



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# VLIV VELIKOSTI ČÁSTIC ODPADNÍHO SKLA NA VLASTNOSTI ALKALICKY AKTIVOVANÝCH ALUMINOSILIKÁTOVÝCH KOMPOZITŮ

EFFECT OF GRAIN SIZE OF WASTE GLASS ON PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED  
ALUMINOSILICATE COMPOSITES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PATRIK BAYER, Ph.D.

BRNO 2019



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Václav Novák
<b>Název</b>	Vliv velikosti částic odpadního skla na vlastnosti alkalicky aktivovaných aluminosilikátových kompozitů
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Patrik Bayer, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2018
<b>Datum odevzdání</b>	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

1. T. Williamson , Maria C.G. Juenger: The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete. *Cement and Concrete Research* 83 (2016) 124–130
2. Jian-Xin Lu, Chi Sun Poon: Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials* 160 (2018) 399–407
3. H. Rashidian-Dezfouli a, P. R. Rangaraju: A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution. *Construction and Building Materials* 153 (2017) 996–1009
4. Maochieh Chi: Effects of modulus ratio and dosage of alkali-activated solution on the properties and micro-structural characteristics of alkali-activated fly ash mortars. *Construction and Building Materials* 99 (2015) 128–136
5. W. Wang, B. Chen, H. Wang , H. Chou: A study of the engineering properties of alkali-activated waste glass material (AAWGM). *Construction and Building Materials* 112 (2016) 962–969

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Provedte literární rešerši týkající se materiálů na bázi alkalicky aktivovaných aluminosilikátů. Zaměřte se především na kompozity s aluminosilikátovými prekurzory, struskou a popílkem, a jejich náhradu odpadním mletým sklem. Při zpracování tématu se věnujte mechanickým a chemickým vlastnostem a mikrostrukturu těchto kompozitů.

V experimentální části připravte kompozity s náhradou použitého aluminosilikátového prekurzoru mletým sklem o různé granulometrii. Použijte různé typy alkalických aktivátorů. Následně zjistěte mechanické vlastnosti a strukturu těchto kompozitů.

Pro vypracování diplomové práce použijte zadanou literaturu a doplňte ji o vlastní literární rešerši.

Rozsah práce 50 až 60 stran.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Patrik Bayer, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na použití odpadního skla s různou jemností mletí u alkalicky aktivovaných kompozitů, především na bázi strusky a popílku. Teoretická část se zabývá materiály, které jsou nejvíce využívány pro alkalickou aktivaci - struskou, popílkem a jejich kompozity s odpadním sklem. Teoretická část se dále zabývá alkalickou aktivací kompozitů z těchto materiálů a faktory, které ovlivňují mikrostrukturu a vlastnosti těchto kompozitů. V experimentální části byly připraveny kompozity ze strusky a popílku s náhradou odpadním sklem. Tyto kompozity poté byly podrobeny zkouškám mechanických vlastností a mikrostruktury a také jak různá jemnost mletí skla ovlivňuje tyto vlastnosti. Dále se bude posuzovat, zda je ekonomicky výhodné mletí skla na jemnější frakce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Alkalická aktivace, geopolymery, struska, popílek, odpadní sklo, jemnost mletí, mikrostruktura, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The diploma thesis is focused on the use of the waste glass with different fineness on alkali - activated composites, mainly based on slag and fly ash. The theoretical part is focused on materials that are most used for alkaline activation - slag, fly ash and their composites with waste glass. The theoretical part also deals with the alkaline activation of composites from these materials and the factors that influences the microstructure and properties of these composites. In the experimental part were prepared composites from slag and fly ash with a waste glass as substitute. These composites then have been examined on mechanical properties and microstructure, also how different fineness of glass influences these properties. Then it will be decided whether it is economically advantageous grinding waste glass to finer fractions

## **KEYWORDS**

Alkali activation, geopolymers, slag, fly ash, waste glass, fineness of milling, microstructure, mechanical properties

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Václav Novák *Vliv velikosti částic odpadního skla na vlastnosti alkalicky aktivovaných aluminosilikátových kompozitů*. Brno, 2019. 84 s., Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Patrik Bayer, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vliv velikosti částic odpadního skla na vlastnosti alkalicky aktivovaných aluminosilikátových kompozitů* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2019

---

Bc. Václav Novák

autor práce

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucím Ing. Patriku Bayerovi, Ph.D. za jeho odborné a pedagogické vedení v průběhu zpracování diplomové práce a za jeho cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům, přátelům a všem, kteří mě v průběhu studia podporovali.

## Obsah

Úvod .....	12
Teoretická část.....	13
1. Alkalická aktivace.....	13
2. Alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály .....	14
2.1. Popílek.....	14
2.2. Struska.....	18
3. Sklo.....	20
3.1. Historie výroby skla.....	20
3.2. Vlastnosti .....	21
3.3. Výroba.....	22
3.4. Dělení skel .....	22
3.4.1. Dle původu.....	22
3.4.2. Dle chemického složení .....	23
3.4.3. Dle způsobu výroby .....	23
3.5. Recyklace skel .....	23
4. Alkalická aktivace skel .....	24
5. Alkalicky aktivované kompozity s odpadním sklem.....	25
5.1. Kinetika probíhajících reakcí.....	25
5.2. Mikrostruktura a vlastnosti .....	26
5.3. Vlivy působící na výsledné vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitů s odpadním sklem .....	29
5.3.1. Si/Al modul, SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O modul .....	30
5.3.2. Druhy aktivátoru .....	31
5.3.3. Obsah alkálií a jiných prvků .....	31
5.3.4. Vliv teploty a doby zrání.....	32
5.3.5. Vliv vlhkosti .....	33

5.3.6.	Jemnost mletí a tvar částic.....	35
5.4.	Odolnost alkalicky aktivovaných kompozitů .....	39
5.4.1.	Odolnost vůči sulfataci .....	39
5.4.2.	Odolnost vůči karbonataci.....	40
5.4.3.	Odolnost vůči ASR (alkalicko - křemičité reakci).....	42
5.5.	Enviromentální dopady alkalicky aktivovaných aluminosilikátových kompozitů .....	43
	Experimentální část.....	44
1.	Cíle a metodika práce .....	44
2.	Použité materiály .....	44
2.1.	Popílek.....	44
2.2.	Struska.....	44
2.3.	Sklo.....	45
2.4.	Vodní sklo .....	46
3.	Složení směsí pro výrobu alkalicky aktivovaných aluminosilikátových materiálů .....	46
4.	Příprava a ošetřování vzorků .....	49
5.	Provedené zkoušky a zkušební metody.....	50
5.1.	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu.....	51
5.2.	Zkouška pevnosti v tlaku.....	51
5.3.	REM analýza (Snímkovací elektronový mikroskop) .....	52
5.4.	DTA analýza .....	52
6.	Diskuze a výsledky .....	53
6.1.	Pevnost v tahu za ohybu.....	53
6.2.	Pevnost v tlaku.....	53
6.3.	Objemová hmotnost.....	54
6.4.	Pevnost v tahu za ohybu.....	56
6.5.	Pevnost v tlaku.....	58

6.6.	Mikrostruktura .....	61
6.6.1.	Metoda SEM .....	61
6.6.1.1.	Vzorky S – VS 1,6 (40).....	61
6.6.1.2.	Vzorky P – VS 1,6 (80).....	63
6.6.1.3.	S – Na (10).....	65
6.6.1.4.	S – Na (5).....	67
6.6.2.	DTA analýza .....	69
6.6.2.1.	S – VS 1,6 (40) .....	69
6.6.2.2.	P – VS 1,6 (80) .....	71
6.6.2.3.	S – Na (10).....	72
6.6.2.4.	S – Na (5).....	74
Závěr	.....	75

## Úvod

Beton je druhý nejvíce používaný materiál hned po vodě. Pro výrobu betonu se používá jako pojivové složky cement. Výrobou portlandského cementu se vyprodukuje přibližně jedna tuna  $\text{CO}_2$  a z toho 50 % je tvořeno spalováním fosilních paliv. Portlandský cement je tedy zodpovědný za 7 - 10 % emisí  $\text{CO}_2$  celosvětově. Hledají se proto náhrady za tento materiál, které by měly lepší nebo stejné vlastnosti při nižších vyprodukovaných globálních emisích. [1]

Cement je v současné době vedoucím materiálem pro průmyslovou výrobu betonu se spotřebou 1,6 bilionů tun ročně. Produkce cementu se zvyšuje každoročně asi o 3 %. Cementářský průmysl je přitom druhým největším producentem skleníkových plynů v roce 2010, přitom se předpokládá že mezi roky 2010–2020 se zvýší spotřeba cementu až o 100 % a že poptávka po cementu vzroste asi o 200 % v rozmezí let 2010 až 2050. Tato vysoká poptávka po cementu by mohla způsobit drastické zvyšování emisí  $\text{CO}_2$  i dalších plynů které vznikají při výrobě, např.  $\text{SO}_3$  a  $\text{NO}_x$ . Ve světle těchto problémů se začaly hledat jiné alternativy k portlandskému cementu, které by byly méně energeticky náročné na výrobu a produkci skleníkových plynů. Jednou z těchto alternativ jsou právě alkalicky aktivované materiály, které ve srovnání s cementem mají potenciálně až o 70 % nižší emise a spotřebují asi o 60 % méně energie při výrobě. Hlavní suroviny pro výrobu jsou navíc klasifikovány jako odpady (popílký, struska, odpadní sklo atd.). Tyto materiály dosahují přitom srovnatelných vlastností jako portlandský cement. Proto se mnoho autorů stále více zabývá jejich výzkumem a možností průmyslového využití. [2]

Geopolymery či alkalicky aktivované materiály představují srovnatelnou alternativu k portlandskému cementu a začínají se uplatňovat v různých aplikacích. Geopolymer je termín k popsání anorganických polymerů založených

na aluminosilikátech a jsou vyráběny pomocí syntézy pucolánových materiálů nebo materiálu obsahující aluminosilikáty ve vysoce alkalických roztocích. [3]

## Teoretická část

### 1. Alkalická aktivace

Alkalická aktivace aluminosilikátových materiálů je proces, při kterém se částečně nebo úplně přeměňují sklovité struktury v kompaktní, cementu podobné struktury. [2]

Tyto alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály, se skládají z Si a Al tetraedrů a jsou spojeny přes vrcholové atomy kyslíku. Termín geopolymery poprvé použil J. Davidovits, který popsal fáze vzniklé opětovným vysrážením rozpuštěných látek vzniklých při alkalickém působení na pevné aluminosilikátové materiály. Mechanismus geopolymeryzace je založen na chemismu alkalicky aktivovaného pojiva a zahrnuje chemickou reakci aluminosilikátových oxidů s alkalickými polysilikáty za tvorby polymerních Si - O - Al vazeb. [4]

Přesný proces geopolymeryzace se pak dá popsat těmito 4 kroky:

- a) rozpouštění aluminosilikátových prekurzorů ve vysoce alkalickém roztoku
- b) formace oligomerických prekurzorů které se skládají z Si - O - Si / Si - O - Al vazeb
- c) polykondenzace oligomerů a vznik třídimenziální aluminosilikátové mřížky
- d) vytvrzení zesíťováním celého systému v polymerní strukturu skrze navázání nerozpuštěných pevných částic do již vzniklé struktury. [5]

Negativní náboj  $Al^{3+}$  ve čtyřvazné podobě je potom vyvažován přítomností pozitivních iontů, jako jsou  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , které se nachází v mezerách mřížky. Obecný vzorec pro geopolymery se pak dá zapsat takto:



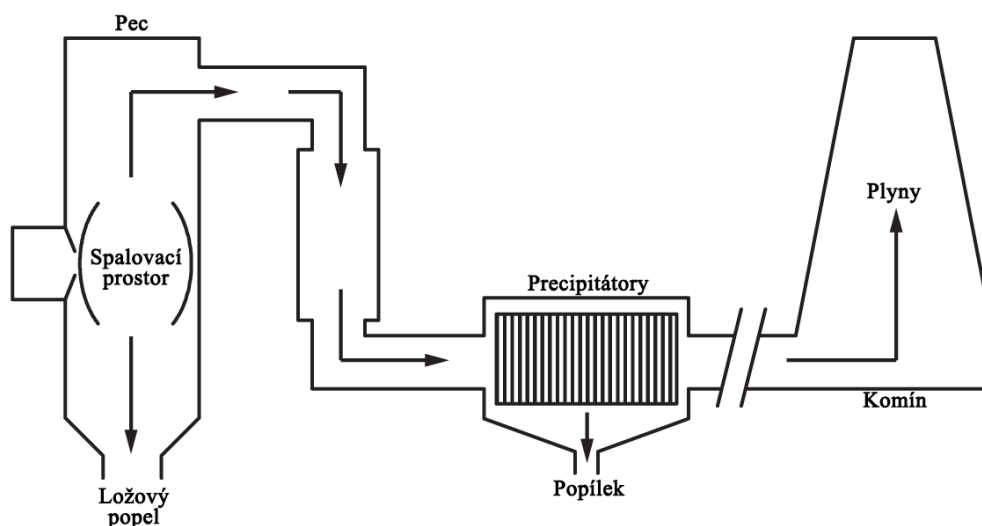
Kde: M ... je kationt  
Z ... je 1, 2, nebo 3  
N ... je stupeň polykondenzace

Výhodou geopolymérů je, že mají nižší výrobní emise CO<sub>2</sub> než portlandský cement. Mikrostruktura a vlastnosti záleží pak na prekurzorech. Mohou mít vysoké pevnosti, malé smrštění, rychlé nebo pomalé tuhnutí, dobrou odolnost vůči kyselinám a ohni či nízkou elektrickou vodivost. Geopolymerní prekurzory musí obsahovat zdroj křemíku a hliníku které jsou schopny rozpouštět se v alkalickém roztoku. [5]

## 2. Alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály

### 2.1. Popílek

Popílek je vedlejší produkt, který vzniká spalováním práškového uhlí v tepelných elektrárnách. Ve světě je těmito elektrárnami každoročně produkováno okolo jednoho bilionu tun popílku. [2] Na obrázku č. 1 pak lze vidět proces produkce popílku.

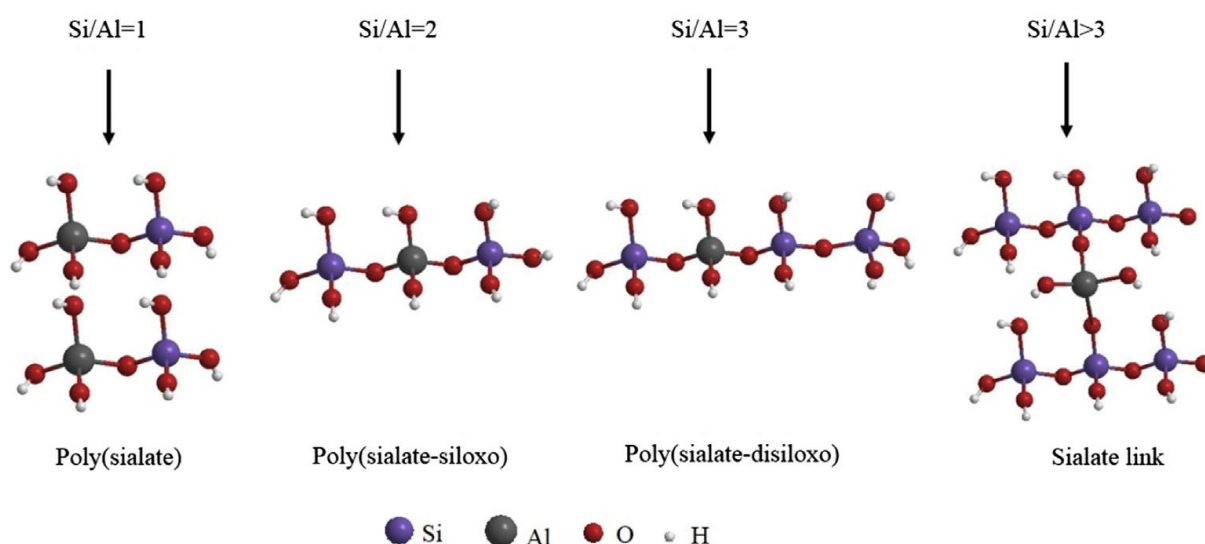


Obr. č. 1 - schéma produkce popílku [6]

Dle ASTM (American Society for Testing and Materials) se popílek vzniklý v tepelných elektrárnách dělí do dvou kategorií, C a F. Třída F vzniká spalováním

antracitového uhlí nebo asfaltového uhlí, které obsahuje dohromady více než 70 %  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , zatímco třída C vzniká spalováním hnědého uhlí nebo asfaltového uhlí, které obsahuje 50 - 70 %  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Třída F je pak klasifikována jako pucolánový materiál. [7]

Základní a zjednodušený princip alkalické aktivace popílku se dá popsat tak, že nejprve dochází k rozkladu popílku v alkalickém roztoku a poté k polykondenzaci. Avšak skutečné reakce, které se vyskytují v tomto procesu jsou velmi komplikované a dosud nejsou přesně popsány. Zásadní roli zde hraje rozpad - Si - O - Si - nebo - Si - O - Al - vazeb v alkalickém roztoku, které potom uvolňují aktivní  $\text{Al}^{3+}$  a  $\text{Si}^{4+}$ . Tyto aktivní  $\text{Al}^{3+}$  a  $\text{Si}^{4+}$  potom reagují a tvoří nukleační zárodky a aluminosilikátové oligomery, které se skládají ze  $\text{SiO}_4$  a  $\text{AlO}_4$  tetraedrů. Tyto řetězce aluminosilikátových oligomerů se potom mohou formovat buď: v polysialátové řetězce - Al - O - Si -, polysialáto-siloxové řetězce - Al - O - Si - Si - a nebo v polysialáto-disiloxové řetězce - Al - O - Si - Si - Si -, přičemž jaký typ vznikne záleží na Si/Al poměru. Na obrázku č. 2 lze pak vidět vzniklé řetězce v závislosti na Si/Al poměru. [8]



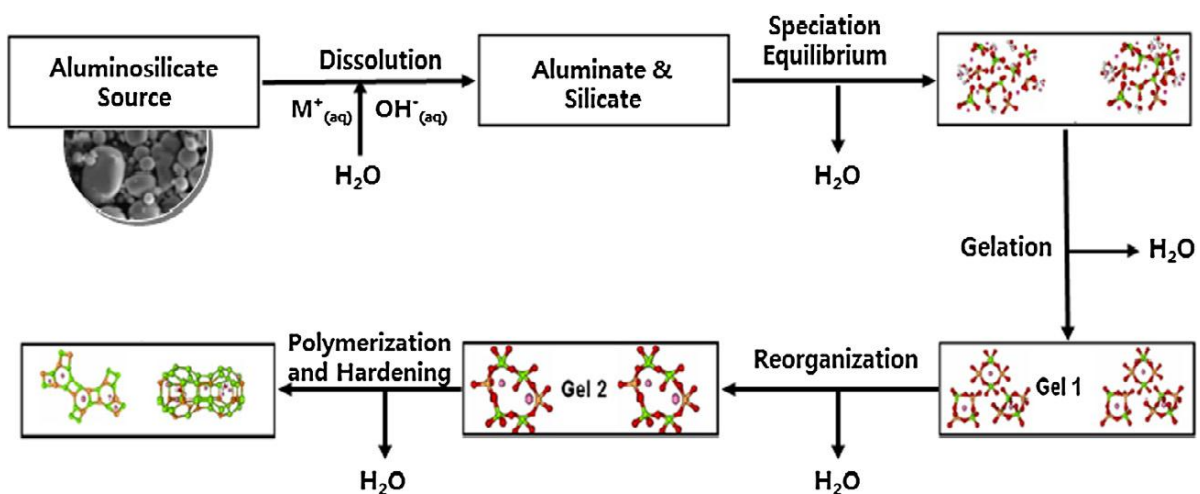
Obr. č. 2 - struktury sialátových řetězců v závislosti na Si/Al poměru [8]

Alkalicky aktivovaný popílek je trvanlivý, dobře odolává kyselinám a alkalicko - křemičité reakci, odolává sulfataci a zvýšeným teplotám. Smrštění je rovněž nižší než u tradičních cementů. [2] Na druhou stranu jeho nevýhodou je fakt, že náběh pevností je velmi pomalý. [9]

Mikrostruktura alkalicky aktivovaných popílkových materiálů je pak silně závislá na alkalickém roztoku. Množství uvolněného  $\text{Si}^{4+}$  a  $\text{Al}^{3+}$  je totiž přímo ovlivněno druhem a koncentrací alkalického roztoku. Hlavní složkou alkalicky aktivovaných popílků je N - A - S - H gel. Pokud se však přidá k popílkům další složky, mohou se tvořit i další reakční produkty jako C - S - H, C - A - H nebo C - A - S - H gely. [8]

Zdá se, že vysoké množství Ca v popílcích snižuje konečné pevnosti materiálu. Je dáno tím, že Ca se v popílcích nerozkládá v alkalickém roztoku, a tudíž není dostupné pro alkalickou aktivaci. [10]

Na obrázku č. 3 pak lze vidět proces alkalické aktivace, kde M znázorňuje alkalický kov.

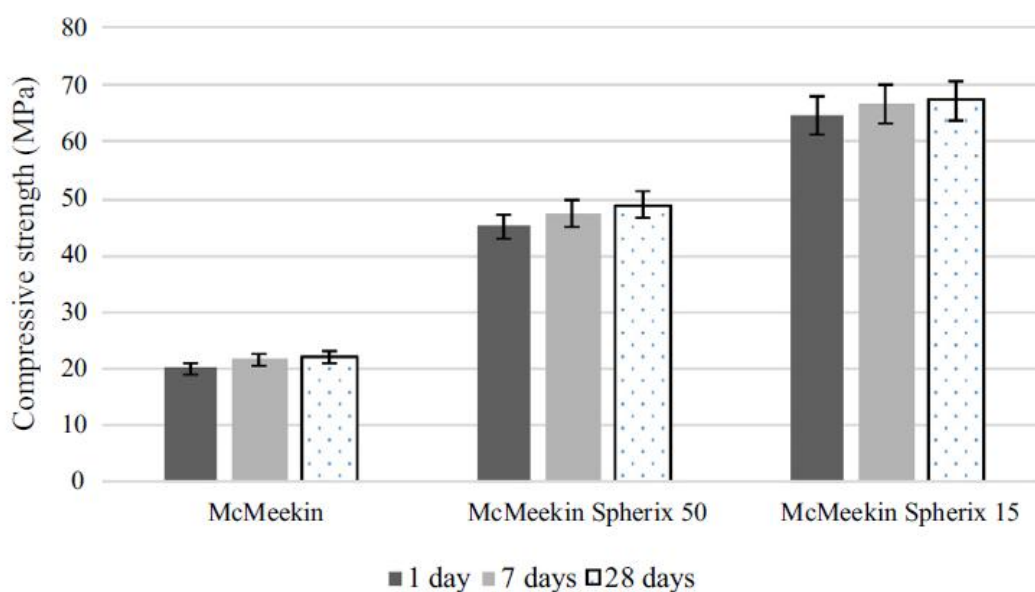


Obr. č. 3 - proces alkalické aktivace popílků [11]

Lateef N. Assi et al. [1] testoval dva různé druhy popílků, které měly přibližně stejnou velikost částic, ale lišily se původem. Rozdíl mezi pevnostmi v tlaku však byl kolem 31 %, přičemž pevnosti byly testovány po 1, 7, a 28 dnech. Tento podstatný rozdíl v pevnostech ukazuje, že původ a technologie spalování hraje důležitou roli.

Může být několik důvodů, proč se tyto pevnosti tak liší. Například způsob zpracování a přípravy nebo rozdílné množství cenosfér. Další příčinou může být odlišné chemické složení. Horší z popílků měl více železa, vápníku a uhlíku než lepší popílek. [1]

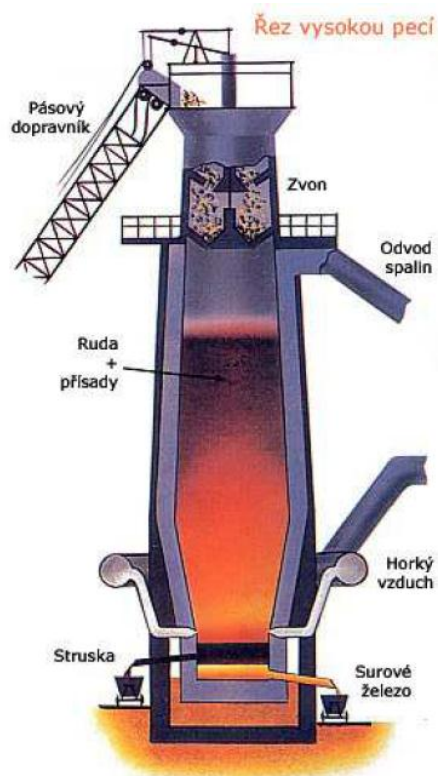
Stejný autor [1], potom zkoumal popílků o různých velikostech částic. McMeekin (průměrná velikost částice 38.8 mm); McMeekin Spherix 50 (průměrná velikost částice 17.9 mm) a McMeekin Spherix 15 (průměrná velikost částice 4.78 mm). Jak lze vidět z obrázku č. 4., tak čím menší byly částice popílku, tím větší dosáhly vzorky pevnosti. Příčinou zlepšení pevností je hlavně zvýšení měrného povrchu, čím více aktivátoru se dostane do kontaktu s popílkem, tím lépe se bude popílek rozkládat. Dalším důvodem je pak menší celková pórovitost v důsledku menších zrn, která byla schopna lépe vyplnit vzniklé mezery. Použitím jemnějšího popílku se také dosáhlo snížení mikrotrhlin a celkové pórovitosti. Snížení velikosti částic je v některých případech lepší volbou než zrání při vysokých teplotách. Větší měrný povrch na sebe naváže více vody, a tudíž zbyde méně volné vody která se musí vypařit. [1]



Obr. č. 4 – graf závislosti pevnosti v tlaku (compressive strenght) na velikosti částic [1]

## 2.2. Struska

Vysokopecní struska je vedlejší produkt při výrobě železa. Vzniká, když se do železné rudy přidávají struskotvorné přísady (např. železná ruda, koksárenský popel, vápenec) za účelem odstranění nečistot z železné rudy. V procesu výroby železa se z železné rudy tvoří roztavená struska, což je nemetalická kapalina, která se skládá převážně ze silikátů a aluminosilikátů, vápníku a jiných bází, která potom plave na povrchu roztaveného železa. Roztavená struska je potom oddělována od surového železa a chlazená. V závislosti na metodě chlazení jsou produkovány tři typy strusky, vzduchem chlazená, expandovaná a granulovaná. Pokud je struska dostatečně rychle zchlazena vodou nazývá se pak vysokopecní granulovaná struska a řadí se k latentně hydraulickým materiálům. [12]



Obr. č. 4 - řez vysokou pecí [13]

Hlavní složkou ve vysokopecní strusce je elektricky vyvážená kalcium – aluminosilikátová mřížka která se skládá z  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ .

Speciální roli hrají  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$  které se chovají jako modifikátory mřížky (vyvažují náboj).  $\text{Si}^{4+}$  a  $\text{Al}^{3+}$  hrají potom klíčovou roli při tvorbě mřížky v alkalickém prostředí.

