TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Hybridní geopolymerní kompozity

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství

Autor práce: **Duy Nguyen Trong**
Vedoucí práce: Ing. Pavlína Hájková, Ph.D.
Katedra materiálu
Konzultant práce: Ing. Lukáš Voleský, Ph.D.
Katedra materiálu

Liberec 2020

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Zadání bakalářské práce

Hybridní geopolymerní kompozity

Jménoapříjmení: **Duy NguyenTrong**
Osobníčíslo: S15000006
Studijníprogram: B2301 Strojní inženýrství
Studijníobor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra materiálu

Akademickýrok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďteodbornourešeršinatémageopolymerní materiály, kompozitní materiály, odpadní materiály z elektráren, využití materiálů s vysokým podílem uhlíku, zkušební metody pevných nekovových anorganických materiálů a kompozitních materiálů.
2. Připravte zkušební tělesa z geopolymerního materiálu s proměnným množstvím částicových i vláknovýchplniv.
3. Proveďte základní charakteristiku použitých materiálů.
4. Proveďte zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v ohybu za laboratorní teploty i po vystavení zkušebních těles vyšším teplotám.
5. Stanovte ztrátu sušením a ztrátu žíháním připravených materiálů.
6. Vyhodnoťte vlastnosti připravených hybridních geopolymerních kompozitů.

Rozsah grafických prací:	dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy:	30-50 stran
Formaz pracování práce:	tištěná/elektronická
Jazyk práce:	Čeština

Seznam odborné literatury:

[1] DAVIDOVITS, J. Geopolymers and geopolymeric materials. *ThermAnalCalorim*, 1989, 35(2), 429-41.

[2] DUXSON, P., et al., Geopolymer technology: the current state of the art, *JMaterSci*, 2007, 42, 2917-2933, DOI 10.1007/s10853-006-0637-z

[3] HLAVÁČ, J.: *Základy technologie silikátů*. Praha: SNTL, 1985.

[4] DUXSON, P., et al., Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A – Physicochem. Eng. Aspects*, 2005, 269 (1-3), 47-58, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.

[5] VNOUČEK, M., *Kompozitní materiály.* Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf

[6] KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry, *Miner Eng*, 2007, 20, 1261-77.

Vedoucí práce:	Ing. Pavlína Hájková, Ph.D. Katedra materiálu
Konzultant práce:	Ing. Lukáš Voleský, Ph.D. Katedra materiálu

Datum zadání práce: 1. listopadu 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2021

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako pů- vodní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedou- cím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzi- tu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

15. července 2020 Duy Nguyen Trong

Poděkování:

Na prvním místě bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během mého studia na Technické univerzitě v Liberci. Dále bych chtěl poděkovat mé vedoucí bakalářské práce paní Ing. Pavlíně Hájkové, Ph.D, za pomoc a za ochotu kdykoliv odpovědět na mé dotazy. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Le Chi Hiep za pomoc při provedení zkoušky tlakem, ohybem. A také bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Petru Loudovi CSc., i všem členům katedry materiálu, kteří mi byli, během mého studia, vždy ochotni poskytnout radu a mohl jsem používat materiály, zařízení i stroje v laboratoři.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím výsledků dosažených za použití infastruktury v režimu open access v rámci projektu Katalytické procesy pro efektivní využití uhlíkatých energetických surovin (LM2015039), který finančně podpořilo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT) z prostředků účelové podpory velkých infrastruktur. Projekt byl začleněn do Národního programu udržitelnosti I MŠMT prostřednictvím projektu Rozvoj centra UniCRE (LO1606).

Téma : **Hybridní geopolymerní kompozity**

Hybrid geopolymer composites

Anotace:

Tato bakalářská práce využívá různých plniv s cílem optimalizovat vybrané geopolymerní kompozity. Konkrétně byl jako plnivo použit úlet popílku z černouhelné elektrárny, u kterého bylo stanovováno optimální procento plnění v geopolymeru pro dosažení co nejlepších vlastností. Tato práce je rozdělena na dvě části.

V teoretické části jsou popsány obecné znalosti týkající se tématu. Jsou zde vysvětleny a popsány geopolymerní materiály, kompozitní materiály, odpadní materiály z elektráren tj. úlet popílku, využití materiálů s vysokým podílem uhlíku, zkušební metody pevných nekovových anorganických materiálů a kompozitních materiálů.

V experimentální části byly navrženy dvě řady experimentů. V první řadě experimentů byl přídáván úletový popílek do geopolymerního kompozitu. V druhé řadě experimentů měly být studovány geopolymerní kompozity s úletovým popílkem a uhlíkovou sítí jako plnivem. Z důvodu koronaviru však tuto část nebylo možné zrealizovat, neboť došlo k ukončení činnosti firmy, od které byl získáván úletový popílek a s jiným podobným produktem by byly výsledky již nerelevantní.

Abstract:

This bachelor thesis uses filler substance, and to find out the best mechanical properties of geopolymer composite when using this filler. It’s mean to find out the optimal percentage of filler in geopolymer composite. This topic consists of two parts are theoretical part and experimental part.

In the theoretical part are explained and described what are composites, what are geopolymer, where are come from the filler, and how are usefull.

In the second part two experiments are designed. First of all the filler are added into the clean geopolymer matrix. However, due to coronavirus, the second experiment of this part could't be completed, as the company from which the fly ash was obtained was terminated and the results would be irrelevant with another similar product.

Seznam použitých symbolů a zkratek

CO_2	Oxid uhličitý
NaOH	Hydroxid sodný
KOH	Hydroxid draselný
SiO_2	Oxid křemičitý
CaO	Oxid vápenatý
Fe_2O_3	Oxid železitý
SO_3	Oxid sírový
Al_2O_3	Oxid hlinitý
MgO	Oxid hořečnatý
K_2O	Oxid draselný
TiO_2	Oxid titaničitý
P_2O_5	Oxid fosforečný
Na_2O	Oxid sodný
SrO	Oxid strontnatý
MgO	Oxid manganatý
ZnO	Oxid zinečnatý
V_2O_5	Oxid vanadičný
NiO	Oxid nikelnatý
CuO	Oxid měďnatý
Fe	Železo
Si	Křemík
S	Síry
Ca	Vápník
Na	Sodík
C	Uhlík
O	Kyslík
Mg	Hořčík
Al	Hliník
K	Draslíku
Cl	Chlor
As	Arsen
Ti	Titan
P	Fosforu
Sr	Stroncium
Mn	Mangan
Zn	Zinek
V	Vanadu.
Cu	Měď
Ni	Nikl
UP	Úletový popílek
PAN	Polyakrylátové vlákna
XRF	X-Ray Fluorescence
XRD	X-Ray Diffraction
[°C]	Teplota ve stupních Celsia
%	Procenta – v celé práci se jedná o hmotnostní procenta (hm %)

KLÍČOVÁ SLOVA

Geopolymer

Geopolymerní kompozit

Uhlíkové sítě

Úletový popílek

KEY WORDS

Geopolymer

Geopolymer composite

Carbon networks

Fly ash

OBSAH

1. ÚVOD 11

2. TEORETICKÁ ČÁST 12

2.1. Geopolymerní materiálu 12

2.1.1. Definice geopolymeru 12
2.1.2. Struktura geopolymeru 12
2.1.3. Výroba geopolymeru 14
2.1.4. Vlastnosti geopolymeru 16

2.2. Kompozitní materiálu 17

2.2.1. Definice kompozitů 17
2.2.2. Historie kompozitů 17
2.2.3. Rozdělení kompozitů 18
2.2.3.1. Rozdělění kompozitů podle druhu matrice: 18
2.2.3.2. Kompozity rozdělění podle druhu disperze: 19
2.2.4. Výhody a nevýhody kompozitních materiálů 19
2.2.4.1. Výhody 19
2.2.4.2. Nevýhody 20

2.3. Uhlíková vlákna 20

2.3.1. Charakteristika 20
2.3.2. Postup výroby uhlíkového vlákna na bázi PAN (Polyakrylonitrilu) 21
2.3.3. Vlastnosti úhlíkových vláken 22
2.3.4. Použití uhlíkových vláken 23

2.4. Odpadní materiály z elektráren 24

2.4.1. Definice 24
2.4.2. Charakteristika strusky a popílku 24
2.4.3. Použití strusky a popílku 25

3. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE 26

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 27

4.1. Experimentální metody, použité materiály a přístroje 27

4.1.1. Úletový popílek z černouhelné elektrárny 27

4.1.2. Použitá uhlíková vlákna....28
4.1.3. Mechanické zkoušky....30
4.1.4. Zkouška pevnosti ohybem....30
4.1.5. Výpočet pro hodnocení pevnosti v tříbodovém ohybu....31
4.1.6. Experimentální podmínky měření pevnosti ohybem....32
4.1.7. Zkouška tlakem....32
4.1.8. Výpočet pro hodnocení pevnosti v tlaku....33
4.1.9. Experimentální podmínky měření pevnosti tlakem....33
4.1.10. Další Použité přístroje....34
4.1.11. Použitá forma....35

4.2. Metodika experimentů....35
4.2.1. Příprava geopolymerního pojiva....35
4.2.2. Postup výroby geopolymerů a testování vzorků....36
4.2.3. Příprava kompozitu bez vláken....37
4.2.4. Kompozity s vláknem....38
4.2.5. Metodika receptur geopolymerního pojiva a kompozitů....39

4.3. Experimentální vyhodnocení a diskuze výsledků....39
4.3.1. Kompozit s úletovým popílkem....39
4.3.1.1. Výsledky pevnosti ohybem kompozitu s úletovým popílkem....39
4.3.1.2. Výsledky pevnosti v tlaku kompozitu s úletovým popílkem....41
4.3.1.3. Ztráta sušením a ztráta žíháním připravených materiálů....44

5. DISKUZE....51

6. ZÁVĚR....53

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY....55

8. SEZNAM OBRÁZKŮ , GRAFŮ A TABULEK....57

8.1. Obrázky....57

8.2. Grafy....57

8.3. Tabulky....58

9. PŘÍLOHY....59

1. ÚVOD

V současné době je jednou z nejvyšších priorit vědců otázka ochrany životního prostředí a efekt globálního oteplování. Jedním z opatření k omezení globálního oteplování je omezení množství odpadu, který tepelné elektrárny emitují do životního prostředí. Opětovné použití odpadu z tepelných elektráren je z hlediska životního prostředí také velice důležité.

V roce 1978 představil francouzský vědec Joseph Davidovits koncept geopolymeru na Louisiana University of Technology, který přitahoval velkou pozornost vědců z celého světa. Geopolymer je materiál, který je pro vědce zajímavý kvůli jeho mechanickým vlastnostem, především vysokým pevnostem, tepelné odolnosti, vysoké odolnosti proti korozi a výhodných vlastností přispívajících k ochraně životního prostředí.

Na základě výhod geopolymerních materiálů a jejich kombinaci s odpadem z tepelných elektráren mohou vzniknout materiály, které mají mechanické valstnosti lepší než samotný geopolymer. Současně je se přispěje k opětovnému použití průmyslového odpadu, což přispívák ochraně životního prostředí.

Cílem této bakalářské práce je zjistit mechanické vlastnosti geopolymerního kompozitního materiálu s částicovým a vláknitým plnivem při teplotách od 20°C do 1000°C a stanovit vliv obsahu plniv na na mechanické vlastnosti těchto geopolymerních materiálů. Výsledkem získaným z experimentů s hodnocením pevností ohybem a tlakem bude optimální složení hybridního geopolymeru, které bude zajišťovat co nejlepší mechanické vlastnosti za zvýšených teplot.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Geopolymerní materiálu

2.1.1. Definice geopolymeru

Geopolymer je alkalicky aktivovaný aluminosilikát se strukturou sítě tvořené vzájemným propojením atomů hliníku, křemíku a kyslíku vzniklé pomocí polykondenzace za laboratorní teploty.. Jedná se konkrétně o chemickou reakci hlinitokřemičitanu (Si_2O_5, Al_2O_2) v silném alkalickém činidle (např. NaOH, KOH), aby se snadno vytvořila reakce kondenzátu polymeru za vytvoření vazby Si-O-Al. Geopolymerní materiály mají výborné mechanické vlastnosti, rychle tvrdnou, jsou nerozpustné ve vodě, mají odolnost vůči teplotám do 1000°C a jsou chemicky odolné. [1, 2]

2.1.2. Struktura geopolymeru

Geopolymer je složen z molekulárních jednotek :

-Si-O-Si-O-	siloxo, poly (siloxo)
-Si-O-Al-O-	sialát, poly (sialate)
-Si-O-Al-O-Si-O-	sialát -siloxo, poly (sialate-siloxo)
-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	sialát -disiloxo, poly (sialate-disiloxo)

Chemické označení geopolymerů je název „polysialáty“. Je to soubor řetězců sialátů, ve kterých sialát označuje zkratku pro oxid hlinitokřemičitanu. Sialáty jsou tvořeny z tetraedrálních aniontů $[SiO4]^{4-}$ a $[AlO4]^{5-}$ s kovalentními vazbami mezi sebou sdílením atomů kyslíku O. Kompenzace elektrického náboje Al^{3+} v tetraedrální koordinaci je zajištěna ionty, jako jsou Na^+, K^+, Li^+, Ca^{2+}, Ba^{2+}, NH^{4+} apod.. [1, 3]

Experimentální vzorec poly řetězce (polysialáty) podle tohoto tvaru:

$$M_n.[-(SiO_2)_z-(AlO_2)]_n.wH_2O$$

Kde:

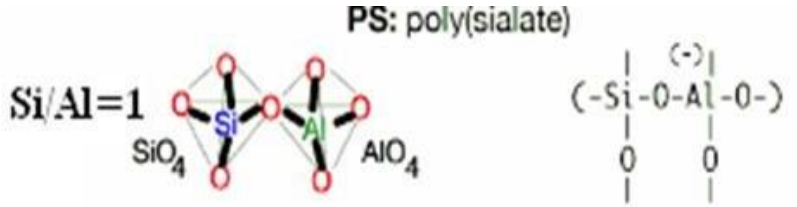
M – Alkalická složka (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Ba^{2+},....).

n – Stupeň polymerace.

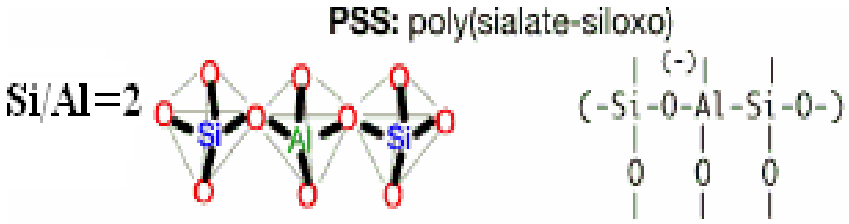
z – Číslo 1, 2, 3 nebo > 3 zaleží na poměru jednotek SiO_2 a AlO_2.

w – Počet molekul vody vázaných v polymerním řetězci.

