TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

VLIV VÝZTUŽE Z KRÁTKOVLÁKENNÝCH ODPADŮ S OBSAHEM PRYŽE NA VLASTNOSTI GEOPOLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

Bakalářská práce

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Studijní obor: 3911R018 – Materiály a technologie

Autor práce: **Giao Hoang Van**
Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.

Liberec 2014

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studijní rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	**Giao HOANG VAN**
studijní program	**B2341 Strojírenství**
obor	**3911R018 Materiály a technologie**
zaměření	**Materiálové inženýrství**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Vliv výztuže z krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže na vlastnosti geopolymerních kompozitů

Zásady pro vypracování:
(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proveďte literární rešerši na téma kompozitů na bázi geopolymerů, jejich výztuží a vlastností geopolymerů.
2. Navrhněte experiment pro ověření vlastností geopolymerních kompozitů s krátkovlákennou výztuží s obsahem pryže.
3. Experiment vyhodnoťte a proveďte modelování závislostí vlastností kompozitů na podílu vláken s obsahem pryže.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran

- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

1. XIEM,N.T. *Potenciální využití geopolymerních materiálů v oblasti zpracování odpadů.* Disertační práce, TU v Liberci 2011.
2. PRUD'HOMME,R.E.: *Defining existence domains in geopolymers through their physicochemical properties*. Applied Clay Science. Elsevier 2013

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.
Konzultant bakalářské práce: Ing. Vladimír Kovačič
Ing. Trinh Thi Linh

L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.
děkan

V Liberci dne 11.03.2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ) .Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto pří- padě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vyna- ložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych na poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce: panu prof. Ing. Petru Loudovi, CSc., Ing. Vladimíru Kovačičovi a konzultantovi Ing. Trinh Thi Linh za vedení, cenné rady a podnětné připomínky při realizaci mé bakalářské práce pomoc při řešení experimentálních problémů a vytvoření velmi dobré pracovní atmosféry. Také bych chtěl poděkovat mému příteli a mé rodině za podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem výztuže z krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže na vlastnosti geopolymerních kompozitů. Práce je rozdělena do tří částí: První je teoretická část, která obsahuje literární rešerši na téma kompozitů na bázi geopolymerů, jejich výztuží a vlastnostmi těchto kompozitů. Druhá část je experimentální, kde je navržen experiment pro ověření vlastností geopolymerních kompozitů s krátkovlákennou výztuží s obsahem pryže. Poslední částí práce je experiment s vyhodnocením a provedení modelování závislosti vlastností kompozitů na podílu krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the influence of reinforcement short fibres containing waste rubber on the properties of geopolymer composites. The work is divided into three parts: The first part is theoretical and contains the literature review on the topic-based geopolymer composites, the reinforcements and the properties of these composites. The second part is experimental, which is designed experiment to verify the properties of geopolymer composites reinforced with short fibres containing rubber. The last part is the experiment with the evaluation and implementation of modeling of composites properties, depending on the proportion of short fibres containing waste rubber.

KLÍČOVÁ SLOVA

Krátká vlákna, pryž, geopolymer, kompozit, pojiva, mechanické vlastnosti

KEYWORDS

Short-fibres, rubber, geopolymer, composit, binders, mechanical properties

Rozsah práce:

Počet stran : 51

Počet obrázků : 33

Počet tabulek : 16

Počet grafů : 16

Počet příloh : 0

OBSAH

1. ÚVOD 8
2. TEORETICKÁ ČÁST 8
2.1 KOMPOZIT 8
2.1.1 OBECNÉ DEFINICE KOMPOZITU (DEFINICE MIL – NASA USA) 8
2.1.2 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ 8
2.1.3 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ KOMPOZITŮ 11
2.1.4 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY KOMPOZITŮ 11
2.2 MATRICE A POJIVA 17
2.2.1 ROZDĚLENÍ MATRIC (POJIV) 17
2.3 PLNIVA 17
2.3.1 POJEM PLNIVO 17
2.3.2 ROZDĚLENÍ VÝZTUŽE A VLASTNOSTI VÝZTUŽE 18
2.3.3 VLIVY PLNIVA NA VLASTNOSTI KOMPOZITŮ 19
2.4 GEOPOLYMERY 23
2.4.1 OBECNÉ VLASTNOSTI GEOPOLYMERNÍCH KOMPOZITŮ 23
2.4.2 MECHANISMUS ALKALICKÉ AKTIVACE A STRUKTURA GEOPOLYMERU 24
2.4.3 APLIKACE PRO GEOPOLYMERY 25
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 25
3.1 VOLBA SLOŽENÍ VZORKŮ 25
3.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH SMĚSÍ 26
3.5 Elektrická pec 30
3.6 Měření vzorků 31
3.7 výsledky a vyhodnocení 35
3.8 vyhodnocení 50
4. ZÁVĚR 50

Seznam symbolů a zkratek:

PE	Polyethylen	
PA	Polyamid	
l, L	Konečná délka	[mm]
l_o, L_o	Počáteční délka	[mm]
h	Výška vzorku	[mm]
ε	Relativní deformace	[-]
σ	Napětí	[N/mm^2], [MPa]
D, d	Průměr vzorku	[mm]
R, r	poloměr	[mm]
E	Youngův modul pružnosti.	[GPa]
F	Síla	[N]
S	Průřez	[mm^2]
T	Teplota	[^{o}C]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
ρ	Hustota.	[g/cm^3]
m	Hmotnost.	[g]
Wo	Modul průřezu	[m^3]
Mo	ohybový moment	[N.m]
δ_{po}	pevnost v ohybu	[MPa]
δ_d	poměrné stlačení	[%]
δ_{pd}	pevnosti materiálu v tlaku	[MPa]

1. ÚVOD

V současnosti jsou kompozitní materiály na bázi geopolymerů jedním z perspektivních a rychle rostoucích odvětví. Kompozitní materiály na bázi geopolymerů jsou používány všude tam, kde je potřeba vysoké tepelné odolnosti, snížení spotřeby vody u stavebních směsí a speciálních vlastností (např. využití barevnosti a struktury při opravách památek). Geopolymerní matrice zvyšuje svou pevnost během dalšího zrání a dosahuje pevnosti srovnatelné nebo vyšší, než klasický beton. V neposlední řadě se jedná o materiál, jehož výroba je šetrná k životnímu prostředí, protože se při ní uvolňuje pouze malé množství CO2. Do geopolymerů je možné rovněž zapracovávat odpady, kterých se dnes na světě produkuje množství v řádu milionů tun. Tyto odpady, včetně nebezpečných mohou být použity jako plnivo do geopolymerních kompozitů.

Cílem této bakalářské práce je ověřit možnosti zapracování recyklátů z pneumatik. Tento materiál obsahuje krátká PA, popř. PES vlákna se zbytky pryže. Zapracování těchto odpadů do geopolymerní matrice vzniká nový materiál, který je nutno ověřit po stránce mechanických vlastností.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 KOMPOZIT

2.1.1 OBECNÉ DEFINICE KOMPOZITU (DEFINICE MIL – NASA USA)

Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami existuje rozhraní. [1]

Kompozitní materiály je možno posuzovat podle více měřítek:

- Jedná se o vícefázový materiál, tvořící pevnou látku. Takovéto materiály se vyskytují v přírodě (např. dřevo) nebo jako produkt lidské činnosti (litina, beton)
- fáze si ponechávají své vlastnosti
- fáze musí být v objemu rovnoměrně rozděleny, což se však nevyžaduje vždy.
- fáze se musí vyskytovat odděleně a kompozit se vytvoří jejich kombinací. [2]

Kompozitní materiály s vlákennou výztuží se vyznačují pevností a vysokým měrným modulem. Vlastnosti kompozitů vyztužených vlákny závisí na distribuci a orientaci, jakož i velikosti a tvaru vláken. K výrobě vlákny vyztužených kompozitů se používají výztuže ze skelných vláken, uhlíkových vláken, polymerních a kovových vláken, ve tvaru krátkých vláken, kontinuálních vláken, tkanin a pletenin.

Aby byl vícefázový materiál chápán, jako kompozit musí být splněny následující podmínky:

- podíl výztuže musí být v kompozitu vyšší 5%
- mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti výztuže a matrice se liší.
- kompozit musí být připraven smícháním složek. [3]

2.1.2 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Kompozitní materiály je možné dělit z několika hledisek

- **Podle materiálu výztuže**

Kovy (W, Fe, Cr, Mo, Ti, Ni a jejich slitiny)

Nekovy - anorganické materiály - keramické materiály
(Al_2O_3, ZrO_2, SiC, TiC, TiB atd.)
- skla (E, S)
- čedič

- organické materiály - polymery (polypropylén, aramidová vlákna – Kevlar, polyamidová vlákna – Nylon atd.) [4]

- **Podle materiálu matrice**

Kovy (Al, Ag, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni atd. a jejich slitiny)

Nekovy - anorganické materiály - keramické materiály
(Al_2O_3, SiC, SiO_2, TiC atd.)
- skla (E, S)

- Organické materiály - polymery (polyestery, vinylestery, aromatické polymery, atd.) [4]

Materiál vláken a materiál matrice je možné kombinovat nejrůznějším způsobem, kompozit může být typu

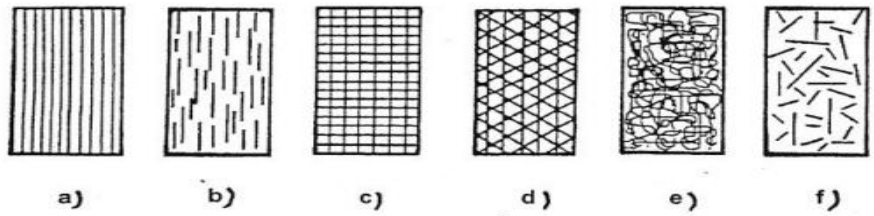
- kov – kov,
- polymer – polymer,
- keramika – keramika,
- keramika – kov ,
- keramika – polymer.

Samozřejmým předpokladem je však dobrá mezifázová adhese a vhodně deformačně napěťové vlastnosti. Jako zajímavost lze uvést, že existují kompozity, u kterých je materiál výztuže stejný, pouze v jiné formě. Jako příklad je zde možné uvést žárupevný materiál na bázi SiO_2 , kdy výztuž je ve formě tenkých vláken matrice ve formě objemového materiálu.

- **Podle geometrického tvaru výztuže (nosné části)**

- Vláknové
- Částicové
- Skeletové

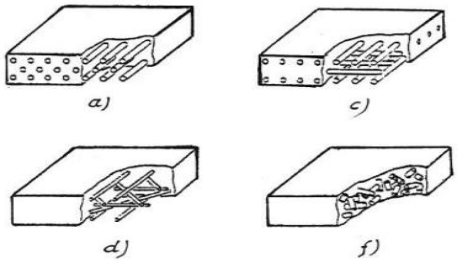
Charakteristické typy vláknových kompozitů jsou graficky znázorněny na následujícím obrázku (obr.1)



Obr. 1 typy vláknových kompozitů [5]

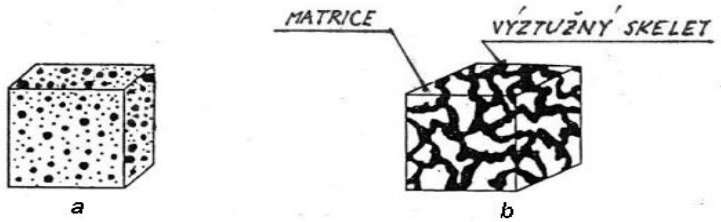
Označení kompozitů vyplývá z tvaru a směru vlákenné výztuže :

- Jednosměrná dlouhá vlákna
- Jednosměrná krátká vlákna
- Dvousměrné vyztužení
- Vícesměrné vyztužení
- Náhodná orientace vláken
- Náhodná orientace krátkých vláken



Obr.2 Prostorové uspořádání vybraných vláknových kompozitů [4]

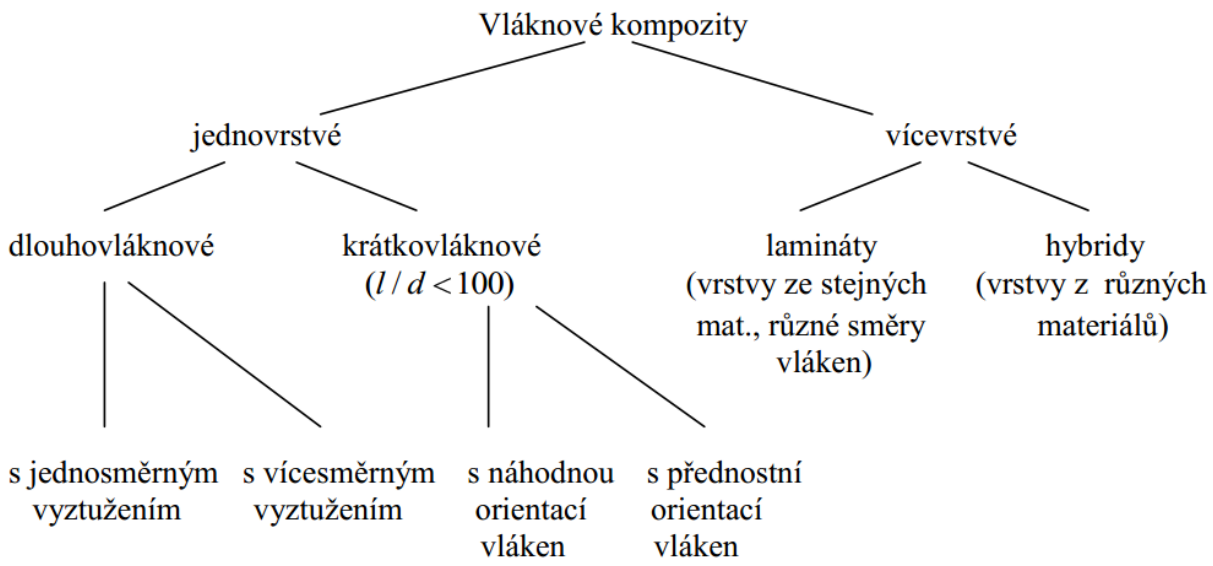
U částicových kompozitních materiálů (obr.3a) jsou vyztužující částice dispergovány v matrici a omezují rozvoj plastických deformací, čímž zvyšují mez kluzu, mez pevnosti a tvrdost a samozřejmě ovlivňují celou dalších vlastností např. Tepelnou a elektrickou vodivost.
Skeletový kompozitní material (obr.3b) je tvořen pórovitou matricí prostoupenou souvislým nosným skeletem.



Obr. 3 částicový a skeletový kompozitní materiál [4]

- **Podle použití** - žárupevné, žáruvzdoné, korozivzdorné, aplikace v letectví, strojírenských výrobních technologií, stavebních atd.

V dalších kapitolách se budeme zabývat především vláknovými konstrukčními kompozitními materiály. Podrobnější klasifikace těchto kompozit z hlediska geometrického uspořádání vláken je uvedena na obr. 4.