[14]

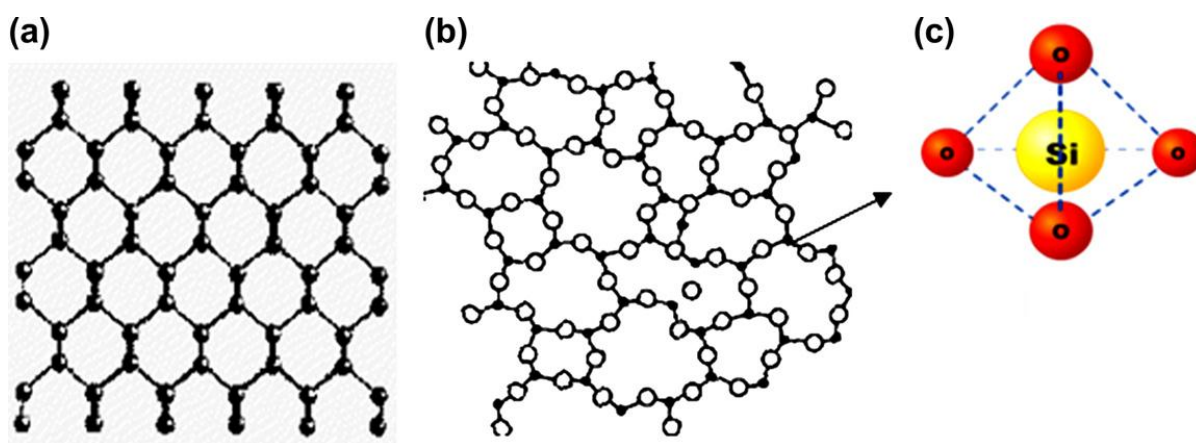
Alkalicky aktivovaná struska má vyšší odolnost proti agresivnímu prostředí než klasické cementy. Obsahuje totiž méně Ca ve struktuře a má nízkou pórovitost. Také má dobrou odolnost vůči chloridům, a sulfátům. [15]

Alkalická aktivace vysokopecní strusky začíná rozložením částic v alkalickém roztoku. V pozdějších stádiích reakce potom složení pevné části ovlivňuje hlavní reakční proces, protože reakční produkty se vysrážejí kolem částic vysokopecní strusky, a to snižuje oblast vystavenou alkalickému působení roztoku. Schopnost reaktivních komponentů (Ca, Mg, Si a Al), rozkládat se, závisí na pH alkalického roztoku. Se zvyšujícím se pH bylo zaznamenáno vyšší množství rozpuštěného Si a Al, zatímco Ca a Mg vykazují nižší rozpustnost. Hlavními reakčními produkty vysokopecní strusky jsou C - (A) - S - H gely, které mají rozhodující vliv na výsledné vlastnosti produktu. [14] Pokud se struska aktivuje pomocí NaOH, s přídavkem, nebo bez přídavku vodního skla, potom hlavní krystalická fáze je C-S-H (I) a hydrotalcit, přítomnost zeolitů nebyla potvrzena. Vápník obsažený ve strusce poté zvyšuje konečné pevnosti materiálu. To je dáno tím, že vápník je schopen ve strusce tvořit C-S-H (I) gely. [10]

Základním prvkem alkalicky aktivovaných gelů ve strusce je aluminosilikátová mřížka, tudíž záleží na dostupnosti křemíku a hliníku v roztoku, aby se mohla zformovat. Dostupnost těchto prvků je závislá na rozpuštění strusky, kde jsou vázány. Proto platí, že čím větší je schopnost strusky rozpustit se v alkalickém roztoku, tím větší pevnosti dosáhnou nově utvořené gely. Rozpustnost strusky je závislá na mnoha faktorech, avšak nejdůležitější je velikost částic a vysoký podíl skelné části. [16]

### 3. Sklo

Kovy mají obecně třídímní periodickou strukturu (krystalickou strukturu). Existují ale i látky s náhodnou třídímní strukturou – tyto látky se pak nazývají amorfní nebo skelné. Anorganické amorfní nebo skelné látky jsou rychle zchlazené kapaliny, aby se zabránilo krystalizaci. [17]



Obr. č. 5 - struktura kovu (a), skla (b) a Si - tetraedru (c) [17]

Skla mají mřížkovou strukturu, tato struktura se skládá ze základního prvku který tvoří mřížku ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,...) a z prvku, který modifikuje mřížku ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,...). Tyto modifikátory jsou důležitou součástí, protože dělají strukturu skla více otevřenou a snižují teplotu tavení skel. [18]

#### 3.1. Historie výroby skla

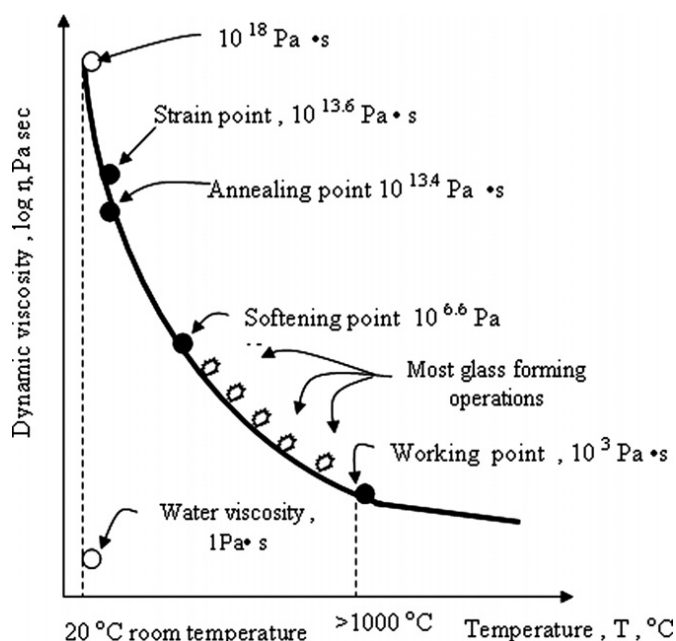
První skleněné objekty vyrobené člověkem se datují okolo roku 7000 př. n. l. a byly nalezeny v Egyptě a Mezopotámii. Sklo bylo objeveno náhodou Fénickými kupci, kteří si první všimli že na sodných kamenech, na kterých vařili, se po smíchání písku z pláže tvoří čirá tekutina - sklo. Výrobci skla potom pravděpodobně používali stejný recept při výrobě skla: písek, sodík, vápník a uhličitán draselný. Důležitým pokrokem při výrobě skla byl objev toho, že sklo lze tvarovat foukáním. Tato nová technika obrovsky zvýšila potenciální užití skla pro praktické účely. K velkému rozmachu výroby skla došlo za římské říše, kdy se jeho výroba dostávala i do jejich

kolonií. Okolo roku 1300 n. l. se Benátky staly centrem výroby skla. Tuto výsadu si udržely až do roku 1700 n. l., kdy se sklo rozšířilo po celé Evropě. [19] V dnešní době se používá nejvíce obalových a plochých skel.

### 3.2. Vlastnosti

Mechanické a fyzické vlastnosti skel jsou dány jejich složením. Obvykle mají pevnost v tahu mezi 24 - 69 MPa, jsou křehké a mají menší tvrdost, mají také menší koeficient tepelné roztažnosti a tepelné vodivosti. Skla jsou také dobrými elektrickými izolátory. Jsou odolné vůči kyselinám, rozpouštědlům, chemikáliím, vodě a alkalickým roztokům.

Při pokojové teplotě jsou skla velmi viskózní ( $10^{18}$  Pa·s x  $1$  Pa·s – viskozita vody). S rostoucí teplotou poté viskozita skla klesá. U skla existuje pět důležitých teplot, které se nazývají standartní body a jsou spojeny s viskozitou při tavení skla. Na obrázku č. 6 lze potom vidět všechny tyto body v grafu. [17]



Obr. č. 6 - významné body při tavení skla [17]

### 3.3. Výroba

Princip výroby skla spočívá v tom, že se roztavená tekutina rychle zchladí tak, aby nestihla zkrystalizovat. [19] Vytváří se tak homogenní, amorfní, křehká a obvykle průsvitná hmota.

Základní suroviny pro výrobu skel jsou sklotvorné suroviny, jejichž směs se nazývá sklářský kmen. Mezi tyto suroviny patří především sklářský písek, soda nebo potaš a vápenec. Pokud se do sklářského kmene přidají skleněné střepey, říká se mu sklářská vsázka. Střepey se do vsázky přidávaly už od starověku z důvodu zlepšení procesu tavby a ke zlepšení kvality výsledné skloviny. Lze ovšem přidávat pouze čisté střepey které mají stejné složení jako sklářská vsázka. Sklářský kmen se potom taví při teplotě 1420–1470 °C. Tavba trvá asi 12–16 hodin. Po tavení následuje proces formování a poté chlazení. [20]

### 3.4. Dělení skel

Skla lze rozdělit dle různých parametrů, nejčastěji se skla dělí dle původu, chemismu, způsobu výroby a způsobu použití. [20]

#### 3.4.1. Dle původu

Dle vzniku se skla dají rozdělit na přírodní a umělá. Skla přírodní jsou skla, která vznikla přírodními procesy, nejčastěji vulkanickou činností. Typickými představiteli těchto skel je obsidián, pemza, perlit nebo smolek. Skla umělá vznikají buďto záměrnou výrobou, nebo jako vedlejší produkty při spalování uhlí (popílký) nebo při výrobě železa (vysokopeční struska). [20]

### 3.4.2. Dle chemického složení

Dle chemického složení dělíme skla na křemenná, rozpustná (vodní), sodnovápenatá, olovnatá a křišťálová skla, tepelně odolná skla a nízkoalkalická skla. [20]

Křemenné sklo vzniká tavením čistého  $\text{SiO}_2$  ve vakuu při teplotách kolem  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , toto sklo je odolné vůči teplotním šokům, má vysokou propustnost krátkovlnného záření a má vysokou chemickou odolnost.

Skla olovnatá a křišťálová mají vysoký index lomu a disperzi (vysoký lesk na broušených hranách), používají se především na estetické účely.

Vodní sklo je koloidní roztok křemičitanu alkalického kovu (Na, K, Li). Používá se jako pojivo pro žáromateriály, nátěrové hmoty nebo jako ztekucovadlo v keramickém průmyslu a pro mnoho dalších účelů. Vyrábí se buďto rozvařením sodnokřemičitého skla nebo hydrotermální metodou v autoklávech.

Tepelně odolná skla mají vyšší obsah  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Ba}_2\text{O}_3$  – mají nízký obsah alkálií a proto se tyto skla se vyznačují nízkým součinitelem tepelné roztažnosti. [20]

### 3.4.3. Dle způsobu výroby

Podle způsobu výroby se sklo dá rozdělit na ploché sklo tažené (válcované), což je sklo vyráběné tzv. float procesem. Je to nejrozšířenější typ výrobků ze skla. Dále se sklo dělí na tvarované, foukané, lisované, válcované a tažené. [20]

## 3.5. Recyklace skel

V průběhu let se neustále zvětšuje produkce skla a tím pádem i produkce odpadního skla. Ačkoliv podíl recyklovaného skla je docela vysoký, jenom malá část tohoto recyklovaného skla lze znovu využít pro další výrobu. Sklo, které je příliš rozbité nebo není stejnobarevné nelze znovu použít pro výrobu. Důvodem jsou odlišné chemické vlastnosti různobarevných skel. [21]

CRT sklo je odpad z vyřazených počítačových monitorů a televizí a je klasifikováno v Evropském katalogu odpadů a koresponduje s národní legislativou odpadu. To znamená že nemůže být uloženo na skládkách bez patřičného ošetření. Tento odpad totiž obsahuje velké množství olova a také ostatní těžké kovy jako baryum a stroncium. V současné době je recyklace těchto skel možná pouze složitým s a náročným postupem, kdy se separují těžké kovy z tohoto skla. [22]

Skleněná vlákna patří mezi velmi komerčně využívané produkty. Každý rok se vyrobí velké množství těchto vláken, avšak při produkci vláken vzniká také hodně odpadu. Až okolo 250 000 – 500 000 tun odpadních skleněných vláken se vyprodukuje jenom v USA. Tato odpadní vlákna mohou být potenciálně tedy využita jako pucolánový materiál. Pokud se odpadní vlákna použijí do alkalicky aktivovaných materiálů může výsledný produkt dosáhnout pevnosti až 80 MPa. [23]

#### 4. Alkalická aktivace skel

Přítomnost rozpuštěného křemíku a hliníku v geopolymerních systémech je silně závislá na rozkladu skelné fáze v prekurzorech. V průběhu rozkladu narušují  $\text{OH}^-$  ionty  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ ,  $\text{Si} - \text{O} - \text{Al}$  a  $\text{Al} - \text{O} - \text{Al}$  vazby, což vede k formaci  $\text{Si} - \text{OH}$  a  $\text{Al} - \text{OH}$  skupin, které kondenzují a přispívají tak k formaci aluminosilikátových gelů. Protože  $\text{Al} - \text{O}$  vazby jsou slabší než  $\text{Si} - \text{O}$ , je pravděpodobné že v brzkých stádiích aktivace budou mít aluminosilikátové gely více  $\text{Si} - \text{O} - \text{Al}$  vazeb než  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ . Toto upřednostňuje začlenění hliníku v gelech, což má za následek tvorbu gelu, který je bohatý na Al. V průběhu aktivace se přetransformuje na Si bohatý gel, z důvodu zabudování dalšího Si, který se pomalu rozložil z prekurzorů. [24]

R. Redden a N. Neithalath [25] zjistili že, pokud odpadní sklo aktivujeme roztokem NaOH, tak se zvyšující se koncentrací roztoku se bude zvyšovat i výsledná pevnost vzorků, protože se zvyšuje dostupnost reaktivního Si ze skla a tvoří se N - S - H gely. Množství aktivátoru je důležitým parametrem pro úspěšnou aktivaci skla. Sklo

obsahuje také velmi málo hliníku, který je důležitý pro vznik N - A - S - H gelu. Tudíž reakční produkt skla je primárně N - S - H gel (sodno - křemičitý gel). Tyto gely však mají menší křemičitý modul a horší mechanické vlastnosti než N - A - S - H a C - A - S - H gely. Vykazují také vyšší smrštění a sklon k tvorbě trhlin. [25]

U skel dochází ke snadnějšímu vyloučení Si a Al iontů než u popílků, toto je dáno tím, že popílek obsahuje fáze, které jsou více odolné vůči rozkladu v alkalickém roztoku [23]

## 5. Alkalicky aktivované kompozity s odpadním sklem

### 5.1. Kinetika probíhajících reakcí

Je známo, že teplo a odpařování vody urychluje vytvrzování gelu. [25] Protože jsou geopolymerní prekurzory primárně aluminosilikátové, netvoří hydratační produkty jako je to v případě silikátových systémů – nepřeměňují vodu z kapalné do tuhé podoby skrze její začlenění do reakčních produktů. Toto je velmi důležité z hlediska vývoje pórovitosti. V silikátových systémech se pórovitost výrazně snižuje v průběhu hydratace z důsledku spotřeby vody na hydratační produkty. Geopolymery naproti tomu nemají takový reakční mechanismus jako silikátové materiály. V geopolymerech je velikost a rozložení pórů utvořeno při procesu tuhnutí a tvrdnutí, avšak toto množství pórů není ovlivněno hydratací jako u silikátových materiálů, protože zde se žádná voda neváže do struktury geopolymery. Tento jev je tedy podstatný při výrobě geopolymery a má velký vliv na výsledné vlastnosti geopolymery, tudíž čím více vody, tím více vznikne pórů, které negativně ovlivňují pevnosti. Je proto důležité snažit se zachovat co nejnižší vodní součinitel u těchto materiálů. [26]

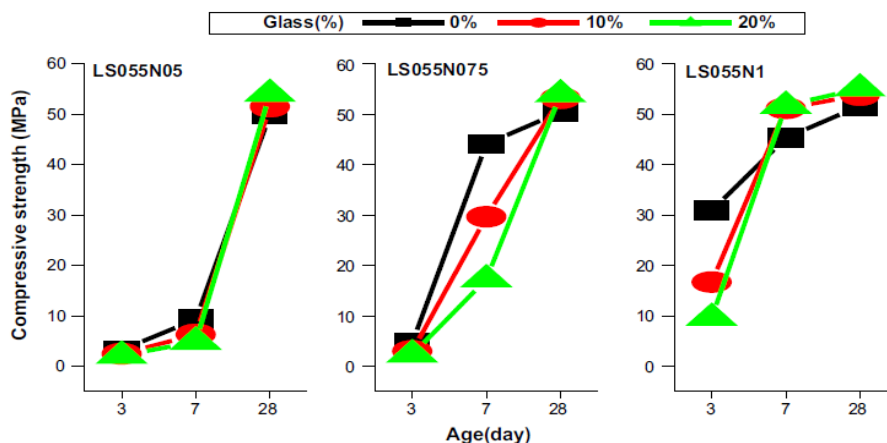
R. Martinez-Lopez et al. [27] zjistili, že přítomnost skla se stává důležitým faktorem až po 28 dnech zrání, existuje zde odlišnost mezi kinetikou reakcí u strusky a odpadního skla. [27]

Pokud je hlavním prekurzorem popílek, tak aby se mohl nechat zrát za normálních teplot je nutné urychlit jeho pomalý nárůst pevností. Toho se dá dosáhnout přidavkem strusky, která obsahuje vysoký podíl Ca, urychlující počáteční nárůst pevností. Lee a Lee dokázali, že pokud se zvýší podíl strusky z 10 na 15 %, tak při 28 dnech se zvýší pevnosti z 15 na 23 MPa. [28]

## 5.2. Mikrostruktura a vlastnosti

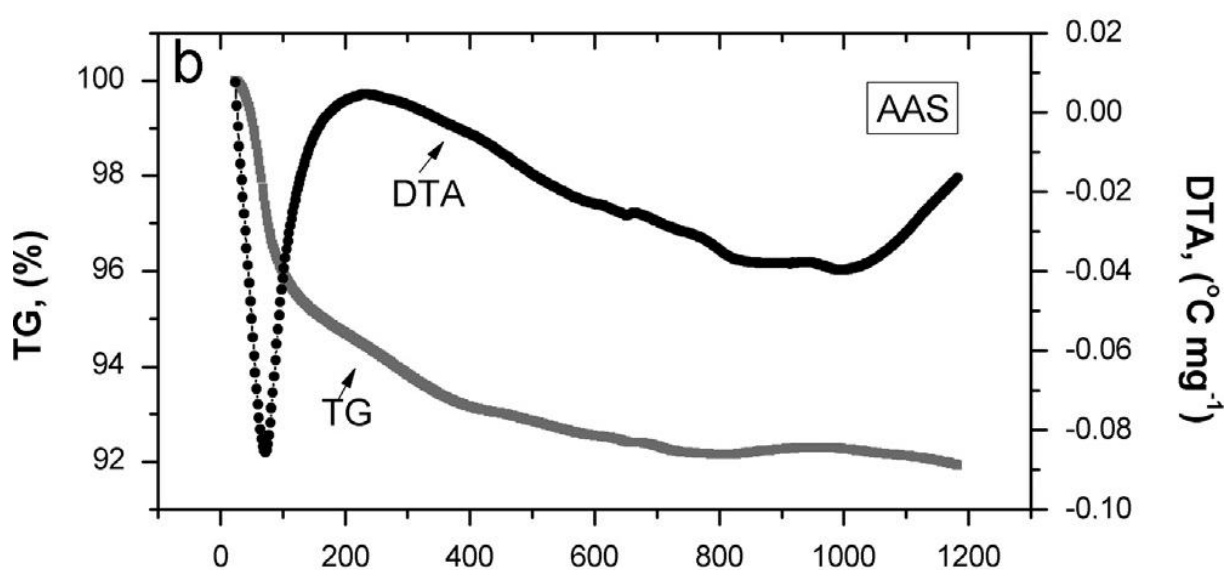
Pokud se k popílku přidá odpadní sklo z použitých fluorescenčních lamp (náhrada 10 - 30 %), potom budou vykazovat jen o něco menší pevnosti než vzorky z čistého popílku. Jev je způsoben nižším obsahem CaO oproti klasickému odpadnímu sklu, avšak toto sklo má větší měrný povrch, a tudíž s ním lze dosáhnout menší pórovitosti než s klasickým odpadním sklem. [29]

Wei-Chien Wang et al. [30] zjistili že, pokud je vodní součinitel 0,5 a koncentrace roztoku 0,5 % tak se pevnosti pohybují okolo 52 MPa, pevnost v tlaku se začíná po 7. dni rapidně zvyšovat. Po 28 dnech potom vzorky s náhradou 20 % skla dosáhly nejvyšších pevností. Je to dáno tím, že se ze skla rozpouští další křemík a hliník a tím pádem může docházet k lepší polymeraci. Při 7denních pevnostech jsou pevnosti vzorků se sklem nižší než referenční, protože sklo se rozkládá déle než struska. Při vyšších koncentracích (1 %) dochází už při 7denních pevnostech ke zvýšení pevností vzorků se sklem, protože sklo se v roztoku rozpouští rychleji. [30]



Obr. č. 7 – Pevnosti v tlaku alkalicky aktivovaných materiálů s odpadním sklem [30]

Alkalicky aktivovaná struska vykazuje při DTA analýze chování typické pro alkalicky aktivované materiály. Ostrý počáteční úbytek váhy, pozorovaný při 100 °C na TG křivce a endotermický pík na DTA křivce, je způsoben ztrátou adsorbované vody. S dalším zahříváním až do 400 °C pokračuje snižování hmotnosti z důsledku termální dehydratace. Úbytek váhy mezi 400 a 600 °C je způsoben dehydratací C-(A)-S-H fáze. Nad 600 °C je změna hmotnosti už pouze malá a dochází zde ke slinování alkalicky aktivovaného materiálu. [31]



Obr. č. 8 – Tg a DTA křivka pro alkalicky aktivovanou strusku [31]

Se zvyšující se teplotou také dochází ke zvyšování pevnosti alkalicky aktivované strusky. Po zahřátí se kumulativní objem pórů velmi výrazně snižuje. Obecně tedy vystavení vysokým teplotám ovlivňuje pórovou strukturu AAM. Po vystavení teplotám nad 600 °C se mění rozložení a velikosti pórů. Velikost pórů roste a tvoří se makropóry (nad 50 nm). Tvorba těchto velkých pórů je pravděpodobně způsobena spojováním menších pórů do větších kvůli uvolňování vody a dehydrataci reakčních produktů alkalické aktivace. I přesto že vystavení vysokým teplotám vede ke tvorbě větších pórů, kumulativní počet pórů se naopak výrazně zmenšuje. Pokud se teplota bude nadále zvětšovat, tak tím dál menší póry se budou spojovat a tvořit větší póry, a naopak kumulativní objem pórů se bude

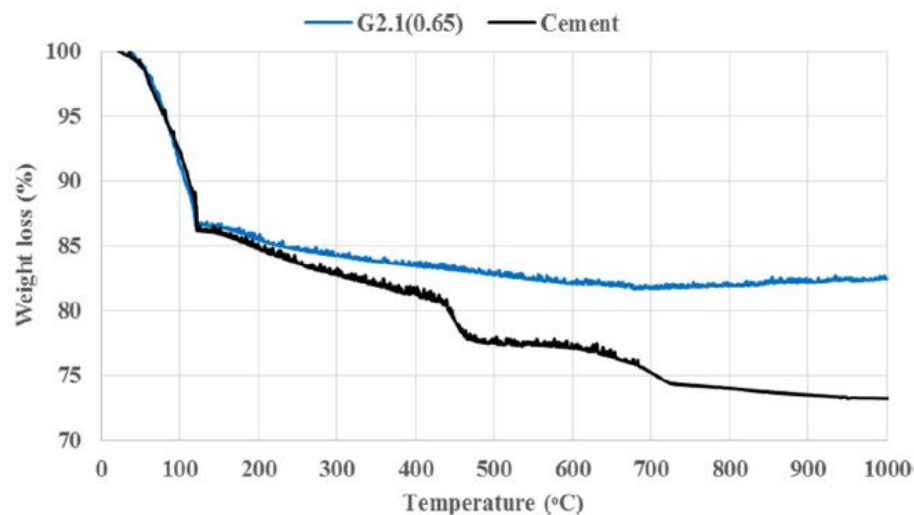
zmenšovat. Z těchto poznatků vyplývá, že se zvyšující teplotou se sice zvětšuje průměr pórů, ale jejich celkové množství klesá a tím pádem rostou pevnosti. [31] Fáze, které obsahují  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se nepodílejí na reakci alkalické aktivace a jsou přítomny ve zbytkovém množství v nezreagovaných popílkových částicích. Tyto prvky mají potom vyšší součinitel délkové teplotní roztažnosti s porovnáním k reakčním produktům alkalické aktivace. Jejich oxidace za zvýšených teplot také vede k zvětšování objemu, tvorbě trhlin na rozhraní těchto fází a tím ke snižování celkových pevností systému. [32]

U popílkových kompozitů se systém rozkládá při teplotách nad  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , a systém odolává lépe vysokým teplotám, pokud zrál při teplotě okolo  $21\text{ }^\circ\text{C}$ , než kdyby zrál při zvýšených teplotách. U popílků bylo při zvýšených teplotách pozorováno bobtnání a praskání, protože obsahovaly značné množství krystalických křemenných fází. Pro strusku bylo toto množství křemenných fází malé, a tudíž se neobjevovaly praskliny způsobené přeměnou křemene. Termální smrštění je závislé také na poměru vody ku pojivu a množství obsaženého sodíku.

