



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie

Využití vybraných druhotných surovin při formulaci kompozitních materiálů ve stavebnictví

The use of selected secondary raw materials for formulation of composite materials in building industry

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Martina Záleská

Doktorský studijní program: P3604 - Stavební inženýrství

Studijní obor: 3911V005 - Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: prof. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D.

Praha, 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Martina Záleská

Název disertační práce: Využití vybraných druhů druhotných surovin při formulaci kompozitních materiálů ve stavebnictví

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Mileny Pavlíkové, Ph.D..

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů: 7AMB16PL044, 17-04215S, 17-02815S, 17/166/OHK1/3T/11, CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002526, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/0002623.

V Praze dne

.....

.....

podpis

Na tomto místě bych ráda upřímně poděkovala mé vedoucí práce prof. Ing. Mileně Pavlíkové, Ph.D. za vedení práce, cenné rady, poskytnuté materiály a zejména za všestrannou pomoc a podporu. Velký dík za užitečné rady a připomínky patří rovněž prof. Ing. Zbyškovi Pavlíkovi, Ph.D. Poděkovat bych chtěla také všem, kteří mi pomáhali při výrobě vzorků, dílčích měřeních a analýzách, zejména Ing. Jaroslavu Pokornému, Ph.D., Ing. Janu Fořtovi, Ph.D. a dalším kolegům z katedry a doc. Ing. Ondřeji Jankovskému, Ph.D. z Ústavu anorganické chemie VŠCHT. Zapomenout nesmím ani na příspěvní a podporu mých nejbližších – děkuji.

Tato práce vznikla v rámci projektů:

7AMB16PL044 - Efektivní tepelná úprava kalů z čistíren odpadních vod a jejich aplikace ve směsném cementovém pojivu.

GA17-02815S - Výzkum a vývoj vysoce hodnotných kompozitů obsahujících popílek z biomasy.

GA17-04215S - Tepelně izolační kompozity obsahující plniva na bázi odpadních plastů.

SGS17/166/OHK1/3T/11 - Aplikace vybraných druhotných surovinových zdrojů při vývoji kompozitních materiálů pro stavebnictví.

CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002526 - Obnova infrastruktury laboratoří Stavební fakulty ČVUT.

CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_017/0002623 - Vytvoření infrastruktury pro inovovaný doktorský studijní program Fyzikální a materiálové inženýrství (CZ/ENG).

Abstrakt:

S rozvojem ekonomiky a nárůstem populace celosvětově stoupá množství vyráběného stavebního materiálu na bázi cementu, spotřeba energie i produkce různých druhů odpadů. S tímto trendem bohužel neodmyslitelně souvisí negativní ovlivňování životního prostředí. Předkládaná dizertační práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První z nich je zaměřena na využití čtyř druhů polypropylenových odpadů jako částečné náhrady kameniva při výrobě cementových kompozitů s vylepšenými tepelně-izolačními vlastnostmi a druhá na využití dvou druhů tepelně zpracovaných kalů z čistíren odpadních vod jako částečné náhrady/přídavku k cementu při výrobě cementových past a malt. Vybrané druhotné suroviny byly nejprve podrobně analyzovány s ohledem na jejich plánovanou aplikaci a následně vyrobené vzorky byly charakterizovány z hlediska jejich základních fyzikálních, mechanických, tepelných a vlhkostních vlastností.

Klíčová slova: *cementové kompozity, využití odpadů, odpadní polypropylen, vypálený čistírenský kal, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti, vlhkostní vlastnosti*

Abstract:

With the development of the economy and the growth of the population, the amount of cement-based building materials produced, the consumption of energy and the production of various types of waste are rising worldwide. Unfortunately, the negative impact on the environment is inherently associated with this trend. The dissertation is divided into two main parts. The first one focuses on the use of four types of polypropylene waste as a partial substitution of aggregate in the production of cement-based composites with improved thermal-insulation properties and the second for the use of two types of thermally treated sludge from sewage treatment plants as a partial replacement/addition of the cement in the production of cement-based pastes and concretes. Selected secondary raw materials were first analyzed in detail with regard to their intended use, and subsequently the samples were characterized in terms of their basic physical, mechanical, thermal and moisture properties.

Keywords: *Cement-based composites, waste recovery, waste polypropylene, sewage sludge ash, mechanical properties, thermal properties, hygric properties*

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	3
Úvod.....	5
1 Přehled o současném stavu problematiky	7
1.1 Legislativa – výrobky z odpadů	7
1.2 Plastový odpad	10
1.2.1 Produkce plastových odpadů.....	10
1.2.2 Nakládání s plastovými odpady	13
1.2.3 Využití plastových odpadů ve stavebnictví.....	16
1.2.4 Polypropylen	20
1.2.5 Expandovaný polypropylen.....	22
1.2.6 Klasifikace polypropylenových částic jako lehkého kameniva do cementových kompozitů	23
1.3 Kaly z čistíren odpadních vod.....	25
1.3.1 Legislativa	25
1.3.2 Složení kalů	26
1.3.3 Produkce kalů	28
1.3.4 Nakládání s kaly	30
1.3.5 Využití tepelně zpracovaného kalu ve stavebnictví	33
1.3.5.1 Tepelné zpracování kalů.....	34
2 Cíl práce	37
3 Experimentální část.....	39
3.1 Použité suroviny.....	39
3.1.1 Odpadní polypropylen z výroby potrubí	39
3.1.2 Odpadní expandovaný polypropylen	42
3.1.3 Kal z řecké čistírny odpadních vod	45
3.1.4 Kal z polské čistírny odpadních vod	51
3.1.5 Pojivo	60
3.1.6 Plnivo	62
3.1.7 Voda	63
3.1.8 Silika VP4	64
3.1.9 Superplastifikátor	66
3.2 Přehled receptur.....	67
3.3 Příprava zkušebních těles	69
3.4 Popis prováděných zkoušek	72
3.4.1 Pevnost v tahu za ohybu.....	72
3.4.2 Pevnost v tlaku	73
3.4.3 Dynamický modul pružnosti	74
3.4.4 Konzistence čerstvého betonu – zkouška rozlíváním	75
3.4.5 Měrný povrch – metoda podle Blaina	75
3.4.6 Hustota matrice	76

3.4.7	Objemová hmotnost	76
3.4.8	Sypná hmotnost	77
3.4.9	Granulometrie.....	77
3.4.10	Distribuce velikosti částic	77
3.4.11	Distribuce velikosti pórů – metoda rtuťové porozimetrie	78
3.4.12	Pórovitost	78
3.4.13	Tepelné vlastnosti.....	79
3.4.14	Termické analýzy	80
3.4.15	Transport kapalné vody – metoda vertikální nasákavosti	81
3.4.16	Transport vodní páry – misková metoda bez teplotního spádu.....	82
3.4.17	Sorpční izotermy – metoda měření v klimatické komoře	83
3.4.18	Sorpční a desorpční izotermy – metoda DVS	84
3.4.19	Pucolánová aktivita	85
3.4.20	Vyluhovatelnost – obsah vyluhovatelných solí.....	86
3.4.21	Rentgenová fluorescenční analýza XRF	86
3.4.22	Rentgenová difrakční analýza XRD.....	87
4	Výsledky měření a diskuse	88
4.1	Plastový odpad	88
4.1.1	Odpadní polypropylen z výroby potrubí	88
4.1.2	Odpadní expandovaný polypropylen	111
4.2	Kaly z čistíren odpadních vod.....	120
4.2.1	Kal z řecké čistírny odpadních vod	120
4.2.2	Kal z polské čistírny odpadních vod	124
4.2.3	Hodnocení životního cyklu (LCA).....	131
4.2.4	Nákladová analýza	133
5	Závěr.....	134
	Literatura.....	139
	Seznam obrázků	158
	Seznam tabulek.....	162

Seznam použitých zkratek

GFRP	Polypropylen zesílený skelným vláknem
PET	Polyethylentereftalát
PE	Polyethylen
EPP	Expandovaný polypropylen
PP	Polypropylen
EPS	Expandovaný polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
LDPE	Nízkohustotní polyethylen
HDPE	Vysokohustotní polyethylen
PUR	Polyuretan
SSA	Vypálený kal z čistírny odpadních vod
ISOH	Informační systém odpadového hospodářství
ČSÚ	Český statistický úřad
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
TGA	Termogravimetrická analýza
DTG	Derivační termogravimetrie
STA	Simultánní termická analýza
DSC	Diferenční kompenzační kalorimetrie
XRD	Rentgenová difrakční analýza
XRF	Rentgenová fluorescenční analýza
EDS	Energo disperzní spektrometrie
EO	Počet ekvivalentních obyvatel
EOČ	Počet ekvivalentních obyvatel napojených na ČOV
DVS	Dynamické měření sorpce vodní páry
ČOV	Čistírna odpadních vod
PCB	Polychlorované bifenyly
v/c	Poměr záměsové vody a pojiva
LCA	Analýza životního cyklu
LCI	Inventarizace životního cyklu

Seznam použitých symbolů

c	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
c_v	$[\text{J m}^3 \text{K}^{-1}]$	objemová tepelná kapacita
φ	$[-]$	relativní vlhkost
κ	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	součinitel vlhkostní vodivosti
λ	$[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
μ	$[-]$	faktor difúzního odporu
r	$[\text{m}]$	poloměr pórů
R	$[\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}]$	molární plynová konstanta
R	$[\text{m}^2 \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$	tepelný odpor
U	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
t	$[\text{s}]$	čas
T	$[\text{K}]$	teplota
ψ	$[\%]$	pórovitost
ρ_v	$[\text{kg m}^{-3}]$	objemová hmotnost materiálu
ρ_{mat}	$[\text{kg m}^{-3}]$	hustota matrice materiálu
ρ_s	$[\text{kg m}^{-3}]$	sytná hmotnost
ρ_l	$[\text{kg m}^{-3}]$	hustota vody
A	$[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1/2}]$	absorpční koeficient
D	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	součinitel difúze vodní páry
δ	$[\text{s}]$	součinitel difúzní vodivosti
a	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	součinitel teplotní vodivosti
f_c	$[\text{MPa}]$	pevnost v tlaku
f_{cf}	$[\text{MPa}]$	pevnost v tahu za ohybu
E	$[\text{GPa}]$	Youngův dynamický modul pružnosti
S	$[\text{m s}^{-1/2}]$	sorptivita
α	$[\text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné roztažnosti
u	$[\text{kg kg}^{-1}; \%]$	hmotnostní vlhkost

Úvod

Beton je bezpochyby nejdůležitějším stavebním materiálem. Jeho celosvětová roční produkce je nyní více než 10 bilionů tun [1] a v blízké budoucnosti se dá očekávat rapidní nárůst jeho výroby, zejména v rozvojových zemích, jejichž ekonomiky rychle rostou. Kromě výborných mechanických vlastností betonu a jeho trvanlivosti, což jsou hlavní důvody pro jeho používání, jeho výroba přináší nepříjemné sekundární dopady na lidskou společnost a na přírodu. K výrobě takového objemu stavebního materiálu je potřeba obrovské množství přírodních zdrojů. Suroviny pro výrobu cementového slínku jsou těženy v lomech. Kamenivo, které tvoří přibližně 75 % celkového objemu betonu, je rovněž těženo v lomech nebo je vyráběno drcením kamenů. Hlavní environmentální dopady, související s těmito aktivitami, jsou zejména: (i) negativní změny dané lokality pro rostliny a zvířata; (ii) eroze půdy; (iii) znečištění vzduchu a vody; (iv) prach vzniklý při zpracování těžných a drcených materiálů způsobuje dráždění očí i dýchacího ústrojí; (v) v dotčených územích je výrazně zvýšena dopravní zátěž a hlučnost [2]. Pro výrobu cementového slínku je rovněž potřeba velkého množství energie a je při ní uvolňováno značné množství CO₂.

Stavební průmysl jako takový je v mnoha zemích jedním z největších konzumentů energie. Tuto energii lze rozdělit na tzv. svázanou spotřebu energie (anglický ekvivalent embodied energy), která souvisí s výstavbou budov včetně výroby stavebních materiálů a konstrukcí a zahrnuje rovněž údržbu, rekonstrukci a demolici budov, a na energii provozní (operational energy), spojenou s topením, chlazením, svícením atd. Pro vylepšení energetické náročnosti budov je třeba již při projektování myslet na uplatnění materiálů s vhodnými tepelně-izolačními parametry.

S celosvětovým růstem ekonomiky úzce souvisí stále se zvyšující množství odpadů ze všech sektorů lidské činnosti. Vzhledem k důležitosti ochrany životního prostředí je nutné hledat možnosti pro recyklaci a využití co největšího množství vzniklých odpadů. Zpracování některých odpadů, nebo vedlejších produktů, ve stavebnictví při výrobě betonu znamená velkou úsporu energie a představuje důležité přínosy pro životní prostředí [3].

Vybrané odpady mohou být ve stavebnictví aplikovány například jako náhrada pojiva, nebo jako náhrada kameniva v cementovém kompozitu. Tato práce se zaměřuje na obě zmíněné alternativy. Jako částečná náhrada písku při výrobě cementových kompozitů byly zkoumány odpadní plasty, jejichž použití redukuje výrobní náklady a váhu výsledného materiálu, a navíc výrazně zlepšuje jeho tepelně-izolační vlastnosti. V celosvětové literatuře je

většina prací týkajících se využití odpadních plastů jako kameniva zaměřena na polyethylentereftalát (PET) a vysokohustotní polyethylen (HDPE), přičemž studií souvisejících se zpracováním polypropylenu (PP), který po polyethylen (PE) tvoří druhý největší podíl plastu na celosvětovém trhu, je relativně málo. Navíc je ve většině případů zkoumán odpadní PP společně s dalšími druhy plastů nebo jiných odpadů, jako jsou popílek či dřevo. Navzdory velkému množství produkovaného PP je jeho recyklační podíl velmi nízký a nedosahuje ani 1 %. Proto je předkládaná práce zaměřena na zjištění možnosti využití čtyř různých typů odpadního polypropylenu pro výrobu cementových kompozitů s vylepšenými tepelně-izolačními vlastnostmi.

Jako částečná náhrada cementu při výrobě cementových kompozitů byly zkoumány vypálené kaly z čistíren odpadních vod. Množství tohoto odpadního proudu se v souvislosti s celosvětově narůstající životní úrovní stále zvyšuje. Kaly z různých městských čistíren odpadních vod se podle různých zdrojů z literatury kvalitativně velmi liší [4; 5], nicméně po tepelném zpracování většina z nich poskytuje materiál, který vykazuje pucolánovou aktivitu a je vhodný jako náhrada/přídavek k cementu. Tato práce se zabývá studiem dvou různých kalů z městských čistíren odpadních vod a jejich možným využitím ve stavebnictví. Protože je potřeba vzít v úvahu rovněž spotřebu energie při tepelném zpracování vybraných kalů, byla pro jejich vypalování zvolena teplota 700 °C, která je nižší než u běžně užívaných technik tepelného zpracování kalů z ČOV a umožňuje proto jak redukci energetické náročnosti, tak aplikaci méně technologicky sofistikovaných procesů.

1 Přehled o současném stavu problematiky

1.1 Legislativa – výrobky z odpadů

Nakládání s odpady a jejich využití podléhá ustanovením zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech. V tomto kontextu je důležitý zejména § 14, odstavec (2) tohoto zákona, který povoluje využití odpadů splňujících požadavky pro vstupní suroviny v zařízeních, která nejsou podle tohoto zákona určena k nakládání s odpady. Přitom nesmějí být porušeny zvláštní právní předpisy, s nimiž v souladu je zařízení provozováno, a právní předpisy na ochranu zdraví lidí a životního prostředí.

Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. v § 9a klade důraz na využívání odpadů jako druhotných surovin před jejich odstraňováním; § 9a zní takto:

„V rámci odpadového hospodářství musí být dodržována tato hierarchie způsobů nakládání s odpady:

- a) předcházení vzniku odpadů,
- b) příprava k opětovnému použití,
- c) recyklace odpadů,
- d) jiné využití odpadů, například energetické využití,
- e) odstranění odpadů.“

Při výrobě, do které jako surovina vstupuje odpad a jejímž výsledkem je výrobek, který již není v režimu odpadových předpisů, se dále uplatňuje § 3, odstavec (6) zákona o odpadech, který uvádí podmínky, za kterých přestává být odpad odpadem, a jeho znění je následující:

„Některé druhy odpadu přestávají být odpadem, jestliže poté, co byl odpad předmětem některého ze způsobů využití, splňuje tyto podmínky:

- a) věc se běžně používá ke konkrétním účelům,
- b) pro věc existuje trh nebo poptávka,
- c) věc splňuje technické požadavky pro konkrétní účely stanovené zvláštními právními předpisy nebo normami použitelnými na výrobky,
- d) využití věci je v souladu se zvláštními právními předpisy a nepovede k nepříznivým dopadům na životní prostředí nebo lidské zdraví a
- e) věc splňuje další kritéria, pokud jsou pro určitý typ odpadu stanovena přímo

použitelným předpisem Evropské unie.“

Výrobků, při jejichž výrobě byl použit odpad, se týká i ustanovení § 3, odstavce (7) zákona o odpadech, které zní:

„Pro konkrétní způsoby použití vedlejších produktů podle odstavce (5) a výrobků z odpadů podle odstavce (6) musí být splněna kritéria pro využití odpadů, pokud jsou stanovena.“

Tento paragraf je některými odborníky v odpadovém hospodářství dlouhodobě kritizován, neboť jde o snahu zákonodárců regulovat používání výrobků, tedy komodit, již mimo působnost zákona o odpadech, i nadále podle tohoto zákona.

Prakticky jediným předpisem, který může sloužit pro hodnocení plnění § 7, je vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadu na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. V ustanovení § 12, odstavec (2) této vyhlášky se říká, že obsahy škodlivin v sušině odpadů a výsledky ekotoxikologických testů odpadů využívaných na povrchu terénu nesmějí překročit limitní hodnoty ukazatelů stanovených v Příloze 10 [6; 7].

Využívání na povrchu terénu je v § 2 písmeno j) této vyhlášky definováno jako: „rekultivace povrchu terénu, vyrovnávání terénních nerovností a jiné úpravy terénu, vytváření uzavíracích vrstev skládky, rekultivace uzavřených skládek, zavážení vytěžených povrchových dolů, lomů, pískoven“.

Vyhláška č. 294/2005 Sb. prošla v roce 2016 rozsáhlou novelizací, která se týkala rovněž několika příloh. V Příloze 10 k vyhlášce č. 294/2005 Sb. jsou uvedeny tabulky č. 10.1, 10.2, 10.3 (týká se pouze sedimentů) a 10.4. Tabulka č. 10.1 určuje nejvyšší přípustné koncentrace škodlivin v sušině a tabulky č. 10.2 a 10.4 udávají požadavky na výsledky ekotoxikologických testů; přičemž v tabulce č. 10.2 jsou uvedeny původní zkoušky akutní toxicity, prováděné pouze s výluhem z odpadů, zatímco tabulka č. 10.4 již obsahuje upravenou baterii testů, včetně jedné zkoušky v pevné fázi. Výše uvedené tabulky Přílohy 10 k vyhlášce č. 294/2005 Sb. jsou zobrazeny v Tab. 1-3.

Tab. 1: Tabulka č. 10.1 (vyhláška č. 294/2005 Sb.): Limitní koncentrace škodlivin v sušině odpadů

Ukazatel	Jednotka	Limitní hodnota
Kovy		
As	mg/kg sušiny	10
Cd	mg/kg sušiny	1
Cr celk.	mg/kg sušiny	200
Hg	mg/kg sušiny	0,8
Ni	mg/kg sušiny	80
Pb	mg/kg sušiny	100
V	mg/kg sušiny	180
Monocyklické aromatické uhlovodíky (nehalogenované)		
BTEX	mg/kg sušiny	0,4
Polycyklické aromatické uhlovodíky		
PAU	mg/kg sušiny	6
Chlorované alifatické uhlovodíky		
EOX	mg/kg sušiny	1
Ostatní uhlovodíky (směsné, nehalogenované)		
Uhlovodíky C10-C40	mg/kg sušiny	300
Ostatní aromatické uhlovodíky (halogenované)		
PCB	mg/kg sušiny	0,2

Tab. 2: Tabulka č. 10.2 (vyhláška č. 294/2005 Sb.): Požadavky na výsledky ekotoxikologických testů

Testovaný organismus	Doba působení	I.	II.
Ryba <i>Poecilia reticulata</i> , nebo <i>Brachydanio rerio</i>	96 hodin	ryby nesmí vykazovat v ověřovacím testu výrazné změny chování ve srovnání s kontrolními vzorky a nesmí uhynout ani jedna ryba	ryby nesmí vykazovat v ověřovacím testu výrazné změny chování ve srovnání s kontrolními vzorky a nesmí uhynout ani jedna ryba
Perloočka <i>Daphnia magna</i> Straus	48 hodin	procento imobilizace perlooček nesmí v ověřovacím testu přesáhnout 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky	procento imobilizace perlooček nesmí v ověřovacím testu přesáhnout 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky
Řasa <i>Desmodesmus subspicatus</i> nebo <i>Pseudokirchnerella subcapitata</i>	72 hodin	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice růstu řasy větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice nebo stimulace růstu řasy větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky
Semeno <i>Sinapis alba</i>	72 hodin	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice růstu kořene semene větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky	neprokáže se v ověřovacím testu inhibice nebo stimulace růstu kořene semene větší než 30 % ve srovnání s kontrolními vzorky

Tab. 3: Tabulka č. 10.4 (vyhláška č. 294/2005 Sb.): Požadavky na výsledky ekotoxikologických testů

Zkušební organismus	Doba působení	I.	II.
Bakterie <i>Vibrio fischeri</i>	15 minut	neprokáže se ve zkoušce	neprokáže se ve zkoušce
	a 30 minut	inhibice světelné emise bakterií větší než 20 % při expozici 15 minut a ani při expozici 30 minut	inhibice nebo stimulace světelné emise bakterií větší než 20 % při expozici 15 minut a ani při expozici 30 minut
Perloočka <i>Daphnia magna</i> Straus	48 hodin	procento imobilizace perlooček nesmí ve zkoušce přesáhnout 20 %	procento imobilizace perlooček nesmí ve zkoušce přesáhnout 20 %
Řasa <i>Desmodesmus subspicatus</i>	72 hodin	neprokáže se ve zkoušce inhibice růstu řas větší než 20 % ve srovnání s kontrolou	neprokáže se ve zkoušce inhibice nebo stimulace růstu řas větší než 20 % ve srovnání s kontrolou
Salát <i>Lactuca sativa</i>	120 hodin	neprokáže se ve zkoušce inhibice růstu kořene salátu větší než 30 % ve srovnání s kontrolou	neprokáže se ve zkoušce inhibice nebo stimulace růstu kořene salátu větší než 30 % ve srovnání s kontrolou

Zkušební metody pro ekotoxikologické testy jsou uvedeny v těchto předpisech:

ČSN EN ISO 7346-2 [8], ČSN EN ISO 6341 [9], ČSN EN ISO 8692 [10], Metodický pokyn MŽP [11], ČSN EN ISO 11348-1,2 [12; 13], ČSN EN ISO 11269-1 [14].

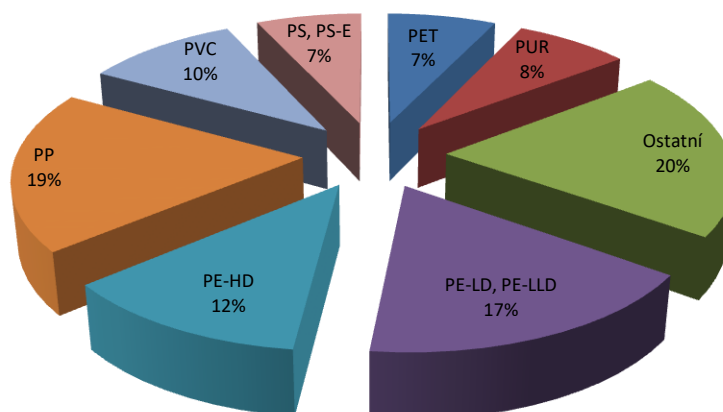
Pokud výrobce chce výrobek s obsahem odpadů využívat na povrchu terénu, je potřeba, aby byly splněny výše uvedené požadavky Přílohy č. 10; přitom platí, že pro provedení a hodnocení ekotoxikologických testů lze použít tabulku č. 10.2 nebo 10.4. Navíc je v § 12 odstavec (2) vyhlášky č. 294/2005 Sb. uvedena možnost tyto ukazatele rozšířit o další, pokud je to nutné z hlediska ochrany zdraví a životního prostředí.

1.2 Plastový odpad

1.2.1 Produkce plastových odpadů

V poslední době je po celém světě pozorován vzrůst spotřeby plastových materiálů, který vede k velkému nárůstu odpadů souvisejících s výrobou a používáním plastů [15]. Od roku 1950, kdy se ve světě vyrobilo a spotřebovalo 1,5 milionů tun plastů, dosáhla světová úroveň

v roce 2016 výše 335 milionů tun, což představuje průměrný roční nárůst o téměř 9 %. Pro rok 2020 je prognóza výroby plastů na světě 400 milionů tun, pro rok 2050 více než 700 milionů tun [16; 17]. Průměrná roční produkce plastů v západní Evropě se pohybuje kolem 60 milionů tun, což znamená cca 25 milionů tun plastového odpadu ročně [18; 17]. To, vzhledem k velmi nízké biodegradabilitě tohoto typu odpadu, představuje velký tlak na životní prostředí [19]. Na trhu v odvětví zpracování plastů převládají plastové obaly (39,9 %), následuje stavebnictví (19,7 %). Co se týká jednotlivých typů plastů na trhu, nejvíce zastoupeny jsou polyethyleny (dohromady PE-LD a PE-HD 29 %); druhý největší podíl na trhu patří polypropylenu (19 %) [20], viz. Obr. 1.



Obr. 1: Rozdělení plastů na trhu v EU28+Norsko+Švýcarsko podle typu, rok 2015 [20]

Podíl jednotlivých plastů v odpadech se poněkud liší od podílů plastů na trhu, což souvisí s různou dobou životnosti jednotlivých plastových výrobků. Z hlediska životnosti aplikací plastů se jedná z asi 40 % o dlouhodobé aplikace a z 60 % o krátkodobé aplikace, nejčastěji o obaly pro potraviny [21]. V Tab. 4 jsou uvedeny podíly jednotlivých druhů plastů v odpadech v EU27+Norsko+Švýcarsko v roce 2010.

Tab. 4: Podíl jednotlivých plastů v odpadech v roce 2010 [22]

Druh plastu	%
Polyethyleny (PE)	41,9
Polypropylen (PP)	17,5
Polyethylentereftalát (PET)	11,9
Polyvinylchlorid (PVC)	8,0
Polystyreny (PS, EPS)	7,6
Polyuretany (PUR)	2,9
Ostatní	4,5

Typy plastů, jak se podílely na stavebních plastových odpadech v EU27+Norsko+Švýcarsko v roce 2010, prezentuje Tab. 5.

Tab. 5: Podíl jednotlivých plastů ve stavebních odpadech [22]

Druh plastu	%
Polyvinylchlorid (PVC)	44,7
Polyethyleny (PE)	13,2
Polystyreny (PS, EPS)	12,9
Polyuretany (PUR)	8,8
Polypropylen (PP)	5,1
Ostatní	12,6

Tab. 6 uvádí podíly odpadních plastů z jednotlivých aplikací ve stavebnictví v EU27+Norsko+Švýcarsko v roce 2010.

Tab. 6: Podíly odpadních plastů z jednotlivých aplikací ve stavebnictví [22]

Druh plastu	%
Izolace	22,0
Potrubí a klimatizace	20,5
Podlahy a obklady	19,0
Ostatní profily	9,9
Fólie	8,8
Okna	7,0
Ostatní	12,8

V České republice bylo v roce 2015 dle údajů z Informačního systému o odpadech (dále ISOH) vyprodukováno více než 285 tisíc tun plastového odpadu. Přehled produkce plastových odpadů podle vybraných katalogových čísel Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. ukazuje Tab. 7. Všechny tyto plastové odpady jsou kategorizovány jako ostatní odpad „O“.

Tab. 7: Přehled produkce plastových odpadů v České republice v roce 2015 dle ISOH

Zařazení odpadu		Množství
		[t]
07 02 Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání plastů, syntetického kaučuku a syntetických vláken	07 02 13 Plastový odpad	73 553
15 01 Obaly (včetně odděleně sbíraného komunálního obalového odpadu)	15 01 02 Plastové obaly	167 133
16 01 Vyřazená vozidla (autovraky) z různých druhů dopravy (včetně stavebních strojů) a odpady z demontáže těchto vozidel a z jejich údržby	16 01 19 Plasty	2 370
17 02 Dřevo, sklo a plasty	17 02 03 Plasty	8 946
20 01 Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01)	20 01 39 Plasty	33 604

Způsob sběru odpadních plastů vychází z nařízení EU k odpadům z obalů, stavebnictví, automobilů a elektroniky, přičemž členské státy mohou aplikovat vlastní přístupy k plnění cílů prostřednictvím soukromých nebo státem subvencovaných firem. Nejčastěji využívaným systémem sběru odpadních plastů z obalových aplikací v ČR je systém Eko-Kom, který je na evropské úrovni zastřešen organizací PRO EUROPE [21].

1.2.2 Nakládání s plastovými odpady

Udržitelný rozvoj výroby, zpracování a spotřeby se neobejde bez efektivního řešení využití odpadů po skončení jejich životnosti. Odpadní plasty je nutno upotřebit jako surovinový, eventuelně energetický zdroj. Významnou roli hraje určení kritérií a momentu, kdy se odpadní plast stává surovinou [16]. To řeší Evropská komise již několik let prostřednictvím IPTS (Institut for Prospective, Technological Studies Seville, Španělsko). Koncem roku 2012

byla dána k veřejné diskusi první pracovní verze dokumentu „End-of-Waste Criteria for Waste Plastic for Conversion – Technical Proposals“. Důležitou kapitolou v tomto dokumentu je „Sources of Waste Plastic“. Definiuje jako samostatné podíly postindustriální (před-uživatelské) odpadní plasty, které vznikají v průběhu výroby primárních plastů a při jejich zpracování na finální výrobky. Tento proud nebývá obvykle statisticky podchycen v národních statistikách. Jejich další zpracování je obvykle bezproblémové [16]. Technologický odpad se nejčastěji recykluje tzv. recyklací technologického odpadu, která spočívá v jeho rozdrčení, po kterém může následovat případná regranulace. Jak drť, tak regranulát se obvykle uplatní opět při výrobě. Uvádí se, že přídavek takového recyklátu v množství 5-15 % neovlivní zásadně vlastnosti finálního výrobku [Lednická, 2006].

V roce 2013 vydala Evropská komise k diskusi „Zelenou knihu – Evropská strategie pro řešení problematiky plastového odpadu v životním prostředí“. Kniha se podrobně zabývá tématem řízení odpadového hospodářství plastů, včetně popisu příslušné legislativy [23].

Výbor regionů EU vydal v roce 2013 k Zelené knize mimo jiné tato stanoviska [24]:

Výbor regionů

- podporuje požadavek Evropského parlamentu a vyzývá Evropskou komisi, aby přijala **zákaz ukládání plastů a vysoce hořlavého odpadu na skládky do roku 2020** a zavedla specifické a ambiciózní cíle v oblasti předcházení vzniku odpadu, přípravy na opětovné použití a recyklaci plastového odpadu, které by byly harmonizovány ve všech příslušných směrniciích...;
- **prosazuje, aby se v budoucích stavebních konstrukcích povinně využíval určitý objem recyklátu.**

K diskusi o Zelené knize se konala v září 2013 konference „The role of plastic waste in a circular economy“, které se zúčastnilo, kromě jiných respondentů, 14 národních ministerstev pro životní prostředí. Většina diskutujících se shodla na brzkém ukončení skládkování odpadních plastů a požadovala zvýšení podílu materiálové recyklace [16].

Skládkování odpadních plastů v EU28+Norsko+Švýcarsko v roce 2014 dosáhlo hodnoty 30,8 % (tj. 8,0 milionů tun) a značně se liší v jednotlivých zemích. Od roku 2006 do roku 2014 vzrostlo množství recyklovaných plastových odpadů ze 4,7 na 7,7 milionů tun, což představuje nárůst o 64 % [17]. Vývoj nakládání s odpadními plasty v EU28+Norsko+Švýcarsko demonstruje Tab. 8.

Tab. 8: Nakládání s odpadními plasty v EU28+Norsko+Švýcarsko v letech 2006–2014 [17]

	Množství plastových odpadů [t.10 ⁶]		Podíl nakládání [%]	
	2006	2014	2006	2014
Materiálová recyklace	4,7	7,7	19,1	29,7
Energetické využití	7,0	10,2	28,5	39,5
Skládkování	12,9	8,0	52,4	30,8

Situaci ohledně recyklace plastů podle jednotlivých druhů plastových odpadů v USA mapuje Tab. 9.