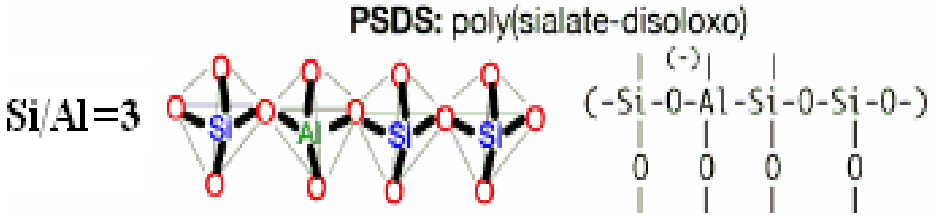
Proces geopolymerizace je proces syntézy k vytvoření geopolymerní materiálu. Tento proces závisí na poměru Si/Al . Podle tohoto poměru prof. Joseph Davidovits rozdělil polysialáty do čtyř skupin:



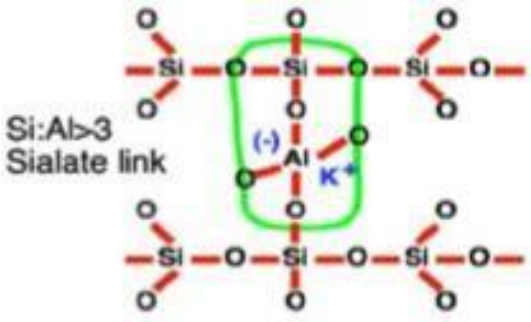
a)



b)



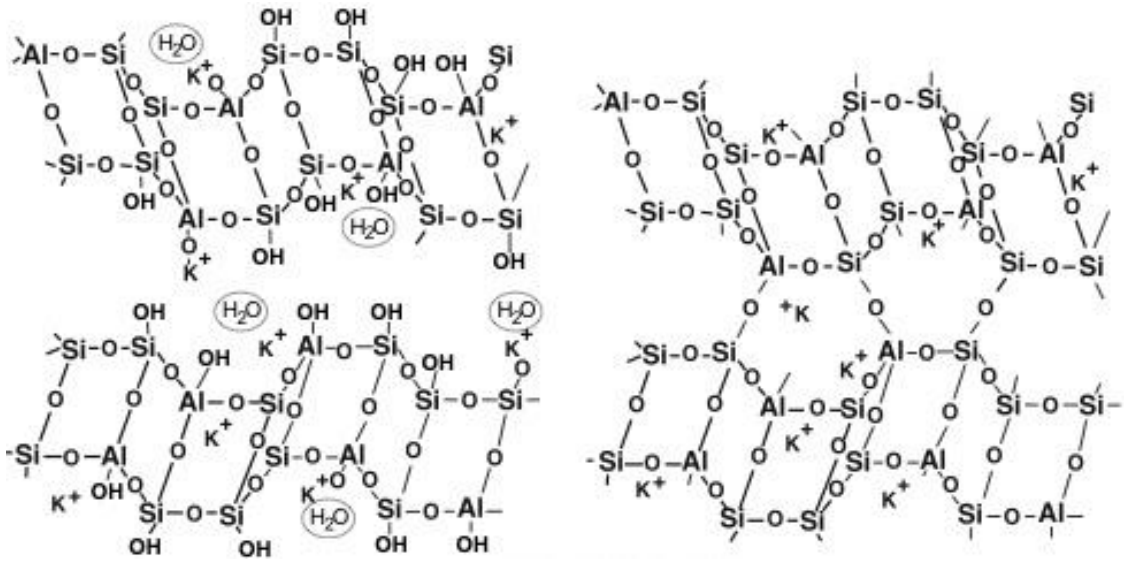
c)



d) Poly (sialate-multisiloxo)

Obr. 1 Typy polysialátu a schéma jejich molekulárních struktury

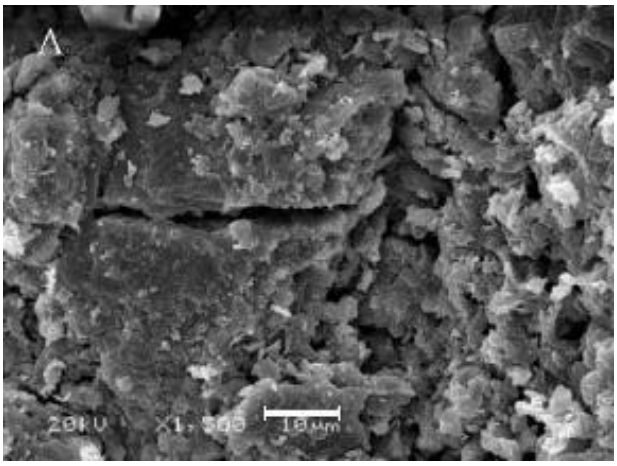
V níž tři základní typy polysialáty jsou PS: poly(sialát), PSS: poly(sialát – siloxo), PSDS: poly (sialate – disiloxo). Ve skutečnosti tyto formy mohou existovat současně v polymerních řetězcích. Při poměru Si/Al > 3 je sialátová linka nebo poly (sialát – multisiloxo), ve kterém se vytvářejí řetězce nebo kruhy spojené Si-O-Al můstky nebo Al-O-Si (Obr. 2). Tyto spojené řetězce Si-O-Al jsou mezi dvěma řetězci jednoho ze tří základních typů polysialáty nebo mezi dvěma řetězci poly (siloxo). Díky tomuto kyslíkovému můstku se mohou připojit molekulární řetězce nebo velké molekulární kruhy v polymerních strukturách za vzniku pevné sítě. [3, 4]



Obr. 2 Struktura geopolymerní sítě ve 3D

2.1.3. Výroba geopolymeru

Geopolymer je produkt vyrobený z hlinitokřemičitanů jako například z metakaolinu [9] či z odpadních materiálů typu elektrárenského popílku, strusky, které reagují se silně alkalickým prostředím (NaOH, KOH, vodní sklo). Proces tvorby nových řetězců Al-Si-O se nazývá tzv. geopolymerizace, která je polykondenzační reakcí. [3]



Obr. 3 Geopolymerní struktura

Polymerizační proces je rozdělen do následujících základních kroků :

- Prvním krokem je rozpuštění pevného hlinitokřemičitanu v silných alkalických roztocích, tj. proces přerušení kovalentních vazeb Si - O - Si a Al - O - Si z původních zdrojů hlinitokřemičitanu. Rozpustnost Si a Al z původního materiálu (např. popílek, struska...) může být popsána podle této chemické rovnice:

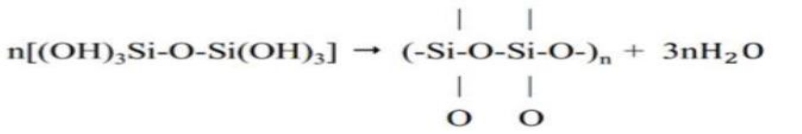
$$(SiO_2.Al_2O_3) + 2MOH + 5H_2O \rightarrow Si(OH)_2 + 2Al(OH)_3 + 2M$$

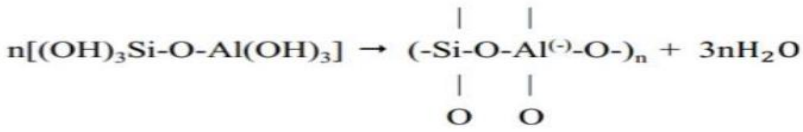
* Kde: M je Na nebo K

- V dalším kroku je v kapalné fázi vytvořen řetězec Si-Si nebo Si-Al (monomer) báze. Výsledky těchto reakcí vytvářejí geopolymerní prekurzory. Může být popsána podle těchto chemických rovnic:

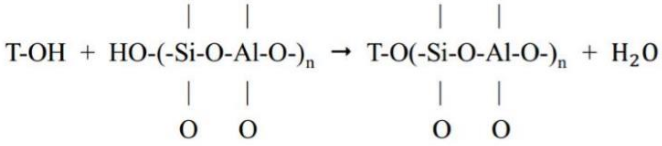
$$Si(OH)_4 + Si(OH)_4 \leftrightarrow (OH)_3Si - O - Si(OH)_3$$
$$Si(OH)_4 + Al(OH)_4 \leftrightarrow (OH)_3Si - O - Al(OH)_3$$
$$2Si(OH)_4 + Al(OH)_4 \leftrightarrow (OH)_3Si - O - Al - (OH)_2 - O - Si(OH)_3 + 2H_2O$$

- Potom polymerizační proces zastaví oligomer, který tvoří alunimosilikátovou síť. Polymerace avytváření chemických vazeb se v geopolymerních prekurzorech zastaví odstraněním molekul vody.





- Poslední krok je vytváření pevných vazeb a vytvrzování v celém systému za vzniku pevných geopolymerních struktur. Při tomto kroku se odstraní zbývající molekuly vody a vytvoří se vazby Si-O-Si nebo Si-O-Al prostřednictvím kyslíkových můstků.



*Kde: T je Si nebo Al

Proto lze říci, že úlohou alkálie je rozpouštět původní vazby Si, Al a O a spojovat je v geopolymerní struktuře, vyrovnávat náboj v mřížkové síti a vytvářet stabilní strukturu geopolymeru. Čím vyšší je koncentrace alkalického roztoku, tím vyšší je rozpustnost složek Si a Al. Geopolymerní reakce je také silnější ale na produktu se více vyskytují zbytkové alkálie v podobě nevzhledných výkvětů. [1, 3, 4]

2.1.4. Vlastnosti geopolymeru

Vlastnosti geopolymerů závisí na vlastnostech původního materiálu (chemické složení, velikost částic,...), závisí na poměrech Si:Al, na koncentraci aktivačního roztoku a jeho složení, způsobu zpracování, teplotě, době trvání geopolymerizace a podmínkách tuhnutí. Jejich vlastnosti jsou:

- Nerozpustnost ve vodě.
- Velmi dobrá odolnost vůči chemické korozi a kyselinám.
- Nehořlavost (Výborně odolávají teplotám až do 1000 °C).

- Vysoké mechanické pevnosti.
- Tepelně-izolační vlastnosti.
- Rychlé tuhnutí.
- Malá měrná hmotnost v porovnání s kovy.
- Vysoká životnost.

2.2. Kompozitní materiálu

2.2.1. Definice kompozitů

Kompozitní materiály neboli kompozity jsou materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více různých materiálů, které při výrobě těchto materiálů vytvářejí nové materiály s vynikajícími vlastnostmi ve srovnání s původními materiály. Kompozity se skládající z matrice a výztuže (disperze), neboli z pojiva a plniva. Matrice je alespoň jedna souvislá fáze, jejíž funkce spojují nespojité fáze dohromady. Disperze je nesouvislá fáze, která zajišťuje mechanické vlastnosti kompozitu. Pro výsledné vlastnosti kompozitu je velmi důležitá přilnavost matrice k disperzi. [5]

2.2.2. Historie kompozitů

Je Jednoduché kompozitní materiály existují již dlouhou dobu cca asi od 5000 let před naším letopočtem. Lidé věděli, že pokud přimíchají malé kameny do půdy před tím, než vyrobí cihly, vyhnou se deformacím na slunci. Např. starověcí Řekové smíchali směsi z medu s půdou, kamenem, pískem a štěrkem a to používali jako stavební materiály nebo ve Vietnamu v minulosti stavěli domy z bláta smíchaného se slámou...

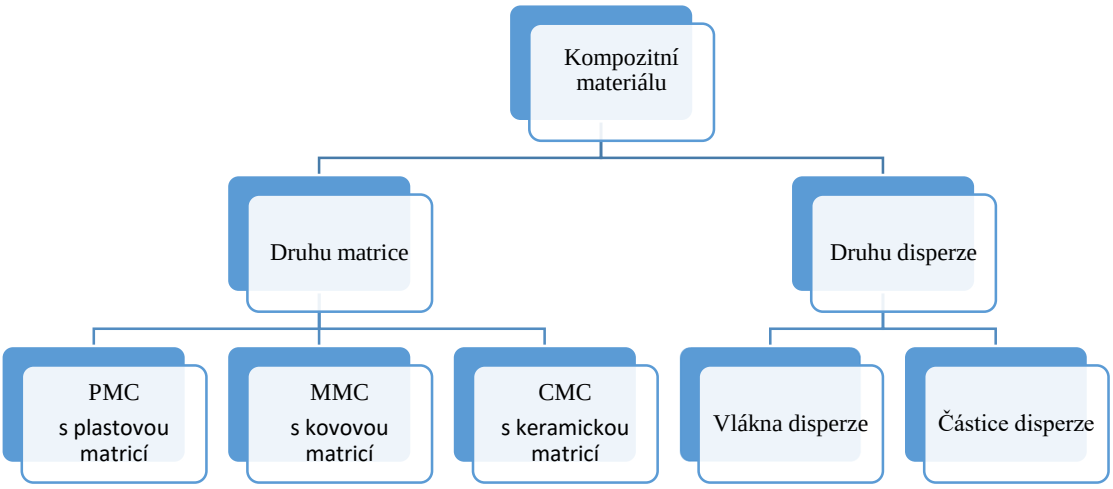
První kompozitní struktura odvozená z přírody byla dřevo, tedy mnoho dlouhých celulózových vláken spojeno leginovými enzymy. Výsledným produktem je přírodní kompozit, který je odolný a flexibilní.

Ačkoli je kompozit základním stavebním prvkem přírody, věda o kompozitních materiálech se formovala až ve spojení s výskytem raketové technologie v USA od 50. let

20. století. Od té doby se veřejná věda „Technologie kompozitních materiálů“ rozvíjí po celém světě a získala úspěchy ve vědě a životě. Příkladem je například kryt motoru rakety, raketové náboje, kompozitní trub letadla, části kosmických lodí, kompozitní trupy lodí, pneumatiky pro automobily, motocykly, jízdní kola, apod. [5] , [7]

2.2.3. Rozdělení kompozitů

Kompozitní materiály jsou klasifikovány podle povahy komponentního materiálu. [5]



Obr. 4 Schéma rozdělění kompozitní materiálu

2.2.3.1. Rozdělění kompozitů podle druhu matrice:

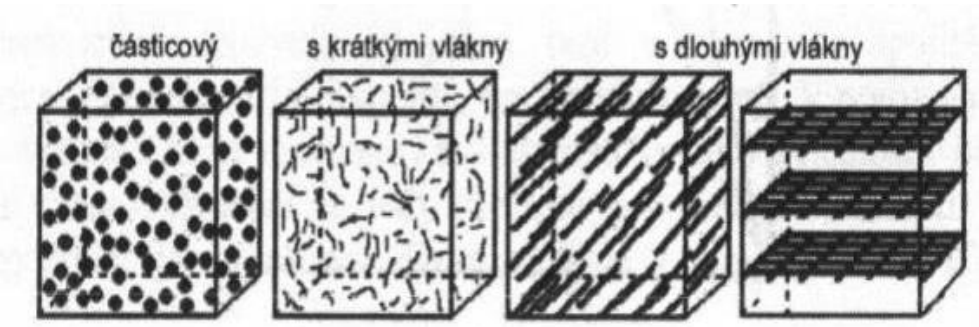
- S matricí z plastů (PMC) např. reaktoplasty, termoplasty, elastomery. Tento typ matrice může být kombinován se všemi typy disperze, jako jsou organická vlákna (aramidová vlákna – Kevlar, polyamidová vlákna), anorganická vlákna (čedičová vlákna, skleněná vlákna, uhlíková vlákna,...), kovová vlákna (hliníková vlákna, bórová vlákna,...)

- S kovovou matricí (MMC) např. hliník a slitina hliníku, slitina titanu, měď a slitiny mědi, apod. Tento typ matrice může být kombinován s typem disperze jako jsou kovová vlákna, anorganická vlákna.

- S keramickou matricí (CMC) jsou kompozity, které vydrží teploty okolo 1000℃. Tento typ matrice může být kombinován s typem disperze jako kovová vlákna, kovové částice, keramická vlákna a částice (karbidové keramické částice, nitridové keramická částice,...) [5, 7, 8]

2.2.3.2. Kompozity rozdělění podle druhu disperze:

- Vlákna – jsou materiál s definovanou dimenzí, v závislosti na účelu výroby se dělí vlákna na dva typy:
    - Krátká – délka vláken je výrazně menší v porovnání s velikostí výrobku.
    - Dlouhá (kontinuální) – délka vláken je srovnatelná s délkou výrobku.
- Částice – jsou materiál, který má nepravidelný tvar, dělí se částice na dva typy:
    - Jemné částice.
    - Hrubé částice.



Obr. 5 Druhy disperze

2.2.4. Výhody a nevýhody kompozitních materiálů

2.2.4.1. Výhody

- Vysoká mechanická pevnost, nízká měrná hmotnost.
- Odolnost vůči vlhkému prostředí, slunečnímu záření.
- Schopnost kombinovat s jinými materiály, jako je dřevo, kov ... a tím zvýšit trvanlivost a snížit náklady.
- Snadná tvarovatelnost, lesk povrchu, vodotěsnost.

- Snadné použití, jednoduché stavební zařízení.
- Dlouhá trvanlivost: Více než 20 let.
- Nízké náklady na údržbu.

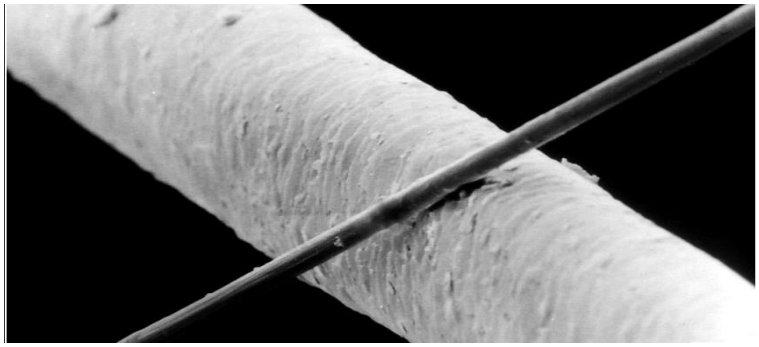
2.2.4.2. Nevýhody

- Cena je stále vysoká oproti běžnému materiálu.
- Špatná odolnost proti nárazu.
- Kvalita materiálů závisí na provedení.
- Je obtížné recyklovat či znovu použít.

2.3. Uhlíková vlákna

2.3.1. Charakteristika

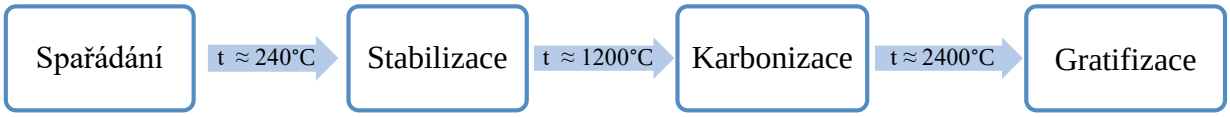
Uhlíková vlákna jsou vlákna s průměrem přibližně 5 až 10 mikronů a složená převážně z atomů uhlíku.



Obr. 6 Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm v porovnání s lidským vlasem.