V systémech s nízkým obsahem vápníku (popílký, metakaolin) je požadován Na/Al poměr 1, který je potřeba aby se kompletně vyvážíly negativní náboje  $\text{Al}^{3+}$  tetraedrů v N - A - S - (H) gelu. Vysoký obsah vápníku v systémech způsobuje tvorbu C - (N) - A - S - H gelu na úkor N - A - S - (H) gelu, a tím se zvyšují pevnosti systému. Avšak systémy s vysokým podílem vápníku vykazují menší termální stabilitu než systémy s nízkým obsahem vápníku, protože obsahují na vodu bohatou fázi portlandit a dosahují nižších polymeračních stupňů. [32]

U portlandského cementu může dojít v důsledku vysokých teplot k odpařování a dehydrataci cementových produktů (C - S - H, portlandit, etringit) což má za následek tvorbu trhlin v pojivu. Naproti tomu, pokud vystavíme alkalicky aktivované materiály vysokým teplotám, má to jen malý vliv na jejich strukturu. Termální degradace produktů portlandského cementu může naopak způsobit strukturní vady a má negativní efekt na pevnosti. Tyto rozdíly lze přičíst tomu,

že cement obsahuje v hydratačních produktech více vody, která se při vystavení vysokým teplotám začne odpařovat. Naopak u alkalicky aktivovaných materiálů není voda tolik zastoupena v reakčních produktech, a tudíž její odpařování nemá takový vliv na výsledné pevnosti. Na obr. č. 9 lze na grafu vidět, že cement vykazuje větší hmotnostní úbytek při DTA analýze, zatímco alkalicky aktivovaného materiálu přestává nad 600 °C hmotnost ubývat. [32]



Obr. č. 9 – graf TGA křivky porovnávající cement a alkalicky aktivovaný materiál [32]

### 5.3. Vlivy působící na výsledné vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitů s odpadním sklem

U alkalicky aktivovaných kompozitů probíhá stále výzkum, technické vlastnosti a trvanlivost těchto materiálů ještě nebyla zcela objasněna a vyzkoumána. Zatím neexistuje plné porozumění vlivu vstupních parametrů na mechanické vlastnosti a dlouhodobé odolnosti těchto alkalicky aktivovaných materiálů. Je důležité uvést, že velká různorodost vstupních prekurzorů při výrobě těchto látek má velký vliv na výsledné vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů, protože každá surovina má jiné chemické složení a vlastnosti. [33]

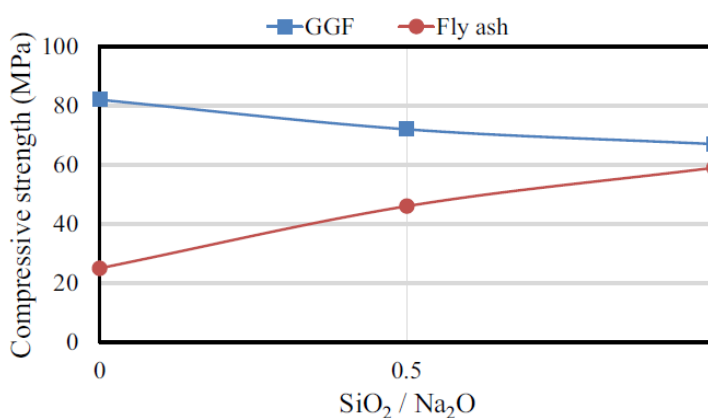
Existuje mnoho vlivů, které mohou ovlivňovat výsledné vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů. Důležité parametry, které ovlivňují výsledné vlastnosti alkalicky aktivovaných kompozitů mohou být rozděleny do 3 skupin:

- a) parametry které jsou závislé na aktivátorech např. koncentrace, druh.
- b) parametry závislé na chemických vlastnostech prekurzoru jako je jemnost mletí, chemické složení
- c) parametry závislé na podmínkách zrání jako je teplota a doba při zrání [23]

### 5.3.1. Si/Al modul, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O modul

Jak lze vidět na obrázku č.10, tak se zvyšujícím se křemičitým modulem dochází ke zvyšování pevností u popílkových vzorků, avšak lze vidět, že u skleněných vzorků se pevnosti snižují. Tento jev má 2 příčiny:

- a) Si/Al poměr - přítomnost Al v geopolymerech je podmínkou, aby se mohly křemičité řetězce spojit a vytvořit 3D mřížku finálního produktu. Si/Al poměr je tedy důležitým parametrem. Optimální hodnota by se měla pohybovat okolo 2 nebo níže, pokud je Si/Al poměr vyšší způsobuje to úbytek pevností.
- b) nezreagované částice - pokud je křemičitý modul vyšší ovlivňuje to negativně skleněné částice a způsobuje menší rozpustnost těchto částic. Toto je způsobeno kvůli vyššímu obsahu Si. [23]



Obr. č. 10 – vliv SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O modulu na pevnosti v tlaku (compressive strenght) u alkalicky aktivovaných skel (GGF) a popílků (fly ash) [23]

### 5.3.2. Druhy aktivátoru

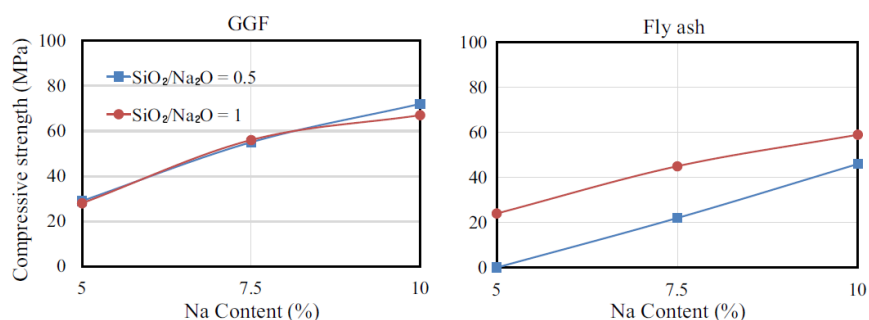
M. Cyr a kol. [35] zjistili že s použitím KOH jako aktivátoru se dosáhne lepších výsledků než s použitím NaOH. Tento jev je pravděpodobně způsoben rozdílem v alkalitě a také ve velikosti  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$  iontů. Matrice obsahující  $\text{K}^+$  ionty vykazovaly vyšší pevnosti díky vyšší koncentraci alkálií. Může to být způsobeno silnější bazicitou alkalických iontů  $\text{K}^+$ , které umožňují vyšší stupeň disociace silikátu. Dále zjistil, že koncentrace 5 M je optimální pro jeho druh skla, nehledě na druh aktivátoru a jemnost mletí skla. Koncentrace 10 M je potom příliš vysoká a pevnosti se snižují, toto může být kvůli velkému množství  $\text{K}^+$  iontů v mezimřížkových prostorech nově vzniklého geopolymery. [35]

Pasty s vysokým obsahem skla potřebují více jak 8 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , pokud se použije aktivátor NaOH/ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , naopak pasty s nízkým obsahem skla potřebují méně jak 8 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , pokud se používá NaOH jako aktivátor. Přítomné  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se chová jako pH stabilizátor. V porovnání s NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  umožňuje lepší rozklad skla v kompozitech s obsahem skla nad 50 %. [36]

### 5.3.3. Obsah alkálií a jiných prvků

U popílkových i skleněných vzorků se s rostoucí koncentrací Na zvyšovala i pevnost v tlaku. Pokud se zvýší obsah sodíku z 5 na 10 %, tak se zvýší i pevnosti. Tyto vyšší pevnosti při obsahu  $\text{Na}_2\text{O}$  k pojivu 10 % může být zdůvodněno vyšší rychlostí rozpouštění prekurzorů ve větším pH. Pokud se použije aktivátor s vyšším obsahem sodíku, dochází k většímu narušování skelných vazeb prekurzorů, a to vede k vyšším pevnostem výsledného materiálu.

Pokud se zvýší koncentrace  $\text{Na}_2\text{O}$  nad 10 % začne pevnost vzorků klesat. Toto snižování pevnosti může být vysvětleno extrémně vysokou koncentrací alkálií v roztoku. Optimální koncentrace  $\text{Na}_2\text{O}$  je tedy 10 %. [23]

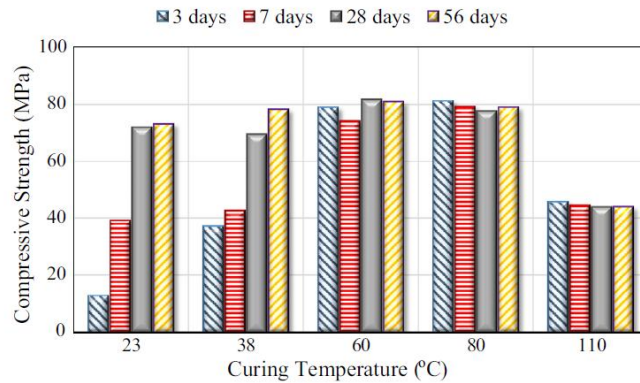


Obr. č. 11 – Vliv množství Na (Na content) na výsledné pevnosti v tlaku (compressive strength) alkalicky aktivovaných materiálů (GGF) a popílků (fly ash) [23]

Dalším důležitým parametrem, který může ovlivňovat výsledné pevnosti je množství vápníku obsaženém v prekurzoru. Přítomnost Ca snižuje dobu zrání, a tudíž zvyšuje rychlost tvrdnutí. Přesný mechanismus, kterým ovlivňuje vápník vlastnosti geopolymérů však není ještě zcela jasný. Existují tři teorie, které popisují možné mechanismy působení Ca na geopolymery. Jedna z teorií popisuje mechanismus, při kterém Ca ovlivňuje strukturu geopolymérů, substitucí Na iontů v N - A - S - H struktuře Ca ionty. Ca a Na ionty mají podobný elektrický potenciál, a tudíž jsou Ca ionty schopny nahradit Na ionty, což vede ke vzniku (C - N) - A - S - H gelů v geopolymerní struktuře. [23]

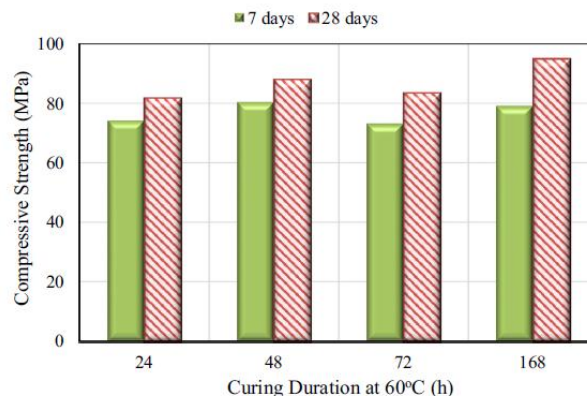
### 5.3.4. Vliv teploty a doby zrání

Autor Hassan Rashidian-Dezfouli et al. [23], se ve své práci zabýval vlivem teploty a doby zrání. Jak je patrné z grafu na obr. č. 12, tak nejvyšší pevnosti bylo dosaženo při teplotách 60 a 80 °C, avšak je nutno zdůraznit že vzorky které zrály při 23 °C dosáhly po 56 dnech skoro stejných pevností. Rozdíl je jenom v rychlosti nárůstu pevností. Pomalejší nárůst pevností při nižších teplotách může být způsoben vyšší vlhkostí. Vlhkost je potřeba na začátku, protože funguje jako transportní médium pro rozpuštěné Si a Al částice. Potom už voda zpomaluje rychlost polymerace. Při vyšších teplotách dochází k rychlejšímu odpaření vody, a tudíž i k rychlejšímu nárůstu pevností.



Obr. č. 12 – vliv zračí teploty (curing temperature) na výsledné pevnosti v tlaku (compressive strength) alkalicky aktivovaných materiálů [23]

Pokud se prodlouží doba zrání při zvýšené teplotě, získají se o něco vyšší pevnosti vzorků. Tento efekt je výraznější u popílkových vzorků. Pokud se prodlouží doba zrání, zvýší se stupeň polymerace, což má za následek hutnější strukturu a tím pádem dochází ke zvýšení pevností vzorků. [23]



Obr. č. 13 – vliv doby zrání (curing duration) na výsledné pevnosti v tlaku (compressive strength) [23]

### 5.3.5. Vliv vlhkosti

Geopolymery z čistého skla mohou vykazovat pevnosti až okolo 30 MPa podle Reddena [37]. Avšak je zde problém se stabilitou ve vlhkém prostředí, protože sodno – křemičitý gel není odolný vůči vodě a vlhkému prostředí. Aby se dosáhlo stabilizace struktury je nezbytné přidat do struktury čtyřvazný Al. I malá dávka Al

má za následek tvorbu polymerní fáze. Pro tyto účely se sklo obvykle míchá s popílkem. [37]

Pokud se vystaví geopolymery vlhkosti, tak nejvyšší ztrátu pevnosti vykazují vzorky ze skla. Nejvyšší úbytek pevnosti je pozorován prvních sedm dní a potom je rychlost ztráty pevností menší. Pokud je sodno - křemičitý gel vystaven vodě, sodík se začne louhovat podle rovnice:

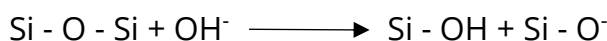


Další disociace závisí na pokračující hydrolyze Si - O - Si vazeb.

Pokud je geopolymery ze skla ve vlhkém prostředí, tak se nijak zásadně nemění jeho pH, i když lze očekávat mírné zvýšení v důsledku vyluhování  $\text{OH}^-$  iontů.

Na povrchu potom zůstane tenká vrstva gelu která už nemá alkálie a může se utvořit vrstva bohatá na Si. Tento jev potom zabraňuje další disociaci křemíku což má za následek snížení rychlosti poklesu pevnosti po počáteční rychlé periodě.

Pokud je však geopolymery ze skla ponořen ve vodě, začne pH vody narůstat, protože se začnou uvolňovat ionty jak je popsáno výše. Toto prostředí potom dále rozkládá Si - O - Si vazby dle rovnice:



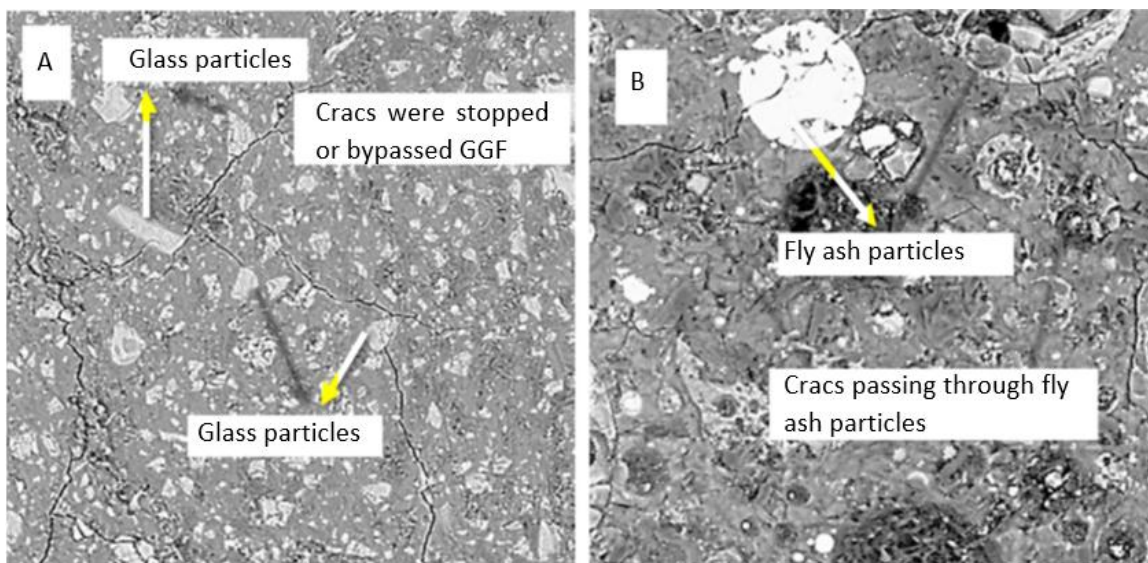
Jednou z možností, jak zlepšit stabilitu, je dosáhnout tvorby (N - A - S - H) gelu přidáním dalšího zdroje reaktivního aluminátu. Nahrazením části  $\text{Si}_4^+$  za  $\text{Al}_3^+$  imobilizuje alkalické ionty které jsou potřebné pro vyrovnání náboje a tím pádem se omezí disociace. Další z možností je přidavek Ca iontů. Ca ionty umožňují možnost tvorby C - (A) - S - H gelů, které jsou stabilnější ve vodním prostředí.

R. Redden a N. Neithalath [38] zjistili, že nejvíce odolný vůči vodnímu prostředí je geopolymery aktivovaný 8 molárním NaOH, který je tvořen 50 % skla, 15 % metakaolinu a 35 % vysokopecní strusky. Pokles pevnosti po 28 dnech činil cca 5 MPa, zatímco u geopolymery tvořeného čistě sklem byl pokles pevnosti více jak

25 MPa. [38] Kompozity ze strusky s 25 a 75 % odpadního skla vykazovaly také velmi dobrou odolnost vůči vodě a pevnosti vyšší než u portlandského cementu. [36]

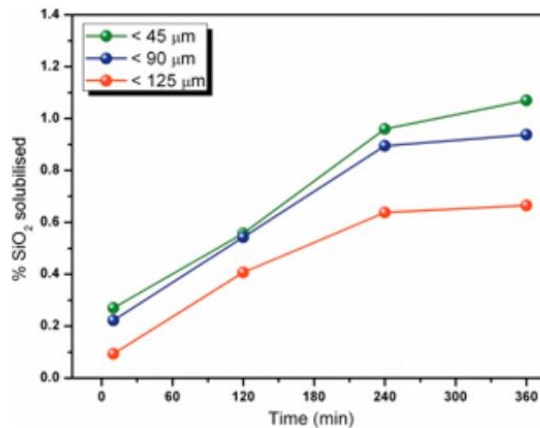
### 5.3.6. Jemnost mletí a tvar částic

Velikost částic je jedna z vlastností, která ovlivňuje výsledné vlastnosti geopolymery. Malé částice u prekurzorů poskytují dostatečně velký měrný povrch, ale taky zaplňují mezery v matici, takže výsledný materiál má menší pórovitost a vyšší pevnost. Nezareagované částice prekurzoru se potom chovají jako plnivo a vyztužují matici. Lze tedy předpokládat, že prekurzor s vyšší tvrdostí může zvýšit mechanickou pevnost výsledného geopolymery. Sklo je tvrdší oproti popílku. Na obrázku č. 14 vidíme, že trhliny při působení napětí musí obejít zrno skla, nebo jsou dokonce zastaveny částicemi, naproti tomu u popílku lze vidět, že trhlina prochází přímo přes částici. [23]



Obr. č. 14 – rozdíl v mikrostruktuře u alkalicky aktivovaného skla (A) a popílku (B) [23]

Čím jsou částice skla menší, tím větší mají měrný povrch. Tudíž se zvětší kontaktní plocha s roztokem, a to má za následek větší rozpustnost skla v roztoku. Pokud je částice větší než 125  $\mu\text{m}$ , uvolní se asi o polovinu méně Si, než kdyby byla velikost částic 45  $\mu\text{m}$ . [39]



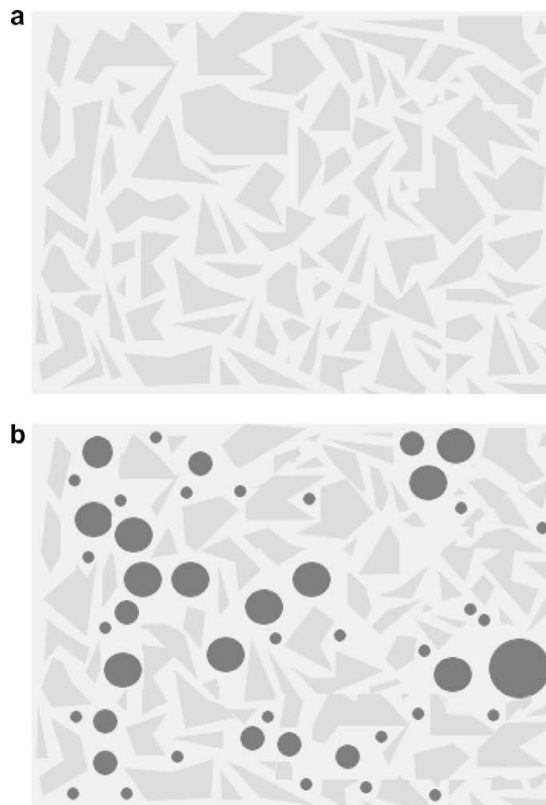
Obr. č. 15 – vliv velikosti částic skla na množství rozpuštěného SiO<sub>2</sub> (SiO<sub>2</sub> solubilised) v čase (time)

[39]

Cementové a struskové částice jsou nepravidelné a nejsou sférické, protože byly formovány mletím a drcením. Naproti tomu popílkové částice jsou sférické a přidávají se proto pro zlepšení reologie. Na jednu stranu sférické kulovité částice zmenšují viskozitu a napětí mezi částicemi díky tomu že se chovají jako kuličková ložiska. Na druhou stranu přítomnost sférických částic zvyšuje vodu potřebnou pro ovlhčení.

Další faktor z hlediska reologie je, že alkalické aktivační roztoky mají vyšší viskozitu než voda (obzvláště vodní sklo). Reologii také může ovlivňovat přímo chemismus dané látky. Je tedy zřejmé že geometrie částic má vliv na chování čerstvých past, které prochází alkalickou aktivací.

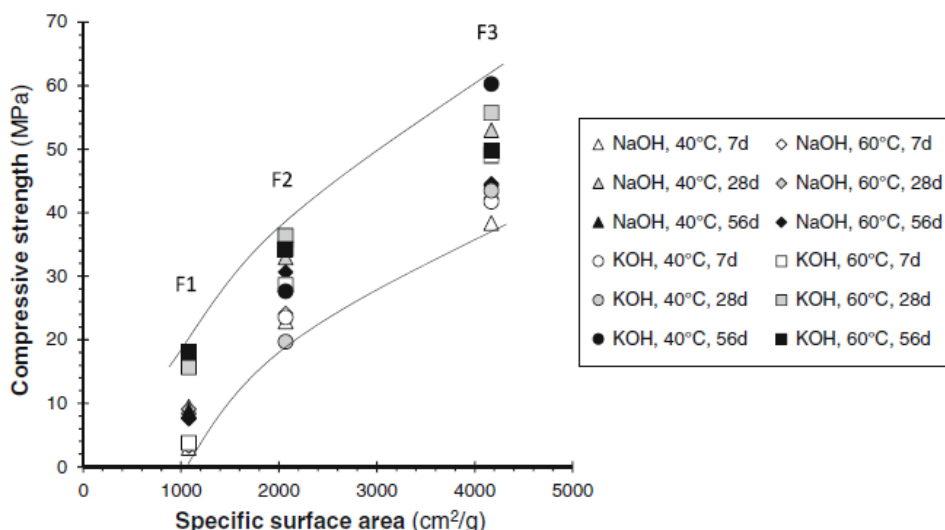
Nízký vodní součinitel je problém udržet u metakaolinu, přestože je jako prekurzor velmi rozšířený, má nevhodnou morfologii zrn. Zrna metakaolinu jsou plochá a hexagonální a svým tvarem připomínají ploché pláty, tudíž díky velkému povrchu je na jejich ovlhčení potřeba hodně vody. [26]



Obr. č. 16 – Rozdíl v morfologii zrn v kompozitu ze strusky (a) a v kompozitu z popílku a strusky (b)

[26]

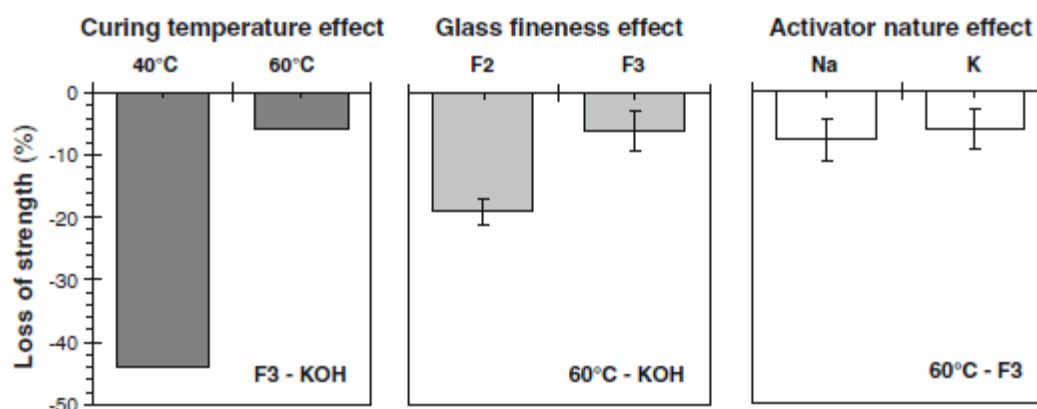
Také jemnost mletí má značný vliv na vývoj konečných vlastností geopolymérů. Čím větší je jemnost, tím větší jsou konečné pevnosti vzorku. Toto je pravidlem vždy a nezáleží na ostatních parametrech jako teplota zrání, typ a koncentrace aktivátoru atd. Je to dáno tím, že jemné částice jsou schopny se lépe rozpouštět v roztoku a reagovat, tím pádem dochází k vyšší tvorbě vazeb a tím k větším pevnostem. [3]



Obr. č. 17 – Pevnost v tlaku (compressive strength) alkalicky aktivovaného skla v závislosti na měrném povrchu skla (specific surface area) a na teplotě, době zrání a aktivátoru [3]

Jemnost skla hraje důležitou roli i u odolnosti vůči vodnímu prostředí, čím jemnější byly částice, tím menší ztráty pevnosti byly pozorovány.

Na obr. č. 18 potom lze na grafu vidět úbytky v pevnostech při vystavení vodnímu prostředí. Zde je vidět že největší vliv má zraje teplota poté jemnost skla a nejmenší vliv měl druh aktivátoru. [3]



Obr. č. 18 – ztráta pevnosti (loss of strength) při vystavení alkalicky aktivovaných skel vodnímu prostředí v závislosti na teplotě zrání (curing temperature), jemnosti skla glass fineness) a druhu aktivátoru (aktivátor nature) [3]

## 5.4. Odolnost alkalicky aktivovaných kompozitů

### 5.4.1. Odolnost vůči sulfataci

Autor H. Rashidian-Dezfouli et al. [40] zjistili, že pokud jsou vzorky vystaveny 5 % roztoku síranu sodného, tak vzorky z popílku nevykazují žádné známky porušení. U vzorků s odpadní sklem byly pozorovány defekty jako praskliny a vyluhování. Po 120 dnech v roztoku popílkové vzorky vykazovaly lehké zvýšení váhy, vzorky s odpadním sklem naopak vykazovaly úbytek váhy což značí nestabilitu v tomto roztoku. Vzorky s odpadním sklem vykazovaly mezi 7 a 28 dnů rapidní snížení pevnosti v tlaku, avšak po 28 dnech už ke snižování pevností nedocházelo. Na rozdíl od cementů, kde síranová koroze má velký vliv na vlastnosti betonu, u geopolymérů tato reakce nemá tak zásadní vliv na vlastnosti geopolymérů. [40]

Wei-Chien Wang et al. [41] zjistili, že největší hmotnostní úbytek vykazaly vzorky, které byly aktivovány 0,5 % roztokem. Nejlepší byly naopak vzorky, které byly aktivovány 1 % roztokem. Toto je způsobeno tím, že v 0,5 % roztoku se prekurzory rozkládaly pomaleji než v 1 % roztoku, a to má za následek vyšší pórovitost, která snižuje odolnost vůči sulfataci. Z grafu lze také vidět, že vzorky s odpadním sklem vykazovaly vyšší odolnost vůči sulfataci, protože obsahovaly křemík a hliník ze skla, který měl za následek lepší a rychlejší polymerační reakci, a tudíž matrice byla více kompaktnější. [41]

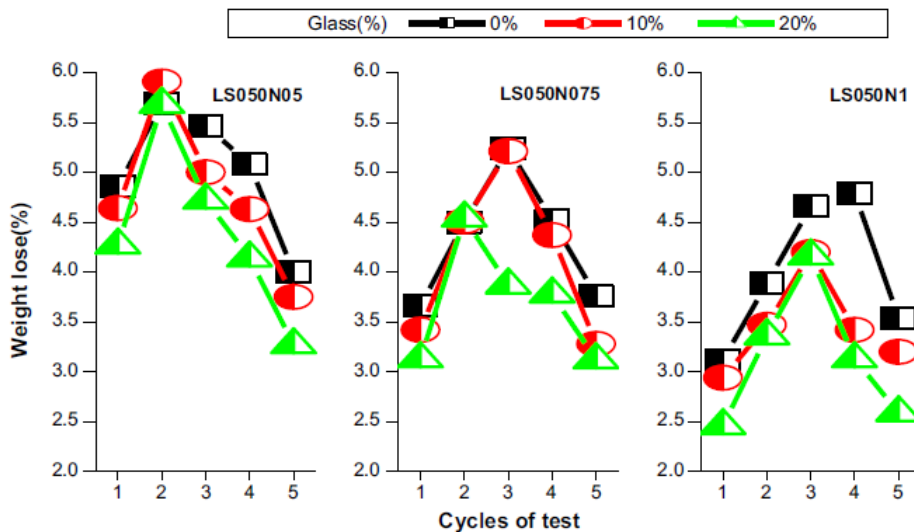


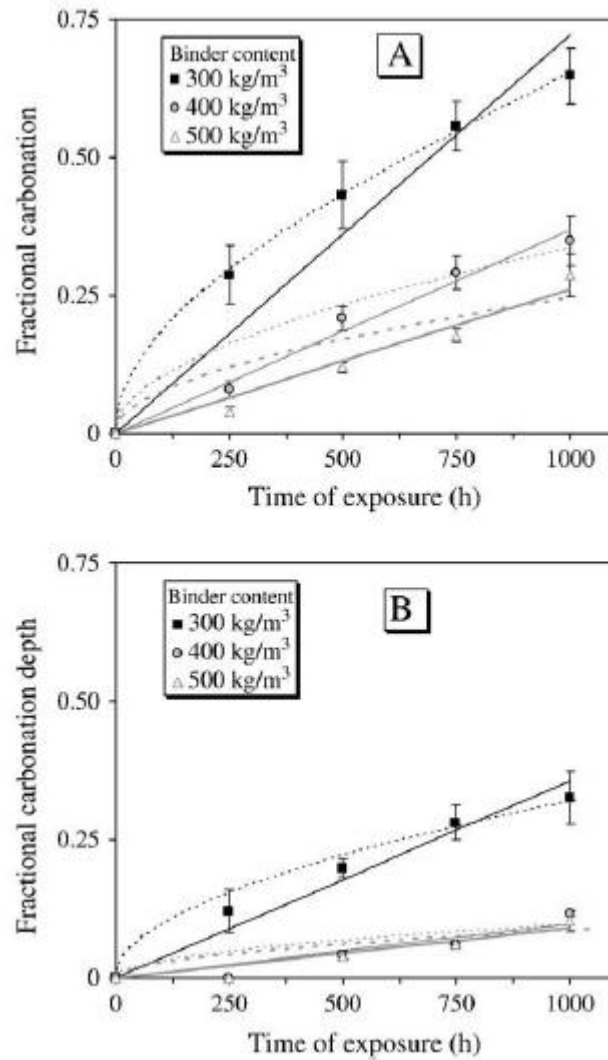
Fig. 13. Sulfate attack of AAWGM and the amount of glass.