Tab. 9: Množství plastů podle jednotlivých typů v komunálním odpadu v USA v roce 2012 [25]

Typ odpadního plastu	Množství plastových odpadů [t.10 ³]	Množství recyklovaných plastových odpadů [t.10 ³]	Podíl recyklace [%]
PET	4 520	880	19,5
HDPE	5 530	570	10,3
LDPE/LLDPE	7 350	390	5,3
PP	7 190	40	0,6
PS	2 240	20	0,9
Ostatní	4 000	900	22,5

V USA, podobně jako v EU, patří PP mezi plasty s největší produkcí v porovnání s jinými typy polymerů. Jeho podíl recyklace je nicméně velice nízký, pouze 0,6 %.

Přes rostoucí dopad plastového odpadu na životní prostředí není tato problematika v EU upravena zvláštními předpisy. Rámcová směrnice o odpadech 2008/98/EC stanovuje obecný cíl pro recyklaci odpadu z domácnosti, který se mimo jiné vztahuje i na plastový odpad. Směrnice 2008/98/EC stanovuje také hierarchii v oblasti odpadů, v níž se dává přednost předcházení vzniku odpadů, jejich opětovnému využití a recyklaci před energetickým využitím a odstraněním. Přetrvává však ostrý kontrast mezi požadavky stanovenými v právních předpisech a skutečným nakládáním s odpady [23].

Nejčastější techniky recyklace plastových odpadů shrnul Al-Salem a kol. [26] takto:

- recyklace technologického plastového odpadu nebo jednodruhového plastového odpadu zpět do konvenční výroby plastových výrobků,
- mechanická recyklace, což je proces vedoucí ke zpracování plastových odpadů tak, aby bylo možné je opět užít pro výrobu plastových produktů. Proces spočívá v tavení, drcení nebo granulaci vhodně tříděného plastového odpadu,
- chemická recyklace je založena na převedení plastových odpadů na jejich monomery. Výsledný produkt může být dále zpracován v rafinériích, v petrochemickém a chemickém průmyslu,
- energetická recyklace znamená využití plastových odpadů k výrobě energie ve formě tepla, páry a elektřiny.

V současnosti se do popředí dostává výzkum recyklace plastových odpadů ve stavebním průmyslu.

1.2.3 Využití plastových odpadů ve stavebnictví

V roce 2010 představovaly budovy 32 % celosvětového konečného využití energie. Zvyšování spotřeby energie v budovách je za posledních dvacet let v USA a v zemích EU relativně malé díky zlepšení energetické účinnosti a podpoře obnovitelných zdrojů energie, nicméně vzhledem k rostoucím ekonomikám rozvojových zemí lze celosvětově očekávat další nárůst spotřeby energie související s budovami [27].

V roce 2014 přijala Evropská Komise ambiciózní balíček EU 2030, týkající se klimatu a energie, ve kterém ustanovila tři klíčové cíle pro rok 2030. Jsou to:

- nejméně 40 % snížení emisí skleníkových plynů (z úrovně roku 1990),
- nejméně 27 % podíl obnovitelné energie,
- nejméně 27% zlepšení energetické účinnosti [28].

Co se týká výše zmíněného tématu, je v evropských zemích speciální pozornost věnována budovám, což souvisí s jejich velkou spotřebou energie a rovněž s možnými energetickými úsporami. Technologické inovace nabízejí nová řešení, díky kterým jsou technologie používány spolu s optimálními návrhy konstrukcí staveb [29; 30]. Pro návrh budovy s požadovanými tepelnými parametry a příznivou energetickou bilancí je důležitým krokem vhodný návrh obálky a uplatnění materiálů s velmi dobrými tepelně-izolačními vlastnostmi.

Aplikace plastových odpadů ve stavebnictví může tedy představovat efektivní řešení jak problému se snížením environmentálních dopadů plastů, tak s vývojem stále udržitelného stavebnictví, zejména vzhledem k vylepšeným tepelně-izolačním vlastnostem výsledných kompozitů s obsahem plastů.

Díky aktuálnosti tohoto tématu bylo provedeno mnoho studií s cílem začlenit plastový odpad do stavebních procesů. Jednou z možností je nahrazení přírodních plniv v betonech a maltách plastovými odpady, tyto aplikace mají ovšem přímé důsledky na chování betonů či malt v závislosti na typu a formě užitého plastu [31].

Část studií se zabývá **plasty ve formě plastových vláken** [15; 32; 33; 34; 35]. Bylo zjištěno zvýšení pevnosti v tahu za ohybu betonu s přidanými plastovými vlákny [34; 35]. Data byla nicméně poskytnuta pouze pro některé vlastnosti a vzhledem k tomu, že byly plasty aplikovány ve formě plastových vláken, jejich množství v betonu bylo velmi malé v porovnání s jejich upotřebením jako kameniva nebo plniva.

Co se týká využití **plastových odpadů ve formě vloček, peletek nebo drti jako náhrady kameniva či plniva** cementových kompozitních materiálů, lze nalézt v literatuře nejčastěji užití polyethylentereftalátu (PET) [15; 31; 36; 37; 38; 39]. Je popisován výzkum lehkého kameniva založeného na polymerních odpadech jako materiálu při snižování nákladů a objemové hmotnosti stavebních materiálů typu beton nebo malta a ke zlepšení jejich tepelně-izolačních vlastností [15; 37; 39].

Studii, zabývajících se aplikací odpadního PP nebo odpadního plastu zesíleného skelnými vlákny (Glass Fibre Reinforced Plastic – GFRP) jako náhrady kameniva nebo plniva, je relativně málo; navíc tyto typy plastů jsou zkoumány ve směsích s jinými druhy plastů nebo s jinými odpady, jako je např. elektrárenský popílek nebo dřevo. Kombinací odpadního PET a odpadního plastu zesíleného skelnými vlákny se zabývá práce Corinaldesiho a kol. [36]. Kompozitní materiál GFRP je zde ve formě odpadní polyesterové pryskyřice se skelnými vlákny a je míchán v různých poměrech s PET, cementem a vápnem pro výrobu lehkých omítek. Aplikaci GFRP při výrobě betonu a cementových kompozitů řeší rovněž studie Asokana a kol. [40].

Využití směsi drcených odpadních plastů, obsahující HDPE, PVC a PP při přípravě betonu pro stavbu nízkoenergetických budov popisuje práce Elzafraneyho a kol. [41]. Byly postaveny dvě budovy, jedna z běžného betonu a jedna z betonu s obsahem recyklovaných plastů. Autoři uvádějí pokles roční spotřeby energie na vytápění o 8 % a doporučují uplatnění betonu s obsahem plastů zejména pro podzemní části budov a pro podlahy.

Směs recyklovaných polyolefinů (PP a PE) pod obchodním názvem R-Pomix „Polimar“ byla studována při výrobě malt [18]. Byl pozorován pokles hustoty matrice i objemové hmotnosti se vzrůstající náhradou písku plastem. S tím souvisí rovněž snížení mechanické odolnosti malt. Se stoupající náhradou písku plastem nicméně významně klesal součinitel tepelné vodivosti a faktor difúzního odporu.

Polypropylen (PP) z odpadních podlahových desek a odpadních automobilových nárazníků byl zkoumán jako náhrada písku při výzkumu lehčeného samozhutitelného betonu s obsahem ultrajemného elektrárenského popílku a expandovaného keramzitu [42]. Velikost částic plastového odpadu byla 1,5-4 mm (Obr. 2) a hustota matrice 950 kg/m^3 . Písek byl nahrazován v množství 10, 15, 20 a 30 objemových %.



Obr. 2: PP odpad z podlahových desek a automobilových nárazníků [42]

Objemová hmotnost a modul pružnosti se stoupající náhradou písku plastem klesaly, pevnost v tlaku a v tahu ohybem do 15 % náhrady písku plastem stoupaly, pak byl pozorován jejich pokles.

Ozbakkaloglu a kol. [43] studovali využití odpadního granulovaného PP jako náhrady kameniva. Zkoumaný PP odpad měl hustotu matrice 910 kg/m^3 a velikost částic max. 9,5 mm (Obr. 3).



Obr. 3: PP odpad [43]

Byly vyrobeny dvě hlavní záměsi – jedna s užitím plastifikátoru a druhá bez plastifikátoru. Záměsi se lišily rovněž vodním součinitelem. Nahrazováno bylo hrubé kamenivo v množství 10, 20 a 30 objemových %. Se stoupající náhradou kameniva plastem docházelo ke zhoršování zpracovatelnosti a snižování objemových hmotností čerstvé i zatvrdlé směsi v porovnání s referenčními vzorky. Byly rovněž získány nižší hodnoty mechanických vlastností. Lepší mechanické vlastnosti vykazovaly směsi s plastifikátorem.

Obecně lze konstatovat, že aplikace plastových odpadů jako kameniva nebo plniva vede ke zlepšení tepelně-izolačních vlastností výsledného kompozitního materiálu a ke snížení pevnosti, která ovšem nijak nesnižuje možnosti jeho upotřebení v aplikacích, kde není vyžadována nosná funkce [18]. Je potřeba rovněž zmínit, že recyklací plastových odpadů ve formě kameniva lze významně snížit množství přírodního kameniva, které se běžně používá při výrobě cementových kompozitů a tím snížit související environmentální dopady spojené s jeho těžbou, výrobou a dopravou.

Jiným způsobem recyklace odpadních plastů ve stavebnictví je jejich **využití jako pojiva**. V práci Čermáka a kol. [21] byla zkoumána možnost zpracování odpadního vícedruhového nevyčištěného plastu (odpadní PET lahve včetně víček a etiket z PE) při výrobě stavebních dílců (dlaždic). Odpadní plasty jsou nadrceny na frakci 2-10 mm. Plnivo, drobné kamenivo frakce 0-4 mm, je zahřáto na určenou teplotu (cca 260 °C) a smícháno s pojivem (drcenými plasty). Při homogenizaci v míchačce dojde k tavení pojiva předáním tepla od horkého plniva a směs je následně lisována do finálního tvaru. Proces je ve fázi provozních zkoušek na technologické lince. Po ověření vlastností produktu a nastavení parametrů výrobní linky se předpokládá upotřebení různých inertních stavebních recyklátů jako plniva v plastbetonové směsi.

Studována byla rovněž možnost aplikace odpadních plastů do stavebních konstrukcí ve formě **stěnových plastbetonových panelů**. Dissanayake a kol. [44] zkoumali využití odpadního extrudovaného polystyrenu (EPS) jako náhrady nově vyrobeného EPS ve stěnových plastbetonových panelech. Cílem bylo nahradit 50 % nového EPS recyklovaným.

Tvar a velikost plastových částic

Co se týká upotřebení plastových odpadů ve formě vloček, peletek nebo drti jako náhrady kameniva či plniva cementových kompozitních materiálů, bylo zjištěno, že velký vliv na zpracovatelnost čerstvého cementového kompozitu, a rovněž na mechanické vlastnosti výsledného ztvrdlého kompozitu, má velikost plastových částic a jejich tvar. Pokud částice mají ostré hrany, zpracovatelnost i mechanické vlastnosti se zhoršují [38; 42; 45]. Podlouhlé

nebo destičkovité částice mohou mít pozitivní vliv na houževnatost betonu [42; 46; 47]. Obecně jsou vhodné částice se sférickými hranami a cylindrickými tvary [42].

1.2.4 Polypropylen

Polypropylen je celosvětově jedním z nejpoužívanějších typů plastů. Náleží mezi termoplasty skupiny polyolefinů a vyrábí se polymerací plynného propylenu za přítomnosti vhodného katalyzátoru. Vzhledem k asymetrii monomerů může být prostorové vkládání $-CH_3$ skupin do řetězce provedeno několika způsoby, přičemž mohou vznikat tři různé izomery, lišící se fyzikálními i chemickými vlastnostmi [48]:

- isotaktický PP (i-PP) má methylové skupiny uspořádané na stejné straně uhlíkového řetězce a patří mezi částečně krystalické polymery. Tento izomer tvoří více než 90 % komerčně produkovaného PP,
- syndioataktický PP (s-PP) má methylové skupiny uspořádané střídavě podél uhlíkového řetězce. Průmyslová výroba s-PP začala před méně než 15 lety,
- ataktický PP (a-PP) má methylové skupiny uspořádané náhodně podél uhlíkového řetězce, patří mezi amorfní polymery a jeho komerční význam je velmi malý.

Následně uváděné vlastnosti PP se vztahují k izomeru i-PP. Stupeň krystalinity PP v závislosti na výrobním procesu dosahuje 60-75 %, je neprůhledný a jeho hustota je výrazně nižší než u ostatních nelehčených plastů. PP patří do skupiny nepolárních materiálů, jejichž povrch není rozpustný, nebobtná a nenavlhá. Lepení je proto obtížné, je však velmi dobře svařitelný. Oproti polyethyleny je méně propustný pro plyny a páry. Je odolný vůči polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím, a to i za vyšších teplot. Vyznačuje se vysokou pevností, tuhostí, tvrdostí a odolností proti otěru. Má dobrou tvarovou stálost za zvýšených teplot (dlouhodobě až 100 °C). Dobře odolává vzniku napět'ových trhlinek. Používá se pro výrobu fólií, elektroizolačního materiálu, zdravotnických potřeb, mechanicky i chemicky odolných textilních vláken, tvarovek a armatur, potrubních systémů, jímek, nádrží a bazénů a v automobilovém průmyslu. Po recyklaci pak slouží pro výrobu kancelářských potřeb, květináčů, ale rovněž k výrobě součástek pro elektroprůmysl, automobily apod. [49; 50; 51].

Základní vlastnosti polypropylenu uvádí Tab. 10.

Tab. 10: Fyzikální vlastnosti polypropylenu [50; 51]

Ukazatel	Jednotka	Hodnota
Hustota matrice	[kg/m ³]	900-910
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	22-32
Tažnost	[%]	120-700
Mez pevnosti	[MPa]	34-38
Houževnatost	[kJ/m ²]	10-15
Teplota tání	[°C]	160-170
Navlhavost	[%]	0,1

V závislosti na vybrané aplikaci a na procesu výroby lze připravit různé typy PP na bázi i-PP. Mezi ně patří zejména PP random kopolymery (PP-R), PP vyztužené skelnými vlákny (PP-GF) a expandovaný PP (EPP).

PP random kopolymery: ko-monomerní jednotky jsou u random kopolymerů uspořádány náhodně podél molekuly polypropylenového řetězce; tyto polymery obvykle obsahují 1 až 7 % ethylenu. Hlavním důvodem kopolymerace je snížení teploty skelného přechodu PP, což rozšiřuje jeho aplikační možnosti v podmínkách pod bodem mrazu. Dochází tím ke zvýšení rázové houževnatosti, současně se však úměrně obsahu ethylenu snižuje modul pružnosti [52; 53; 54].

PP plněný skelnými vlákny: skelná vlákna patří mezi nejčastější plniva PP. Vlákna se před kompaundací s polymerem opatřují apretací chránící jejich povrch před poškozením, jejich obvyklý průměr je 3,5 - 24 μm. Krátká skelná vlákna o délce cca 3 mm jsou označována jako GF, nebo SGF. Hlavními přínosy jejich aplikace je zvýšení modulu pružnosti a zvýšení teplotní odolnosti, která se může blížit až teplotě tání [55].

V této dizertační práci byly zkoumány odpadní polypropyleny (PP-R a PP-GF) z výroby potrubí. Mezi vlastnosti, které uvádí prodejce Akvina servis s.r.o. [56], a které jsou důležité i pro upotřebení tohoto druhu plastu ve stavebnictví, patří zejména:

- životnost nejméně 50 let,
- neutrální chuť a zápach,
- dobrá chemická odolnost,
- pevnost,
- fyziologicky neškodný,
- bakteriologicky neutrální,

- uchování tepla a úspora energie,
- odolnost proti vysokým teplotám (100 °C),
- zvuková izolace,
- recyklovatelnost.

Ve stavebnictví by bylo možné využít rovněž odpadní expandovaný polypropylen, o kterém pojednává následující kapitola.

1.2.5 Expandovaný polypropylen

Expandovaný polypropylen (EPP) je jedním z nejvíce celosvětově produkováných pěnových polymerů. V současnosti se pro výrobu expandovaného polypropylenu nejčastěji uplatňují fyzikální metody za přítomnosti zpěňovacího činidla CO₂. Jsou používány i chemické metody s využitím anorganických (NaHCO₃ a NH₄HCO₃) nebo organických (azo sločeniny, deriváty močoviny atd.) nadouvadel.

Expandovaný polypropylen je vyráběn v České republice společností JSP International s.r.o. v Chebu. Výroba probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je příprava minipelet z polypropylenového granulátu. Teprve z těchto minipelet je totiž možné vyrobít charakteristicky „napěněný“ expandovaný polypropylen, neboť zrna polypropylenového granulátu by pro tento účel byla příliš velká. Výrobní proces probíhá tak, že granulát se roztaví v extrudéru, z něhož vystupuje 48 tenkých vláken, tzv. „špaget“. Ty se ochladí ve vodní lázni, osuší a nasekají na požadované minipelety, které si lze představit jako drobné krátké jehličky. Vyrobené minipelety pak společně s dalšími přísadami vstupují do autoklávu, kde za působení vysokého tlaku cca 20 bar, teploty kolem 150 °C a oxidu uhličitého jako nadouvadla probíhá příprava k expanzi. K té však nedochází ve vlastním autoklávu, ale až v okamžiku, kdy minipelety opouštějí autokláv. Každá minipeleta při expanzi mnohonásobně zvětší svůj objem. Řízením technologických parametrů lze dosáhnout požadované měrné hmotnosti suroviny, která se může pohybovat v rozmezí od 18 do 250 g/l [57].

EPP má nejen výborné vlastnosti PP, ale má i své vlastní přednosti. Mezi ně patří například tepelná odolnost 40-160 °C, dobré mechanické vlastnosti (pružnost, pevnost v tlaku, schopnost velké absorpce energie) a zejména homogenní a uzavřená buněčná struktura, která má za následek výborné akustické a tepelně-izolační vlastnosti, a to i ve vlhkém prostředí. Je vysoce houževnatý ve vztahu k objemové hmotnosti a minimálně nasákavý. Vyznačuje se rovněž dobrou chemickou odolností a na rozdíl od jiných pěnových polymerů, jako např.

polystyrenu, při hoření neprodukuje toxické plyny. Je 100 % recyklovatelný, neobsahuje změkčovadla ani halogenovaná nadouvadla. K typickým aplikacím EPP patří prvky pasivní bezpečnosti, protože materiál je díky konstrukci z uzavřených pěnových buněk izotropický a nabízí stejné vlastnosti ve všech směrech bez ohledu na směr nárazu. EPP tak představuje ideální materiál pro výrobu sportovních a záchranných potřeb (záchranné vesty, bóje, surfovací prkna, gymnastické a antivibrační podložky atd.), je využíván v automobilovém průmyslu a ve stavebnictví a rovněž při výrobě obalů v potravinářství [54; 58; 59].

Ve stavebnictví je EPP používán například ve formě obkladových desek k izolaci budov; např. Young-Sun a Ki-Hyung ve své práci uvádějí, že v závislosti na hustotě (11,0 - 21,0 kg/m³) se tepelná vodivost desek vyrobených z EPP pohybuje mezi (0,038 až 0,044 W/(m·K)) [58].

1.2.6 Klasifikace polypropylenových částic jako lehkého kameniva do cementových kompozitů

Plasty vhodné pro recyklaci mohou být obecně získávány z různých zdrojů, což znamená, že plastové částice byly podrobeny různým druhům přepracování a skladování. Mohou tedy v závislosti na stupni jejich degradace vykazovat odlišné vlastnosti oproti primárním plastům.

Plnivo na bázi PP částic je možné kategorizovat z mnoha úhlů pohledu, např. dle jejich tvaru, velikosti částic, metody zpracování, typu polypropylenu atd., přičemž různé aspekty této klasifikace jsou spolu často úzce svázány. V Tab. 11 je prezentována klasifikace PP částic jak z hlediska jejich vlastností, tak z hlediska využití jako náhrady kameniva v cementových kompozitech.

Tab. 11: Klasifikace odpadních polypropylenových částic jako plniva do cementových kompozitů [60]

Klasifikace na základě původu a vlastností PP	
Typ PP odpadu	PP homopolymer (PPH)
	PP random kopolymer (PP-R)
	PP vyztužený skelnými vlákny (PP-GF)
	Expandovaný PP (EPP)
Původ PP odpadu	PP pocházející z produkce primárního plastu nebo jeho zpracování na finální výrobky
	PP vytríděný z komunálního pevného odpadu, z konstrukčního a demoličního odpadu atd.
Metoda zpracování	Drcení (ekonomická metoda)
	Regranulace (umožňuje získat jednotnější tvary a vlastnosti)
Tvar	Nepřavidelný tvar s ostrými hranami (pocházející z drcení)
	Válcovité tvary a hladký povrch (pocházející z regranulace)
Velikost částic	Hrubé kamenivo (> 4 mm)*
	Jemné kamenivo (< 4 mm)*
Distribuce velikosti částic	Jednotná velikost částic (pocházející z regranulace nebo získaná proséváním)
	Různá velikost částic (pocházející z drcení)
Klasifikace z hlediska použití PP v cementových kompozitech	
Typy nahrazení přírodního kameniva	Částečné nahrazení (hmotnostní %)
	Částečné nahrazení (objemová %)
	Plné nahrazení
Použití plastifikátoru nebo jiných příměsí	Ne
	Ano (zejména vhodné při aplikaci EPP)
Nahrazení přírodního kameniva z hlediska druhů odpadu	Jeden druh PP odpadu
	Jeden druh PP odpadu ve směsi s jiným druhem PP odpadu, případně s jiným typem plastového odpadu (PET, HDPE atd.)
	PP odpad ve směsi s jiným typem odpadu, např. popílkem

* Dolní a horní hranice velikosti částic není striktně limitována

1.3 Kaly z čistíren odpadních vod

Kal je nevyhnutelným odpadem při čištění odpadních vod. Cílem čištění těchto vod je odstranit z nich nežádoucí složky a zakoncentrovat je do objemově významně menšího proudu – kalu. Ten představuje přibližně 1-2 % objemu původních čistěných vod a může obsahovat také přebytečnou biomasu z biologického čištění. Produkci kalů nelze zabránit, pouze lze výběrem technologie čištění odpadních vod zmenšit jeho množství. Požadavky na vyšší kvalitu vypouštěné vody budou dále obecně množství produkovaných kalů zvyšovat [61].

1.3.1 Legislativa

V rámci EU je důležitým předpisem týkajícím se kalů z čistíren odpadních vod směrnice Rady 86/278/EEC, o ochraně životního prostředí, a zvláště půdy při používání čistírenských kalů v zemědělství. Dle této směrnice se kalem z čistíren odpadních vod (dále ČOV) rozumí:

- a) zbytkový kal z čistíren městských odpadních vod nebo odpadních vod z domácností, popřípadě z jiných čistíren zpracovávajících jiné odpadní vody složením podobné městským odpadním vodám nebo odpadním vodám z domácností,
- b) zbytkový kal ze septiků a jiných podobných zařízení určených k nakládání s odpadními vodami,
- c) zbytkový kal z čistíren jiných, než je uvedeno v bodech a) a b).

Legislativa ČR v oblasti kalů z ČOV je plně v souladu se směrnicí 86/278/EEC. Právními požadavky na nakládání s kaly v ČR se zabývají následující předpisy:

- zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů (zákon o odpadech),
- vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě,
- vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady,
- vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu.

V české legislativě jsou kaly z čištění komunálních odpadních vod zařazeny dle Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. pod katalogovým číslem 19 08 05, tento odpad je kategorizován jako ostatní odpad „O“.

Směrnice Rady 86/278/EEC v příloze IB určuje limitní hodnoty pro koncentrace těžkých kovů v kalech používaných v zemědělství. Vyhláška č. 437/2016 Sb. v příloze č. 3 limity pro obsah těžkých kovů používaných na zemědělské půdě v porovnání se směrnicí 86/278/EEC ještě zpřísňuje. Mezní hodnoty, požadované oběma výše uvedenými předpisy, ukazuje Tab. 12.

Tab. 12: Limitní hodnoty koncentrací těžkých kovů v kalech používaných v zemědělství dle směrnice 86/278/EEC a vyhlášky č. 437/2016 Sb.

Ukazatel	86/278/EEC	č. 437/2016 Sb.
	Limitní hodnota	Limitní hodnota
	[mg/kg sušiny]	[mg/kg sušiny]
As	-	30
Cd	20-40	5
Cr	-	200
Cu	1 000-1 750	500
Ni	300-400	100
Pb	750-1 200	200
Zn	2 500-4 000	2 500
Hg	16-25	4

Zde je potřeba vzít v úvahu, že výše uvedené limity těžkých kovů platí pro kal, který je přímo aplikován na zemědělskou půdu. Jestliže bude upravený kal zpracován ve stavebnictví, případné těžké kovy budou do matrice vzniklého kompozitu vázány, a navíc vyrobený stavební materiál nebude používán tak, aby přímo vstupoval do potravního řetězce.

1.3.2 Složení kalů

Čistírenský kal je složen ze suspenze pevných látek a agregovaných koloidních látek původně obsažených v odpadních vodách a vzniklých při jejich čištění. Agregované koloidní látky se vyznačují velkým povrchem, který dovoluje pojmout značné množství vody. Kaly z komunálních čistíren odpadních vod obsahují průměrně 0,5-7 % sušiny, která se skládá z 60-70 % organických látek a 30-40 % anorganických látek. Složení kalů výrazně závisí na

kvalitě čištěné odpadní vody a na zvoleném procesu čištění. Hlavní složky kalu z čištění odpadních vod v závislosti na velikosti částic podle práce Macnicola a Becketta [62] jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Hlavní složky kalu z čištění odpadních vod

Velikost částic [nm]	Hlavní složky kalu
> 100 000	křemen, kalcit, živec, biotit, jílové minerály, sekundární minerály železa, chrómu, manganu, mědi, zinku, ... organické látky 20-30 %, těžké kovy 5-20 %
600-100 000	jemná zrna jílových minerálů, anorganické sraženiny, koloidní shluky, bakteriální vločky. organické látky 80 %, těžké kovy 80-90 %
2-600	koloidní organické látky, bakterie, ultra jemné částice jílových minerálů, organické komplexy, vyměnitelné ionty na jílových minerálech organické látky 80 %, těžké kovy 0,01-3 %
rozpuštěný podíl < 2	komplexní ionty, rozpuštěné a koloidní látky organické látky 50-55 %

Podle Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. jsou kaly z ČOV zařazeny pod katalogovým číslem 19 08 05 a jsou kategorizovány jako ostatní odpad „O“. Obecně ovšem z původu kalů z ČOV vyplývá, že by mohly mít nejméně dvě nebezpečné vlastnosti dle vyhlášky č. 94/2016 Sb. Jsou to „infekčnost“ a tzv. „schopnost uvolňovat nebezpečné látky do životního prostředí při, nebo po jejich odstranění“. Infekčnost je způsobena přítomností patogenních organismů, které kal vždy ve větší či menší míře obsahuje. V kalech se vyskytují např. bakterie *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*; prvoci *Entamoeba histolytica*; parazité *Ascaris lumbricoides*, *Taenia saginata*, *Toxocara canis* a *Toxocara cati*; houby *Aspergillus fumigatus*, *Candida albicans*, *Trichophyton spp.* a viry Hepatitis A, Rotaviry, Coxsackieviry [63].

Možné uvolňování nebezpečných látek do životního prostředí je způsobeno přítomností těžkých kovů a jiných toxických látek jako např. PCB, dioxinů, farmaceutik, hormonů, chemikálií pro domácnost apod., které se mohou při styku s vodou do vody uvolnit [64; 65].

1.3.3 Produkce kalů

Každý rok je ve světě vyprodukováno velké množství kalů z čistíren odpadních vod. Není to pouze záležitost rozvinutých zemí, velký vzestup v množství produkovaného kalu lze nyní pozorovat i v rozvojových zemích, kde dochází k rychlému pokroku v urbanizaci a industrializaci [66]. Stoupající trend v produkci kalu z městských ČOV je rovněž výsledkem zvětšující se kapacity stávajících čistíren odpadních vod a stavbou nových, a také zaváděním pokročilejších metod čištění odpadních vod [67]. Kal je nevyhnutelným produktem procesu čištění odpadních vod a typicky vzniká 70-90 g kalu/ekvivalentního obyvatele za den [68].

Celkové množství produkovaných kalů závisí zejména na množství zpracovávaných vod (počet ekvivalentních obyvatel), na způsobu čištění, na typu kanalizace a na technologickém postupu zpracování vzniklého kalu (zahušťování, desintegrace, stabilizace, odvodnění, desinfekce, sušení apod.). Pozornost je potřeba také věnovat různým činidlům, přidávaným do procesu čištění vod nebo zpracování kalů (soli železa a hliníku, vápno, polymery apod.) [61].

V Tab. 14 je uvedena produkce kalů z ČOV v České republice v letech 2009-2012 získaná ze dvou různých zdrojů – Českého statistického úřadu (dále ČSÚ) a z Informačního systému odpadového hospodářství (dále ISOH). Každá organizace uplatňuje při získávání dat jinou metodiku, proto se liší i uvedené množství produkovaných kalů [69].

Tab. 14: Produkce kalů z ČOV v České republice v letech 2009-2012

Rok	ČSÚ	ISOH
	m [t]	m [t]
2012	168190	163739
2011	163818	162716
2010	170689	168860
2009	168164	163739

Produkce kalů z ČOV v jednotlivých evropských zemích se výrazně liší [70], tuto skutečnost ilustruje i Tab. 15, ve které je uvedeno množství produkovaných kalů z ČOV v jednotlivých zemích a rovněž i produkce kalů vztažená na ekvivalentního obyvatele. Údaje v tabulce odpovídají stavu z let 2003-2007, pro které byla nalezena příslušná data. Velké rozdíly lze pozorovat zejména mezi starými a novými členy EU.

Tab. 15: Produkce kalů z ČOV v jednotlivých evropských zemích v letech 2003-2007, produkce kalů vztažená na ekvivalentního obyvatele (EO) a produkce kalů vztažená na ekvivalentního obyvatele napojeného na ČOV (EOČ) [70]

Země	Produkce m [10 ³ t/rok]	Specifická produkce m [kg/EO/rok]	Specifická produkce m [kg/EOČ/rok]
Německo	2170	26,3	27,7
Velká Británie	1771	29,5	32,0
Španělsko	1121	26,0	28,6
Francie	1059	17,0	21,3
Itálie	1053	18,1	19,2
Holandsko	348	22,0	22,2
Rakousko	254	30,8	33,5
Švédsko	210	23,3	27,1
Portugalsko	189	18,0	26,1
Finsko	148	28,2	34,8
Dánsko	140	26,0	29,2
Řecko	115	10,5	12,4
Belgie	103	10,8	20,4
Irsko	60	14,6	17,3
Lucembursko	14	27,8	29,2
EU15	9806	21,9	25,4
Polsko	486	12,7	21,2
Maďarsko	184	18,2	33,7
Česká republika	172	16,8	23,0
Rumunsko	68	3,1	11,6
Litva	66	19,1	27,8
Slovensko	56	10,5	19,1
Bulharsko	42	5,4	13,1
Estonsko	29	22,1	29,9
Lotyšsko	27	12,5	20,0
Slovinsko	14	6,8	18,4
Kypr	7	11,1	36,8
Malta	0,1	0,1	0,2
EU12	1151	11,5	21,1
EU27	10957	17,7	

1.3.4 Nakládání s kaly

Obecně lze metody zpracování kalů rozdělit na **primární** (metody úpravy kalu) a **finální** [61].

Primární metody:

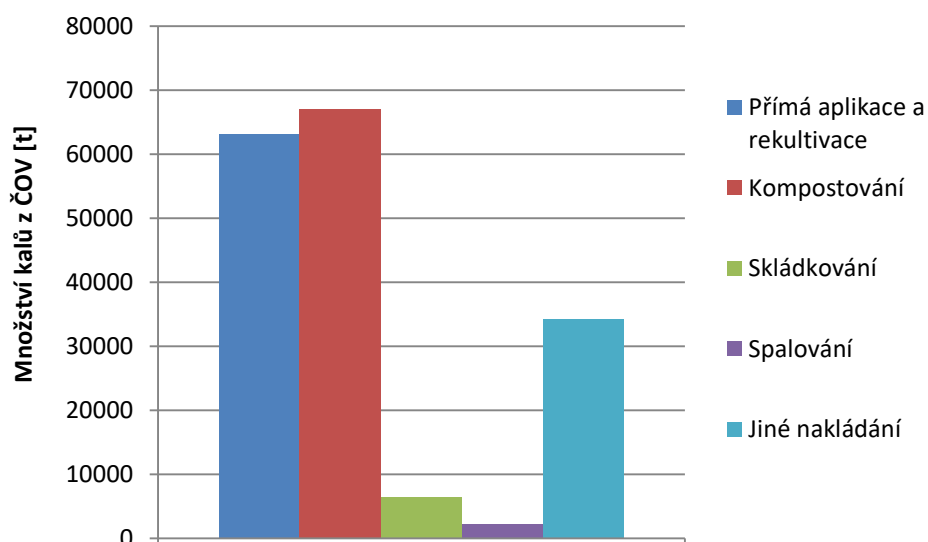
- separace – třídění podle kvality materiálu (oddělení organické frakce, oddělení frakcí vhodných k recyklaci – kovy, sklo, plasty apod.),
- kondicionace – chemická, termická nebo fyzikálně-chemická předúprava. např. přidavek flokulantů ke zlepšení odvodnitelnosti kalů, termická předúprava aktivovaného kalu apod.,
- zahušťování a odvodňování – metody pro zvýšení koncentrace sušiny kalu před jeho dalším zpracováním (na koncentraci sušiny cca do 40 %),
- desintegrace – mechanická (mlýny, vysokotlaké homogenizátory, lyzátovací zahušťovací centrifugy), fyzikální (ultrazvuk), fyzikálně-chemická (termická hydrolýza, alkalická nebo kyselá hydrolýza),
- hygienizace – inaktivace patogenů. Hygienizace může být zařazena jako samostatná metoda, a to před nebo po stupni stabilizace kalu anebo hygienizačně působí již zvolená technologie zpracování kalu (např. termofilní aerobní nebo anaerobní stabilizace, všechny termické metody),
- anaerobní biologická stabilizace – methanizace – metoda zušlechťování odpadu přeměnou převážné části jeho organické sušiny na bioplyn, současně dochází k minimalizaci množství zpracovávaného materiálu a jeho hygienizaci,
- aerobní biologická stabilizace – mezofilní, probíhá obvykle v otevřených nádržích, termofilní (autotermní), vyžaduje uzavřené reaktory často jako předstupeň anaerobní stabilizaci (duální systém),
- sušení – zvýšení obsahu sušiny na 60-95 %.

