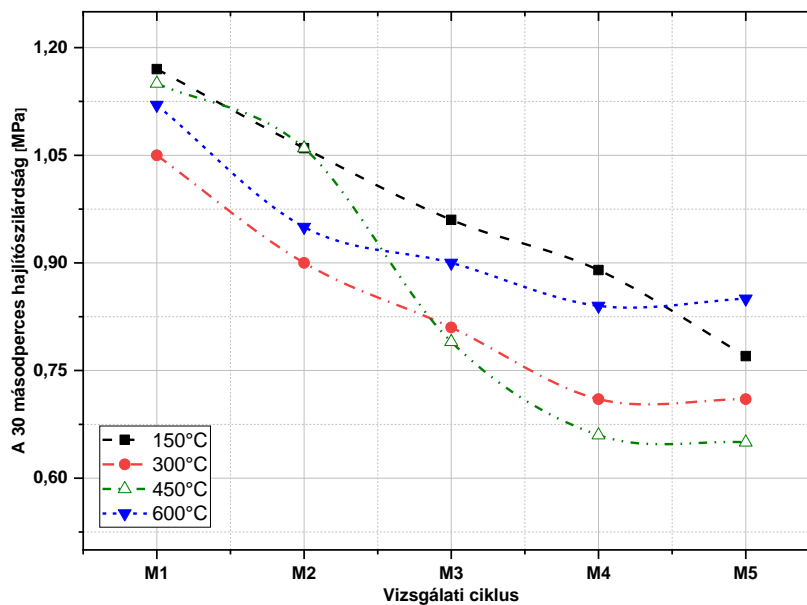
M.48. A hőterhelt vízüveges homokkeverék átlagos szemcseméretének és az ebből előállított hajlító próbatestek térfogatsűrűségének a változása



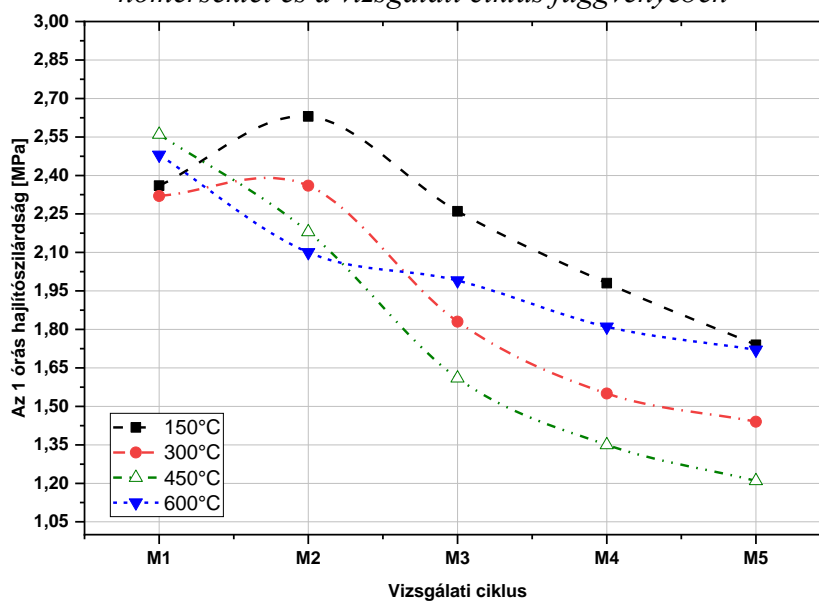
M.49. A vízüveg-CO₂-eljárással előállított hajlító próbatestek hőterhelését követően mért szilárdságváltozása [42]



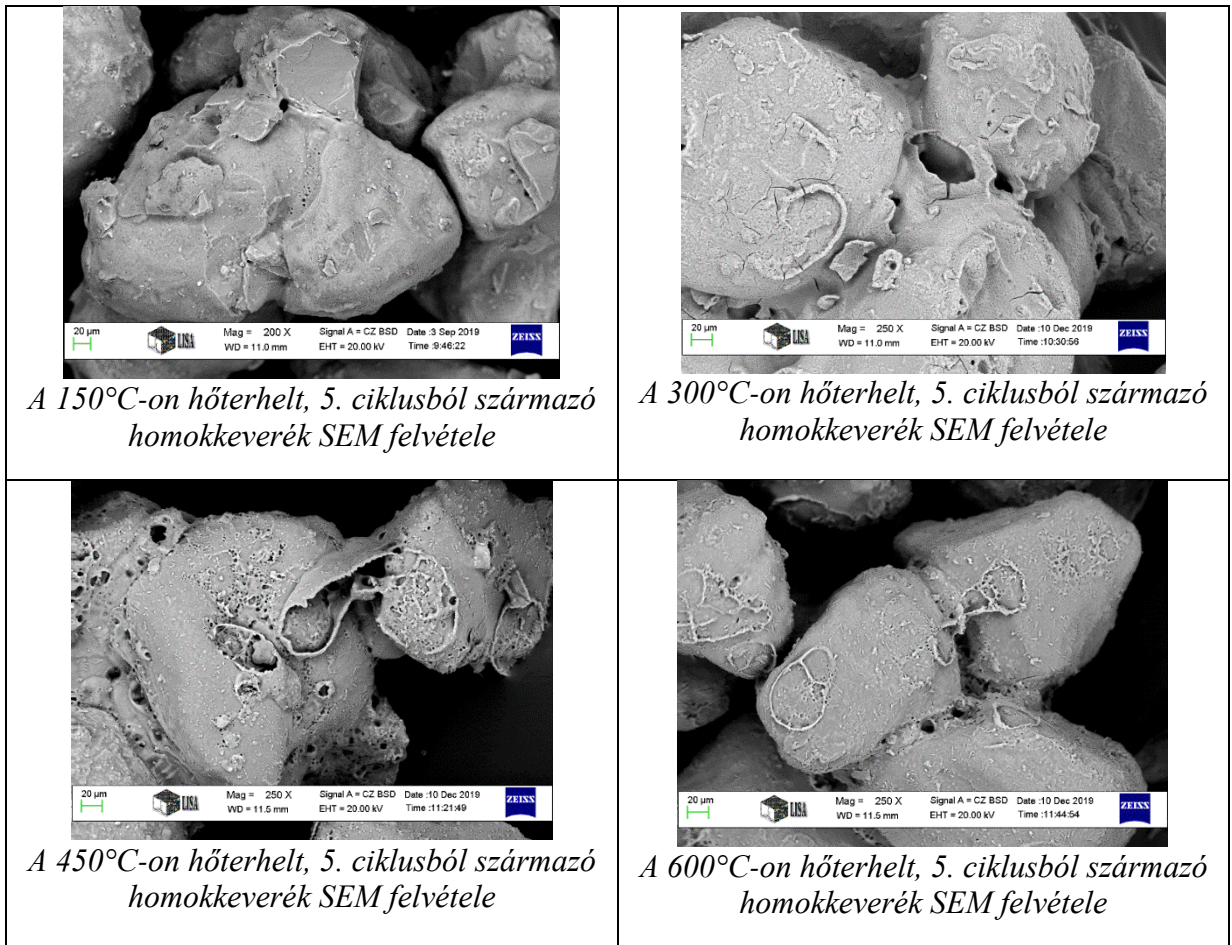
M.50. A hőterhelt víziüveges homokkeverékből előállított hajlító próbatetek 30 másodperces hajlítószilárdság értékének a változása a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus függvényében