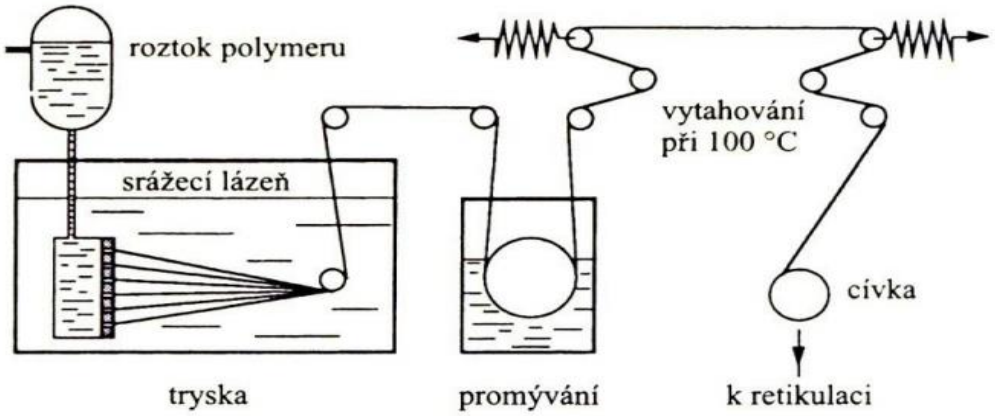
Uhlíková vlákna mají hustotu (při 20°C) je 1800 až 2000 kg. m^{-3}, modul pružnosti v tahu je 216 až 517 GPa, a pevnosti v tahu 1,2 až 6 GPa. Nejobvyklější postup výroby vlákna se dnes vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN) na vlákno uhlíkové.

2.3.2. Postup výroby uhlíkového vlákna na bázi PAN (Polyakrylonitrilu)



Obr. 7 Schéma výroby uhíkových vláken z PAN

- **Spřádání**: během spřádání je roztok polymeru vytlačován přes trysku složenou z 1000 až 300 000 otvorů o průměru jen několika desetin milimetru. Samotná vlákna se tvoří až po průchodu tryskou ve srážecí lázni nebo proudu teplého vzduchu, kde dochází k odpaření rozpouštědla. Dále následuje promývání, kde jsou odstraněny poslední zbytky rozpouštědla a velmi důležitá operace vytahování v atmosféře vodní páry, při které dojde k zlepšení orientace lamel krystalitů podél osy vlákna. Dále následuje sušení a relaxace.



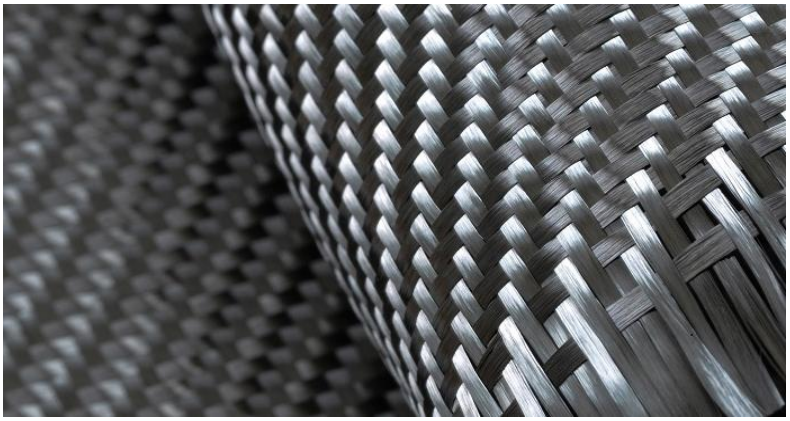
Obr. 8 Schéma spřádání vláken na bázi PAN [14]

- **Stabilizace**: Vlákno PAN se napíná a oxiduje současně při teplotě 180 až 300 °C, čímž se termoplastická PAN vlákna přeměňují na zesíťovanou strukturu, která již nemá termoplastické vlastnosti. Barva vlákna PAN v tomto kroku se změní na tmavou a nelze ji roztavit.
- **Karbonbizace:** Po oxidaci je vlákno karbonizováno při 1000 až 1700°C v

inertní atmosféře po dobu několika hodin. V tomto procesu se neuhlíkové prvky oddělí a odpaří za vzniku uhlíkových vláken. Výsledné vlákno obsahuje 85 - 95 % uhlíku.

- **Grafitizace:** při teplotách do 1500 až 2800 °C v prostředí dusíku a argonu, zvýší se obsah uhlíku, dochází k překrystalizace na grafit.

Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken závisí na teplotě procesu tepelného zpracování. Uhlíková vlákna, která jsou karbonizována při teptolě 1500° C, vykazují nejvyšší pevnost v tahu ($R_{mt} = 5650$ MPa), zatímco uhlíková vlákna tepelně upravená při teplotě od 2500 až 3000° C vykazují vyšší modul pružnosti (E = 531 GPa). Dle požadované aplikace je proto třeba volit typ uhlíkového vlákna.



Obr. 9 Tkanina z uhlíkových vlákna

2.3.3. Vlastnosti úhlíkových vláken

- Vysoká pevnost v tahu 3,5 – 7 GPa.
- Vysoký modul pružnosti v tahu 230 – 930 GPa .
- Nízká hustota je 1800 až 2000 kg. m^{-3}.
- Pokud je chráněna před oxidací, má vynikající tepelné vlastnosti jako např. odolnost tepelným rázům, odolnost vysokým a nízkým teplotám a nízký koeficient tepelné roztažnosti.

- Uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá.

- Ve srovnání se skleněnými vlákny, uhlíková vlákna mají asi desetinásobnou tuhost a poloviční hustotu (hustota skleněná vlákna $\rho_{\text{skelná}} = 2500\ \text{kg.m}^{-3}$. Modul pružnosti v tahu je asi pětinásobně větší než u skleněných vláken $E_{\text{skelná}} = 80 \text{ až } 100\ \text{GPa}$), pevnost v tahu je zhruba dvojnásobná než u skleněných vláken $R_{\text{mt skelná}} = 3{,}5\ \text{GPa}$).

- Srovnání s čedičovými vlákny - hustota ulíkových vláken je výrazně menší než čedičových vláken (hustota čedičových vláken $\rho_{\text{čedičová}} = 2600 \text{ až } 2800\ \text{kg.m}^{-3}$). Modul pružnosti v tahu je asi šeštinásobně větší než u čedičových vláken $E_{\text{čedičová}} = 70 \text{ až } 89\ \text{GPa}$), pevnosti v tahu je zhruba 1,5 x větší než u čedičových vláken $R_{\text{mt čedičová}} = 2 \text{ až } 4{,}7\ \text{GPa}$).

2.3.4. Použití uhlíkových vláken

Díky vynikajícím fyzikálním a mechanickým vlastnostem jsou uhlíková vlákna stale vice používána nejen ve speciálních aplikacích, ale I v běžném životě. Ve stavebnictví se používají uhlíková vlákna na místo konvenkčních ocelových materiálů ke zvýšení mechanických vlastností kompozitního betonu. V textilním průmyslu se používá uhlíkové vlákno k výrobě antistatických ochranných rukavic pro pracovníky pracující v továrnách vyrábějících elektronická zařízení. Dále se uhlíková vlákna používají na speciální aplikace, jako jsou sochranné přilby, ochranné brnění, vyhřívané bundy (bunda DIY). V letectví a vesmíru se používají uhlíková vlákna k výrobě ocasního křídla letadel či vrtulníků, pro součásti trupu kosmických lodí atd.... Ve sportovním automobilovém průmyslu se používají uhlíková vlákna pro výrobu velmi lehké a pevné karoserie..

Obr.10 Karoserie auta z uhlíkových vlákna

2.4. Odpadní materiály z elektráren

2.4.1. Definice

Odpady z elektráren jsou odpady, které vznikají při výrobě elektrické energie. V závislosti na zdrojovém materiálu a technologii zpracování každé elektrárny vznikají různé odpady. Většina odpadů, nebude-li s nimi správně zacházeno, bude mít nepříznivý dopad na životní prostředí z důvodu znečištění CO_2. [8]

Ve výrobním procesu elektrické energie z uhlí jsou struska a úletový popílek považovány za vedlejší produktu nebo jinými slovy jsou odpadními materiály z elektráren [8].

2.4.2. Charakteristika strusky a popílku

V zásadě popílek a struska jsou látky (spolu s mnoha dalšími), které se vytvářejí jako vedlejší produkty během výroby energie v uhelných elektrárnách. V nich se „popel“ vypouštěný kouřovou cestou nazývá „popílek“. „Struska“ je vypouštěna spodkem kotle, nazývaná „spodní struska“. Obsah popílku a strusky závisí na typu výchozího uhlí. Což znamená, že uhlí s vyšším obsahem popela vytvoří více strusky a popílku. [8, 9]

Chemicky jejich hlavní chemické složení se skládá z osmi typů oxidů kovů jako SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, NaO, K_2O, MgO, TiO_2,. Různé druhy uhlí budou mít různé hladiny každého z těchto oxidů a budou mít různé poměry kyselin. Poměr kyseliny se stanoví na základě osmi hlavních oxidů kovů takto:

$$R = (Fe_2O_3 + CaO + NaO + K_2O + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$$

$$* \text{ Kde R je poměr kyselin } [-]$$

Tento poměr kyselin (s hodnotou v rozmezí 0,0 ÷ 1,0) je množství, které je nepřímo úměrné teplotě tání popela. Čím nižší je poměr, tím vyšší je teplota tání popela.

Vznikající popílek je obvykle ve formě sférických granulí o velikosti od 0,5 μm do 300 μm, objemová hmotnost v suchém porézním stavu je 450 kg/m^3 až 700 kg/m^3 a měrné hmotnosti je 1800 kg/m^3 až 2300 kg/m^3. Struska je hrubší a větší než popílek, velikost částic se pohybuje od jemného písku po štěrk o střední velikosti částic od 0,125 mm až 2 mm, objemová

hmotnost v suchém porézním stavu je 700 kg/m^3 až 900 kg/m^3 a měrná hmotnost je 2000 kg/m^3 až 2600 kg/m^3. Obvykle tvoří popílek asi 80% - 90% elektrárenského odpadu, zatímco struska představuje pouze asi 10% - 20% odpadu. Jejich barva je světle hnědé až tmavě šedé barvy v závislosti na obsahu uhlíku v popílku a strusce. [8]

2.4.3. Použití strusky a popílku

V současné době se popílek a struska používají v průmyslových odvětvích kvůli svým charakteristickým vlastnostem. Např. ve stavebnictví se popílek a struska používají jako přídavek pro výrobu betonů a malt nebo se používáji jako zásypový materiál pro betonové silnice.

V průmyslu výroby cementu se pro přímou výrobu cementu používá popílek a struska s nízkým obsahem nespáleného uhlíku (> 5%). Pro popílek a strusku s vysokým obsahem nespáleného uhlíku (< 5%) se používají jako kamenivo pro výrobu cementu.

V průmyslu stavebních materiálů se používají k výrobě nepálených výrobků, jako jsou např. nepálené cihly.

V metalurgii, se z nich dá získávat velké množství kovů jako např germanium (důležitý prvek v elektronickém průmyslu), galium (výroba polovodičů), berylium (lehké slitiny pro letectví a kosmonautiku), titan, železo a hliník. [7, 8, 10]

3. Cíle bakalářské práce

Z teoretické části práce vyplývá potřeba výzkumu využití elektrárenského odpadu jako plniva do geopolymeru. Účelem této práce je proto najít optimální procento plnění geopolymeru s úletovým popílkem na základě vyhodnocení vlastností takto plněných materiálů. Dalším cílem je použití geopolymeru s optimálním obsahem úletového popílku zpevněným uhlíkovými vlákny.

V práci proto bude zkoumáno plnění geopolymeru úletovým popílkem až do technologicky vhodného obsahu a zkoušené vzorky budou po systematickém vystavení teplotě až do 1000 °C testovány na mechanickou pevnost pomocí zkoušek v ohybu a v tlaku. Současně bude sledována ztráta hmotnosti vzorků, po sušení a ohřevu na dané teploty. Ze získaných výsledků bude vybráno nejlepší procento UP pro výrobu kombinovaného materiálu na bázi geopolymeru s uhlíkovým vláknem.

Z důvodu koronaviru však tuto část s vlákny nebylo možné zrealizovat, neboť došlo k ukončení činnosti firmy, od které byl získáván úletový popílek, a s jiným podobným produktem by byly výsledky již nerelevantní.

4. Experimentální část

4.1. Experimentální metody, použité materiály a přístroje

4.1.1. Úletový popílek z černouhelné elektrárny

Úletový popílek (UP) z černouhelné elektrárny je vedlejší produkt získaný zachycováním v elektrostatických nebo mechanických odlučovačích. Fyzikálně je tento (UP) velmi jemným prachem o zrnitosti 20 μm, který má černou barvu.

V procesu oddělování uhlíku od popílku při vysokých teplotách (> 1300 ℃) se roztaví oxidy kovů i atomy kovů a nekovů.

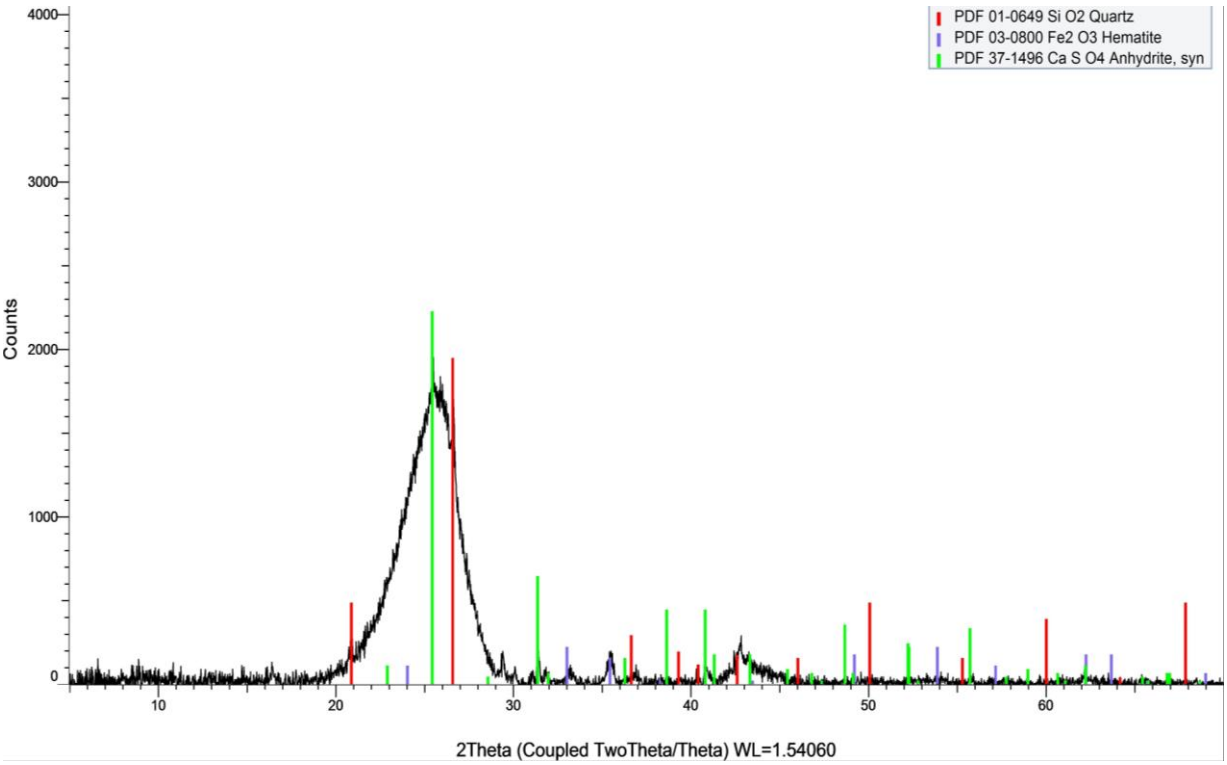
Úletový popílek použitý v experimentech měl celkovou ztrátu žíhnáním 30,32% a chemické složení, které je uvedeno v Tab.1. Chemické složení bylo měřeno metodou Rentgenové fluorescence (XRF - X-ray fluorescence) na přístroji Bruker S8 Tiger.

Tab. 1 Chemické složení úletové popílku měření pomocí XRF

Oxidy	Koncentrace	Prvky	Koncentrace
Fe_2O_3	6,04 %	Fe	4,23 %
SiO_2	3,54 %	Si	1,66 %
SO_3	3,00 %	S	1,20 %
CaO	2,48 %	Ca	1,77 %
Al_2O_3	2,20 %	Al	1,16 %
MgO	0,409 %	Mg	0,247 %
K2O	0,364 %	K	0,302 %
TiO_2	0,319 %	Ti	0,191 %
Cl	0,260 %	Cl	0,260 %
P_2O_5	0,220 %	P	962 PPM
Na_2O	0,129 %	Na	956 PPM
SrO	789 PPM	Sr	667 PPM
MnO	657 PPM	Mn	509 PPM
ZnO	306 PPM	Zn	246 PPM
V_2O_5	288 PPM	V	161 PPM
CuO	126 PPM	Cu	101 PPM
NiO	102 PPM	Ni	79,8 PPM

$* Kde: 1\ PPM = 1/1\,000\,000\ mm = 10^{-6} mm$

Krystalografické složení použitého úletového popílku bylo měřeno pomocí rengentové difrakce - X – ray diffraction XRD, což je analytická metodu, která se používá ke stanovení fazového složení látek na přístroji BRUKER SSD 160 (Graf 1). Z grafu 1 je zřejmá převážně amorfní povaha vzorku s krystalickými fázemi - hlavní fází je křemen (Quartz: SiO_2 – červené označení), dále Hematite (Fe_2O_3 – modré označení) a Anhydrite ($CaSO_4$ – zelené označení).