Finální metody:

- kompostování – aerobní biologická stabilizace materiálů, využití jeho hnojivých vlastností (komposty mohou sloužit pro úpravy vodohospodářsky neexponovaných ploch – městská zeleň, pásy podél silnic apod.),
- aplikace na zemědělskou půdu – užití kalů jako hnojiva v zemědělské výrobě – navrácení živin do půdy (pouze vhodně upravené kaly),
- chemická stabilizace – vápnění vhodná pro stabilizaci a hygienizaci surových i stabilizovaných kalů pře jejich aplikací na pole,

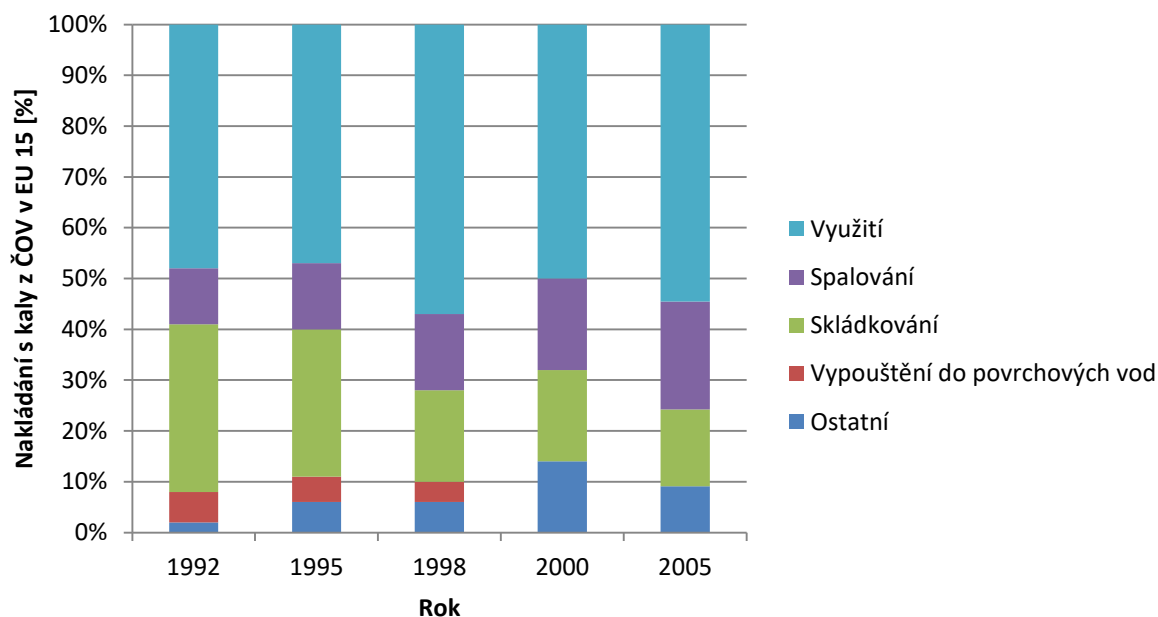
- spalování
 - spalování v cementárenské peci – ekologická a bezodpadová technologie,
 - spoluspalování – spalování společně s energeticky bohatším palivem (teplárny a elektrárny, spalovny komunálního odpadu, obvykle se přidává množství kalu do 5 % spotřeby uhlí),
 - termické zpracování – různé způsoby pyrolýzy a zplyňování,
 - mokré spalování v nadkritické oblasti vody,
 - přímé spalování kalů,
- skládkování – uložení materiálu na zabezpečenou skládku. Jedná se o ekologicky nejméně vhodné řešení.

Obr. 4 ukazuje nejběžnější způsoby nakládání s kaly z ČOV v České republice v roce 2015 podle Statistické ročenky České republiky 2016 [71].



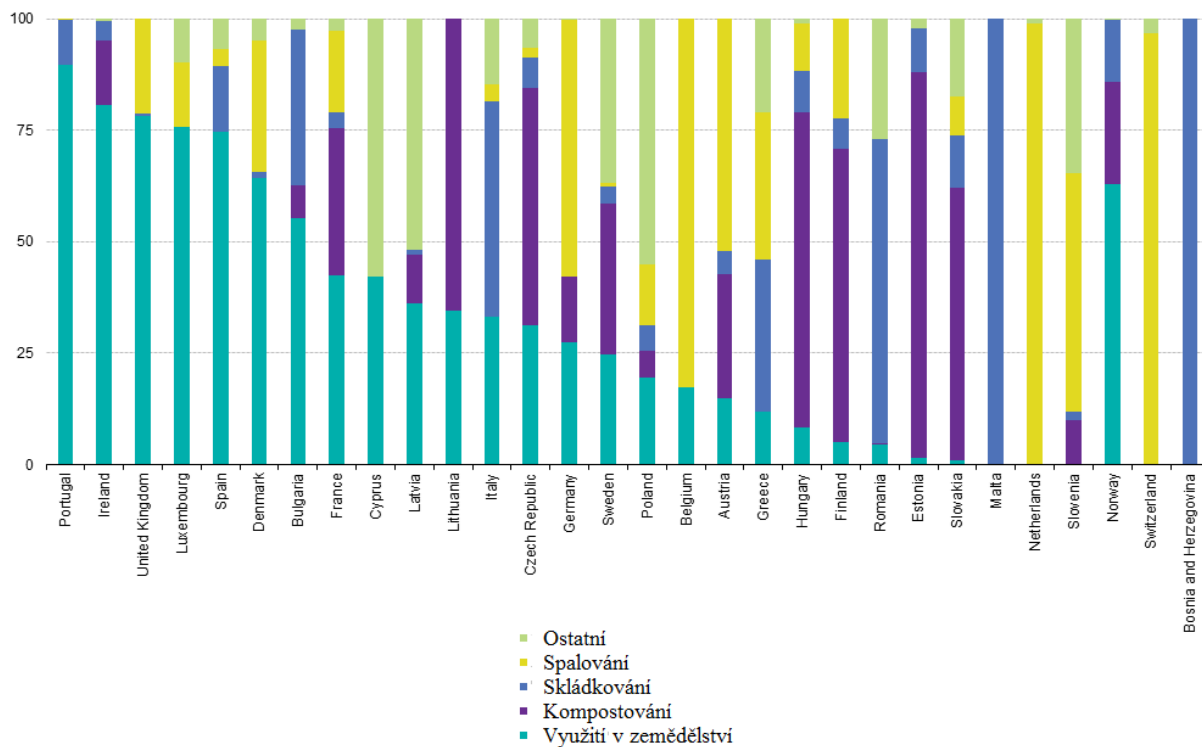
Obr. 4: Způsoby nakládání s kaly z ČOV v ČR roce 2015 [71]

V EU jsou v současné době na vzestupu tepelné metody zpracování kalu, založené na sušení a spalování. Během let 1992-2005 došlo k poklesu skládkování kalů z ČOV z 33 % na 15 %, zatímco spalování kalů se zdvojnásobilo z 11 % na 21 % z ročně produkovaného kalu [72; 73]. Tento trend ilustruje Obr. 5 [70].



Obr. 5: Nakládání s kaly z ČOV v EU-15 mezi lety 1992-2005 [70]

Nakládání s kaly v jednotlivých zemích EU v roce 2012 ukazuje Obr. 6 [74].



Obr. 6: Nakládání s kaly z ČOV v jednotlivých zemích EU v roce 2012. Procenta u jednotlivých typů nakládání jsou založena na celkovém množství kalu v jednotlivých státech [74]

Celosvětově je pravděpodobně nejběžnější metodou nakládání s kaly skládkování, v některých zemích také odstraňování vypouštěním do oceánu [75; 76; 77]. Například federativní státy Mikronésie vypouští téměř 30 % produkovaného kalu do vod Tichého oceánu bez potřebného čištění [78]. V EU bylo ukládání kalů do moře legislativně zastaveno v roce 1998.

Kaly z čistíren odpadních vod se celosvětově ve velké míře používají v zemědělství [79; 80; 81]. Zde je třeba vzít v úvahu, že škodlivé látky a nestálý obsah patogenů obsažených v kalu mohou vést k potenciálním zdravotním a environmentálním rizikům, tudíž jeho skládkování představuje vážné riziko kontaminace půdy a degradace městských území [82; 83].

Z těchto důvodů, a s přihlédnutím k principům udržitelnosti, je potřeba hledat alternativní možnosti k současnému nakládání s kaly z čistíren odpadních vod, například jejich využití ve stavebnictví [84]. Jednou z možností upotřebení kalu ve stavebnictví může být jeho aplikace při produkci lehkého kameniva, ve kterém slouží jako plnivo a přispívá k jeho vysoce porézní struktuře. Z tohoto lehkého kameniva mohou být vyráběny například ekologické lehké tvárnice pro stavební konstrukce [85; 86].

V poslední době je věnována velká pozornost aplikaci popele ze spalování kalů ve stavebnictví. Tomuto tématu se věnuje následující kapitola.

1.3.5 Využití tepelně zpracovaného kalu ve stavebnictví

Zákaz ukládání kalů z ČOV do moře, zavedený Směrnicí Rady 91/271/EEC, o čištění městských odpadních vod, neudržitelnost skládkování kalů (Směrnice Rady o skládkování odpadů 1999/31/EC, zavádějící snižování množství odpadů ukládaných na skládky) a vzrůstající negativní zájem veřejnosti o používání kalů jako hnojiva vedly vodní společnosti ke zvýšení využívání spalování jako vhodného způsobu nakládání s kaly [87].

Ačkoli při spalování dochází k významné redukci spalovaného materiálu, cca 70 % hmotnostních a 90 % objemových, není to finální řešení [4]. Spalováním kalů z ČOV lze získat popel (sewage sludge ash, SSA) s pucolánovými vlastnostmi, který může být aplikován ve stavebnictví. Po spálení za vysokých teplot jsou hlavními složkami popela SiO_2 , CaO , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Tyto sloučeniny jsou také součástí běžného portlandského cementu [88; 89; 90]. Konkrétní chemické a mineralogické složení SSA, stejně jako jeho fyzikální vlastnosti, například měrný povrch, hustota matrice apod., se mohou významně lišit, neboť závisí zejména na původu odpadní vody, na aditivech přidávaných v průběhu čištění vody a na typu

spalování vzniklého kalu [5; 67]. Z hlediska pucolánové aktivity je významný obsah amorfni fáze, která se pohybuje u různých typů SSA mezi 35-75 hm % [4].

Přehled celosvětově publikované literatury ukazuje, že ve složení různých typů SSA jsou významné rozdíly. Proto je vždy potřeba provést výzkum konkrétního popela pro zamýšlené využití.

V literatuře je popsána řada příkladů potencionálního zpracování popela ze spálení kalů ve stavebnictví, zejména jako částečné náhrady portlandského cementu. Výhodou tohoto typu nakládání je, že při reakci s cementovou maticí jsou případné těžké kovy obsažené v popelu stabilizovány a solidifikovány; kovy jsou převedeny na vysoce nerozpustné soli, které se mohou vyluhovat pouze v nepatrných množstvích.

Tento popel našel uplatnění například při výrobě malt [91], betonových směsí [92], jako lehké kamenivo při výrobě lehčených betonů [93; 94] a také při výrobě asfaltových směsí [95]. Další možností je využití popela ze spalování kalů jako náhrady cementu nebo písku v silničním stavitelství [96].

Popel z kalů z čistíren odpadních vod může být upotřeben také při výrobě cihel [97; 98; 99]. Výhody užití kalu, nebo popela z jeho spalování, jako přísady při výrobě cihel nebo střešních tašek mohou být následující: imobilizace těžkých kovů ve vypálené matici, oxidace organického materiálu a zničení jakýchkoliv patogenů v průběhu vypalování. Dále bylo na základě několika studií prokázáno, že u takto vyrobených stavebních materiálů se snižuje poškození mrazem [100].

Byl zkoumán rovněž vliv přídavku popela ze spalování kalů na požární odolnost ztvrdlých cementových past. Bylo zjištěno, že tepelné poškození cementových past po expozici vysokým teplotám bylo menší při přídavku SSA do 20 % hmotnostních [101].

1.3.5.1 Tepelné zpracování kalů

Spalování kalů z ČOV se liší od spalování běžného paliva kvůli vysokému obsahu vody [102; 103].

Chemické složení, obsah sušiny a výhřevnost kalu z ČOV rovněž ovlivňuje výběr vhodných metod pro jeho tepelnou konverzi [104; 105]. Mezi nejčastější metody patří [67]:

- spoluspalování kalu s komunálním odpadem,
- spoluspalování kalu v rotačních pecích při výrobě cementu,
- spoluspalování kalu v elektrárnách,
- přímé spalování kalu.

Pro **zpracování kalu ve spalovnách komunálního odpadu** se doporučuje kal předsušit na obsah sušiny 55–65 %. Kal je možné přivádět do pece i v tekutém stavu (zahuštěný), což představuje redukci nákladů na odvodnění či sušení (vhodné při malé vzdálenosti od ČOV), maximálně však v hmotnostním poměru k odpadu 1:4. Kal lze však spalovat i v odvodněném stavu ve směsi s odpadem ve fluidních spalovnách odpadu (např. kal z vídeňské ČOV). Kal je po předehrání odvodněn a pístovými čerpadly dopraven do prostoru pece, kde hoří spolu s komunálním odpadem. Proces je navržen tak, že podíl spalovaných kalů může tvořit až 80 % hm., aniž by bylo třeba přídatného paliva [106].

Spalování kalu v cementárnách má následující výhody: dochází k úplnému odstranění všech organických látek v důsledku vysoké teploty vypalování v rotační peci; případné těžké kovy jsou vázány do cementářského slínku a nemohou být vyluhovány; úspora uhlí a surovin; dochází ke snížení emisí CO₂; jedná se o bezodpadové zpracování kalu; je možno zpracovávat nejen sušený, ale i odvodněný kal. Pro udržení kvality cementu je možno sušeným kalem nahradit pouze 5 % uhlí [61].

Spoluspalování čistírenských kalů především na hnědouhelných elektrárnách nebo teplárnách je ekologický a finančně výhodný způsob likvidace odvodněných kalů. Výhodnost tohoto způsobu spočívá v několika skutečnostech: pro bezprostředně navazující proces spalování postačuje mechanické odvodnění kalu na sušinu 25 %; moderní technika odsíření spalin obvykle postačuje na dodržení limitních hodnot spalin i při spoluspalování kalů a náklady na odstranění zbytku po spalování kalů a z čištění spalin (energósádovec, přebytečná voda z vápenných vypírek) se zvyšují pouze minimálně, protože zařízení je již vybudováno. Z teoretického hlediska lze použít spoluspalování kalů do cca 10 % k spalovanému hlavnímu palivu – uhlí. Obvykle se však nepřekračuje 5% podíl [105].

Pro **přímé spalování čistírenských kalů** v praxi nejčastěji slouží pece s fluidním ložem a fluidní pece kombinované s etážovou sušárnou [106].

Fluidní pec sestává z vertikální kolony s fluidním pískovým ložem, fluidace probíhá pomocí vzduchu, který je vháněn přes distributor ve spodní části pece. Fluidní lože je tvořeno křemičitým pískem. Udržení expanze pískového lože je proudem vháněného vzduchu. Do fluidního lože je čerpán odvodněný kal, který se zde suší v důsledku vysoké teploty písku a rovněž se dezintegruje působením turbulence pískového lože. Dále zde dochází k uvolnění těkavých látek, které rychle dosahují zápalné teploty a hoří. Postupně tak dochází k pyrolýze usušeného kalu a tím i k spálení celého organického podílu kalu. Lehčí anorganický podíl odchází ve spalinách, zatímco případný těžší podíl a větší, nespalitelné inertní kusy propadají

skrz fluidní pískové lože a jsou odstraňovány ze dna kotle spalovny. Teplota fluidního lože je 750 °C, teplota v horní části pece 850 °C.

Výhody fluidní pece:

- snadné řízení provozu a vysoká adaptabilita vůči kvalitě spalovaného kalu a způsobu provozu,
- odolnost vůči šokovému zatížení a změnám obsahu sušiny kalu,
- možnost spalování i zasolených kalů,
- vysoká účinnost spalování, velká tepelná kapacita a homogenní teplota lože pískového fluidního lože,
- inertní popel a minimální připékání popela, méně problémů s emisemi, nízká tvorba NO_x a těkavých sloučenin kovů,
- nízká teplota spalování, minimální množství přídavného paliva,
- malá potřeba plochy,
- vysoká spolehlivost.

Jako nevýhoda fluidní pece se uvádí nebezpečí spékání popela a písku v případě přítomnosti solí s nízkým bodem tání [105].

V současné době jsou v ČR dvě komunální ČOV, kde je kal termicky zpracováván. Na ČOV Brno Modřice byla instalována kontaktní sušárna odvodněného kalu, která produkuje kal o sušině až 92 %. Tento kal splňuje parametry požadované pro spalování v cementárně, kde je také využíván. Sušení kalu je realizováno pomocí zemního plynu. V roce 2007 byla uvedena do zkušebního provozu spalovna vyhnílého kalu na ČOV Jihlava s kapacitou 2 520 t/rok. Zde je spalován přímo kal odvodněný, bez předchozího sušení. Vzhledem k tomu, že se jedná o kal stabilizovaný, který ztratil část svého energetického obsahu při vyhnívání, je nutné proces energeticky dotovat spalováním zemního plynu. Pro přímé spalování odvodněných kalů byla jako optimální prostředí vyhodnocena fluidní vrstva. Fluidní vrstva představuje teplotně homogenní prostředí bohaté na kyslík se silně abrazivním působením na částice kalu [105; 107; 108].

Odhaduje se, že v Severní Americe a v EU je produkováno 1,2 miliónu tun popela ze spalování kalu z ČOV ročně [5] a v Japonsku 0,5 miliónu tun ročně [109].

2 Cíl práce

Nárůst poptávky po stavebních materiálech, pozorovaný v posledních letech v důsledku celosvětového rozvoje, vyzývá k alternativním způsobům vývoje, nebo odvození stavebních materiálů z jiných zdrojů. Pokud vezmeme v úvahu ekonomické a environmentální faktory, technická aplikace vhodných typů odpadů ve stavebnictví může poskytnout řešení problému s odpadem a podpořit ekologicky vhodné zpracování se sníženou spotřebou primárních materiálů a energie.

Odpadní plasty

Předkládaná práce byla ve své první části věnována studiu čtyř druhů polypropylenových odpadů a jejich možnému využití ve stavebnictví jako částečné náhrady křemičitého písku při výrobě cementových kompozitů. Polypropylen byl vybrán na základě skutečnosti, že figuruje jak v Evropě, tak i celosvětově na čelních místech produkce plastů a také proto, že naprostá většina literatury věnující se tématu aplikace odpadních plastů jako náhrady kameniva ve stavebnictví je zaměřena na jiné typy plastů, jako je PET a HDPE. Teoretická část práce mapovala produkci odpadních plastů a způsoby nakládání s nimi a zaměřila se rovněž na možnosti využívání odpadních plastů ve stavebnictví. Prvním cílem experimentální části byla charakterizace vzorků plastových odpadů zejména z hlediska jejich fyzikálních a tepelných vlastností a jejich následná aplikace jako lehkého kameniva pro částečnou náhradu písku při výrobě cementových kompozitů s vylepšenými tepelně-izolačními vlastnostmi. Náhrada písku jednotlivými plastovými odpady byla realizována v různých hmotnostních, resp. objemových poměrech. Hlavním cílem pak bylo hodnocení vlivu inkorporace plastových částic do cementové matrice na vlastnosti výsledného materiálu jak v čerstvém, tak v zatvrdlém stavu. V čerstvém stavu byla pozornost zaměřena na zjištění zpracovatelnosti směsí s obsahem odpadních plastů. Po 28, resp. 90 dnech ošetřování ve vodě byly hodnoceny základní fyzikální, mechanické, tepelné a vlhkostní vlastnosti vyrobených kompozitů. Důraz byl kladen především na tepelné vlastnosti, které byly měřeny v závislosti na obsahu vlhkosti, ze suchého do plně nasyceného stavu.

Výsledky této části práce by měly přispět k prohloubení znalostí o chování lehkých cementových kompozitů s obsahem odpadních plastů a na možnosti jejich aplikace ve stavebním průmyslu.

Kaly z čistíren odpadních vod

Druhá část dizertační práce byla věnována studiu dvou druhů kalů z čistíren odpadních vod, které po tepelném zpracování mohou sloužit jako částečná náhrada cementu při výrobě cementových kompozitů. Teoretická část práce byla zaměřena na získání údajů o složení, produkci a nakládání se vznikajícími čistírenskými kaly, dále byly shrnuty poznatky o tepelném zpracování kalů a možnostech využívání takto upravených kalů ve stavebnictví. Do experimentální části řešení dizertační práce byla pro vypalování kalů vybrána teplota 700 °C, která je nižší, než u běžných technik tepelného zpracování kalů z ČOV, a umožňuje proto jak redukci energetické náročnosti, tak použití méně technologicky sofistikovaných procesů. Cílem práce bylo zhodnotit možnost uplatnění takto tepelně zpracovaných kalů ve stavebnictví zejména s ohledem na jejich výsledné složení a fyzikálně-chemické vlastnosti. Kaly z ČOV byly proto podrobně studovány ve vysušeném i ve vypáleném stavu a následně byly použity pro výrobu cementových kompozitů, kde sloužily jako částečná náhrada cementu v různých hmotnostních poměrech. Čerstvé směsi s obsahem kalů byly zkoumány z hlediska jejich zpracovatelnosti, výsledné materiály, po 28, resp. 90 dnech ošetřování ve vodě, byly následně charakterizovány na základě jejich základních fyzikálních a mechanických vlastností. Pro zjištění, zda ve vyrobených materiálech probíhá pucolánová reakce, byly zvoleny metody termogravimetrie a rentgenová difrakce. Důležitou součástí hodnocení aplikace kalů ve stavebnictví byla i nákladová analýza a analýza životního cyklu zaměřená na energetickou náročnost a emise skleníkových plynů spojených s výrobou cementu a směsného cementu s obsahem tepelně zpracovaných kalů.

Výsledky práce by měly sloužit k lepšímu pochopení procesů probíhajících při výrobě cementových kompozitů obsahujících vypálené kaly z ČOV a pomoci k hodnocení vlivu kalů na vlastnosti výsledných materiálů určených pro stavební průmysl.

3 Experimentální část

Tato kapitola je věnována popisu materiálů použitých při přípravě vzorků cementových kompozitů, postupu výroby vzorků a popisu experimentálních metod vybraných pro posuzování vlastností jak zkoušených materiálů, tak vyrobených vzorků kompozitů.

3.1 Použité suroviny

3.1.1 Odpadní polypropylen z výroby potrubí

Zkoumaný plastový odpad pochází ze společnosti FV Plast, a.s., která se zabývá výrobou tlakových plastových potrubí a tvarovek pro rozvody teplé a studené vody, teplovodního vytápění a chladicích a klimatizačních okruhů. Odpad vzniklý při výrobě je zařazený podle Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. pod katalogovým číslem 07 02 13 Plastový odpad a je kategorizován jako ostatní odpad „O“.

Studovány byly dva různé typy odpadního polypropylenu: PP-R a PP-GF. PP-R znamená zkratku z názvu Polypropylene Random Copolymer, jež označuje vlastnost krystalické mřížky polymeru. PP-GF je název polypropylenu zesíleného skelnými vlákny (Polypropylene Glass Fibre). Konkrétní studované odpadní plasty jsou uvedeny níže a prezentovány na Obr. 7:

- PP-R drcený (dále v textu PP-R),
- PP-R regranulovaný (dále v textu PP-Reg),
- PP-GF drcený (dále v textu PP-GF).



Obr. 7: Testované polypropylenové odpady: a) drcený PP-R, b) drcený PP-GF, c) regranulovaný PP-Reg

Lze pozorovat ostré hrany u drcených plastových částic (PP-R a PP-GF), zatímco regranulované částice PP-Reg se vyznačují cylindrickým tvarem se zaoblenými hranami.

Pro testované PP odpady byly zjišťovány základní fyzikální a termofyzikální vlastnosti jako hustota matrice ρ_{mat} , sypná hmotnost ρ_s , součinitel tepelné vodivosti λ , měrná objemová tepelná kapacita C_v a součinitel teplotní vodivosti a . Hustotu matrice jednotlivých PP odpadů, změřenou pomocí héliové pyknometrie, uvádí Tab. 16.

Tab. 16: Hustota matrice PP odpadů

Vzorek	ρ_{mat} [kg/m³]
PP-R	905
PP-GF	940
PP-Reg	921

Nejvyšší hustotu matrice vykazovaly částice PP-GF, protože skelná vlákna v nich obsažená mají vyšší hustotu než samotný PP.

Sypná hmotnost a termofyzikální veličiny byly měřeny v závislosti na zhutnění, výsledky měření jsou prezentovány v Tab. 17-19. Zhutnění bylo prováděno na vysokofrekvenčním vibračním stolku VSB-15 (Brio Hranice). Doba zhutnění uvedená v tabulkách odpovídá celkovému měřenému času, po který byl vzorek vibrován. Jsou zde uvedeny časy, kdy byla pozorována změna hodnocených veličin; měření bylo ukončeno v čase, kdy se již neměnil objem. Obecně lze konstatovat, že plastové částice vykazují výrazně lepší tepelné vlastnosti než písek běžně používaný při výrobě betonu (viz. kapitola 4.1.6, Tab. 33). Tepelná vodivost se zhutněním stoupá, což je způsobeno eliminací vzduchových mezer mezi částicemi.

Tab. 17: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti PP-R v závislosti na zhutnění

Čas	ρ_s	λ	C_v	a
[s]	[kg/m ³]	[W/(m·K)]	[10 ⁶ J/(m ³ ·K)]	[10 ⁻⁶ m ² /s]
0	382	0,098	0,240	0,408
10	425	0,098	0,242	0,398
20	435	0,098	0,249	0,391
30	445	0,100	0,258	0,389
90	451	0,101	0,296	0,337
180	456	0,105	0,299	0,336
240	467	0,108	0,322	0,310

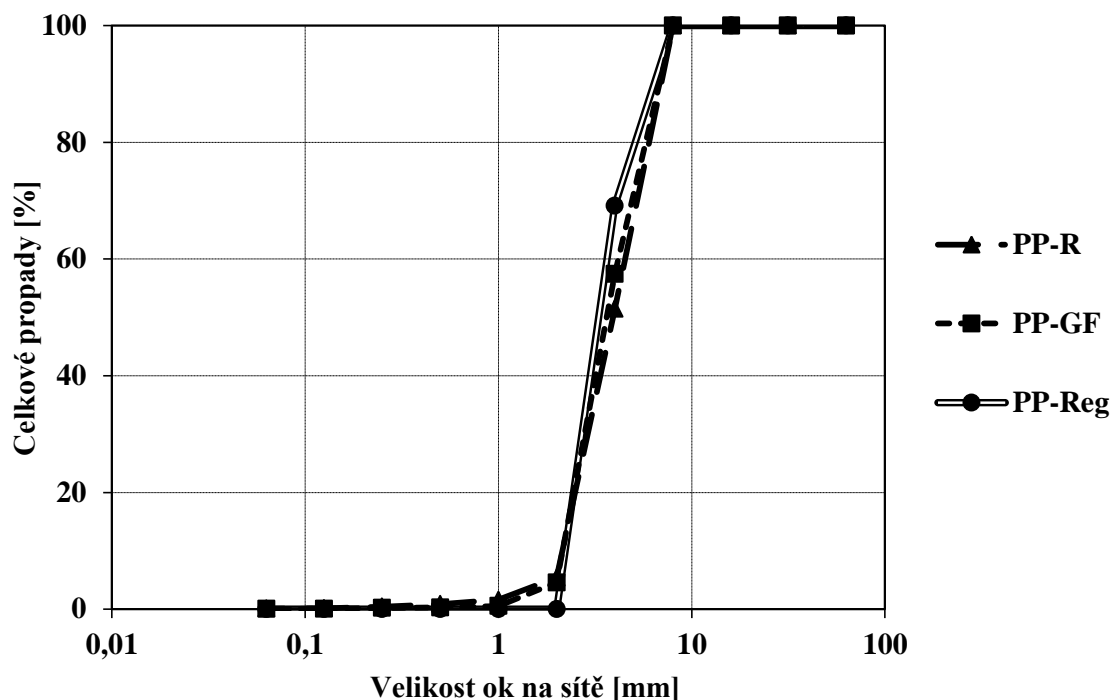
Tab. 18: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti PP-GF v závislosti na zhutnění

Čas	ρ_s	λ	C_v	a
[s]	[kg/m ³]	[W/(m·K)]	[10 ⁶ J/(m ³ ·K)]	[10 ⁻⁶ m ² /s]
0	394	0,092	0,266	0,347
10	446	0,098	0,277	0,345
20	457	0,098	0,306	0,321
30	468	0,098	0,314	0,311
60	481	0,098	0,314	0,310
240	487	0,099	0,323	0,307

Tab. 19: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti PP-Reg v závislosti na zhutnění

Čas	ρ_s	λ	C_v	a
[s]	[kg/m ³]	[W/(m·K)]	[10 ⁶ J/(m ³ ·K)]	[10 ⁻⁶ m ² /s]
0	494	0,113	0,289	0,391
10	524	0,114	0,309	0,358
30	533	0,114	0,310	0,350
240	541	0,115	0,313	0,318

Všechny druhy studovaných plastů z výroby potrubí byly podrobeny síťové analýze. Z výsledků, uvedených na Obr. 8 vyplývá, že 100 % plastových částic je menších než 8 mm, což je výhodné pro jejich aplikaci jako náhrady písku při výrobě cementových kompozitů.



Obr. 8: Síťová analýza plastových odpadů PP-R, PP-GF a PP-Reg

3.1.2 Odpadní expandovaný polypropylen

Zkoumaný plastový odpad pochází ze slovenské společnosti Flyteam, která ve své chráněné dílně vyrábí z expandované polypropylenové pěny (EPP) letecké modely. Vzniklý odpadní EPP je nadrcen. Podle české legislativy by byl tento odpad zařazen dle Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. pod katalogové číslo 07 02 13 Plastový odpad, kategorie ostatní odpad „O“. Jednotlivé drcené částice (Obr. 9) mají různé barvy a tvary, ale jejich struktura je homogenní.



Obr. 9: Odpadní EPP drcený

Pro drcený EPP odpad byly zjišťovány základní fyzikální a termofyzikální vlastnosti jako hustota ρ , sypná hmotnost ρ_s , součinitel tepelné vodivosti λ , měrná objemová tepelná kapacita C_v a součinitel teplotní vodivosti a . Zde je třeba poznamenat, že vzhledem k uzavřené buněčné struktuře EPP (Obr. 11) nebylo možné ani pomocí héliového pyknometru zjistit hustotu matrice tohoto materiálu, neboť ani molekuly hélia neprošly do uzavřených pórů. Získaná hodnota by tedy v tomto konkrétním případě měla být nazývána pouze hustotou.

Hustota EPP zjištěná pomocí héliového pyknometru byla 105 kg/m^3 , což řadí EPP mezi umělé ultralehké (hustota $< 300 \text{ kg/m}^3$) plnivo [110].