Obr. č. 19 – hmotnostní úbytek (weight loss) u alkalicky aktivovaných kompozitů s odpadním sklem při sulfataci [41]

## 5.4.2. Odolnost vůči karbonatoci

Karbonatace je vážný problém u betonů s portlandským cementem.  $\text{CO}_2$  z atmosféry proniká dovnitř struktury a rozkládá se v obsažené vodě a vzniká kyselina uhličitá. Ta potom může napadat fáze, které obsahují Ca. Jako první se rozkládá  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , potom C - S - H a C - A - S - H gely. Tento jev má za následek snižování pH, které vede ke ztrátě alkality. U alkalicky aktivovaných pojiv jsou hlavní reakční produkty C - A - S - H gely, tudíž se při vystavení působení  $\text{CO}_2$  dají očekávat karbonáty, především kalcit a trona. Z obrázku č. 20 lze vidět že, Karbonatace u AAM je vyšší než u OPC při stejné dávce pojiva. Může to být způsobeno jiným průběhem karbonatace u AAM než u OPC. Obr. A, reprezentuje AAM a obrázek B, portlandský cement, přerušovaná čára znázorňuje difuzní model a plná čára chemicky – reakční model. Lze vidět že u AAM se karbonatace zmenšuje se zvyšující se dávkou pojiva, na rozdíl od cementu, kdy průběh karbonatace pro  $400 \text{ kg/m}^3$  a  $500 \text{ kg/m}^3$  je skoro stejný, toto může být způsobeno mikrotrhlinami v cementovém vzorku které znemožnily lepší výsledky. Odolnost vůči karbonatoci

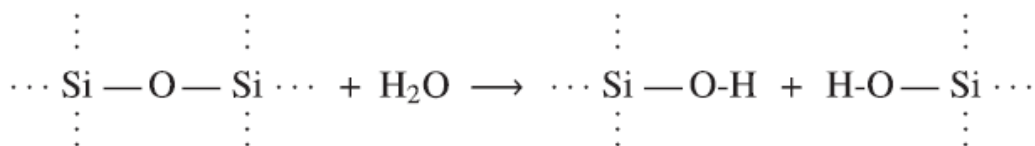
je ale pořád citelně lepší u cementových vzorků. Co se týče AAM materiálů bude se muset provést další výzkum a navrhnout lepší receptury pro snížení karbonatace. [33]



Obr. č. 20 – hloubka Karbonatace (fractional carbonation depth) v závislosti na množství pojiva (binder content) a době působení (time of exposure) alkalicky aktivovaných materiálů (a) nebo cementu (b) [33]

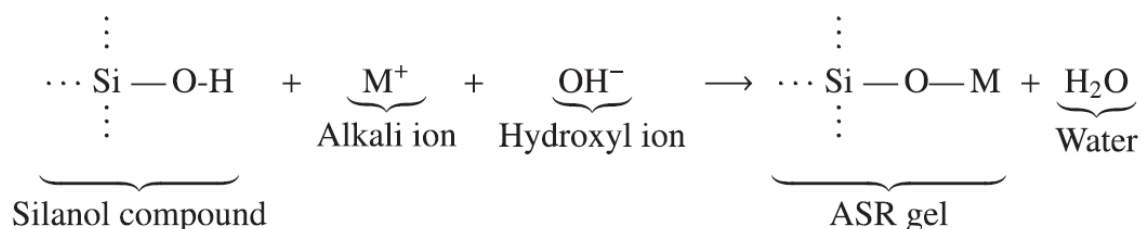
### 5.4.3. Odolnost vůči ASR (alkalicko - křemičité reakci)

Degradační proces u alkalicko - křemičité reakce je silně závislý na teplotě a začíná rozložením siloxanů na silanoly kvůli přítomnosti hydroxidových iontů.



Obr. č. 21 – rozklad struktury u alkalicky aktivovaných materiálů [42]

Následně, alkalické ionty uvolněné z matrice ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) naruší silanolové skupiny a vytvoří hydrofilní gel, který začne zvětšovat objem, jak absorbuje vodu.



Obr. č. 22 – tvorba ASR gelu u alkalicky aktivovaných materiálů [42]

Z hlediska alkalicko - křemičité reakce je pro popílkové kompozity optimální koncentrace  $\text{NaOH}$  8M. Vyšší koncentrace vedly ke snižování pevností. Pokud se koncentrace zvyšovala nad 8 M tak se zvyšovala i pórovitost systému. Expanze pro koncentraci 8 M je skoro nulová. Primární role hydroxylových iontů v alkalicky aktivovaných popílkových roztocích je rozložení a uvolnění silikátů a aluminátů, zatímco alkalické kationty vyvažují negativní náboje čtyřvazného hliníku a stávají se součástí alkalického aluminosilikátového gelu. Dle předpokladu tedy volné alkálie, které už nejsou potřeba pro kompletní polymeraci jsou volně rozmístěné v pórech roztoku, kde jsou potom jejich náboje vyvažovány hydroxylovými ionty. [43]

U popílků záleží také na množství alkalického roztoku a na množství  $\text{Na}_2\text{O}$ , tyto dva parametry významně ovlivňují výsledné vlastnosti geopolymérů. Pevnost v tlaku se zvyšuje s množstvím  $\text{Na}_2\text{O}$ , zatímco čím vyšší poměr  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , tak tím lepší

pevnosti v tlaku. Co se týče smrštění popílkových vzorků, tak to je větší než u obyčejných cementových malt. Zvýšením dávky  $\text{Na}_2\text{O}$  však můžeme u popílkových malt toto smrštění redukovat, stejně jako porozitu. [44]

U struskových kompozitů lze předpokládat stejné příčiny vzniku alkalicko - křemičité reakce jako u popílkových kompozitů - tj. příliš vysoká koncentrace a volné alkálie, které nebyly třeba pro kompletní polymeraci budou způsobovat alkalicko - křemičitou reakci.

U alkalicky aktivovaného skla bylo dokázáno, že pokud se velikost částic pohybuje do 0,3 mm, nedochází k ASR skoro vůbec. Přitom jemnější zrna by měla mít větší měrný povrch který umožňuje rychlejší průběh ASR, avšak pokud je velikost částic dostatečně malá začnou se projevovat pucolánové vlastnosti skel, které vedou k tvorbě C-S-H gelů. Tato kritická hranice se liší od druhů skel, to je dáno zřejmě odlišným chemickým složením skel, přičemž zelené sklo má menší odolnost vůči alkáliím. [45]

## **5.5. Environmentální dopady alkalicky aktivovaných aluminosilikátových kompozitů**

Nejvíce kritický faktor, který určuje environmentální dopad alkalicky aktivovaných materiálů je dávka aktivátoru. Je to také nejdražší položka v každé receptuře AAM. AAM založené na popílku vykazují o 45 % méně emisí  $\text{CO}_2$ , než beton s portlandským cementem. AAM s vysokopecní struskou vykazují také méně emisí, avšak AMM s metakaolinem naopak vykazují vyšší globální emise, než portlandský cement kvůli potřebě vyšší dávky aktivátoru a kvůli tomu, že metakaolin je na rozdíl od ostatních AAM vyráběn výpalem při 800 °C. [46]

## Experimentální část

### 1. Cíle a metodika práce

V experimentální části práce bylo cílem vyrobit alkalicky aktivované materiály s různým množstvím příměsí a různou jemností mletí odpadního skla. Experimentální část byla rozdělena na 2 etapy.

V první etapě se připravovaly pasty s prekurzory struskou a popílkem a různě mletým odpadním sklem. Pro aktivaci se použilo vodní sklo s různým křemičitým modulem a NaOH s různou koncentrací. Cílem první etapy bylo zjistit, jak reagují popílek a strusky s jinými typy aktivátorů a s jinak mletým odpadním sklem a následně vybrat receptury, které dosáhnou nejlepších pevností.

Ve druhé etapě experimentální části se vyhodnotily výsledky z první etapy a následně byly vybrány a připraveny malty z těch receptur, které dosáhly nejlepších vlastností. Cílem potom bylo zjistit pevnosti a mikrostrukturu těchto materiálů a dále jak ovlivňuje jemnost mletí odpadního skla tyto vlastnosti.

### 2. Použité materiály

#### 2.1. Popílek

Pro přípravu vzorků byl použit popílek z tepelné elektrárny Dětmarovice. Jeho chemické složení je potom uvedeno v tabulce č. 1.

Tab. č. 1 - chemické složení popílku

Složení	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S <sub>total</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
%	49,82	24,67	7,50	3,91	2,68	0,91	0,70	2,78

#### 2.2. Struska

Pro přípravu vzorků byla použita struska SMŠ 380 od výrobce KOTOUČ ŠTRAMBERK, jejíž měrný povrch byl 384 m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup> (Blaine). Chemické složení strusky je uvedeno v tabulce č. 2.

Tab. č. 2 – chemické složení strusky

Složení	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
%	39,66	40,12	9,50	6,45	0,47	0,72	0,65	0,33	0,55

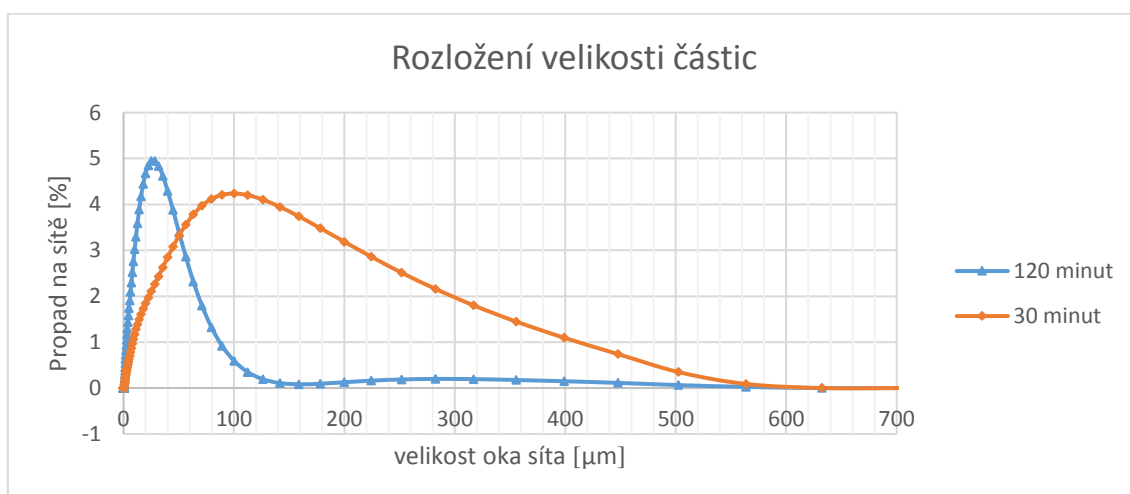
## 2.3. Sklo

Co se týká skla, tak bylo použito odpadní sklo od společnosti Remat glass, která se zabývá recyklací odpadního skla. Toto odpadní sklo se dále nepoužívá pro recyklaci ani žádnou jinou výrobu. Sklo byla směs odpadního skla, keramiky, malého množství kovu a plastů. Chemické složení je potom zobrazeno v tabulce č. 3. Sklo bylo mleto v kulovém mlýně po dobu 30 a 120 minut. Velikost částic po 30 a 120 minutách lze vidět na grafu č.1.

Tab. č. 3 – chemické složení odpadního skla

Prvek	Hodnota	Jednotka
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,88	%
SiO <sub>2</sub>	68,04	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,49	%
CaO	9,56	%
MgO	2,54	%
Na <sub>2</sub> O	15,41	%
TiO <sub>2</sub>	0,10	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	%
MnO	0,38	%
SO <sub>3</sub>	0,15	%

Graf č. 1 – rozložení a velikost částic odpadního skla



## 2.4. Vodní sklo

Vodní sklo bylo použito jako jeden z alkalických aktivátorů. Jako základní vodní sklo se použilo vodní sklo VS 1,6 od společnosti Vodní sklo a. s. Z tohoto vodního skla se dále připravovalo za pomoci NaOH vodní sklo o různých křemičitých modulech. Moduly vodního skla byly použity 1,6; 1,0 a 0,5.

## 3. Složení směsí pro výrobu alkalicky aktivovaných aluminosilikátových materiálů

Jak již bylo uvedeno výše, experimentální část se skládá ze dvou etap. V tabulce č. 4 - 7 jsou uvedeny receptury pro první etapu a v tabulce č. 8 jsou uvedeny receptury pro druhou etapu.

Tab. č. 4 – Složení a označení receptur (I. etapa)

OZNAČENÍ	Sklo	Pojivo	Aktivátor	voda
S - REF - VS 1,6 (80)	0	180	144	0
S - 25 - VS 1,6 (80) - 30 min	45	135	144	0
S - 75 - VS 1,6 (80) - 30 min	135	45	144	0
S - 25 - VS 1,6 (80) - 120 min	45	135	144	0
S - 75 - VS 1,6 (80) - 120 min	135	45	144	0
S - REF - VS 1,6 (40)	0	180	72	26
S - 25 - VS 1,6 (40) - 30 min	45	135	72	21
S - 75 - VS 1,6 (40) - 30 min	135	45	72	17
S - 25 - VS 1,6 (40) - 120 min	45	135	72	23
S - 75 - VS 1,6 (40) - 120 min	135	45	72	21
P - REF - VS 1,6 (80)	0	180	144	0
P - 25 - VS 1,6 (80) - 30 min	45	135	144	0
P - 75 - VS 1,6 (80) - 30 min	135	45	144	0
P - 25 - VS 1,6 (80) - 120 min	45	135	144	0
P - 75 - VS 1,6 (80) - 120 min	135	45	144	0
P - REF - VS 1,6 (40)	0	180	72	20
P - 25 - VS 1,6 (40) - 30 min	45	135	72	20
P - 75 - VS 1,6 (40) - 30 min	135	45	72	19
P - 25 - VS 1,6 (40) - 120 min	45	135	72	19
P - 75 - VS 1,6 (40) - 120 min	135	45	72	19

Tab. č. 5 – Složení a označení receptur (I. etapa)

OZNAČENÍ	Sklo	Pojivo	Aktivátor	voda
S - REF - VS 1,0 (80)	0	180	144	6
S - 25 - VS 1,0 (80) - 30 min	45	135	144	5
S - 75 - VS 1,0 (80) - 30 min	135	45	144	5
S - 25 - VS 1,0 (80) - 120 min	45	135	144	6
S - 75 - VS 1,0 (80) - 120 min	135	45	144	5
S - REF - VS 1,0 (40)	0	180	72	31
S - 25 - VS 1,0 (40) - 30 min	45	135	72	28
S - 75 - VS 1,0 (40) - 30 min	135	45	72	25
S - 25 - VS 1,0 (40) - 120 min	45	135	72	30
S - 75 - VS 1,0 (40) - 120 min	135	45	72	30
P - REF - VS 1,0 (80)	0	180	144	2
P - 25 - VS 1,0 (80) - 30 min	45	135	144	1
P - 75 - VS 1,0 (80) - 30 min	135	45	144	0
P - 25 - VS 1,0 (80) - 120 min	45	135	144	2
P - 75 - VS 1,0 (80) - 120 min	135	45	144	2
P - REF - VS 1,0 (40)	0	180	72	18
P - 25 - VS 1,0 (40) - 30 min	45	135	72	20
P - 75 - VS 1,0 (40) - 30 min	135	45	72	21
P - 25 - VS 1,0 (40) - 120 min	45	135	72	22
P - 75 - VS 1,0 (40) - 120 min	135	45	72	24

Tab. č. 6 – Složení a označení receptur (I. etapa)

OZNAČENÍ	Sklo	Pojivo	Aktivátor	voda
S - REF - VS 0,5 (80)	0	180	144	16
S - 25 - VS 0,5 (80) - 30 min	45	135	144	50
S - 75 - VS 0,5 (80) - 30 min	135	45	144	50
S - 25 - VS 0,5 (80) - 120 min	45	135	144	60
S - 75 - VS 0,5 (80) - 120 min	135	45	144	60
S - REF - VS 0,5 (40)	0	180	72	30
S - 25 - VS 0,5 (40) - 30 min	45	135	72	50
S - 75 - VS 0,5 (40) - 30 min	135	45	72	55
S - 25 - VS 0,5 (40) - 120 min	45	135	72	55
S - 75 - VS 0,5 (40) - 120 min	135	45	72	55
P - REF - VS 0,5 (80)	0	180	144	60
P - 25 - VS 0,5 (80) - 30 min	45	135	144	60
P - 75 - VS 0,5 (80) - 30 min	135	45	144	60
P - 25 - VS 0,5 (80) - 120 min	45	135	144	60
P - 75 - VS 0,5 (80) - 120 min	135	45	144	60
P - REF - VS 0,5 (40)	0	180	72	50
P - 25 - VS 0,5 (40) - 30 min	45	135	72	50
P - 75 - VS 0,5 (40) - 30 min	135	45	72	50
P - 25 - VS 0,5 (40) - 120 min	45	135	72	50
P - 75 - VS 0,5 (40) - 120 min	135	45	72	50

Tab. č. 7 – Složení a označení receptur (I. etapa)

OZNAČENÍ	Sklo	Pojivo	Aktivátor	voda
S - REF - Na10	0	180	85	4
S - 25 - Na10 - 30 min	45	135	85	2
S - 75 - Na10 - 30 min	135	45	85	0
S - 25 - Na10 - 120 min	45	135	85	3
S - 75 - Na10 - 120 min	135	45	85	3
S - REF - Na5	0	180	85	2
S - 25 - Na5 - 30 min	45	135	85	0
S - 75 - Na5 - 30 min	135	45	85	0
S - 25 - Na5 - 120 min	45	135	85	0
S - 75 - Na5 - 120 min	135	45	85	0
P - REF - Na5	0	180	85	0
P - 25 - Na10 - 30 min	45	135	85	0
P - 75 - Na10 - 30 min	135	45	85	0
P - 25 - Na10 - 120 min	45	135	85	0
P - 75 - Na10 - 120 min	135	45	85	0
P - REF - Na5	0	180	85	0
P - 25 - Na5 - 30 min	45	135	85	0
P - 75 - Na5 - 30 min	135	45	85	0
P - 25 - Na5 - 120 min	45	135	85	0
P - 75 - Na5 - 120 min	135	45	85	0

Tab. č. 8 – Složení a označení receptur (II. etapa)

OZN	Surovina	sklo	aktivátor	voda
S - REF	450	0	180	115
S25 - VS - 30 min	337,5	112,5		117
S50 - VS - 30 min	225	225		119
S75 - VS - 30 min	112,5	337,5		129
S25 - VS - 120 min	337,5	112,5		125
S50 - VS - 120 min	225	225		120
S75 - VS - 120 min	112,5	337,5		122
P - REF	450	0	360	20
P25 - VS - 30 min	337,5	112,5		20
P50 - VS - 30 min	225	225		19
P75 - VS - 30 min	112,5	337,5		17
P25 - VS - 120 min	337,5	112,5		20
P50 - VS - 120 min	225	225		19
P75 - VS - 120 min	112,5	337,5		18
S - Na5	450	0	212,5	30
S25 - Na5 - 30 min	337,5	112,5		
S50 - Na5 - 30 min	225	225		
S75 - Na5 - 30 min	112,5	337,5		
S25 - Na5 - 120 min	337,5	112,5		
S50 - Na5 - 120 min	225	225	212,5	30
S75 - Na5 - 120 min	112,5	337,5		
S - Na10	450	0		
S25 - Na10 - 30 min	337,5	112,5	212,5	45
S50 - Na10 - 30 min	225	225		40
S75 - Na10 - 30 min	112,5	337,5		40
S25 - Na10 - 120 min	337,5	112,5		46
S50 - Na10 - 120 min	225	225		48
S75 - Na10 - 120 min	112,5	337,5		49

#### 4. Příprava a ošetřování vzorků

V první etapě se připravovaly z alkalicky aktivovaných materiálů pasty. Na tyto pasty byly použity trojformy o rozměru jednoho tělesa 20 x 20 x 100 mm. Pasty se připravovaly ručně. Nejprve se do nádoby navážilo vodní sklo, do něho se nasypaly

ostatní suroviny a následně se rozmíchaly. Voda byla přidávána až nakonec dle potřeby tak, aby bylo dosaženo optimální konzistence. Takto rozmíchanou směsí byla ručně naplněna trojforma na trámce o rozměru trámce 20 x 20 x 100 mm. Vzorky byly poté lehce zhutněny poklepáním formy a přikryty PE fólií, aby se zabránilo úniku vlhkosti. Po dostatečném zatuhnutí byly vzorky odformovány a uloženy v laboratorním prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 99 %.

Ve druhé etapě se připravovaly ze surovin malty. Na tyto vzorky se použila trojforma která měla rozměry jednoho tělesa 40 x 40 x 160 mm. Tyto malty se skládaly z aktivátoru, prekurzoru, normového písku a vody. Nejdřív se do nádoby odvážil prekurzor, odpadní sklo a aktivátor, tyto suroviny se zamíchaly a přidalo se trochu vody, aby se směs důkladně promíchala. Potom se začal přidávat normový písek od nejjemnější frakce po nejhrubší, nakonec se přidala voda, aby se dosáhlo požadované konzistence. Tato směs se plnila po polovinách do formy a byla zhutněna na vibračním stole. Forma se poté přikryla PE fólií, aby bylo zabráněno rychlému odpařování vody a byla uložena v laboratorním prostředí, dokud vzorky neztuhly, následně se formy odformovaly a vzorky byly uloženy v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 99 %.

## **5. Provedené zkoušky a zkušební metody**

V první etapě se u vzorků po 14 dnech zjišťovala pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku.

Ve druhé etapě byly trámce po 14 a 28 dnech vyjmuty z laboratorního prostředí a poté se změřily a zvážily. Pak byly provedeny tyto zkoušky: pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a z rozměrů byla vypočtena objemová hmotnost. Dále byla na jednom z úlomků sady zjišťována struktura pomocí snímkování elektronovým rastrovacím mikroskopem a DTA analýza.

## 5.1. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena pomocí zkušební lisu. Způsob zatěžování byl tříbodovým ohybem. Trámec se uložil na dvě podpory vzdálené 80 nebo 100 mm (v závislosti na rozměru tělesa) kolmo na směr hutnění. Zatěžovací síla působila uprostřed vzorku skrze válcové těleso. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena dle vztahu:

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Kde:

R <sub>f</sub>	pevnost v tahu za ohybu
F	nejvyšší síla dosažená při porušení vzorku
l	vzdálenost podpor
b	šířka zkušební tělesa
h	výška zkušební tělesa

## 5.2. Zkouška pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušená pomocí stejného zkušební lisu jako pevnost v tahu za ohybu, pouze se vyměnil zkušební prostředek pro stanovení pevnosti v tlaku. Zkušební těleso bylo uloženo kolmo na směr hutnění a bylo namáháno tlakem o dané zatěžovací ploše 400 nebo 1600 mm<sup>2</sup> (v závislosti na rozměrech zkušební tělesa). Pevnost v tlaku poté bylo vypočtena ze vztahu:

$$R_c = \frac{F}{A}$$

Kde:

R <sub>c</sub>	pevnost v tlaku [MPa]
F	nejvyšší dosažené zatížení při porušení [N]
A	zatěžovací plocha [mm <sup>2</sup> ]

### **5.3. REM analýza (Snímkovací elektronový mikroskop)**

Mikrostruktura byla zjišťována na vysušených vzorcích pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu značky Tescan Mira3.