Graf 1. Fázové složení úletového popílku měřené pomocí XRD

4.1.2. Použitá uhlíková vlákna

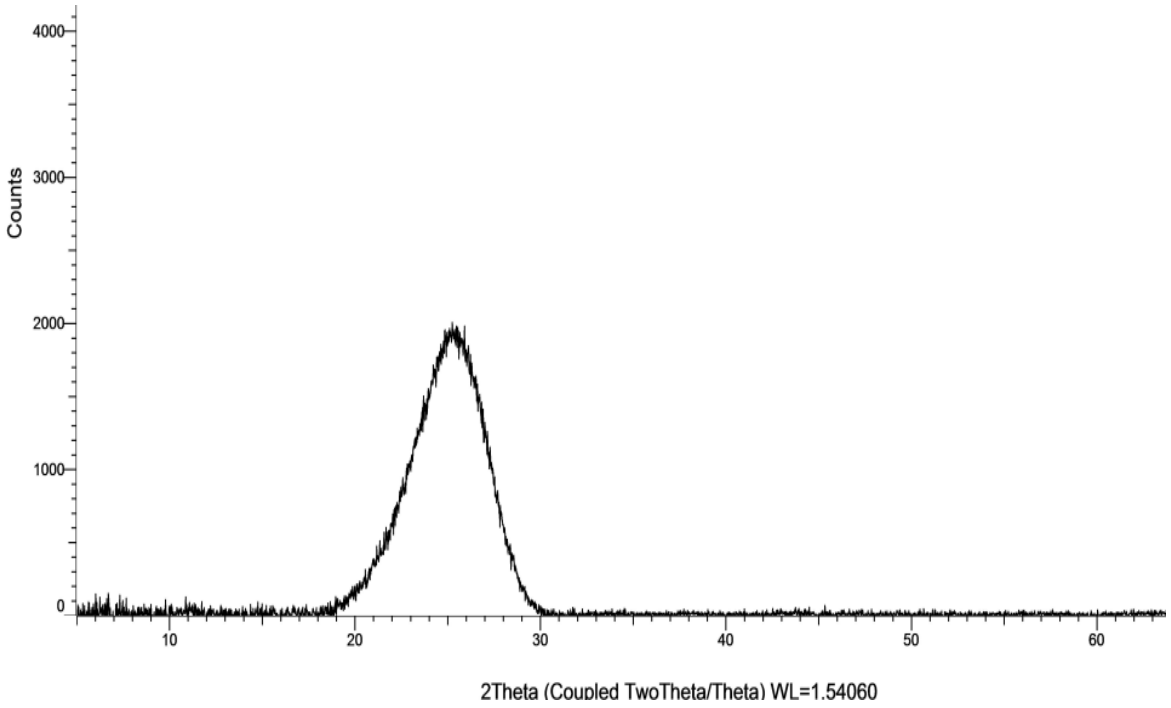
U uhlíkových vláken v této práci je díky analytickými metodami XRF a XRD na přístroji Bruker S8 Tiger velmi snadné určit procentualní chemické a krystalografické složení použitého uhlíkového vlákna, které jsou uvedeno v Tab.2 a Graf 2.

Úhlíková vlákny použitá v experimentech měla amorfní strukturu dle rengentové difrakce - X – ray diffraction XRD (BRUKER SSD 160) a celkovou ztrátu žíhnáním při 1000 °C 100%. Chemické složení bylo měřeno metodou Rentgenové fluorescence (XRF - X-ray

fluorescence) na přístroji Bruker S8 Tiger, která však vzhledem k charakteru vzorku je pro kvalitativní i kvantitativní hodnocení vzorku nevhodná (Tab.2 a Graf 2).

Tab. 2 Chemické složení úhlikové vlákno měření pomocí XRF

Oxidy	**Koncentrace**	**Prvky**	**Koncentrace**
Fe_2O_3	0,303 %	Fe	0,212%
Cr_2O_3	0,119 %	Cr	816 PPM
Cl	244 PPM	Cl	244 PPM
SO_3	198 PPM	S	79,3 PPM
SiO_2	149 PPM	K	77,3 PPM
K_2O	93,1 PPM	Si	69,4 PPM
CaO	86,5 PPM	Ca	61,8 PPM
P_2O_5	73,5 PPM	Zn	41,3 PPM
Al_2O_3	59,8 PPM	Ni	39,3 PPM
ZnO	51,4 PPM	P	32,1 PPM
NiO	50,0 PPM	Al	31,6 PPM
MgO	27,5 PPM	Mg	16,6 PPM
Na_2O	13,5 PPM	Na	9,99 PPM
CuO	12,0 PPM	Cu	9,62 PPM



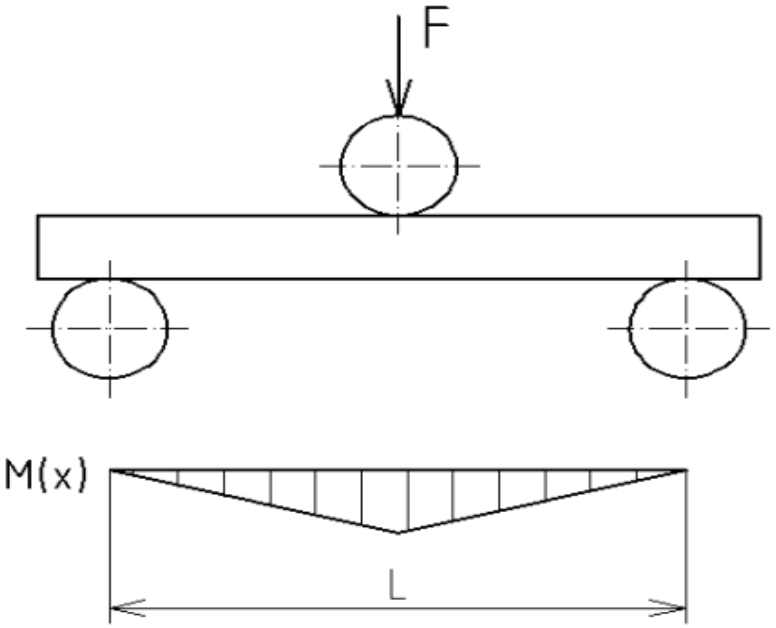
Graf 2. Fázové složení uhlíkové vlákno měřené pomocí XRD

4.1.3. Mechanické zkoušky

Používají se pro zjištění základních charakteristik materiálu při mechanickém namáhání. Mezi základní mechanické vlastnosti měřené u geopolymerů patří pevnost v tlaku a pevnost ohybem a modul pružnosti materiálu.

4.1.4. Zkouška pevnosti ohybem

Ohybová zkouška dává důležité konstrukční podklady pro materiály, které jsou na ohyb namáhány. Pevnost v ohybu byla měřena u vzorků podle statické zkoušky tříbodovým ohybem dle normy ČSN EN 12372. Princip zkoušky spočívá v zatížení vzorku silou, až dojde k prasknutí. Výsledkem zkoušky pevnosti v ohybu je zjištění lomové síly F (N), ohybového napětí R_{mo} (MPa), průhybu ω_o (mm), a modul pružnosti E (MPa). K měření bylo použito 3-bodového ohybu (Obr. 12).

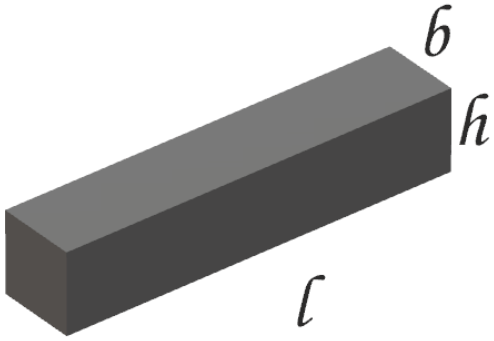


Obr. 11 Schéma 3 bodového ohybu

4.1.5. Výpočet pro hodnocení pevnosti v tříbodovém ohybu

Hodnota pevnosti v ohybu je daná maximálním napětím uprostřed mezi dvěma podporami, které vzorek nebo materiál vydrží během zkoušky v ohybu.

- $R_{mo} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{3}{2}\frac{F_{max}.l}{b.h^2}$
- $M_o = \frac{F_{max}.l}{4}$
- $W_o = \frac{b.h^2}{6}$
- $E = \frac{F_{max}.l^3}{\omega_o.4.b.h^3}$
- $\omega_o = -\frac{M_x''}{E.J_y}$
- $J_y = \frac{b.h^2}{12}$



Obr. 12 Velikost vzorku

$*\ kde$: R_{mo} ... napěti v ohybu (MPa)

F_{max} ... zatěžující síla (N)

l ... délka vzorku (mm)

b ... šířka vzorku (mm)

h ... tloušťka vzorku (mm)

M_o ... ohybový moment$(N.mm)$

W_o ... modul průřezu v ohybu (mm^3)

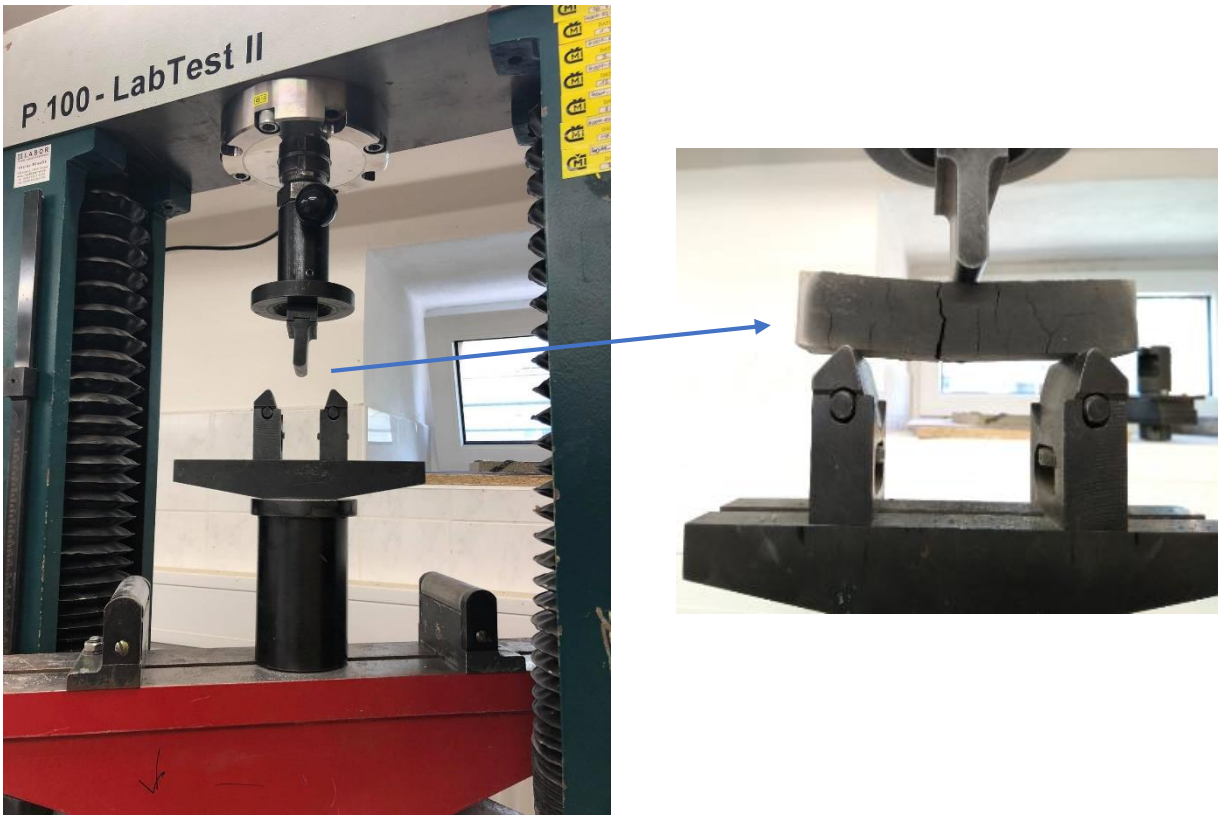
ω_o ... průhybu v ohybu (mm)

E ... modul pružnosti v ohybu (MPa)

J_y ... modul setrvačnosti ve oxy y (mm^3)

4.1.6. Experimentální podmínky měření pevnosti ohybem

Pevnost v tříbodovém ohybu byla měřena na univerzálním trhacím přístroji P100 – Labtest II o rozsahu 0 – 100 kN (Obr. 13). Zkušební vzorky měly velikost 30 x 30 x 150 mm. Rychlost zatěžování v $[mm/min]$ během zkoušky v ohybu byla 2 mm/min při laboratorního teplotě kolem 22 ± 2 °C a standardní relativní vlhkosti. Pevnost byla stanovena průměrem pevnostní na pěti vzorcích. Zkouškou byly získané hodnoty ohybového napětí R_{mo} $[MPa]$, modulu pružnosti v ohybu E $[MPa]$, maximální lomové síly v ohybu $F_{o_{max}}$ $[N]$, a maximálního průhybu v ohybu $\omega_{o_{max}}$ $[mm]$ ...

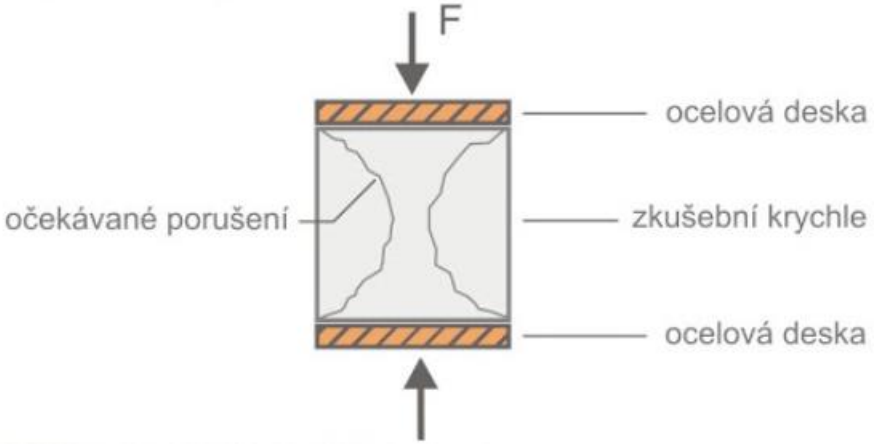


Obr. 13 Univerzální trhací přístroji P100 – Labtest II v ohybu

4.1.7. Zkouška tlakem

Tak jako zkouška ohybem je i zkouška tlakem důležitá pro konstrukční podklady pro materiály, které jsou tlakem namáhány. Pevnost v tlaku byla zjišťována podle statické zkoušky tlakem dle ČSN EN 1926. Princip zkoušky spočívá v zatížení vzorku silou, až dojde k porušení vzorku. Zkušební vzorky jsou zatíženy tlakovou silou F v podélné ose vzorku (Obr. 14).

Výsledkem zkoušky pevnosti v tlaku je zjištění tlakové síly F_t (N), pevnosti v tlaku R_{mt} $[MPa]$ a modulu pružnosti E $[MPa]$.



Obr. 14 Uspořadání pro zkoušku pevnosti v tlaku

4.1.8. Výpočet pro hodnocení pevnosti v tlaku

Hodnota pevnosti v tlaku je daná napětím, které vzorek nebo materiál vydrží během zkoušky.

