



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE, TECHNOLOGIE A
VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF CHEMISTRY, TECHNOLOGY AND PROPERTIES OF
MATERIALS

SYNTÉZA ALUMINOSILIKÁTOVÝCH SYSTÉMŮ NA BÁZI GEOPOLYMERŮ ORIENTO VANÁ NA VYUŽÍVÁNÍ SEKUNDÁRNÍCH SUROVIN

SYNTHESIS OF ALUMINOSILICATE SYSTEMS BASED ON ALKALI ACTIVATION OF
INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

ZKRÁCENÁ VERZE DOKTORSKÉ PRÁCE
SUMMARY OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. LUKÁŠ KALINA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. JAROMÍR HAVLICA, DrSc.

BRNO 2011

ABSTRAKT

Produkty na bázi hydratace portlandského cementu jsou nejběžnějšími stavebními materiály. Nicméně je velmi dobře známo, že produkce cementu nejen spotřebovává významné množství přírodních zdrojů a energie, ale také dochází k uvolnění značného množství oxidu uhličitého (CO₂) do atmosféry. Cílem této práce je vyvinout nový materiál podobný materiálu na bázi hydratovaného cementu, který je méně energeticky náročný a navíc šetrný k životnímu prostředí. Tato práce prezentuje přípravu, složení a vlastnosti anorganického aluminosilikátového polymeru, nazvaného geopolymery, vyvinutého z vysokopeční strusky a popílku aktivovaného hydroxidem sodným a cementářskými odprašky. Studium mikrostruktury je založeno na metodách SEM-EDX-WDX, TG-DTA-EGA a XRD.

ABSTRACT

Portland cement-based products are the most commonly used building materials. However, it is well known that the production of OPC not only consumes a significant amount of natural resources and energy but also releases high quantity of carbon dioxide (CO₂) to the atmosphere. Purpose of this work is to develop new cementitious material similar to Portland cement-based concrete, which is convenient in terms of energy and is environmental-friendly at once. This work presents preparation, composition and properties of inorganic aluminosilicate polymer, called geopolymer, synthesized from blast furnace slag and fly ash, activated by sodium hydroxide and cement kiln dust. Study of the microstructure was based on SEM-EDX-WDX, TG-DTA-EGA and XRD analysis.

KLÍČOVÁ SLOVA

geopolymer, alkalická aktivace, sekundární suroviny, cementářské odprašky

KEYWORDS

geopolymer, alkali activation, by-product materials, cement kiln dust

OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV V OBLASTI VÝVOJE GEOPOLYMERŮ	4
1.1	Charakterizace geopolymérů.....	5
1.2	Alkalický aktivátor.....	7
1.3	Sekundární suroviny pro přípravu geopolymérů	9
1.3.1	<i>Alkalická aktivace vysokopecní strusky</i>	<i>9</i>
1.3.2	<i>Alkalická aktivace vysokoteplotního popílků</i>	<i>10</i>
2	CÍL PRÁCE	12
3	POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ	12
3.1	Měření pevností.....	12
3.2	Termická analýza (TG-DTA-EGA)	12
3.3	Rentgenová difrakce (XRD)	12
3.4	Skenovací elektronová mikroskopie (SEM-EDX).....	12
4	VÝSLEDKY PRÁCE.....	13
4.1	Mechanické vlastnosti.....	13
4.2	Charakterizace fázového složení geopolyméru.....	14
4.3	Studium mikrostruktury	16
4.4	Trvanlivost geopolymerních matric	17
4.5	Aplikace geopolymerního betonu	18
5	ZÁVĚR.....	20
6	LITERATURA	22
7	CURRICULUM VITAE	24

1 SOUČASNÝ STAV V OBLASTI VÝVOJE GEOPOLYMERŮ

Pod pojmem „polymery“ nerozumíme pouze syntetické organické makromolekulární látky, plasty nebo různé přírodní materiály (organické či hybridní anorganicko-organické biopolymery), ale i četné čistě anorganické látky přírodní či technogenní, jejichž vznik či příprava je založena rovněž na polymeraci či polykondenzaci. Důležitou skupinou těchto materiálů převážně amorfní struktury jsou geopolymery [1].

Na celém světě jsou ročně vyprodukovány miliony tun odpadních materiálů. Často tyto materiály obsahují těžké kovy, které negativně působí na životní prostředí. V současné době je snaha o využití těchto odpadních materiálů s cílem odvrátit vzrůstající zamoření planety toxickými látkami. Velké množství odpadů, tj. popílků, vzniká v tepelných elektrárnách a teplárnách, kdy z kotelních zařízení odpadá značné množství tuhých zbytků. Jejich množství a charakter je dán především vlastnostmi paliva, druhem a účinností kotelního zařízení a odlučovačů kouřových plynů. Velká část těchto odpadních produktů je stále skládkována nebo ukládána do povrchových lomů nebo do hlubinných dolů. Je tedy zapotřebí technologie, která bude moci jednoduše a levně zpracovávat velké množství těchto materiálů. Důležitou roli také hraje ekonomická stránka. Výrobním závodům se musí vyplatit tyto odpady recyklovat namísto pouhého odvozu na skládku [2,3,4]. Naším cílem je tedy využít popílků jako výchozí suroviny pro výrobu stavebních materiálů.

Dalším důvodem proč využívat sekundární suroviny je značné zvyšování produkce stavebních materiálů probíhající v celosvětovém měřítku, kdy spotřeba portlandského cementu stále roste. Výroba portlandského cementu je však energeticky náročná. Průmysl zabývající se výrobou PC je třetí energeticky nejnáročnější hned po výrobě hliníku a oceli, kdy na výrobu jedné tuny cementu je zapotřebí přibližně 4 GJ energie [5,6].

S výrobou cementu zároveň roste i produkce CO_2 , kdy během výroby 1 tuny portlandského slínku vzniká celkem 1 tuna CO_2 , z toho 0,55 t se uvolní při kalcinaci vápence a zbylých 0,4 t je způsobeno spalováním paliva. Emise oxidu uhličitého vytváří spolu s dalšími plyny skleníkový efekt, což vede ke změnám klimatu v důsledku globálního oteplování.

Snaha o snížení produkce portlandského cementu vede k alternativě, která nabízí použití alkalicky aktivovaných pojiv. I když portlandský cement bude ještě minimálně několik desetiletí naší maltovinou č. 1, pokroky aplikovaného výzkumu v oblasti alkalické aktivace vedlejších průmyslových produktů nenechávají na pochybách, že se tyto alkalicky aktivované druhotné suroviny stanou jedním z ekologicky i ekonomicky nejvýznamnějších materiálů 21. století [7,8,9,10].

1.1 CHARAKTERIZACE GEOPOLYMERŮ

Název geopolymer přinesl prof. Davidovits a přispěl k velkému rozvoji výzkumu alkalické aktivace. I když předtím se výzkumem alkalické aktivace se zabývala řada pracovišť, zejména v padesátých letech v Kyjevě, následně pak i v Polsku, v Československu, Finsku, Rumunsku a později i v dalších státech, prof. Davidovits se zasloužil o významnou publicitu těchto materiálů, když patentoval pojiva založená na alkalické aktivaci metakaolinu roztokem hydroxidu, uhličitanu nebo křemičitanu sodného, či draselného, která jsou připravena bez přítomnosti vápenaté složky a zejména když těmto pojivům dal atraktivní historický podtext o možnostech, že tyto materiály byly používány ve starém Egyptě při stavbě pyramid. Toto pojivo nazval geopolymer a zahrnul tyto materiály do skupiny polysialátů.

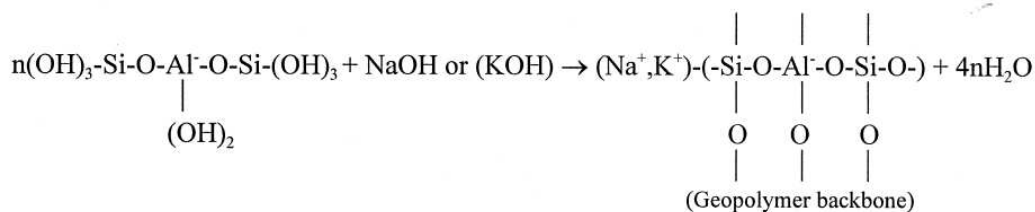
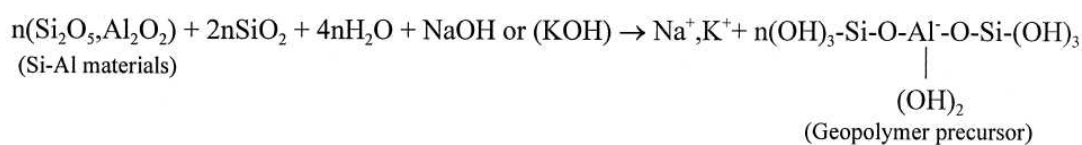
Obecný zápis polysialátů vystihuje vzorec $M_n\{-(Si-O)_z-Al-O\}_n \cdot wH_2O$, kde z vyjadřuje poměr $SiO_2:Al_2O_3$, M je kationt alkalického kovu a n je stupeň polykondenzace. Davidovits zavedl teorii, podle které je geopolymer látka, která vzniká anorganickou polykondenzací tzv. geopolymerací, kdy ^{27}Al NMR spektrum musí obsahovat pík kolem 55 ppm. Hliník tedy musí být pouze v koordinaci 4. Pokud tato podmínka není splněna, produkt se nemůže nazývat geopolymer, ale alkalicky aktivovaný materiál. Tato velice striktní formulace však zahrnuje jen materiály, které vznikly alkalickou aktivací čistého metakaolinu. Dnes se začíná pro tyto sodné, draselné aluminosilikáty zavádět termín „pravé“ geopolymery a pro další materiály s jistým obsahem N(K)ASH gelu, ale též s obsahem vápenaté či jiné složky např. ve formě CSH gelu se doporučuje název „geopolymerní materiály“. Nicméně lze konstatovat, že se odbornou veřejností přijatý výstižný název „geopolymery“ vžil a dnes se již používá obecně pro všechny, i vícesložkové alkalicky aktivované aluminosilikáty. Jejich společným znakem je amorfní trojrozměrná mikrostruktura s nahodilým uspořádáním křemičitanových a hlinitanových tetraedrů s kationem alkalického kovu vyvažující náboj $[Al(OH)_4]^-$. Lze je považovat za prekursorů zeolitů, vzájemně se lišících chemickým složením, způsobem přípravy a vlastnostmi [11,12,13].