### **5.4. DTA analýza**

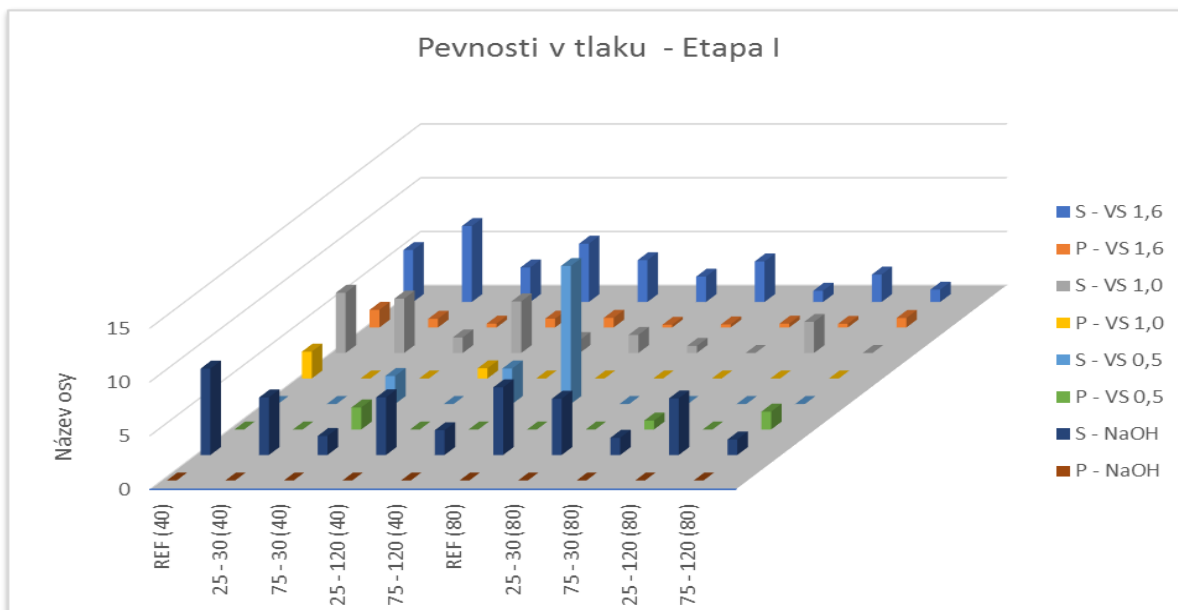
Diferenční termická analýza je dynamická, tepelně analytická metoda založená na měření rozdílů teplot mezi zkoušeným vzorkem a inertním standardem současně zahřívány v peci měřicího přístroje. V našem případě byla analýza provedena na přístroji značky Netzsch sta 2500, který používá skutečný inertní standart - korund. Výstupem této analýzy je graf křivky DTA a TG ze kterých se potom určují změny probíhající v materiálu při zvyšování teploty. [47]

# Diskuze a výsledky

## I. ETAPA

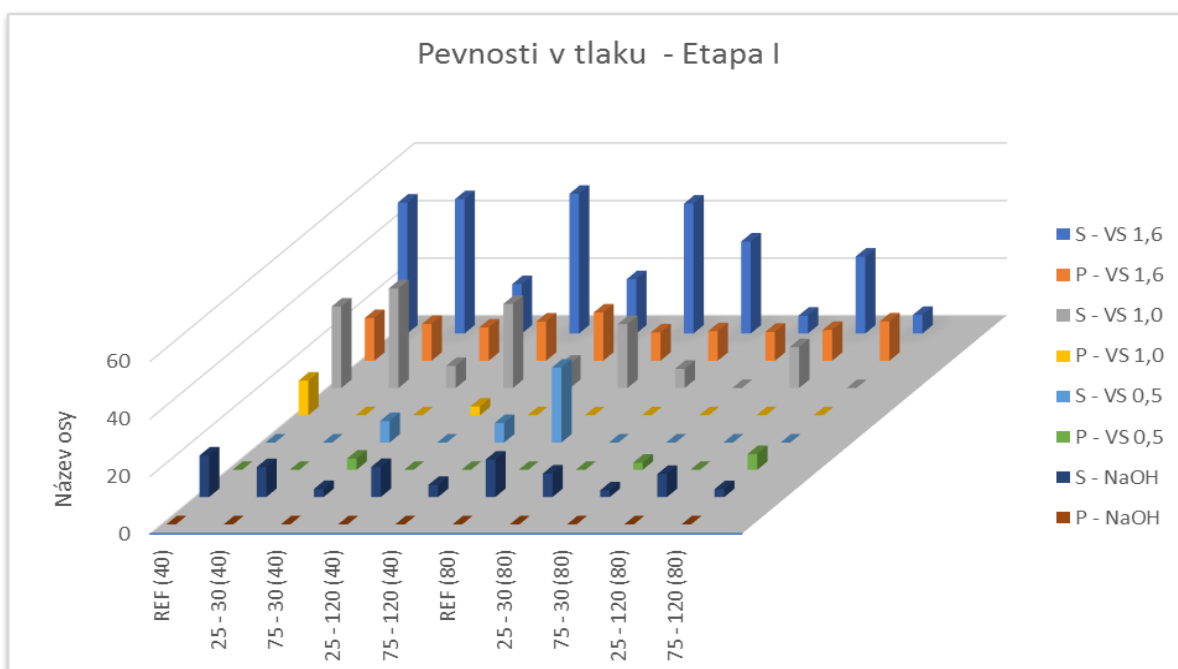
### 5.5. Pevnost v tahu za ohybu

Graf č. 2 – Souhrnné pevnosti v tahu za ohybu I. Etapy



### 5.6. Pevnost v tlaku

Graf č.3 – Souhrnné pevnosti v tlaku I. Etapy



Jak lze vidět z grafu č. 1 a 2, tak nejvyšších pevností dosáhly vzorky ze strusky aktivované vodním sklem o křemičitém modulu 1,6 a o koncentraci aktivátoru 40 %. Druhé byly struskové vzorky, aktivované stejným aktivátorem ale o koncentraci 80 %. Druhých nejvyšších pevností dosáhly struskové vzorky aktivované vodním sklem o křemičitém modulu 1,0. U těchto vzorků však docházelo k větším poklesům pevností s rostoucím množstvím odpadního skla. Velmi dobře dopadly popílkové vzorky aktivované vodním sklem o modulu 1,6, u kterých se s přidáním množstvím odpadního skla pevnosti zvyšovaly oproti referenčním vzorkům. Nižších pevností dosáhly vzorky aktivované NaOH. U vzorků aktivovaných vodním sklem o modulu 0,5 docházelo po přidání aktivátoru k tak rychlé reakci, že vzorky skoro nebylo možné naplnit do forem, tato reakce probíhala v řádu desítek sekund. U tohoto aktivátoru by bylo vhodné příště užít regulátor tuhnutí. Popílkové vzorky reagovaly pouze v přítomnosti vodního skla o modulu 1,6 jinak jejich pevnosti byly malé či vůbec netuhly. Z těchto vzorků se vybraly do druhé etapy 4 záměsy, ze kterých se namíchala malta s plnivem. Vybrané byly tyto záměsy: S – VS 1,6 (40); P – VS 1,6 (80), S – NaOH (5) a S – NaOH (10).

## II. ETAPA

### 5.7. Objemová hmotnost

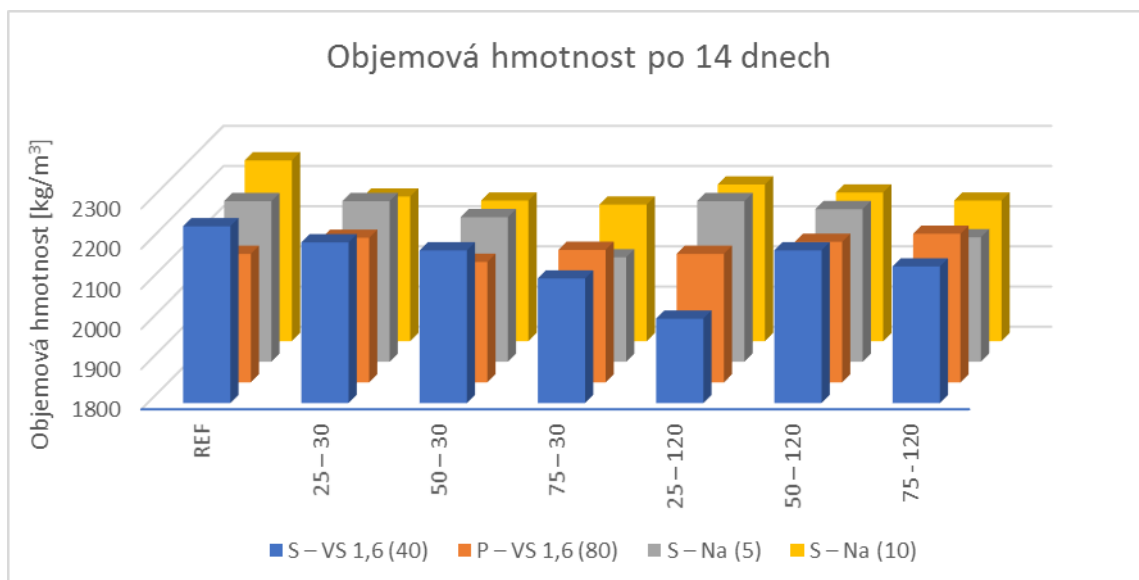
V tabulkách č. 9 a 10 jsou uvedeny objemové hmotnosti vzorků po 14 a 28 dnech. Při pohledu do tabulky č. 9 lze vidět, že nejvyšší objemové hmotnosti dosáhl vzorek S – Na (10) – REF, tedy vzorek ze strusky aktivovaný 10 molárním roztokem NaOH bez přídavku skla. U všech sad vzorků docházelo s rostoucím množstvím přidaného skla ke snižování objemové hmotnosti, toto platí pro sklo, které bylo mleté 30 minut – tudíž hrubší sklo. Naopak pro sklo, které bylo mleté 120 minut dochází k opačnému trendu. Tudíž lze říci že hruběji mleté sklo mělo větší částice než prekurzory, ke kterým bylo přidáváno, což mělo za následek větší množství

pórů a tím pádem snížení objemové hmotnosti, naopak sklo, které bylo mleté 120 minut, mělo pravděpodobně menší velikost částic než prekurzory struska a popílek. To mělo za následek snížení pórovitosti a tím pádem zvyšování objemové hmotnosti. Výjimkou byly ale směsi aktivované NaOH, tam se zvyšujícím se podílem skla objemová hmotnost klesala.

Tab. č. 9 – objemová hmotnost vzorků po 14 dnech

Označení	REF	25 – 30	50 – 30	75 – 30	25 – 120	50 – 120	75 – 120
S – VS 1,6 (40)	2240	2200	2180	2110	2010	2180	2140
P – VS 1,6 (80)	2120	2160	2100	2130	2120	2150	2170
S – Na (5)	2200	2200	2160	2060	2200	2180	2110
S – Na (10)	2250	2160	2150	2140	2190	2170	2150

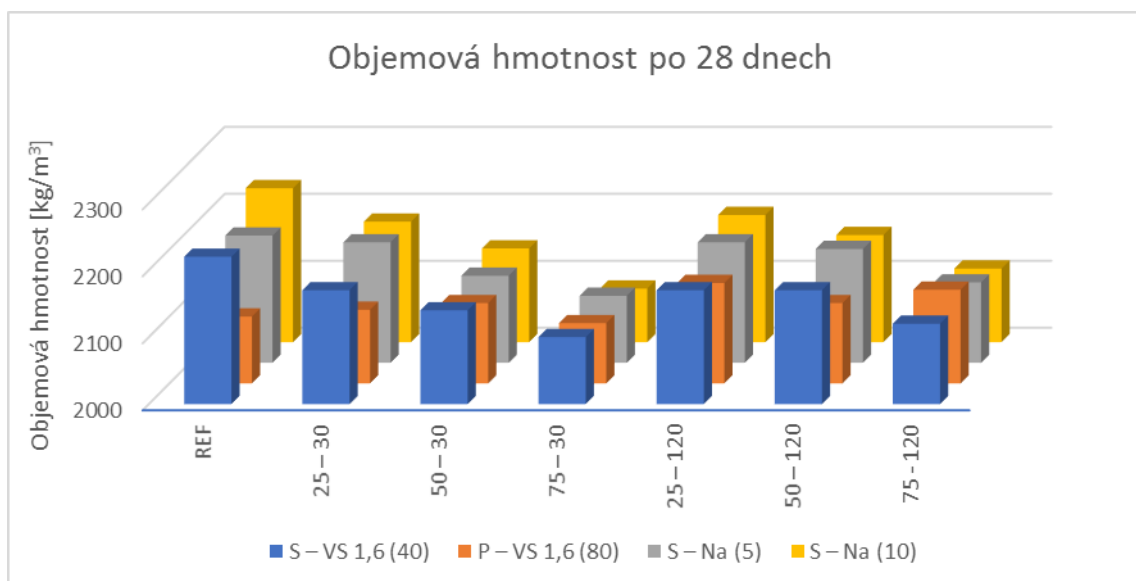
Graf č. 4 - objemová hmotnost vzorků po 14 dnech



Tab. č. 10 – objemová hmotnost vzorků po 28 dnech

Označení	REF	25 – 30	50 – 30	75 – 30	25 – 120	50 – 120	75 – 120
S – VS 1,6 (40)	2220	2170	2140	2100	2170	2170	2120
P – VS 1,6 (80)	2100	2110	2120	2090	2150	2120	2140
S – Na (5)	2190	2180	2130	2100	2180	2170	2120
S – Na (10)	2230	2180	2140	2080	2190	2160	2110

Graf č. 5 - objemová hmotnost vzorků po 28 dnech



## 5.8. Pevnost v tahu za ohybu

U pevnosti v tahu za ohybu dosáhly nejvyšších pevností vzorky ze strusky aktivované vodním sklem o křemičitém modulu 1,6. U vodního skla lze taky z grafu č. 6 vyčíst, že u jemněji mletého skla (120 minut) docházelo k nárstu pevností mezi 14. a 28. dnem a u hruběji mletého skla (30 minut), není tento jev tak patrný. Toto nasvědčuje domněnce, že jemně mleté sklo je schopno reagovat a tvořit reakční produkty, naopak hrubější zrna skla nejsou schopna se rozkládat a tvořit reakční produkty. Co se týče strusky aktivované NaOH, ať už 5 nebo 10 molárním, (grafy č. 8 a 9), tak s přidavkem skla se pevnosti snižovaly u obou koncentrací. Dále lze vidět, že u NaOH nedochází k nárstu pevností mezi 14. a 28. dnem zrání u vzorků s přidavkem skla, a že jemnost mletí zde nehraje velkou roli na výsledné pevnosti. U popílkových vzorků lze na grafu č. 7 vidět že, zde dochází s přidavkem skla ke zvyšování pevností mezi 14. a 28. dnem nehledě na jemnost mletí skla. U jemněji mletého skla také docházelo k většímu nárstu pevností oproti hruběji mletému sklu, přičemž vzorky s 50 a 75 % náhradou skla měly dvakrát větší pevnosti oproti referenčnímu vzorku.

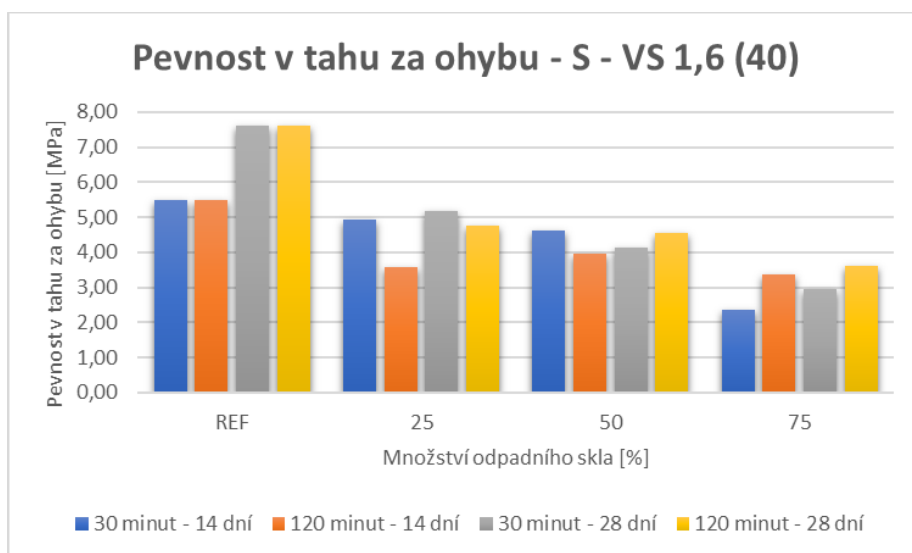
Tab. č. 11 – Pevnosti v tahu za ohybu po 14 dnech

Označení	REF	25 – 30	50 – 30	75 – 30	25 – 120	50 – 120	75 - 120
S – VS 1,6 (40)	5,49	4,92	4,63	2,34	3,56	3,95	3,38
P – VS 1,6 (80)	1,21	0,82	0,64	0,57	1,01	1,36	1,46
S – Na (5)	4,65	4,47	2,43	1,02	3,99	2,43	1,38
S – Na (10)	5,81	3,12	2,41	1,57	3,86	2,74	1,68

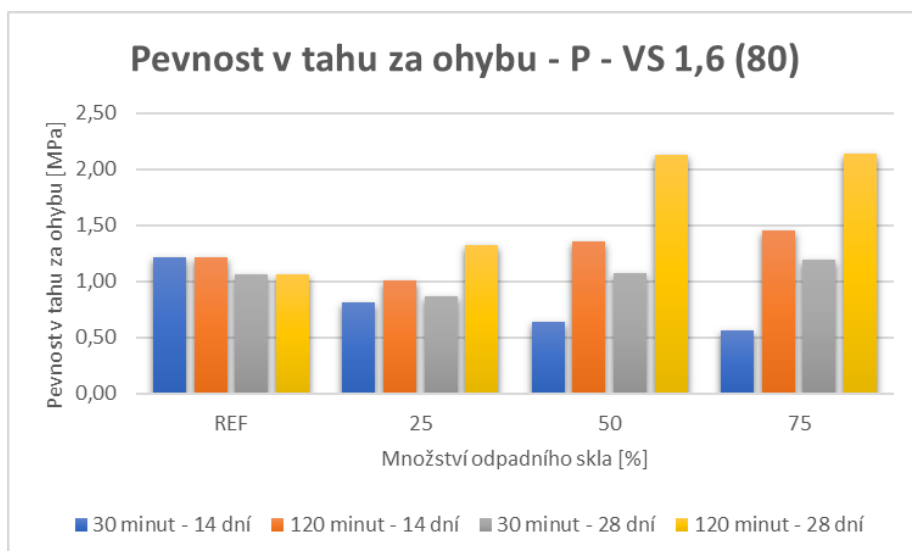
Tab. č. 12 – Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

Označení	REF	25 – 30	50 – 30	75 – 30	25 – 120	50 – 120	75 - 120
S – VS 1,6 (40)	7,60	5,18	4,14	2,95	4,77	4,55	3,61
P – VS 1,6 (80)	1,07	0,87	1,08	1,19	1,32	2,13	2,14
S – Na (5)	4,91	4,41	2,51	0,86	4,60	2,65	1,20
S – Na (10)	5,51	4,25	2,76	1,65	3,71	2,68	1,88

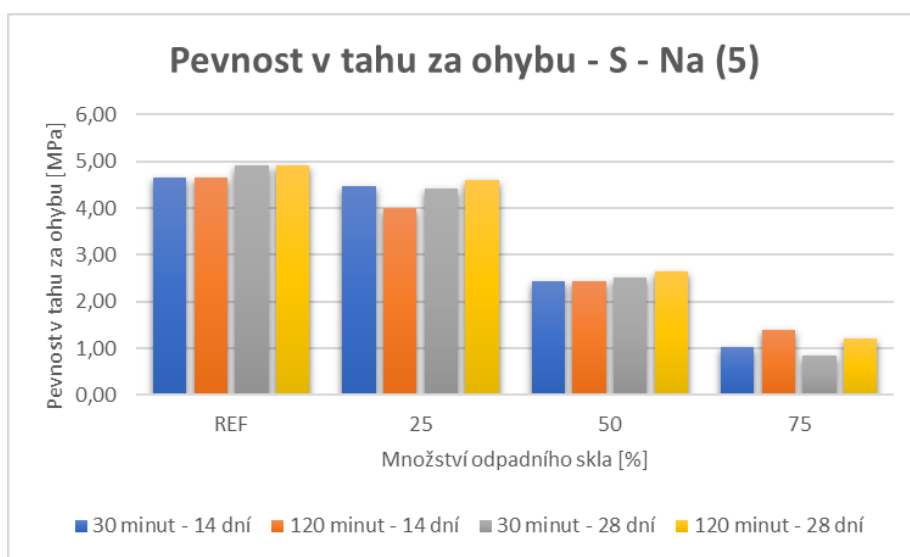
Graf č. 6 – pevnost v tahu za ohybu S – VS 1,6 (40)



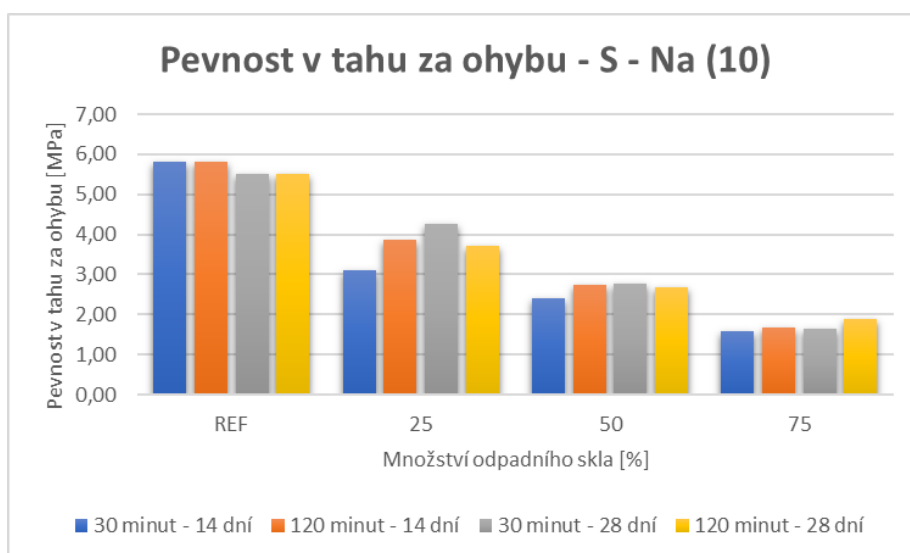
Graf č. 7 – pevnost v tahu za ohybu



Graf č. 8 - pevnost v tahu za ohybu



Graf č. 9 - pevnost v tahu za ohybu



## 5.9. Pevnost v tlaku

Pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulkách č. 13 a 14. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosáhl vzorek S – VS 1,6 (40) – REF, tedy vzorek ze strusky aktivovaný vodním sklem bez přídavku skla. Na grafu č. 10 lze pak vidět struskové vzorky aktivované vodním sklem, je zajímavé že u těchto vzorků je pevnost po 28 dnech horší než po 14 dnech s výjimkou referenčních vzorků. Také s rostoucím množstvím odpadního skla se pevnosti zhoršují. U struskových vzorků aktivovaných NaOH (grafy č. 12 a 13), pevnosti s rostoucím množstvím odpadního skla klesají. Dále lze vidět, že u hruběji mletého skla se pevnosti mezi 14. a 28. dnem mírně zlepšují, zatímco u jemněji

mletého skla se pevnosti mezi 14. a 28. dnem zhoršují. U popílkových vzorků (graf č. 11), se pevnosti s rostoucím množstvím přidaného skla zvyšují. Lze také vidět, že u jemněji mletého skla dochází k většímu nárustu pevností, z čehož vyplývá že jemněji mleté sklo lépe reagovalo a bylo schopné vytvořit reakční produkty.

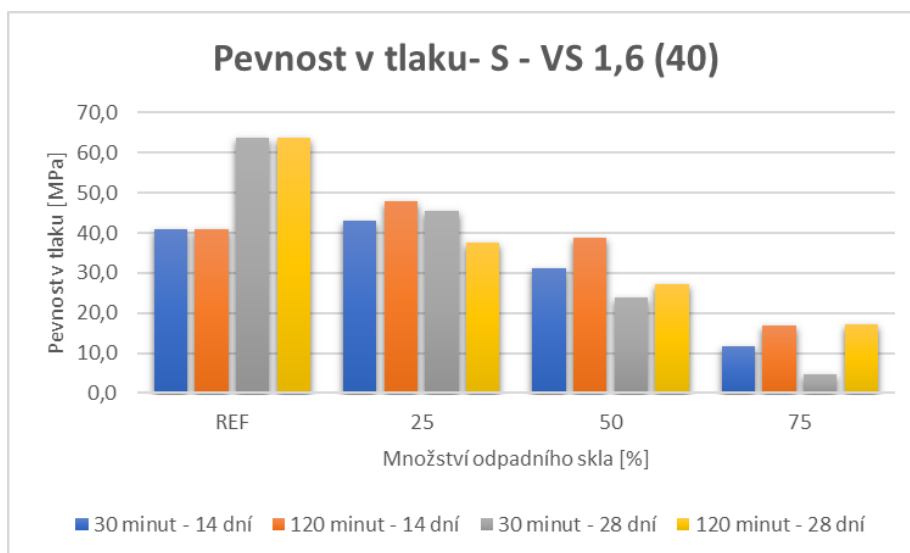
Tab. č. 13 – Pevnosti v tlaku po 14 dnech

Označení	REF	25 – 30	50 – 30	75 – 30	25 – 120	50 – 120	75 – 120
S – VS 1,6 (40)	40,9	42,9	31,3	11,6	48,0	38,7	16,8
P – VS 1,6 (80)	1,8	1,6	1,4	1,4	2,1	3,4	4,3
S – Na (5)	15,3	11,2	6,3	2,9	10,6	6,3	3,5
S – Na (10)	17,7	10,1	5,7	2,8	11,4	8,7	5,8

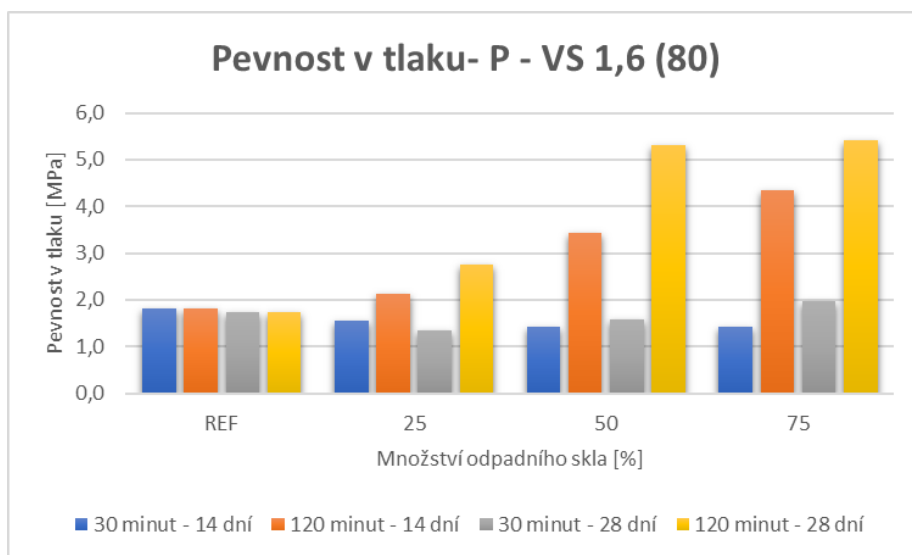
Tab. č. 14 – Pevnosti v tlaku po 28 dnech

Označení	REF	25 – 30	50 – 30	75 – 30	25 – 120	50 – 120	75 – 120
S – VS 1,6 (40)	63,6	45,5	23,8	4,8	37,6	27,3	17,2
P – VS 1,6 (80)	1,7	1,3	1,6	2,0	2,8	5,3	5,4
S – Na (5)	8,7	10,5	6,2	3,0	11,0	6,9	4,1
S – Na (10)	15,1	11,9	7,6	4,5	11,2	6,9	5,4