Obr. 4 klasifikace vláknových kompozitů z geometrického pohledu [4]

2.1.3 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ KOMPOZITŮ

Kompozitní materiály představují jedno z nejúčinnějších využití potenciálních možností hmoty, a tím maximalizaci energetických úspor nejen z hlediska materiálu, ale i z hlediska využívání konstrukce. [6]

O největší pokrok v konstrukčním využití kompozitů se zasloužil letecký, kosmický, automobilový průmysl a stavebnictví [6]

Příklady aplikací:

- Stavebnictví (pláště budov, okenní rámy, pracovní a obslužné plošiny, stavby pro rozvod energie, nástavby na výškových budovách)
- Nákladní doprava (kontejnery, nákladní návěsy)
- Výroba osobních automobilů
- Letecký a kosmický průmysl
- Výroba vojenské techniky
- Rozvod elektrické energie (rozvaděče, izolátory, sloupy elektrického osvětlení, atd.)
- Výroba sportovních potřeb (golfové hole, hokejky)
- Oblast reklamy atd. [7]

2.1.4 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY KOMPOZITŮ

Kompozity jsou vždy složeny z několika jasně oddělených fází, jsou tedy ve své podstatě nehomogenní, jako technický materiál je však nutno jej považovat za homogenní.

Proto v kompozitu zavádíme fiktivní hodnoty napětí a relativní deformace. Tyto hodnoty jsou různé od skutečných hodnot v matrici i výztuži, ale vzájemně souvisí.

Většina uspořádání kompozitních materiálů je taková, že způsobuje jejich anizotropii. Někdy je možné anizotropii vědomě výhodně využít. S anizotropií kompozitů je možné se vyrovnat vhodným uspořádáním. [1]

Mechanické charakteristiky a mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti jsou definovány jako odezva materiálu na jeho mechanické namáhání. Tato odezva se projevuje jako vzájemná závislost napětí σ (Pa) a deformace ε (- , %). Pro stanovení těchto vlastností se používají zejména tyto zkoušky:

a) zkoušky pevnosti v tahu
b) zkoušky pevnosti v tlaku
c) zkoušky pevnosti v ohybu
d) zkoušky pevnosti v rázu
e) zkoušky tření
f) dynamické ohybové zkoušky a další

Pevnost v tahu

Zkoušky pevnosti v tahu jsou nejběžnějším testem pro určení mechanických vlastnosti kompozitních materiálů. Jejím účelem je stanovení pevnosti, deformačních charakteristik, jako je tažnost a modul pružnosti. Zkušební těleso je namáháno v ose tahem. Zkoušku lze provádět při různých podmínkách deformací a teplot.

Výsledkem zkoušky je kromě hodnot pevnosti a tažnosti rovněž tahová křivka, která znázorňuje průběh závislosti napětí ve vzorku a jeho deformací (prodloužení). Tato závislost je presentována křivkou napětí – deformace (obr. 5)

Na ose x je znázorněna deformace, na ose y se nachází síla, která je odezvou namáhaného materiálu na prodloužení. Měřená síla je dodatečně přepočítána na napětí σ (Pa), popř. je napětí udáváno přímo po zadání příčných rozměrů vzorku.

Pevnost materiálu je vyjadřována mezí pevnosti σ_p (Pa). Mez pevnosti je maximální hodnota normálového napětí σ_n, při které ještě není porušena celistvost materiálu. Vypočítá se jako podíl deformující síly F (N) a průřezu kolmého řezu S (m^2), na který tato síla působí:

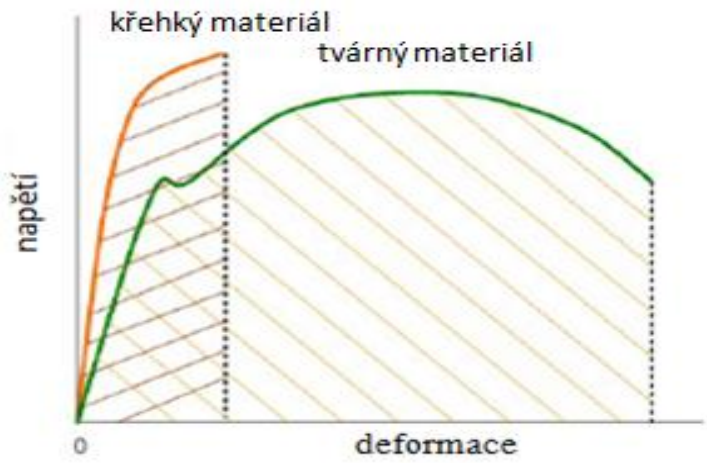
$$\sigma_n = F/S \quad \text{(Pa)} \qquad (1)$$

nebo jako součin relativní deformace ε a materiálové konstanty E, tj. modulu pružnosti:

$$\sigma_n = \varepsilon E. \quad \text{(Pa)} \qquad (2)$$

Deformace se udává jako relativní ε (-), resp. (%):

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (-) \qquad (3)$$



Obr. 5 závislost napětí σ(MPa) a deformace ε (-) pro křehké (oranžové) a tvárné materiály (zeleně) [8]

Pevnost v tlaku

Při zkoušce pevnosti v tlaku působí síla rovněž v ose zkušebního tělesa, ale má opačný smysl než při zkoušce tahem. Tato zkouška se provádí hlavně u křehkých materiálů namáhaných na tlak. U houževnatého a tvárného materiálu nemá tato zkouška velký význam a většinou se provádí jako zkouška technologická.

Křehké materiály se při zkoušce poruší náhle, téměř bez předchozí deformace a to v rovinách, kde tangenciální napětí dosáhne maximální hodnoty, tj. pod úhlem 45 stupňů. V tomto případě odpovídá smluvní napětí při lomu (porušení) pevnosti materiálu v tlaku δ_{pd}:

$$\delta_{pd} = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad \text{(Pa)} \qquad (4)$$

Houževnaté, tvárné materiály vykazují oproti křehkým materiálům určité deformace, takže je možné stanovit z průběhu pracovního diagramu smluvní mez kluzu v tlaku δ_{kd} (Pa)

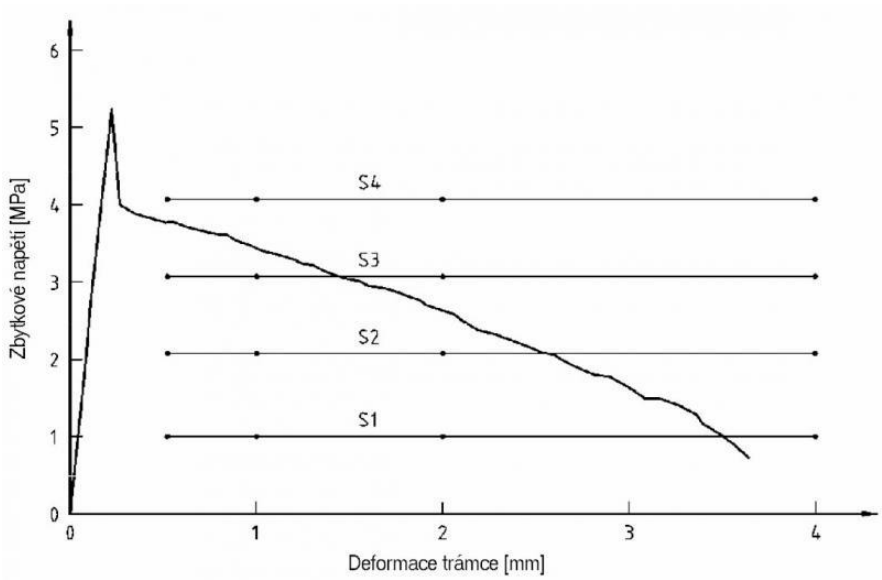
$$\delta_{kd} = \frac{F_{kd}}{S_0} \quad \text{(Pa)} \qquad (5)$$

U tvárných materiálů se v případě deformací určuje poměrné stlačení (zkrácení - δ_d), tj. zmenšení výšky zkušebního tělesa h vzhledem k původní výšce h_o :

$$\delta_d = \frac{h_0 - h}{h_0}.100 \quad (\%) \qquad (6)$$

Obdobně lze stanovit příčné rozšíření průřezu S vzhledem k původnímu So :

$$\psi_d = \frac{S - S_0}{S_0}.100 \quad (\%) \qquad (7)$$



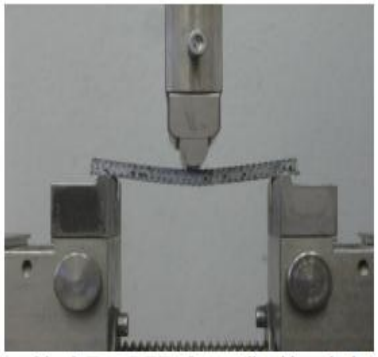
Obr. 6 Křivka pevnosti v tlaku křehkého materiálu (beton)

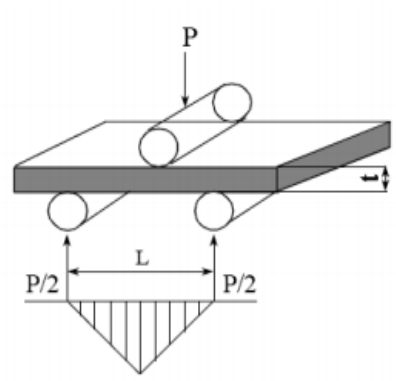
Pevnost v ohybu

Zkoušky pevnosti v ohybu se liší uspořádáním. Ve strojnické praxi a přeneseně v praxi zkoušení kompozitů jsou prováděny zkoušky tříbodovým a čtyřbodovým ohybem.

Tříbodový ohyb

Zkouška tříbodovým ohybem poskytuje důležité konstrukční podklady pro kompozitní materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. Jsou to nejen nosníky, ale např. samonosné střešní konstrukce z laminátů, obkladový materiál ve stavebnictví, který se prohýbá svou vlastní vahou, střešní krytiny apod. Ohybová zkouška také umožňuje stanovit modul pružnosti *E* u materiálů, u kterých to nelze dostatečně přesně určit z tahových nebo tlakových zkoušek. [9]
Princip a zařízení na měření tříbodého ohybu je na obr. 7.





Obr.7 schéma tříbodového zatěžování se znázorněním rozložení ohybového momentu [9]

Zkouškou zjistíme pevnost v ohybu (smluvní napětí na mezi pevnosti) δ_{po}

$$\delta_{po} = \frac{M_{0\max}}{W_0} \qquad \text{(Pa)} \qquad (8)$$

kde Mo $_{max}$ je ohybový moment při maximální zatěžující síle F_{max}:

$$M_{0\max} = \frac{F_{\max}.L}{4} \qquad \text{(N.m)} \qquad (9)$$

kde L je vzdálenost podpor

W_o je modul průřezu (m^3)

Modul průřezu Wo má hodnoty:

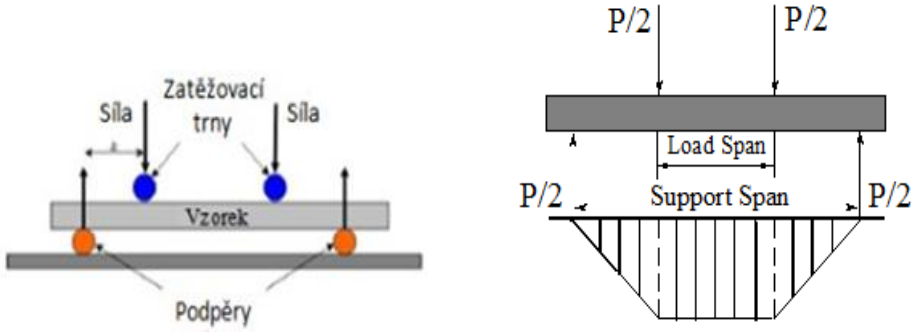
pro kruhový průřez: $$W_0 = \frac{\pi.d^3}{32} \cong \frac{1}{10} d^3 \qquad (m^3) \qquad (10)$$

pro čtvercový průřez: $$W_0 = \frac{a^3}{6} \qquad (m^3) \qquad (11)$$

pro obdélníkový průřez: $$W_0 = \frac{bh^2}{6} \qquad (m^3) \qquad (12)$$

Čtyřbodový ohyb

Při zkoušce čtyřbodovým ohybem je zkušební těleso prohýbáno dvěma trny působícími v jedné polovině vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou nižší než u tříbodového systému a jak ukazuje obr. 8, je i jiné rozložení ohybového momentu. Jeho rovnoměrnější působení v celé zkušebního tělesa vedlo k tomu, že se modul pružnosti stanovuje hlavně tímto způsobem.



Obr. 8 Schéma čtyřbodového zatěžování se znázoměním rozložení ohybového momentu. [9]

Kompozitní materiály se vyznačují následujícími vlastnostmi:

Nízká specifická hmotnost (až 20% hmotnosti oceli)

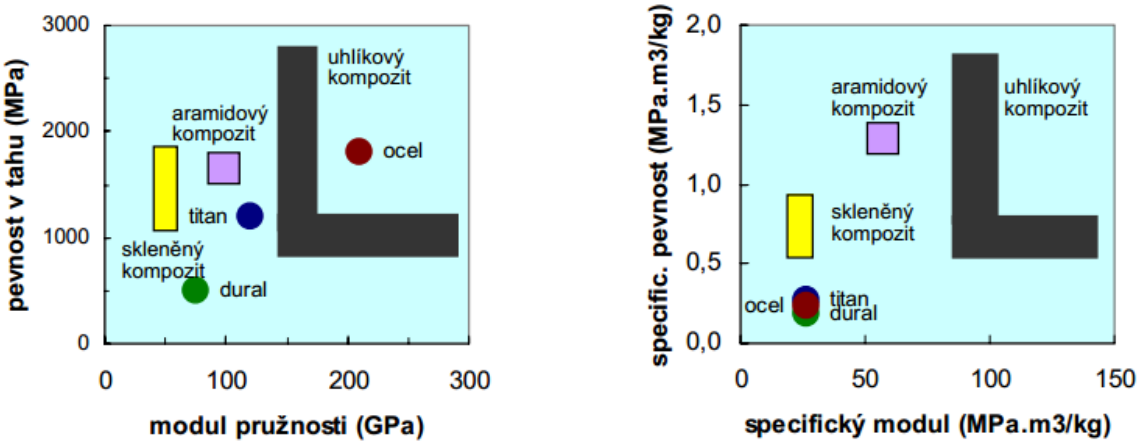
Vysoká pevnost a tuhost

Téměř nulová tepelná roztažnost

Vysoká korozní odolnost

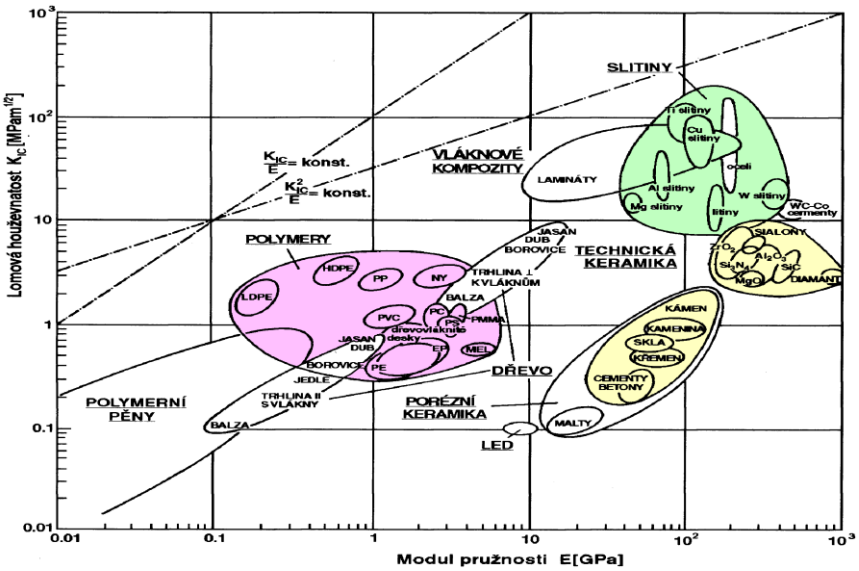
Nízká hodnota momentu setrvačnosti

Na obrázku 9 je znázorněn vztah mezi pevností a tuhostí (modulem pružnosti) u tradičních kovových materiálů a kompozitů. Oblasti vlastnostní kompozitů jsou vzhledem ke kovům širší, protože lze kombinovat vlákna o různých vlastnostech, např. u uhlíkových kompozitů lze dle potřeby použít buď vlákna o vysokém modulu pružnosti, nebo vlákna s vysokou pevností. [10]



Obr. 9 porovnání mechanických vlastností materiálů [10]

Na obrázku 10 jsou znázorněny oblasti modulu pružnosti E (GPa) a lomové houževnatosti K_{IC} (MPa.m$^{1/2}$). Z obrázku je patrné, že kompozity dosahují vysokých hodnot obou parametrů.