Výsledky, které byly až dosud publikovány nám dávají možnost prohlásit, že geopolymerní materiály [14]:

- nemají monolitickou strukturu typu polysialát-siloxo
- alkalický kationt (K,Na) je přítomný ve struktuře v solvované formě, je vázán slaběji než v krystalické struktuře zeolitů (tento fakt vede k potenciálnímu nebezpečí tvorby výkvětů)
- je charakterizován náhodně trojrozměrným uspořádáním
- reprezentuje pórovitý materiál s póry o velikosti od nanometrů po mikrometry
- obsahuje vodu v pórech a v gelu
- voda hraje roli nosiče alkalického aktivátoru a „reologickou“ vodu

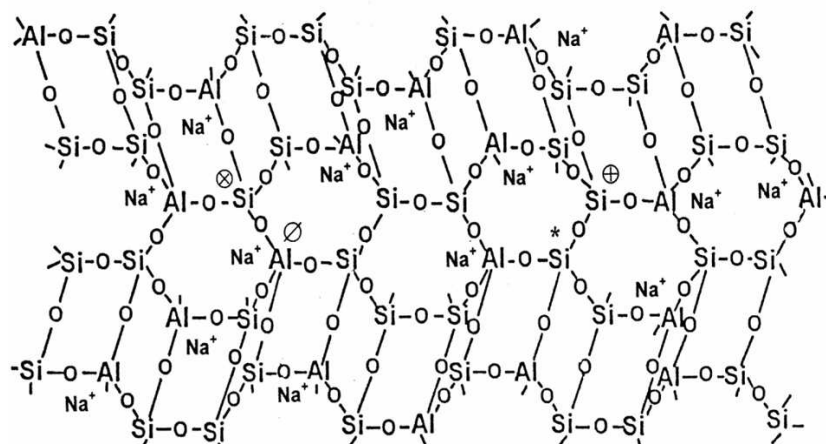
- krystalické a amorfní hydráty se objevují pouze v přítomnosti strusky, nebo v materiálu bohatém na vápník

Mechanismus zesítení a tuhnutí geopolymerních materiálů stále ještě není zcela objasněn, stejně tak jako není popsána reakční kinetika. Nicméně je známo, že geopolymerní novotvary vznikají z roztoků, kdy prvním krokem musí být rozklad (rozpuštění) základního aluminosilikátu – převedení jeho podstatné části do roztoku. Rozklad probíhá relativně rychle v silně alkalickém prostředí o vysokém pH 13–14. Následuje polykondenzace vzniklých křemičitanových a hlinitanových tetraedrů, které se vzájemně prováží kyslíkovými atomy na vrcholech tetraedrů do trojrozměrné geopolymerní struktury amorfního gelu $[M_x(AlO_2)_y(SiO_2) \cdot nMOH \cdot mH_2O]$, který následně tuhne v geopolymer (obr. 1) [10,15].



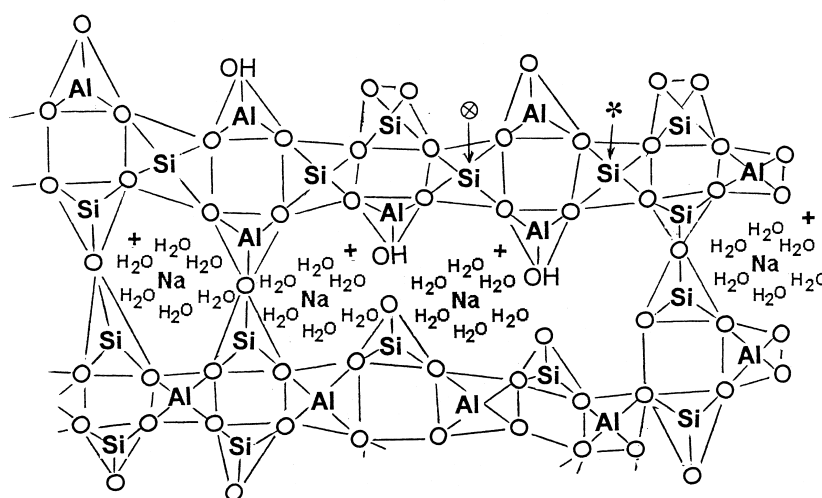
Obr. 1: Reakce vedoucí k formaci geopolymerní struktury

Strukturální model geopolymery vypracoval Davidovits [16] na základě alkalické aktivace metakaolinu. V tomto modelu předpokládá v podstatě monolitický polymer podobný organickému polymeru (obr. 2).



Obr. 2: Davidovitsův model geopolymerní struktury

Další pokrok ve výzkumu mikrostruktury produktů alkalické aktivace (geopolymerace), který byl založen na celé řadě metod jako je například termická analýza, porozimetrie a MAS NMR spektroskopie (Si, Al a především Na) dovoluje poněkud poupravit tuto koncepci. Na základě výše uvedených analýz Barbarosa [17] navrhl modifikovaný model (obr. 3). Model vychází z výsledků NMR spektroskopie, která prokázala, že geopolymerní materiály mají NMR spektra podobná jako alumino-silikátová skla. Oba materiály vykazují trojrozměrné uspořádání. Nicméně liší se tím, že ve struktuře skla není přítomna ani voda ani póry [14].



Obr. 3: Barbarosiv model geopolymerní struktury

1.2 ALKALICKÝ AKTIVÁTOR

Nejběžnějším aktivátorem je roztok hydroxidu sodného a křemičitanu sodného, kdy se s výhodou využívá vyššího silikátového modulu ve vodním skle. Aktivátory na bázi draslíku jsou používány zřídka, a to zejména díky vyšší ceně. Na druhé straně důvod užití draselných aktivátorů spíše než sodných spočívá především v tom, že tyto aktivátory významně redukuje tvorbu výkvětů. Při aktivaci je vhodné, aby molární koncentrace alkalické složky byla stejná jako složky hlinité. Je-li značně vyšší, může dojít k bobtnání tuhnutí kompozitu tvorbou hydrátu křemičitanu sodného, což je podstatou destrukce běžných ztvrdlých betonů (tzv. alkalické rozpínání). Zásadní roli hraje i obsah vody, kdy při požadovaných vyšších pevnostech kompozitu, je výhodné pracovat s patřičně nízkým vodním součinitelem [18].

Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících pevnost výsledných produktů je pH alkalického aktivátoru. Phair a van Deventer [19] studovali vliv různého pH na pevnost geopolymerního materiálu. Výsledek práce ukázal, že vzorky při pH = 14 měly asi padesátkrát větší pevnost v tlaku než při pH = 12. Tuto skutečnost ovlivňují dva hlavní faktory: Se zvyšujícím se pH totiž dochází k tvorbě krátkých řetězců

oligomerů a monomerních silikátů, které tak mohou vytvářet geopolymerní pojivovou fázi. Druhým faktorem, který značně přispívá geopolymerní reakci, je zvětšující se množství hlinitanových aniontů rozpuštěných z původního aluminosilikátového materiálu.

Dalším z faktorů, které mají vliv na pevnost geopolymerního materiálu je druh používaného alkalického aktivátoru. Na^+ a K^+ kationy mají tento efekt odlišný a to v důsledku jejich rozdílné velikosti. Kation s menší velikostí podporuje tvorbu malých silikátových oligomerů, jako například silikátové monomery, dimery a trimery. Proto můžeme očekávat, že Na^+ s menším iontovým poloměrem bude v reakcích více aktivnější než K^+ , což vede k lepšímu rozpuštění aluminosilikátu. Tuto teorii potvrdili ve své studii Xu a van Deventer [15], kteří zkoumali chování přírodních aluminosilikátů aktivovaných buď NaOH , nebo KOH . Výsledky ukázaly, že všechny alkalicky aktivované přírodní sloučeniny vykazovaly větší pevnosti při použití KOH -aktivátoru, navzdory tomu, že se dané minerály rozpouštěly lépe při užití NaOH . Tuto skutečnost vysvětlil Phair a van Deventer [19] následovně; jelikož K^+ kationy mají menší „hydratační povrch“ než Na^+ , dochází proto k polykondenzačním reakcím, které vytvářejí těsnější a hustší zesílení, což vede i k celkově větší pevnosti geopolymerní matrice.