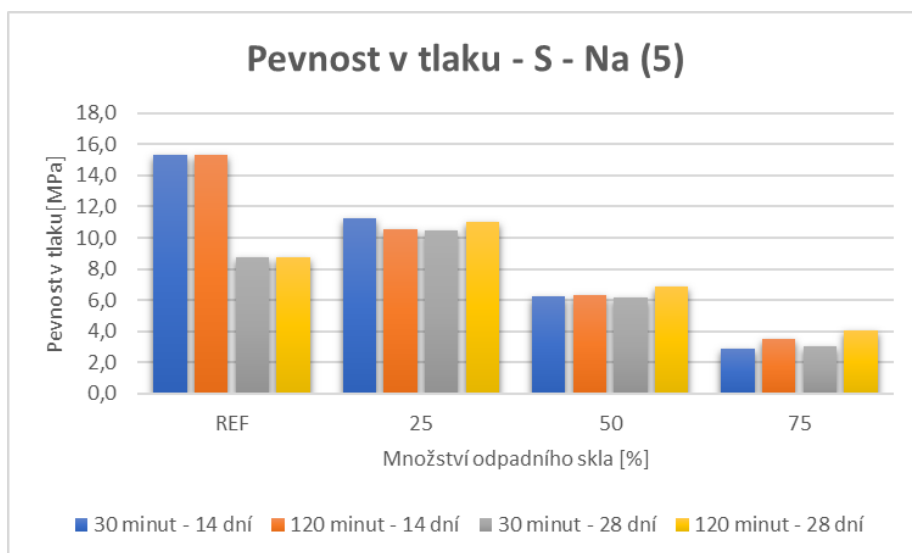
Graf č. 10 – pevnost v tlaku



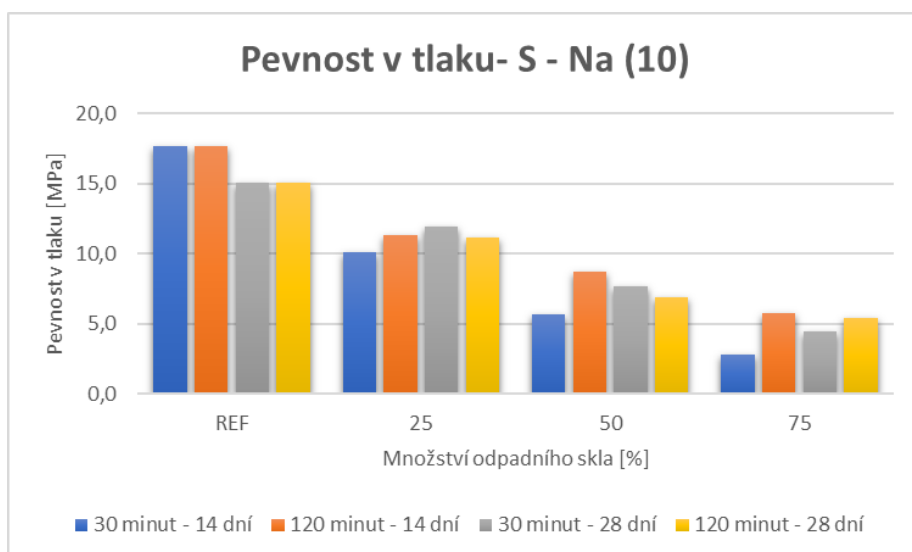
Graf č. 11 – pevnost v tlaku



Graf č. 12 – pevnost v tlaku



Graf č. 13 – pevnost v tlaku



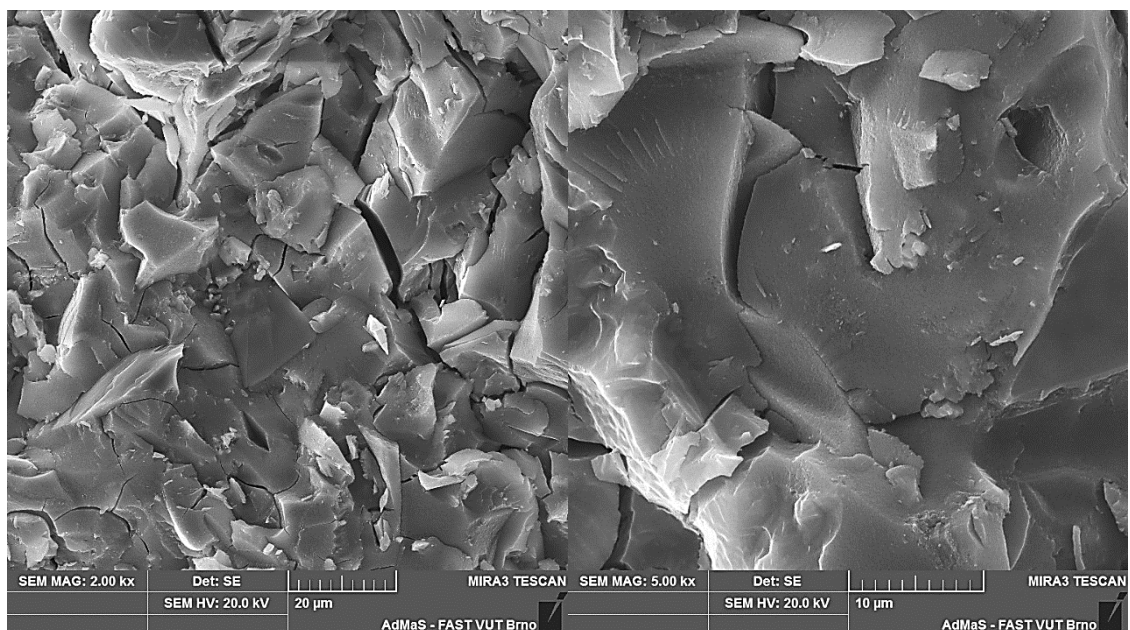
## 5.10. Mikrostruktura

### 5.10.1. Metoda SEM

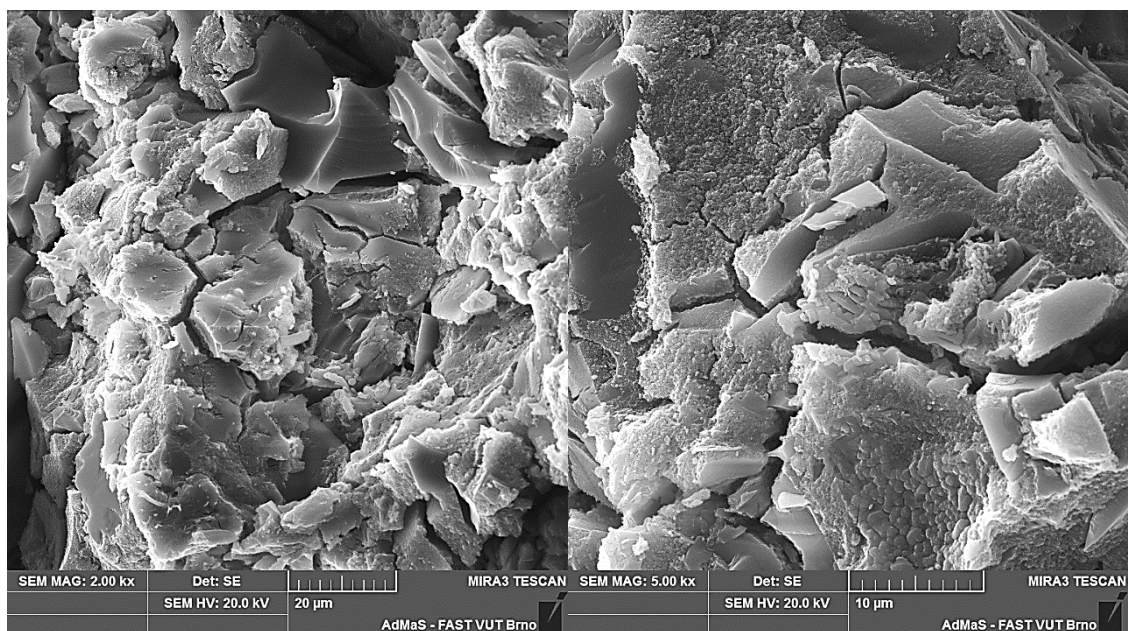
Tato metoda (snímkování elektronovým mikroskopem), se prováděla za pomoci přístroje značky TESCAN MIRA3. Na obrázcích je vedle sebe uspořádán vždy jeden a ten samý vzorek s jiným rozlišením, vlevo jsou obrázky s menším rozlišením a vpravo jsou obrázky s vyšším rozlišením. Z každé sady byl vybrán pro porovnání vždy referenční vzorek a potom oba vzorky se 75 % odpadního skla ale s jinou jemností mletí.

#### 5.10.1.1. Vzorky S – VS 1,6 (40)

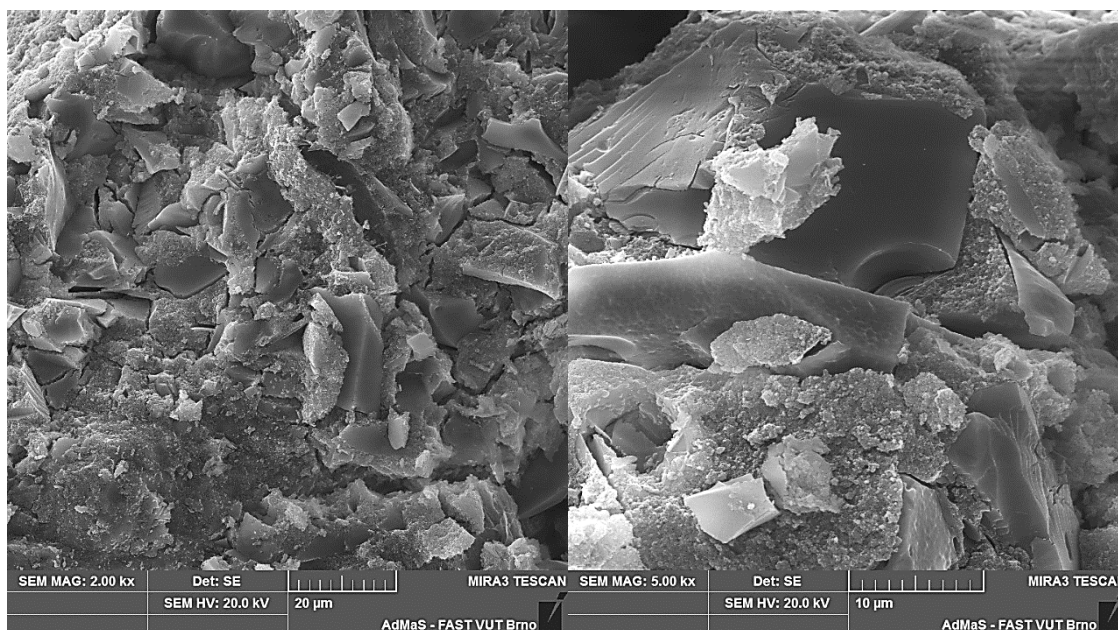
Na obrázcích 1 – 6 lze vidět mikrostrukturu strusky aktivované vodním sklem. Na obrázcích jsou ve všech vzorcích přítomny praskliny a trhliny. Struktura strusky je však velmi homogenní a bez pórů. S přidavkem skla lze vidět, že struktura je trochu hrubší, to je způsobeno odpadním sklem, které narušuje strukturu strusky. Jak lze vidět na obrázcích 4 a 5, tak nejvíce narušená je struktura vzorku S – VS 1,6 (40) - 75 (30) což je struska se 75 % odpadního skla mletého 30 minut. Zároveň lze vidět, že zrna skla nejsou spojena reakčními produkty s okolní matricí, tudíž se ve struktuře chovají pouze jako plnivo. U vzorku se sklem mletým 120 minut (obr. 5,6) lze vidět že struktura není tak narušená jak u vzorku s hrubším odpadním sklem a vykazuje méně trhlín, avšak zrna skla také nejsou spojeny s okolní matricí, tudíž nereagují. Tento jev lze pozorovat také na grafu pevností (graf č. 6,10), kdy pevnosti s přidavkem skla klesaly.



Obr. č. 1,2 – Mikrostruktura vzorku S - VS 1,6 (40) – REF



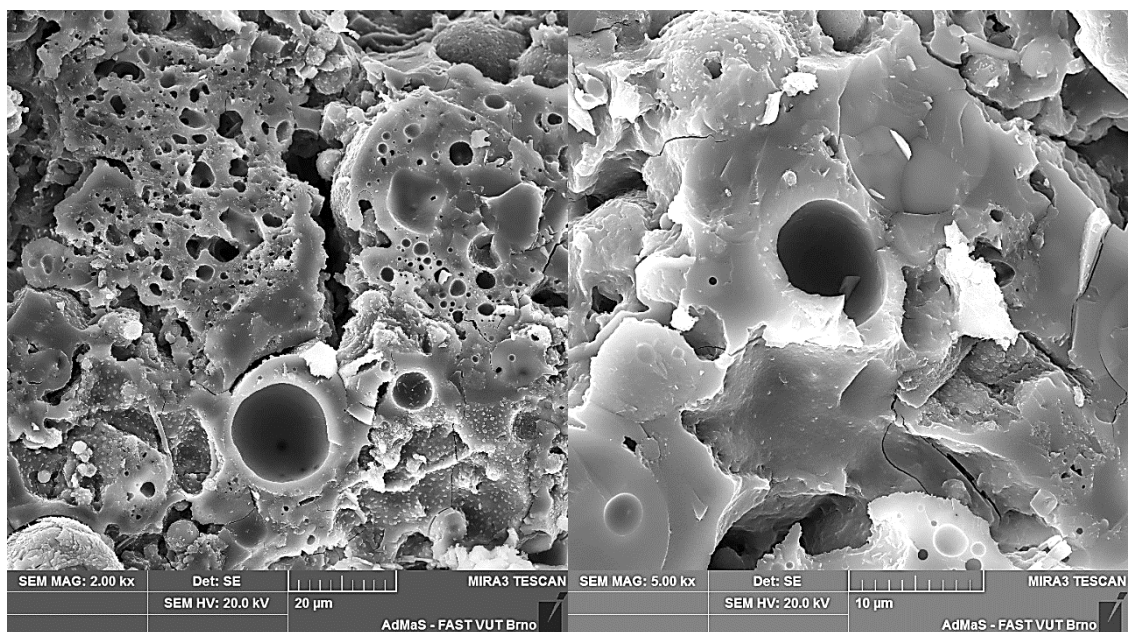
Obr. č. 3,4 - Mikrostruktura vzorku S - VS 1,6 (40) – 75 (30)



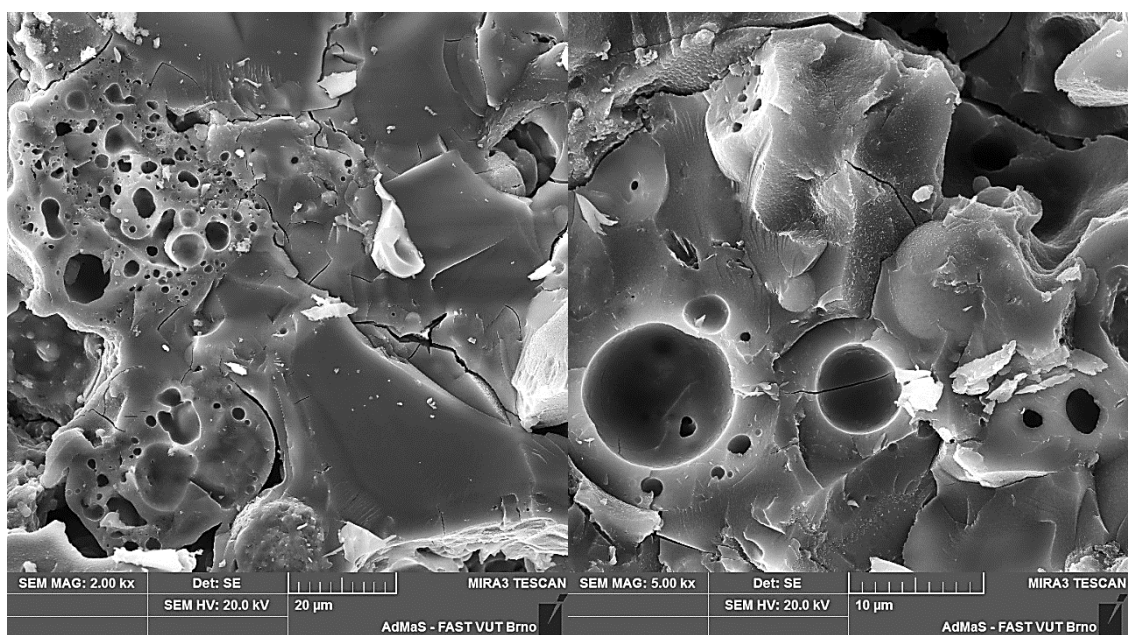
Obr. č. 5,6 – Mikrostruktura vzorku S – VS 1,6 (40) – 75 (120)

### 5.10.1.2. Vzorky P – VS 1,6 (80)

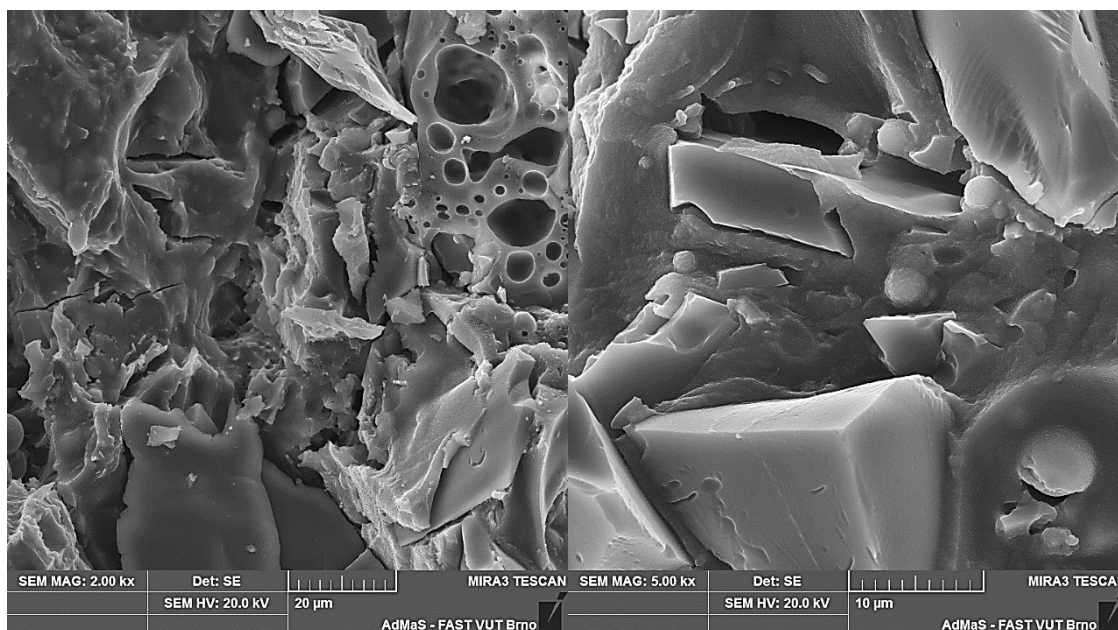
U vzorků z popílku lze vidět na obr. 7 – 12, že přidavek skla má pozitivní vliv na strukturu vzorků. Vzorky s přidavkem skla mají hutnější matici s méně póry a trhlinami. Odpadní sklo se zde chová jako plnivo, kdy vyplňuje prostor mezi kulovými zrny popílku (obr. 9 – 12). Také lze však vidět, že některá zrna jsou spojena s okolní maticí, to naznačuje, že zde sklo tvoří reakční produkty. To lze vidět na grafu pevností pro popílek (č. 7 a 11), kde s přidavkem skla rostly pevnosti, přičemž jemněji mleté sklo dosáhlo vyšších pevností. Lze tedy říci, že u popílkových vzorků aktivovaných vodním sklem (VS 1,6), je sklo schopno rozpouštět se a tvořit reakční produkty. Zároveň je pravděpodobné, že nezareagovaná zrna skla se chovají jako mikroplnivo a tím pádem také přispívají ke zlepšení pevností.



Obr. č. 7,8 – Mikrostruktura vzorku P - VS 1,6 (80) – REF



Obr. č. 9, 10 – Mikrostruktura vzorku P - VS 1,6 (80) – 75 (30)

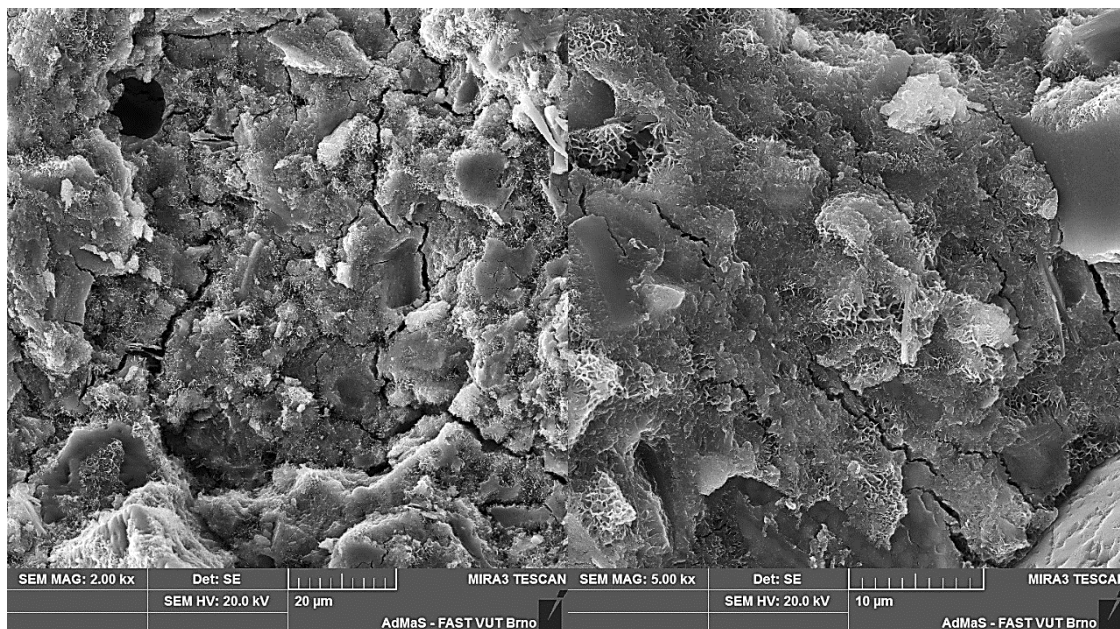


Obr. č. 11, 12 – Mikrostruktura vzorku P – VS 1,6 (80) – 75 (120)

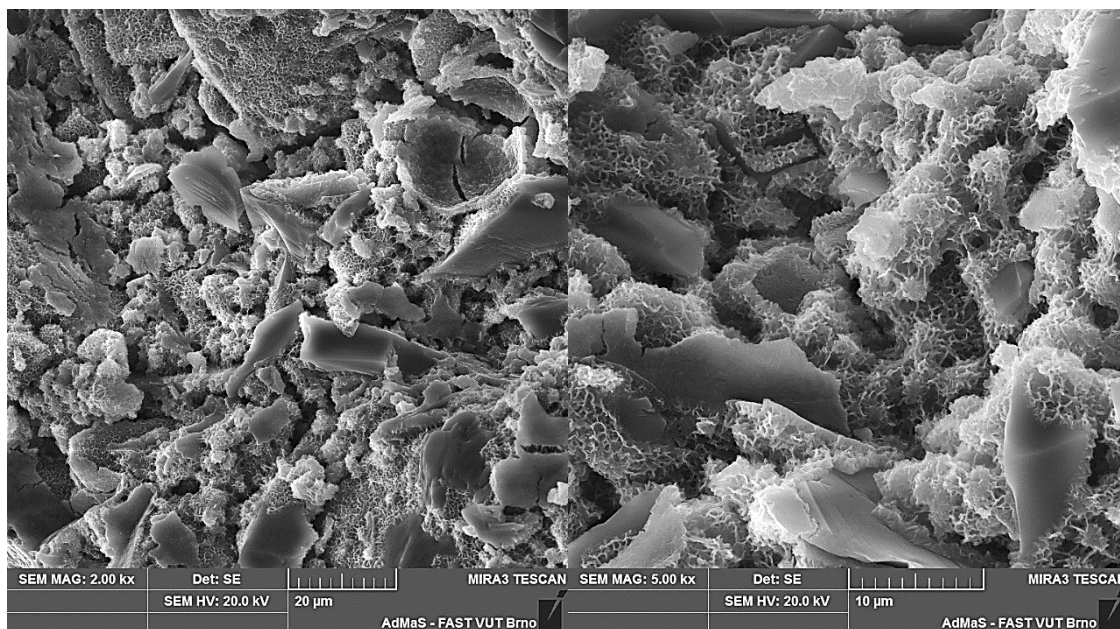
### 5.10.1.3. S – Na (10)

Pokud se podíváme na obr. č. 13 – 18, které patří strusce aktivované 10 molárním NaOH, lze vidět odlišnou strukturu než u strusky aktivované vodním sklem (obr. č. 1 – 6). U vzorků aktivovaných NaOH lze vidět, že v tomto případě jsou reakční produkty menší, struktura je kompaktnější a má méně prasklin a trhlin. Na obr. č. 15 – 18 lze potom vidět strusku se 75 % odpadního skla s odlišnou jemností mletí, u těchto vzorků nejsou patrné žádné velké rozdíly kromě velikosti částic skla ve struktuře. Zrna skel jsou také lépe obalená reakčními produkty než v případě struskových vzorků aktivovaných vodním sklem. A některá zrna vypadají že jsou spojeny s okolní maticí a tudíž že tvoří reakční produkty. Z těchto obrázků by se dalo usuzovat, že pevnosti těchto vzorků budou lepší než u vzorků ze strusky aktivované vodním sklem. Na grafech pevností (č. 9 a 13) lze ale vidět opačný výsledek: struska aktivovaná NaOH má menší pevnosti, než struska aktivovaná vodním sklem. Tento jev může být způsoben tvorbou odlišných reakčních produktů při aktivaci různým aktivátorem, přičemž z pevností vyplývá, že vodní sklo tvoří se struskou pevnější strukturu než s NaOH. Je také zajímavé, že

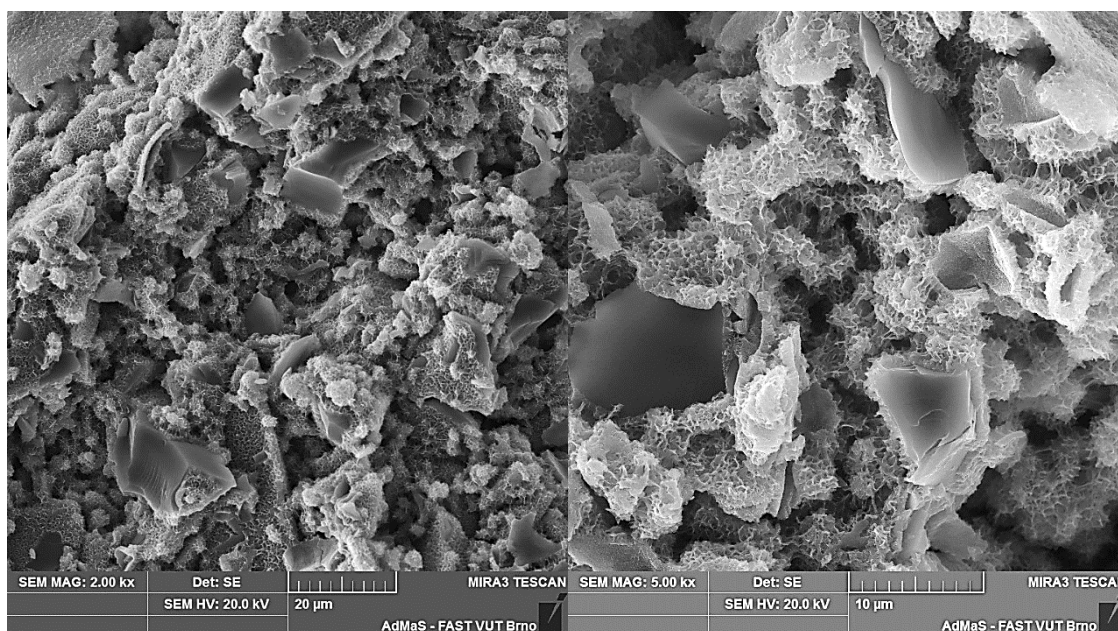
u referenčních vzorků pevnosti mezi 14 a 28 dnem klesaly, zatímco u vzorků s přidaným sklem zůstávaly pevnosti stejné, vzorky ale nedosahovaly pevností referenčních.