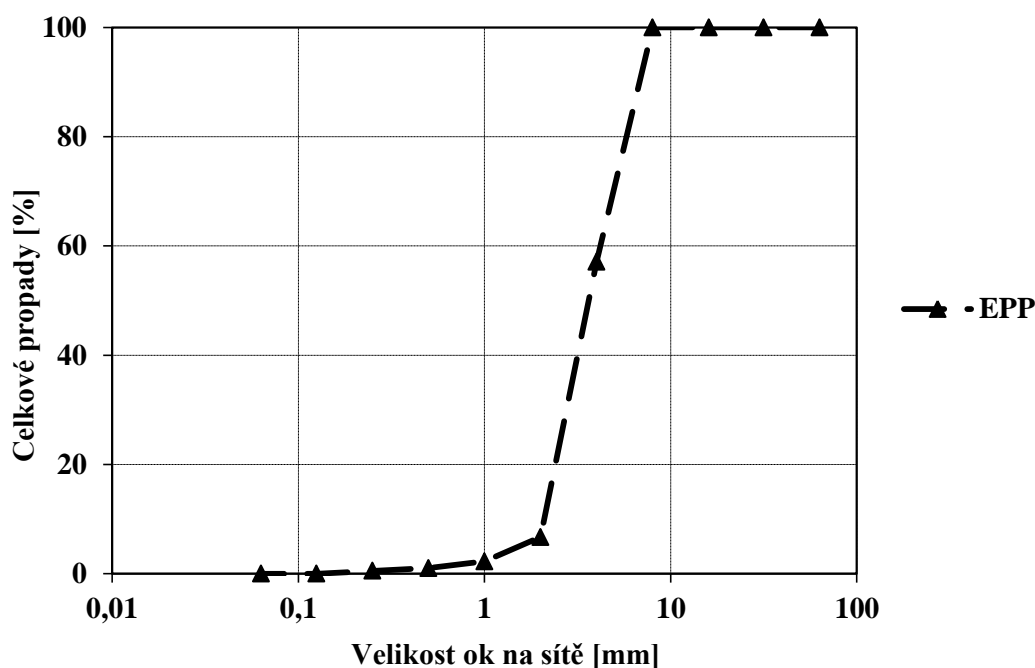
Sypná hmotnost a termofyzikální veličiny byly měřeny v závislosti na zhutnění; výsledky předkládá Tab. 20. Zhutnění bylo prováděno na vysokofrekvenčním vibračním stolku VSB-15 (Brio Hranice). Doba zhutnění uvedená v tabulce odpovídá celkovému měřenému času, po který byl vzorek vibrován. Jsou zde uvedeny časy, kdy byla pozorována změna hodnocených veličin; měření bylo ukončeno v čase, kdy se již neměnil objem.

Tab. 20: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti EPP v závislosti na zhutnění

Čas [s]	ρ_s [kg/m^3]	λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	C_v [$10^6 \text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]	a [$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]
0	18,9	0,0423	0,0489	0,9588
10	22,4	0,0432	0,0548	0,7978
30	23,3	0,0435	0,0581	0,7452
60	23,9	0,0437	0,0606	0,7172
180	24,3	0,0469	0,0618	0,6850

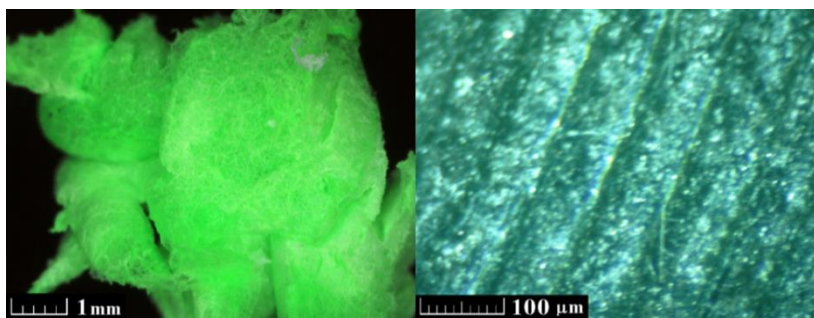
V porovnání s pískem používaným při výrobě cementových kompozitů vykazuje EPP výrazně lepší tepelné vlastnosti. Se stoupající sypnou hmotností hodnoty tepelné vodivosti, stejně jako hodnoty objemové tepelné kapacity, rostly. To je způsobeno zmenšováním vzduchových mezer během zhutňování.

Výsledky síťové analýzy jsou uvedeny na Obr. 10. Z grafu vyplývá, že všechny částice mají velikost pod 8 mm, což je výhodné pro jejich využití jako náhrady písku při výrobě cementových kompozitů.



Obr. 10: Síťová analýza plastového odpadu EPP

Pomocí optické mikroskopie (optický mikroskop Dino-Lite, rozlišení 5 Mpx) byla zjišťována struktura jednotlivých zrn EPP. Na Obr. 11 lze při dvou různých rozlišeních pozorovat vysoce porézní charakter uzavřené buněčné struktury EPP, což souvisí s jeho nízkou hmotností, vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti a rovněž s tepelně- a zvukově-izolačními vlastnostmi.



Obr. 11: EPP částice, optický mikroskop

3.1.3 Kal z řecké čistírny odpadních vod

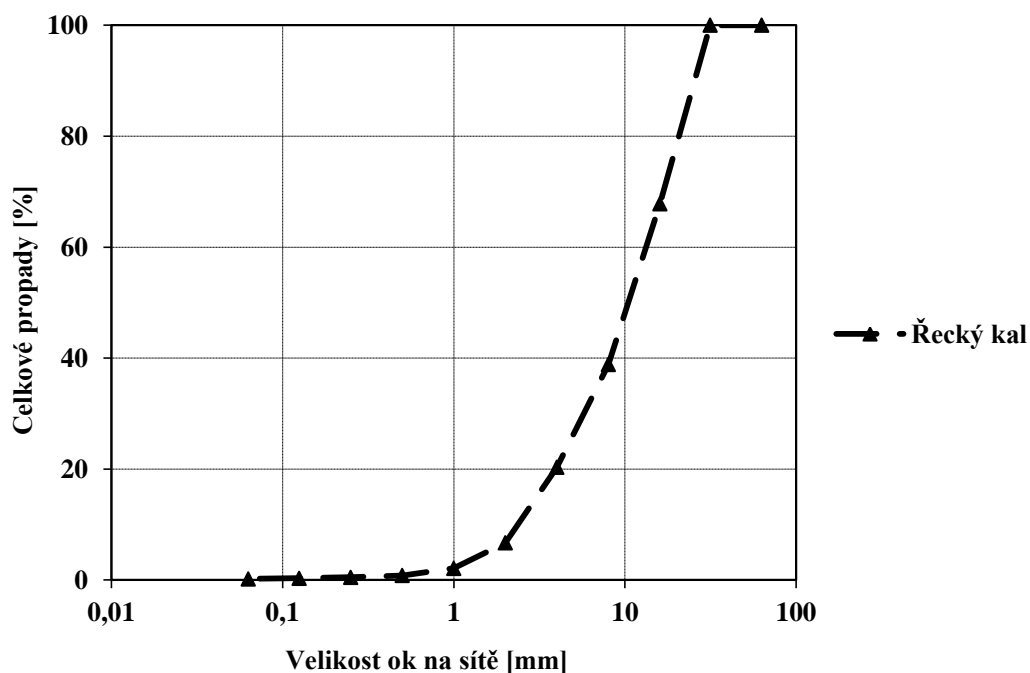
První ze zkoumaných čistírenských kalů byl získán z čistírny odpadních vod města Patras, Řecko. Tento odpad by byl v ČR zařazen podle Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. pod katalogovým číslem 19 08 05 a byl by kategorizován jako ostatní odpad „O“.

Kal byl z čistírny odpadních vod odebraný po zakoncentrování pomocí centrifugace a obsahoval cca 1-4 % hm. sušiny, zbytek tvořila voda. Nejprve byl proto kal sušen pomocí slunečního záření. Vysušený kal byl analyzován pomocí rentgenové fluorescenční analýzy (X-Ray Fluorescence, XRF), chemické složení ukazuje Tab. 21.

Tab. 21: Chemické složení vysušeného řeckého kalu z ČOV – hlavní oxidy

Složka	Obsah [% hm.]
SiO ₂	18,2
Al ₂ O ₃	6,36
Fe ₂ O ₃	8,67
CaO	26,71
MgO	5,29
SO ₃	10,61
ZnO	0,35
Na ₂ O	3,56
K ₂ O	1,54
TiO ₂	1,29
P ₂ O ₅	12,64
Cl	4,23
Σ	97,73

Byly změřeny rovněž sypaná hmotnost ρ_s , hustota matrice ρ_{mat} a byla provedena síťová analýza. Zjištěná sypaná hmotnost vysušeného kalu byla 712 kg/m³ a hustota matrice (měřená héliovým pyknometrem) 1620 kg/m³. Výsledek síťové analýzy je prezentován na Obr. 12.



Obr. 12: Sítová analýza vysušeného řeckého kalu z ČOV

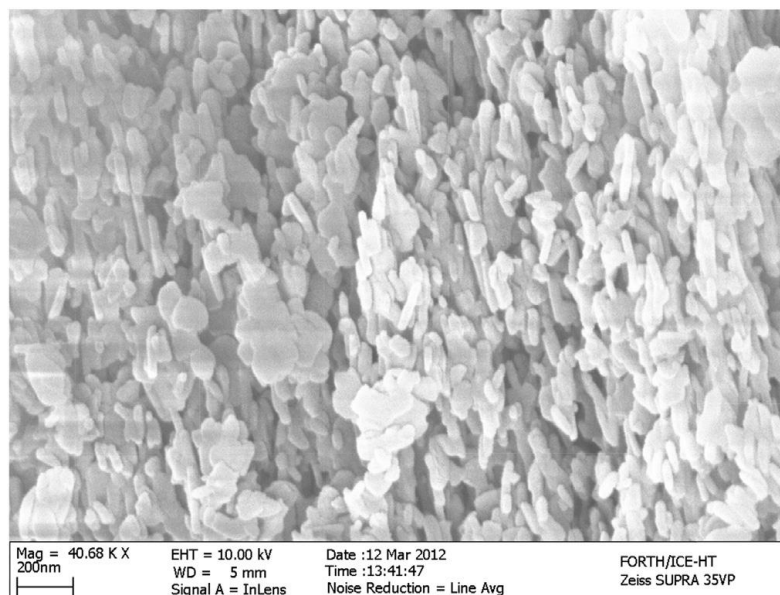
Pro další práci s tímto kalem bylo potřeba znát rovněž obsah těžkých kovů. V Tab. 22 jsou uvedeny výsledky XRF analýzy, spolu s limitními hodnotami koncentrací těžkých kovů uplatňovaných v zemědělství dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. Z tabulky vyplývá, že obsah analyzovaných těžkých kovů byl pod uvedenými limitními hodnotami.

Tab. 22: Koncentrace těžkých kovů ve vysušeném řeckém kalu z ČOV v porovnání s limity vyhlášky č. 437/2016 Sb.

Ukazatel	Koncentrace [mg/kg sušiny]	Limitní hodnota [mg/kg sušiny]
As	<1	30
Cd	<1	5
Cr	<1	200
Cu	80	500
Ni	<1	100
Pb	<1	200
Zn	80	2500
Hg	<1	4

Morfologie vysušeného kalu byla studována pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) na zařízení LEO-SUPRA 35VP se sondou Bruker EDX (pracoviště

Univerzity v Patrasu, Řecko). Výsledky, prezentované na Obr. 13, ukazují hranolovité a destičkovité krystaly struvitu s velikostí menší než 200 nm.

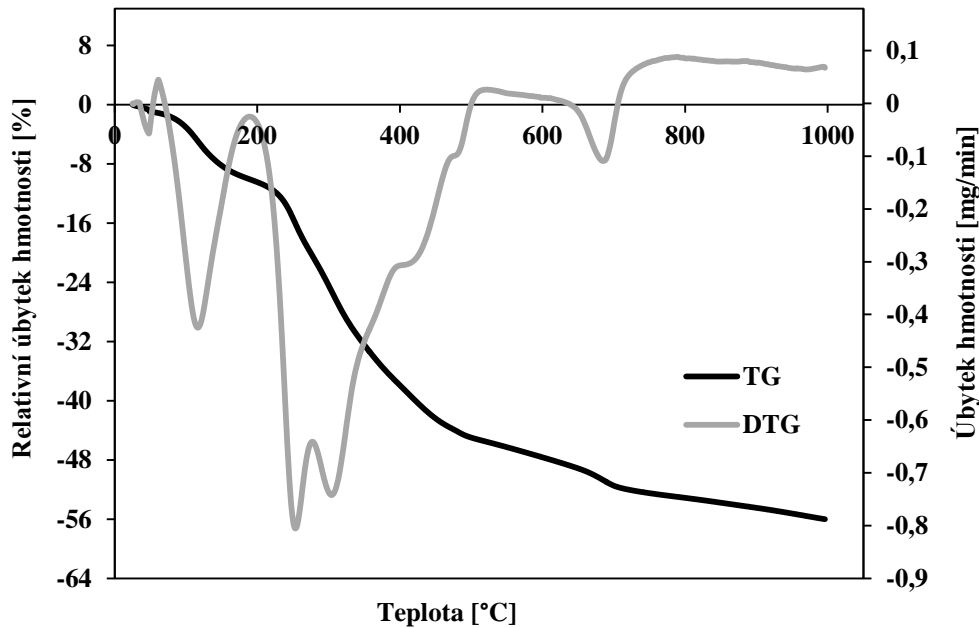


Obr. 13: Morfologie vysušeného řeckého kalu z ČOV získaná pomocí SEM

Mineralogické složení vysušeného kalu bylo získáno pomocí rentgenové difraktometrie (X-Ray Diffraction, XRD) přístrojem Bruker D2 Phaser na pracovišti VŠCHT v Praze. Byl identifikován struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), kalcit (CaCO_3) a křemen (SiO_2), což koresponduje s výsledky XRF analýzy.

Vzhledem k malému procentu amorfnní fáze ve vysušeném kalu bylo potřeba přistoupit k jeho tepelnému zpracování. Možný efekt vypálení kalu byl nejprve studován pomocí termogravimetrické analýzy (Thermogravimetric Analysis, TGA). Měření bylo provedeno na VŠCHT v Praze přístrojem Labsys Evo (Setaram). Operační teplota tohoto zařízení je 25-1600 °C. Měření proběhlo ve vzduchové atmosféře a vzorky byly vystaveny lineárnímu zahřívání 5 °C/min mezi 25-1000 °C. Výstupem měření jsou křivka derivační termogravimetrie (Derivative thermogravimetry, DTG) (Obr. 14) a termogravimetrická křivka (Thermogravimetry, TGA) (Obr. 16); DTG data byla získána derivací TGA křivky.

Termogravimetrická křivka a křivka derivační termogravimetrie ukazují čtyři viditelné zlomy. V teplotním intervalu 70-150 °C dochází k odpaření fyzikálně vázané vody a k rozkladu struvitu [111]. Další významný úbytek hmotnosti byl pozorován v teplotním rozsahu 200-500 °C, což odpovídá rozkladu organických látek s delším uhlíkovým řetězcem. Následně při teplotách mezi 650-750 °C dochází k rozkladu kalcitu [72].



Obr. 14: TGA a DTG křivky, teplotní spád 5 °C/min

Abychom obdrželi materiál vhodný pro použití v cementových kompozitech, vysušený kal byl vypalován v laboratorní peci při 700 °C po dobu 2 hodin. Teplotní spád byl 6 °C/min.

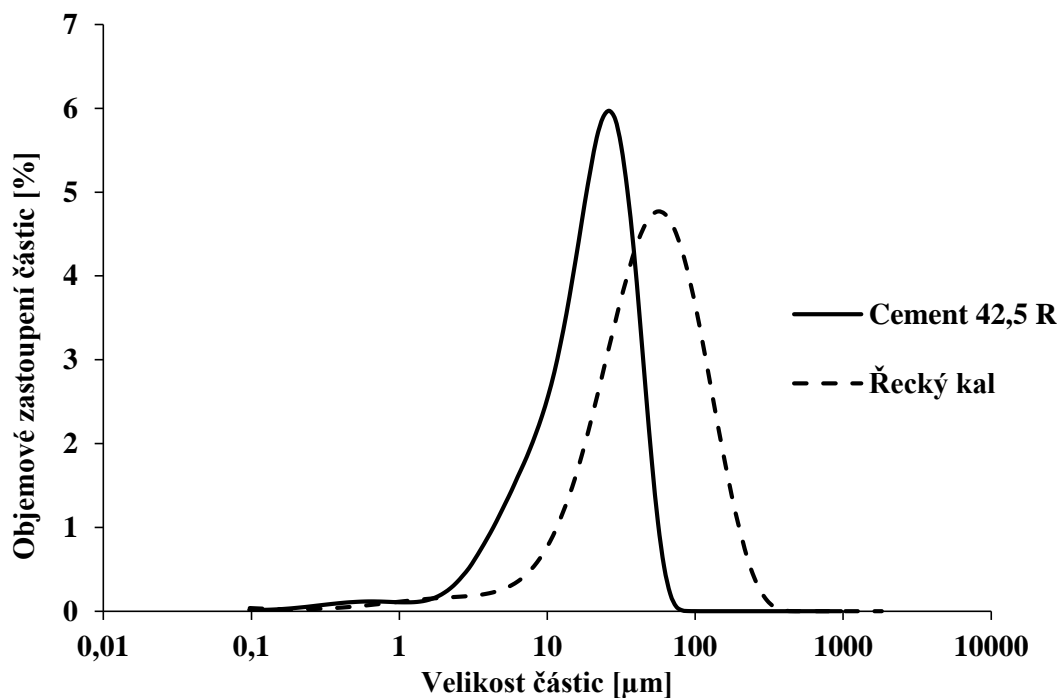
Vypálený říční kal je ukázán na Obr. 15.



Obr. 15: Vypálený říční kal

Pro dosažení jemnosti podobné cementu byl získaný materiál mlet v diskovém mlýnu. Sypná hmotnost takto upraveného kalu byla 959 kg/m³ a hustota matrice 2549 kg/m³. Tyto hodnoty jsou vyšší než pro vysušený kal.

Měření distribuce velikosti částic vypáleného namletého kalu bylo provedeno pomocí přístroje Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch), který pracuje na principu laserové difrakce. Výsledky, uvedené na Obr. 16, ukazují větší velikost částic vypáleného mletého kalu v porovnání s velikostí částic cementu CEM I 42,5 R.



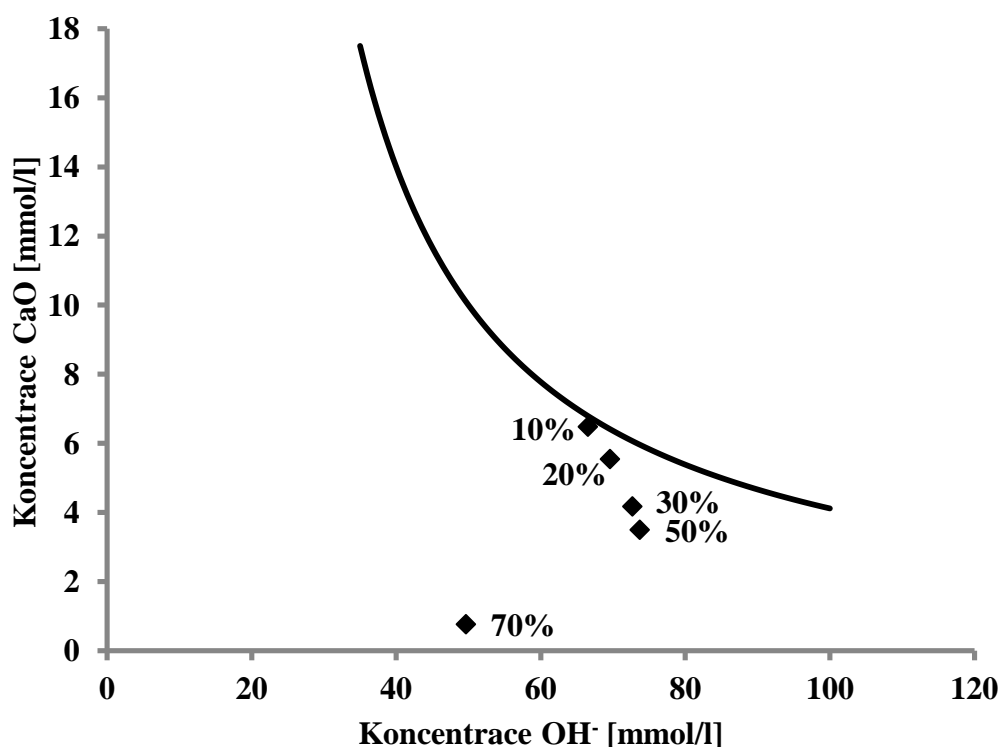
Obr. 16: Distribuce velikosti částic vypáleného mletého řeckého kalu v porovnání s cementem CEM I 42,5 R

Chemické složení vypáleného kalu, získané metodou XRF, prezentuje Tab. 23; lze pozorovat zvýšení obsahu SiO_2 o cca 5 % hm. v porovnání s kalem před vypálením a množství Al_2O_3 vzrostlo o cca 2 % hm. To je známkou rozkladu organických látek.

Tab. 23: Chemické složení vypáleného řeckého kalu – hlavní oxidy

Složka	Obsah [% hm.]
SiO_2	22,85
Al_2O_3	8,89
Fe_2O_3	5,89
CaO	25,41
MgO	5,36
SO_3	6,73
ZnO	0,26
Na_2O	4,83
K_2O	4,47
TiO_2	1,00
P_2O_5	12,54
Cl	4,14
Σ	99,37

K určení pucolánové aktivity vypáleného mletého kalu byly vybrány dvě metody: Frattini test, který je specifikován v normě ČSN EN 196-5 [112] a modifikovaný Chappelle test, vycházející z normy NF P 18-513 [113] Z Obr. 17, kde jsou prezentovány výsledky Frattiniho testu, vyplývá, že kal je pucolánově aktivní, neboť všechny zkoušené směsi kalu s cementem (10–70 % hm.) leží pod izotermou nasycenosti oxidu vápenatého. S tím koresponduje i výsledek modifikovaného Chappelle testu, kde množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$, zreagovaného s kalem, bylo 1373 mg/g kalu. Oba výsledky měření pucolánové aktivity jsou velmi slibné z hlediska využití vypáleného mletého kalu z ČOV jako částečné náhrady cementu.



Obr. 17: Pucolánová aktivita vypáleného řeckého kalu dle testu Frattini

Pro pucolánovou aktivitu je zásadní přítomnost amorfní fáze v posuzovaném materiálu. Obsah amorfní fáze byl určen na základě podílu krystalické fáze pomocí XRD analýzy (difraktometr Bruker D2 Phaser, VŠCHT v Praze) jako 41 % hm. Výsledky kvantitativní XRD analýzy uvádí Tab. 24. S přihlédnutím k chemickému složení kalu lze konstatovat, že zjištěný obsah amorfní fáze odpovídá výsledkům měření pucolánové aktivity.

Tab. 24: Kvantitativní XRD analýza vypáleného řeckého kalu

Složka		Obsah [% hm.]
Amorfni fáze		41,0
Krystalická fáze	Kalcit	5,5
	Křemen	11,9
	Anhydrit	4,3
	Hematit	4,6
	Halit	2,9
	Albit	1,7
	Mikroclin	5,7
	Apatit	1,6
	Chabazit	1,8
	Bassanit	17,2
	Biotit	0,9

Pro vysušený i vypálený kal byly provedeny zkoušky vyluhovatelnosti, zaměřené na obsah vyluhovatelných solí: zejména chloridů, síranů a dusičnanů. Výluhy kalů byly připraveny v souladu s normou ČSN EN 12457-2 [114]. Poměr kapalné a pevné fáze byl 10 l/kg.

Výsledky (Tab. 25) ukazují relativně velká množství chloridů a pouze stopová množství dusičnanů a síranů.

Tab. 25: Obsah vyluhovatelných solí vysušeného a vypáleného řeckého kalu

Materiál	Chloridy [mg/g]	Dusičnany [mg/g]	Sírany [mg/g]
Vysušený řecký kal	13,4	0,5	0,3
Vypálený řecký kal	18,5	0,5	0,2

3.1.4 Kal z polské čistírny odpadních vod

Druhý zkoumaný čistírenský kal pocházel z Polska, z čistírny odpadních vod „Hajdow“ města Lublin.

Tento odpad by byl v ČR zařazen podle Katalogu odpadů uvedeného ve vyhlášce č. 93/2016 Sb. pod katalogovým číslem 19 08 05 a byl by kategorizován jako ostatní odpad „O“.

Kal, vycházející z procesu zpracování vody, byl v čistírně podroben fermentaci ve fermentačních komorách a následně mechanicky odvodněn na pásových filtračních lisech. Odvodněný kal byl sušen v sušárně s fluidním ložem na sušinu cca 85 % hm.

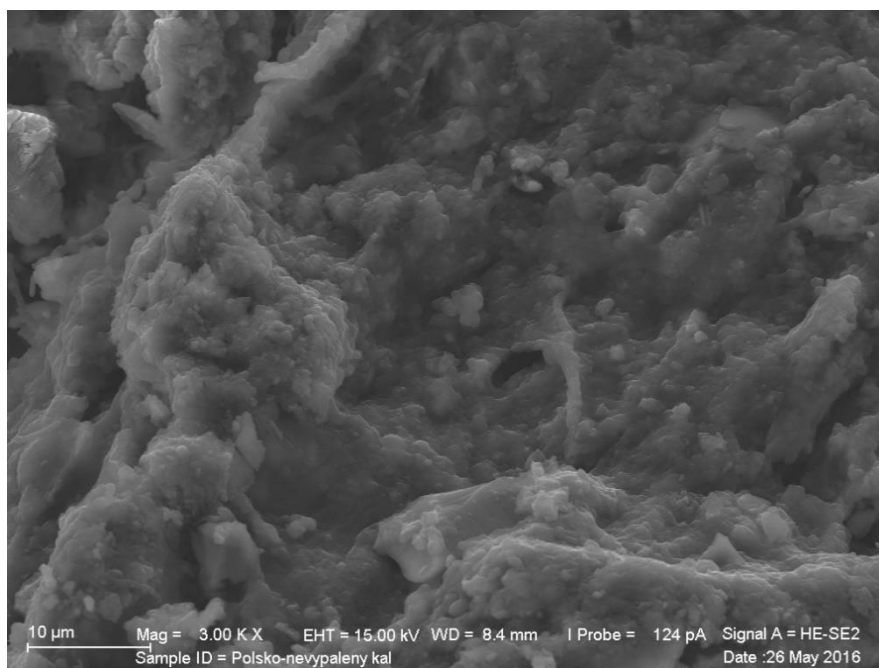
Obsah sušiny takto zpracovaného kalu byl stanoven v souladu s normou ČSN EN 14346 [115] na 87,5 % hm. Vysušený kal byl analyzován pomocí rentgenové fluorescenční analýzy (X-Ray Fluorescence, XRF), chemické složení ukazuje Tab. 26.

Tab. 26: Chemické složení vysušeného polského kalu – hlavní oxidy

Složka	Obsah [% hm.]
SiO₂	22,7
Al₂O₃	5,6
Fe₂O₃	5,3
CaO	24,1
MgO	3,7
SO₃	9,9
Na₂O	0,9
K₂O	2,6
TiO₂	0,7
P₂O₅	22,2
Cl	0,4
Σ	98,1

Sypná hmotnost vysušeného polského kalu byla 501 kg/m³ a hustota matrice 1494 kg/m³.

Morfologie vysušeného kalu byla zjišťována pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) při zvětšení 3 kx zařízením Merlin (Zeiss) na VŠCHT v Praze. Na Obr. 18 lze při zvětšení 3 kx vidět amorfni charakter organické fáze vysušeného kalu.



Obr. 18: Morfologie vysušeného polského kalu z ČOV získaná pomocí SEM

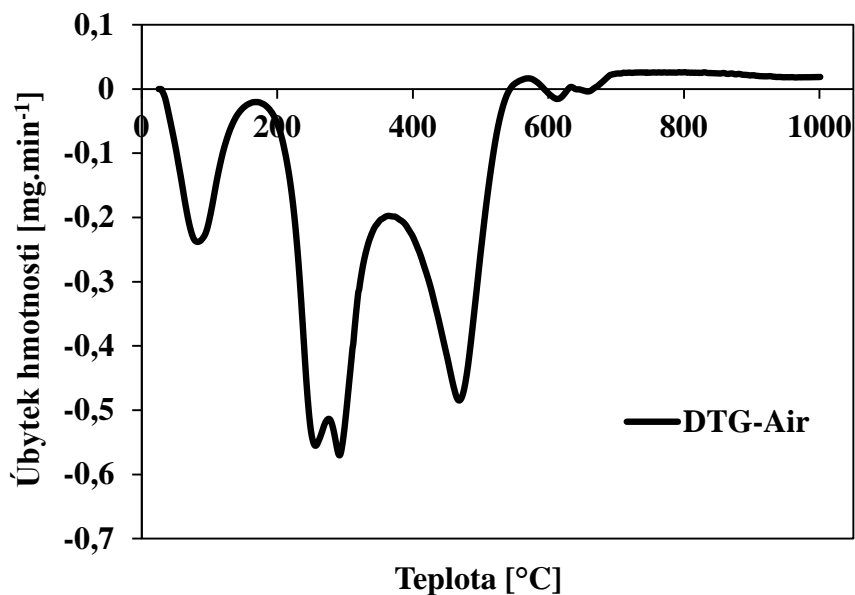
K určení mineralogického složení vysušeného kalu sloužila rentgenová difrakční analýza (X-Ray Diffraction, XRD). Měření bylo realizováno na pracovišti VŠCHT v Praze na přístroji Bruker D2 Phaser. Výsledky ukázaly, že amorfnní fáze tvoří 62,1 % hm. kalu. Hlavní krystalická fáze, jak je vidět z Tab. 27, je křemen (SiO_2). Je potřeba vzít v úvahu, že nelze považovat celou amorfnní fázi za pucolánově aktivní, neboť obsahuje významné množství organických látek.

Tab. 27: Kvantitativní XRD analýza vysušeného polského kalu

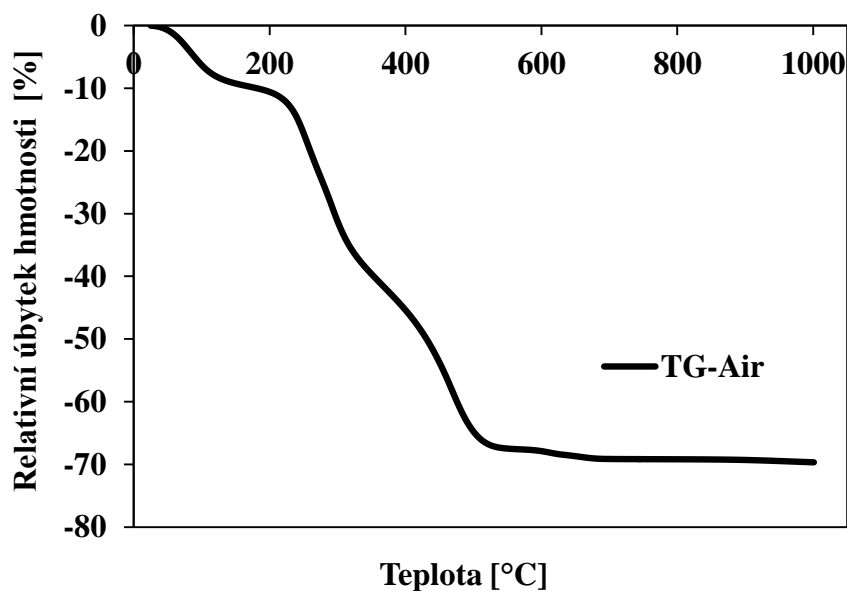
Složka		Obsah [% hm.]
Amorfnní fáze		62,1
Krystalická fáze	Křemen	19,2
	Kalcit	5,2
	Dolomit	2,9
	Mikroklin	4,2
	Struvit	6,4

Efekt tepelného zpracování kalu byl studován pomocí termogravimetrické analýzy (Thermogravimetric analysis, TGA) pomocí přístroje Labsys Evo (Setaram) na pracovišti VŠCHT v Praze. Operační teplota tohoto zařízení je 25-1600 °C. Měření proběhlo ve vzduchové atmosféře a vzorky byly vystaveny lineárnímu zahřívání 5 °C/min mezi 25-

1000 °C. Výstupem měření jsou křivka derivační termogravimetrie (Derivative thermogravimetry, DTG) (Obr. 19) a termogravimetrická křivka (Thermogravimetry, TGA) (Obr. 20); DTG data byla získána derivací TGA křivky.