Použitý druh alkalického aktivátoru má rovněž vliv na tvorbu výkvětů. Ve studii F. Škváry [20] se atomy Na nebo K v geopolymerních strukturách vyskytují ve formě $\text{Na}, \text{K}(\text{H}_2\text{O})_n^+$ (obr. 1) spíše než jako samostatné kationty Na^+ , K^+ . Vazba $\text{Na}, \text{K}(\text{H}_2\text{O})_n^+$ je slabší než Na^+ , K^+ . Z tohoto důvodu tento fakt vede k vyšší vyluhovatelnosti Na ze struktury a tedy vytvoření výkvětů. Výkvětům lze předcházet záměnou sodného za draselný alkalický aktivátor, protože K_2CO_3 nevytváří viditelné hydráty. Rozpustnost K_2CO_3 , který se tvoří na povrchu alkalicky aktivovaného materiálu je vyšší než u $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$, proto v kontaktu s vodním prostředím se rozpouští prakticky bez tvorby viditelných výkvětů.

Díky vysoké ceně alkalických aktivátorů jako jsou hydroxidy a vodní skla je snaha o jejich nahrazení odpadními surovinami. Cementářské odprašky, díky vysokému množství alkálií a v podstatě zanedbatelnou cenou, se nabízejí jako možná alternativa.

V dílčích provozech cementárny vzniká jistý podíl velmi jemných, pevných částic, které je nutno hlavně z hygienických i ekonomických důvodů zachycovat. K odstraňování částic velmi malých rozměrů se používá elektrofiltrů. Princip jejich funkce je založen v záporném nabití částic po průchodu elektrickým polem a jejich přitažení ke kladně nabitě stěně filtru. Velkou předností elektrofiltrů je jejich vysoká účinnost dosahující až 99 % i to, že odlučují i částice menší než $10 \mu\text{m}$. Využití těchto materiálů je v současné době velmi sporadické, nejčastěji se používají jako plnivo do asfaltu pro chodníky a střešní krytiny, každý rok jsou však miliony tun odváženy na skládku. Nicméně velký obsah alkálií, sulfátů a volného vápna dělají odprašky výborným alkalickým aktivátorem pucolánových materiálů.

Při nízkém pH, menším než 11,5, u latentně hydraulických látek jako je například vysokopecní struska nedochází k jejímu rozpuštění z důvodu vytvoření vrstvy

aluminosilikátu na povrchu zrn strusky, která zpomalí další hydrataci. Odprašky díky velkému množství sodných a draselných solí, které při kombinaci s vápnem reagují vzájemnou výměnou Ca^{2+} a OH^- iontů, vytvářejí sodné a draselné hydroxidy. Roztok tak vykazuje vysoké pH, což vede k rozložení depolymerovaného aluminosilikátového skla vysokopecní strusky.

Použití a účinnost odprašků jako alkalického aktivátoru vysokopecní strusky se odvíjí od jejich fyzikálních a chemických vlastností, především tedy obsahu alkálií, volného vápna a sulfátů. Dá se očekávat, že vysoký podíl volného vápna zlepšuje hydratační proces.

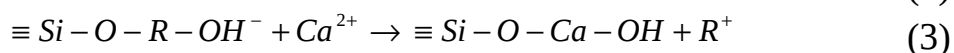
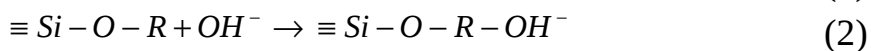
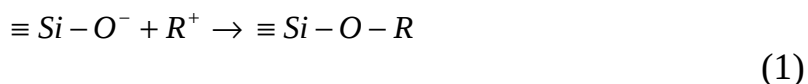
1.3 SEKUNDÁRNÍ SUROVINY PRO PŘÍPRAVU GEOPOLYMERŮ

Pro přípravu geopolimerů lze využít velkoobjemově produkované průmyslové druhotné suroviny, jako například strusky a popílky, které jsou již dnes dobře známy jako pucolánové nebo latentně hydraulické látky přidávající se do cementu. Toto využití současně přináší jak ekonomické, tak i ekologické výhody. Není tedy třeba hledat vhodné přírodní suroviny [21].

1.3.1 ALKALICKÁ AKTIVACE VYSOKOPECNÍ STRUSKY

Nejčastěji je vysokopecní struska aktivována NaOH, Na_2CO_3 nebo sodným vodním sklem. Příklad aktivátoru se pohybuje kolem 2–7 hm.% oproti strusce. Do takto alkalicky aktivované strusky (AAS) mohou být přimíchány další materiály ovlivňující vlastnosti konečného produktu. Například popílky a mletý vápenec mají za následek lepší zpracovatelnost směsi, přidavek mikrosiliky vede k potlačení možných výkvětů a využití práškového železa zase zlepšuje chemickou odolnost.

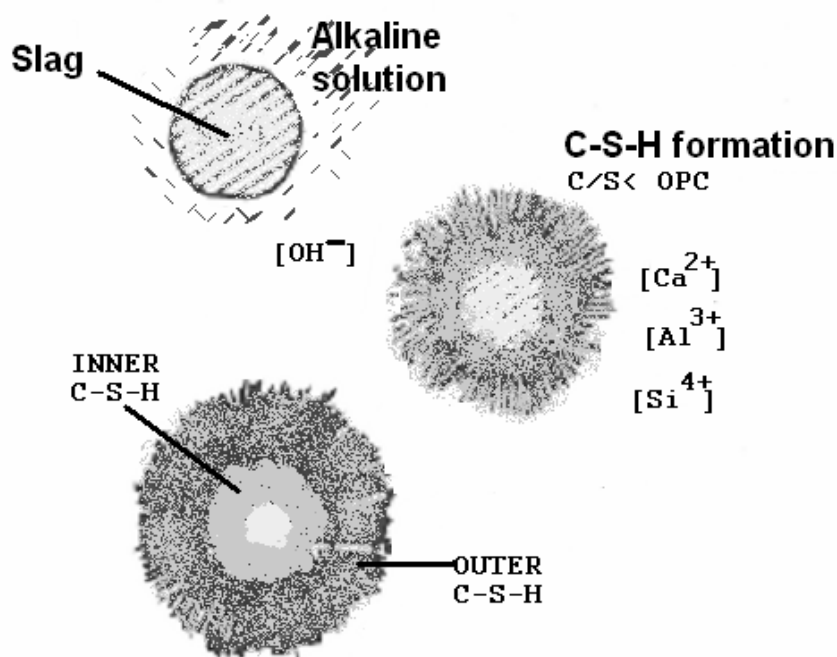
Pro materiály, bohaté na SiO_2 a CaO jako například vysokopecní struska, vzniklé alkalickou aktivací, navrhl Glukhovskiy [22] a Krivenko [23] model, ve kterém kation (R^+) funguje v prvních krocích hydratace jako katalyzátor, který umožňuje začlenění Ca^{2+} iontů do struktury:



Reakce tak dále postupuje a alkalické kationty tak formují konečnou strukturu. Hydratace v AAS probíhá velice rychle. Při pokojové teplotě je do jedné hodiny zhydratována zhruba jedna třetina strusky a do 24 hodin celá dvě třetina strusky.

Model AAS, který navrhl Fernández-Jiménez, je zobrazen na obr. 4 [24]. Vnitřní produkt KOH, nebo NaOH aktivované strusky obsahuje hydrotalcit společně s CSH fází podobné i tvořícímu se vnějšímu produktu, který má velký stupeň uspořádání.

Struktura takto aktivované pasty vytváří, stejně jako na obr. 4, kruhový charakter složený s CSH gelu strukturálně podobnému tobermoritu. Hlavním hydratačním produktem AAS je tedy CSH fáze, která se liší od hydratačních produktů portlandského cementu nižší hodnotou poměru C/S a přítomností výrazné koncentrace hlinitanových a alkalických iontů. Poměr C/S v CSH je též ovlivněný pH, kdy klesá s jeho zvyšující se hodnotou a zvoleným typem alkalického aktivátoru, kdy rovněž klesá při aktivaci vodním sklem [25,26,27].