Obr.10 porovnání mechanických vlastností materiálů [11]

2.2 MATRICE A POJIVA

2.2.1 ROZDĚLENÍ MATRIC (POJIV)

Podle typu pojiva dělíme na dvou základních skupin:

a) organické matrice (skupina směsí s organickým pojivem)
b) anorganické matrice (skupina směsí anorganickým pojivem).

a) Skupina směsí s organickým pojivem

Dominantním materiálem mezi organickým pojivy jsou epoxidové pryskyřice, s výhodou lze však využít nové materiály, jako nenasycené polyesterové pryskyřice, polymetylmetakrylát (PMMA), tvrdé silikonové pryskyřice, tvrdé silikonové pryskyřice a aromatické polymer y (PEEK).

- **Výhody**

Výhodou je dobrá adheze k podkladu, dobrá odolnost vůči kyselému prostředí, krátká doba potřebná k dosažení konečné pevnosti, atd. [12]

- **Nevýhody**

U těchto směsí je optimální teplota vytvrzovací reakce kolem 15°C. Vytvrzování je zpomalováno, případně zastaveno přítomností vhkosti. To hraje roli například při výběru plniva, kdy nelze použít vlhký přírodní písek. To neplatí pro epoxidy ve vodných emulzích. Běžné epoxidové pryskyřice jsou náchylné k degradaci UV zářením. V neposlední řadě je třeba připomenout nutnost přesného dodržení technologie přípravy směsí a vyšší cenu oproti běžným anorganickým pojivům [12]

b) Skupina směsí s anorganickým pojivem

Mezi anorganická pojiva patří především pojiva hydraulická: cement, hydraulická vápna, románský cement a v menší míře i sádra. U směsí pojených bílým cementem byl optimální poměr stanoven na 1:4 (pojivo: plnivo). Zde hraje značnou roli i množství použité záměsové vody. Optimální množství se pohybuje kolem 9 hm%. [12]. Poměrně nové směsi jsou geopolymery, které jsou definovány jako alkalicky aktivované aluminosilikáty.

- **Výhody**

Přitomnost vody v systému, zpracovatelnost i při teplotách blížících se 0°C. Anorganické materiály jsou méně odolné kyselému prostředí [12]

- **Nevýhody**

Přitomnost velkého množství alkálií a s tím související nebezpečí výkvětů vodorozpustných solí [12]

2.3 PLNIVA

2.3.1 POJEM PLNIVO

Plniva (vyztužující fáze) jsou přísady, které výrazným způsobem mohou ovlivnit výsledné vlastnosti směsi a výrobku. [13]

2.3.2 ROZDĚLENÍ VÝZTUŽE A VLASTNOSTI VÝZTUŽE

Výztuže mohou být anorganické nebo organické povahy, může to být jeden prvek, přírodní materiál, směs různých materiálů (odpad a recykláty) nebo materiál specifického složení. Forma částic může být nepravidelného tvaru, kulovitá, prostorová, deskovitá, vločková, vláknová nebo směsí různých tvarů. Velikost částic bývá od několika nanometrů po desítky milimetrů. [14]

Ve většině případů se jedná o tuhé látky používané ve formě prášku (základním tvarem je koule), tuhých vláken (základním tvarem je válec), nebo granulí a můžeme jimi plnit kaučuky, termoplasty i reaktoplasty. [13]

➢ ROZDĚLENÍ PLNIV

Podle geometrického tvaru rozdělujeme vyztužující fáze na:

- Částicové
- Vláknové

- **Částicové (partikulární) výztuže**

Jeden rozměr útvarů výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Částicové (partikulární) výztuže jsou prášky s částicemi různých tvarů (kulovité, jehlancovité, destičkovité, tyčinkovité i nepravidelné.) a velikostí. Většinou se jako částicová výztuž používají prášky anorganických sloučenin typu oxidů, nitridů, boridů a křemičitanů (kaolín, slída).

- *Výhody*

Výhodami vedoucími k použití anorganického plniva jsou podobnost plniva s přírodním materiálem, dosažení podobnosti některých fyzikálních a mechanických vlastností s přírodním materiálem.

- *Nevýhody*

Nevýhodou je složitost přípravy tohoto materiálu spočívající v drcení, mletí a následného prosívání na požadovanou frakci. Výsledný vzhled produktu je často více ovlivněn vlastnostmi pojiva, které často zastírají autentický charakter plniva.

V případě, že z nějakého důvodu nelze použít běžné plnivo, např. z důvodů vysokého statického zatížení originálu, lze použít lehčená plniva, mezi které patří především skleněné, keramické nebo polymerní mikrokuličky. Velmi příznivou vlastností je jejich snadná mísitelnost s polymerními pryskyřicemi i při velmi nízkém podílu pojiva ve směsi. Oproti této výhodě vystupuje v případě výhradního použítí lehčených plniv esteticky neuspokojivý vzhled povrchu.[13]

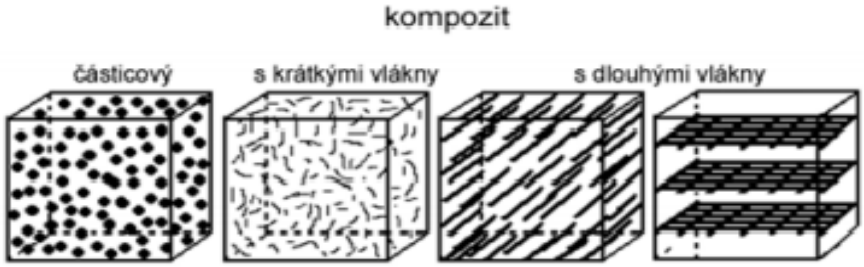
- **Vláknové výztuže**

Výztuž je v jednom směru výrazně rozměrnější, vláknové výztuže bývají vlákna kovová, polymerní, keramická, skleněná nebo vláknové monokrystaly (whiskery). Vlákna jsou podstatně pevnější než stejné kompaktní materiály a závisí především na jeho průřezu. Čím menší průřez, tím větší pevnost vlákna. Ve většině případů mají kruhový průřez o průměru od 10 μm do 1 mm. [5]

U vláknových kompozitů jsou využívány vysoké mechanické vlastnosti vláken ve směru jejich osy: vysoká pevnost a modul pružnosti. Vlákna mají mnohem vyšší mechanické vlastnosti v porovnání se stejným, ale masivním materiálem. Příčinou je pokles velikosti strukturních defektů ve vláknech, orientace těchto defektů ve směru vláken a rovněž snížení celkové pravděpodobnosti výskytu defektů. [13]

Na obr. 11 jsou znázorněny kompozity s různými výztužemi (plnivy).

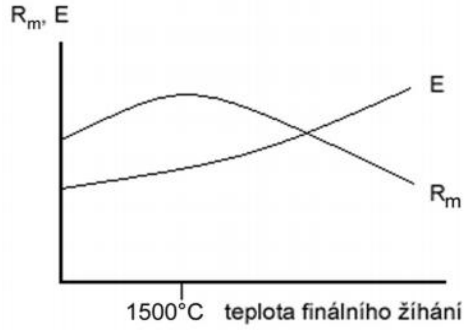
Kompozity s krátkými vlákny - délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí daného výrobku. [13]
Kompozity s dlouhými vlákny - délka vláken srovnatelná s velikostí daného výrobku. [15]
Kompozity s různým uspořádáním kontinuálních vláken, např. v jednom směru nebo jsou vzájemně spletena do rohoží a tvoří laminát. [15]



Obr. 11 Rozdělení kompozitních materiálů. [15]

- **Základní požadavky na plniva (vyztužující fáze)**

Základním požadavkem na plniva (vyztužující fáze) je její vysoká pevnost a modul pružnosti (řádově vyšší než modul matrice) a malá deformace v lomu (1-2%) při vysokém podílu pružné deformace. Výztuž přenáší převážnou část vnějšího zatížení.

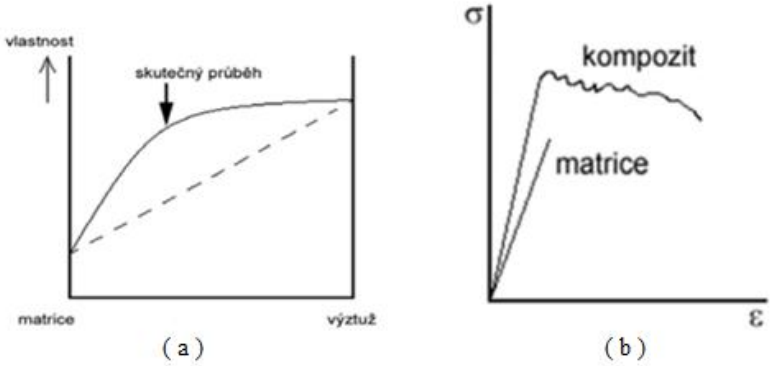


Obr. 12 Závislost mechanických vlastností uhlíkových vláken na teplotě žíhání. [15]
E – modul pružnosti (MPa), Rm – pevnost (GPa)

2.3.3 VLIVY PLNIVA NA VLASTNOSTI KOMPOZITŮ

Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů jsou závislé na mechanických vlastnostech matrice a výztuže: typy plniva (nejčastěji se používá plnivo suché), velikost a distribuce výztuže, tvaru výztuže, soudržnost matrice a výztuže, koncentraci výztuže (objemový podíl) a orientaci výztuže (uspořádání výztuže). [16]
Velikost a distribuce částic se řídí texturou kompozitu a společně s objemovým podílem určují také mezifázový povrch, který má důležitou roli při určování rozsahu vzájemného působení mezi vyztužením a matricí na zpevnění. Koncentrace se udává se v objemovém nebo hmotnostním podílu a popisuje objem výztuže. Patří mezi nejvýznamnější parametry, které ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu. Izotropii systému ovlivňuje orientace plniva. Jsou-li vyztužující částice tvarově a rozměrově přibližně ve všech směrech stejné (prášky), chová se kompozit v podstatě jako izotropní

materiál a jeho vlastnosti jsou nezávislé na směru. Naopak kompozity s vláknovou výztuží vykazují anizotropii vlastností. [5]



Obr. 13 Vlivy plniva na vlastnosti kompozitů. [15]
a) Synergické chování složek kompozitu.
b) Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice a křehkých keramických vláken.

a) Vlivy plniva na obecné vlastnosti kompozitů

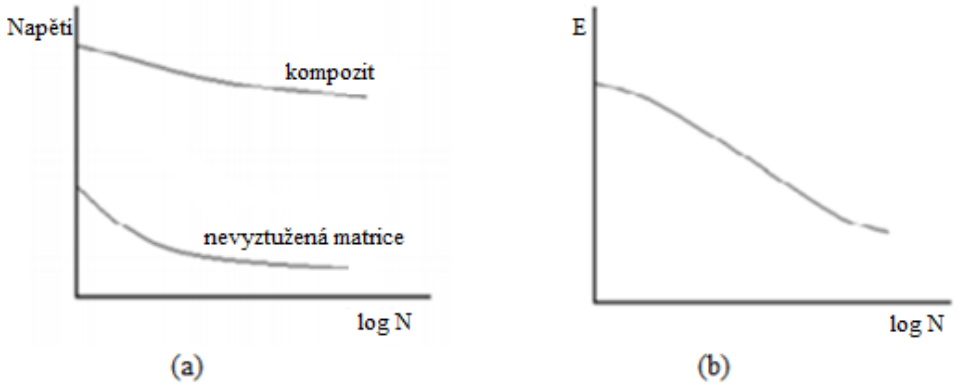
Nejdříve se plniva začala přidávat do kompozitu z důvodu snížení ceny. Plniva byla levná, proto i výsledný materiál mohl být výrazně levnější. Posléze snížení nákladů nebylo jediným důvodem pro použití plniv ale skutečnost, že plnivy lze výrazně ovlivnit vlastnosti kompozitu. Přidáním plniv do kompozitu lze snížit jejich hustotu, zlepšit mechanické vlastnosti výrobku (např. pevnost, houževnatost, odolnost proti oděru), ovlivnit optické, povrchové, elektrické vlastnosti, jeho odolnost vůči teplu, ohni, korozi, stárnutí. Je možno s nimi snížit smrštitelnost tvaru a regulovat permeabilitu výrobků (folií). Mnohá plniva se používají k ovlivnění chemické reaktivity, materiálové životnosti nebo ke zvýšení účinnosti aditiv.

Stručně řečeno plnivo již neslouží jen ke snížení nákladů ale lze jimi měnit prakticky všechny vlastnosti materiálu se současným vlivem na výrobu, design a použití výrobků. Použitím plniv se značně rozšířila základna aplikaci plastů.

b) Vlivy plniva na vybrané mechanické vlastnosti kompozitů

- **Únava kompozitů**

U kompozitů probíhá při únavovém poškození řada procesů – např. vznik lokálních mikrotrhlin v matrici nebo na rozhraní matrice a výztuže (delaminace), přetržení vláken vedoucí k porušení kontaktu mezi matricí a výztuhou, změny směru šíření trhlin podél vláken atd. Důležité však je, že tyto procesy neprobíhají na jednom místě, nýbrž difúzně v celém objemu kompozitu. Jejich průběh lze sledovat např. měřením změn modulu pružnosti E během cyklického namáhání N. [15]



Obr. 14 Únava kompozitů a modul pružnosti E. [15]
a) Porovnání únavových křivek nevyztuženého materiálu a vyztuženého materiálu - vláknového kompozitu.
b) Změny modulu pružnosti E vláknového kompozitu během únavového procesu.