Obr. č. 13, 14 – Mikrostruktura vzorku S – Na (10) – REF



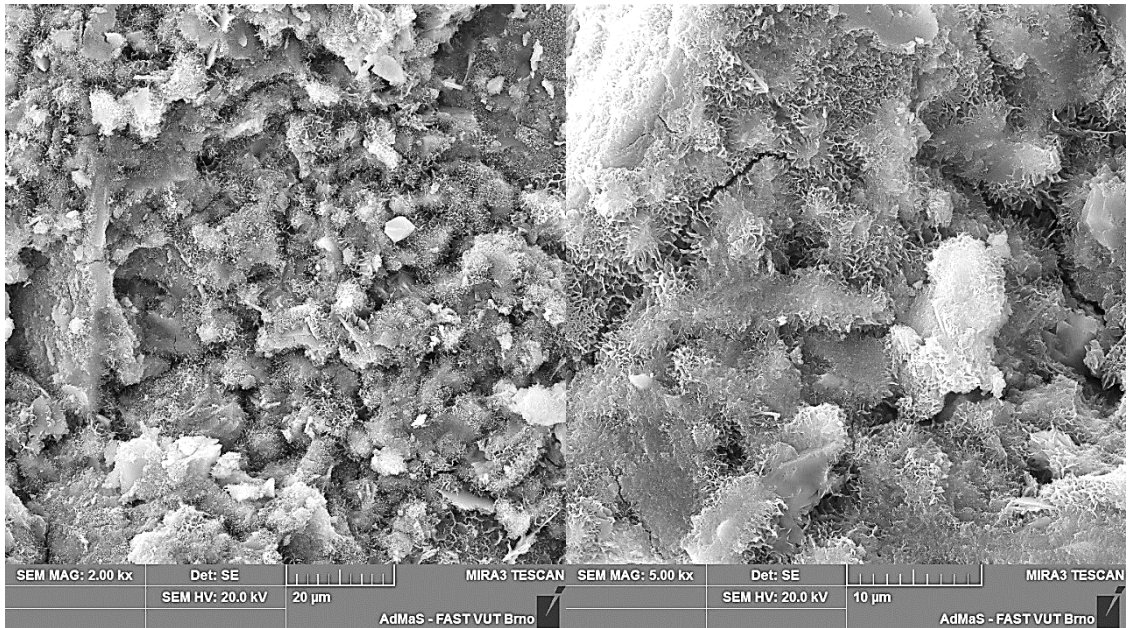
Obr. č. 15, 16 – Mikrostruktura vzorku S – Na (10) – 75 (30 minut)



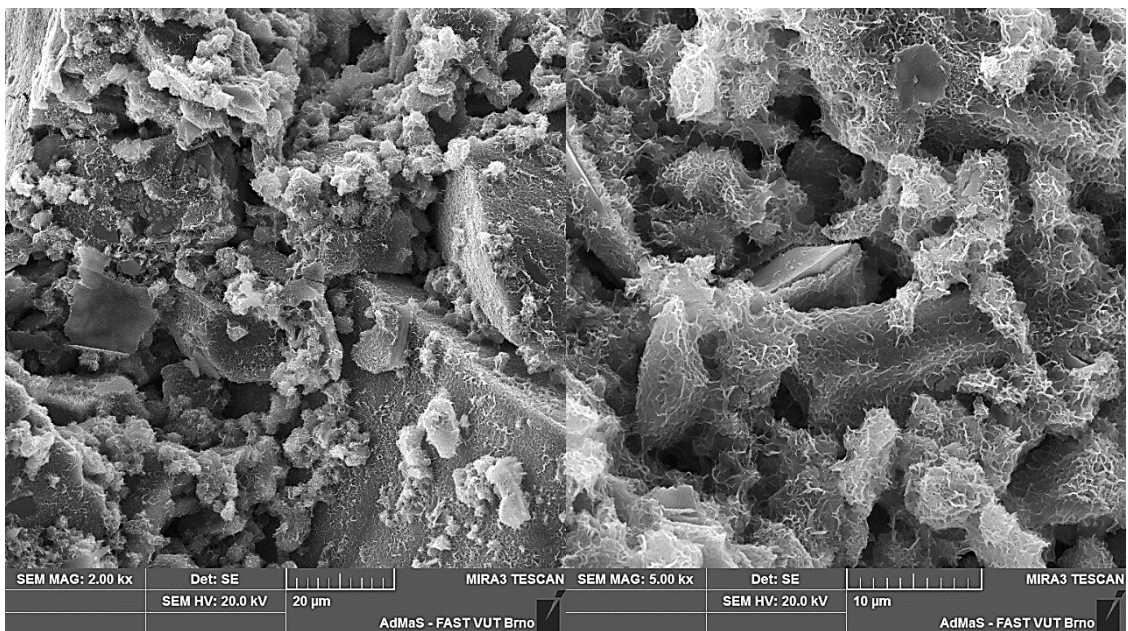
Obr. č. 17, 18 – Mikrostruktura vzorku S – Na (10) – 75 (120 minut)

#### 5.10.1.4. S – Na (5)

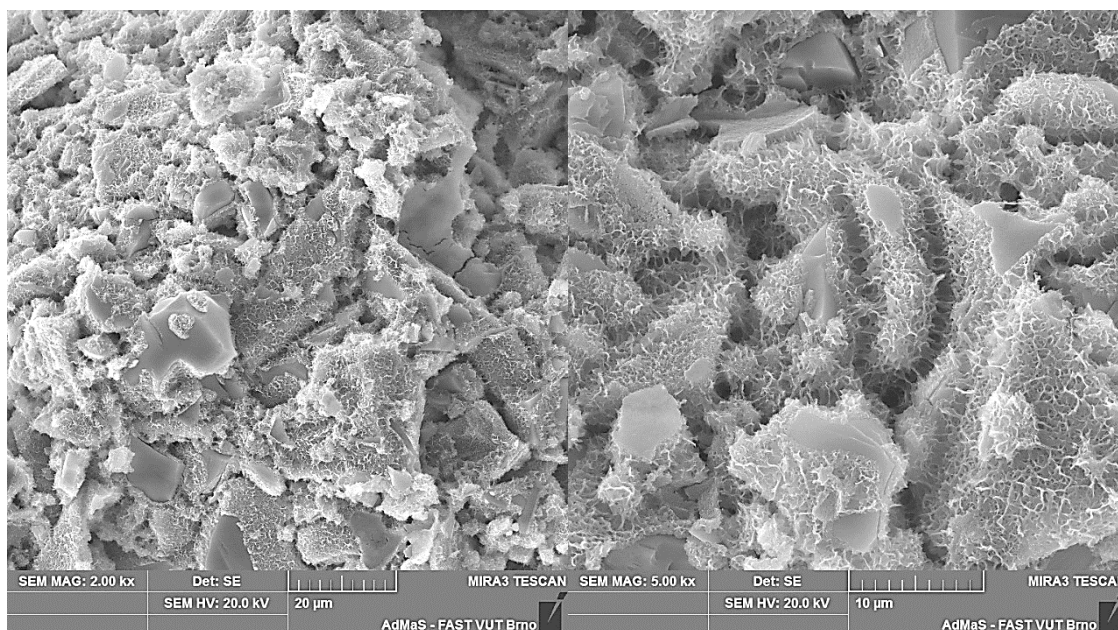
Na obrázcích č. 19 – 24 lze vidět vzniklé reakční produkty strusky aktivované 5 mol. NaOH. Tato struktura vypadá podobně jako struktura u strusky aktivované 10 mol. NaOH, avšak u těchto vzorků jsou vzniklé reakční produkty menší. Také struktura vypadá kompaktněji. U vzorků s odpadním sklem (obr. č. 21 – 24), lze vidět že vzniklé reakční produkty obalují zrna skla a tvoří kompaktní strukturu, nelze však říct jestli zrna skla reagují či nikoliv. Při pohledu na graf pevností č. 8 a 12 lze vidět, že s přidavkem skla pevnosti klesají. Tedy jako u výše uvedené strusky aktivované 10 mol. NaOH, i zde vzorky dosahují menších pevností než u strusky aktivované vodním sklem. I zde pevnosti referenčních vzorků klesaly mezi 14. a 28. dnem, a to skoro o polovinu. U vzorků s přidáním sklem nebyl však mezi 14. a 28. dnem pozorován žádný úbytek pevností či dokonce mírné zlepšení, přičemž vzorek s 25 % skla mletého 120 minut dosáhl po 28 dnech vyšších pevností než vzorek referenční



Obr. č. 19, 20 – Mikrostruktura vzorku S – Na (5) – REF



Obr. č. 21, 22 – Mikrostruktura vzorku S – Na (5) – 75 (30 minut)



Obr. č. 23, 24 – Mikrostruktura vzorku S – Na (5) – 75 (120 minut)

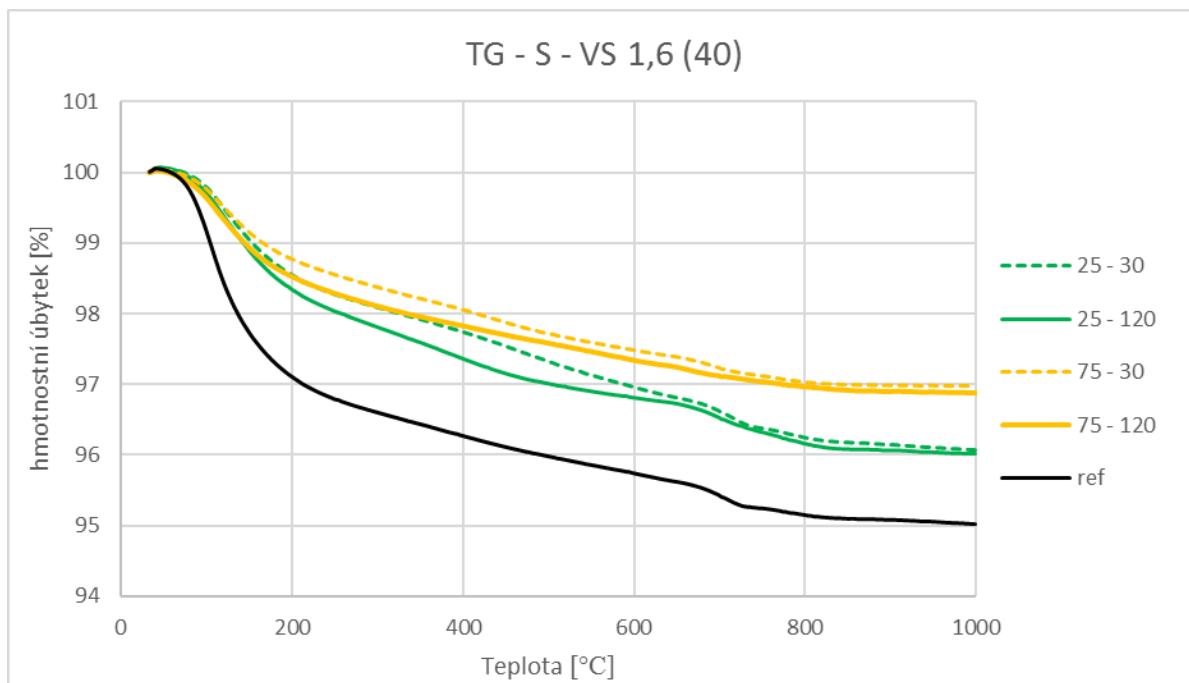
## 5.10.2. DTA analýza

### 5.10.2.1. S – VS 1,6 (40)

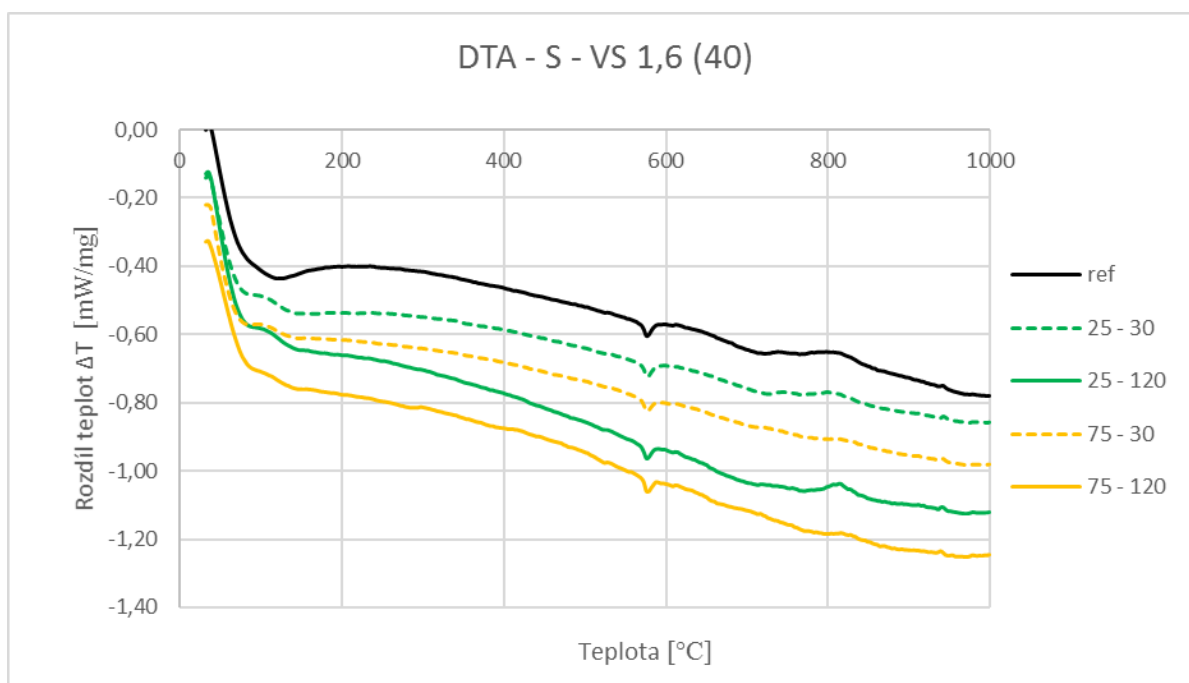
Na grafech č. 14 a 15 můžeme vidět křivky z DTA analýzy pro strusku aktivovanou vodním sklem. Na všech pěti DTA křivkách byl kolem 150 °C patrný endotermický pík. Tento pík odpovídá rozkladu C - S - H gelů a jiných reakčních fází. Na TG křivkách lze potom kolem 150 °C sledovat pokles hmotnosti z důvodu rozkladu těchto C - S - H a jiných gelů, které byly výsledkem alkalické aktivace. Z grafu lze také vyčíst, že největší hmotnostní úbytek zaznamenal referenční vzorek a nejmenší vzorek se 75 % odpadního skla mletého 30 minut. To znamená že nejvíce gelů by měl obsahovat vzorek referenční a nejméně vzorek se 75 % odpadního skla mletého 30 minut. Tyto výsledky korespondují s grafem pevností (č. 6 a 10), kdy nejvyšší pevnosti dosáhl vzorek referenční a nejnižší vzorek se 75 % odpadního skla mletého 30 minut. Dále je na DTA křivkách kolem 590 °C patrný endotermický pík, který náleží modifikační přeměně křemene. Tento pík byl způsoben obsahem křemičitého písku, který byl do malt použit jako plnivo. Dále si lze na DTA křivce kolem 700 °C všimnout, malých endotermických píků. Tyto píky jsou způsobeny uhličitany hořečnatými. Tyto píky odpovídají i hmotnostním

úbytkům na TG křivkách kolem 700 °C. Uhličitany hořčnaté zde šlo najít protože struska byla již staršího data, a začala karbonatovat.

Graf č. 14 – Tg křivka pro vzorky S – VS 1,6 (40) po 28 dnech



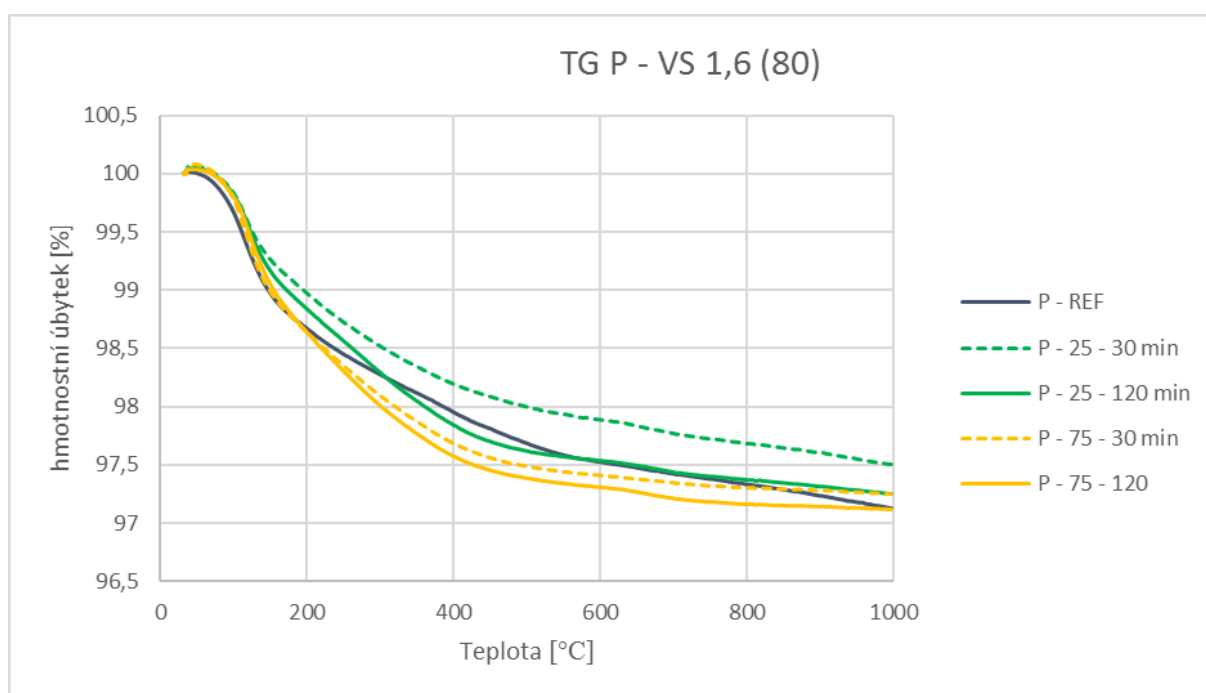
Graf č. 15 – DTA křivky pro vzorky S – VS 1,6 (40) po 28 dnech



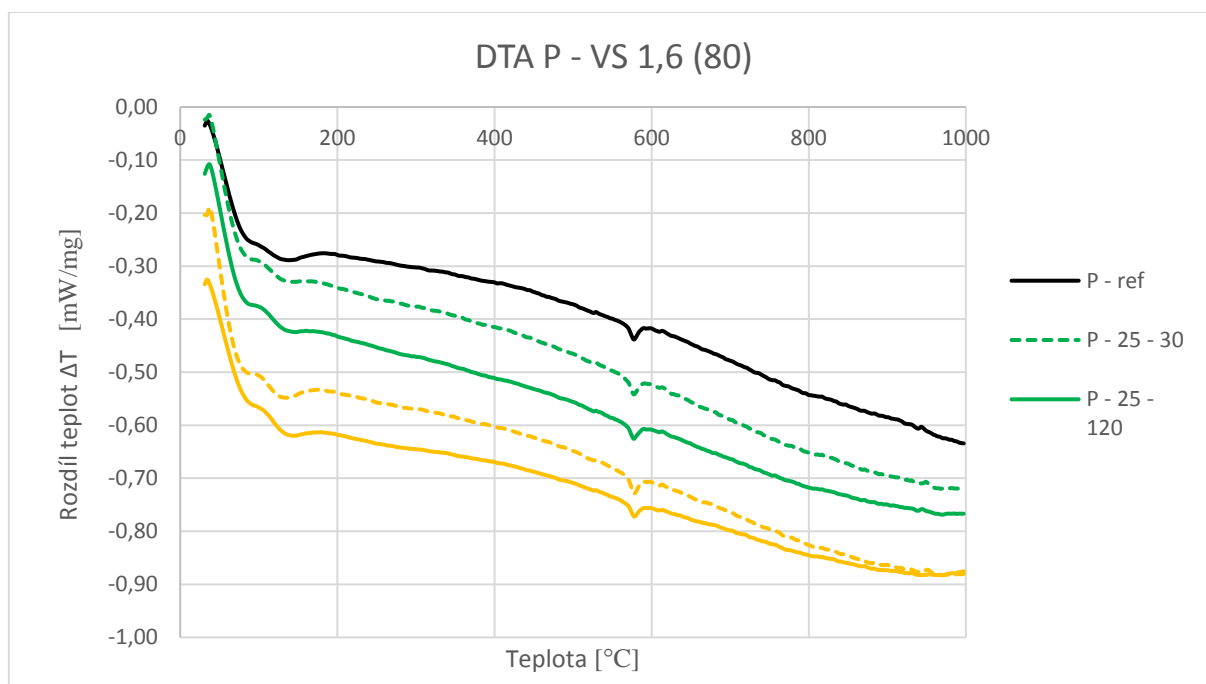
### 5.10.2.2. P – VS 1,6 (80)

U popílkových vzorků lze na všech DTA křivkách (graf č. 17) pozorovat endotermický pík kolem 150 °C. Tento pík náleží rozkladu C - S - H a jiných gelů, které vznikly alkalickou aktivací popílku. Na TG křivkách lze také kolem pozorovat hmotnostní úbytek kolem této teploty. Na TG křivkách je také patrné, že největší hmotnostní úbytek měli vzorky se 75 % náhradou mletého skla. Pokud se podíváme na graf pevností popílkových vzorků (č. 7 a 11), lze vidět že hmotnostní úbytky přesně souhlasí s dosaženými pevnostmi. Tj. vzorek P - 25 - 30, který měl nejmenší hmotnostní úbytek na TG křivce dosáhl také nejnižších pevností z těchto 5 vzorků které byly podrobeny DTA analýze. Naopak referenční vzorek měl na TG křivce skoro stejný hmotnostní úbytek jako vzorky s přidavkem odpadního skla, avšak jejich pevnosti se lišily ve prospěch vzorků se sklem. Toto vede k závěru, že sklo zde funguje také jako mikroplnivo, jak už bylo zmíněno v teoretické části práce. Lze si také všimnout že zde nedochází na DTA křivkách k žádným výkyvům kolem 700 °C. Popílkové kompozity tedy na rozdíl od strusky neobsahují uhličitany hořečnaté.

Graf č. 16 – Tg křivky pro vzorky P – VS 1,6 (80) po 28 dnech



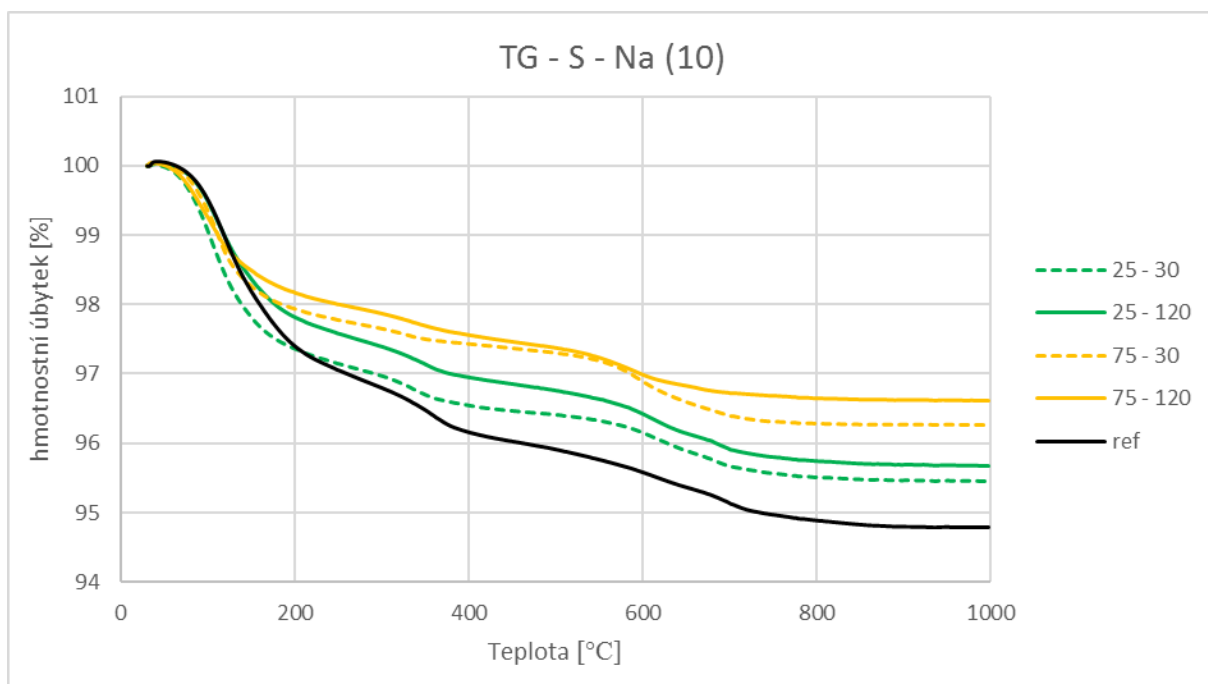
Graf č. 17 – DTA křivky pro vzorky P – VS 1,6 (80) po 28 dnech



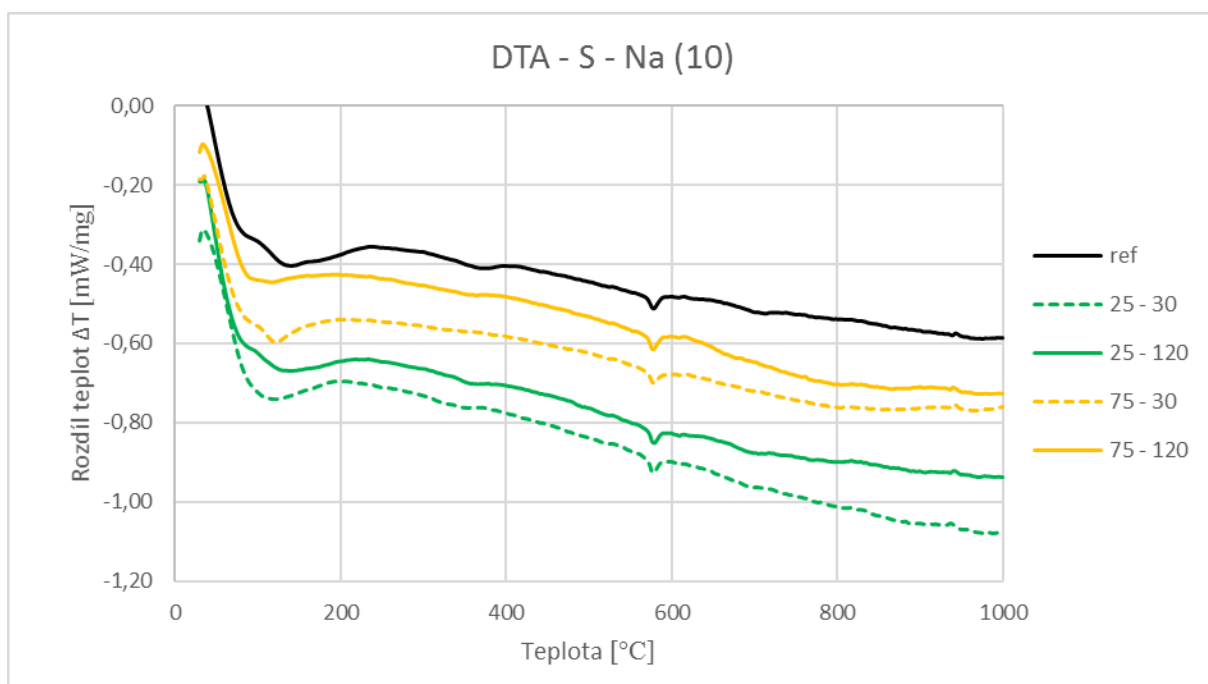
### 5.10.2.3. S – Na (10)

Na grafu č. 19 jsou zobrazeny DTA křivky pro struskové vzorky aktivované NaOH. Kolem 150 °C zde opět dochází k rozkladu C - S - H a jiných reakčních fází. Tento pík je nejvíce patrný u referenčního vzorku, čemuž odpovídá největší hmotnostní úbytek na křivce TG (graf č. 18). Kolem 390 °C jsou na DTA křivkách patrné endotermické píky. Tyto píky jsou nejvíce patrné pro referenční vzorek a pro vzorky s 25 % náhradou odpadního skla. U DTA křivek se 75 % náhradou odpadního skla nejsou tyto píky tak patrné. Těmto píkům odpovídají poklesy okolo 390 °C na TG křivkách. Tyto píky a poklesy ukazují na rozklad dalších reakčních produktů strusky, protože jsou více patrné u vzorků s větším obsahem strusky. Tomuto nasvědčují i výsledky z mikrostruktury, kdy je z obrázků patrné že struska aktivovaná NaOH měla úplně odlišnou strukturu než struska aktivovaná vodním sklem. Na DTA křivkách lze dále kolem 700 °C pozorovat opět rozklad uhličitánů hořečnatých jako v případě strusky aktivované vodním sklem.