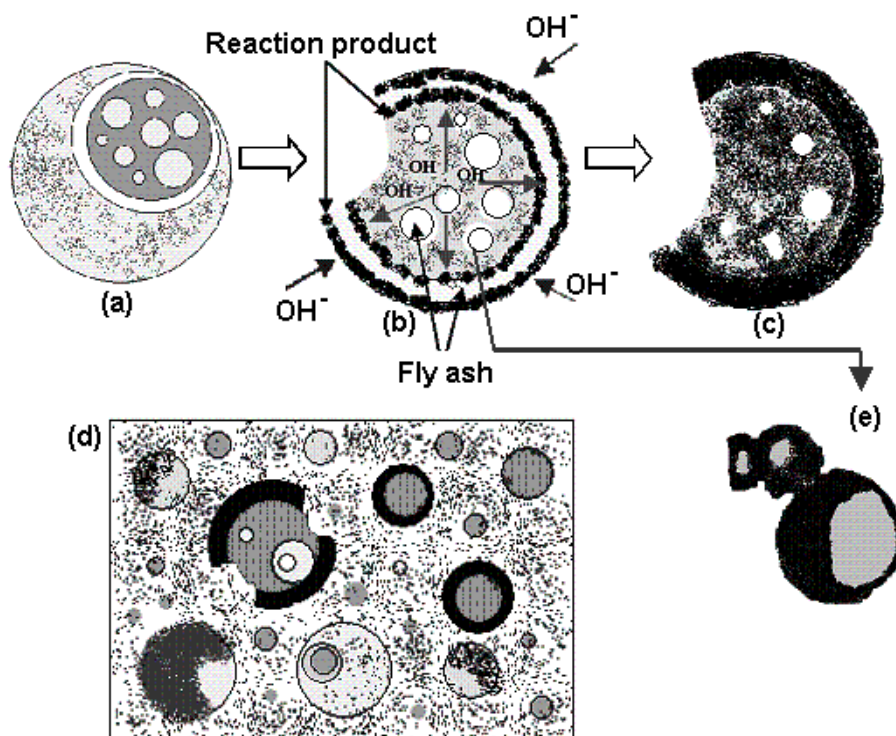


Obr. 4: Teoretický model reakčního mechanismu alkalicky aktivované strusky [34]

1.3.2 ALKALICKÁ AKTIVACE VYSOKOTEPLOTNÍHO POPÍLKU

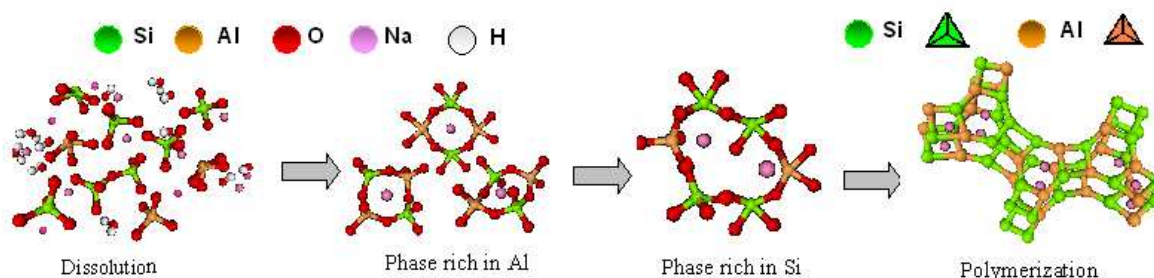
V roce 2005 navrhl Fernández-Jiménez [18] dvou stupňový model alkalické aktivace popílku založeném na principu syntézy zeolitů. Prvním krokem je nukleace, při které dochází k rozpuštění aluminosilikátů za vytvoření iontových komplexů. Ve druhém kroku, kdy nuklei dosáhnou kritické velikosti, začínají růst. Konečným produktem je tak amorfnní matrice alkalického aluminosilikátového gelu (N(K)ASH gel), kterou můžeme nazvat „zeolitický prekursor“. Model reakčního mechanismu alkalicky aktivované částice popílku zachycuje obrázek 5. V prvním kroku (obr. 5a) dochází ke vzniku díry ve slupce popílku způsobeného chemickým působením alkalického aktivátoru na částici popílku, což má za následek pronikání aktivátoru dovnitř zrna, kde přítomná menší zrnka popílku jsou rovněž vystavena působením alkálií (obr. 5b). Reakční produkty tak vznikají současně jak uvnitř, tak vně kulovité

částice, dokud není zrnko popílku téměř celé zreagováno (obr. 5c). Morfologie takto vzniklé matrice je zobrazena na obr. 5d.



Obr. 5: Teoretický model reakčního mechanismu alkalicky aktivovaného popílku [18]

Strukturální model vzniku N(K)ASH gelu (obr. 6) můžeme popsat následovně. Základním předpokladem je rozpuštění vstupního aluminosilikátu tzv. alkalickou hydrolýzou (spotřebovává se voda). Rozpouštění je podpořeno vyšším pH, což vede ke vzniku přesyceného aluminosilikátového roztoku. V takto koncentrovaném roztoku dochází díky kondenzaci vzniklých oligomerů k utvoření rozsáhlého zesíťení. Tento proces má za následek uvolnění vody, která se spotřebovávala při alkalické hydrolýze. Voda tedy hraje roli reakčního média, která se poté zadržuje uvnitř vytvořeného gelu [28].



Obr. 6: Strukturální model vzniku N(K)ASH gelu [39]

2 CÍL PRÁCE

Disertační práce je zaměřena na vývoj a výzkum alkalicky aktivovaných systémů na bázi geopolymerních struktur připravených z velkoobjemově produkováných průmyslových odpadů a jejich následná aplikace ve stavebnictví. Pro tuto práci byly tedy vytyčeny následující cíle:

- literární rešerše na téma alkalická aktivace druhotných surovin
- charakteristika vhodných odpadních surovin pro přípravu geopolymerních matric
- sledování mechanických vlastností připravených kompozitů
- popis mikrostruktury a morfologie alkalicky aktivovaných systémů

3 POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ

3.1 MĚŘENÍ PEVNOSTÍ

Mechanické vlastnosti vzorků byly testovány po 1, 7 a 28 dnech na základě normy ČSN EN 196-1 za použití lisu DESTTEST 3310. Hodnoty pevností byly získány průměrem z naměřených čtyř hodnot.

3.2 TERMICKÁ ANALÝZA (TG-DTA-EGA)

Pro termickou analýzu (simultánní TG-DTA-EGA) bylo použito termického analyzátoru (TG-DTA, TA Instruments SDT Q600) spojeného přes vyhřívanou kapiláru s infračerveným spektrometrem (FT-IR analyzátor Nicollet iS10). Kapilára i měřící cela infračerveného spektrometru byla vyhřívána na 200 °C.

3.3 RENTGENOVÁ DIFRAKCE (XRD)

Data z rentgenová prášková difrakce byly získány za použití rentgenu PANanalytical Empyrean s $\text{CuK}\alpha$ anodou vybavený 3D detektorem PIXcel^{3D}.

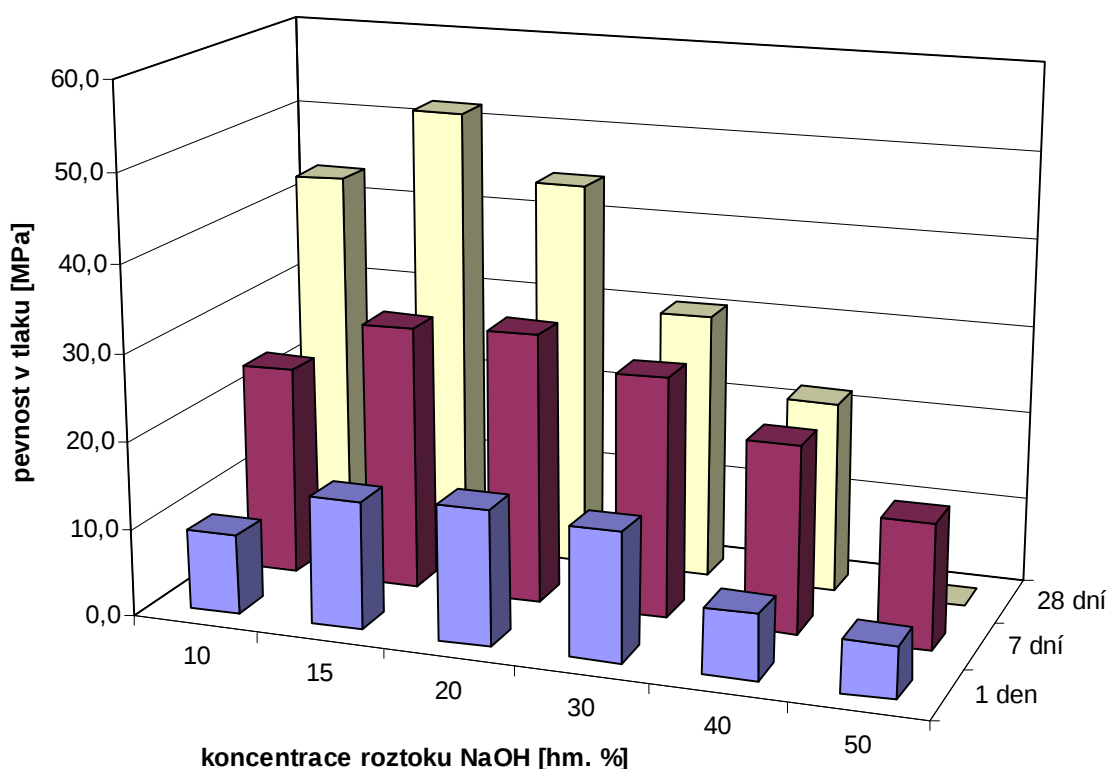
3.4 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE (SEM-EDX-WDX)

Pro studium mikrostruktury nábrusů vzorků byl využit elektronový mikroskop JEOL JSM-7600F vybavený energodisperzním a vlnovědisperzním analyzátozem rentgenového záření. Většina vzorků byla leštěna pomocí iontové leštičky JEOL Cross section CP Polisher po dobu pěti hodin. Výsledky EDX analýzy byly vyhodnoceny za použití systému Oxford Instruments INCA.