- **Modul pružnosti E a pevnost kompozitů**

Výsledné elastické chování kompozitů závisí na tvaru výztuže a jejím rozložení v objemu kompozitu. Kromě mechanických vlastností matrice a vláken jsou vlastnosti výsledného kompozitu určeny rovněž objemovým podílem vláken a jejich uspořádáním. Pokud jsou vlákna uspořádána v jednom směru, pak nejvyšších mechanických vlastností dosahuje kompozit právě ve směru vláken. Požadujeme-li vysokou pevnost a tuhost ve dvou směrech, pak používáme struktury vyztužené vrstvami spletených vláken. Jsou-li žádoucí izotropní vlastnosti, pak lze aplikovat výztuž složenou z náhodně uspořádaných krátkých vláken. [16]

- *Kompozity s dlouhými vlákny*

Známe-li moduly pružnosti matrice a vláken (E_M , E_V), pak pro modul pružnosti E_K kompozitu s dlouhými (kontinuálními) vlákny uspořádanými v jednom směru platí směšovací pravidlo:

$$E_K = E_V \cdot V_V + E_M \cdot V_M \qquad (13)$$

kde: objemový podíl vláken $V_V = 1 - V_M$, V_M je objemový podíl matrice a

E_K je modul pružnosti ve směru shodném se směrem vláken. Vztah platí pouze pro ideálně dokonalou adhezi mezi matricí a vlákny a předpokládá se stejná deformace matrice a vláken. [13]

Druhým základním parametrem kompozitů je jejich pevnost R_{mK} (MPa). U kompozitů s kovovými matricemi, které jsou schopny poměrně velkých plastických deformací, se při lomu zpravidla porušují jako první vlákna. Napětí ve vláknech v okamžiku lomu je tedy rovno pevnosti vláken R_{mV}, napětí v matrici je však nižší než pevnost matrice R_{mM}. Důvodem je, že deformace matrice je shodná s deformací vláken i kompozitu, tj. je výrazně nižší než mezní deformace matrice. Napětí v matrici v okamžiku lomu kompozitu označme R_M a lze ho definovat jako napětí v matrici odpovídající kritické deformaci vláken. [13]

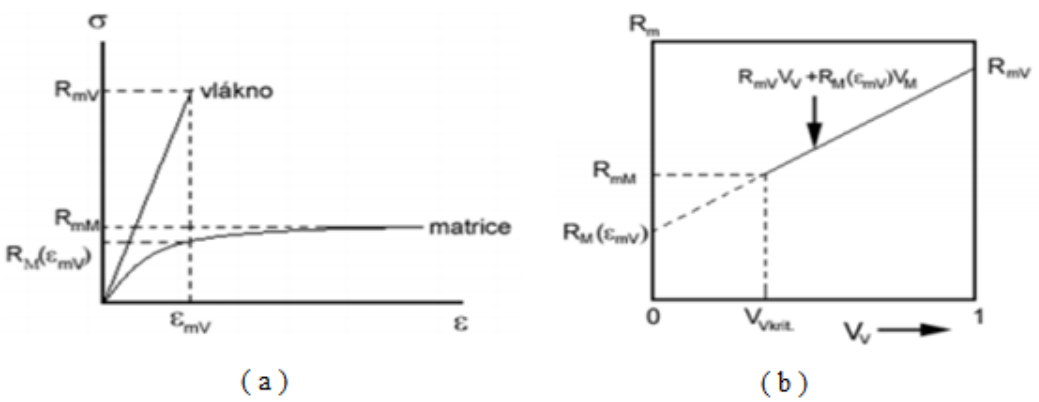
Pro pevnost kompozitu s dlouhými vlákny platí ve směru vláken směšovací pravidlo podobné vztahu (1):

$$R_{mK} = R_{mV} \cdot V_V + R_M \cdot V_M \qquad (14)$$

Na obr. 15, vidíme, že k tomu, aby došlo ke zvýšení pevnosti kompozitu oproti samotné matrici, je třeba určitého minimálního podílu vláken. Pokud je objemový podíl vláken příliš nízký, je jejich působení neúčinné, neboť při zatěžování dosáhne kompozit velmi rychle kritické deformace vláken. V takovém případě je pevnost kompozitu dána pouze pevností matrice. Minimální objemový podíl vláken vedoucí ke zpevnění matrice se nazývá kritický objemový podíl vláken V_{Vkrit} a lze ho vypočítat tak, že pravou stranu rovnice (2) položíme rovnu pevnosti matrice R_{mM}. Pro kritický objemový podíl vláken tedy platí:
Pro kritický objemový podíl vláken tedy platí:

$$V_{Vkrit} = \frac{R_{mM} - R_M}{R_{mV} - R_M} \tag{15}$$

Ze vztahu (3) plyne, že kritický objemový podíl vláken je tím větší, čím je vyšší pevnost matrice a čím je nižší pevnost vláken. [13]



Obr. 15 Vliv směšovacího podílu vláken a matrice na pevnost kompozitu

a) Tahové diagramy vlákna a kovové matrice, význam R_M (ε_{mV}). [15]

b) Závislost pevnosti kompozitu na objemovém podílu vláken V_V, význam V_{Vkrit}. [15]

- *Kompozity s krátkými vlákny*

U kompozitů s krátkými vlákny jsou tato vlákna často uspořádána náhodně. Jako hrubý odhad modulu pružnosti pro takové makroskopicky isotropní prostředí můžeme užít aritmetického průměru. [15]

$$E_K = \frac{E_{K1} + E_{K2}}{2} \tag{16}$$

U kompozitů s jednosměrně uspořádanými krátkými vlákny o délce L a průměru d je možno pro odhad modulu pružnosti kompozitu ve směru vláken E_K využít následujících vztahů:

$$E_K = E_M \frac{1 + \frac{2L}{d}\eta_L . v_V}{1 - \eta_L . v_V} \quad (17)$$

$$\eta_L = \frac{\frac{E_V}{E_M} - 1}{\frac{E_V}{E_M} + \frac{2L}{d}} \quad (18)$$

Výpočet pevnosti kompozitu s krátkými vlákny je složitější vzhledem k obecně komplikovanému průběhu napětí ve vláknech i v matrici. Za předpokladu ideálního elasticko-plastického chování matrice s mezí kluzu ve smyku τ_c, (maximální mezipovrchová adheze), existence tření mezi matricí a vláknem a volných konců (prasklého) vlákna můžeme použít schématu rovnováhy. [16]

2.4 GEOPOLYMERY

Geopolymery (anorganické pojivo), jsou občas definovány jako anorganické pryskyřice nebo též alkalicky aktivované pojivo. Geopolymery patří do skupiny alkalicky aktivovaných materiálů, které jsou na rozhraní mezi klasickými hydratovanými anorganickými pojivy– cementy, skelnými a keramickými materiály a hydraulickými vápny. Termín geopolymer byl použit poprvé v roce 1979, kdy byl tento typ materiálů patentován Prof. Davidovitsem, který poprvé popsal geopolymer jako materiál, kde základní aktivovanou složkou je metakaolin, který se připravil kalcinací s různými typy vápenců. [12]

Obecně pod pojmem geopolymer dnes rozumíme amorfní hlinitokřemičitý materiál skládající se z tetraedrálních hlinitých a křemičitých jednotek kondenzujících při pokojové teplotě za vzniku rovnovážných struktur s přítomností jednomocného iontu alkalického kovu. Svým chemickým složením se tak tyto materiály velmi podobají zeolitům. [12]

Geopolymery jsou řetězce nebo sítě minerálních molekul spojených kovalentními vazbami a tvoří je následující molekulové jednotky (nebo chemické skupiny):

- Si – O – Si – O – siloxo, poly – (siloxo)
- Si – O – Al – O – sialate, poly – (sialate)
- Si – O – Al – O – Si – O – sialate – siloxo, poly – (sialate siloxo)
- Si – O – Al – O – Si – O – Si – O – sialate – disiloxo a poly – (sialate disiloxo)
- P – O – P – O – fosforečnan, poly – (fosforečnan) atd. [16]

2.4.1 OBECNÉ VLASTNOSTI GEOPOLYMERNÍCH KOMPOZITŮ

Kompotzity na bázi geopolymerní matrice, s minerálními vlákny a dalšími aditivy, vykazují mimořádnou pevnost, odolnost proti ohni a slouží jako tepelná a zvuková izolace. Přidáním dalších nanomateriálů bylo docíleno nových vlastností jako například odstínění elektromagnetického a dalších druhů záření.

Geopolymerní kompozity jsou materiály s amorfní strukturou. Za vyšších teplot přechází amorfní struktura v mikrokrystalickou. [12]

Nejsou rozpustné ve vodě, nehoří ani nevytvářejí zplodiny, jsou odolné k teplotám kolem 1000°C, (na rozdíl od betonu, který se začíná rozpadat při teplotách nad 300°C), mají velmi nízkou teplotní vodivost, vysokou pevnost v tlaku (až 100 MPa), dobrou chemickou odolnost a minimální tepelnou roztažnost. Geopolymerní kompozity vykazují dobrou odolnost proti vlivu zředěných kyselin a zásad. Jejich výroba je ve srovnání s výrobou portlandského cementu výrazně méně náročná na

energii a násobně šetrnější k životnímu prostředí. Jejich základní „báze“ je schopná akceptovat a uzavírat do polymerní sítě řadu dalších materiálů včetně materiálů druhotných. [12]

Geopolymerní pasty mají výbornou schopnost pojit velké množství plniva (až do 90% plniva ve směsi). Poměr pojiva a plniva ovlivňuje některé mechanické vlastnosti těchto kompozitů jako jsou např. pevnost a porozita.

2.4.2 MECHANISMUS ALKALICKÉ AKTIVACE A STRUKTURA GEOPOLYMERU

a) Alkalická aktivace

Podmínkou pro alkalickou aktivaci je silně zásadité prostředí, aby mohlo dojít k rozkladu trojrozměrné struktury výchozího hlinitokřemičitanu za vzniku křemičitanových a hlinitanových aniontů. Geopolymerizaci vyvolává exotermní chemická reakce oxidů hliníku a křemíku s alkáliemi nebo za vzniku polymerických vazeb Si–O–Al. Vznikající pevná látka anorganického polymeru je vytvořena ze soustavy sol-gel. Prekurzorem reakce je voda, která během reakčního procesu pomalu a postupně odchází. [12]

Alkalickou aktivací metakaolinu vzniká geopolymer typu O.xSi.yO obsahující jednotku sialát-siloxo [-Si-O-Al-O-Si-O-] případně sialát-disiloxo [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-].

b) Struktura geopolymeru

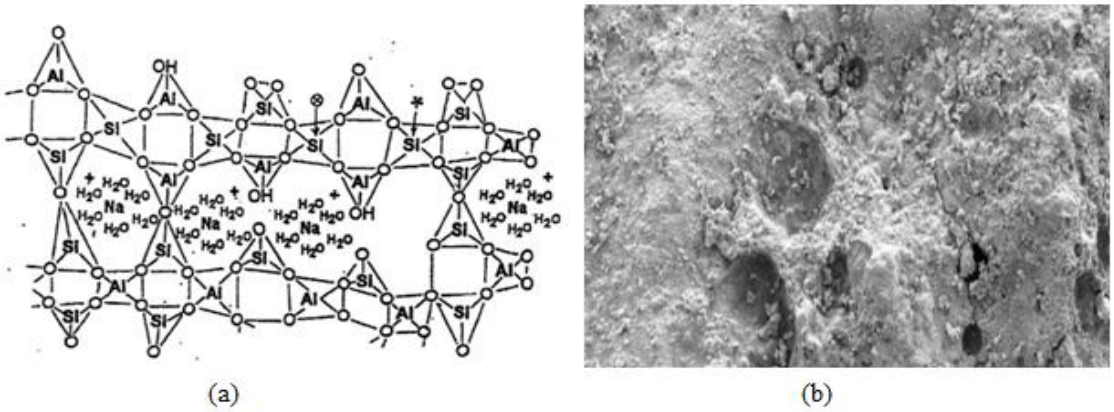
Pro chemické označení geopolymeru byl navržen Prof. Davidovitsem název (polysialáty), ve kterých sialát označuje zkratku pro oxid hlinitokřemičitanu. Sialát je složen z tetraedrálních aniontů a sdílejících kyslík, který potřebuje pozitivní ionty ke kompenzaci elektrické šarže v tetraedrální koordinaci. [12]

Obecný vzorec vzniklých polysialátů lze empirickým vzorcem vyjádřit následovně:

$Me\ [-(SiO_2)_z - AlO_2]_n\ ,\ wH_2O$

kde n označuje stupeň polymerace, počet tetraedrických jednotek (z = 1, 2 nebo 3). Me je alkalický kation, nejčastěji se jedná o kationy alkalických kovů jako jsou sodík nebo draslík tvořící různé typy polysialátů. [12]

Geopolymerní kompozity mají trojrozměrnou amorfní mikrostrukturu, v níž jsou silikátové a aluminátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány polykondensací přes kyslíkový můstek.



Obr. 16 Struktura geopolymeru

a) Struktura sodného geopolymerního kompozitu. [12]

b) Mikrostruktura geopolymerů. [12]

2.4.3 APLIKACE PRO GEOPOLYMERY

Geopolymerní pojiva a kompozity nabízejí uplatnění v praxi, diky jejich snadnému zpracování za nízkých teplot, vysoké pevnosti, nehořlavosti a odolnosti proti teplotnímu šoku. Největší použití je ve stavebnictví, částečně zastupují plastové výrobky (doplnění o nehořlavost), v automobilovém a leteckém průmyslu. Geopolymery dokáží zakonzervovat toxické a radioaktivní odpady na mnooho tisíc let, což je v případě cementových betonů téměř nemožné [16]

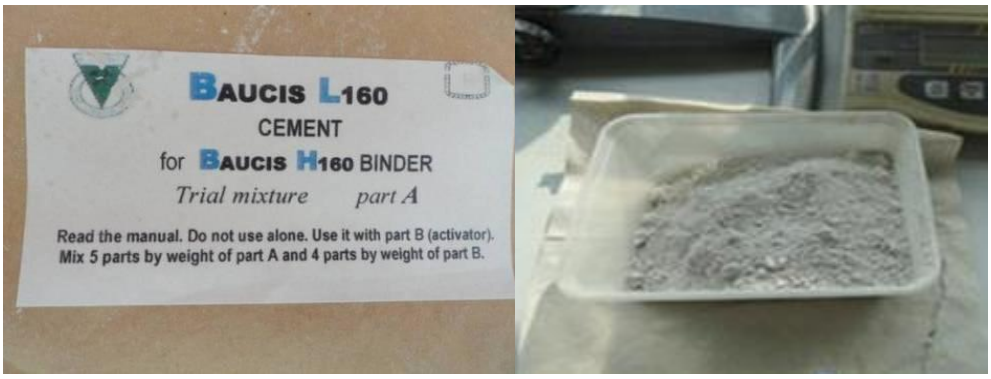
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 VOLBA SLOŽENÍ VZORKŮ

Pro vypracování bakalářské práce byly použity tyto materiály:

a) Pojivová složka

Jako pojivo pro geopolymerní kompozity byl použit BAUCIS L160 cement – složka A s alkalickým aktivátorem – složka B výrobce Lupkové závody Nové Strašecí. Obě složky jsou presentovány na obr. 17 a 18.



Obr. 17 složka Baucis L160 cement

Obr. 18 Alkalický aktivátor Baucis L 160.

Pojivo bylo namícháno podle údajů výrobce, t.j. 5 hm. dílů cementu a 4 hm. díly aktivátoru.

b) Plnivo – krátkovlákenné odpady s obsahem pryže

Jako plnivo do kompozitů byla použita krátká vlákna s obsahem pryže z recyklovaných pneumatik.