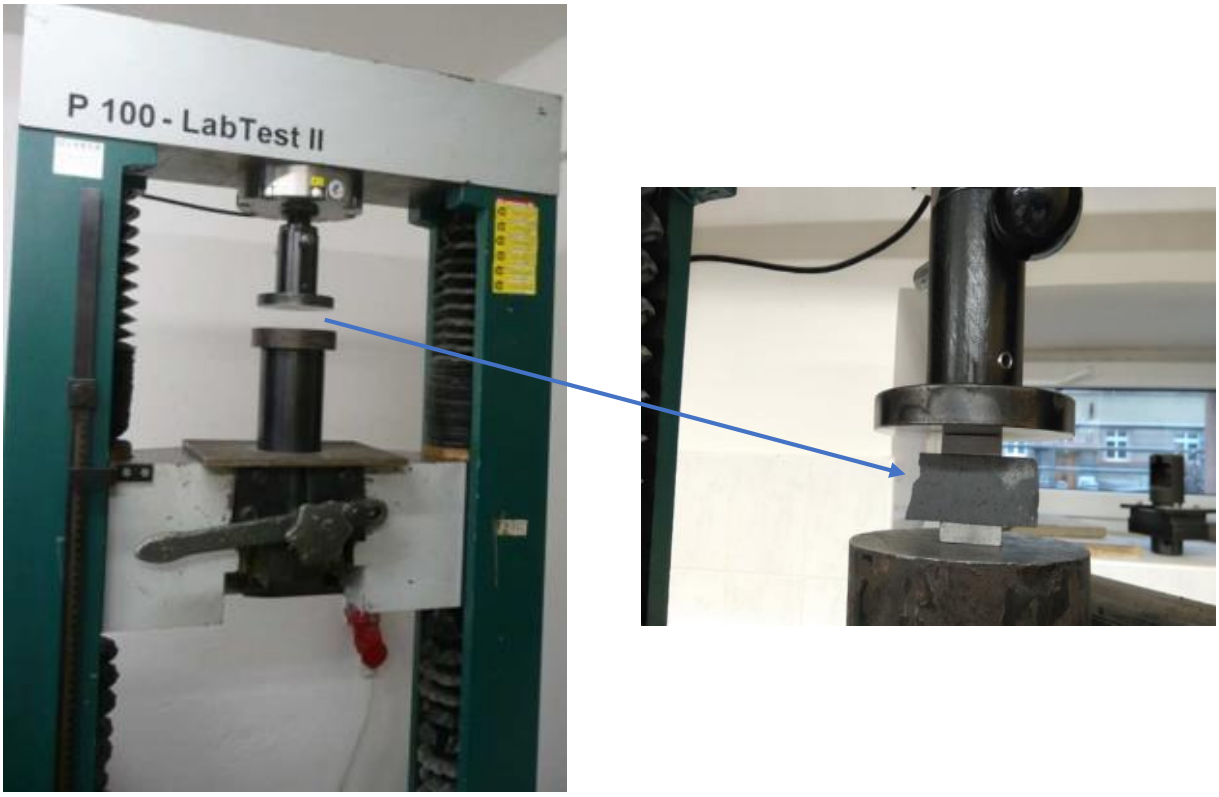
- $R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_o}$
- $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{l - l_o}{l_o}$
- $E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}$
- $S_o = b.h$

$* kde$: R_{mt} ... napěti v tlaku (MPa)
F_{max} ... maximální síla (N)
E ... Youngův modul (MPa)
S_o ... obsah (mm^2)
Δl ... délka prodloužení (mm)
l_o ... délka původní (mm)
l ... délka (mm)

4.1.9. Experimentální podmínky měření pevnosti tlakem

Pevnost v tlaku byla měřená na univerzálním trhacím přístroji P100 – Labtest II o rozsahu 0 – 100 kN (Obr. 15), rychlost zatěžování byla 2 mm/min při laboratorní teplotě a standardní relativní vlhkosti. Zkušební tělesa byla získána po zkoušce ohybem (zbylé konce po přelomení vzorků byly zatíženy přes příložník vymezující namáhanou plochu 30 x 30 mm). Pevnost byla

stanovena průměrem pevnostní v tlaku na pěti vzorcích. Zkouškou byly získané hodnoty tlakového napěti R_{mt} $[MPa]$, modulu pružnosti v tlaku E $[MPa]$, maximální síly v tlaku $F_{t_{max}}$ $[N]$, a maximální relativní deformace v tlaku A_{max} [%] ...



Obr. 15 Univerzální trhací přístroji P100 – Labtest II v tlaku

4.1.10. Další Použité přístroje

Obr. 16 Digitalní váhy

Obr. 17 Míchací přístroj

Obr. 18 Sušárna BINDER

Obr. 19 Pec do 1200°C

4.1.11. Použitá forma

Forma pro výrobu geopolymerů byla vytvořená z plastu a dřevotřísky, jejíž rozměry byly 30 x 30 x 150 mm a obsahovala 5 komor vedle sebe. Vzorky odlité do této formy sloužily ke stanovení mechanických vlastností -pomocí zkoušku ohybem a tlakem.

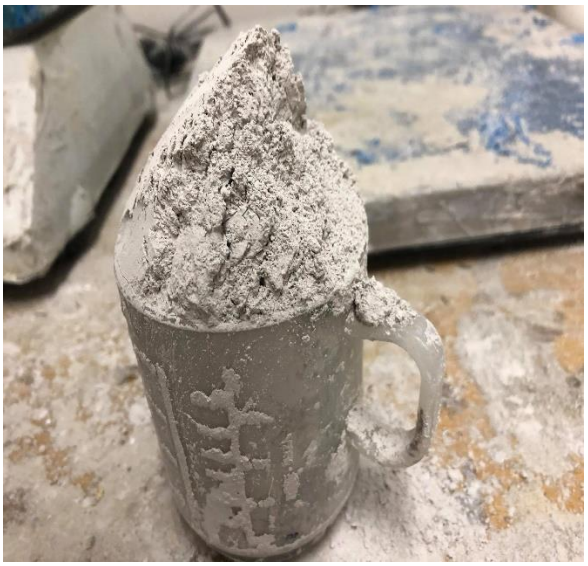
Obr. 20 Formy na odlití vzorků

4.2. Metodika experimentů

4.2.1. Příprava geopolymerního pojiva

K přípravě geopolymerů byla použita dvousložková směs „ Baucis L_K“ z Českých

lupkových závodů, a.s). Podstatou první složky je metakaolinit, který je označený jako „ Cement L “ (složka A) a druhá složka (složka B) je alkalický aktivátor, který je na bázi vodního skla. Dále byly pro přípravu geopolymerního kompozitu jako plniva použity složky C a D, které budou popsány dále.



Obr. 21 Složka A

Obr. 22 Složka B

4.2.2. Postup výroby geopolymerů a testování vzorků

Geopolymerní pojivo bylo připraveno tímto postupem:

- Navážení složek A a B
- Míchání směsi pět minut.
- Dále v závislosti na připravovaném kompozitu byly přidány složky C a D a opět byla celá směs mísena 5 minut.

Poté probíhalo:

- Nalití směsi do formy.
- Ponechání této směsi na vzduchu (při 20 ℃) 2 - 3 hodiny pro zatvrdnutí vzorku.
- Zabalení formy s vzorky do fólie a ponechání na dva dny při pokojové teplotě.
- Vyndání vzorků z formy a dozrání vzorků zabalených v fólii v sušárně při teplotě

75 ℃ po tři hodiny.

- Rozbalení vzorků z fólie a ponechání při pokojové teplotě po dobu jednoho dne .
- Tepelná úprava geopolymerních vzorků na teplotu 120°C, 400°C, 600°C, 800°C a 1000°C po dobu 1 hodiny
- Měření pevností ohybem a v tlaku po tepelném namáhání
- Měření ztráty hmotnosti po tepelných úpravách u kompozitů bez vláken

4.2.3. Příprava kompozitu bez vláken

K přípravě kompozitního materiálu byl použit jako plnivo úletový popílek označen jako „složka C“. Na obrázcích od 24 do 27 je znázorněna příprava geopolymerního kompozitu s úletovým popílkem.

Obr. 23 Složka C

Obr. 24 Geopolymerní pojivo

Obr. 25 Přidaná složka C do směs

Obr. 26 Výsledná kompozitní směs

Obr. 27 Naléváné směsi do formy

4.2.4. Kompozity s vláknem

Kompozit s vláknem byl plánován připravitze směsi s úletovým popílkem s nejvhodnějším procentem plnění UP, jehož příprava je popsána v předchozí kapitole, s tím, že do směsi je navíc přidána další komponenta D - uhlíková vlákna. Z důvodu koronaviru však tuto část nebylo možné zrealizovat.

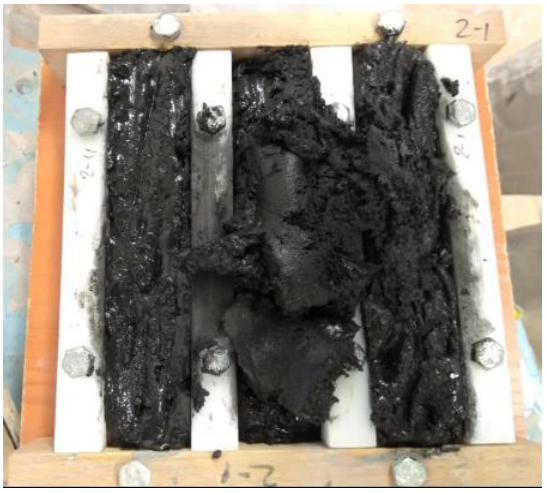
4.2.5. Metodika receptur geopolymerního pojiva a kompozitů

Geopolymerní pojivo bylo připraveno smísením suché (A) a kapalné (B) složky v hmotnostním poměru 5:4. Např. se smísí 500g složky„A“ a 400g složky „B“. Celková hmotnost „A+B“ je rovna 900g.

Geopolymerní kompozit bez vláken byl připraven s hmotnostním plněním geopolymerního pojiva úletovým popílkem v obsahu 0, 10, 20 a 30 % hmotn. 40 % úletového popílku již nebylo možné do geopolymeru zakomponovat z důvodu vysoké viskozity, jak je vidět na obrázku 27.

Nejvhodnější složení geopolymerního kompozitu s úletovým popílkem, které bylo po vyhodnocení pevností vzorků stanoveno na 30 % hmotn. úletového popílku bylo plánováno dále naplnit uhlíkovými vlákny. Z důvodu koronaviru však tuto část nebylo možné zrealizovat.

i) Směs po smíchání



ii) Po smíchání nalévání směsi do formy

Obr. 28 Použité 40% UP do směsi.

4.3. Experimentální vyhodnocení a diskuze výsledků

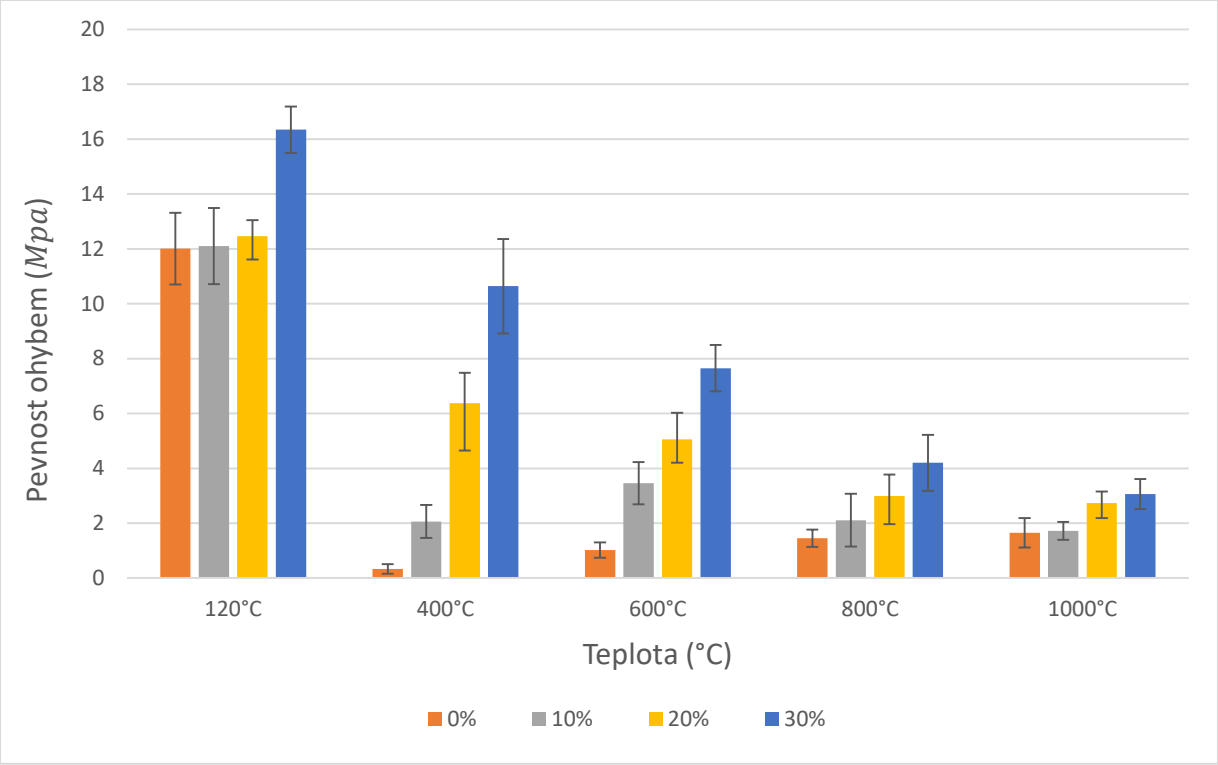
4.3.1. Kompozit s úletovým popílkem

4.3.1.1. Výsledky pevnosti ohybem kompozitu s úletovým popílkem

Pevnosti ohybem geopolymerních materiálů se systematickou změnou obsahu úletového popílku (bez vláken) jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3) a v grafu 3.

Tab. 3 Pevnost v ohybu zkušebních těles

Ohybové pevnosti R_{mo} [MPa]						
% Hmot. Úletu	Číslo vzorku	120°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
0%	1	10.61	0.48	0.74	1.54	1.45
	2	13.41	0.5	1.43	1.04	1.57
	3	13.25	0.12	1.16	1.31	2.49
	4	11.95	0.39	0.83	1.9	1.04
	5	10.85	0.18	0.92	1.46	1.71
	Průměr	12.01	0.33	1.02	1.45	1.65
	Směrodatná odchylka	1.3	0.17	0.28	0.32	0.53
10%	6	13.74	2.52	3.92	2.29	1.63
	7	12.89	2.38	3.86	3.59	2.11
	8	14.39	2.85	4.84	3.95	2.23
	9	14.6	3.21	3	3.95	2.46
	10	11.18	1.6	3	1.93	1.81
	Průměr	12.1	2.06	3.46	2.11	1.72
	Směrodatná odchylka	1.39	0.6	0.77	0.96	0.33
20%	11	12.3	7.87	7.33	2.85	2.32
	12	12.89	5.64	5.49	4.01	3.3
	13	13.24	6.21	6.38	4.25	3.36
	14	13.15	6.44	6.24	2.41	3.06
	15	11.89	4.87	7.96	3.12	3.15
	Průměr	12.46	6.37	5.05	2.99	2.74
	Směrodatná odchylka	0.58	1.11	0.97	0.78	0.42
30%	16	16.34	14.36	4.93	3.71	3.03
	17	16.2	9.38	4.51	6.15	1.99
	18	14.42	9.79	5.46	4.25	3.03
	19	16.37	9.23	6.74	5.76	2.11
	20	16.34	6.92	5.17	4.69	3.09
	Průměr	16.34	10.64	7.65	4.2	3.06
	Směrodatná odchylka	0.85	1.72	0.85	1.02	0.55



Graf 3. Závislost pevnosti ohybem zkušebních těles na teplotě

Dílčí závěr

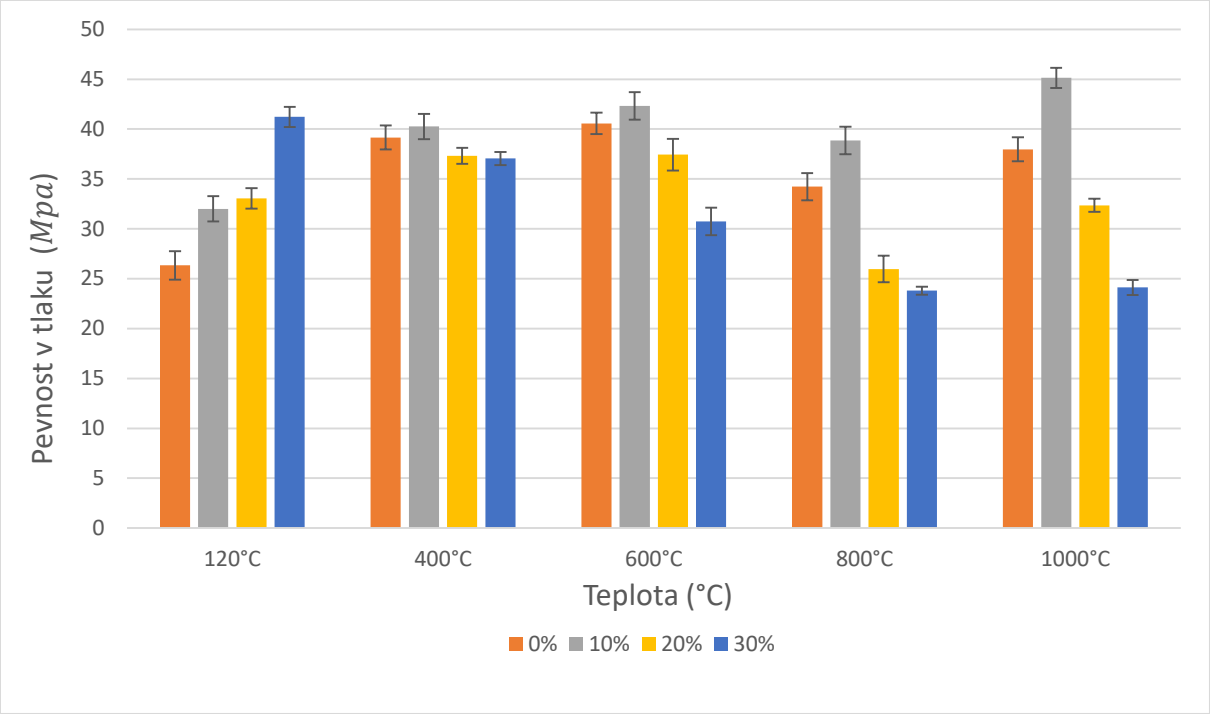
Z grafu 3 lze vyhodnotit, že nejvyšší pevnost v ohybu mají sušené vzorky. S rostoucí teplotou tepelné úpravy vzorků jejich ohybová pevnost klesá, kromě případu samotného geopolymeru bez úletového popílku. Je zřemé, že úletový popílek (UP) měl velmi pozitivní vliv na zvýšení ohybové pevnosti, která byla u sušeného vzorku s 30% úletového popílku o 30 % vyšší než v případě geopolymerů s nižším plnění. Vzorky s nejmenším ohybovým napětím byly vzorky s procentem (UP) 0% na obsahu při teplotě 400°C. Čím vyšší procento úletu, tím vyšší ohybové napětí. tzn.. větší odolnost proti ohybové deformaci při stejné teplotě, ale čím vyšší je teplota, tím menší je ohybové napětí. Např. vzorky s 30% úletového popílku mají při teplotě 1000°C vyšší ohybovou pevnost než vzorky s 0 %, 10 % i s 20 % úletu při 1000°C.