Obr. 19: DTG křivka, teplotní spád 5 °C/min



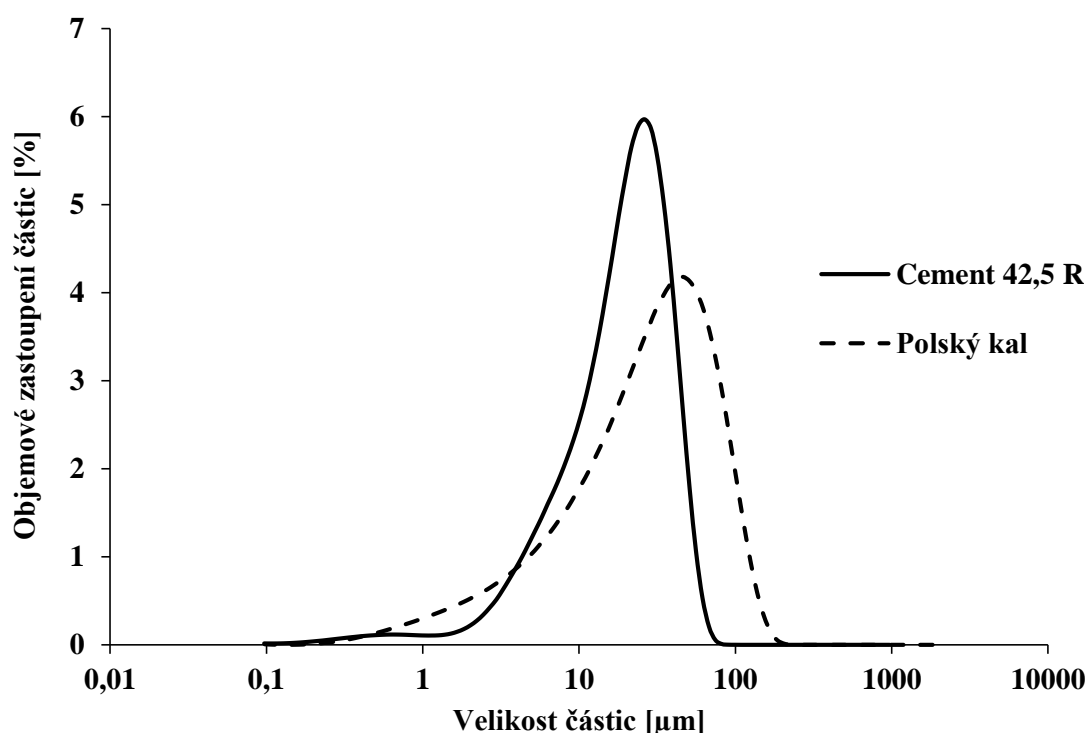
Obr. 20: TGA křivka, teplotní spád 5 °C/min

První hmotnostní změny, korespondující s odpařením fyzikálně vázané vody a s rozkladem struvitu, lze pozorovat do 180 °C [111; 116]. Většina rozkladných procesů probíhala v teplotním rozsahu 180-580 °C. Hlavní pík se dvěma maximy (255 °C, 291 °C) lze přiřadit k rozkladu komplexních organických struktur [116]. Úbytek hmotnosti mezi 300-350 °C

odpovídá rozkladu celulózy, hemicelulózy, mikroskopických řas a některých alifatických aminokyselin. Pík, pozorovaný přibližně při 500 °C, může pocházet z rozkladu aromatických struktur nebo heterocyklických sloučenin [116; 117; 118; 119]. Dva nízké píky, nacházející se v teplotním intervalu 600-700 °C, mohou být přiřazeny rozkladu dolomitu a kalcitu [120]. Pro teploty vyšší než 700 °C již nebyly zaznamenány žádné rozkladné procesy.

Na základě předběžných výše uvedených analýz byl vysušený polský kal podroben procesu vypalování v laboratorní peci a byl ponechán 2 hodiny při 700 °C. Teplotní spád byl 6 °C/min.

Vypálený kal byl následně mlet v diskovém mlýnu, aby bylo dosaženo jemnosti podobné cementu. Měření distribuce velikosti částic vypáleného namletého kalu bylo provedeno pomocí přístroje Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch). Na Obr. 21 lze pozorovat porovnání velikosti částic vypáleného mletého kalu s velikostí částic cementu CEM I 42,5 R. Ačkoliv výsledná jemnost mletého kalu je o něco horší v porovnání s cementem, distribuce velikosti částic kalu je pro přidavek k cementu do cementových kompozitů zcela dostačující.



Obr. 21: Distribuce velikosti částic vypáleného mletého polského kalu v porovnání s cementem CEM I 42,5 R

Po tepelné úpravě a mletí kalu byly zjišťovány jeho základní fyzikální vlastnosti, chemické a mineralogické složení, morfologie a pucolánová aktivita.

Sypná hmotnost takto upraveného kalu vzrostla na 657 kg/m^3 a hustota matrice se rovněž zvýšila na hodnotu 2800 kg/m^3 . Hodnoty hustoty matrice nalezené v literatuře se pohybují v rozsahu $1800\text{-}2900 \text{ kg/m}^3$, nejvíce výsledků se blíží hodnotě 2350 kg/m^3 . Nízký poměr sypné hmotnosti k hustotě matrice indikuje porézní charakter tohoto materiálu [4; 87]. Měrný povrch, získaný metodou podle Blainea, byl $1405 \text{ m}^2/\text{kg}$, což je blíže k dolnímu limitu udávanému jinými autory $500\text{-}3900 \text{ m}^2/\text{kg}$ [4].

Výsledek měření ztráty žíháním byl 0,2 %. Měření bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN 15169 [121]. Cyr a kol. ve své práci [5] uvádí data pro ztrátu žíháním kalů z ČOV, zjištěná v literatuře: minimální hodnoty ztráty žíháním dosahovaly 0,2 %, průměrné hodnoty 6,1 % a maximální hodnoty 41,8 %.

Chemické složení vypáleného kalu, získané metodou XRF, ukazuje Tab. 28.

Tab. 28: Chemické složení vypáleného polského kalu – hlavní oxidy

Složka	Obsah [% hm.]
SiO₂	30,8
Al₂O₃	7,9
Fe₂O₃	3,5
CaO	19,7
MgO	4,1
SO₃	2,7
Na₂O	0,6
K₂O	2,3
TiO₂	1,0
P₂O₅	25,3
Cl	0,1
Σ	98

Výsledky XRF analýzy obsahu těžkých kovů jsou prezentovány v Tab. 29. Získaná data byla porovnána s limity platnými v České republice pro kal aplikovaný na zemědělskou půdu dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. Tyto limity jsou pro některé kovy ještě přísnější než limity dané směrnicí o kalcích 86/278/EEC. Z tabulky vyplývá, že obsah analyzovaných těžkých kovů byl pod uvedenými limitními hodnotami.

Tab. 29: Koncentrace těžkých kovů ve vypáleném mletém polském kalu z ČOV v porovnání s limity vyhlášky č. 437/2016 Sb.

Ukazatel	Koncentrace [mg/kg sušiny]	Limitní hodnota [mg/kg sušiny]
Ag	<1	
As	<1	30
Cd	<1	5
Co	<1	
Cr	<1	200
Cu	39	500
Mn	36	
Mo	<1	
Ni	<1	100
Sr	39	
Pb	<1	200
Zn	80	2500
Hg	<1	4

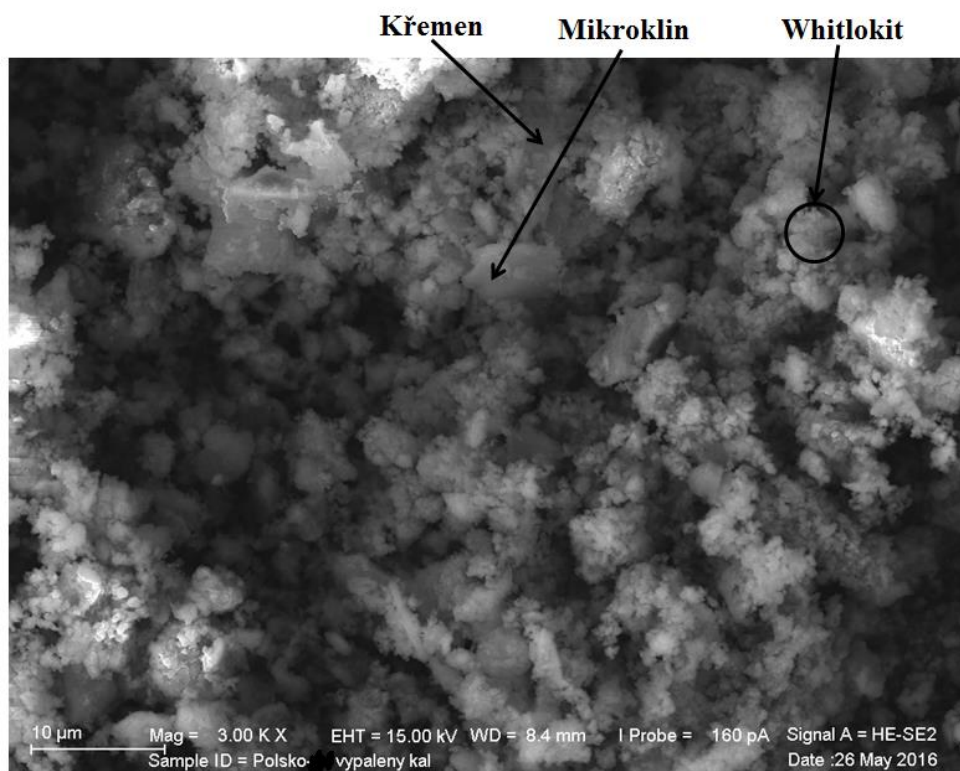
Tab. 30 uvádí kvantitativní mineralogické složení vypáleného kalu získaného XRD analýzou. Výsledky ukazují, že hlavní krystalické fáze jsou křemen (SiO_2) a whitlokit $((\text{Ca.Mg})_3(\text{PO}_4)_2)$.

Tab. 30: Kvantitativní XRD analýza vypáleného polského kalu

	Složka	Obsah [% hm.]
Amorfni fáze		52,3
Krystalická fáze	Křemen	22,4
	Whitlokit	11,6
	Albit	3,2
	Mikroclin	3,8
	Hematit	5,2
	Anhydrit	4,7

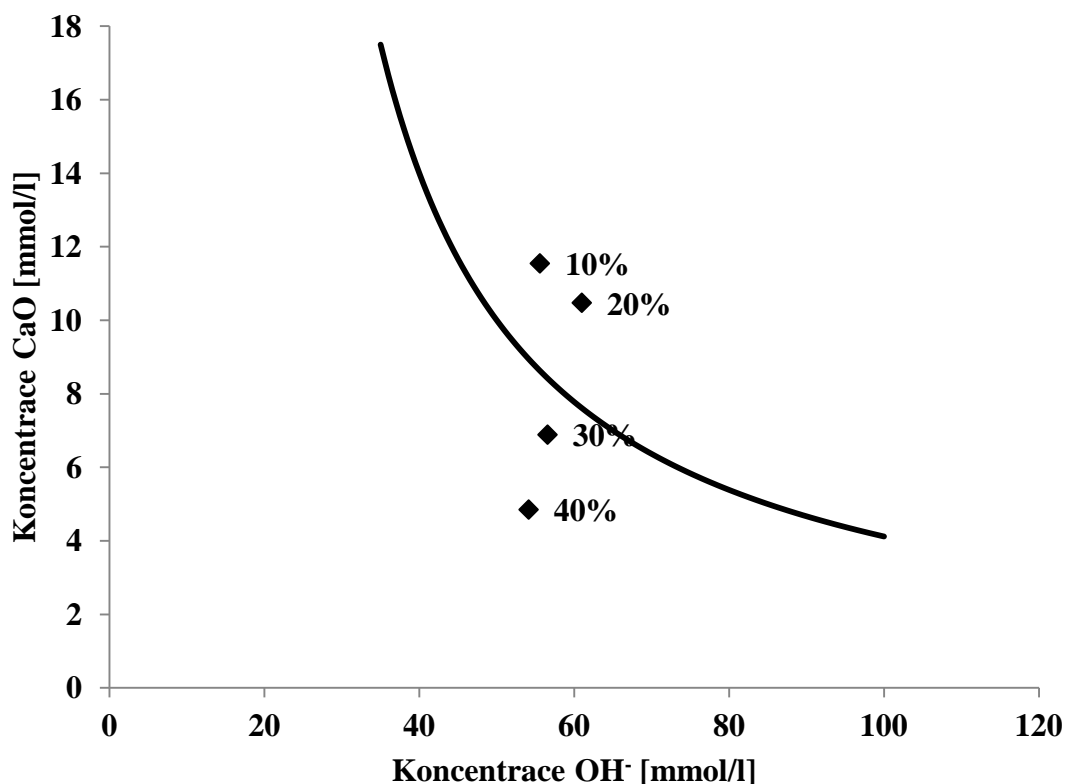
Obsah fosforečnanů vápenatých ve formě whitlokitu pravděpodobně závisí na složení kalu a na teplotě a čase jeho tepelného zpracování. Porovnání chemického a mineralogického složení s publikovanými výsledky jiných autorů ukazuje velkou variabilitu mezi různými typy kalů. Složení popelů ze spalování kalů se velmi liší v závislosti na původu odpadní vody, podle konkrétních operací aplikovaných při čištění odpadní vody a podle dalšího nakládání se vzniklým kalem. Například obsah SiO_2 v popelu ze spalování kalů může být podle jednotlivých prací v rozsahu 14-65 % hm. [5]. Obsah amorfni fáze studovaného materiálu byl vyhodnocen na základě stupně krystalinity na 52,3 % hm. S ohledem na chemické složení je tato hodnota v kvalitativním souladu s výsledky měření pucolánové aktivity. Tepelně zpracovaný kal obsahuje pouze omezené množství SiO_2 a Al_2O_3 , tj. dvou oxidů zodpovědných za pucolánovou aktivitu; navíc část těchto oxidů se nalézá v krystalické formě. Obsah amorfni fáze různých typů SSA se obvykle pohybuje v rozmezí 35-75 % hm. [4]. Několik autorů dokonce uvádí, že výsledky XRD analýzy neukázaly žádnou amorfni fázi. Tyto údaje rovněž potvrzují velkou variabilitu tohoto typu odpadního materiálu [5].

Morfologie tepelně upraveného kalu byla studována na pracovišti VŠCHT v Praze pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) s použitím zařízení Merlin (Zeiss) při zvětšení 3 kx. Obr. 22 ukazuje krystaly křemene, mikroklinu a whitlokitu. Lze pozorovat, že vypálený kal je tvořen různě velkými částicemi nepravidelného tvaru, které vytváří porézní strukturu tohoto materiálu. To může vést k větší spotřebě záměsové vody při přípravě kompozitů.



Obr. 22: Morfologie vypáleného polského kalu získaná pomocí SEM

K určení pucolánové aktivity vypáleného mletého kalu byly vybrány dvě metody: Frattini test, který je specifikován v normě ČSN EN 196-5 [112] a modifikovaný Chappelle test, vycházející z normy NF P 18-513 [113]. Na Obr. 23 jsou prezentovány výsledky Frattiniho testu. Zkoušené směsi kalu s cementem v poměru 30 % hm. a 40 % hm. jsou pucolánově aktivní (leží pod izotermou nasycenosti oxidu vápenatého), zatímco směsi 10 % hm. a 20 % hm. leží nad izotermou nasycenosti oxidu vápenatého, tj. kal v těchto směsích nevykazuje pucolánovou aktivitu. V souladu s těmito výsledky je i výsledek modifikovaného Chappelle testu, kde množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$, zreagovaného s kalem, bylo 1030 mg/g kalu. Oba výsledky měření pucolánové aktivity jsou slibné z hlediska využití vypáleného mletého kalu z ČOV jako přísadky k cementu.



Obr. 23: Pucolánová aktivita polského kalu dle testu Frattini

Pozornost byla také věnována obsahu vybraných vyluhovatelných solí; ve výlužích vysušeného i vypáleného polského kalu byly analyzovány chloridy, sírany a dusičnany. Výluhy kalů byly připraveny dle normy ČSN EN 12457-2 [114]. Poměr kapalné a pevné fáze byl 10 l/kg.

Výsledky ukázaly pouze stopová množství chloridů a malá množství dusičnanů a síranů (Tab. 31).

Tab. 31: Obsah vyluhovatelných solí vysušeného a vypáleného polského kalu

Materiál	Chloridy	Dusičnany	Sírany
	[mg/g]	[mg/g]	[mg/g]
Vysušený polský kal	0,8	3,9	4,9
Vypálený polský kal	0,7	1,7	6,9

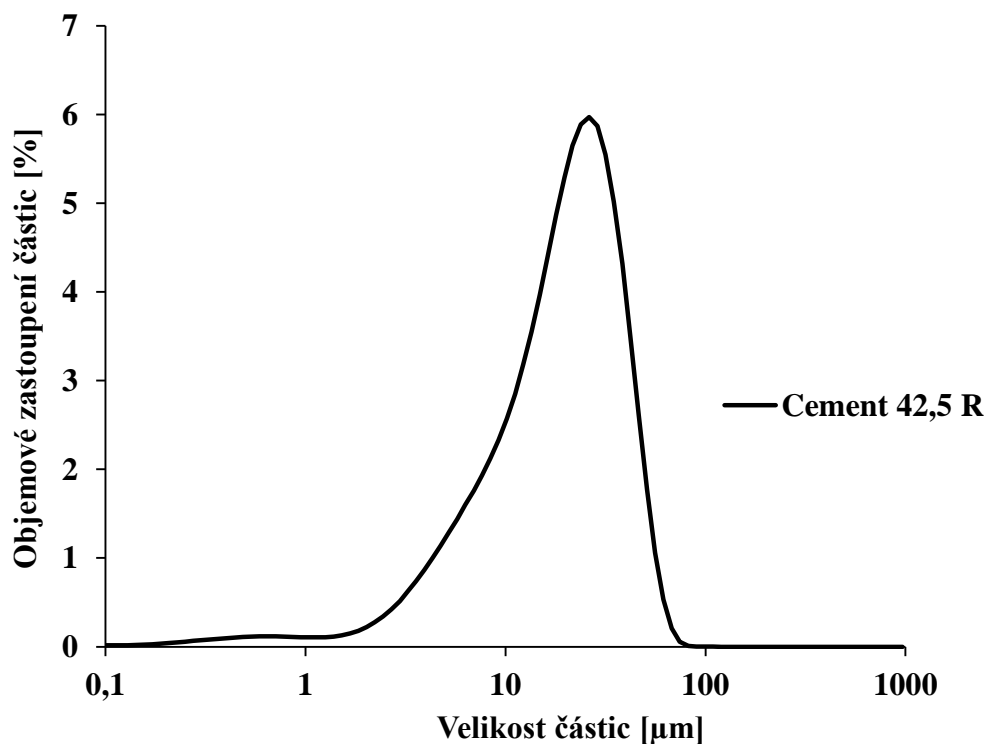
3.1.5 Pojivo

Jako pojivo byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R společnosti Českomoravský cement, a.s., skupina HeidelbergCement, závod Mokrá. Chemické složení cementu bylo zjištěno XRF analýzou (Tab. 32).

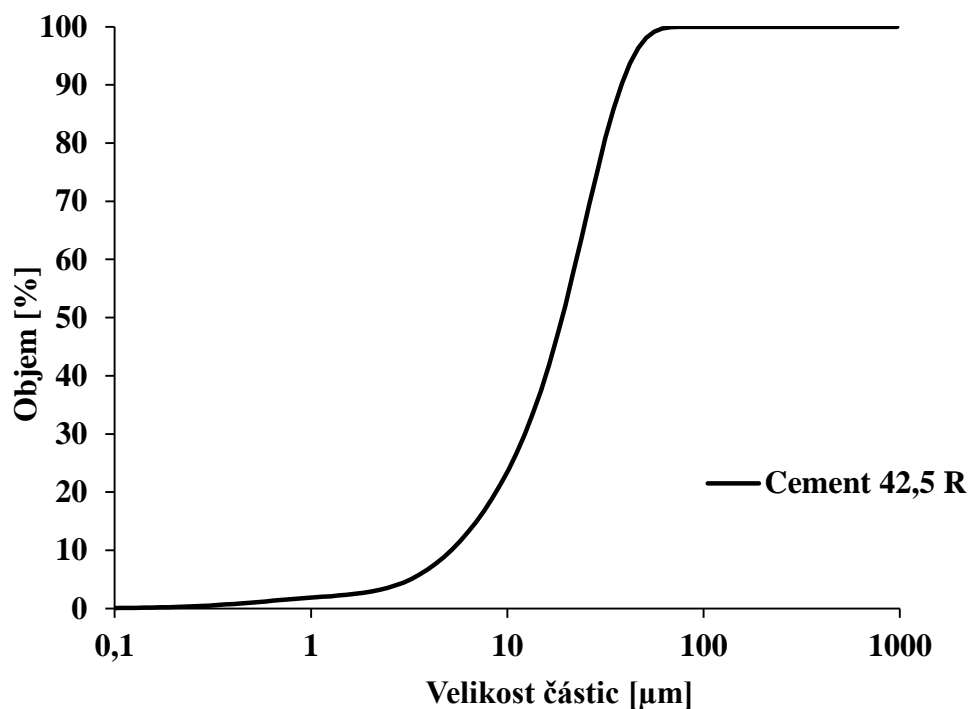
Tab. 32: Chemické složení portlandského cementu CEM I 42,5 R, hm. %.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O
64,2	19,5	4,7	3,2	1,3	3,2	0,047	0,78	0,09

Měrný povrch byl 381 m²/kg, měření bylo provedeno metodou dle Blaina v souladu s ČSN EN 196-6 [122]. Hustota matrice měřená pomocí héliové pyknometrie byla 3129 kg/m³. Distribuce velikosti částic byla měřena pomocí přístroje Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch), který pracuje na principu laserové difrakce. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 24 – distribuční křivka a Obr. 25 – kumulativní křivka.



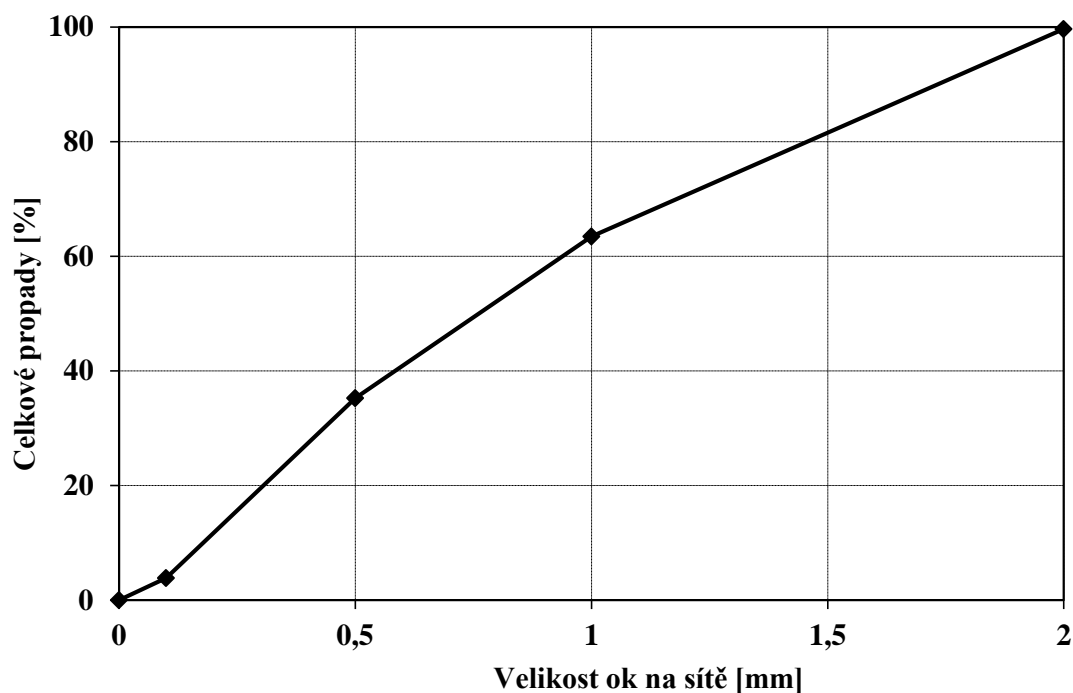
Obr. 24: Distribuce velikosti částic portlandského cementu – distribuční křivka



Obr. 25: Distribuce velikosti částic portlandského cementu – kumulativní křivka

3.1.6 Plnivo

Plnivem kompozitů byl normový křemenný písek ze společnosti Filtrační písky, a.s., závod Chlum u Doks. Písek frakce 0-2 mm byl smíchán ze tří velikostních frakcí - PG1 (0,063/0,5 mm), PG2 (0,08/1 mm) a PG3 (1/2 mm) - v hmotnostním poměru 1:1:1. Sítová analýza písku je uvedena na Obr. 26.



Obr. 26: Sítová analýza písku

Hustota matrice písku ρ_{mat} byla 2647 kg/m³. Pro porovnání termofyzikálních vlastností písku a odpadních plastů, byly pro křemenný písek zjišťovány sypná hmotnost ρ_s a tepelné vlastnosti v závislosti na zhutnění. Měření probíhalo podle postupu uvedeného v kapitole 4.1.1. Výsledky předkládá Tab. 33.

Tab. 33: Sypná hmotnost písku a jeho tepelné vlastnosti v závislosti na zhutnění

Čas [s]	ρ_s [kg/m ³]	λ [W/m.K]	C_v [10 ⁶ J/m ³ .K]	a [10 ⁻⁶ m ² /s]
0	1657	0,410	1,569	0,261
10	1910	0,562	1,681	0,334
20	1916	0,575	1,683	0,342
30	1922	0,576	1,684	0,342
60	1927	0,577	1,689	0,342

3.1.7 Voda

Jako záměsová i ošetřovací voda byla použita pitná voda z vodovodního řadu, která v souladu s ČSN EN 1008 [123] danému účelu vyhovuje.

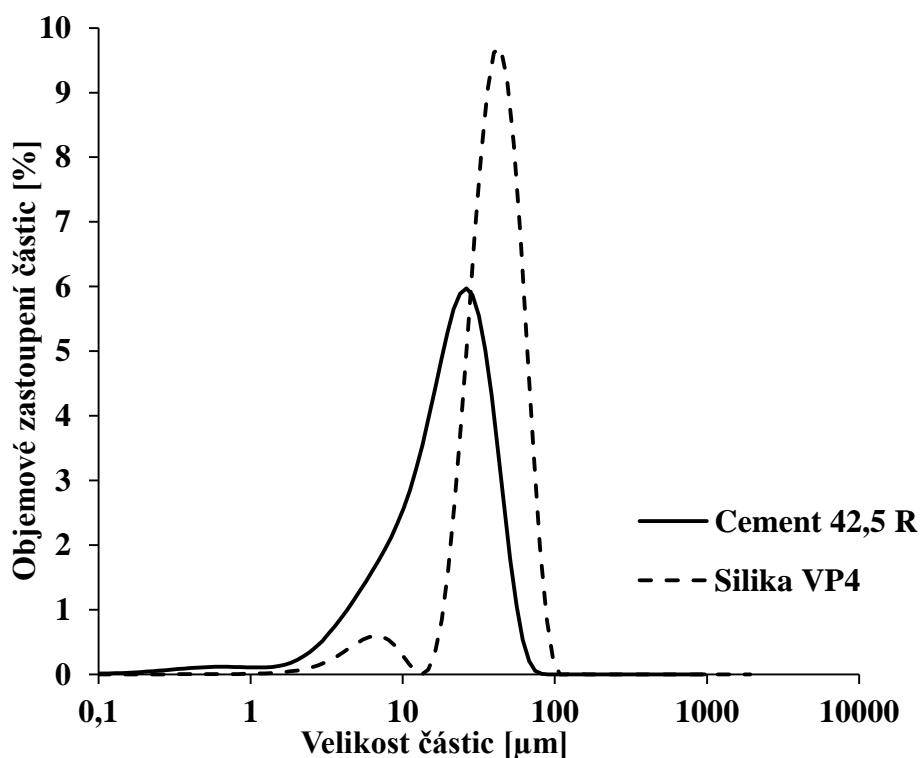
3.1.8 Silika VP4

Při přípravě cementových kompozitů s náhradou písku expandovaným polypropylenem EPP byla receptura doplněna o syntetický koagulovaný amorfni SiO_2 (Silika VP4), firmy AV EKO-COLOR s.r.o. Chemické složení (Tab. 34) bylo získáno metodou rentgenové fluorescenční analýzy (XRF). Zjištěný obsah SiO_2 byl 98,93 hm. %. Měrný povrch určený metodou dle Blaina v souladu s ČSN EN 196-6 [122] byl $5210 \text{ m}^2/\text{kg}$. Pucolánová aktivita, měřená modifikovaným Chappelle testem, byla $1530 \text{ mg Ca(OH)}_2/\text{g}$.

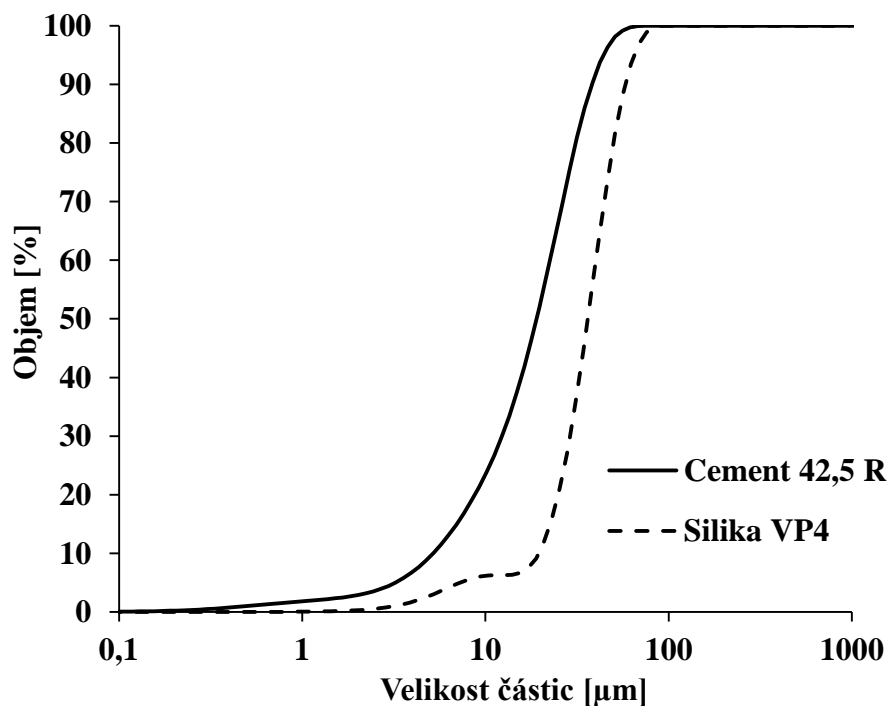
Tab. 34: Chemické složení Siliky VP4, hm. %

SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	C a další prvky
98,93	0,11	0,84	0,13

Hustota matrice měřená pomocí héliového pyknometru byla 2348 kg/m^3 . Distribuce velikosti částic, získaná pomocí přístroje Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch), je uvedena na Obr. 27 – distribuční křivka a Obr. 28 – kumulativní křivka.



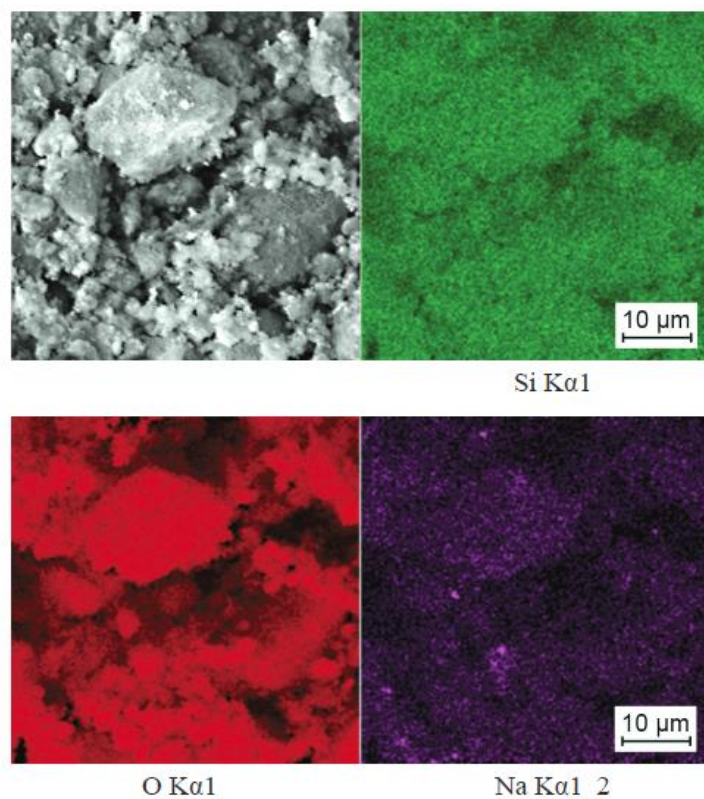
Obr. 27: Distribuce velikosti částic – Silika VP4 v porovnání s cementem CEM I 42,5 R – distribuční křivka



Obr. 28: Distribuce velikosti částic – Silika VP4 v porovnání s cementem – kumulativní křivka

Co se týká velikosti částic, zrna Siliky VP4 jsou větší v porovnání s částicemi cementu. Nicméně Silika VP4 vykazuje naopak významně větší měrný povrch (hodnota byla získána metodou podle Blaina) než portlandský cement.

Na Obr. 29 je zobrazena morfologie Siliky VP4, získaná pomocí SEM (mikroskop Tescan Lyra s duálním paprskem (LYRA), VŠCHT v Praze) a mapa distribuce prvků analyzovaná energo disperzní spektrometrií (EDS) (analyzátor X-Max^N s SDD detektorem a AZtecEnergy softwarem, VŠCHT v Praze). EDS data korespondují s chemickým složením koagulované siliky a dávají informaci o rovnoměrné distribuci křemíku a kyslíku.