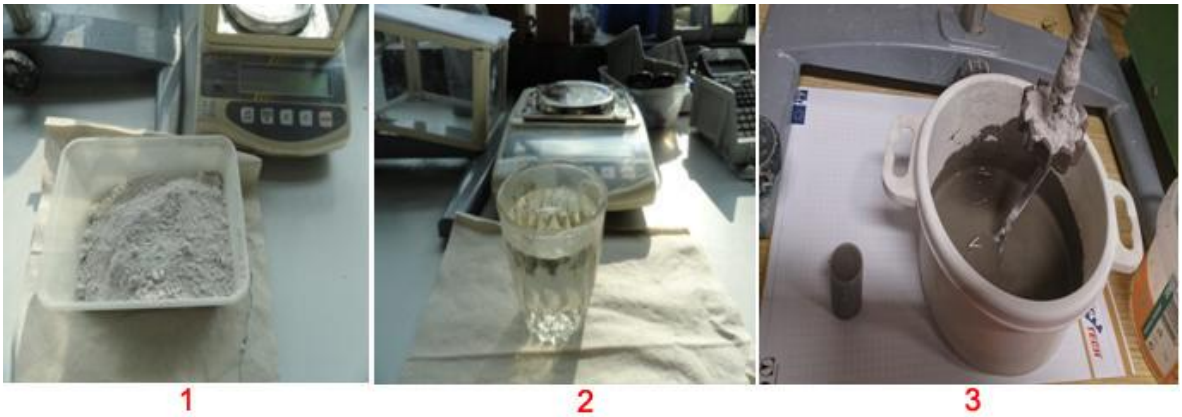
Vlákna byla identifikována jako polyamidová o délce 1 – 2 mm. Jedná se o polymerní vlákna, jejichž pevnosti nebylo možno zjistit pro jejich malou délku. Tloušťka vláken byla asi 10 µm. Zbytky pryže obsahují kaučuk a uhlíkové saze.

Obr.19 Krátkovlákenné odpady z recyklace pneumatik. Odpady obsahují krátká vlákna a zbytky pryže.

3.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH SMĚSÍ

a) postup přípravy geopolymerních směsí

Geopolymerní pojivo **(3)** se skládalo ze dvou složek – první složku tvořil cement **(1)**, který byl smíchán s roztokem silné alkálie označované jako aktivátor (2). Složky byly smíchány podle výše uvedených hmotnostních podílů, tj. 5/4 cement/aktivátor.



Obr.20 Postup přípravy geopolymerních směsí.

Směs byla míchána a homogenizována po dobu pěti minut.

V experimentální části práce byla použita konstantní směs geopolymerního pojiva.

Pro přípravu geopolymerních kompozitů s obsahem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže byl použit směšovací poměr **1%, 3%, 5%, 7%, 10%.** Procenta byla přepočítána na hmotnostní podíly a přidána do pojiva, přičemž byla dodržena zásada 100% celkového materiálového složení. V praxi to znamenalo, že u přídavku 1% vláken byl podíl pojiva považován za 99%. K tomu byl dodpočítán hmotnostní podíl vláken.

b) postup přípravy geopolymerních kompozitních směsí

Michání geopolymerního pojiva (3) a krátkovlákenných odpadu s obsahem pryže (4) se stanoveným obsahem vláken (1%, 3%, 5%, 7%, 10%) je znázorněn na obr.21.

Vlákna odpadu s obsahem pryže (4) byla přidávána do geopolymerního pojiva (3) a opět 5 minut michána (homogenizována).

První michání proběhlo za pomalých otáček, se zvyšujícím se přídavkem plniva se otáčky pro zlepšení zpracovatelských vlastností.

Poté byla geopolymerní kompozitní směs (6) naplněna do forem a ve formách (7) vibrována na vibračním stolku po dobu 1,5 minut (obr .22) s cílem snížení obsahu vzduchových bublin a zlepšení jakosti povrchu a zvýšení mechanických vlastností kompozitů.

Obr. 21 Míchání geopolymerního pojiva a krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže.

Obr. 22 homogenizace a střásání kompozitů na vibračním stolku.

c) Označení kompozitních směsí

Směs G0 Čistá geopolymerní směs (cement a aktivátor)
Směs A1: obsahuje 1% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže
Směs A3: obsahuje 3% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže
Směs A5: obsahuje 5% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže
Směs A7: obsahuje 7% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže
Směs A10: obsahuje 10% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže

Kromě složení vzorků byla variována teplota jejich následného tepelného zpracování. Vzorky byly teplotně připravovány při teplotách 25 °C, 80 °C, 95 °C, 115 °C, 200 °C, 300°C, 500 °C a 700 °C.

3.3 PŘÍPRAVA SMĚSÍ PRO VZORKY

- **Postup přípravy směsí**

Směs je poměrně snadno připravitelná. Komplikovaný je pouze přídavek plniva, který musí být zamíchán od pomalých otáček do vysokých.
Směs lze připravit velmi pohodlně laboratorním míchadlem, ale i s použitím ručního míchadla.
Důležité je pořadí přidávaných prvků a rychlost jejich míchání, aby nedošlo k tvorbě shluků pojiva nepromíchaného s plnivem. Nejdříve byl tedy smíchán cement s aktivátorem, poté byla přidána krátka vlákna odpadů s obsahem pryže.
U směsi A7 a A10 bylo konstatováno, že vysoký obsah krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže působí obtížné míchání a směs není zcela homogenní..
Dalším krokem přípravy bylo zhutňování směsi ve formách na vibračním stolku po dobu 1,5 min.

- **Čas přípravy směsí a tvorby vzorků**

Součet času postupu přípravy směsí, naplnění do forem a setřesení trvá cca 30 minut.

3.4 DRUHY POUŽITÝCH FOREM A JEJÍCH UŽITÍ

Byly použity polyetylénové formy s rozměry :
ϕ20 × 30[mm],[ϕd x L]
objem formy V= $\frac{m}{\rho}$ $[cm^3]$, (19)
forma je vyrobena z plastu PE – obr 23.

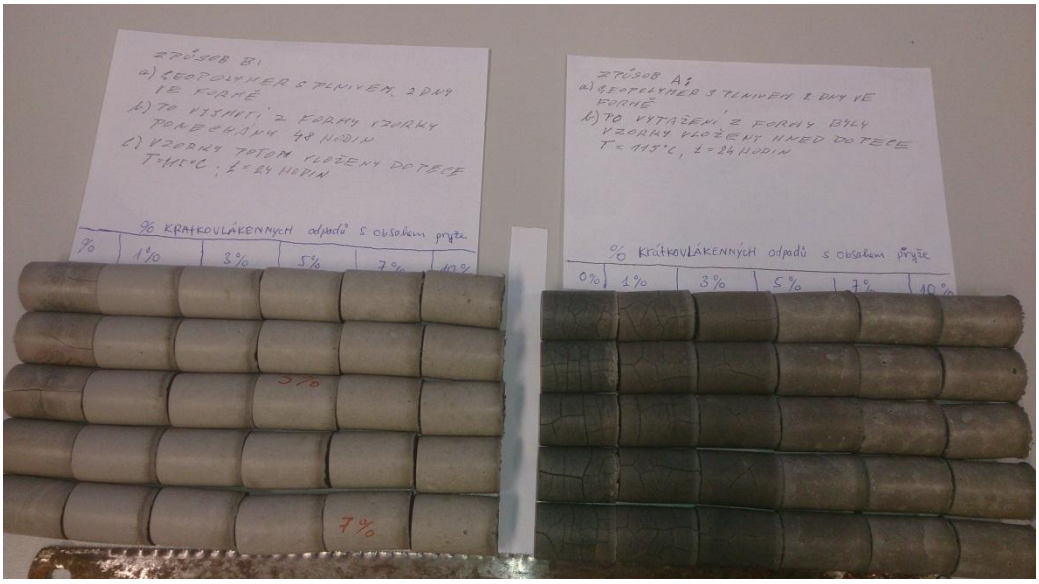
Vzorky odlité z této formy byly použity pro měření maximálního tlakového napětí, tvrdosti a hustoty.

Obr. 23 válcové formy : $\phi 20 \times 30$[mm]

Při vytvrzování vzorků byl porovnáván výsledný stav vzorků po pomalém a rychlém vysychání. U geopolymerů by mělo zrání probíhat podobně jako u betonu po dobu asi 28 dnů. Pomalé a rychlé vysychání bylo realizováno vytvrzením s pokrytím vzorků PE fólií a bez ní. Na obr. 24 je znázorněn rozdíl mezi oběma způsoby vysychání. Při rychlém vysychání se na vzorcích projevují bubliny a praskliny. Na obr. 25 je znázorněno pokrytí vzorků PE fólií, na obr. 26 je vzhled vzorků po vytvrzení.

Obr.24 srovnání pomalého a rychlého vysychání

Obr. 25 Snižování množství trhlin pokrytím vzorků



Obr. 26 Vzhled vzorků

3.5 Elektrická pec

k tepelné úpravě vzorků byly použity dvě elektrické pece:
Pec s rozsahem do 1200 °C k ohřevu vzorků při teplotách 300 -800 °C – obr. 28
Pec s rozsahem do 300 °C k ohřevu vzorků při 60- 300 °C (obr. 27)

Obr. 27 Elektrická pec (maximum 300 °C)

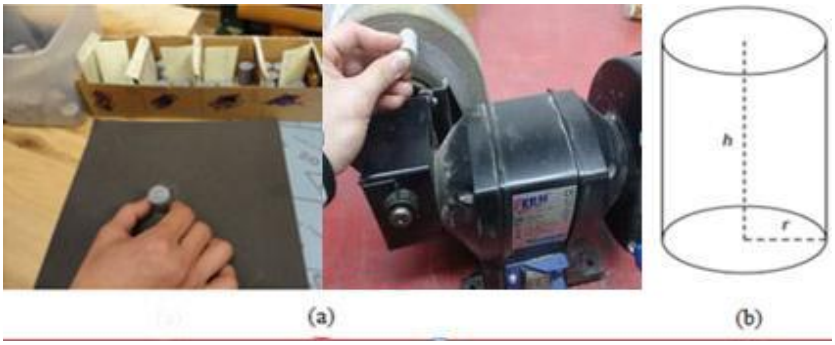
Obr. 28 Elektrická pec (maximum 1200 °C)

3.6 Měření vzorků

- **Charakter struktury pomocí SEM a naměřené výsledky**

3.6.1 PEVNOST V TLAKU

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ASTM C 39M – 01. Po 28 dnech zrání při laboratorních podmínkách na zkušebních vzorcích ve tvaru válce o výše uvedených rozměrech a před měřením vzorků bylo nutno zajistit planparalelnost a čistotu ploch. Proto byly vzorky broušeny na čelech a byly měřeny na 3 místech – 3 mm od čela a uprostřed vzorku.



Obr. 29 broušení testovaných vzorku

- *Broušení povrchových nerovnosti u testovaných vzorků (a)*
- *Zkušební váleček (b)*

a) Měření rozmměrů a hmotnosti

K měření rozměrů bylo použito digitální posuvné měřítko a pro stanovení hmotnosti byla použita digitální váha KERN s váživostí do 220 g a schopností vážit na 3 desetinná místa (obr. 30)

Obr. 30 měření rozměrů a hmotnosti vzorků

b) **Měření tvrdosti**

k měření tvrdosti bylo použito digitálního tvrdoměru MH -180 Hardness Tester (obr. 31).
Čidlo pro měření tvrdosti přístroje MH180 Hardeness Tester obsahuje spouštěcí tlačítko měření, trubici s pružinou a unášečem kuličky, vodicí trubici, měřicí cívku čidla, kabel k propojení s měřicím přístrojem, unášeč s kuličkou a opěrný kroužek.

Měření s přístrojem MH180 Hardeness Tester: Pružinu s unášečem kuličky stlačíme dolů (tím dojde k přípravě „vystřelení“ kuličky), opěrný kroužek se přiloží kolmo na měřený povrch (nejprve dochází k ověřovacímu měření na kalibračním vzorku). Tlačítkem se uvolní unášeč s kuličkou a hodnota měření je zaznamenána v měřicím přístroji. Ze tří za sebou následujících měření přístroj vyčíslí průměrnou hodnotu.

Obr. 31 digitálního tvrdoměr MH -180 Hardness Tester

c) **Vložení vzorku a nastavení přístroje (dynamometru)**

Po kontrole uložení a nastavení plošek lisu byly vzorky válců zatěžovány v tlaku. Měření bylo ukončeno při destrukci vzorků (obr 32).

d) Výsledná pevnost v tlaku byla vypočítána ze vztahu

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{max}}{S} \qquad (20)$$

Kde : σ_{max} [N/mm^2] nebo-li [MPa] je pevnost v tlaku – normálové napětí.

F_{max} [N] je maximální síla nutná k porušení zkušebního vzorku.

S - Plocha [mm^2]

(a) (b)

Obr. 32 a) Přístroj pro měření pevnosti v tlaku.
b) Destrukce vzorku

Pevnost v tlaku se získává experimentálně z výsledků tlakové zkoušky vzorků.
Hodnoty pevností v tlaku byly stanoveny aritmetickým průměrem pevnostních hodnot zjištěných na třech zkušebních válečcích vzorků.

g) hustota

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{kde :}$$

m : hmotnost zkušebních vzorku [g]

V : objem vzorky. Kde $V = \pi\frac{d^2}{4} . L \ [cm^3]$ (21)

L : Výška vzorky [mm]

D : průměr zkusebních vzorky [mm]

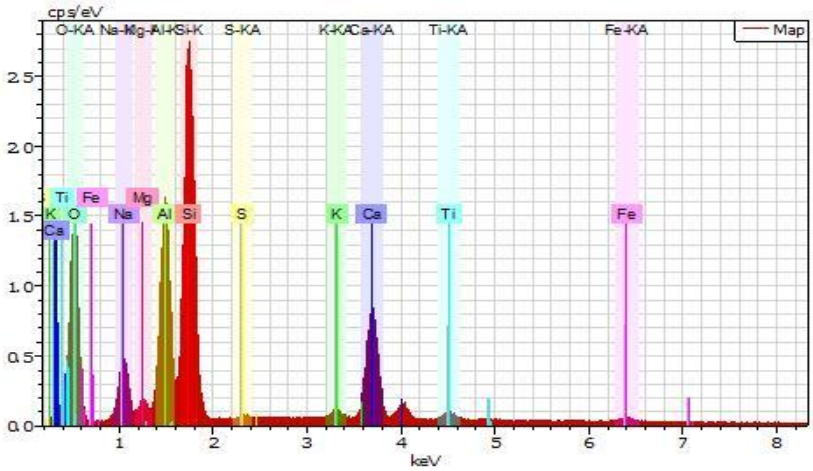
ρ : hustota zkušebních vzorku [g/cm^3]

3.6.2 pozorování mikrostruktury

a) chemické složení geopolymeru L160

tab.1 chemické složení geopolymeru L160

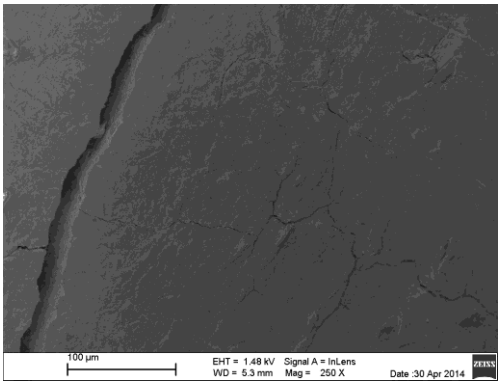
Element	Na_20	Mg0	Al_20_3	$Si0_2$	$Si0_3$	K_20	Ca0	$Ti0_2$	Fe0	∑
Wt %	9.24	2.12	24.03	50.94	0.44	0.61	10.08	0.97	0.85	99.28%