4 VÝSLEDKY PRÁCE

4.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vývoj pevností geopolymerních past je zobrazen na obr. 7. Zajímavý pevnostní trend mají vzorky aktivované roztokem NaOH. Pevnostní maximum bylo zaznamenáno již při koncentraci 15 hm. % a dále se jen snižovalo. Důsledkem tohoto poklesu je vysoká koncentrace sodné složky, která není stejná jako složka hlinitá. Je-li totiž značně vyšší, dochází k bobtnání tuhnoucího kompozitu tvorbou hydrátu křemičitanu sodného, což je podstatou destrukce běžných ztvrdlých betonů (tzv. alkalické rozpínání).

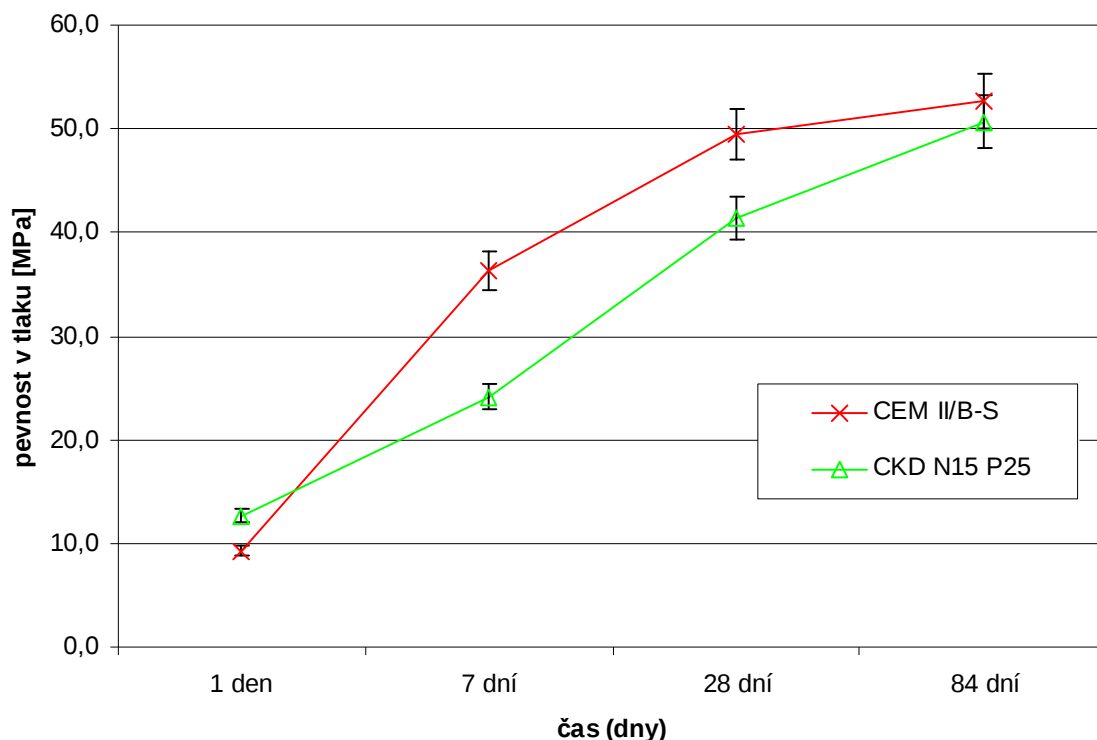


Obr. 7: Vliv koncentrace NaOH na pevnosti připravených geopolymerních matric

Do navrhnutých geopolymerních matric s cementářskými odprašky bylo následně zkoušeno přidávat určitý hmotnostní přídavek popílků, který nahrazuje podíl vysokopevní strusky v pojivu a výrazně tak snižuje výslednou cenu materiálu. Bylo využito jak vysokoteplotních, tak fluidních popílků. Z výsledků měření pevností připravených trámů byl zjištěn jejich maximální přídavek odpovídající nahrazení vysokopevní strusky 25-ti hm. %.

Vzájemný poměr jednotlivých surovin pro přípravu pojiva s přídavkem vysokoteplotního popílku z Počerad 5B a cementářských odprašků byl upraven

snížením podílu cementářských odprašků způsobujících objemovou expanzi pojiva. Díky této úpravě vzájemných hmotnostních poměrů rovněž došlo ke zlepšení mechanických vlastností, které byly následně porovnány s referenční cementovou pastou (obr. 8).



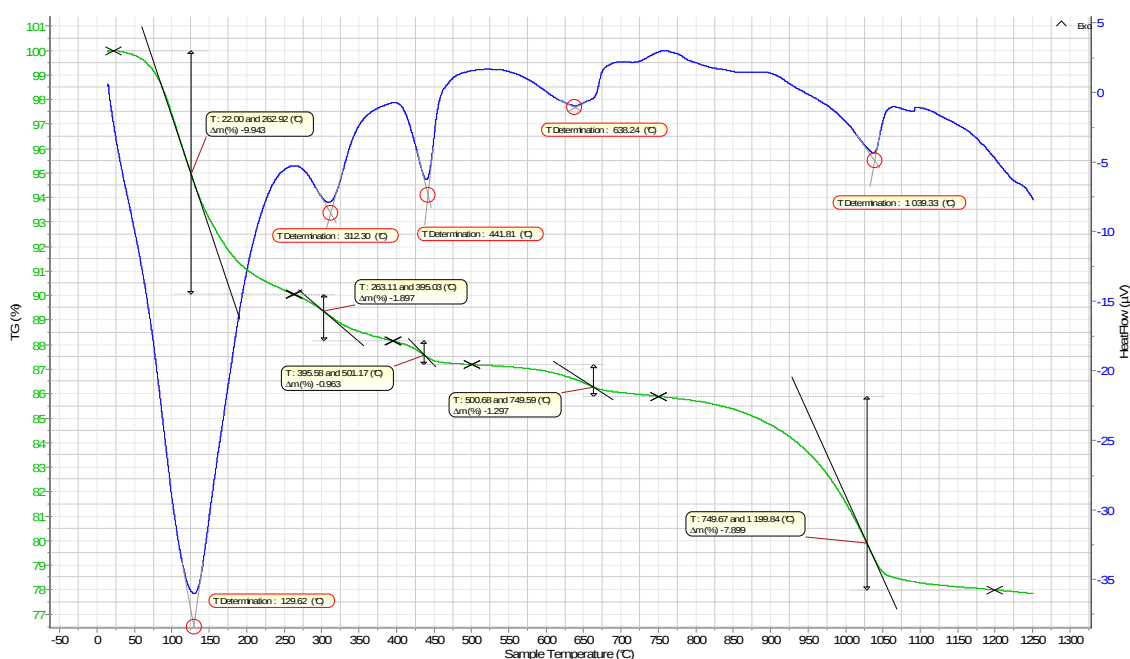
Obr. 8: Vývoj pevnosti v tlaku připravených testovacích vzorků

4.2 CHARAKTERIZACE FÁZOVÉHO SLOŽENÍ GEOPOLYMERU

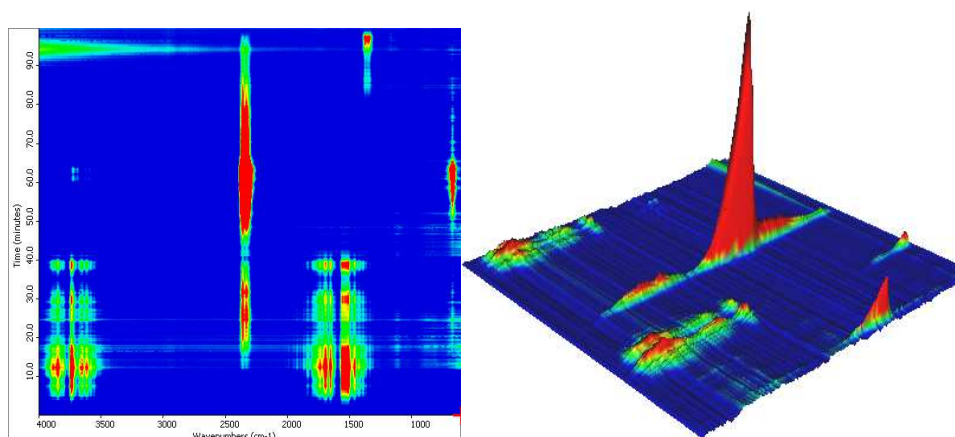
Pro bližší pochopení procesu tvrdnutí alkalicky aktivovaného pojiva na bázi cementářských odprašků byla provedena rentgenová difrakční analýza vzorků pojiva v různých stádiích tuhnutí. Jako zcela nová krystalická fáze byl identifikován hydrotalcit. Zároveň docházelo i k tvorbě portlanditu, uhličitanu a rovněž k nárůstu množství pojivové fáze C-S-H gelu. Další charakterizace v procesu tuhnutí geopolymery byla provedena na základě výsledků termických analýz.