Graf č. 18 – Tg křivky pro vzorky S - Na (10) po 28 dnech



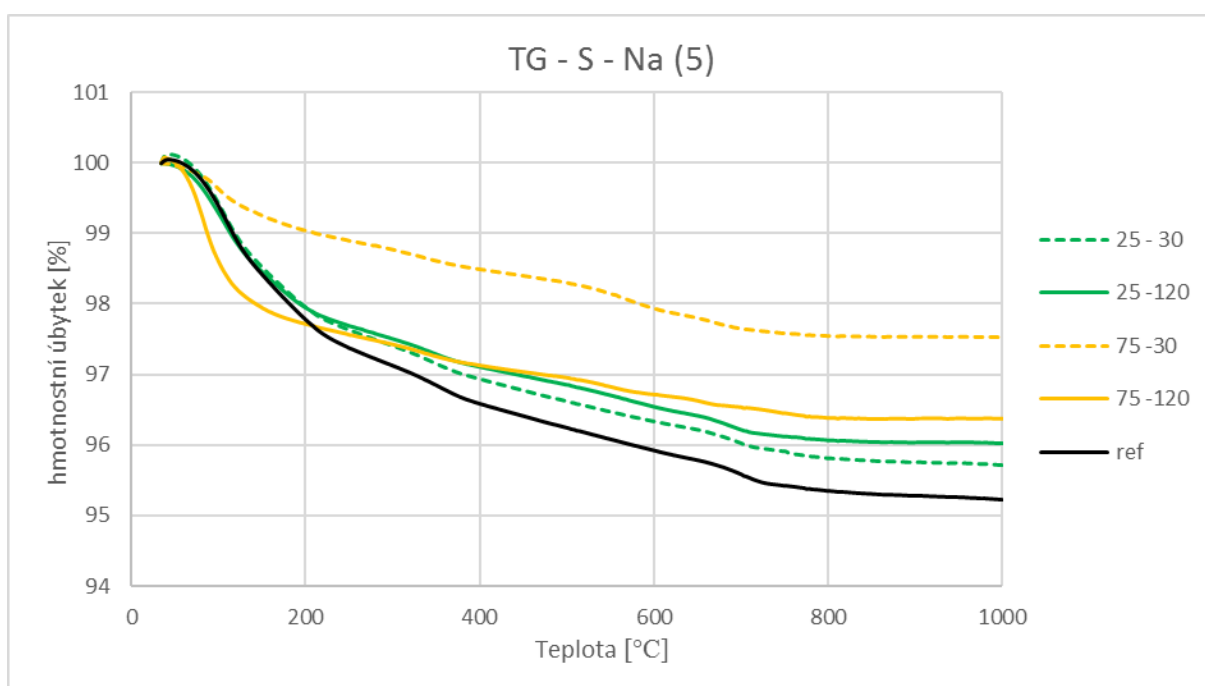
Graf č. 19 – DTA křivky pro vzorky S - Na (10) po 28 dnech



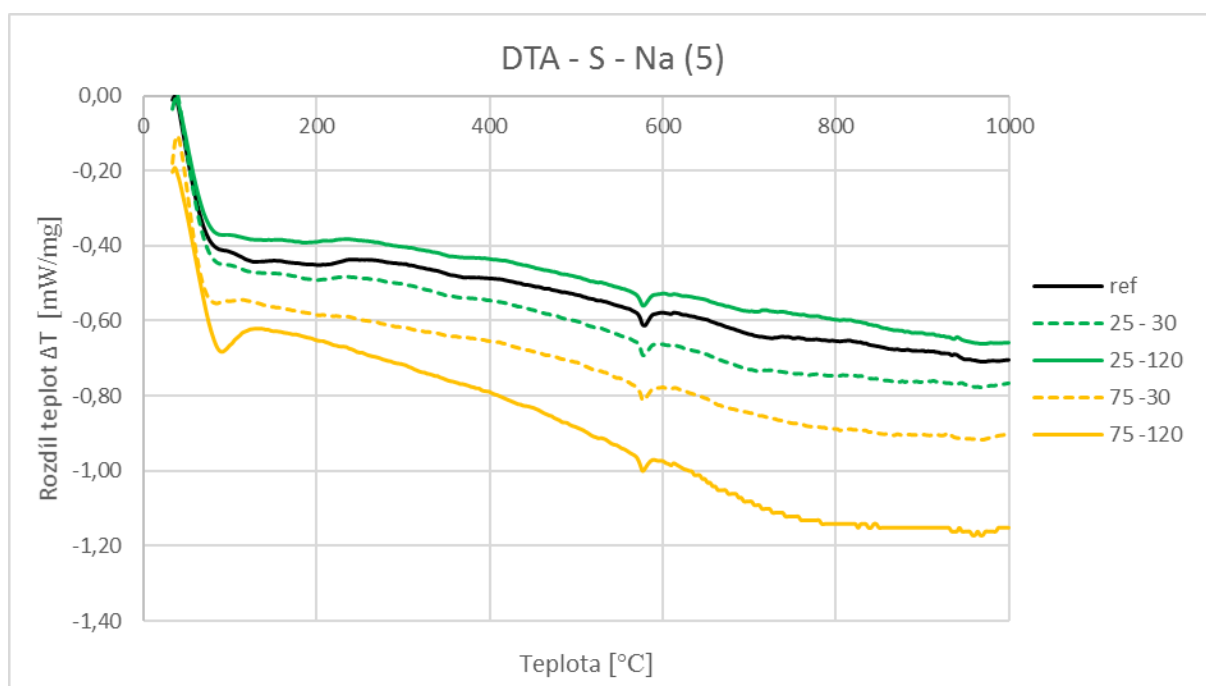
#### 5.10.2.4. S – Na (5)

Na DTA křivkách pro strusku aktivovanou 5 molárním NaOH lze opět okolo 150 °C pozorovat endotermické píky. Tyto píky odpovídají hmotnostním úbytkům na TG křivkách (graf č. 20) a jsou jako u všech kompozitů výše důsledkem rozkladu C - S - H gelů a jiných reakčních produktů. Dále si lze všimnout nepatrných endotermických píků okolo 390 °C. Toto souvisí s rozkladem dalších reakčních produktů strusky aktivované NaOH. Lze si všimnout, že u DTA křivek se 75 % odpadního skla nejsou tyto píky patrné pravděpodobně z důvodu malého obsahu strusky. Okolo teploty 700 °C lze opět pozorovat endotermické píky a odpovídající úbytky hmotností na TG křivkách z důvodu rozkladu uhličitánů hořečnatých. Lze vidět že vzorky se 75 % odpadního skla mají tyto píky nepatrné z důvodu malého obsahu strusky. U strusky aktivované 5 molárním NaOH byly píky shodné se struskou aktivovanou 10 molárním NaOH, tyto píky byly ale méně výrazné u strusky aktivované 5 molárním NaOH. Struska tedy byla lépe aktivovaná 10 molárním NaOH, protože se lépe rozpouštěla a měla více reakčních produktů než struska aktivovaná 5 molárním NaOH.

Graf č. 20 – Tg křivky pro vzorky S - Na (10) - po 28 dnech



Graf č. 21 – DTA křivky pro vzorky S - Na (10) - po 28 dnech



## Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjistit, jak ovlivňuje jemnost mletí odpadního skla vlastnosti alkalicky aktivovaných materiálů. V teoretické části byly shrnuty současné poznatky z oblasti alkalické aktivace strusky, popílků, skla a kompozitů s odpadním sklem. V experimentální části bylo cílem navrhnout jednotlivé receptury past ze strusky a popílku s odpadním sklem a vyhodnotit jednotlivé vlastnosti.

V první etapě experimentální části byly vyrobeny pasty ze strusky a popílku. Do těchto past se přidávala jako náhrada odpadní sklo v množství 25, 50 a 75 %. Dále byly použity různé aktivátory. Jako aktivátory byly použity látky: vodní sklo o křemičitém modulu 0,5; 1,0 a 1,6 (které byly navíc přidávány v množství 40 a 80 % z hmotnosti pojiva) a NaOH s koncentrací 5 a 10 molů. Výsledkem první fáze byly pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku po 14 dnech. Z těchto pevností se potom vybraly 4 receptury, které dosáhly nejlepších pevností.

Nejlepších pevností v první etapě dosáhly tyto receptury: struska aktivovaná vodním sklem 1,6, struska aktivovaná 5 molárním NaOH, struska aktivovaná 10 molárním NaOH a popílek aktivovaný vodním sklem o modulu 1,6.

V druhé etapě byly ze 4 nejlepších receptur vyrobeny zkušební malty a následně se provedly zkoušky pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu, SEM snímkování a DTA analýza.

Z hlediska mechanických vlastností na tom nejlépe byly vzorky ze strusky aktivované vodním sklem. Tyto vzorky dosáhly nejvyšších pevností, konkrétně referenční vzorek, který dosáhl pevnosti v tlaku přes 60 MPa. S přidavkem odpadního skla tyto pevnosti klesaly, lze ale říci že vzorky do 50 % náhrady odpadním sklem dosahovaly slušných pevností. Naopak nejhůře na tom byly popílkové vzorky aktivované vodním sklem 1,6. Tyto vzorky dosáhly pevností v řádech MPa. U těchto vzorků byly rozdíly v jemnosti mletí po 14 dnech docela velké. U jemněji mletého skla docházelo k nárůstu pevností o cca 5 - 8 MPa oproti hruběji mletému sklu. Po 28 dnech byly tyto rozdíly však menší. Zajímavý je vzorek s 25 % odpadního skla, kdy pevnosti po 28 dnech byly lepší u hruběji mletého skla. U těchto vzorků odpadní sklo zhoršuje mechanické vlastnosti. Toto podporují i výsledky z SEM a DTA analýzy, kdy je jasně vidět že nejlepších vlastností dosahoval referenční vzorek – vzorek bez odpadního skla.

Referenční vzorky popílkové receptury dosáhly v tlaku pevnosti kolem 2 MPa. Nutno však podotknout, že u této jediné receptury se s přidavkem skla zvyšovaly pevnosti, přičemž nejvyšší pevnosti měl vzorek s 50 a 75 % odpadního skla. Tento vzorek s jemněji mletým sklem dosahoval po 28 dnech pevností okolo 5,5 MPa, což je trojnásobek pevnosti referenčního vzorku. Výsledky ze SEM analýzy pak ukazují, že u popílkových vzorků odpadní sklo funguje jako mikroplnivo, kdy vyplňuje strukturu popílkové matrice a tím snižuje pórovitost. Z DTA analýzy vyplývá, že sklo je schopné také reagovat a tvořit reakční produkty.

U vzorků ze strusky aktivované 10 molárním NaOH dosáhly nejvyšších pevností opět referenční vzorky. S přidavkem skla se pevnosti snižovaly. U těchto vzorků byl efekt různého mletí skla velmi sporný. U vzorků s 25 % odpadního skla byly pevnosti po 14 vyšší u jemněji mletého skla. Vzorky po 28 dnech vykazovaly opačný trend, tedy u jemněji mletého skla byly pevnosti horší. U vzorků s 50 % náhradou byl trend stejný jako u vzorků se 25 % náhradou. U vzorků s 75 % odpadního skla však dosáhlo po 28 dnech vyšších pevností sklo jemněji mleté. Výsledky z DTA analýzy potom potvrzují dosažené pevnosti. Při pohledu na SEM analýzu lze říci že u těchto vzorků odpadní sklo reaguje částečně, avšak přednostně reaguje struska. Tudíž sklo potom nestihne zreagovat, neboť potřebuje delší dobu k reakci než struska.

Struskové vzorky aktivované 5 molárním NaOH vykazují velmi podobné vlastnosti i pevnosti jako vzorky aktivované 10 molárním NaOH. Pevnosti jsou však o trochu nižší. U těchto vzorků také nezáleželo tolik na jemnosti mletí skla. U vzorků s 25 % odpadního skla byly pevnosti po 14 dnech vyšší u hrubějšího skla. U ostatních vzorků potom byly pevnosti vyšší u jemněji mletého skla. Po 28 dnech byly u všech vzorků pevnosti vyšší u jemněji mletého skla. Ze SEM analýzy lze vidět že u těchto vzorků odpadní sklo spíše zhoršovalo strukturu a zvětšovalo pórovitost, tím pádem se snižovaly pevnosti.

U všech struskových vzorků je z dosažených výsledků patrné, že přidavek skla zhoršoval jejich pevnosti. Lze tedy říci, že odpadní sklo u těchto vzorků zhoršovalo mikrostrukturu. Částice skla byly ve struktuře spíše nezreagované, tudíž spíše strukturu narušovaly a přispívaly pravděpodobně k vyšší pórovitosti, což se promítlo potom do výsledných pevností vzorků. Toto tvrzení podporuje DTA analýza, kdy nejméně reakčních produktů měly vzorky se 75 % odpadního skla. Je tedy možné že struska se rozkládá lépe než odpadní sklo, tudíž rychleji reaguje a tvoří strukturu. Odpadní sklo potom reaguje později v okamžiku, kdy už je vytvořená struktura strusky.

U popílkových vzorků se s rostoucím množstvím odpadního skla zlepšovaly pevnosti. Z dosažených výsledků lze říci, že odpadní sklo je zde schopno lépe reagovat. Z výsledků SEM a DTA analýz je patrné, že sklo zde tvoří reakční produkty a chová se zároveň jako mikroplnivo. Tudíž snižuje pravděpodobně i pórovitost systému. Na rozdíl od strusky, popílek reaguje velmi pomalu. Sklo pravděpodobně reaguje rychleji než popílek, a tím pádem se rozkládá první, nebo současně s popílkem. Tento jev má za následek zlepšování pevností, jak bylo uvedeno výše. Z výše uvedených výsledků vyplývá že v popílkových kompozitech se vyplatí sklo mlet na jemnější frakci, protože díky tomu sklo lépe reaguje a zlepšuje vlastnosti popílkových systémů.

U struskových systémů není rozdíl mezi jemněji a hruběji mletým sklem, lze tedy předpokládat že sklo zde nemá prostor k reakci či reaguje hůře. U struskových kompozitů se ekonomicky nevyplatí mlet sklo na jemnější částice, protože zde není rozdíl ve výsledných vlastnostech u různých jemností mletí skla. Zajímavé by bylo sledovat vlastnosti kompozitů z více než dvou druhů. Sklo by zde mohlo lépe využít své pozitivní vlastnosti a přispět k tvorbě lepších kompozitů.

Co se týče výzkumu do budoucna, odpadní sklo se ukázalo jako slibná surovina pro alkalickou aktivaci, avšak bude nutno dalšího výzkumu a prohloubení znalostí u této suroviny.

## Zdroje použité literatury:

[1] ASSI, Lateef N., Edward EDDIE DEEVER a Paul ZIEHL. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 167, 372-380 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818302174>

[2] RASHAD, Alaa M. A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design* [online]. 2014, 53, 1005-1025 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.074. ISSN 02613069.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913007024>

[3] CYR, M., R. IDIR a T. POINOT. Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science* [online]. 2012, 47(6), 2782-2797 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1007/s10853-011-6107-2. ISSN 0022-2461.

Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-011-6107-2>

[4] KOURTI, Ioanna, D. Amutha RANI, D. DEEGAN, A.R. BOCCACCINI a C.R. CHEESEMAN. Production of geopolymers using glass produced from DC plasma treatment of air pollution control (APC) residues. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2010, 176(1-3), 704-709 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.089. ISSN 03043894.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409018883>

[5] YOUSEFI ODERJI, Sajjad, Bing CHEN a Syed Taseer Abbas JAFFAR. Effects of relative humidity on the properties of fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 153, 268-273 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.115. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817314599>

[6] ŠAFÁŘ, M. *Optimalizace betonových záměsí na bázi alkalicky aktivovaných druhotných surovin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Kalina, Ph.D.

[7] HEMALATHA, T. a Ananth RAMASWAMY. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, 147, 546-559 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.114. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617301294>

[8] ZHUANG, Xiao Yu, Liang CHEN, Sridhar KOMARNENI, Chun Hui ZHOU, Dong Shen TONG, Hui Min YANG, Wei Hua YU a Hao WANG. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, 125, 253-267 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.019. ISSN 09596526.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616300798>

[9] SAHA, Suman a C. RAJASEKARAN. Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 146, 615-620 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817307729>

[10] OH, Jae Eun, Paulo J.M. MONTEIRO, Ssang Sun JUN, Sejin CHOI a Simon M. CLARK. The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research* [online]. 2010, 40(2), 189-196 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.10.010. ISSN 00088846.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884609002932>

[11] RYU, Gum Sung, Young Bok LEE, Kyung Taek KOH a Young Soo CHUNG. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, 47, 409-418 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813004674>

[12] LI, Chao, Henghu SUN a Longtu LI. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research* [online]. 2010, 40(9), 1341-1349 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020. ISSN 00088846.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461000089X>

[13] RYPÁK, Peter. Vplyv podmienok ošetrovania na vlastnosti alkalicky aktivovanej trosky. Brno, 2015. 77 s., Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.

[14] KIM, G.M., Hammad R. KHALID, H.J. KIM a H.K. LEE. Alkali activated slag pastes with surface-modified blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2017, 76, 39-47 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.11.009. ISSN 09589465.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516307831>

[15] CHI, Maochieh. Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 35, 240-245 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.005. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812002073>

[16] KEELEY, P.M., N.A. ROWSON, T.P. JOHNSON a D.E. DEEGAN. The effect of the extent of polymerisation of a slag structure on the strength of alkali-activated slag binders. *International Journal of Mineral Processing* [online]. 2017, 164, 37-44 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.05.007. ISSN 03017516.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751617301096>

- [17] AXINTE, Eugen. Glasses as engineering materials: A review. *Materials & Design* [online]. 2011, 32(4), 1717-1732 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.11.057. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910006837>
- [18] BUNDE, A. Ionic glasses: History and challenges. *Solid State Ionics* [online]. 105(1-4), 1-13 [cit. 2019-01-08]. DOI: 10.1016/S0167-2738(97)00444-X. ISSN 01672738. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016727389700444X>
- [19] NASCIMENTO, Marcio Luis Ferreira. Brief history of the flat glass patent – Sixty years of the float process. *World Patent Information* [online]. 2014, 38, 50-56 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.wpi.2014.04.006. ISSN 01722190.  
Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0172219014000507>
- [20] HONS, O. Materiály na bázi pěnového skla z druhotných surovin: diplomová práce. Brno, 2012. 104 s., 109 s. přílohami.  
Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců.  
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.
- [21] MOHAJERANI, Abbas, John VAJNA, Tsz Ho Homan CHEUNG, Halenur KURMUS, Arul ARULRAJAH a Suksun HORPIBULSUK. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 156, 443-467 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005. ISSN 09500618.  
Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817318068>
- [22] MONCEA, A. M., A. BADANOIU, M. GEORGESCU a S. STOLERIU. Cementitious composites with glass waste from recycling of cathode ray tubes. *Materials and Structures* [online]. 2013, 46(12), 2135-2144 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1617/s11527-013-0041-5. ISSN 1359-5997.  
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0041-5>
- [23] RASHIDIAN-DEZFOULI, Hassan, Prasada Rao RANGARAJU a Venkat Sai Kumar KOTHALA. Influence of selected parameters on compressive strength of geopolymer produced from ground glass fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 162, 393-405 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.166. ISSN 09500618.  
Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181731989X>
- [24] BOBIRICĂ, Constantin, Jae-Ho SHIM, Jun-Hyeon PYEON a Joo-Yang PARK. Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers. *Ceramics International* [online]. 2015, 41(10), 13638-13649 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.160. ISSN 02728842.  
Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884215014509>
- [25] REDDEN, Rachel a Narayanan NEITHALATH. Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2014, 45, 46-

56 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513001479>

[26] PROVIS, John L., Peter DUXSON a Jannie S.J. VAN DEVENTER. The role of particle technology in developing sustainable construction materials. *Advanced Powder Technology* [online]. 2010, 21(1), 2-7 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.appt.2009.10.006. ISSN 09218831.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921883109001678>

[27] MARTINEZ-LOPEZ, Ricardo a J. IVAN ESCALANTE-GARCIA. Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 119, 119-129 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.064. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816307905>

[28] DING, Yao, Jian-Guo DAI a Cai-Jun SHI. Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 127, 68-79 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816315719>

[29] THO-IN, Tawatchai, Vanchai SATA, Kornkanok BOONSERM a Prinya CHINDAPRASIRT. Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, 172, 2892-2898 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.125. ISSN 09596526.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617327981>

[30] WANG, Wei-Chien, Bo-Tsun CHEN, Her-Yung WANG a Hsien-Chih CHOU. A study of the engineering properties of alkali-activated waste glass material (AAWGM). *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 112, 962-969 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.022. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816303099>

[31] NIKOLIĆ, Irena, Ljiljana KARANOVIĆ, Ivona Janković ČASTVAN, Vuk RADMILOVIĆ, Slavko MENTUS a Velimir RADMILOVIĆ. Improved compressive strength of alkali activated slag upon heating. *Materials Letters* [online]. 2014, 133, 251-254 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.07.021. ISSN 0167577X.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X14012713>

[32] KASHANI, Alireza, Tuan D. NGO, Brant WALKLEY a Priyan MENDIS. Thermal performance of calcium-rich alkali-activated materials: A microstructural and mechanical study. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 153, 225-237 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.119. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817314629>

[33] BERNAL, Susan A., Ruby MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Alba L. PEDRAZA, John L. PROVIS, Erich D. RODRIGUEZ a Silvio DELVASTO. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, 41(1), 1-8 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.08.017. ISSN 00088846.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884610002024>

[34] HEMALATHA, T. a Ananth RAMASWAMY. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, 147, 546-559 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.114. ISSN 09596526.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617301294>

[35] CYR, M., R. IDIR a T. POINOT. Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science* [online]. 2012, 47(6), 2782-2797 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1007/s10853-011-6107-2. ISSN 0022-2461.

Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-011-6107-2>

[36] MARTINEZ-LOPEZ, Ricardo a J. IVAN ESCALANTE-GARCIA. Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 119, 119-129 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.064. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816307905>

[37] TONIOLO, Nicoletta a Aldo R. BOCCACCINI. Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International* [online]. 2017, 43(17), 14545-14551 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.07.221. ISSN 02728842.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884217316681>

[38] REDDEN, Rachel a Narayanan NEITHALATH. Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2014, 45, 46-56 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946513001479>

[39] TORRES-CARRASCO, M., J. G. PALOMO a F. PUERTAS. Sodium silicate solutions from dissolution of glasswastes. Statistical analysis. *Materiales de Construcción* [online]. 2014, 64(314) [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.3989/mc.2014.05213. ISSN 1988-3226. Dostupné z: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1470/1706>

[40] RASHIDIAN-DEZFOULI, Hassan a Prasada Rao RANGARAJU. A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 153, 996-1009 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.139. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817314824>

[41] WANG, Wei-Chien, Bo-Tsun CHEN, Her-Yung WANG a Hsien-Chih CHOU. A study of the engineering properties of alkali-activated waste glass material (AAWGM). *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 112, 962-969 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.022. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816303099>

[42] CUBA RAMOS, Aurelia I., Clément ROUX-LANGLOIS, Cyrille F. DUNANT, Mauro CORRADO a Jean-François MOLINARI. HPC simulations of alkali-silica reaction-induced damage: Influence of alkali-silica gel properties. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, 109, 90-102 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.020. ISSN 00088846.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461731150X>

[43] WILLIAMSON, Trevor a Maria C.G. JUENGER. The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2016, 83, 124-130 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.02.008. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888461530034X>

[44] CHI, Maochieh. Effects of modulus ratio and dosage of alkali-activated solution on the properties and micro-structural characteristics of alkali-activated fly ash mortars. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 99, 128-136 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.029. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815303913>

[45] DU, Hongjian a Kiang Hwee TAN. Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, 66, 275-285 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.092. ISSN 09500618.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814005947>

[46] PROVIS, John L., Angel PALOMO a Caijun SHI. Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2015, 78, 110-125 [cit. 2019-01-05]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.04.013. ISSN 00088846.

Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884615001192>

[47] DUFKA, Amos a Jan NOVÁK. Laboratorní experimentální metody. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. 2007, 155.