Obr. 29: Morfologie Siliky VP4 získaná pomocí SEM a mapa prvků obdržená EDS analýzou

3.1.9 Superplastifikátor

Jako superplastifikátor byl vybrán Dynamon SX 45 společnosti Mapei s.r.o., který patří do řady superplastifikátorů na bázi akrylových polymerů. Technické údaje výrobku, získané z internetových stránek výrobce [124], jsou shrnuty v Tab. 35.

Tab. 35: Technické údaje superplastifikátoru Dynamon SX 45

Konzistence	Tekutina
Objemová hmotnost [g/cm³]	1,12
Obsah sušiny [%]	45
Chloridy rozpustné ve vodě [%]	-
Obsah alkálií (ekvivalent Na₂O) [%]	<0,2
pH	6,5

3.2 Přehled receptur

Ze surovin popsaných v předchozí kapitole byly připraveny kompozitní směsi, které byly následně ošetřovány ve vodě po dobu 28 dní, případně 90 dní.

Polypropylenové odpady z výroby potrubí

V první části práce byly vyrobeny kompozity, ve kterých jako částečná náhrada písku v množství 10 %, 20 %, 30 %, 40 % a 50 % hmotnostních sloužily polypropylenové odpady.

Byly vyrobeny tři typy kompozitů: v první směsi byl písek nahrazen drceným PP-R, v druhé drceným PP-GF a ve třetí směsi byl jako náhrada aplikován regranulovaný PP-Reg. Připraveny byly rovněž referenční vzorky (R) bez obsahu plastů. Vodní součinitel byl udržován na konstantní hodnotě 0,5 pro všechny připravované vzorky. Složení testovaných kompozitů ukazuje Tab. 36.

Tab. 36: Složení testovaných kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg

Vzorek	Cement [g]	Písek [g]	Voda [g]	PP [g]	v/c
R	450	1350	225	0	0,5
10 %	450	1215	225	135	0,5
20 %	450	1080	225	270	0,5
30 %	450	945	225	405	0,5
40 %	450	810	225	540	0,5
50 %	450	675	225	675	0,5

Expandovaný polypropylen

Na rozdíl od PP odpadů byla vzhledem k nízké sypané hmotnosti EPP navržena náhrada písku pomocí objemových, nikoli hmotnostních, procent. Nahrazení písku plastovým odpadem bylo tedy 10 %, 20 %, 30 %, 40 % a 50 % objemových. Byl připraven rovněž referenční vzorek bez obsahu plastů. Vodní součinitel byl udržován pro všechny záměsi 0,5.

Při výrobě a následně i po provedených zkouškách mechanických vlastností bylo zjištěno, že u všech záměsí dochází při zhutňování ke stoupaní EPP k povrchu vzorků. Stejný problém byl pozorován více autory při přípravě lehkých betonů z expandovaného polystyrenu (EPS) o hustotě nižší než 300 kg/m^3 ; bylo popsáno, že EPS má tendenci vyplavat k povrchu směsi. To má za následek špatné promíchání směsi a segregaci jejích jednotlivých částí, což vyžaduje použití vhodných příměsí, které jsou schopné segregaci zabránit [110].

Hlavním cílem této části práce bylo proto připravit materiál obsahující co největší množství odpadního EPP, přičemž by tento lehký plast zůstal rovnoměrně rozptýlen ve výsledném kompozitu. Za účelem zabránění segregace byl do směsi přidán syntetický koagulovaný amorfni SiO_2 (Silika VP4) a pro dosažení dobré zpracovatelnosti byl aplikován superplastifikátor Dynamon SX 45. Bylo vyrobeno celkem 9 zkušebních záměsí s různými poměry jednotlivých složek. Zpracovatelnost těchto směsí byla zjišťována zkouškou rozlitím dle ČSN EN 12350-5 [125] Pro záměsí s vyhovujícím rozlivem byly vyrobeny trámečky a následně byly provedeny zkoušky mechanických vlastností. Složení konečné vybrané záměsí, kde bylo dosaženo žádoucího rozptýlení EPP v kompozitu i po zhutnění vzorků a která rovněž vyhovuje svou zpracovatelností, uvádí Tab. 37. Náhrada písku odpadním EPP byla 60 % objemových. Připravena byla i referenční směs (R) bez obsahu EPP.

Tab. 37: Složení testovaného kompozitu s obsahem EPP

Vzorek	Cement [g]	VP4 [g]	Dynamon [g]	Voda [g]	Písek [ml]	EPP [ml]	v/c
R	1387,5	112,5	30	750	3300	0	0,5
EPP	1387,5	112,5	30	750	1300	2000	0,5

Cementové pasty s obsahem vypáleného kalu

Řecký kal byl přidáván jako částečná náhrada cementu při přípravě cementových past; nahrazení cementu kalem bylo 10 %, 20 %, 30 % a 60 % hmotnostních. Byly připraveny rovněž referenční vzorky bez obsahu kalu (R). Vodní součinitel byl zachován konstantní pro všechny vzorky a jeho hodnota byla 0,4.

Tab. 38: Složení testovaných cementových past s obsahem vypáleného mletého řeckého kalu

Vzorek	Cement [g]	Řecký kal [g]	Voda [g]	v/c
R	450	0	180	0,4
10 %	405	45	180	0,4
20 %	360	90	180	0,4
30 %	315	135	180	0,4
60 %	180	270	180	0,4

Cementové malty s obsahem vypáleného kalu

Při přípravě cementových malt byl polský kal aplikován jako přídavek k cementu v množství 10 %, 20 % a 30 % hm. Složení vyrobených kompozitů je ukázáno v Tab. 39. Byly připraveny rovněž referenční vzorky (R) bez obsahu kalu. Vodní součinitel byl udržován na konstantní hodnotě 0,5.

Tab. 39: Složení testovaných kompozitů s obsahem vypáleného mletého polského kalu

Vzorek	Cement [g]	Polský kal [g]	Písek [g]	Voda [g]	v/c
R	1350	0	4050	675	0,5
10 %	1350	135	4455	743	0,5
20 %	1350	270	4860	810	0,5
30 %	1350	405	5265	878	0,5

3.3 Příprava zkušebních těles

V první fázi experimentů, kde byly zkoumány jednotlivé receptury a zejména vhodné vodní součinitele, sloužilo k přípravě čerstvých směsí normové míchací zařízení FORM+TEST Prüfsysteme (FORM+TEST Seidner&Co. GmbH), splňující podmínky normy ČSN EN 196-1 [126]. Suroviny byly nejprve naváženy a poté smíchány v suchém stavu při I. rychlostním stupni, který odpovídá 106 ot/min, po dobu jedné minuty. Během 30 sekund byla poté za stálého míchání přilévána záměsová voda a míchání pokračovalo do dosažení času dvou minut. Následně byl proces na 30 sekund přerušeno a s pomocí stěrky bylo provedeno ruční promíchání směsi, které slouží k odstranění případné suché sedliny ze dna míchací nádoby a k docílení lepší výsledné homogenity záměsi. Míchání dále pokračovalo při II. stupni míchacího režimu (196 ot/min) po dobu dvou minut. Poslední část míchacího procesu pak proběhla opět v I. rychlostním stupni po dobu jedné minuty.

Pro výrobu směsí určených k odlévání zkušebních těles, kde již byla potřeba větší objemová kapacita, bylo míchání realizováno na míchacím zařízení Spar 200D-B. Přístroj disponoval rovněž dvěma rychlostními režimy (106 a 196 ot/min) a objemovou kapacitou 10 litrů.

Zkušební tělesa byla odlévána do ocelových forem, vytřených minerálním olejem. Ukládání probíhalo ve dvou rovnoměrných vrstvách s tím, že po každé vrstvě následovalo 30 sekundové hutnění na vibračním stole BS VIB 02 R (Beton Systém) s vibrátorem EVU 500. Odstředivá síla byla nastavena na 6. stupeň.

Z jednotlivých směsí byly vyrobeny trámečky o rozměrech 160×40×40 mm, kostky o rozměrech 100×100×100 mm a vzorky na difúze o průměru 100 mm a tloušťce cca 20 mm. Vzorky byly uchovány 24 hodin při relativní vlhkosti cca 98 % a po odformování byly ponechány následujících 27, resp 89 dní ve vodě o teplotě (20 ± 2) °C. Zkoušky pevnosti byly provedeny bezprostředně po vyndání vzorků z vody. Ostatní vzorky byly ponechány týden na vzduchu a následně vysušeny při 60 °C do konstantní hmotnosti.

Vybrané vzorky studovaných kompozitů jsou vyobrazeny na Obr. 30-34.



Obr. 30: Zleva – Trámeček s referenční záměsí a trámečky s náhradou písku 10–50 hmotnostních % PP-R



Obr. 31: Referenční vzorek (vlevo) a vzorek s obsahem EPP



Obr. 32: Vzorky cementové pasty s náhradou cementu vypáleným mletým říčným kalem 60 % hmotnostních



Obr. 33: Vzorky cementových past s náhradou cementu vypáleným a mletým říčným kalem, připravené na měření hustoty matrice; zprava: referenční vzorek, náhrada 10, 20, 30 a 60 % hmotnostních



Obr. 34: Vzorky cementových kompozitů s přidavkem vypáleného a mletého polského kalu; zleva referenční vzorek, 10 - 30 % hmotnostních náhrada cementu kalem

3.4 Popis prováděných zkoušek

Experimentální zkoušky byly prováděny v laboratorních podmínkách při teplotě 22 ± 2 °C a relativní vlhkosti 40 ± 5 %, pokud není u popisu dané zkoušky uvedeno jinak.

3.4.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla zkoušena v souladu s ČSN EN 12390-5 [127] na zkušebních tělesech ve tvaru hranolu dle ČSN EN 12390-1 [128]. Zkoušky pevnosti probíhaly bezprostředně po vyndání vzorků z vody, pro každou studovanou záměs bylo měřeno 5 trámečků o rozměrech $160\times 40\times 40$ mm.

Tělesa byla rovnoměrně zatěžována ve zkušebním lisu, vyhovujícím požadavkům ČSN EN 12390-4 [129] prostřednictvím zatěžovacího zařízení s jedním břemenem uprostřed.

Výsledkem měření byla maximální hodnota síly F , dosažená při porušení (rozlomení) tělesa.

Pevnost vzorků v tahu za ohybu f_{cf} (MPa) byla stanovena dle vztahu:

$$f_{cf} = \frac{3.F.l}{2.d_1.d_2.d_2} \quad (1)$$

kde

F je maximální zatěžovací síla (N),

l je vzdálenost mezi podpěrnými válečky (mm),

d_1 (šířka), d_2 (výška) rozměry příčného řezu tělesa (mm).

Zkušební tělesa byla testována po 28, resp. 90 dnech ošetřování ve vodě. Pro zatěžování byl použit zkušební lis Heckert PF100 (Obr. 35). Rozšířená kombinovaná nejistota měření byla 1,4 %.



Obr. 35: Zkušební lis pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu

3.4.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku vyrobených kompozitů byla zkoušena dle ČSN EN 12390-3 [130] na zlomcích hranolů ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.

Zkušební tělesa byla rovnoměrně zatěžována ve zkušebním lisu, vyhovujícím požadavkům ČSN EN 12390-4 [129]. Zatěžovací plocha při zkoušce byla 40×40 mm. Výsledkem měření byla maximální hodnota síly F , dosažená při vyhovujícím způsobu porušení (rozdrcení) zkušebního tělesa.

Pevnost betonu v tlaku f_c (MPa) byla stanovena dle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

kde

F je maximální zatěžovací síla při porušení zkušebního tělesa (N),

A_c je průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatěžovací síla, stanovena ze změřených rozměrů tělesa (mm²).

Zkušební tělesa byla testována po 28, resp. 90 dnech ošetřování ve vodě. Zatěžování bylo realizováno na zkušebním lisu Heckert PF100 (Obr. 36) se zatěžovací kapacitou 100 kN a hydraulický lis Heckert ED600 se zatěžovací kapacitou 600 kN. Rozšířená kombinovaná nejistota měření byla 1,4 %.



Obr. 36: Zkušební lis pro zkoušku pevnosti v tlaku

3.4.3 Dynamický modul pružnosti

K měření dynamického modulu pružnosti E (GPa) je využívána pulzní ultrazvuková metoda. Tato metoda spočívá v měření rychlosti mechanických kmitů v materiálu, která se zjišťuje z doby průchodu ultrazvukové vlny vzorkem. Měření bylo realizováno pomocí zařízení DIO 562 (Starmans Electronic) s pracovní frekvencí 50 kHz (Obr. 37) na vysušených trámečcích velikosti 40×40×160 mm v podélném směru. Zkouška byla provedena na 4 tělesech.



Obr. 37: Ukázka měření na ultrazvukovém impulsním přístroji DIO 562

Dynamický modul pružnosti byl získán dle rovnic:

$$E = \frac{m}{a \cdot b \cdot c} v^2 \quad (3)$$

$$v = \frac{a}{t} \quad (4)$$

kde

m je hmotnost vysušeného vzorku (kg),

a je podélný rozměr vzorku (m),

b, c jsou výška a šířka vzorku (m),

v je rychlost průchodu ultrazvukové vlny vzorkem (m/s),

t je čas průchodu ultrazvukové vlny vzorkem (s).

Rozšířená kombinovaná nejistota měření byla 5,6 %.

3.4.4 Konzistence čerstvého betonu – zkouška rozlíváním

Zkouška rozlíváním dle normy ČSN EN 12350-5 [125] je prováděna na rozlívovém stolku, viz. Obr. 38.



Obr. 38: Rozlívový stůl

Na hladkém a nenasákavém povrchu horní desky se pomocí kovové formy ve tvaru komolého kužele zhotoví zkušební těleso (složené ze dvou vrstev čerstvého betonu vždy 10x zhutněných dusadlem). Po 30 s od naplnění se forma oddělí tahem svisle nahoru. Pomocí kliky se deska zvedá a následně se nechá volně dopadnout dolů k zarážce v průběhu 1 až 3 s. Tento cyklus se opakuje 15×.

Pravítkem se změří největší rozměr rozlitého betonu ve dvou na sebe kolmých směrech (v mm). Čerstvý beton musí zůstat celistvý, při zjevné segregaci kameniva je zkouška hodnocena jako nevyhovující.

3.4.5 Měrný povrch – metoda podle Blaina

Měrný povrch materiálů byl určován metodou dle Blaina postupem specifikovaným v ČSN EN 196-6 [122]. Vzorek byl před měřením vysušen a po dobu dvou minut roztírán ve třecí misce za účelem rozptýlení shluků částic. Hmotnost testovaných materiálů byla určována pomocí digitální váhy s přesností 0,0001g. Pro měření času sloužily stopky s přesností $\pm 0,01$ s. Výsledná hodnota byla průměrem ze tří měření.

3.4.6 Hustota matrice

Hustota matrice ρ_{mat} (kg/m^3) byla zjišťována pyknometricky s použitím automatického héliového pyknometru Pycnomatic ATC (Thermo Scientific) s plně integrovanou kontrolou teploty s přesností $\pm 0,01$ °C, Obr. 39. Tlakové rozlišení přístroje je 0,001 kPa a reprodukovatelnost při měření objemu vzorku 0,01 % při 20 °C. Jako vstupní parametr slouží hmotnost změřená digitální váhou s přesností 0,00001 g.



Obr. 39: Automatický héliový pyknometr Pycnomatic ATC

3.4.7 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost ρ_v (kg/m^3) byla zjišťována gravimetricky na vzorcích vysušených do konstantní hmotnosti. Měření bylo prováděno na zkušebních tělesech ve tvaru krychlí s rozměrem strany 100 mm, případně na trámečcích o rozměrech 40×40×160 mm. Pro měření byla použita vždy nejméně 3 tělesa.

Vzorek byl zvážen na digitální váze s přesností 0,01 g a jeho rozměry byly změřeny digitálním posuvným měřidlem s přesností $\pm 0,01$ mm. Objemová hmotnost byla vypočtena dle vztahu:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (5)$$

kde

V je objem tělesa získaný výpočtem (m^3),

m je hmotnost vysušeného vzorku (kg).

Rozšířená kombinovaná nejistota měření objemové hmotnosti byla 2,4 %.

3.4.8 Sypná hmotnost

Sypná hmotnost ρ_s (kg/m^3) byla stanovena ve stavu setřeseném (zhutněném). Do odměrného válce byla na digitální váze s přesností 0,001 g stanovena hmotnost vzorku a na vysokofrekvenčním vibračním stolku VSB-15 (BRIO Hranice spol. s r.o.) bylo provedeno zhutnění do doby, kdy již nedocházelo ke změně objemu vzorku. Poté byl objem odečten a sypná hmotnost vypočtena dle rovnice:

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (6)$$

kde

m je hmotnost vzorku (kg),

V je objem vzorku po zhutnění (m^3).

3.4.9 Granulometrie

Stanovení zrnitosti (granulometrie) vzorku bylo prováděno dle normy ČSN EN 933-1 [131] pomocí prosévacího přístroje RETSCH AS 200 Basic. Byla použita síta dle ČSN EN 933-2 [132] s následujícími jmenovitými velikostmi otvorů (mm): 0,063; 0,125; 0,250; 0,500; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 a 63. Dílčí zbytky na jednotlivých sítích byly přepočteny na poměrné zbytky v procentech a výsledkem byla čára zrnitosti vzorku vynesena do grafu.

3.4.10 Distribuce velikosti částic

Distribuce velikosti částic byla analyzována pomocí přístroje Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch) (Obr. 40), který pracuje na principu laserové difrakce s možností měřit jak v polárním, tak nepolárním prostředí. Tento přístroj měří velikosti částic v rozmezí 0,08 – 2000 μm , k tomu využívá zelený a infračervený laser. Distribuce velikosti částí kalů byly stanovovány ve vodném prostředí, měření hydraulického CEM I 42,5 R probíhalo v technickém ethanolu.

Výsledkem měření byly distribuční a kumulativní křivky velikosti částic.



Obr. 40: Analyzátor distribuce velikosti částic Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch)

3.4.11 Distribuce velikosti pórů – metoda rtuťové porozimetrie

Pro měření distribuce velikosti pórů byly použity rtuťové porozimetry Pascal 140 a Pascal 440 (Thermo Scientific), Obr. 41. Pascal 140 má dvojí roli: připravuje vzorek pro analýzu a provádí nízkotlakou porozimetrii od vakua po 400 kPa, měří velké póry (velikost pórů 116 – 3,8 μm). Je spojen s vysokotlakým modulem Pascal 440, který dosahuje tlaku 400 MPa a dovoluje měřit i velmi malé póry (velikost pórů 15 – 0,0036 μm). Výsledkem měření byly distribuční a kumulativní křivky velikosti pórů. Před měřením byly vzorky vysušeny do konstantní hmotnosti.



Obr. 41: Rtuťové porozimetry Pascal 140 a Pascal 440 (Thermo Scientific)

3.4.12 Pórovitost

Celková pórovitost ψ byla jako bezrozměrné číslo vypočítána z hodnot objemové hmotnosti a hustoty příslušného materiálu dle rovnice:

$$\psi = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{mat}} \quad (7)$$

kde

ρ_v je objemová hmotnost vzorku, zjištěná gravimetricky (kg/m^3),

ρ_{mat} je hustota matrice vzorku zjištěná pomocí héliového pyknometru (kg/m^3).

Rozšířená kombinovaná nejistota stanovení pórovitosti byla 3,5 %.

3.4.13 Tepelné vlastnosti

U vzorků byly zjišťovány tyto vybrané termofyzikální veličiny: součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), měrná objemová tepelná kapacita C_v ($\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$) a součinitel teplotní vodivosti a (m^2/s).

Pro měření byl použit přístroj ISOMET 2114 (Applied Precision s.r.o.), což je mikroprocesorem řízený ruční přístroj na přímé měření sypkých a kapalných materiálů pomocí výměnných jehlových a plošných sond. Každá sonda obsahuje zabudovanou paměť, ve které jsou uloženy její kalibrační konstanty.

Měření kompozitních materiálů bylo realizováno pomocí plošné sondy (viz. Obr. 42), pro měření sypkých materiálů (plastů, křemičitého písku) byla aplikována jehlová sonda.

Tepelné vlastnosti kompozitních materiálů s obsahem plastů byly stanovovány na tělesech ve tvaru krychle o rozměrech strany 100 mm ve vysušeném stavu a dále v závislosti na obsahu vlhkosti až do stavu plné nasycenosti. Zkouška byla prováděna vždy na nejméně 3 tělesech.



Obr. 42: ISOMET 2114 (Applied Precision s.r.o.) s plošnou sondou

Přesnost měření přístroje ISOMET 2114 udává Tab. 40.

Tab. 40: Přesnost měření přístroje ISOMET 2114 (Applied Precision s.r.o.)

Měření	Rozsah měření	Přesnost
Součinitel tepelné vodivosti λ	0,015 - 0,70 W/(m·K)	5 % čtení + 0,001 W/(m·K)
	0,7 - 6,0 W/(m·K)	10 % čtení
Měrná objemová tepelná kapacita C_v	$4,0 \cdot 10^4 - 4,0 \cdot 10^6$ J/(m ³ ·K)	15 % čtení + $1 \cdot 10^3$ J/(m ³ ·K)
Součinitel teplotní vodivosti a	-20 °C - +70 °C	1 °C

3.4.14 Termické analýzy

Měření termických analýz bylo prováděno na přístroji Labsys Evo (Setaram), který umožňuje simultánní termickou analýzu (STA), tj. současné použití dvou různých metod, např. TGA/DSC nebo TGA/DTG (Obr. 43). Přístroj pracuje v teplotním rozsahu 30-1000 °C s rychlostí ohřevu 5 °C/min. v dynamické syntetické vzduchové atmosféře (20 % obj. O₂ / 80 % obj. N₂) s průtokem 50 ml/min. Vzorky pro měření byly odebrány z vnitřních částí zkušebních trámečků, rozemlety v kulovém mlýnu Retsch MM 400 a následně vysušeny do konstantní hmotnosti.



Obr. 43: Přístroj Labsys Evo (Setaram)

3.4.15 Transport kapalné vody – metoda vertikální nasákavosti

U vzorků byly zjišťovány následující veličiny, popisující transport kapalné vlhkosti: absorpční koeficient vody A ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$), součinitel vlhkostní vodivosti κ (m^2/s) a sorptivita S ($\text{m}/\text{s}^{1/2}$).

Zkouška byla provedena na tělesech ve tvaru krychle o délce strany 100 mm, která byla vysušena do konstantní hmotnosti; od každého studovaného kompozitu byla testována 3 tělesa. Vzorky pro měření byly nejprve po obvodu izolovány epoxidovou pryskyřicí pro zajištění jednorozměrného transportu vlhkosti. Před začátkem měření byly vzorky zváženy a neizolovanou stranou pak byly ponořeny do vody tak, aby byl povrch ponořený 1-2 mm pod vodní hladinu. V průběhu zkoušky byly v určených časových intervalech zaznamenávány hmotnosti vzorků zvětšené o hmotnost nasáknuté vody. Z naměřených hodnot byla sestavena křivka nasákavosti jednotlivých vzorků. Absorpční koeficient A byl určen přímo z počáteční přímkové části grafu závislosti kumulativního obsahu vody v materiálu (kg/m^2) na odmocnině z času ($\text{s}^{1/2}$). Vzorky byly následně ponechány ve vodě pro zjištění hmotnosti odpovídající kapilární nasákavosti a následně byla vypočtena hodnota kapilární nasycené vlhkosti w_{cap} (kg/m^3), která byla stanovena dle vztahu:

$$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V} \quad (10)$$

kde

m_{cap} je hmotnost vzorku odpovídající kapilární nasákavosti (kg),

m_0 je hmotnost suchého vzorku (kg),

V je objem vzorku (m^3).

Z výše uvedených hodnot byla pak vypočtena průměrná hodnota součinitele vlhkostní vodivosti κ (m^2/s) dle rovnice

$$\kappa \approx \left(\frac{A}{w_{cap}} \right)^2 \quad (11)$$

Sorptivita S ($\text{m}/\text{s}^{1/2}$) byla získána výpočtem ze vztahu

$$S = \frac{A}{\rho_l} \quad (12)$$

kde

ρ_l je hustota vody (kg/m^3).

Rozšířená kombinovaná nejistota měření absorpčního koeficientu vody A byla 2,3 % a součinitele vlhkostní vodivosti κ 3,5 %.

3.4.16 Transport vodní páry – misková metoda bez teplotního spádu

Pro hodnocení difúzních vlastností vzorků byly zjišťovány tyto vybrané veličiny: součinitel difúzní vodivosti δ (s), součinitel difúze vodní páry D (m^2/s) a faktor difúzního odporu μ (-).

Měření součinitele difúze vodní páry miskovou metodou bez teplotního spádu bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 12572 [133]. Zkoušeny byly tělesa o průměru 100 mm a výšce cca 20 mm, která byla před měřením kondicionována v klimatické komoře s udržovanou relativní vlhkostí vzduchu (50 ± 5) % a teplotou (21 ± 1) °C. Zkoušky probíhaly na 3 zkušebních tělesech.

Vzorek byl před vlastním měřením po stranách opatřen nátěrem epoxidové pryskyřice a následně byl vzduchotěsně upevněn v misce, která byla ponechána při teplotě (21 ± 1) °C v klimatické komoře s udržovanou relativní vlhkostí vzduchu (50 ± 5) %, jak je ukázáno na Obr. 44.



Obr. 44: Klimatická komora se vzorky pro měření transportu vodní páry

Miska se vzorkem byla periodicky vážena a byly zaznamenány přírůstky/úbytky hmotnosti. Byly zvoleny dva způsoby provedení experimentu: tzv. dry-cup, kdy do misky pod vzorek byl umístěn silikagel (relativní vlhkost prostředí pod vzorkem 2 %) a wet-cup, kdy v misce pod vzorkem byl nasycený roztok K_2SO_4 (relativní vlhkost prostředí pod vzorkem 98 %). Zjištěné přírůstky/úbytky hmotnosti byly vynášeny do grafu v závislosti na době vážení. Po dosažení přímkového charakteru křivky bylo měření pokládáno za ukončené.

Součinitel difúzní vodivosti δ (s) byl vyhodnocen dle vztahu:

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p} \quad (13)$$

kde

Δm je množství páry difundující vzorkem (kg),

d je tloušťka vzorku (m),

S je měrná plocha vzorku (m²),

τ je časové období korespondující s transportem vodní páry Δm (s),

Δp_p je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod měrným povrchem vzorku (Pa), vypočítá se z tabelovaných hodnot pro příslušnou teplotu a vlhkost.

Dále byl vypočten součinitel difúze vodní páry D (m²/s) z rovnice:

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M} \quad (14)$$

kde

R je univerzální plynová konstanta, jejíž velikost je 8,314 (J/(mol·K)),

T je teplota (K),

M je molární hmotnost vody, která je rovná 0,018 (kg/mol).

Ze součinitele difúze vodní páry byl vypočítán faktor difúzního odporu μ (-) podle vztahu:

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad (15)$$

kde

D_a je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu, který je roven $2,3 \cdot 10^{-5}$ (m²/s).

Rozšířená kombinovaná nejistota měření transportu vodní páry miskovou metodou bez teplotního spádu byla pro součinitel difúze vodní páry D 2,0 % a pro faktor difúzního odporu μ 2,8 %.

3.4.17 Sorpční izotermy – metoda měření v klimatické komoře

U vybraných vzorků byly měřeny sorpční izotermy jako parametr akumulace plynné vlhkosti. Měření probíhalo v klimatické komoře, kde byla udržována stálá teplota (21±1) °C. Vzorky byly periodicky váženy a relativní vlhkost v klimatické komoře byla zvyšována vždy po ustálení hmotnosti vzorků. Pro jednotlivé relativní vlhkosti prostředí byla vypočtena

hmotnostní vlhkost vzorku u (kg/kg), která pak byla vynesena do grafu v závislosti na příslušné relativní vlhkosti prostředí. Hmotnostní vlhkost byla vypočtena dle vztahu:

$$u = \frac{m_v - m_0}{m_0} \quad (16)$$

kde

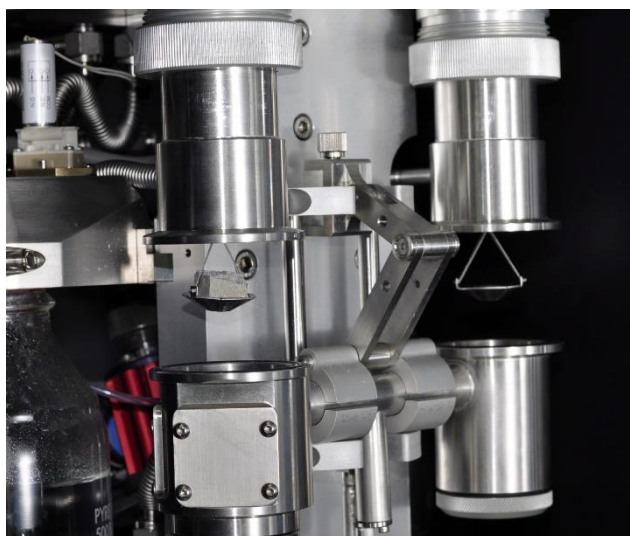
m_v je hmotnost vlhkého vzorku (kg),

m_0 je hmotnost suchého vzorku (kg).

3.4.18 Sorpční a desorpční izoteremy – metoda DVS

K automatickému měření sorpčních izoterem byl použit přístroj DVS (Dynamic water sorption) – Advantage 2 device (Surface Measurement Systems Ltd.). Přístroj je určen pro měření v teplotním rozsahu $5 - 60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Požadovaná relativní vlhkost vzduchu je zajišťována řízeným průchodem suchého vzduchu přes lahev s redestilovanou vodou.

Vysušený vzorek o hmotnosti řádově několik gramů byl vložen do měřicí komory (Obr. 45), kde byla pomocí technického vzduchu, který byl podle potřeby vlhčen, udržována daná relativní vlhkost vzduchu.



Obr. 45: Přístroj DVS – Advantage 2 device pro měření sorpčních izoterem

Vzorek byl kontinuálně vážen na přesných analytických vahách (přesnost vážení $0,00001 \text{ g}$). Po ustálení jeho hmotnosti nebo po uplynutí časového úseku, určeného pro danou relativní vlhkost, byla tato vlhkost zvýšena/snížena. Měření probíhalo při teplotě $(21 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. Výsledkem měření byly křivky sorpčních a desorpčních izoterem.

3.4.19 Pucolánová aktivita

V případě jemnozrnných práškových materiálů obsahujících významný podíl amorfních oxidů křemíku a hliníku je zajímavé stanovit jejich tzv. pucolánovou aktivitu, tj. schopnost pucolánů reagovat za normální teploty v přítomnosti vody s hydroxidem vápenatým za vzniku hydratovaných křemičitanů a hlinitanů vápenatých, které mají pojivé vlastnosti.

Test Frattini

Test Frattini patří mezi tzv. přímé metody stanovení pucolánové aktivity s využitím klasické chemické analýzy [134].

Metoda byla prováděna postupem dle normy ČSN EN 196-5 [112]. Do polyethylenové lahve se 100 ml destilované vody neobsahující CO_2 bylo naváženo 20 g směsi cementu s testovaným vypáleným a mletým kalem. Ve směsi cement/ řecký kal byla hodnocena 10, 20, 30, 50 a 70 hm. % náhrada cementu kalem; ve směsi cement/polský kal byla hodnocena 10, 20, 30 a 40 hm %náhrada cementu kalem. Láhev byla poté vložena do termostatu, kde byla udržována teplota 40 °C. Po 8 dnech byla stanovena koncentrace hydroxidových iontů titrací roztokem HCl na indikátor bromfenolovou modř a následně po úpravě pH nad 12,5 pomocí NaOH byla stanovena koncentrace oxidu vápenatého titrací roztokem EDTA na indikátor Murexid. Pro posouzení pucolanity byly získané koncentrace hydroxidových iontů a iontů vápníku (vyjádřeného jako oxid vápenatý) vyneseny do grafu, který udává koncentraci nasyceného roztoku oxidu vápenatého jako funkci koncentrace hydroxidových iontů při 40 °C. Vzorek vyhovuje zkoušce pucolanity, jestliže vyneseny bod leží pod izotermou nasycenosti oxidu vápenatého.

Modifikovaný Chapelleho test

Chapelleho test vychází z francouzské podnikové normy pro výrobu metakaolinů NF P 18-513 [113]. Metoda slouží pro určení relativní schopnosti pucolánů absorbovat $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Jedná se o reakci vlastního pucolánu s přesně definovaným množstvím $\text{Ca}(\text{OH})_2$ po dobu 20 hodin za zvýšené teploty a výsledek zkoušky je uváděn jako množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zreagované s 1 g testovaného materiálu.

1g testovaného vypáleného a mletého kalu byl smíchán se 2g CaO v 250 ml redestilované vody. Pokus probíhal při teplotě (80 ± 3) °C za stálého míchání ve třepačce IKA KS 4000 ic control (IKA – laboratorní technika). Množství zbývajícího CaO bylo analyzováno titračně roztokem HCl na indikátor fenolftalein. Současně probíhal slepý pokus bez zkoumané látky.