V průběhu analýzy dochází nejdříve k odpařování gelové vody vázané v C-S-H gelu a geopolymerních strukturách. Teplota maxima rychlosti tohoto procesu se s dobou tvrdnutí posouvá k vyšší hodnotě v důsledku zvyšujícího se množství pevněji vázané gelové vody. Samozřejmě se množství odpařené gelové vody s dobou tvrdnutí zvyšuje. Následuje současná dehydroxylace a dekarbonatace hydrotalcitu, který byl identifikován pomocí XRD. DTA křivka ukazuje i různá maxima v procesu dehydroxylace a dekarbonatace hydrotalcitu oproti „čisté“ fázi. Tyto odlišnosti jsou zřejmě spojeny s různým obsahem kationtů železa ve struktuře hydrotalcitu ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Za zvýšené hodnoty pH může docházet

k částečnému nahrazení dvojmocných kationtů kovů Mg^{2+} za Fe^{2+} , ale i trojmocných Al^{3+} za Fe^{3+} , kdy výsledná fáze může být vystižena obecným vzorcem: $\text{M}^{2+} \text{M}^{3+} (\text{OH}) \text{A}^{n-} \cdot y\text{H}_2\text{O}$, kde M^{2+} a M^{3+} jsou dvojmocné a trojmocné ionty kovů, A je aniont s n záporným nábojem a y označuje proměnlivé množství vody v mezivrstvě. Typický poměr $\text{M}^{2+}:\text{M}^{3+}$ v hydrotalcitu se pohybuje od 2:1 po 3:1. Rovněž vzájemný poměr $\text{Mg}^{2+}:\text{Fe}^{2+}$, stejně tak $\text{Al}^{3+}:\text{Fe}^{3+}$ může být rozličný, což má vliv i na chování fází v průběhu procesu zahřívání. Díky kratší vazbě $\text{Mg}-\text{OH}$, která je silnější než-li delší $\text{Fe}-\text{OH}$ dochází v procesu dehydroxylace k posunu teplotních maxim ($\sim 330^\circ\text{C}$ u čisté fáze a ~ 312 u CKD pojiva). Další efekty v průběhu TG-DTA analýzy souvisí s přítomností portlanditu a kalcitu. Záznam s TG-DTA analýzy vzorku ztuhnutého pojiva je spolu s analýzou uvolněných plynů (EGA) uveden na obrázcích 9, 10.



Obr. 9: TG-DTA analýza geopolymerního pojiva



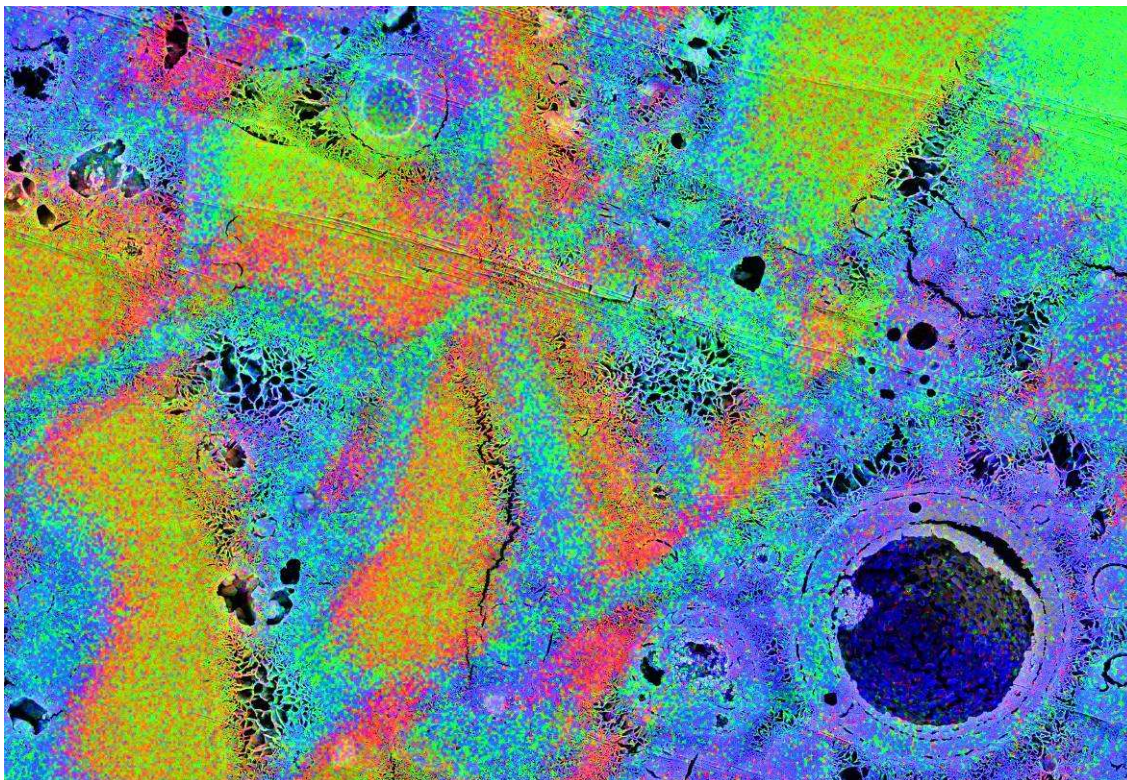
Obr. 10: EGA analýza geopolymerního pojiva

4.3 STUDIUM MIKROSTRUKTURY

Hlavní pojivovou fází alkalicky aktivovaného systému vysokoteplotního popílku a vysokopecní strusky s cementářskými odprašky (CKD) je C-S-H gel. Tato fáze se nachází v blízkosti zrn strusky a vyznačuje se hodnotou poměru $\text{Ca/Si} \sim 1,1$. Hodnota tohoto poměru se téměř shoduje jak s C-S-H gelem tvořícího se ve směsném cementu, tak i v alkalicky aktivované strusce. Nanostruktura C-S-H gelu není stále ještě zcela objasněna, nicméně je známo, že se tato fáze velice podobá struktuře tobermoritu a jennitu. Obecně jsou předpokládány dva druhy C-S-H fáze, C-S-H(I) a C-S-H(II) [35]. C-S-H(I) se vyznačuje malou hodnotou poměru Ca/Si , která je obecně $< 1,5$ a předpokládá strukturu odvíjející se od 1,4-nm tobermoritu. C-S-H(II) s poměrem $> 1,5$ má pravděpodobně strukturu jennitu [29]. Z výsledků EDX analýzy tedy vyplývá, že ve všech třech systémech je jako pojivová fáze zastoupen druh C-S-H(I) podobný tobermoritu. Nicméně i tento druh lze dále rozdělit podle odlišného prostorového uspořádání. Tento typ pojivové fáze se přes shodnou hodnotu poměru Ca/Si liší vyšším číslem poměru Al/Ca , které je u vzorku alkalicky aktivované strusky rovno $\sim 0,1$, naproti tomu v systému s popílky a CKD dvakrát tak vyšší $\sim 0,2$. Tato skutečnost směřuje k většímu stupni polymerace řetězců skrze tzv. Al-přemostění, což má výrazný vliv na konečné pevnosti materiálu. Díky zesítnění skrze vazbu Si-O-Al tak vzniká pojivová fáze CASH gelu.

Druhý typ pojivové fáze se nachází v okolí, ale i uvnitř částic vysokoteplotního popílku. Tvarově je tento produkt odlišný od prvního typu pojivové fáze, vyznačuje se navzájem srostlými lupínkovitými útvary. Chemické složení této fáze je také různé. Hlavním rozdílem je hodnota poměru $\text{Ca/Si} \sim 0,6$, která je výrazně nižší oproti předchozí fázi. Naopak vysoký podíl hliníku $\text{Al/Ca} \sim 1,1$ a přítomnost hořčíku může napovědět, že se zřejmě jedná o fázi podobné zeolitům. Díky vyššímu obsahu vápníku, který v zeolitických strukturách není majoritním prvkem a jistým podílem sodíku lze usuzovat strukturu pojivové fáze odvíjející se od Ca-faujasitu. Tato zeolitická fáze byla rovněž prokázána XRD. Z důvodu nevýrazné a málo ostré hlavní difrakce bude mít tak tato pojivová fáze spíše semikrystalický charakter.

Dobrou vypovídající hodnotu má obrázek 11, který byl získán EDX mapováním leštěného povrchu vzorku geopolymerního. Červeně zobrazená místa zastoupená hořčíkem jsou zaznamenána v jednotlivých zrnech strusky, kdy vyšší koncentrace hořčíku (tmavě červená barva) postupuje spíše k okrajům $\Rightarrow$ vnější obal částic strusky tvořený hydrotalcitem. Pojivová fáze je naopak zabarvena modrozeleně, kdy zelená barva indikuje zastoupení vápníku a modrá sodíku. Přítomnost alkálií byla též pozorována uvnitř a kolem částic popílků (modrá barva).



*Obr. 11: EDX mapa vzorku geopolymery s CKD
(červená – hořčík; zelená – vápník; modrá – sodík)*

4.4 TRVANLIVOST GEOPOLYMERNÍCH MATRIC

Zkoušky trvanlivosti byly provedeny na základě tzv. zrychlených zkoušek trvanlivosti, při kterých jsou vzorky vystaveny buď extrémním nebo koncentrovaným agresivním vlivům. Zkoušky byly provedeny sice na základě platných ČSN norem, které se však týkaly převážně betonových vzorků. U některých zkoušek, jako byla například odolnost proti působení kyselin a síranová odolnost byla dodržena pouze koncentrace agresivního činidla a byl tak sledován jen trend vývoje pevností po expozici v korozním prostředí. Nicméně všechny tyto zkoušky měly jako hlavní cíl stanovit pouze to, zda-li má vůbec smysl pojivovou geopolymerní matici využít pro výrobu betonu a na co si při produkci betonových dílců dávat pozor. U každé zkoušky trvanlivosti CKD pojiva bylo vždy provedeno srovnání s cementovou pastou založenou na hydrataci struskoportlandského cementu CEM II/B-S.