4.3.1.2. Výsledky pevnosti v tlaku kompozitu s úletovým popílkem

Pevnosti v tlaku geopolymerních materiálů se systematickou změnou obsahu úletového popílku (bez vláken) jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4) a v grafu 4.

Tab. 4 Pevnost v tlaku zkušebních těles

Tlakové pevnosti R_{mt} [MPa]						
% Hmot. Úletu	Číslo vzorku	120°C	400°C	600°C	800°C	1000°C
0%	1	25.04	37.78	39.40	31.98	36.95
	2	25.35	37.92	40.91	35.26	39.30
	3	28.67	39.91	40.69	35.32	38.96
	4	26.09	39.79	42.13	34.29	38.05
	5	26.50	40.35	39.71	34.28	36.57
	Průměr	26.33	39.15	40.57	34.22	37.97
	Směrodatná odchylka	1.43	1.21	1.08	1.35	1.20
10%	6	33.47	41.29	42.33	39.94	45.39
	7	32.17	39.24	44.48	36.81	45.08
	8	30.29	38.56	40.67	38.04	45.45
	9	31.26	41.09	41.78	39.65	43.51
	10	32.82	41.10	42.35	39.82	46.24
	Průměr	32.00	40.26	42.32	38.85	45.13
	Směrodatná odchylka	1.26	1.26	1.39	1.38	1.00
20%	11	32.04	37.16	35.63	25.02	32.67
	12	34.51	36.86	36.04	26.43	31.55
	13	32.39	36.37	39.13	26.92	33.13
	14	32.64	38.45	38.84	27.30	32.66
	15	33.68	37.78	37.52	24.17	31.78
	Průměr	33.05	37.32	37.43	25.97	32.36
	Směrodatná odchylka	1.02	0.81	1.59	1.33	0.67
30%	16	40.00	37.33	30.09	23.47	24.98
	17	41.35	37.71	29.24	23.38	23.19
	18	40.56	37.48	32.94	23.74	24.73
	19	42.66	36.16	30.43	24.02	24.11
	20	41.55	36.59	30.97	24.38	23.58
	Průměr	41.22	37.05	30.73	23.80	24.12
	Směrodatná odchylka	1.02	0.65	1.38	0.41	0.75



Graf 4. Závislost pevnost v tlaku zkušebního těles na teptotě

Dílčí závěr

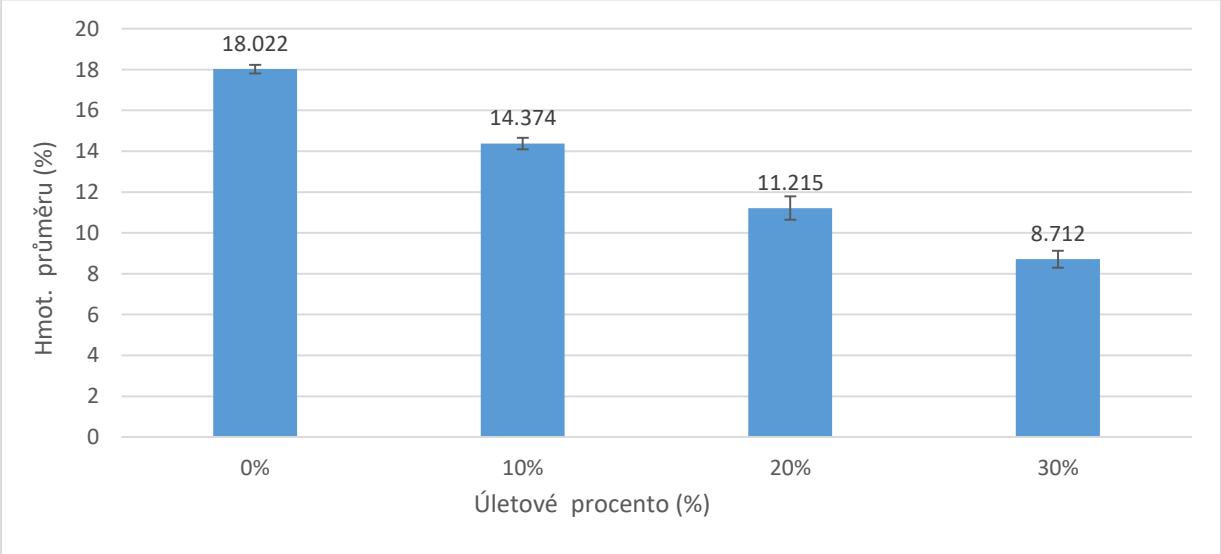
Z grafu 4 lze vyhodnotit, že u sušených vzorků při 120°C roste pevnost v tlaku s rostoucím obsahem úletového popílku.

Naopak vzorky upravované při teplotách 400°C a vyšších je nejvyšší pevnost v tlaku vždy při 10 % UP a po té pevnost v tlaku klesá. Při teplotě 1000°C je pevnost v tlaku při 30 %UP téměř poloviční oproti geopolymeru s 10 % UP. Mezi pevností v tlaku geopolymeru bez UP a s 10 %UP je největší rozdíl při 1000°C, kdy geopolymer s 10 % UP má o 18 % vyšší pevnost v tlaku než geopolymer bez UP.

4.3.1.3. Ztráta sušením a ztráta žíháním připravených materiálů

Tab. 5 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po sušení na 120 °C

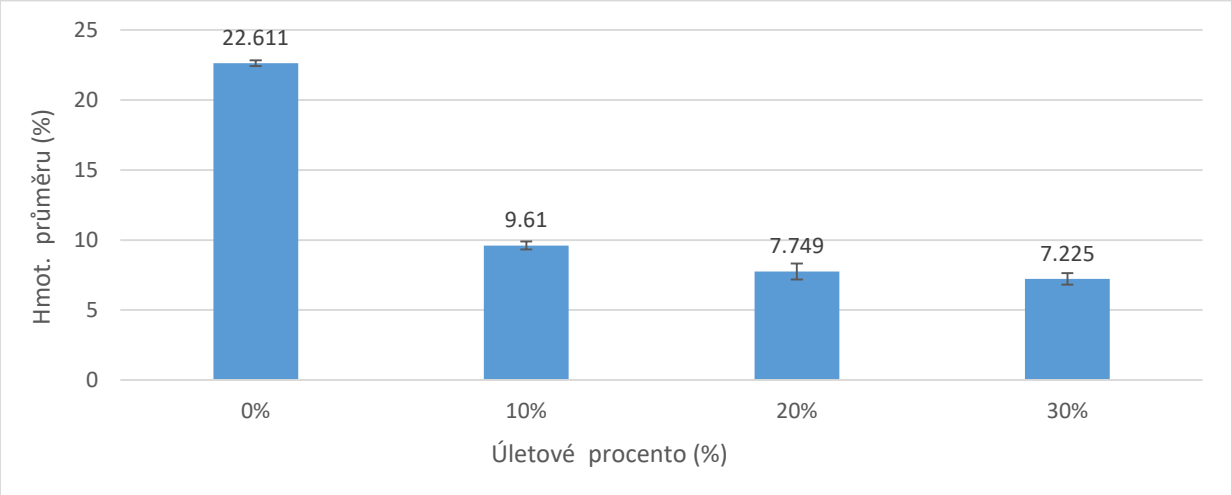
Procento UP. [%]	Zkušební vzorky [-]	Původní hm. [g]	Hm. po 120°C [g]	Hm. ztráta [%]	Průměr [%]
0%	0/1	0.238	0.195	18.067	18.022
	0/2	0.241	0.202	16.183	
	0/3	0.239	0.197	17.573	
	0/4	0.246	0.199	19.106	
	0/5	0.245	0.198	19.184	
10%	10/1	0.239	0.205	14.226	14.374
	10/2	0.239	0.205	14.226	
	10/3	0.243	0.210	13.580	
	10/4	0.237	0.203	14.346	
	10/5	0.241	0.206	14.523	
20%	20/1	0.224	0.200	10.714	11.215
	20/2	0.236	0.209	11.441	
	20/3	0.235	0.207	11.915	
	20/4	0.238	0.211	11.345	
	20/5	0.239	0.211	11.715	
30%	30/1	0.242	0.220	9.091	8.172
	30/2	0.243	0.223	8.230	
	30/3	0.243	0.222	8.642	
	30/4	0.233	0.214	8.155	
	30/5	0.240	0.220	8.333	



Graf 5. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hmotnosti sušených zkušebních vzorků po sušení na 120°C

Tab. 6 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 400 °C

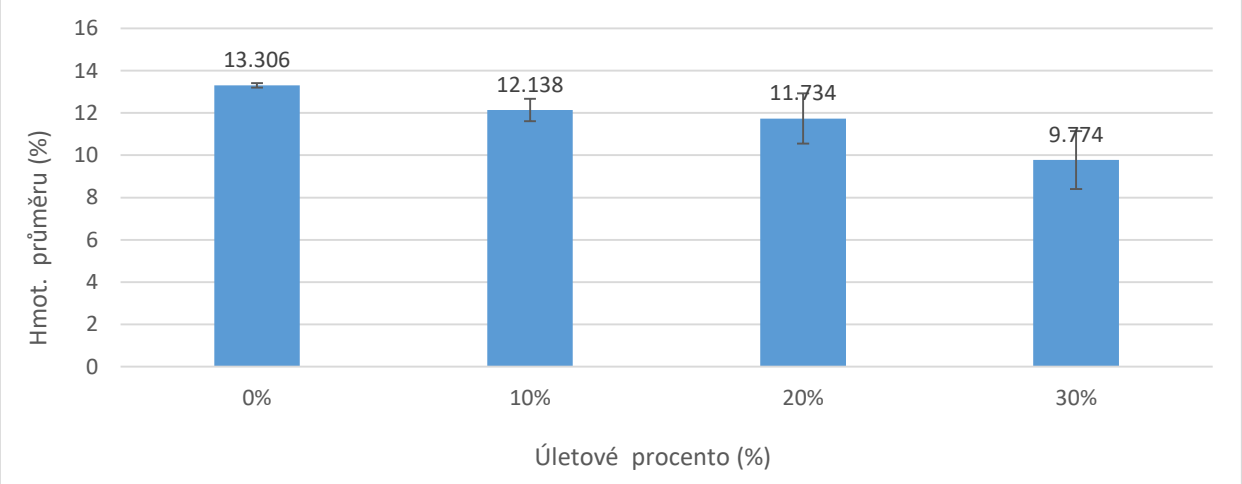
Procento UP. [%]	Zkušební vzorky [-]	Původní hm. [g]	Hm. po 400°C [g]	Hm. ztráta [%]	Průměr [%]
0%	0/1	0.239	0.185	22.594	22.611
	0/2	0.241	0.186	22.822	
	0/3	0.244	0.189	22.541	
	0/4	0.242	0.188	22.314	
	0/5	0.237	0.183	22.785	
10%	10/1	0.204	0.185	9.314	9.61
	10/2	0.210	0.190	9.524	
	10/3	0.207	0.188	9.179	
	10/4	0.208	0.188	9.615	
	10/5	0.212	0.191	9.906	
20%	20/1	0.211	0.194	8.057	7.749
	20/2	0.216	0.197	8.796	
	20/3	0.205	0.187	8.780	
	20/4	0.213	0.195	8.451	
	20/5	0.215	0.199	7.442	
30%	30/1	0.209	0.194	7.177	7.225
	30/2	0.213	0.196	7.981	
	30/3	0.210	0.193	8.095	
	30/4	0.212	0.196	7.547	
	30/5	0.220	0.204	7.273	



Graf 6. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 400°C

Tab. 7 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 600°C

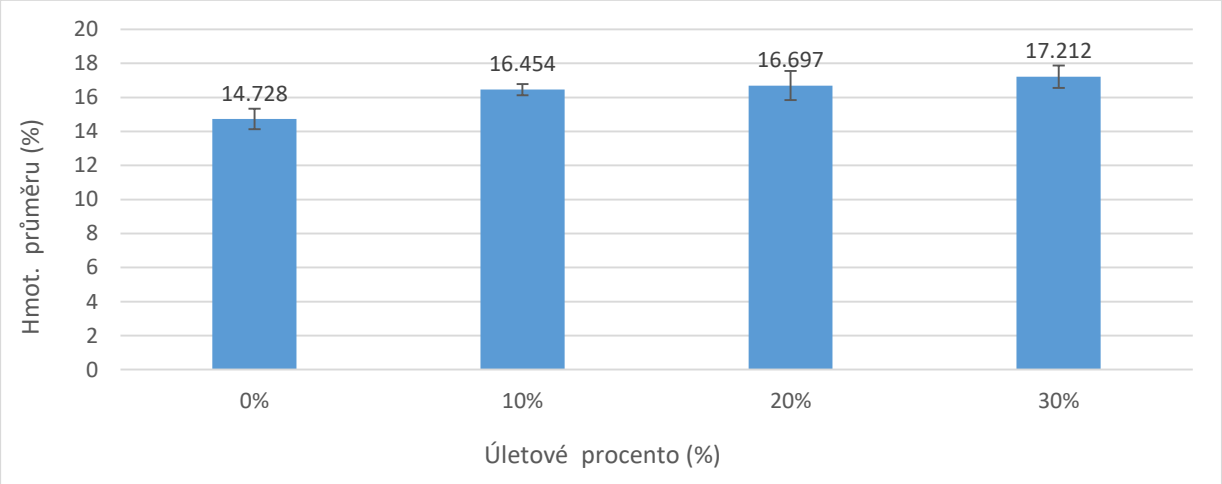
Procento UP. [%]	Zkušební vzorky [-]	Původní hm. [g]	Hm. po 600°C [g]	Hm. ztráta [%]	Průměr [%]
0%	0/1	0.202	0.175	13.366	13.306
	0/2	0.203	0.176	13.300	
	0/3	0.203	0.176	13.300	
	0/4	0.201	0.174	13.433	
	0/5	0.198	0.172	13.131	
10%	10/1	0.198	0.173	12.626	12.138
	10/2	0.214	0.186	13.084	
	10/3	0.205	0.179	12.683	
	10/4	0.207	0.181	12.560	
	10/5	0.206	0.182	11.650	
20%	20/1	0.215	0.189	12.093	11.734
	20/2	0.211	0.187	11.374	
	20/3	0.216	0.192	11.111	
	20/4	0.214	0.184	14.019	
	20/5	0.211	0.187	11.374	
30%	30/1	0.200	0.181	9.500	9.774
	30/2	0.213	0.190	10.798	
	30/3	0.214	0.192	10.280	
	30/4	0.206	0.191	7.282	
	30/5	0.209	0.188	10.048	