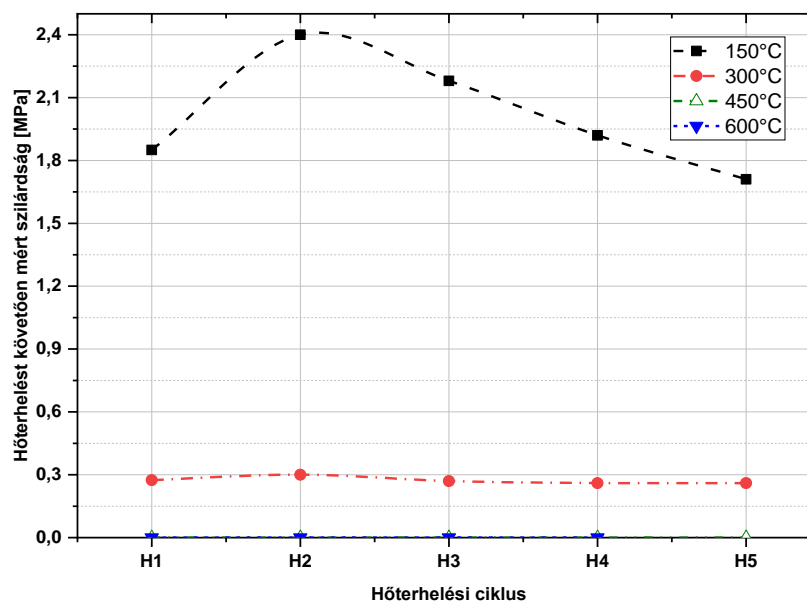
M.51. A hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatetek 1 órás tárolását követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása a hőterhelési hőmérséklet és a vizsgálati ciklus függvényében



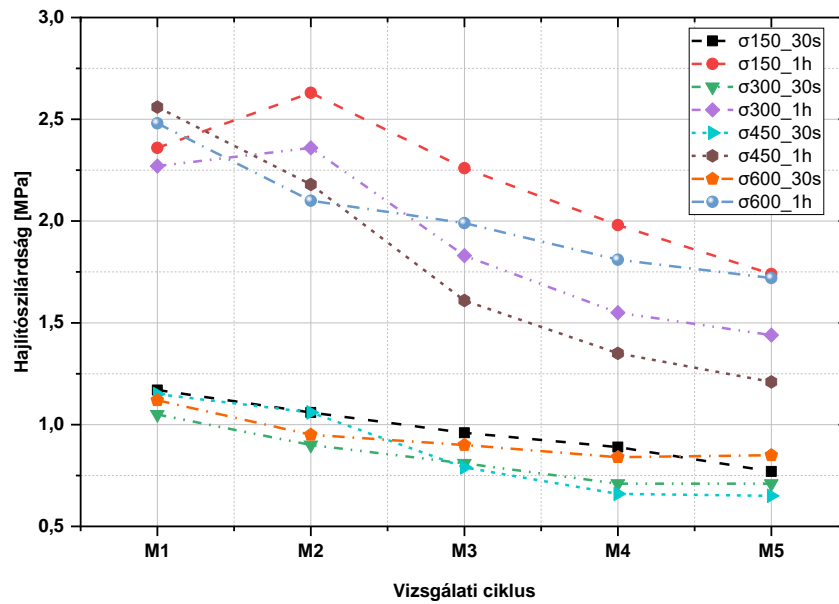
M.52. A 150°C-on, 300°C-on, 450°C-on és 600°C-on hőterhelt, 5. ciklusból származó homokkeverékek SEM felvétele



M.53. A hőterhelt homokkeverékből készített hajlító próbatestek egy órás hőterhelést követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása



M.54. A vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek 30 másodperces és az egy órás tárolást követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása



M.55. A vízüveges homokkeverékből azonos gyártási paraméterrel készített hajlító próbatestek egy órás tárolását és egy órás hőterhelését követően meghatározott hajlítószilárdság értékének a változása