Z výsledků vyplynulo, že geopolymerní pojivo vykazovalo ve srovnání s referenčním vzorkem celkově nižší odolnost vůči extrémním vlivům působení síranů, kyselin či procesu karbonatce nebo mrazuvzdornosti. Nicméně ani u jedné zkoušky nedošlo k extrémnímu zhoršení mechanických vlastností vedoucí k výraznému poklesu v pevnostech geopolymerního materiálu.

4.5 APLIKACE GEOPOLYMERNÍHO BETONU

Na základě velmi dobrých mechanických vlastností CKD pojiva a zjištění vlastností týkající se jejich trvanlivosti, byla navrhnutá matrice použita pro výrobu geopolymerního betonu. Díky spolupráci s firmou ŽPSV a.s. bylo možné ve výrobním závodu Nové Hradky vyzkoušet navrhnutý geopolymerní beton v praxi.

Složení geopolymerního betonu ukazuje následující tabulka (tab. 1), kde množství jednotlivých složek je uváděna v kilogramech a počítána na objem 1 m³ betonu. Jako kamenivo byly využity 3 frakce z Halámek; 0/4, 4/8, 8/16. Pro lepší zpracovatelnost bylo do výsledné záměsi přidána voda na rozmíchání, hmotnostní koncentrace roztoku hydroxidu sodného tak nečinila 15 % jak v pojivových systémech, ale klesla na zhruba 10 %. Tato skutečnost bohužel poněkud ovlivnila tuhnutí výsledného betonu, kdy po 18 hodinách nebyl beton zcela ztuhlý. Nicméně i přesto šel výsledný betonový dílec dobře odformovat.

V tabulce 1 jsou rovněž doplněny přibližné ceny jednotlivých surovin, ze kterých lze snadno porovnat výslednou cenu betonu oproti běžnému OPC betonu. Ceny kameniva a vody jsou pro oba druhy betonů stejné. Konečná cena geopolymerního betonu je tedy zhruba 1 400 Kč za 1 m³ bez DPH, což je dnes běžná cena konstrukčního betonu C8/10. Zároveň bylo jeho produkcí zpracováno i jistý množství sekundárních surovin (popílky, cementářské odprašky), proto lze tento beton označit i za ekologický. Výsledná záměs byla následně použita pro výrobu přechodové desky. Postup produkce geopolymerního dílce zachycuje obr. 12.

Tab.1: Suroviny pro výrobu CKD geopolymerního betonu

Suroviny	1 m ³ [kg]	cena [Kč/t]
VP struska (380)	286	1 700
vysokoteplotní popílek	96	100
CKD	68	1
NaOH (50 hm. %)	45	10 000
voda	200	–
Halámky 0/4	795	260
Halámky 4/8	360	350
Halámky 8/16	370	310

(ceník surovin je aktuální pro měsíc říjen roku 2011 a uvádí ceny bez DPH)

1. Míchačka 	2. Míchání geopolymerního betonu 
3. Dopravník 	4. Transport betonu po výrobní hale 
5. Plnění formy z násypky 	6. Výsledný odformovaný produkt 

Obr. 12: Postup výroby CKD geopolymerního betonu

5 ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na vývoj geopolymerních matric, které budou základem průmyslově vyráběných geopolymerních betonů. Alkalickou aktivací strusky s přídavkem popílků byl připraven materiál, který svými mechanickými vlastnostmi, nízkou až téměř nulovou cenou výchozích surovin, bude silnou konkurencí doposud vyráběných betonů na bázi portlandského cementu. Vysoká cena alkalického aktivátoru limitující doposud tyto materiály pro široké možnosti jeho využití byla v této práci řešena částečným nahrazením hydroxidu sodného pomocí cementářských odprašků.

V první části disertační práce byly provedeny analýzy použitých druhů sekundárních surovin. Metody rentgenové, laserové difrakce a termických analýz tak umožnily charakterizovat tyto materiály po stránce chemické i fyzikální. Z následných zkoušek připraveného geopolymerního pojiva bylo zjištěno, že na konečný proces alkalické aktivace má vliv především složení amorfnní části sekundárních surovin. Bylo prokázáno, že jako vhodnější alternativa v procesu geopolymeryce je využití vysokoteplotních popílků namísto popílků z fluidního spalování.

Z celé řady teplárenských popílků byl na základě mechanických zkoušek vybrán pro alkalickou aktivaci v kombinaci s vysokopecní jemně mletou struskou Ostrava 380 vysokoteplotní popílek Počerady 5B, který umožnil nahradit stále se zdražující vysokopecní strusku až z 25 hm. %. Měření pevností připravených geopolymerních testovacích trámů rovněž vedlo k nalezení vhodného druhu aktivátoru a jeho optimálního hmotnostního poměru vůči ostatním složkám. Díky dobrým pevnostem vzorků a nižší ceně oproti roztoku hydroxidu draselnému byl vybrán jako vhodný alkalický aktivátor 15 hm. % roztok hydroxidu sodného. Přídavek cementářských odprašků byl zjištěn pomocí metody měření objemové expanze, kde jako doporučený hmotnostní přídavek do systému geopolymerní matrice činil zhruba 11 hm. %. Takto navržené pojivo bylo následně porovnáno na základě měření pevností s referenční cementovou pastou, vzniklou hydratací struskoportlandského cementu CEM II/B-S 32,5 N Hranice. Výsledky ukázaly na pomalejší nárůst pevností geopolymery, které se však po třech měsících téměř vyrovnaly.

Jednou z možných nevýhod geopolymery oproti pojivu z portlandského cementu je případná tvorba výkvětů na povrchu těchto materiálů. Sledování výkvětovitosti navržených alkalicky aktivovaných matric opět poukázalo na výhodnost využití vysokoteplotního popílku z Počerad 5B spolu s vysokopecní struskou a cementářskými odprašky. Oproti ostatním alkalicky aktivovaným systémům se neprojevovalo v tomto pojivu téměř žádná tendence ke tvorbě nežádoucího výkvětu a to i při aktivaci hydroxidem sodným.

Hydratace navrženého geopolymerního pojiva byla sledována pomocí isoperibolické kalorimetrie. Z výsledků kalorimetrických křivek bylo možné vyhodnotit jednotlivé doby pro indukční periodu a hydratační maximum. Zastavení

hydratace v těchto časech umožnilo následně sledovat pomocí XRD a termických analýz děje, které se udávají v průběhu tuhnutí geopolymery.

Rentgenová difrakce prokázala tvorbu nových fází, jako jsou portlandit a hydrotalcit. Tyto fáze byly rovněž dokázány pomocí termických analýz TG-DTA-EGA. Úbytek hmoty v průběhu termogravimetrické analýzy byl použit k hodnocení nárůstu pojivové fáze na základě množství odpařené gelové vody a také trendu nárůstu obsahu ostatních nově se vytvářejících fází. Diferenční termická analýza také poskytla informaci o charakteru fáze hydrotalcitu, kdy byly zjištěny odlišné teploty v procesu dehydroxylace a dekarbonatace této fáze oproti čisté fázi hydrotalcitu. Přítomností železa se dá vysvětlit rozdílná teplota těchto procesů. Železnaté ionty v jeho struktuře dávají navíc připraveným alkalicky aktivovaným materiálům typické zelené zbarvení lomových ploch.

Zelené zbarvení systémů na základě alkalické aktivace vysokopecní strusky je známo již řadu let, nicméně teorie jeho vzniku, ale i jeho vymizení v důsledku vystavení lomových ploch běžným atmosferickým podmínkám se lišily. Rovněž dosud není vysvětleno, zda má tento jev vliv na mechanické vlastnosti geopolymery vzniklých aktivací vysokopecní strusky. Tato práce usiluje na základě využití celé řady analytických metod o vysvětlení dopadu přítomnosti železa ve struktuře hydrotalcitu.

Další metoda, která prokázala výskyt železa ve fázi hydrotalcitu byla skenovací elektronová mikroskopie s energodisperzním a vlnovědisperzním analyzátozem rentgenového záření. Tato analýza rovněž umožnila stanovit vlastnosti tvořící se pojivové fáze, která je svým složením a hodnotou poměru Ca/Si velmi podobná C-S-H gelu v hydratovaném struskoportlandském cementu. Díky přítomnosti popílku byla prokázána i pojivová fáze podobná zeolitu Ca-faujasitu se spíše amorfním charakterem vyplývající z XRD analýzy.