Materiál je považován za pucolánově aktivní, pokud je výsledek testu nejméně 650 mg/g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [135].

3.4.20 Vyluhovatelnost – obsah vyluhovatelných solí

Pro testované vysušené a vypálené kaly z ČOV a kompozity s obsahem kalů z ČOV byly provedeny zkoušky vyluhovatelnosti, zaměřené na obsah vyluhovatelných solí: chloridů, síranů a dusičnanů.

Výluhy byly připraveny v souladu s normou ČSN EN 12457-2 [114] při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg. Testované kaly i kompozity s obsahem kalů byly namlety na kulovém mlýnu Retsch MM 400 a vysušeny do konstantní hmotnosti. Chemická analýza výluhu byla provedena na kapalinovém adsorpčním chromatografu s vodivostním detektorem Shodex CD-5 (Watrex Praha s.r.o.) s citlivostí 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ až 5 mS/cm .

3.4.21 Rentgenová fluorescenční analýza XRF

Rentgenové fluorescenční analýzy byly prováděny na vysušených a mletých (kulový mlýn Retsch MM 400) vzorcích pomocí EDXRF spektrofotometru ARL Quant'X (Thermo Scientific), Obr. 46. Přístroj je vybaven rhodiovou rentgenovou trubicí a Si(Li) krystalovým detektorem. Získaná data jsou sbírána a vyhodnocována softwarem UniQuant. Relativní přesnost měření se pohybuje mezi 0,5 až 5 %.



Obr. 46: EDXRF Spektrofotometr ARL Quant'X

3.4.22 Rentgenová difrakční analýza XRD

Měření bylo realizováno na difraktometru Bruker D2 Phaser (Bruker, Karlsruhe, Německo), Obr. 47. Přístroj pracuje s těmito parametry: geometrie Bragg-Brentano, zdroj $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,15418 \text{ nm}$, $U = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$). Velikost kroku při skenování byla $0,019^\circ$ (2θ). Data byla vyhodnocována pomocí software High-Score Plus. Vzorky byly před měřením vysušeny do konstantní hmotnosti a mlety v kulovém mlýnu Retsch MM 400.



Obr. 47: XRD difraktometr

4 Výsledky měření a diskuse

Tato kapitola je věnována získaným výsledkům, jejich interpretaci a diskusi.

4.1 Plastový odpad

4.1.1 Odpadní polypropylen z výroby potrubí

Následující kapitola popisuje vlastnosti čerstvých a zatvrdlých cementových kompozitů s polypropylenovými odpady z výroby potrubí: drcený polypropylen random kopolymer (PP-R), drcený polypropylen zesílený skelnými vlákny (PP-GF) a regranulovaný polypropylen random kopolymer (PP-Reg). U čerstvých směsí byla stanovena jejich konzistence (zpracovatelnost) pomocí zkoušky rozlitím dle ČSN EN 12350-5 [125]. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 41.

Tab. 41: Výsledky zkoušky rozlitím pro kompozity s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg

Vzorek	Rozliv [mm]					
	R	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
PP-R	165×165	125×125	120×115	110×110	-	-
PP-GF	165×165	130×130	120×115	110×110	-	-
PP-Reg	165×165	155×150	130×130	110×110	-	-

V souladu s poznatky uvedenými v literatuře bylo pozorováno výrazné snižování zpracovatelnosti se vzrůstajícím podílem plastu ve směsi. Při 30 % náhradě písku plastem se směs obsahující PP-R a PP-GF při zkoušce rozlitím rozpadala, směs s PP-Reg sice nevykazovala žádný rozliv, ale nedošlo k segregaci plniva a pojiva. Pro směsi se 40 % a 50 % náhradou písku plastem již nebyla zkouška rozlitím provedena. Zpracovatelnost čerstvých směsí souvisí rovněž s tvarem částic, částice s ostrými rohy ji zhoršují více než částice s oblými tvary. Saikia a de Brito zkoumali tři různé tvary PET částic: jemnou drcenou frakci, hrubou drcenou frakci a částice ve tvaru peletek [38]. Obě drcené frakce s ostrými hranami a nepravidelnými tvary částic výrazně snižovaly zpracovatelnost s nárůstem jejich množství ve směsi, zatímco částice ve tvaru peletek s hladkým povrchem a přibližně kulovým tvarem zpracovatelnost lehce zvyšovaly. Rahmani a kol. uvádí, že zabudování plastů do kompozitní

směsi způsobuje větší tření mezi částicemi, což vede k horší zpracovatelnosti [136]. Batayneh a kol. pozorovali, že matrice připravená nahrazením 20 % písku odpadními plasty snížila zpracovatelnost až o 25 % [45].

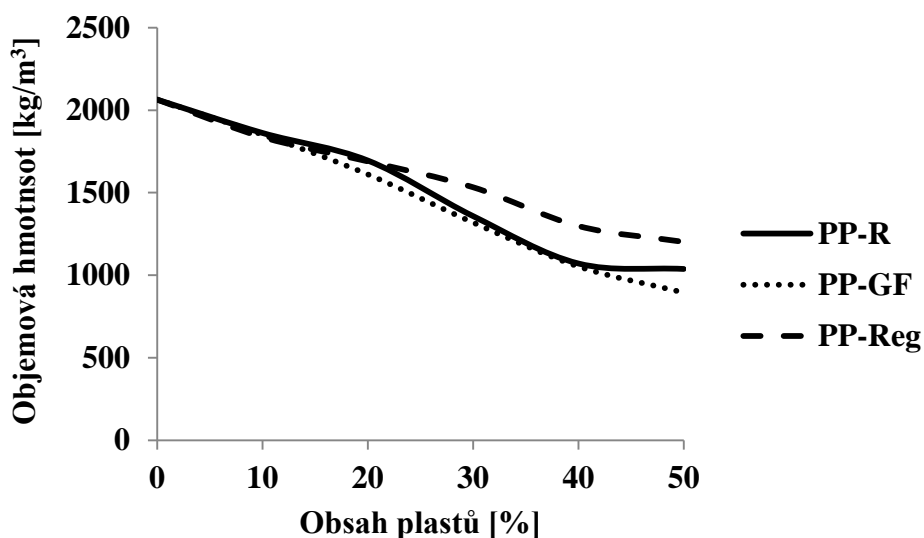
Z hlediska zjištěné horší zpracovatelnosti by pro vyvinuté lehké kompozitní betony s vylepšenými tepelně-izolačními vlastnostmi mohly být hlavními doporučenými aplikacemi např. využití ve stavebním podloží nebo do podlahových konstrukcí, případně lisování kompozitů s vyššími podíly plastů do forem pro výrobu prefabrikátů např. ve formě desek.

V Tab. 42 jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti cementových kompozitů s náhradou písku plastovými polypropylenovými odpady z výroby potrubí.

Tab. 42: Základní fyzikální vlastnosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-

<i>Reg</i>			
Vzorek	ρ_{mat} [kg/m³]	ρ_v [kg/m³]	ψ [%]
R	2508	2064	17,7
PP-R			
10 %	2230	1862	16,5
20 %	2048	1695	17,2
30 %	1672	1358	18,8
40 %	1630	1071	34,3
50 %	1606	1038	35,4
PP-GF			
10 %	2225	1852	16,8
20 %	2003	1611	19,6
30 %	1821	1319	27,6
40 %	1652	1053	36,3
50 %	1589	895	43,6
PP-Reg			
10 %	2202	1837	16,6
20 %	2035	1690	17,0
30 %	1865	1533	17,8
40 %	1621	1298	19,9
50 %	1516	1202	20,7

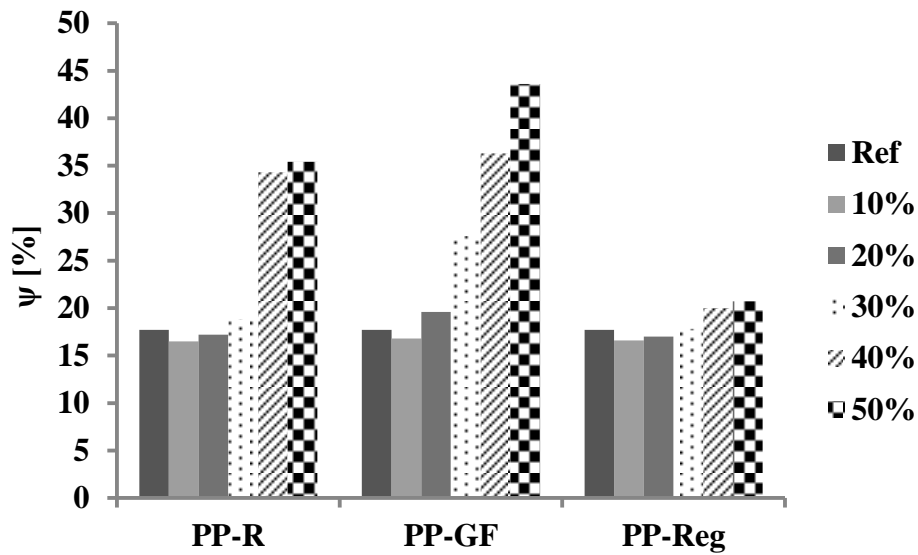
Objemové hmotnosti kompozitů obsahujících plasty dosahovaly hodnot v rozmezí 895-1884 kg/m³; tyto kompozity mohou být tedy klasifikovány jako lehké betony ve třídách LC 1.0, LC 1.2, LC 1.4, LC 1.8 a LC 2.0 podle normy ČSN EN 206 [137]. Mnoho autorů uvádí, že aplikace plastového kameniva v maltách nebo v betonech, bez ohledu na jeho typ a velikost, snižuje objemovou hmotnost výsledných produktů. To lze snadno vysvětlit tím, že plastové částice jsou lehčí než křemičitý písek, který je ve stavebnictví běžně používaný. Na Obr. 48 lze vidět téměř lineární pokles objemové hmotnosti lehkých betonů v závislosti na obsahu plastů pro všechny tři typy studovaných polypropylenových odpadů.



Obr. 48: Vývoj objemové hmotnosti jako funkce obsahu PP odpadů

Celková pórovitost vzorků při nízkých náhradách písku plastem je nižší v porovnání s referenčním vzorkem; při vyšší náhradě pórovitost systematicky roste pro všechny typy PP odpadů. Podobné chování, co se týká porozity, pozoroval rovněž Safi a kol. [37]. Při nízkém procentu nahrazení písku plastovými odpady snižuje inertní struktura těchto materiálů celkovou porozitu výsledných cementových kompozitů, zatímco zpracovatelnost směsi a tudíž i obsah vzduchu v betonu, nejsou znatelně ovlivněny. Naopak, vysoký obsah všech typů testovaných PP odpadů vede ke vzrůstu porozity a k celkovému zhrubnutí vnitřní struktury kompozitu. Změny v pórovitosti odkazují na přerušení kontinuity mikrostruktury materiálu, která pochází ze začlenění heterogenit do relativně homogenní matrice cementového kompozitu. Pozorované změny pórovitosti u studovaných lehkých betonů s obsahem plastů mohou být vysvětleny spojenými vlivy klesající zpracovatelnosti a inertní hydrofobní struktury PP materiálů. Na Obr. 49 je zobrazen vliv jednotlivých studovaných PP odpadů na

pórovitost výsledných cementových kompozitů. Lze pozorovat výrazně nižší pórovitost vzorků obsahujících PP-Reg v porovnání se vzorky s obsahem drcených částic PP; tento vliv je zřetelný zejména při vyšších stupních náhrady. Toto chování lze přičíst oblému tvaru částic regranulovaného PP.



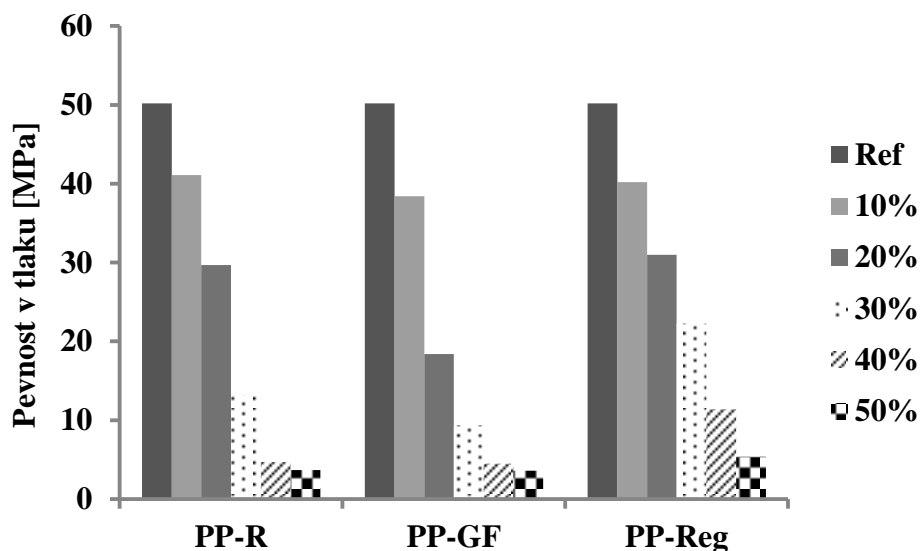
Obr. 49: Vliv obsahu plastových PP odpadů na pórovitost testovaných kompozitů

Mechanické vlastnosti lehkých betonů s obsahem plastů jsou shrnuty v Tab. 43.

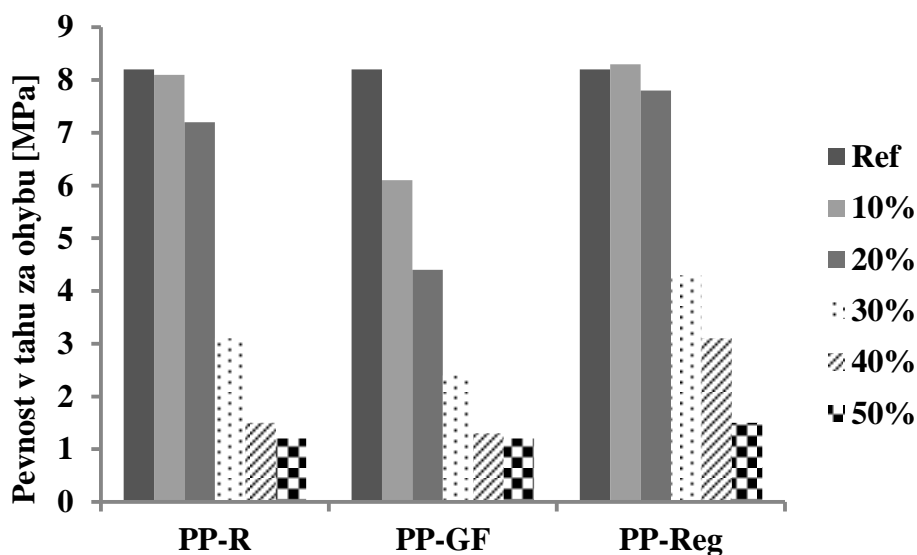
Tab. 43: Mechanické vlastnosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg

Vzorek	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	E [GPa]
R	50,2	8,2	23,1
PP-R			
10 %	41,1	8,1	8,8
20 %	29,7	7,2	4,6
30 %	13,2	3,1	2,3
40 %	4,7	1,5	0,6
50 %	3,7	1,2	-
PP-GF			
10 %	38,4	6,1	5,6
20 %	18,4	4,4	3,2
30 %	9,4	2,4	1,9
40 %	4,5	1,3	0,4
50 %	3,6	1,2	0,2
PP-Reg			
10 %	40,2	8,3	9,0
20 %	31,0	7,8	5,2
30 %	22,3	4,3	3,1
40 %	11,4	3,1	2,2
50 %	5,4	1,5	-

S vyšším obsahem plastových částic v testovaných kompozitech klesají jejich mechanické parametry, a tudíž i mechanická odolnost. Tyto výsledky jsou v souladu s výsledky studií zabývajících se aplikací plastových částic jako kameniva při výrobě cementových kompozitů, které shodně uvádí, že obsah plastů zhoršuje mechanické vlastnosti výsledných betonů či omítek [15; 19; 47; 138]. Pokles mechanické odolnosti může být zapříčiněn nízkou pevností vazby mezi povrchem plastových částic a cementovou maticí, která souvisí s hydrofobní povahou plastů. Plastové částice ve směsi mohou rovněž inhibovat hydrataci cementu omezováním pohybu vody [15]. Obr. 50 a 51 ukazují pevnost v tlaku, resp. pevnost v tahu za ohybu vyrobených lehkých betonů. Lze konstatovat, že nejnižší hodnoty pevností v tlaku a v tahu za ohybu vykazuje kompozit obsahující PP-GF.

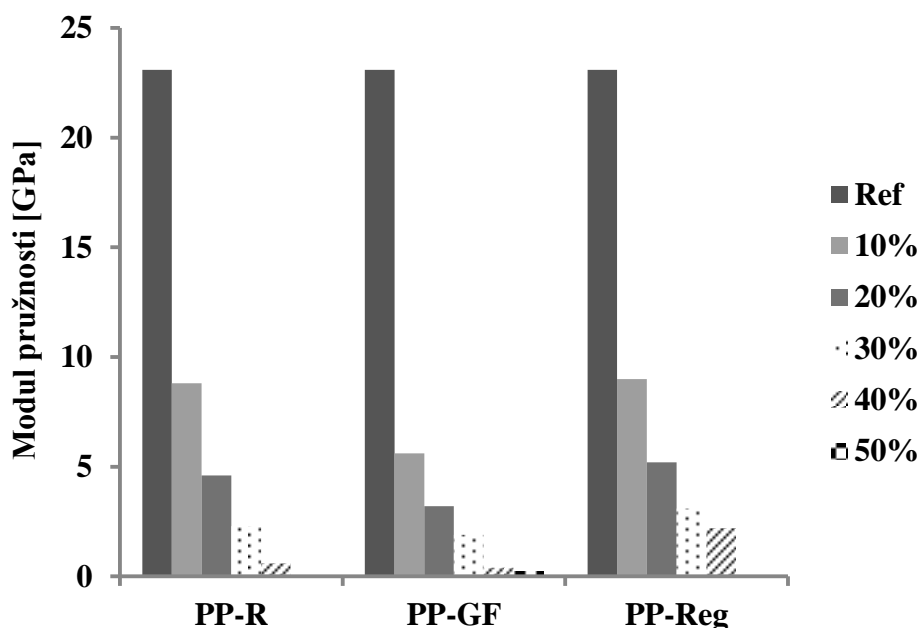


Obr. 50: Pevnost v tlaku cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg



Obr. 51: Pevnost v tahu za ohybu cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg

Co se týká vlivu plastových částic na dynamický modul pružnosti, s rostoucím množstvím plastů Youngův dynamický modul pružnosti významně klesá pro všechny typy PP odpadů, viz. Obr. 52.



Obr. 52: Dynamický modul pružnosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg

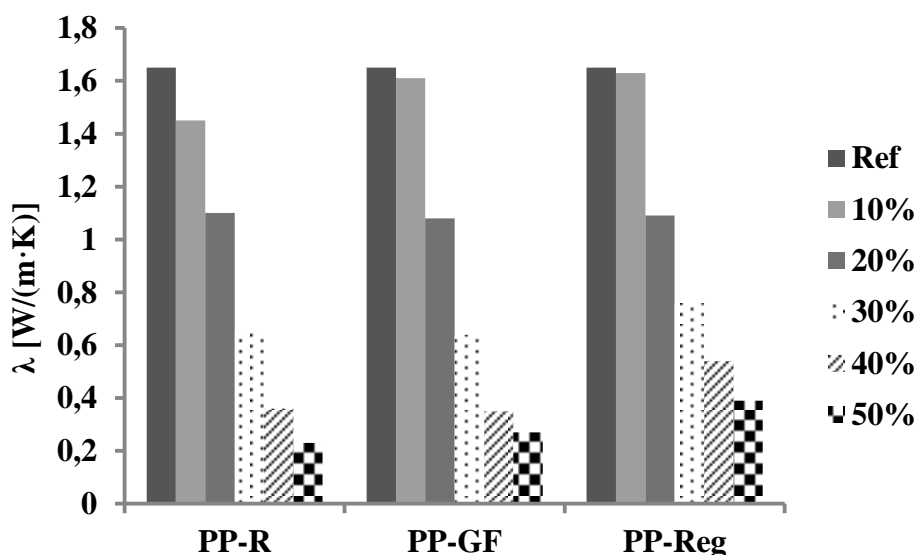
Nejmenší pokles dynamického modulu pružnosti byl pozorován u kompozitů s PP-Reg. Marzouk a kol. [139] popisují pokles modulu pružnosti se vzrůstajícím množstvím PET ve vzorcích malt; v případě nahrazení 50 % písku plastovým odpadem byl pozorován 50 % pokles modulu pružnosti v porovnání s referenční maltou. Nízký Youngův dynamický modul pružnosti vyrobených lehkých betonů lze přisoudit nízké elasticitě zkoumaných plastů. Mechanické vlastnosti PP studovali např. Etcheverry a Barbosa [140], kteří získali hodnotu modulu pružnosti PP cca 685 MPa. Obecně se vzrůstajícím množstvím plastových částic ve směsi vzrůstá i nekompatibilita mezi částicemi a matricí. Snížení Youngova dynamického modulu pružnosti koresponduje se snížením celistvosti vlny narušením šíření ultrazvukových vln. Tato skutečnost indikuje pozitivní vliv náhrady písku plastovými částicemi na životnost výsledného materiálu a jeho chování při vibracích.

Výsledky měření tepelných vlastností cementových kompozitů s obsahem PP v suchém stavu jsou uvedeny v Tab. 44.

Tab. 44: Tepelné vlastnosti cementových kompozitů obsahujících PP-R, PP-GF a PP-Reg, měření v suchém stavu

Vzorek	λ [W/(m·K)]	C_v [10^6 J/(m³·K)]
R	1,65	1,44
PP-R		
10 %	1,45	1,37
20 %	1,10	1,15
30 %	0,65	0,94
40 %	0,36	0,53
50 %	0,23	0,42
PP-GF		
10 %	1,61	1,38
20 %	1,08	1,12
30 %	0,64	0,98
40 %	0,35	0,78
50 %	0,27	0,46
PP-Reg		
10 %	1,63	1,41
20 %	1,09	1,30
30 %	0,76	1,19
40 %	0,54	0,81
50 %	0,39	0,52

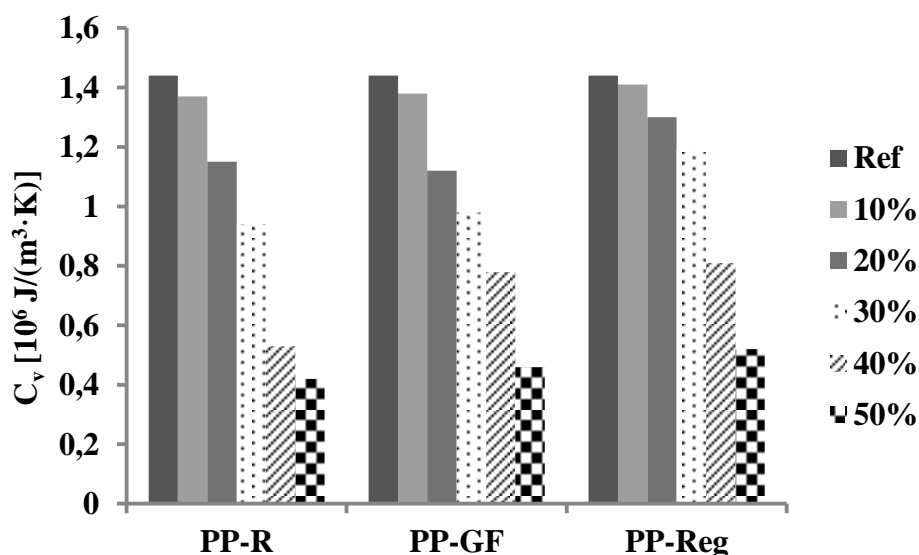
Měření tepelných parametrů vyrobených vzorků s obsahem PP ukázalo velice pozitivní efekt všech typů plastů na zpomalení přenosu tepla. Lze pozorovat významný pokles hodnot tepelné vodivosti v závislosti na obsahu plastů v kompozitu. Nejnížší hodnoty tepelné vodivosti dle očekávání vykazují kompozity s nejvyšší náhradou písku plastovými částicemi. V tomto případě došlo k poklesu hodnot tepelné vodivosti pro vzorky obsahující PP-R o 86 %, PP-GF o 83 % a o 76 % pro vzorky s PP-Reg v porovnání s referenčním materiálem (viz. Obr. 53).



Obr. 53: Součinitel tepelné vodivosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg, měření v suchém stavu

Dosažené vylepšení tepelně-izolačních vlastností výsledných kompozitů lze přisoudit: (a) tepelné vodivosti PP částic, která je mnohem nižší nežli tepelná vodivost písku, (b) vyšší pórovitosti kompozitů s vyšším obsahem PP částic. Získané výsledky jsou v souladu s výsledky již publikovanými v literatuře. Iucolano a kol. [18] uvádí, že náhrada křemičitého písku plastovými částicemi (směs PP, PE a PET) vedla ke snížení hodnoty tepelné vodivosti téměř o 50 %; z 0,38 W/(m·K) (referenční malta) na 0,19 W/(m·K) (malta s 20 % náhradou písku plasty). Podobně Marzouk a kol. [139] popisuje, že 50 % objemová náhrada písku odpadními PET částicemi vedla ke snížení tepelné vodivosti o 46 % z 1,28 W/(m·K) na 0,69 W/(m·K). Rovněž Herrero a kol. [138] uvádí, že přidání 20 % PE částic vedlo ke snížení tepelné vodivosti pod polovinu její původní hodnoty.

Se zvětšujícím se množstvím všech druhů PP ve studovaných kompozitech byl pozorován pokles objemové tepelné kapacity (Obr. 54).



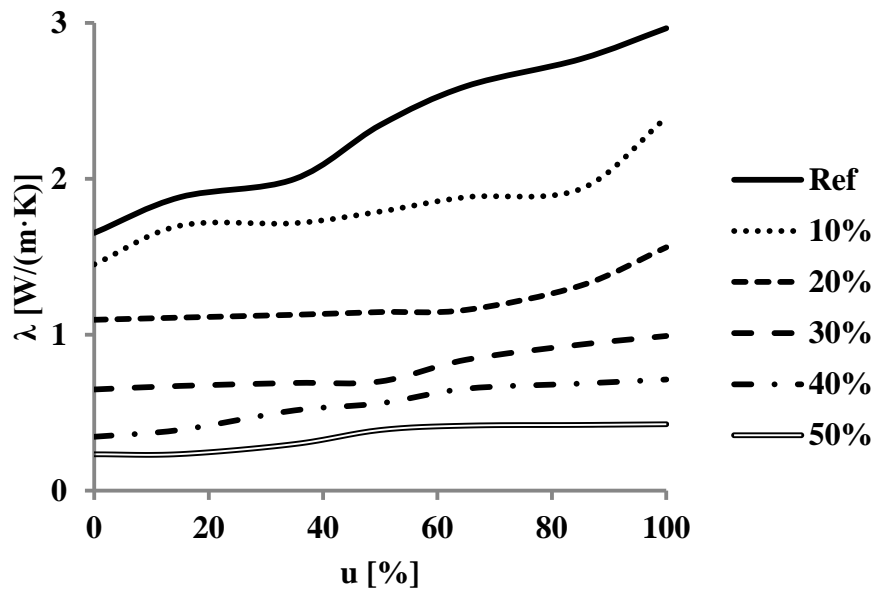
Obr. 54: Objemová tepelná kapacita cementových kompozitů obsahujících PP-R, PP-GF a PP-Reg

Tento výsledek lze vysvětlit nižší tepelnou kapacitou PP částic v porovnání s pískem a také nižší objemovou hmotností lehkých betonů s obsahem plastů.

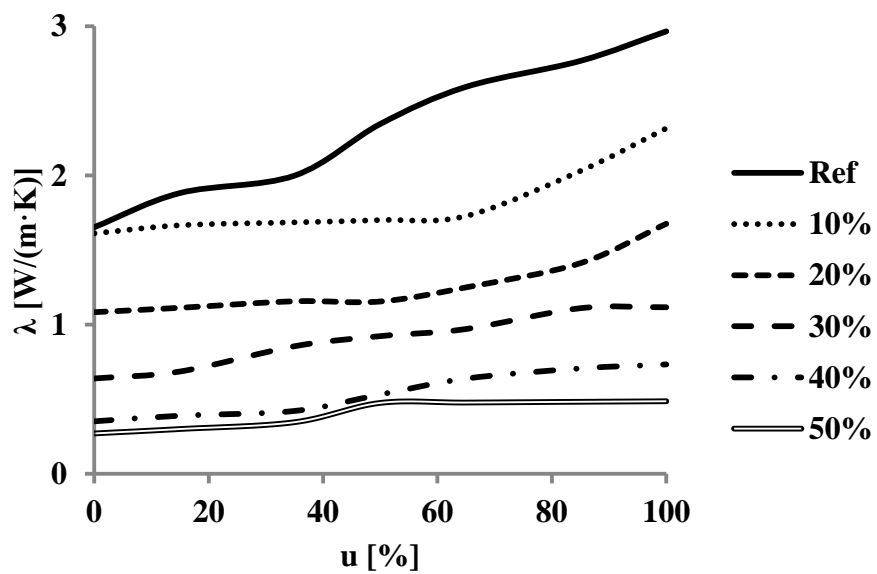
Tepelná vodivost porézních materiálů závisí na mnoha faktorech, včetně jejich struktury, složení směsi, typu kameniva, hustotě a porozitě [18]. Významný vliv na tepelnou vodivost má rovněž obsah vody. V Tab. 45 jsou uvedeny výsledky měření závislosti tepelné vodivosti na obsahu vody (ze suchého do plně nasyceného stavu). Tyto výsledky byly zpracovány rovněž do grafů, viz. Obr. 55-57. 100 % vlhkost odpovídá obsahu vody plně saturovaného vzorku, vyjádřeno v hmotnostních procentech. Podle předpokladu byl pozorován vzrůst tepelné vodivosti s nárůstem vlhkosti vzorku, s tím, že vliv vlhkosti na nárůst hodnot tepelné vodivosti byl nejvyšší pro referenční vzorek bez obsahu plastů. To je způsobeno tím, že PP částice jsou nenavlhavé a přispívají ke zlepšení tepelné vodivosti bez negativního ovlivnění vlhkostí. Nejméně byly obsahem vlhkosti ovlivněny vzorky s 50 % náhradou písku PP částicemi.