Graf 7. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 600°C

Tab. 8 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 800°C

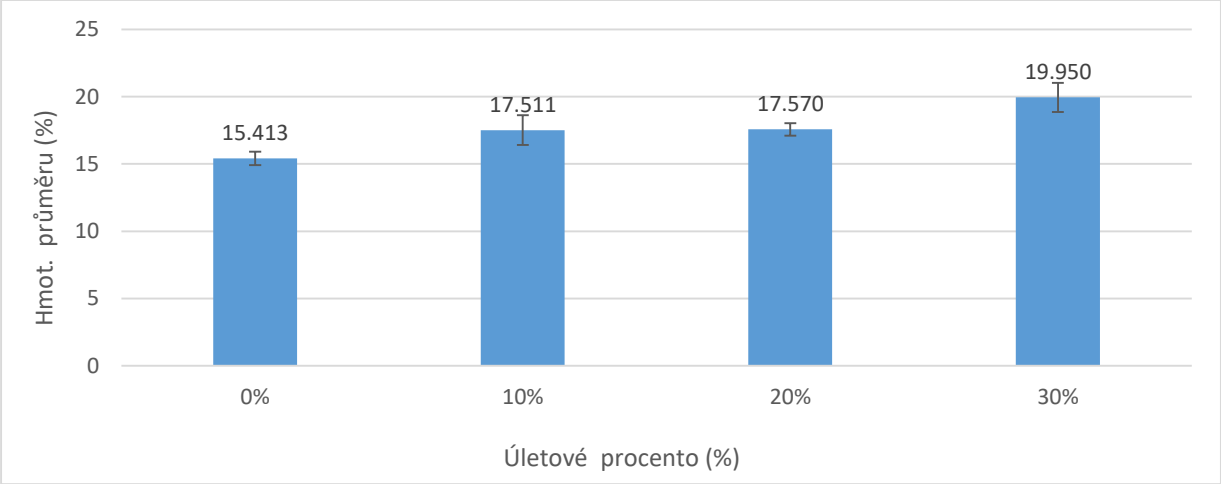
Procento UP. [%]	Zkušební vzorky [-]	Původní hm. [g]	Hm. po 800°C [g]	Hm. ztráta [%]	Průměr [%]
0%	0/1	0.201	0.173	13.930	14.728
	0/2	0.198	0.168	15.152	
	0/3	0.203	0.174	14.286	
	0/4	0.202	0.171	15.347	
	0/5	0.201	0.171	14.925	
10%	10/1	0.209	0.174	16.746	16.454
	10/2	0.209	0.174	16.746	
	10/3	0.211	0.177	16.114	
	10/4	0.210	0.176	16.190	
	10/5	0.198	0.166	16.162	
20%	20/1	0.213	0.179	15.962	16.697
	20/2	0.219	0.186	15.068	
	20/3	0.208	0.174	16.346	
	20/4	0.205	0.171	16.585	
	20/5	0.218	0.180	17.431	
30%	30/1	0.214	0.176	17.757	17.212
	30/2	0.218	0.182	16.514	
	30/3	0.212	0.177	16.509	
	30/4	0.213	0.179	15.962	
	30/5	0.204	0.170	16.667	



Graf 8. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 800°C

Tab. 9 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 1000°C

Procento UP. [%]	Zkušební vzorky [-]	Původní hm. [g]	Hm. po 1000°C [g]	Hm. ztráta [%]	Průměr [%]
0%	0/1	0.199	0.17	14.573	15.413
	0/2	0.206	0.174	15.534	
	0/3	0.207	0.175	15.459	
	0/4	0.202	0.17	15.842	
	0/5	0.198	0.167	15.657	
10%	10/1	0.211	0.175	17.062	17.511
	10/2	0.205	0.170	17.073	
	10/3	0.210	0.174	17.143	
	10/4	0.219	0.176	19.635	
	10/5	0.206	0.169	17.961	
20%	20/1	0.208	0.171	17.788	17.570
	20/2	0.210	0.174	17.143	
	20/3	0.209	0.173	17.225	
	20/4	0.206	0.172	16.505	
	20/5	0.219	0.181	17.352	
30%	30/1	0.210	0.170	19.048	19.950
	30/2	0.219	0.179	18.265	
	30/3	0.216	0.176	18.519	
	30/4	0.218	0.178	18.349	
	30/5	0.211	0.167	20.853	



Graf 9. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 1000°C

Dílčí závěr

Dosažené výsledky vykazují, že hmotnosti ztrát sušením a žíháním zkušebních vzorků poměrně vysoké. Při teplotě sušení 120 °C je výrazně vyšší ztráta hmotnosti u vzorků bez UP než u kompozitních vzorků s UP. U vzorku s 0 % UP je ztráta sušením dokonce dvojnásobná oproti vzorku s 30 % UP. To je pravděpodobně způsobeno tím, že s vyšším procentem plnění popílkem ubývá celkový obsah geopolymerního pojiva, které má vysokou nasákavost (vysoký obsah volné vody)a tím i nejvyšší ztrátu sušením, což dokazuje právě nejvyšší ztráta sušením u samotného geopolymeru bez UP.

Podobný charakter klesající ztráty hmotnosti vzorků s rostoucím obsahem UP vykazují i vysušené vzorky při ohřevu na 400 °C a 600 °C. To je pravděpodobně opět způsobeno vyšším obsahem geopolymerního pojiva a tím i ztrátou chemicky vázané vody v něm obsažené u vzorků s nižším obsahem plnění UP a opačně. Konkrétně vzorky s 0% UP ztráta hmotnosti po ohřevu na 400 °C je 22,611%, zatímco tato hodnota je pouze 9.61% pro vzorky s obsahem UP 10% a 7,2 % pro vzorky s obsahem UP 30 %. Po ohřevu na teplotou 600°C jsou rozdíly ztráty hmotnosti mezi různými obsahy UP docela malé - asi 1 až 2%.

Při teplotě 800°C a 1000°C již nedochází k úniku chemicky vázané vody a naopak pravděpodobně dochází k výpalu a rozkladu UP, kdy vznikají CO_2 splodiny což dokazuje, že jsou vyšší ztráty žíháním u vzorků s vyšším obsahem UP. Také to, že hmotnostní ztráty pro geopolymerní vzorky vyžíhané při teplotě 800°C jsou menší než vzorků se stejným složením při teplotě 1000°C.

i) Vzorky s obsahem 30% UP

ii) Vzorky s obsahem 20% UP

iii) Vzorky s obsahem 10% UP

iiii) Vzorky s obsahem 0% UP

Obr. 29 Vzorky po šušením i po žíháním v pořadí 120°C 400°C 600°C 800°C 1000°C

5. DISKUZE

V bakalářské práci byl zkoumán vliv obsahu úletového popílku z černouhelné elektrárny na vlastnosti geopolymerních kompozitů s použitím až do teploty 1000 °C. Dále měly být provedeny experimenty s hybridním kompozitem, který by se skládal z nejvhodnějšího plnění geopolymeru popílkem s přídavkem uhlíkových vláken. Z důvodu pandemie koronaviru však nebylo možné tuto část pokusů provést, neboť došlo ke krachu společnosti, od které byl získáván používaný úletový popílek, a tudíž ho nebylo možné získat pro další plánované pokusy s obsahem popílku i vláken. Použití jiného popílku by bylo značně zkreslující. Přes to se domnívám, že bylo v mé bakalářské práci dosaženo významných výsledků, které lze diskutovat. Také se domnívám, že testované geopolymery lze i bez použití vláken nazvat hybridními, neboť byl použit hybridní způsob vzniku geopolymerů, kdy geopolymerní matrice vzniká alkalickou aktivací nejen jednoho materiálu – tepelně upraveného lupku, ale také strusky, která je obsažena ve směsi Baucis a úletového popílku, který se také částečně v alkalickém prostředí rozpouští. Nerorozpuštěné části zrn těchto surovin pak tvoří plnivo vzniklých geopolymerních kompozitů.

Z dosažených výsledků je evidentní, že zvyšující se obsah úletového popílku měl na pevnost ohybem vždy pozitivní vliv jak za nízkých, tak za vysokých teplot až do 1000 °C. To je způsobeno dle předpokladů obecným účelem plniva v kompozitech, kdy dochází k vyztužení materiálu. Při vyšších teplotách (800 a 1000°C) však vliv na zvýšení pevnosti ohybem již nebyl tak výrazný a to pravděpodobně z důvodu výpalu úletového popílku, což prokazuje i změřená vysoká ztráta žíháním samotného popílku při teplotě 1000°C či geopolymerů s obsahem UP při teplotách 800 a 1000 °C. U pevnosti v tlaku měl obsah UP také pozitivní efekt, avšak pouze u vysušených vzorků. U tepelně upravených vzorků byl nejvhodnější obsah UP 10 %, při kterém bylo dokonce při 1000 °C dosaženo nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku. Tento jev dopopručuji k dalšímu výzkumu, který by vysvětlil, proč bylo tento obsah pro pevnost v tlaku tak výhodný oproti pevnosti ohybem.

Pro přehled lze shrnout výsledky takto:

- Při teplotě 120°C:
    - Pevnost samotného geopolymerního pojiva ohybem a v tlaku jsou poměrně

vysoké, ale jejich hodnoty jsou menší než pevnost kompozitního materiálu s UP v tlaku a v ohybu.

- Čím je větší procento plnění UP, tím je vyšší pevnost ohybem a tlakem

- Při vysokých teplotách (400°C, 600°C, 800°C, 1000°C):
    - Pevnosti ohybem geopolymernch materiálů byly nejvyšší vždy u vzorků s obsahem UP 30%
    - Pevnost geopolymerů v tlaku ostatních vzorků je menší než pevnost v tlaku vzorků s obsahem 10% UP.
    - Čím je vyšší procento plnění UP než 10%, tím je menší pevnost v tlaku u kompozitního materiálu.

Zajímavé výsledky byly získány také při výzkumu úbytků hmotnosti vlivem oheřevu vzorků až na 1000 °C po dobu 1 hodiny. Do teploty sušení dochází ke ztrátě volné vody a proto je nejvyšší ztráta sušením u vzorků s nejnižším plněním UP, neboť voda je obsažena především v pojivu. U již sušených vzorků dochází k další ztrátě hmotnosti. Až do teploty 600 °C převládá vliv většího množství pojiva a ztráta jeho vázané vody – to koresponduje s vyšší ztrátou hmotnosti u vzorků s nižším obsahem UP. U vzorků žíhaných na 800 °C a 1000 °C již hraje větší roli výpal a rozklad UP, který dokazuje i ztráta žíhání samotného UP, která je přes 30 % při 1000°C. Proto jsou při teplotách nad 600°C vyšší ztráty žíháním u vzorků s vyšším obsahem UP.

6. ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci:

- Provedl jsem literární odbornou rešerši na téma geopolymerní materiály, kompozitní materiály, odpadní materiály z elektráren, využití materiálů s vysokým podílem uhlíku, zkušební metody pevných nekovových anorganických materiálů a kompozitních materiálů

- Navrhl jsem zkušební tělesa z geopolymerního materiálu s proměnným množstvím částicových plniv a pak jsem navrhl ohybovou a tlakovou zkoušku za laboratorní teploty i po vystavení zkušebních těles vyšším teplotám až do 1000 °C po dobu 1 hodiny.

- Po vykonání mechanických zkoušek jsem provedl zhodnocení a porovnání mezi hodnotami pevnosti při různých teplotách tak jako hodnocení ztrát hmotnosti vzorků před a po sušení i před a po žíhání až do teploty 1000 °C po dobu 1 hodiny..

- Provedl jsem vyhodnocení a diskuzi naměřených výsledků:

    - Pro geopolymery s proměnným obsahem úletového popílku bez vláken

        - Nejvyšší hodnoty průměrné pevnosti ohybem vykazují sušené vzorky, při teplotě 120°C

        - Na pevnost ohybem měl při všech teplotách pozitivní efekt nejvyšší obsah UP 30 %

        - Nejvyšší pevnosti v tlaku bylo dosaženo při 1000 °C a obsahu plnění 10 % UP.

        - Po žíhání se průměrné hodnoty pevnosti v tlaku geopolymeru nezměnily tak významně jako u pevností ohybem.

        - Do teploty 600°C má nejvyšší vliv na ztrátu sušením a žíháním obsah volné a vázané vody a proto jsou tyto ztráty vyšší u geopolymerů s nižším plněním

- Nad teplotu 600°C má nejvyšší vliv na ztrátu žíháním výpal úletového popílku a proto je vyšší u geopolymerrů s vyšším plněním

- Z těchto výsledků je ukázáno, že ztráta žíháním významě neovlivnila pevnost v tlaku, dokonce vzorek žíhaný při 1000°C s 17,5 % ztráty žíháním vykazoval nejvyšší pevnost v tlaku ze všech vzorků.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers and geopolymeric materials. Therm Anal Calorim, 1989, 35(2), 429-41.

[2] DUXSON, P., et al. Geopolymer technology: the current state of the art, J Mater Sci, 2007, 42, 2917-2933, DOI 10.1007/s10853-006-0637-z.

[3] HLAVÁČ, Jan. Základy technologie silikátů. Praha: SNTL, 1985.

[4] DUXSON, P., et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A – Physicochem. Eng. Aspects, 2005, 269 (1-3), 47-58, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.06.060.

[5] VNOUČEK, Milan. Kompozitní materiály.

Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf [online, cit. 01. 04. 2020].

[6] KOMNITSAS, Kostas a Dimitra ZAHARAKI. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry, Miner Eng, 2007, 20, 1261-77.

[7] Dostupné z: https://www.cs.wikipedia.org/ [online, cit. 02. 04. 2020].

[8] DAĎOUREK, Karel. Kompozitní materiály – druhy vláken. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013.

[9] HÁJKOVÁ, Pavlína. Kaolinite Claystone-Based Geopolymer Materials: Effect of Chemical Composition and Curing Conditions [online]. 10.2018 [cit. 24. 4. 2020]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/328239599_Kaolinite_Claystone-Based_Geopolymer_Materials_Effect_of_Chemical_Composition_and_Curing_Conditions

[10] NGUYEN, Thang Xiem. Potenciální využití geopolymerních materialů v oblasti zpracování odpadů. Liberec, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Liberci. Fakulta strojní.

[11] LE, Chi Hiep. Optimalizace vlastností geopolymerní matrice vybranými plnivy. Liberec,

2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Liberci. Fakulta strojní.

[12] HÁJKOVÁ, Pavlína. Tensile and bending test of carbon/epoxy and carbon/geopolymer composites after temperature conditioning [online]. 1.2018 [cit. 25. 04. 2020]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/323752079_Tensile_and_bending_test_of_carbonepoxy_and_carbongeopolymer_composites_after_temperature_conditioning

[13] GRÉGR, Jan. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken. Liberec, 10.2004. Zpráva pro Výzkumné centrum „Textil“ LN00B090. Fakulta přírodovědně - humanitní a pedagogická. Technická univerzita v Libereci.

[14] LEGENDRE, André. Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům. Praha: Informatorium, 2001. 173 s. ISBN 80-86073-82-3.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ , GRAFŮ A TABULEK

8.1. Obrázky

Obr. 1 Typy polysialátu a schéma jejich molekulárních struktury ... 13
Obr. 2 Struktura geopolymerní sítě ve 3D ... 14
Obr. 3 Geopolymerní struktura ... 15
Obr. 4 Schéma rozdělění kompozitní materiálu ... 18
Obr. 5 Druhy disperze ... 19
Obr. 6 Uhlíkové vlákno o průměru 6 μm v porovnání s lidským vlasem. ... 20
Obr. 7 Schéma výroby uhíkových vláken z PAN ... 21
Obr. 8 Schéma spřádání vláken na bázi PAN [14] ... 21
Obr. 9 Tkanina z uhlíkových vlákna ... 22
Obr.10 Karoserie auta z uhlíkových vlákna ... 23
Obr. 11 Schéma 3 bodového ohybu ... 30
Obr. 12 Velikost vzorku ... 31
Obr. 13 Univerzální trhací přístroji P100 – Labtest II v ohybu ... 32
Obr. 14 Uspořadání pro zkoušku pevnosti v tlaku ... 33
Obr. 15 Univerzální trhací přístroji P100 – Labtest II v tlaku ... 34
Obr. 16 Digitalní váhy Obr. 17 Míchací přístroj ... 34
Obr. 18 Sušárna BINDER Obr. 19 Pec do 1200°C ... 35
Obr. 20 Formy na odlití vzorků ... 35
Obr. 21 Složka A Obr. 22 Složka B ... 36
Obr. 23 Složka C ... 37
Obr. 24 Geopolymerní pojivo Obr. 25 Přidaná složka C do směs ... 38
Obr. 26 Výsledná kompozitní směs Obr. 27 Naléváné směsi do formy ... 38
Obr. 28 Použíté 40% UP do směsi ... 39
Obr. 29 Vzorky po šušením i po žíháním v pořadí 120°C 400°C 600°C 800°C 1000°C.. 50
Obr. 30 Vzorek před (vlevo) a po (vpravo) zkoušce v ohybu ... 59
Obr. 31 Vzorek před (vlevo) a po (vpravo) zkoušce v tlaku ... 64