Trvanlivost geopolymerního pojiva byla probírána z hlediska typů koroze, kterým může být materiál vystaven nejčastěji. Výsledky síranové koroze a odolnosti pojiva proti působení kyselin ukázaly na horší trend odolnosti než u referenčního cementové pasty. Nicméně vždy po jednom měsíci v korozním uložení docházelo u geopolymerních materiálů ke zlepšení mechanických vlastností. Mrazuvzdornost geopolymery a referenčního vzorku vykazovala do padesáti zmrazovacích cyklů podobný průběh, nicméně po 75 cyklech byla již překročena u obou pojiv mezni hodnota pro součinitel mrazuvzdornosti. V neposlední řadě byla provedena i zkouška odolnosti pojiva proti karbonataci, která svými výsledky potvrdila příznivý vliv cementářských odprašků v geopolymerním pojivu, kdy hloubka zkarbonatovaného okraje u tohoto pojiva byla téměř shodná s referenčním cementovým pojivem.

Posledním úkolem této práce bylo vyzkoušení navrženého pojiva pro průmyslovou výrobu geopolymerního betonu. Proces zhotovení betonového dílce v závodě Nové Hradý proběhl úspěšně bez sebemenších technologických problémů, kdy výsledkem bylo zhotovení přechodové desky. K velkovýrobní produkci navrženého geopolymerního betonu chybí pouze doladění přídatku záměsové vody,

jejíž nadměrné množství vedlo k pozdějšímu ztuhnutí vytvořeného produktu. Velmi příznivá je i konečná cena geopolymerního betonu srovnatelná s cenou běžného komerčně vyráběného konstrukčního betonu. Tato skutečnost vede k tomu, že vyvinutý materiál má výborný potenciál zaujmout své místo ve stavebním průmyslu.

6 LITERATURA

- [1] BRANDŠTETR, J., ODLER, I., SKALNÝ, J., KRÁTKÝ, J., HAVLICA, J., SZKLORZOVÁ, H.: Anorganická a hybridní pojiva a kompozity netradičního složení. *Silika* 14, 2004. č. 3-4, s. 97-100, č.5-6, s. 148-151.
- [2] DAVIDOVITS, J.: Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis* 37, 1991. pp. 1633-1659.
- [3] VAN JAARSVELD, J.G.S., VAN DEVENTER, J.S.J., LORENZEN, L.: The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: Part I. Theory and application. *Minerals Engineering*, Vol. 10, 1997. pp. 659-669.
- [4] XU, J.Z., ZHOU, Y.L., CHANG, Q., QU, H.Q.: Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers. *Material Letters* 60, 2005. pp. 820-822.
- [5] RANGAN, V.B.: Fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC 4, Perth, Curtin University of Technology Engineering Faculty, 2008. p. 40.
- [6] ŠKVÁRA, F.: Struskoalkalické cementy. *Stavivo* 1, 1985. roč. 860, s. 16-20.
- [7] DAVIDOVITS, J.: Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. *World Resource Review*, Vol.6, 2006.
- [8] McCAFFREY R.: Climate change and cement industry. *Global Cement and Lime Magazine*, 2002. pp. 15-19.
- [9] DAVIDOVITS J.: High-alkali cements for 21st century concretes in concrete technology, past, present and future. V. Mohan Malhotra Symposium, 1994.
- [10] BRANDŠTETR, J., OPRAVIL, T., HAVLICA, J.: Geopolymeric materials ancient and for the 21st century. 11th Int. Conf. Ecology and new building materials and products, Telč, 2007. s. 264-268.
- [11] DAVIDOVITS J.: Chemistry of geopolymeric systems, Terminology. In: Proc. Conf. Geopolymère, Saint-Quentin, 1994. pp. 9-40.
- [12] DAVIDOVITS, J.: Geopolymer chemistry and properties. 1st International Conference on Geopolymer, Compiègne, France, 1988. pp. 25-48.
- [13] McKENZIE, K.J.D.: What are these things called geopolymers? A physico-chemical perspective, *Advances in Matrix Composites IX*, ACS, 2003. pp. 175-186.
- [14] ŠKVÁRA, F.: Alkali activated materials or geopolymer?. *Ceramics-Silikáty* 51, 2007, pp. 173-178.
- [15] XU, H., VAN DEVENTER, J.S.J.: The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *Int. J. Miner. Process.* 59 (2000), 2000. pp. 247-266.
- [16] DAVIDOVITS, J.: Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J. Therm. Anal.* Vol. 37, 1991, pp. 1633-1656.

- [17] BARBAROSA, V.F.F., MACKENZIE, K.J.D., THAUMATURGO, C.: Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *Int.J.Inorg.Mater.* Vol. 2, 2000, pp. 309-317.
- [18] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., CRIADO, M.: Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. In *Cement and Concrete Research* 35, 2005. pp. 1204-1209.
- [19] PHAIR, J.W., VAN DEVENTER, J.S.J.: Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. *Minerals Engineering*, Vol. 14, No. 3, 2001, pp. 289-304.
- [20] ŠKVÁRA, F., KOPECKÝ, L., MYŠKOVÁ, L., ŠMILAUER, L., ALBEROVSKÁ, L., VINŠOVÁ, L.: Aluminosilicate polymers - geopolymers (influence of temperatures 20 – 1000 °C, efflorescences). In: *Ceramics – Silikáty* 53 (4), 2009. pp. 276-282.
- [21] BUCHWALD, A., KAPS, CH., HOHMANN, M.: Alkali-activated binders and pozzolan cement binders – complete binder reaction or two sides of the same story?. 11th International Congress on the Chemistry of Cements, Durban, South Africa, 2003. pp. 1238-1246.
- [22] GLUKHOVSKY, V.: Ancient, Modern and Future Cements. In 1st International Conference Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994. pp.1-8.
- [23] KRIVENKO, P.V.: Alkaline cements. In 1st International Conference Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994. pp.12-129.
- [24] FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., REVUELTA, D.: Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements. In *Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009)*, Bath, UK, 6-9 September, 2009. pp. 1-15.
- [25] ODLER, I.: *Special inorganic cement*. 2nd ed. Taylor & Francis, 2000. 584 p. ISBN: 0419227903.
- [26] RICHARDSON, I.G.: Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: application to hardened pastes of tricalcium silicate, β -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume. In: *Cement and Concrete Research* 34, 2004. pp. 1733-1777.
- [27] PUERTAS, F., PALACIOS, M., VÁZQUEZ, T.: Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *J. Mater. Sci.* 41, 2006. pp. 3071-3082.
- [28] DUXON, P., PROVIS, J.L., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., LUKEY, G.C., DEVENTER, J.S.J.: Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42, 2006. pp. 2917-2933.
- [29] NONAT, A.: The structure and stoichiometry of C-S-H. In: *Cement and Concrete Research* 34, 2004. pp. 1521-1528.

7 CURRICULUM VITAE

Jméno a příjmení: Lukáš Kalina, Ing.
Datum narození: 9.4.1984
Stav: svobodný
Trvalé bydliště: Černčín, Májová 135, Bučovice, 685 01
Tel.: 608 925 919
Email: kalina@fch.vutbr.cz

Dosažené vzdělání:

- 2008, Ing., Chemická fakulta VUT v Brně, obor Chemie a technologie materiálů

Pedagogická činnost v rámci DS:

- Praktikum z anorganické chemie I a II
- Praktikum z preparačních a testovacích metod I a II

Publikační činnost:

BUZEK, L.; ŠOUKAL, F.; MÁSilKO, J.; KOPLÍK, J. High-heat resistant phosphate binders. In Ecology and new building materials and products. Brno: VUSTAH, 2009. p. 200-203. ISBN: 978-80-254-4447-4.

BUZEK, L.; KOPLÍK, J.; MÁSilKO, J.; ŠOUKAL, F. Synthesis of aluminosilicate systems based on alkali activation of industrial by-products. Brno: VUSTAH, 2010. p. 145-148. ISBN: 978-80-87397-02-2.

BUZEK, L.; MÁSilKO, J.; KOPLÍK, J.; ŠOUKAL, F. Aluminosilicate system based on alkali activation of industrial by-products reinforced with wollastonite microfibers. In: *12th International Inorganic-Bonded Fiber Composite Conference*. Aalborg, 2010. p. 316-320. ISBN 87-91606-20-9.

BUZEK, L.; ŠOUKAL, F.; ZMRZLÝ, M.; WASSERBAUER, J. Mechanical Properties of Aluminosilicate Systems Based on Alkali Activation of Industrial By-Products. *Chemické listy* 105. 2011, p. 779-780. ISSN 0009-2770.

BUZEK, L.; ŠOUKAL, F.; KOPLÍK, J.; MÁSilKO, J.; JASKOWIECOVÁ, L. Geopolymers – earth friendly building material based on alkali activation of industrial by-products. *Chemické listy* 105. 2011, p. 925. ISSN 0009-2770.

Přehled zaměstnání:

- září 2008 – říjen 2011, Technicko hospodářský pracovník, Vysoké učení technické, Fakulta chemická, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno
- červen 2009 – duben 2010, Student Engineer, Honeywell, spol. s.r.o. – HTS CZ o.z., Tuřanka 96/1236, 627 00 Brno
- červenec 2010 → , Výzkumný pracovník, Vysoké učení technické, Fakulta chemická, Centrum materiálového výzkumu, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno

Jazyky:

- Anglický jazyk: aktivně
- Německý jazyk: pasivně

Počítačové znalosti a dovednosti:

uživatelské dovednosti v prostředí Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), ChemSketch, Internet Explorer, základy programu OriginPro7.5

Řidičský průkaz:

skupina A + B