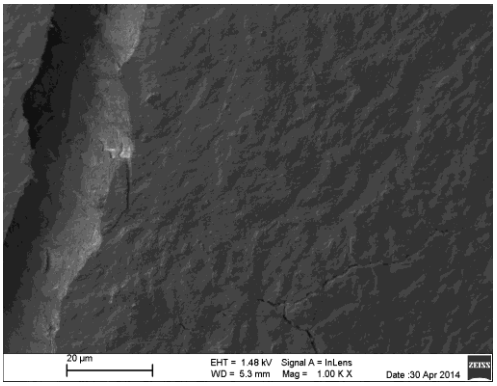


Graf.1 EDX spektrum čistého geopolymeru

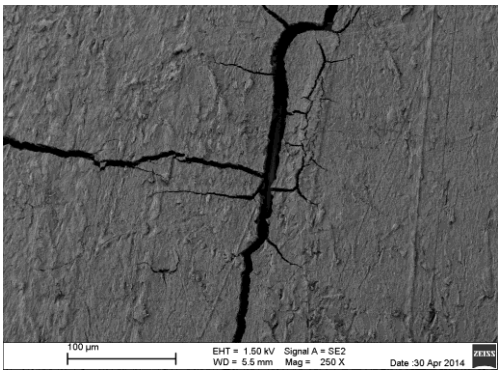
b) Charakter struktury pomocí SEM

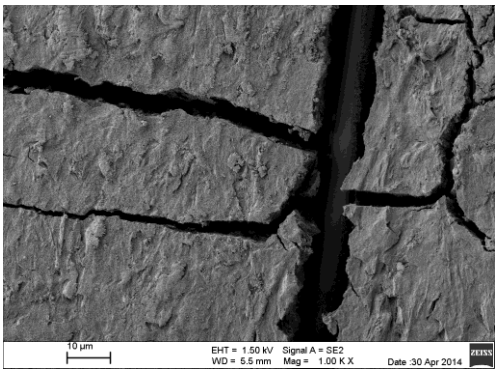
0 % aditiv



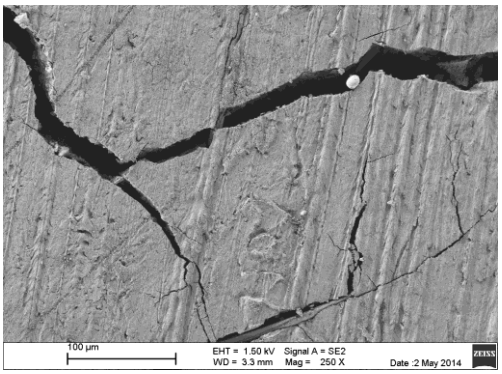


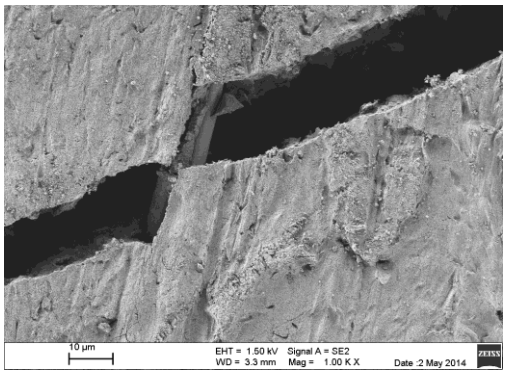
3 % aditiv





7 % aditiv





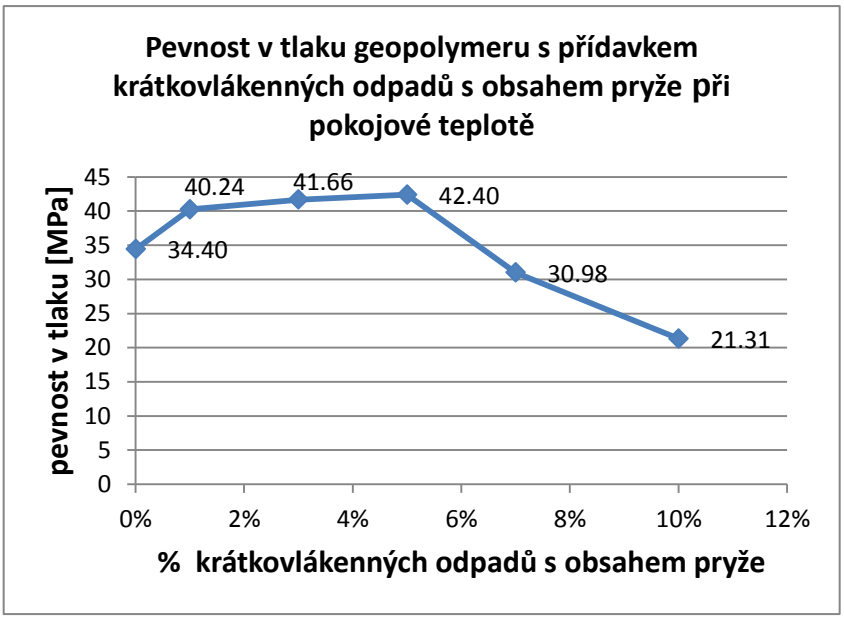
obr.33 vyobrazení geopolymeru s aditivem na SEM při zvětšení 250x a 1000x

3.7 výsledky a vyhodnocení

Hodnoty pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce a jejich grafické :

Tab.2 vzorky s krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže, při pokojové teplotě (23 -26 °C)

Teplota ohřevu [°C]	% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže	Tvrdost po 28 dnech [HV]	Hustota [g/cm^3]	Tlakové napětí [Mpa]
Při pokojové Teplotě po 28 dní	0%	266±6	1.68	34.40
	1%	234±3	1.64	40.24
	3%	208±8	1.58	41.66
	5%	207±11	1.60	42.40
	7%	211±5	1.56	30.98
	10%	221±6	1.51	21.31

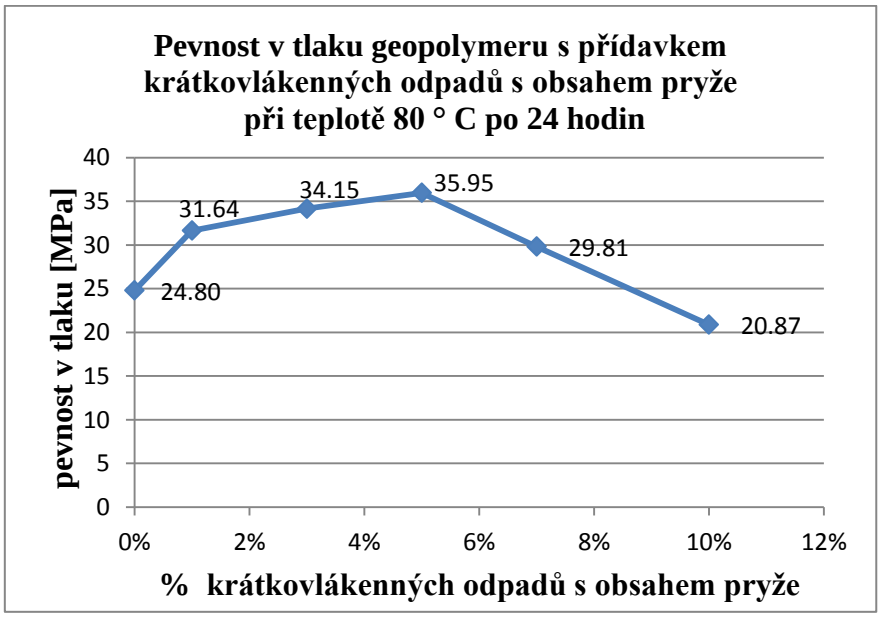


Graf. 2 Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při pokojové teplotě.

Výsledky v diagramu ukazují na závislost mezi typy kompozitů s různým obsahem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže. Srovnáme-li hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů na grafu, vidíme, že kompozit s 5% obsahu vláken bez tepelného zpracování (při pokojové teplotě) má nejvyšší pevnost v tlaku. Počátek křivky (0% krátkých vláken), tlakové napětí 34,40 MPa má hodnoty nízké a roste do maximální hodnoty pevnosti v tlaku (42,40 MPa) u 5% plniva. Se vzrůstajícím procentním podílu vláken pevnost v tlaku klesá.

Tab. 3 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže
(sušení při teplotě 80 ° C po 24 hodin) po 28 dní vytvrzování

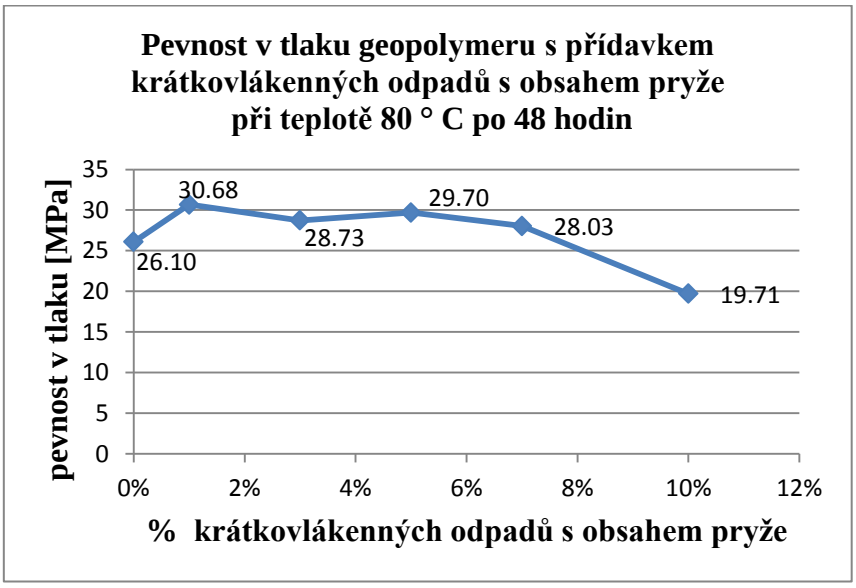
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 80 °C ohřev po 24 h	0%	246±4	1.56	24.80
	1%	282±8	1.57	31.64
	3%	289±12	1.55	34.15
	5%	254±5	1.50	35.95
	7%	219±7	1.53	29.81
	10%	209±3	1.49	20.87



Graf. 3 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 80 °C po 24 hod*

Tab.4 Vzorky s krátkovlákenných odpadem s obsahem pryže při teplotě (80 ° C po 48 hodin) po 28 dní vytvrzování

Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 80°C ohřev po 48h	0%	330±11	1.57	26.10
	1%	276±4	1.55	30.68
	3%	248±2	1.59	28.73
	5%	285±5	1.54	29.70
	7%	222±7	1.49	28.03
	10%	217±8	1.51	19.71

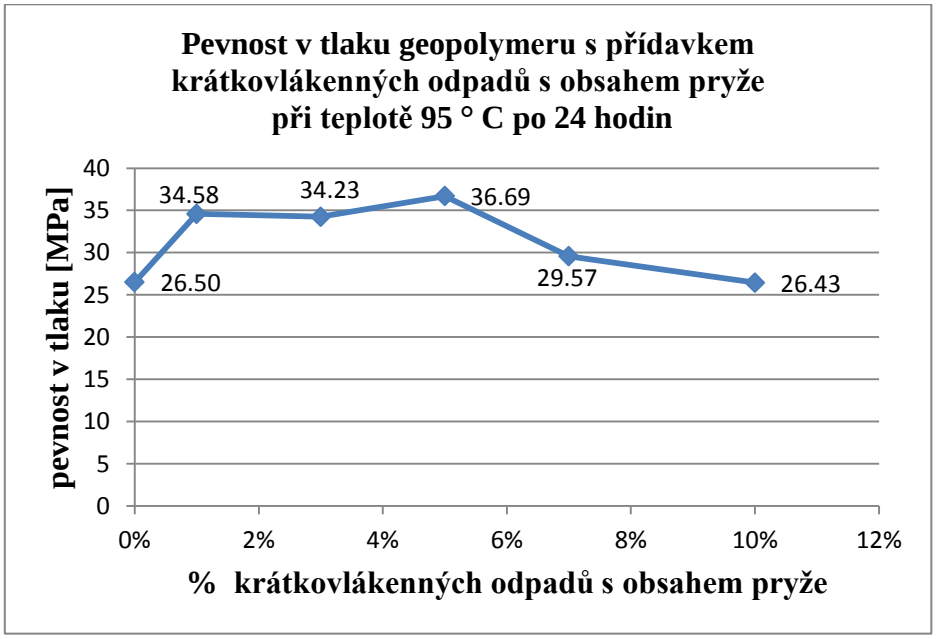


Graf. 4 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 80 °C po 48 hod.*

Srovnáme-li hodnoty pevnosti v tlaku geopolymerních kompozitů při ohřevu na 80°*C* po 24 hodin s ohřevem 80°C po 48 hodin, vidíme, že hodnoty v grafu 3 jsou větší a stabilnější, než v grafu.4

Tab.5 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (95 °C po 24 hodin) po 28 dní

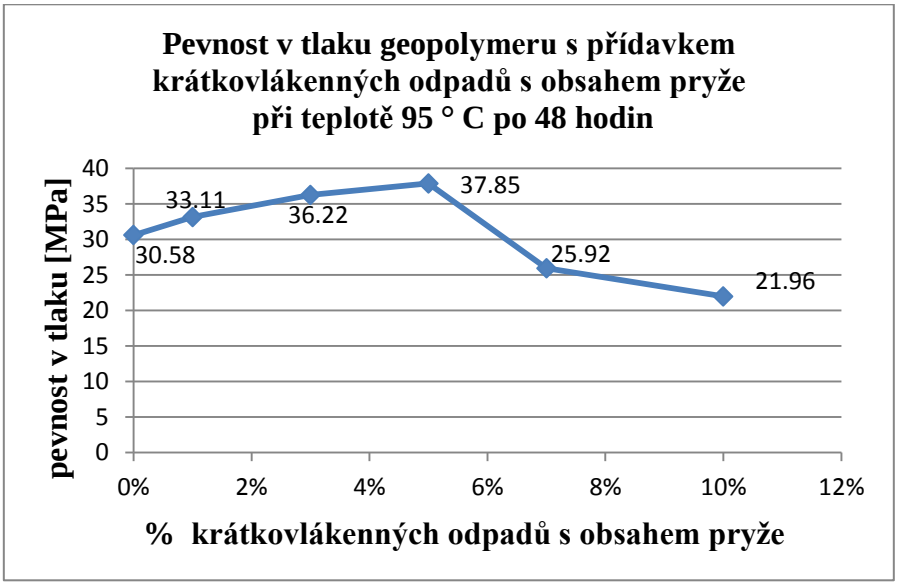
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 95 °C ohřev po 24 h	0%	255±7	1.70	26.50
	1%	225±10	1.67	34.58
	3%	322±6	1.61	34.23
	5%	254±4	1.53	36.69
	7%	243±7	1.52	29.57
	10%	260±5	1.46	26.43



Graf. 5 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 95 °C po 24 hod.*

Tab.6 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (95 °C po 48 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu [°C]	% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže	Tvrdost po 28 dnech [HV]	Hustota [g/cm^3]	Tlakové napětí [Mpa]
Při Teplotě 95 °C ohřev po 48 h	0%	255±7	1.72	30.58
	1%	225±10	1.76	33.11
	3%	322±6	1.77	36.22
	5%	254±4	1.63	37.85
	7%	243±7	1.49	25.92
	10%	260±5	1.50	21.96

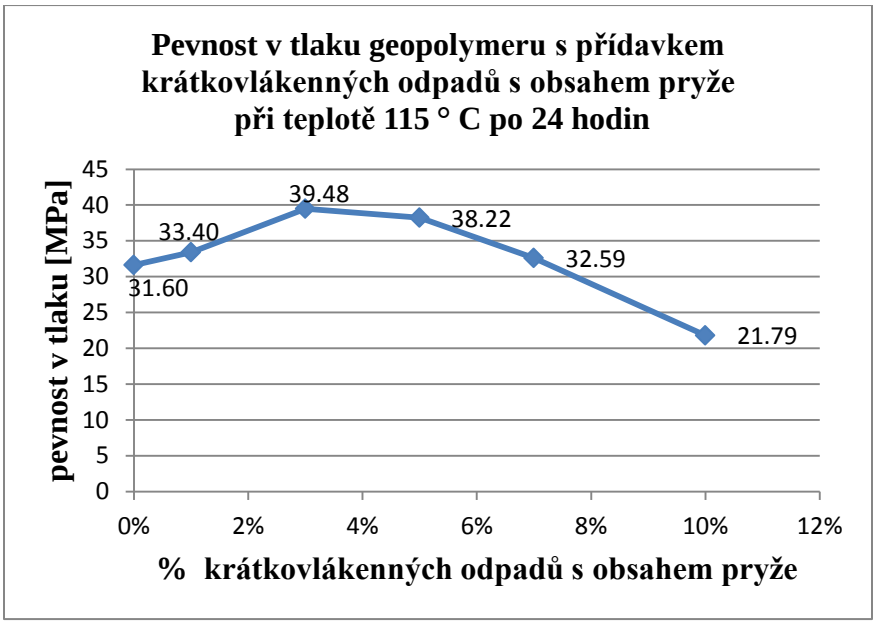


Graf. 6 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 95 °C po 48 hod.*

Při ohřevu 95°C po 24 hodin a po 48 hodin vídime, že u 5% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže má nějvětší pevnost v tlaku a křivka závislosti na teplotě ohřevu a na procentu plniva stoupá. Křivka počátku s 0% plniva roste do 5% plniva, potom klesá v závislosti na obsahu plniva.