8.2. Grafy

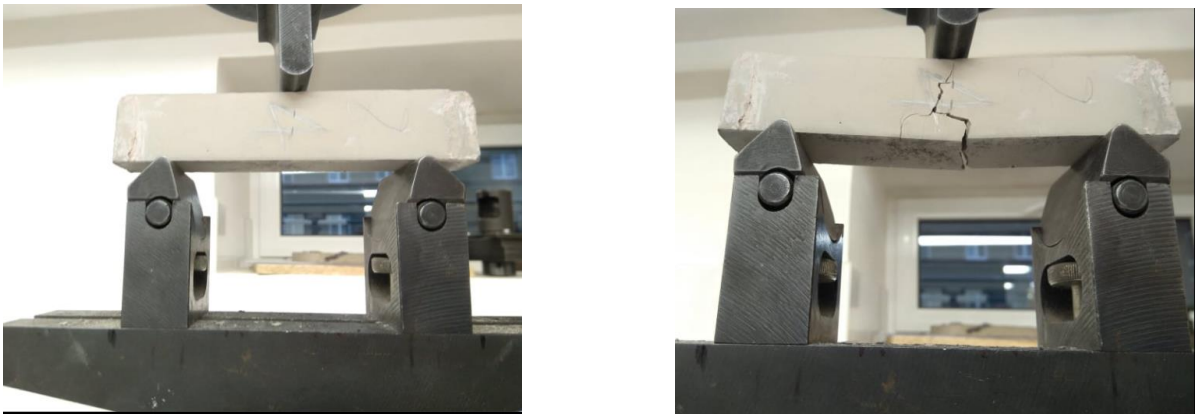
Graf 1. Fázové složení úletového popílku měřené pomocí XRD ... 28
Graf 2. Fázové složení uhlíkové vlákno měřené pomocí XRD ... 29
Graf 3. Závislost pevnosti ohybem zkušebních těles na teplotě ... 41
Graf 4. Závislost pevnost v tlaku zkušebního těles na teptotě ... 43
Graf 5. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hm. sušených zkušebních vzorků po sušení na 120°C ... 44
Graf 6. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hm. sušených zkušebních vzorků po žíhání na 400°C ... 45
Graf 7. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hm. sušených zkušebních vzorků po žíhání na 600°C ... 46
Graf 8. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hm. sušených zkušebních vzorků po žíhání na 800°C ... 47

Graf 9. Závislost mezi obsahem UP a ztrátou hm. sušených zkušebních vzorků po žíhání na 1000°C 48

8.3. Tabulky

Tab. 1 Chemické složení úletové popílku měření pomocí XRF 27
Tab. 2 Chemické složení úhlikové vlákno měření pomocí XRF 29
Tab. 3 Pevnost v ohybu zkušebních těles 40
Tab. 4 Pevnost v tlaku zkušebních těles 42
Tab. 5 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po sušení na 120 °C 44
Tab. 6 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 400 °C 45
Tab. 7 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 600°C 46
Tab. 8 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 800°C 47
Tab. 9 Ztráta hmotnosti sušených zkušebních vzorků po žíhání na 1000°C 48
Tab. 10 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 120°C 59
Tab. 11 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 400°C 60
Tab. 12 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 600°C 61
Tab. 13 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 800°C 62
Tab. 14 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 1000°C 63
Tab. 15 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 120°C 64
Tab. 16 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 400°C 65
Tab. 17 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 600°C 66
Tab. 18 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 800°C 67
Tab. 19 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 1000°C 68

9. PŘÍLOHY



Obr. 30 Vzorek před (vlevo) a po (vpravo) zkoušce v ohybu

Tab. 10 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 120°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Max. průhyb A_{max}[mm]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mo}[MPa]	Úletové procento [%]
1	236.57	2.02	1273.30	10.611	0%
2	160.09	1.06	1609.05	13.409	
3	163.73	2.95	1589.43	13.245	
4	299.71	1.45	1433.56	11.946	
5	242.24	1.63	1302.44	10.854	
6	294.82	1.70	1649.39	13.745	10%
7	247.86	1.89	1546.67	12.889	
8	382.73	1.37	1727.35	14.395	
9	280.17	1.90	1752.15	14.601	
10	226.96	1.79	1341.21	11.177	
11	237.00	1.89	1475.81	12.298	20%
12	271.06	1.73	1546.65	12.889	
13	270.56	1.78	1589.16	13.243	
14	337.15	1.42	1578.54	13.155	
15	278.06	1.56	1426.22	11.885	
16	337.32	1.77	1961.16	16.343	30%
17	339.54	1.74	1943.47	16.196	
18	319.86	1.64	1730.92	14.424	
19	348.89	1.71	1964.72	16.373	
20	353.15	1.69	1961.16	16.343	

- Příklad výpočtu maximálního ohybového napětí vzorku s obsahem 0% UP při 400°C:

$$R_{mo} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{57.01 \cdot 150}{30 \cdot 30^2} = 0.475083\ (MPa)$$

Tab. 11 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 400°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [Mpa]	Max. průhyb Amax[mm]	Max. síly Fmax[N]	Max. Nápětí R_{mo}[MPa]	Úletové procento [%]
1	21.17	0.82	57.01	0.48	0%
2	13.97	1.32	60.57	0.50	
3	7.49	0.58	14.25	0.12	
4	12.15	1.16	46.32	0.39	
5	5.37	1.21	21.38	0.18	
6	70.24	1.31	302.86	2.52	10%
7	57.85	1.5	285.05	2.38	
8	70.23	1.48	342.05	2.85	
9	76.53	1.53	384.81	3.21	
10	45.15	1.29	192.4	1.60	
11	201.53	1.42	944.21	7.87	20%
12	115.95	1.77	676.98	5.64	
13	131.78	1.72	744.68	6.21	
14	167.67	1.4	773.18	6.44	
15	89.53	1.98	584.34	4.87	
16	357.85	1.46	1723.79	14.36	30%
17	237.9	1.44	1125.06	9.38	
18	176.31	2.02	1174.68	9.79	
19	269.35	1.25	1107.34	9.23	
20	245.9	1.02	830.19	6.92	

- Například výpočet maximální ohybové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 600°C:

$$R_{mo} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{89.08 \cdot 150}{30 \cdot 30^2} = 0.74233\ (MPa)$$

Tab. 12 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 600°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [Mpa]	Max. průhyb Amax[mm]	Max. síly Fmax[N]	Max. Nápětí R_{mo}[MPa]	Úletové procento [%]
1	29.07	0.93	89.08	0.74	0%
2	38.96	1.33	171.03	1.43	
3	24.79	1.7	138.96	1.16	
4	29.75	1.02	99.77	0.83	
5	29.11	1.15	110.46	0.92	
6	126.15	1.13	470.32	3.92	10%
7	131.26	1.07	463.2	3.86	
8	106.14	1.66	580.78	4.84	
9	88.88	1.23	359.87	3.00	
10	148.67	0.73	359.87	3.00	
11	174.49	1.53	880.08	7.33	20%
12	83.05	2.41	659.17	5.49	
13	170.07	1.37	766.06	6.38	
14	128.46	1.77	748.24	6.24	
15	136.48	2.12	954.9	7.96	
16	125.14	1.43	591.47	4.93	30%
17	95.11	1.73	541.59	4.51	
18	129.89	1.53	655.6	5.46	
19	172.75	1.42	808.81	6.74	
20	136.33	1.38	619.97	5.17	

- Například výpočet maximální ohybové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 800°C:

$$R_{mo} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{185.28 \cdot 150}{30 \cdot 30^2} = 1.544\ (MPa)$$

Tab. 13 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 800°C

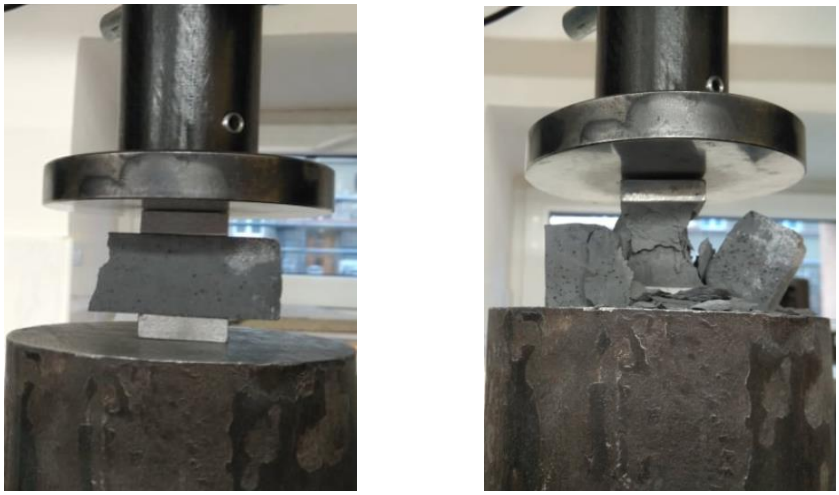
Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Max. průhyb A_{max}[mm]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mo}[MPa]	Úletové procento [%]
1	51.1	1.1	185.28	1.54	0%
2	62.13	0.61	124.71	1.04	
3	51.75	0.92	156.77	1.31	
4	79.92	0.87	228.04	1.90	
5	59.63	0.99	175.67	1.46	
6	54.22	1.54	274.36	2.29	10%
7	77.64	1.69	431.13	3.59	
8	107.3	1.34	473.89	3.95	
9	124.5	1.16	473.89	3.95	
10	58.79	1.2	231.6	1.93	
11	99.94	1.04	342.05	2.85	20%
12	75.64	1.93	481.01	4.01	
13	108.71	1.42	509.52	4.25	
14	51.15	1.71	288.61	2.41	
15	84.55	1.34	374.12	3.12	
16	92.41	1.46	445.38	3.71	30%
17	155.78	1.44	737.55	6.15	
18	127.72	1.21	509.52	4.25	
19	152.4	1.38	691.23	5.76	
20	97.57	1.75	562.96	4.69	

- Například výpočet maximální ohybové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 1000°C:

$$R_{mo} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{174.59 \cdot 150}{30 \cdot 30^2} = 1.454916\ (MPa)$$

Tab. 14 Vlastnosti vzorků při zkoušce v ohybu při teplotě 1000°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Max. průhyb A_{max}[mm]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mo}[MPa]	Úletové procento [%]
1	60.93	0.87	174.59	1.45	0%
2	33.39	1.72	188.84	1.57	
3	154.12	0.59	299.3	2.49	
4	22.86	1.66	124.71	1.04	
5	70.55	1.32	204.67	1.71	
6	55.84	1.07	195.97	1.63	10%
7	51.6	1.49	252.98	2.11	
8	53.6	1.51	267.23	2.23	
9	34.34	2.61	295.73	2.46	
10	44.32	1.49	217.35	1.81	
11	69.1	1.22	277.92	2.32	20%
12	67.97	1.77	395.5	3.30	
13	91.68	1.33	402.63	3.36	
14	108.73	1.02	366.99	3.06	
15	81.98	1.4	377.68	3.15	
16	103.22	1.07	363.43	3.03	30%
17	46.47	1.56	238.73	1.99	
18	71.23	1.55	363.43	3.03	
19	51.6	1.49	252.98	2.11	
20	69.61	1.62	370.56	3.09	



Obr. 31 Vzorek před (vlevo) a po (vpravo) zkoušce v tlaku

Tab. 15 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 120°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Rel. deformace A_{max} [%]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mt}[MPa]	Úletové procento [%]
1	974.03	4.79	22533.9	25.04	0%
2	1479.78	3.33	38299.5	42.56	
3	1514.75	3.41	37555.4	41.73	
4	747.73	2.65	19193	21.33	
5	934.89	3.11	22813.8	25.35	
6	1134.73	3.7	30122.3	33.47	10%
7	1435.92	3.06	28953.3	32.17	
8	1039.42	4.3	27263.4	30.29	
9	1076.05	4.11	28138.4	29.56	
10	1134.21	4.14	29541.4	31.26	
11	1388.2	4.2	28836.6	32.04	20%
12	1482.3	3.3	31057.9	34.51	
13	1263.18	3.46	29155.4	32.39	
14	1372.57	3.53	29371.6	32.64	
15	1467.72	4.75	24783.5	33.68	
16	937.68	5.16	35996.7	40.00	30%
17	1585.34	4.07	37215.4	41.35	
18	1035.44	3.68	36499.7	40.56	
19	1164.07	4.35	38391.6	42.66	
20	1183.07	4.1	37396	41.55	

- Například výpočet maximální tlakové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 400°C:

$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_o} = \frac{F_{max}}{b \cdot h} = \frac{33880.6}{30 \cdot 30} = 37.775\ (MPa)$$

Tab. 16 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 400°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Rel. deformace A_{max} [%]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mt}[MPa]	Úletové procento [%]
1	1168.73	4.86	33880.6	37.78	0%
2	1272.26	4.37	34129.3	37.92	
3	1208.75	4.37	35914.9	39.91	
4	1368.14	4.24	35808.6	39.79	
5	1469.88	3.90	36318.8	40.35	
6	1421.34	4.05	37158.5	41.29	10%
7	867.05	4.58	35312.6	38.51	
8	1205.81	4.71	34706.8	39.24	
9	1466.73	3.68	36977.8	35.62	
10	1401.84	4.89	36992.0	38.56	
11	1077.19	4.1	33445.7	37.16	20%
12	1277.35	4.28	33172.9	36.86	
13	1244.17	4.31	32733.7	36.37	
14	980.73	3.62	34901.1	38.45	
15	1038.12	3.91	34305.9	37.78	
16	1453.88	4.05	34294.2	37.33	30%
17	1299.32	5.79	34841.7	37.71	
18	1562.14	3.62	34629.1	37.48	
19	1269.21	4.41	34345.7	36.16	
20	1184.82	4.58	34728.2	36.59	

- Například výpočet maximální tlakové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 600°C:

$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_o} = \frac{F_{max}}{b \cdot h} = \frac{35457.8}{30 \cdot 30} = 39.39\ (MPa)$$

Tab. 17 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 600°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Rel. deformace A_{max} [%]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mt}[MPa]	Úletové procento (%)
1	1070.29	4.59	35457.8	39.4	0%
2	991.27	4.57	36818.3	44.72	
3	1288.84	4.31	36623.5	35.21	
4	1295.26	5.31	37916.5	40.91	
5	1399.6	4.75	35737.7	40.69	
6	1550.98	4.16	38097.3	42.33	10%
7	1478.09	4.34	40031.7	44.48	
8	1603.06	4.37	36605.8	40.67	
9	1293.14	4.16	37805.1	41.78	
10	1505.24	4.17	38111.5	42.35	
11	1170.26	4.43	32064.1	35.63	20%
12	1104.33	5.02	32436.1	36.04	
13	1246.4	4.75	35213.6	39.13	
14	1147.27	4.38	34955	38.84	
15	1416.95	3.91	33768.1	37.52	
16	1015.35	3.74	27005.8	30.09	30%
17	859.37	4.86	26317.6	29.24	
18	1378.19	3.32	29644.2	32.94	
19	1086.32	4.03	27339.2	30.43	
20	932.12	4.64	27873.1	30.97	

- Například výpočet maximální tlakové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 800°C:

$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_o} = \frac{F_{max}}{b \cdot h} = \frac{28244.6}{30 \cdot 30} = 31.98\ (MPa)$$

Tab. 18 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 800°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Rel. deformace A_{max} [%]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mt}[MPa]	Úletové procento [%]
1	1317.34	6.64	28244.6	31.98	0%
2	730.66	5.45	31734.3	51.87	
3	1181.19	4.56	31783.9	31.98	
4	504.97	4.75	30859.3	30.17	
5	1123.2	4.53	30855.8	35.26	
6	1411.27	4.83	35943.3	39.94	10%
7	1347.86	5.03	33130.2	36.81	
8	1562.98	3.64	34235.7	38.04	
9	1303.98	5.01	32453.6	39.65	
10	1511.67	4.4	35684.7	39.82	
11	940.06	4.18	22519.7	25.02	20%
12	1119.17	3.79	23784.5	26.43	
13	930.12	4.02	24230.9	26.92	
14	862.79	6.22	24571.1	27.3	
15	914.15	4.07	21754.5	24.17	
16	1125.72	3.84	21120.3	23.47	30%
17	774.16	4.13	21046.4	23.38	
18	907.01	3.89	21364.8	23.74	
19	984.81	3.34	22116.5	24.02	
20	744.06	4.28	22942.2	24.38	

- Například výpočet maximální tlakové napětí vzorky s obsahem 0% UP při 1000°C:

$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_o} = \frac{F_{max}}{b \cdot h} = \frac{33254.3}{30 \cdot 30} = 36.95\ (MPa)$$

Tab. 19 Vlastnosti vzorků při zkoušce v tlaku při teplotě 1000°C

Číslo vzorku [-]	Modul Přuznosti E [MPa]	Rel. deformace A_{max} [%]	Max. síly F_{max}[N]	Max. Nápětí R_{mt}[MPa]	Úletové procento [%]
1	1273.77	6.42	33254.3	36.95	0%
2	916.69	5.37	35372.9	39.30	
3	1038.08	6.00	35068.1	38.96	
4	884.55	6.62	34242.6	38.05	
5	1101.26	5.85	32914.1	36.57	
6	1292.89	5.11	40853.7	45.39	10%
7	1118.93	6.42	40573.8	45.08	
8	1118.47	5.99	40906.8	45.45	
9	1259.15	5.57	39160.1	43.51	
10	1425.83	5.38	43418.5	46.24	
11	1181.15	4.62	29399.8	32.67	20%
12	1304.9	3.01	28397.2	31.55	
13	1316.15	3.87	29821.5	33.13	
14	1280.09	4.66	29392.8	32.66	
15	1294.45	4.43	28602.8	31.78	
16	1056.67	3.69	22977.6	24.98	30%
17	816.57	4.56	21068.6	23.19	
18	894.08	3.71	22254.1	24.73	
19	848.6	4.74	21697.8	24.11	
20	1218.48	2.98	21219.5	23.58	