Tab.7 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (115 °C po 24 hodin) po 28 dní

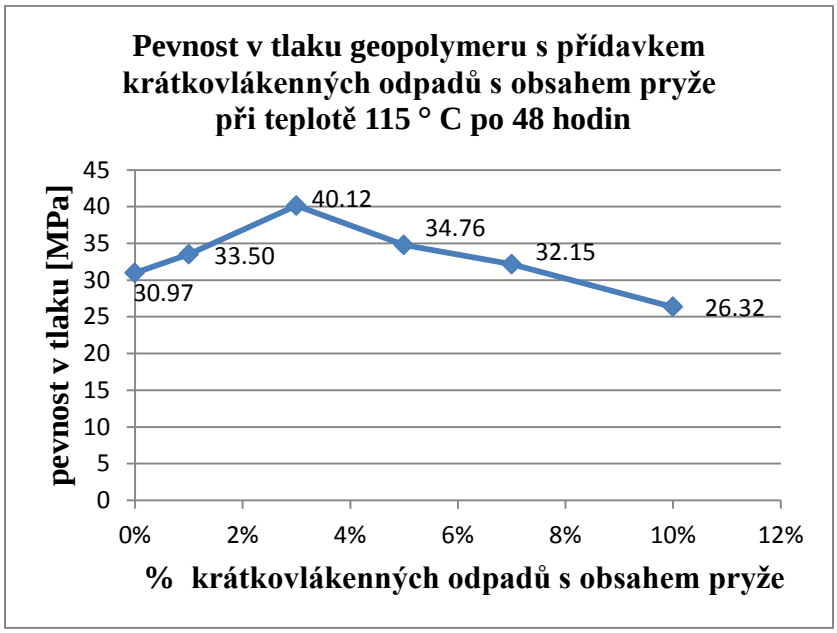
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 115°C ohřev po 24 h	0%	232±7	1.736	31.60
	1%	211±6	1.77	33.40
	3%	225±8	1.71	39.48
	5%	314±3	1.66	38.22
	7%	228±12	1.50	32.59
	10%	280±5	1.48	21.79



Graf. 7 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 115 °C po 24 hod.*

Tab.8 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (115 °C po 48 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 115°C ohřev po 48 h	0%	184±4	1.75	30.97
	1%	195±6	1.64	33.50
	3%	248±7	1.68	40.12
	5%	283±3	1.62	34.76
	7%	251±10	1.55	32.15
	10%	217±5	1.56	26.32

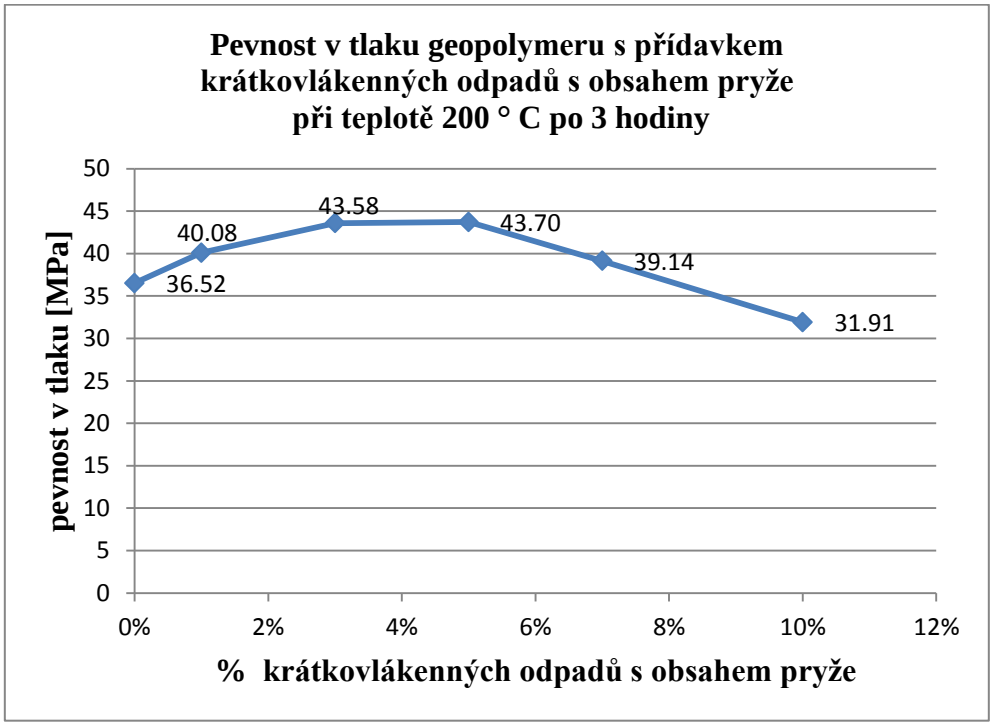


Graf. 8 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 115 °C po 48 hod.*

Při ohřevu na 115°C po 24 hodin a po 48 hodin vídime, že u 3% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže je nějvětší pevnost v tlaku a křivka závislosti na teplotě ohřevu a na procentu plniva stoupá. Křivka počátku s 0% plniva roste do 3% (maximální pevnost vtlaku) se zvyšujícím se obsahem plniva opět klesá.

Tab.9 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (200 °C po 3 hodin) po 28 dní

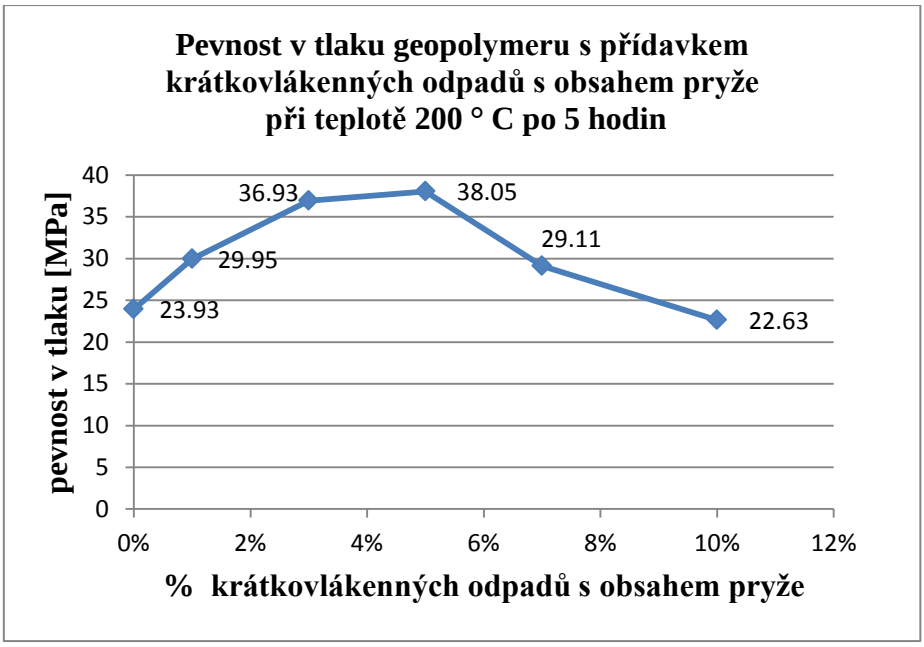
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 200°C ohřev po 3 h	0%	148±3	1.49	36.52
	1%	184±2	1.48	40.08
	3%	209±5	1.52	43.58
	5%	259±3	1.44	43.70
	7%	189±10	1.46	39.14
	10%	124±4	1.43	31.91



Graf.9 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 200 °C po 3 hodinách*

Tab.10 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (200 °C po 5 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 200°C ohřev po 5 h	0%	170±3	1.51	23.93
	1%	238±6	1.48	29.95
	3%	212±8	1.53	36.93
	5%	249±5	1.47	38.05
	7%	245±11	1.45	29.11
	10%	167±4	1.47	22.63

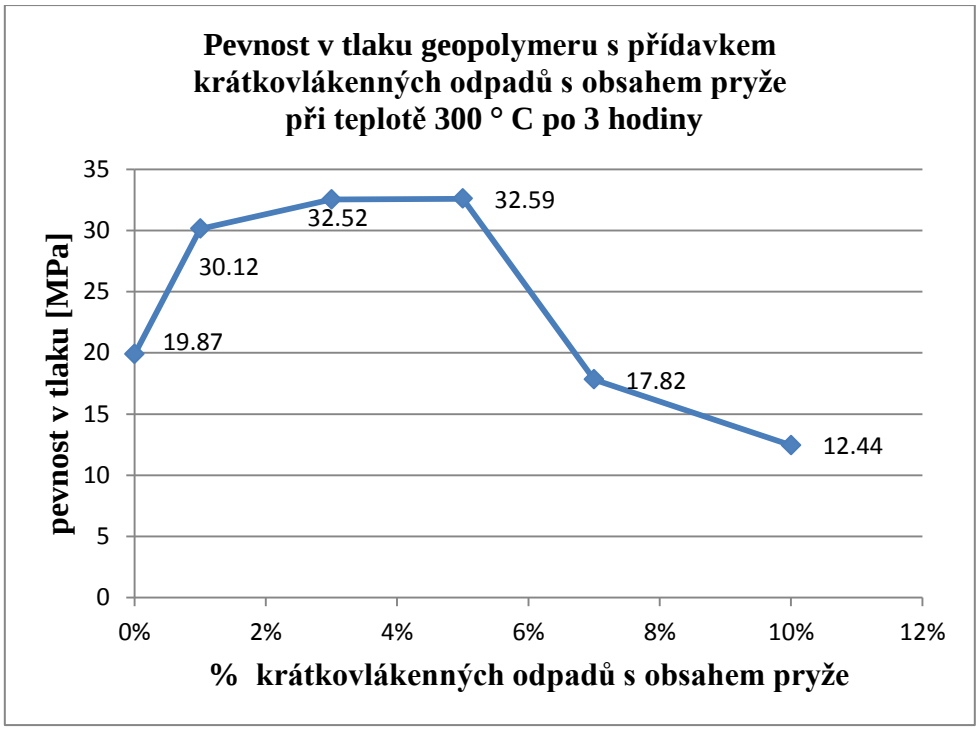


Graf. 10 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 200 °C po 5 hod.*

Při ohřevu na 200°*C* po dobu 3 hodin a 5 hodin u vzorků, vytvrzovaných při pokojové teplotě po 28 dní je dosaženo maximální pevnosti v tlaku u 5% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže, kdy křivka od 0% plniva roste do maximální hodnoty pevnosti a potom opět klesá.

Tab.11 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (300 °C po 3 hodiny) po 28 dní

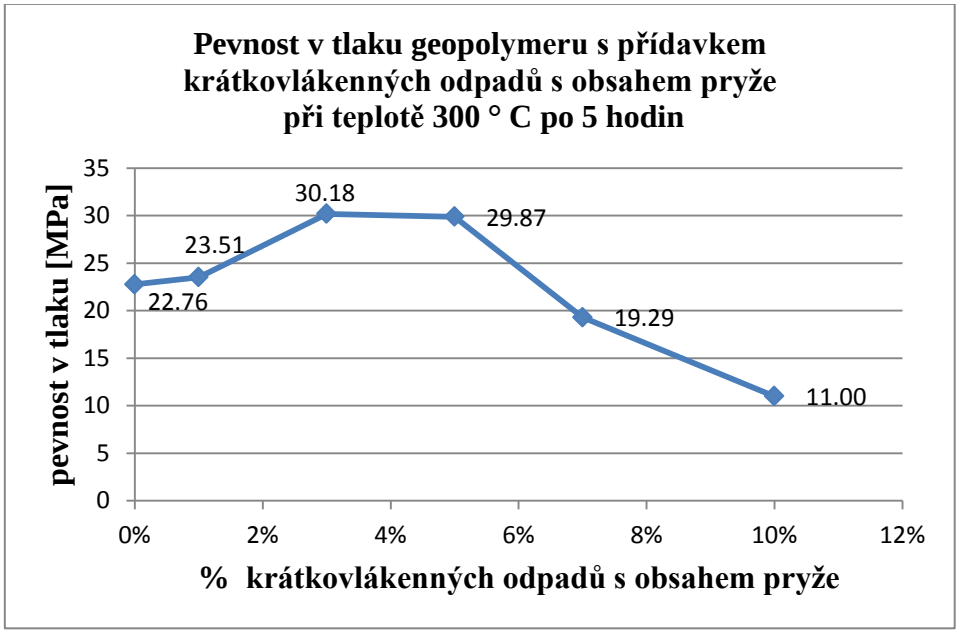
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 300°C ohřev po 3 h	0%	139±2	1.52	19.87
	1%	218±6	1.57	30.12
	3%	267±5	1.49	32.52
	5%	232±7	1.44	32.59
	7%	221±12	1.38	17.82
	10%	223±5	1.39	12.44



Graf. 11 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 300 °C po 3 hodinách*

Tab.12 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (300 °C po5 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu [°C]	% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže	Tvrdost po 28 dnech [HV]	Hustota [g/cm^3]	Tlakové napětí [Mpa]
Při Teplotě 300°C ohřev po 5 h	0%	137±7	1.53	22.76
	1%	170±3	1.50	23.51
	3%	160±11	1.41	30.18
	5%	202±4	1.47	29.87
	7%	217±10	1.34	19.29
	10%	174±5	1.34	11.00

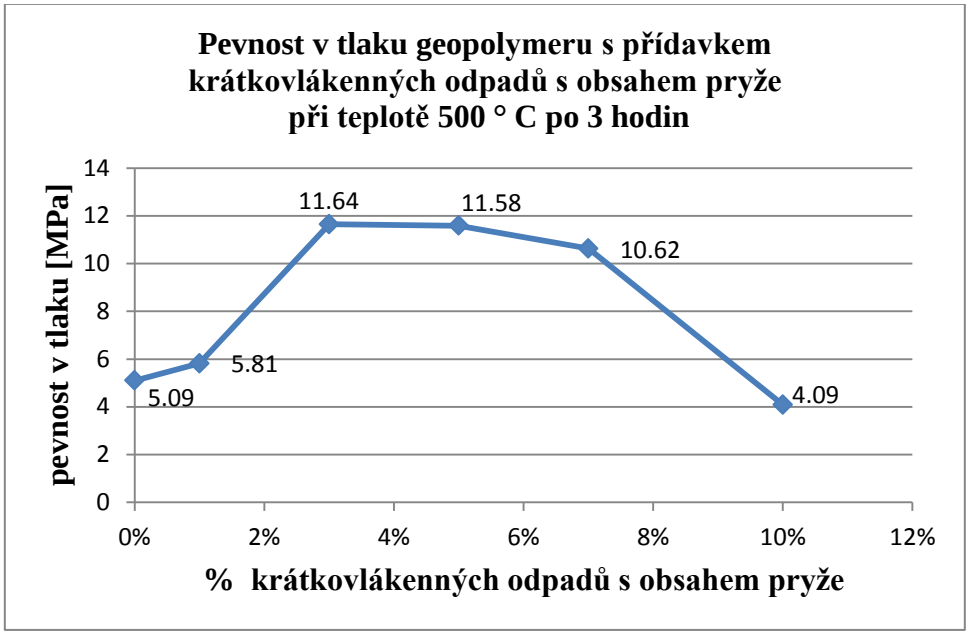


Graf. 12 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 300 °C po 5 hodinách*

Z křivek je patrné, že při ohřevu na 300°*C* po dobu 3 hodin a 5 hodin vytvrzovaných při pokojové teplotě po 28 dní se dosahuje maximální pevnosti v tlaku u směsi s 3% a 5% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže. Křivka od počátku (0% plniva) roste do maximální hodnoty pevnosti a potom opět klesá.

Tab.13 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (500 °C po 3 hodin) po 28 dní

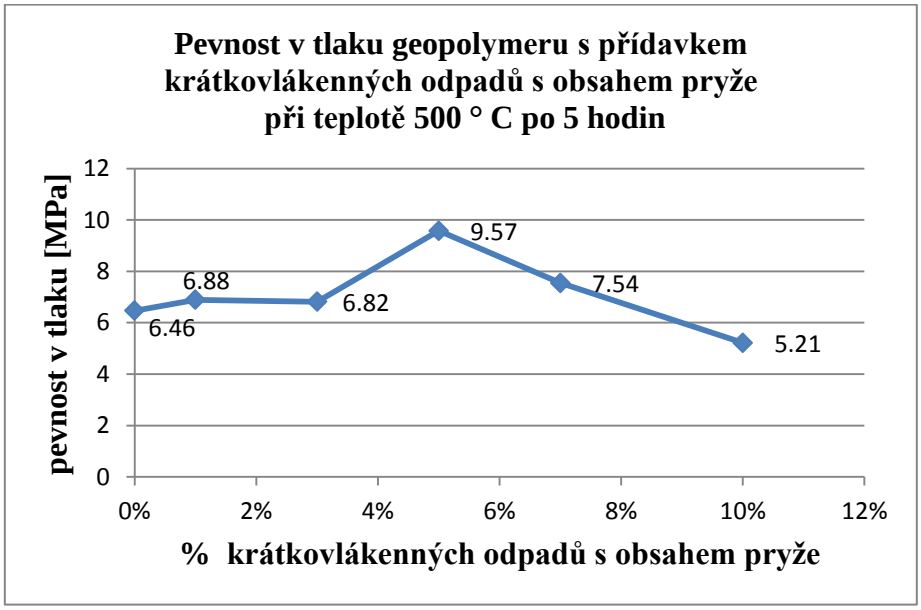
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 500°C ohřev po 3 h	0%	196±11	1.52	6.46
	1%	225±4	1.38	6.88
	3%	136±12	1.31	6.82
	5%	246±5	1.32	9.57
	7%	268±3	1.26	7.54
	10%	186±5	1.21	5.21



Graf. 13 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 500 °C po 3 hod.*

Tab.14 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (500 °C po 5 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu [°C]	% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže	Tvrdost po 28 dnech [HV]	Hustota [g/cm^3]	Tlakové napětí [Mpa]
Při Teplotě 500°C ohřev po 5 h	0%	164±2	1.47	5.09
	1%	241±4	1.46	5.81
	3%	188±7	1.43	11.64
	5%	241±8	1.34	11.58
	7%	187±3	1.27	10.62
	10%	164±4	1.18	4.09

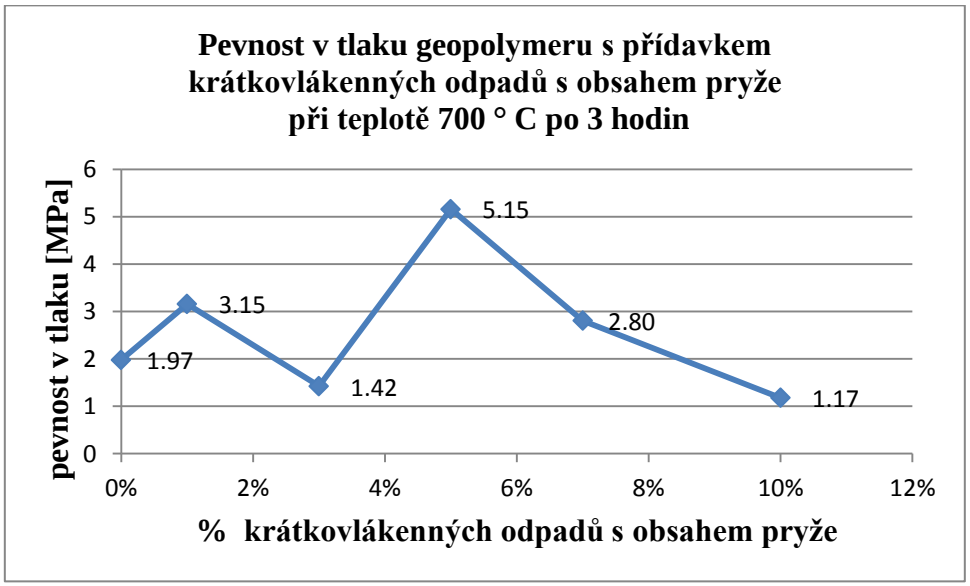


Graf. 14 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 500 °C po 5 hod.*

Vzorky pro ohřev na 300°*C* po 3 hodiny a 5 hodin byly vytvrzovány při pokojové teplotě po 28 dní. Vzorky dosahují maximální pevnosti v tlaku u 5% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže. Křivka od počátku s 0% plniva roste do maximální hodnoty pevnosti a potom klesá. Při ohřevu na vysokou teplotu pevnost v tlaku rychle klesá a dosahuje maximální hodnoty pouze 12 MPa.

Tab.15 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (700 °C po 3 hodin) po 28 dní

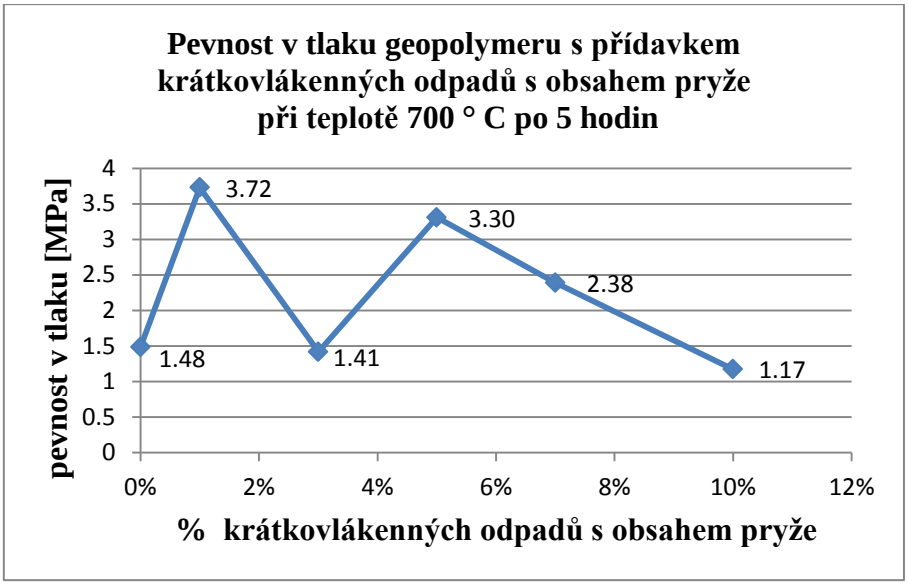
Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 700°C ohřev po 3 h	0%	89±5	1.82	1.97
	1%	121±6	1.89	3.15
	3%	172±3	1.72	1.42
	5%	168±7	1.66	5.15
	7%	175±6	1.46	2.80
	10%	220±4	1.45	1.17



Graf. 15 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 700 °C po 3 hod.*

Tab.16 Vzorky s krátkovlákenným odpadem s obsahem pryže při teplotě (700 °C po 5 hodin) po 28 dní

Teplota ohřevu [°C]	**% krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže**	**Tvrdost po 28 dnech [HV]**	**Hustota [g/cm^3]**	**Tlakové napětí [Mpa]**
Při Teplotě 700°C ohřev po 5 h	0%	114±3	1.74	1.48
	1%	125±6	1.65	3.72
	3%	136±2	1.71	1.41
	5%	145±5	1.45	3.30
	7%	95±7	1.62	2.38
	10%	87±2	1.34	1.17



Graf. 16 *Pevnost v tlaku geopolymeru s přidavkem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při teplotě 700 °C po 5 hod.*

Křivka pevností v tlaku v závislosti na procentu obsaženého plniva při vysoké teplotě 700 °C je značně rozkolísaná. Hodnoty pevnosti v tlaku rostou do 3.72 MPa při 1% obsahu plniva, vzápětí klesá a u obsahu plniva 5% roste. Značí to, že ve struktuře vzorků vznikají poruchy a směsi při této teplotě nevyhovují. Při této teplotě se složka pryže ve vzorcích změní na popílek a vzniká pórovitost.

3.8 Vyhodnocení

Z experiementů vyplývá, že pro optimální a srovnatelné vlastnosti je nutno použít vytvrzování při pomalém vysychání a je nutno čekat néjméně 4 dny, než podrobíme vzorky ohřevu. Pak mají vzorky hladký povrch a stabilní strukturu. U čistého geopolymeru (0% aditiv) jsou vzorky velmi křehké a pevnost v tlaku je minimální při všech variantách dalšího zpracování (teplota a čas ohřevu).

Geopolymerní směs s 10 % plnivem je tuhá a těžko se mísí a proto do vyhodnocení nebyla zahrnuta.

Z tabulek hodnot a diagramů vidíme, že pevnost v tlaku směsí geopolymerů s plnivem závisí na obsahu plniva, době ohřevu a teplotě ohřevu. Nejlepší pevnost v tlaku dosahuje kompozit s 5% plniva a dále s 3% plniva, a to u všech teplot.

U teplotně nezpracovaných kompozitů (23 - 26°C) a u ohřevu na 200°C po dobu 3 hodin pevnost v tlaku dosahuje maximální hodnotu (42.40 a 43.70 MPa)

Vzorky s ohřevem na 500 °C, 700°C po 3 a 5 hodin vkazují pevnost v tlaku velmi malou a u teploty 700°C jsou hodnoty pevnosti v tlaku nestabilní a kompozit nevyhovuje pro využití v praxi.

Z experimentů s variabilním množstvím plniva z krátkovlakenných odpadů s obsahem pryže na bázi geopolymeru vyplývá, že u kompozitů se zvyšuje tvrdost a pevnost v tlaku. Je nutno omezit trhliny. Plnivo snižuje křehkost kompozitů. Kladem je zároveň zpracování odpadů, což přináší zvýšenou ekonomickou efektivitu v průmyslu.

4. ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla provedena analýza vlastností kompozitní materiálů na bázi geopolymeru s výztuží z krátkovlakenných odpadů s obsahem pryže s cílem najít poměr obsahu těchto vláken v kompozitech tak, aby je bylo možno uplatnit v praxi. Na základě výsledků experimentů lze konstatovat, že toto využití odpadů z recyklovaných pneumatik je pro budoucnost pozitivní. Mechanické vlastnosti geopolymerních kompozitů jsou velmi závislé na množství přidaných aditiv. Nejlepší vlastnosti vykazuje geopolymer s 5% obsahem krátkovlákenných odpadů s obsahem pryže při ohřevu na 200°C po 3 hodiny (43.70 MPa) a dále s 5% obsahu těchto aditiv při pokojové teplotě (42.40 MPa).

Nejhorší výsledky byly dosaženy u vzorku s 10% ním obsahem krátkovlákenných odpadů při všech variantách dalšího zpracování (teplota a čas ohřevu).

Při ohřevu na 500 - 700°C vykazují vzorky špatné mechanické vlastnosti, pryž se mění na popílek a ve vnítřní struktuře vzorku vznikají poruchy (póry).

U geopolymeru (0 % aditiv) při všech variantách dalšího zpracování (teplota a čas ohřevu) vykazují vzorky malou pevnost a vysokou křehkost.

Použitá literatura:

- [1] Karel Daďourek: Kompozitní materiály – modely a vlastnosti .Skripta.Technická univerzita v Liberci 2005
- [2] Karel Daďourek: Kompozitní materiály – druhy a jejich užití .Skripta.Technická univerzita v Liberci 2007
- [3] [online], [cit. 2010-2-19] Dostupný z: http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [4]VRBKA,Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ [online]. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 z: http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php.
- [5] Míšek, B.: Kompozity. TDS Brno, 2003
- [6] BAREŠ, A. Richard. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-734-88.
  [7]BLATEK, Rostislav: TECHNOLOGICKÝ PROJEKT PROVOZU PRO MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ [online]. Zlín, 2006, z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2140/bla%C5%BEek_2006_bp.pdf
- [8] HLASOVA, Martina.: OPTIMALIZACE ROZHRANÍ VLÁKNO MATRICE U KOMPOZITŮ S KERAMICKOU MATRICÍ [online] Brno 2011
- [9] PRAKTIKUM ZE STRUKTURY A VLASTNOSTÍ POLYMERŮ ZKOUŠKA OHYBEM. [http: www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaleto/uloha9.doc]. Ústav chemie materiálů. 25.3.2010
- [10] KOMPOZITNÍ MATERIÁLY [online]. http//new.bibus.cz/pdf/comat/kompozitni_COMA.pdf
- [11] MODULY PRUŽNOSTI MATERIÁLŮ [online] www.ipm.cz/group/tracture/vyuka/doc/p13.pdf
- [12] ČERVINKA, Josef. Geopolymery-využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů [online].Fakulta restaurování, 2008, z: :http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29938/1/CervinkaJ_Geopolymery_RT_2008.pdf
- [13] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V.: Úvod do studia materiálů. 1. vyd. 2005. s.191, Vydavatelství VŠCHT Praha , ISBN 80-7080-568-4
- [14]CIULLO, P. A.: Industrial Minerals and Thein Uses - A handbook and Formulary. William Andrew Publishing/notes, 1996, ISBN 978-0-8155-1808-2
- [15] [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf
- [16] Bartoňová Pavla,. PŘÍPRAVA GEOPOLYMERNÍCH POJIV NA BÁZI ALKALICKY AKTIVOVANÝCH METAKAOLINŮ. [online] diplomové práce, vedoucí doc.ing.Jaromír Havlica, Drsc. z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13531/Bartonova%20Pavla.pdf