Tab. 45: Součinitel tepelné vodivosti cementových kompozitů obsahujících PP-R, PP-GF a PP-Reg v závislosti na obsahu vlhkosti

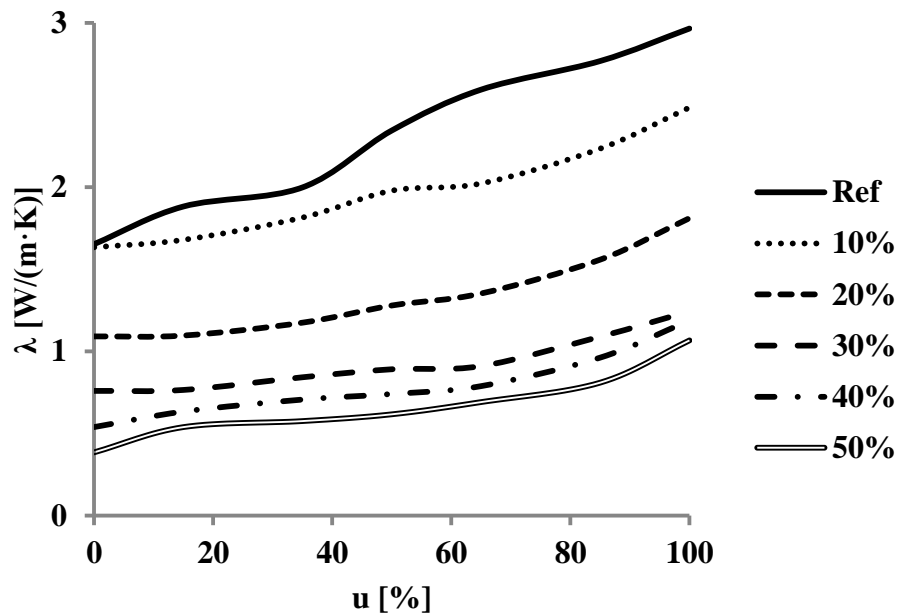
λ [W/(m·K)]	Relativní obsah vlhkosti [%]						
	0	15	35	50	65	85	100
R	1,65	1,88	2,00	2,35	2,59	2,77	2,97
PP-R							
10 %	1,45	1,70	1,72	1,79	1,88	1,93	2,39
20 %	1,10	1,11	1,13	1,15	1,16	1,31	1,56
30 %	0,65	0,67	0,69	0,70	0,84	0,94	0,99
40 %	0,35	0,39	0,51	0,56	0,65	0,69	0,71
50 %	0,23	0,23	0,30	0,39	0,42	0,42	0,43
PP-GF							
10 %	1,61	1,67	1,69	1,70	1,73	2,03	2,32
20 %	1,08	1,11	1,16	1,15	1,25	1,41	1,68
30 %	0,64	0,69	0,85	0,92	0,97	1,11	1,12
40 %	0,35	0,39	0,42	0,53	0,64	0,71	0,73
50 %	0,27	0,30	0,35	0,47	0,48	0,48	0,49
PP-Reg							
10 %	1,63	1,68	1,81	1,98	2,02	2,23	2,48
20 %	1,09	1,10	1,17	1,28	1,35	1,56	1,81
30 %	0,76	0,77	0,84	0,89	0,91	1,09	1,24
40 %	0,54	0,63	0,71	0,74	0,79	0,96	1,19
50 %	0,39	0,54	0,58	0,62	0,69	0,81	1,07



Obr. 55: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s PP-R v závislosti na obsahu vlhkosti

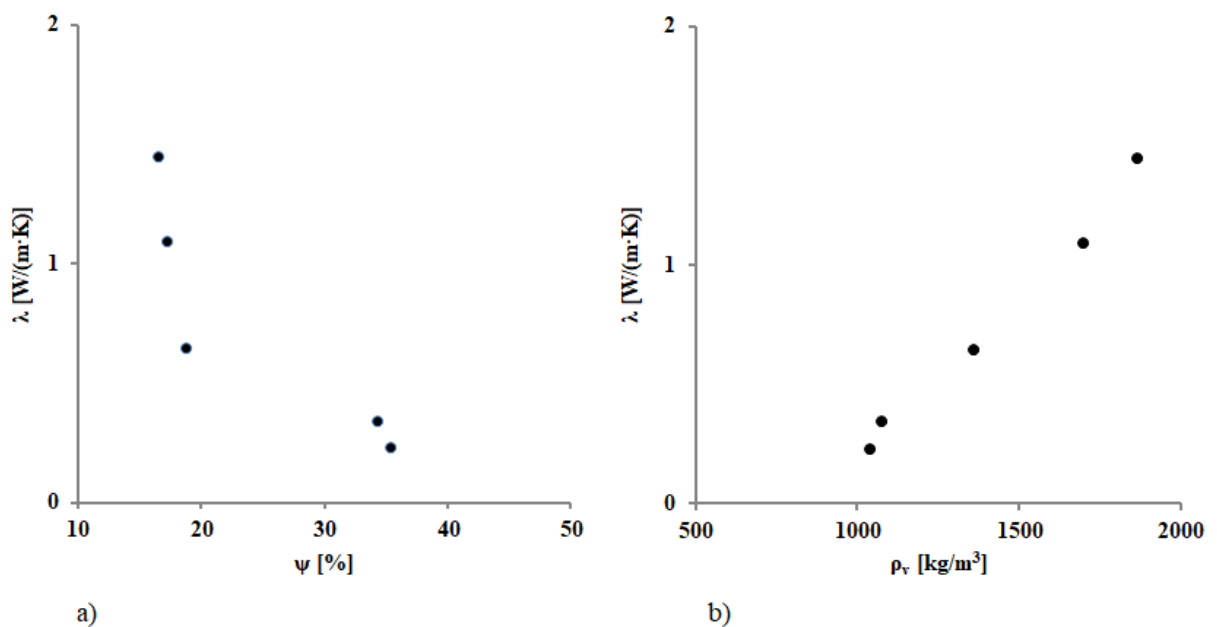


Obr. 56: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s PP-GF v závislosti na obsahu vlhkosti

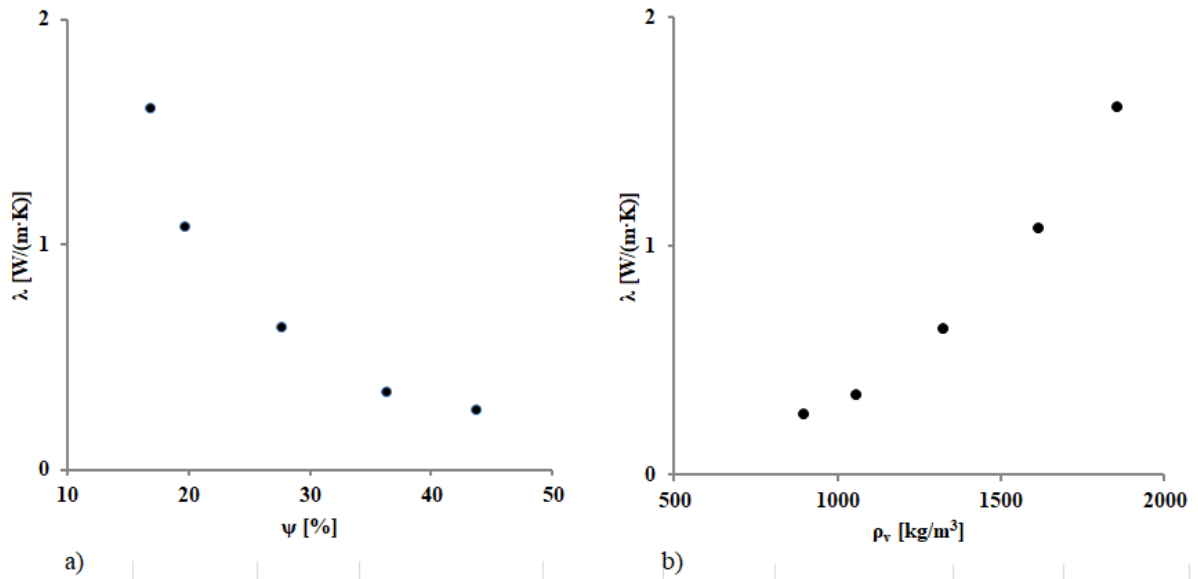


Obr. 57: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s PP-Reg v závislosti na obsahu vlhkosti

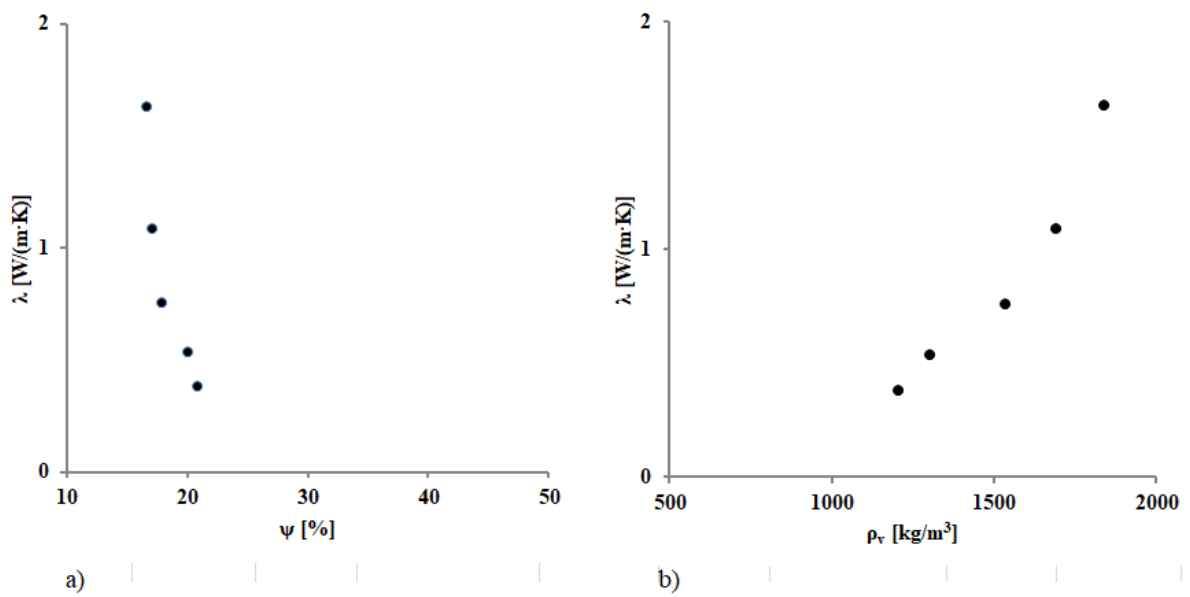
Obr. 58-60 znázorňují závislost tepelné vodivosti vyrobených lehkých betonů s obsahem plastů v suchém stavu na pórovitosti a na objemové hmotnosti. S nárůstem pórovitosti tepelná vodivost klesá, a naopak, s nárůstem objemové hmotnosti roste.



Obr. 58: Závislost součinitele tepelné vodivosti cementových kompozitů s PP-R v suchém stavu: a) na pórovitosti, b) na objemové hmotnosti



Obr. 59: Závislost součinitele tepelné vodivosti cementových kompozitů s PP-GF v suchém stavu: a) na pórovitosti, b) na objemové hmotnosti



Obr. 60: Závislost součinitele tepelné vodivosti cementových kompozitů s PP-Reg v suchém stavu: a) na pórovitosti, b) na objemové hmotnosti

Předpokládáme-li, že by kompozitní materiály s obsahem plastů mohly nalézt uplatnění jako roznášecí vrstva podlahy, lze vypočítat tepelný odpor R $((\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W})$ a součinitel prostupu tepla U $(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$ pro vrstvu podlahy o tloušťce 0,1 m. Tepelný odpor byl vypočten z rovnice:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (17)$$

kde

d je tloušťka vrstvy podlahy (m), v našem výpočtu 0,1 m,

λ je součinitel tepelné vodivosti $(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$.

Dále byl z této hodnoty vypočten součinitel prostupu tepla podle vztahu:

$$U = \frac{1}{(R_i + R + R_e)} \quad (18)$$

kde

R je tepelný odpor vrstvy podlahy $((\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W})$,

R_i je tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru, pro podlahovou vrstvu činí jeho hodnota 0,17 $((\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W})$,

R_e je tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru, jeho hodnota je 0,04 $((\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W})$.

Výše uvedené tepelně-technické parametry jsou spolu se součinitelem tepelné vodivosti λ uvedeny pro jednotlivé typy lehkých betonů s obsahem plastů v Tab. 46.

Tab. 46: Součinitel tepelné vodivosti a vypočtené tepelně-technické vlastnosti pro konstrukci podlahy (0,1 m) z lehkého betonu s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg

Vzorek	λ [W/(m·K)]	U [W/(m ² ·K)]	R [(m ² ·K)/W]
R	1,65	3,697	0,060
PP-R			
10 %	1,45	3,585	0,069
20 %	1,10	3,319	0,091
30 %	0,65	2,746	0,154
40 %	0,36	2,001	0,290
50 %	0,23	1,563	0,430
PP-GF			
10 %	1,61	3,676	0,062
20 %	1,08	3,308	0,092
30 %	0,64	2,728	0,157
40 %	0,35	2,021	0,285
50 %	0,27	1,723	0,370
PP-Reg			
10 %	1,63	3,687	0,061
20 %	1,09	3,315	0,092
30 %	0,76	2,927	0,132
40 %	0,54	2,529	0,185
50 %	0,39	2,130	0,260

Vypočtený součinitel prostupu tepla vyvinutých lehkých betonů lze porovnat s daty získanými pro pěnový polystyren, používaný k izolaci podlah. Hodnoty součinitele prostupu tepla U se pro vrstvu podlahy z pěnového polystyrenu o tloušťce 0,1 m pohybují v závislosti na jeho objemové hmotnosti mezi 0,3 - 0,5 W/(m²·K) [141].

Výsledky získané měřením transportu kapalné vody testovanými vzorky uvádí Tab. 47.

Tab. 47: Transport kapalné vlhkosti u cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-

<i>Reg</i>			
Vzorek	A [kg/(m ² ·s ^{1/2})]	κ [m ² /s]	S [m ² /s ^{1/2}]
R	0,024	2,7.10 ⁻⁸	2,39.10 ⁻⁵
PP-R			
10 %	0,076	2,55.10 ⁻⁷	7,62.10 ⁻⁵
20 %	0,077	3,19.10 ⁻⁷	7,73.10 ⁻⁵
30 %	0,111	5,32.10 ⁻⁷	11,1.10 ⁻⁵
40 %	0,113	6,1.10 ⁻⁷	11,2.10 ⁻⁵
50 %	0,131	9,73.10 ⁻⁷	13,2.10 ⁻⁵
PP-GF			
10 %	0,049	1,21.10 ⁻⁷	4,89.10 ⁻⁵
20 %	0,057	1,81.10 ⁻⁷	5,68.10 ⁻⁵
30 %	0,113	5,79.10 ⁻⁷	11,3.10 ⁻⁵
40 %	0,137	7,3.10 ⁻⁷	13,7.10 ⁻⁵
50 %	0,141	9,75.10 ⁻⁷	14,1.10 ⁻⁵
PP-Reg			
10 %	0,058	1,33.10 ⁻⁷	5,82.10 ⁻⁵
20 %	0,076	2,66.10 ⁻⁷	7,58.10 ⁻⁵
30 %	0,085	3,88.10 ⁻⁷	8,51.10 ⁻⁵
40 %	0,094	4,46.10 ⁻⁷	9,44.10 ⁻⁵
50 %	0,106	4,57.10 ⁻⁷	10,6.10 ⁻⁵

Byl pozorován nárůst absorpce vody při rostoucím obsahu PP ve vzorcích lehkého betonu. Podobné výsledky popisuje např. da Silva a kol. [31]. Tento nárůst je pravděpodobně spojen s nárůstem vnitřní pórovitosti, souvisejícím se slabou vazbou cementové matrice a plastového zrna. Důležitou roli v kapilární absorpci vody hraje rovněž objem a propojení kapilárních pórů v materiálu [36]. Na základě získaného absorpčního koeficientu lze u výsledných lehkých betonů s obsahem plastů předpokládat propustné póry s vysokou konektivitou. Nejnižší nárůst absorpčního koeficientu vykazovaly záměsi do 20 % náhrady PP-GF a 10 % náhrady PP-Reg.

Faktor difúzního odporu μ je často používán pro klasifikaci materiálů ve stavebnictví a určuje schopnost materiálu vést vodní páru. Vysoká hodnota faktoru μ znamená vysokou

resistenci materiálu vůči průchodu vodní páry [18]. Data, uvedená v Tab. 48 a 49 ukazují, že součinitel difúze vodní páry D roste s nárůstem obsahu plastu ve směsi a naopak, odpovídajícím způsobem klesá faktor difúzního odporu μ . Iucolano a kol. [18] uvádějí, že malty vyrobené s plastovým pískem, bez ohledu na procento zabudovaného plastu, vykazovaly hodnoty faktoru difúzního odporu 5-7 a byly o řád nižší než hodnoty zjištěné u běžných cementových malt. V případě PP odpadů byl nicméně pozorován, analogicky jako u transportu kapalné vody, vzrůst rychlosti prostupu vodní páry a tím příslušné snížení faktoru difúzního odporu se zvyšujícím se obsahem plastu v lehkém betonu. Obecně, lehké betony s obsahem plastu byly více propustné pro vodní páru než referenční beton. Z praktického hlediska, co se týká vhodného moderování klimatu uvnitř budov, je toto chování lehkých betonů výhodné.

Tab. 48: Transport plynné vlhkosti u cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-

Reg – dry-cup

Vzorek	δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]
R	$6,11 \cdot 10^{-12}$	$8,30 \cdot 10^{-7}$	29,9
PP-R			
10 %	$7,00 \cdot 10^{-12}$	$9,51 \cdot 10^{-7}$	28,9
20 %	$7,89 \cdot 10^{-12}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	23,1
30 %	$8,52 \cdot 10^{-12}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	21,4
40 %	$2,24 \cdot 10^{-11}$	$3,04 \cdot 10^{-6}$	8,3
50 %	$4,56 \cdot 10^{-11}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$	4,6
PP-GF			
10 %	$7,23 \cdot 10^{-12}$	$9,82 \cdot 10^{-7}$	25,2
20 %	$7,85 \cdot 10^{-12}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	23,2
30 %	$9,36 \cdot 10^{-12}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	19,5
40 %	$2,78 \cdot 10^{-11}$	$3,78 \cdot 10^{-6}$	6,6
50 %	$6,22 \cdot 10^{-11}$	$8,45 \cdot 10^{-6}$	3,0
PP-Reg			
10 %	$6,87 \cdot 10^{-12}$	$9,34 \cdot 10^{-7}$	26,5
20 %	$7,58 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	24,1
30 %	$7,73 \cdot 10^{-12}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	23,6
40 %	$9,45 \cdot 10^{-12}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	19,3
50 %	$1,03 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	17,7

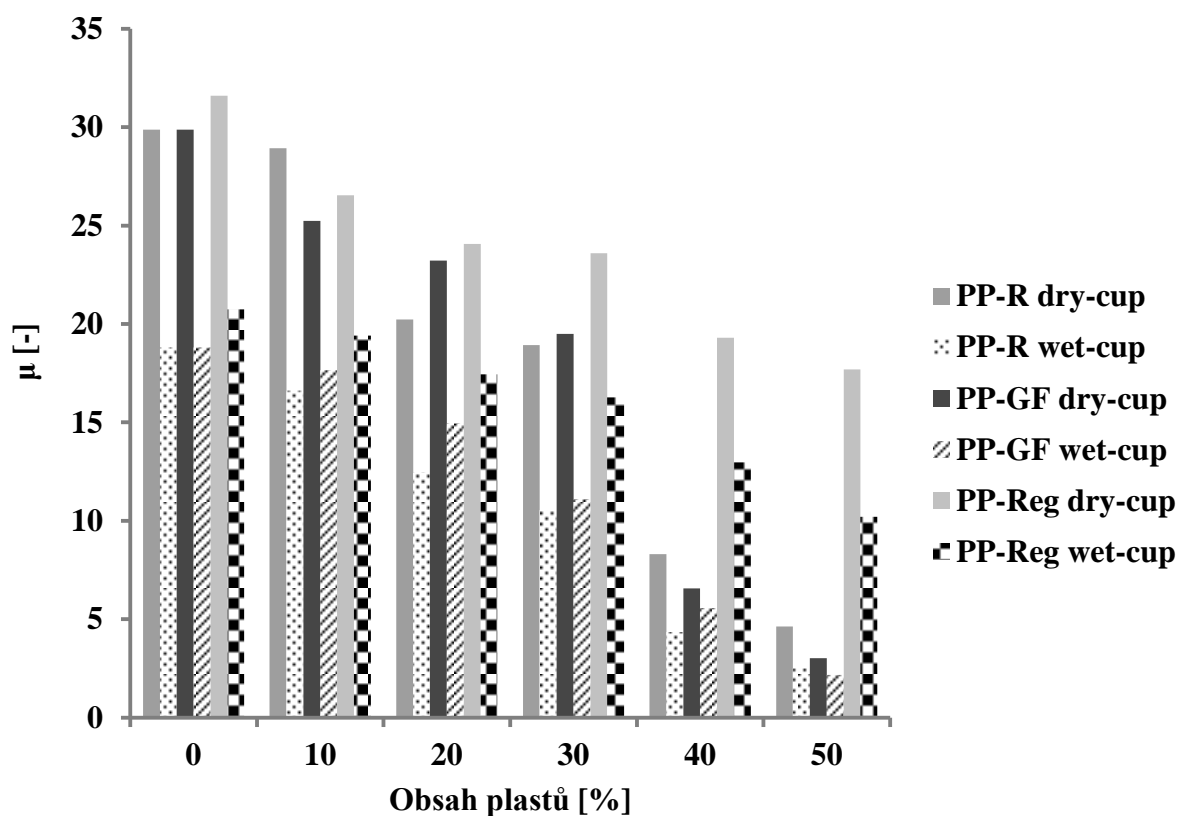
Tab. 49: Transport plynné vlhkosti u cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-

Reg – wet-cup

Vzorek	δ [s]	D [m^2/s]	μ [-]
R	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	18,8
PP-R			
10 %	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	16,6
20 %	$1,13 \cdot 10^{-11}$	$1,53 \cdot 10^{-6}$	16,2
30 %	$1,61 \cdot 10^{-11}$	$2,19 \cdot 10^{-6}$	11,3
40 %	$4,43 \cdot 10^{-11}$	$6,01 \cdot 10^{-6}$	4,4
50 %	$9,36 \cdot 10^{-11}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	2,5
PP-GF			
10 %	$1,03 \cdot 10^{-11}$	$1,41 \cdot 10^{-6}$	17,7
20 %	$1,34 \cdot 10^{-11}$	$1,82 \cdot 10^{-6}$	15,0
30 %	$1,77 \cdot 10^{-11}$	$2,41 \cdot 10^{-6}$	11,1
40 %	$3,29 \cdot 10^{-11}$	$4,46 \cdot 10^{-6}$	5,6
50 %	$1,13 \cdot 10^{-10}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	2,2
PP-Reg			
10 %	$9,9 \cdot 10^{-11}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	18,4
20 %	$1,05 \cdot 10^{-11}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	17,4
30 %	$1,12 \cdot 10^{-11}$	$1,52 \cdot 10^{-6}$	16,3
40 %	$1,41 \cdot 10^{-11}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$	13,0
50 %	$1,79 \cdot 10^{-11}$	$2,43 \cdot 10^{-6}$	10,2

Ačkoliv je v literatuře publikováno velice málo prací, týkajících se propustnosti lehkých betonů s obsahem odpadních plastů pro vodní páru, získaná data jsou v souladu s výsledky publikovanými v práci Colangela a kol. [142], který provedl experimentální a numerickou analýzu tepelných a hygrometrických vlastností vlastností stavebních materiálů s obsahem recyklovaných plastů. Podobné výsledky, týkající se zlepšení transportu vodní páry, prezentovali rovněž Liguori a Iucolano [143], kteří testovali izolační omítky s recyklovanými plastovými částicemi vyrobenými z průmyslových odpadů. Autoři uvádí, že omítky vyrobené s přídavkem plastového písku vykazují vyšší hodnotu transportu vodní páry v porovnání s referenční záměsí, obsahující pouze křemičitý písek.

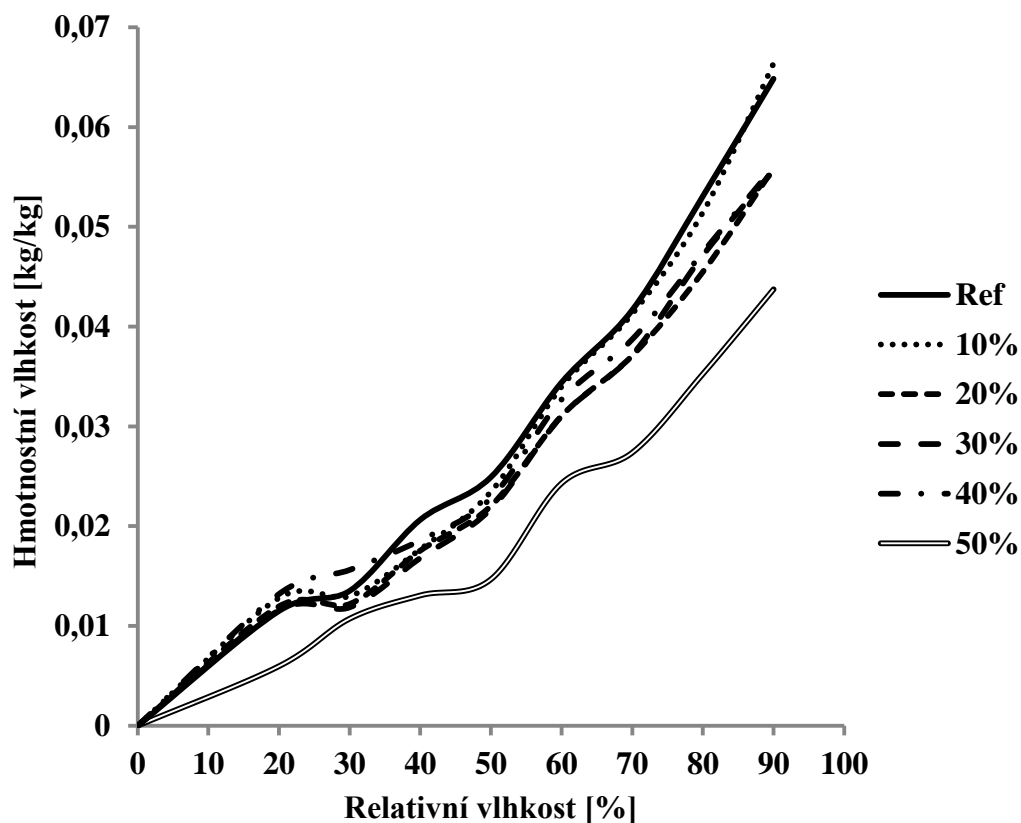
Pro wet-cup metodu byly získány nižší hodnoty faktoru difúzního odporu μ než pro uspořádání dry-cup. To koresponduje s principy měření pomocí obou těchto metod. Pro dry- i wet-cup metody byly získány nejvyšší faktory difúzního odporu μ pro lehký beton s obsahem PP-Reg (viz. Obr. 61), což souvisí s nejnižší porozitou betonů s přidavkem tohoto plastu.



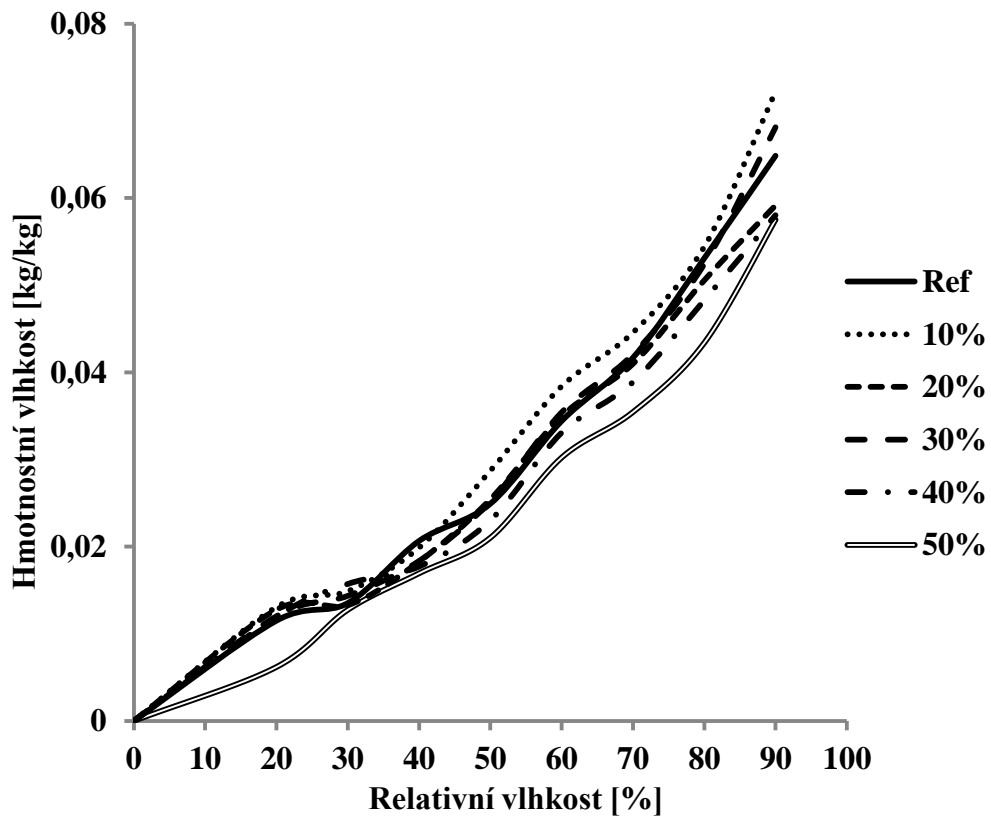
Obr. 61: Závislost faktoru difúzního odporu měřeného miskovou metodou v uspořádání dry-cup a wet-cup na obsahu plastu

Výsledné sorpční izotermy testovaných materiálů jsou prezentovány na Obr. 62-64. Tato data jsou zcela unikátní, jelikož v současné době nebyly publikovány žádné výsledky pro sorpci plynné vlhkosti u lehkých betonů s obsahem odpadních plastů. Nelze tedy provést porovnání s výsledky dosaženými jinými autory. Získané výsledky měření akumulace plynné vlhkosti ilustrují dvě protichůdné role, které ve výsledném materiálu hrají studované plasty. První role souvisí s nárůstem pórovitosti materiálu kvůli inkluzi heterogenit v cementové matici, obzvláště při větší náhradě písku plastem, a kvůli slabé vazbě mezi cementovou maticí a plastovými částicemi. Opačný vliv má neporézní struktura plastů, která významně snižuje sorpční kapacitu betonu. Tento vliv je dominantní zejména při vyšších náhradách písku plastem, kde větší plastové částice tvoří neaktivní vrstvu pro molekuly vodní páry a

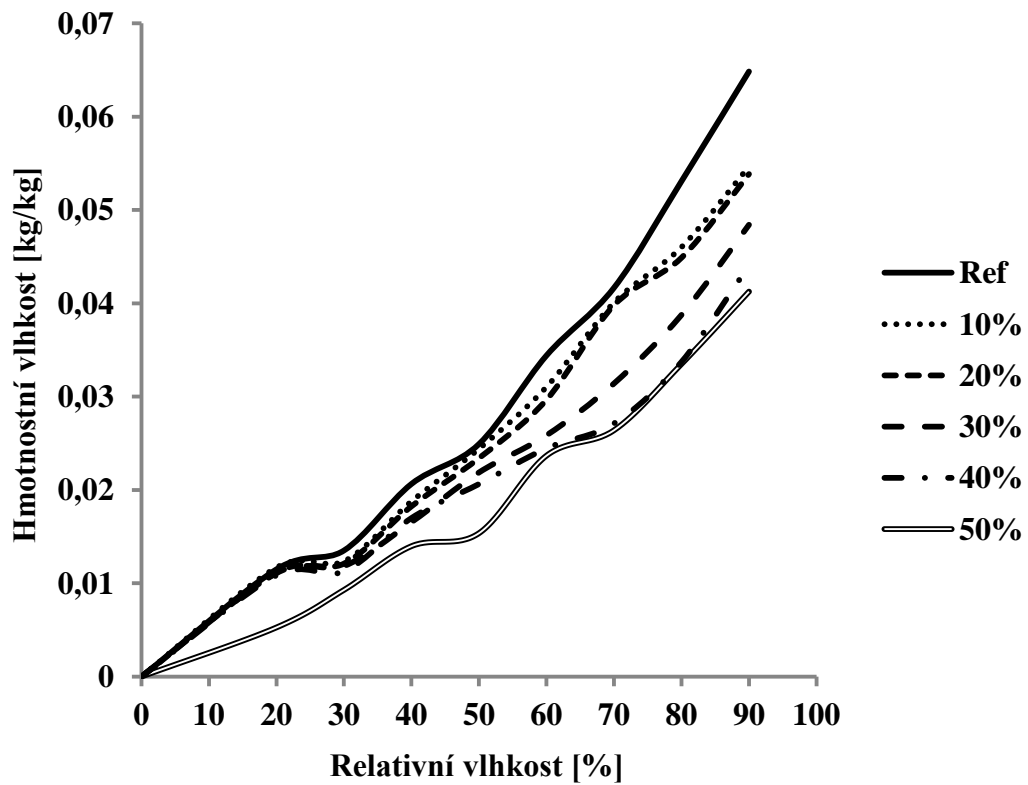
zabraňují sorpci vlhkosti. Je zřejmé, že změny v poréznosti vzorků ovlivnily akumulaci plynné vlhkosti v menší míře ve srovnání s účinkem nepropustnosti plastových částic pro molekuly vodní páry. Nárůst pórovitosti částečně zvýšil sorpci vlhkosti u materiálů s 10 % a 20 % PP-GF. V souladu s dalšími získanými výsledky, jako je pórovitost, charakteristiky transportu vodní páry a transportu kapalné vody, byla pozorována nejnižší sorpční kapacita plynné vlhkosti u vzorků s obsahem PP-Reg.



Obr. 62: Sorpční izotermy lehkých betonů s obsahem PP-R

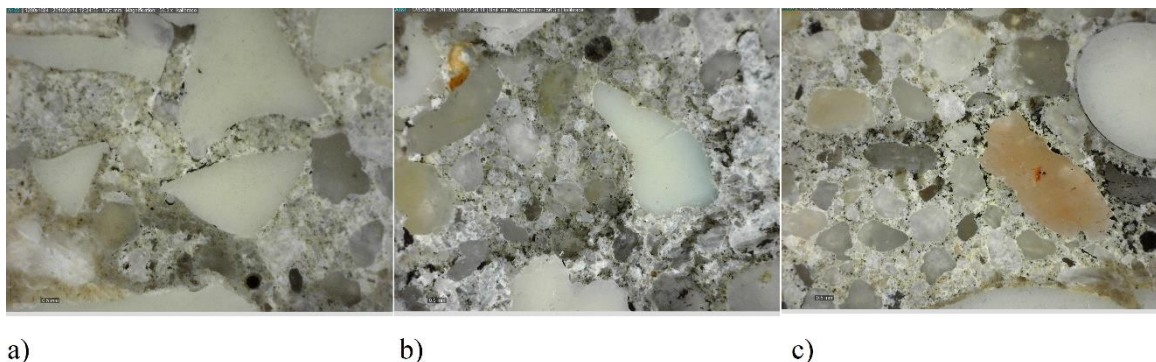


Obr. 63: Sorpční izotermy lehkých betonů s obsahem PP-GF



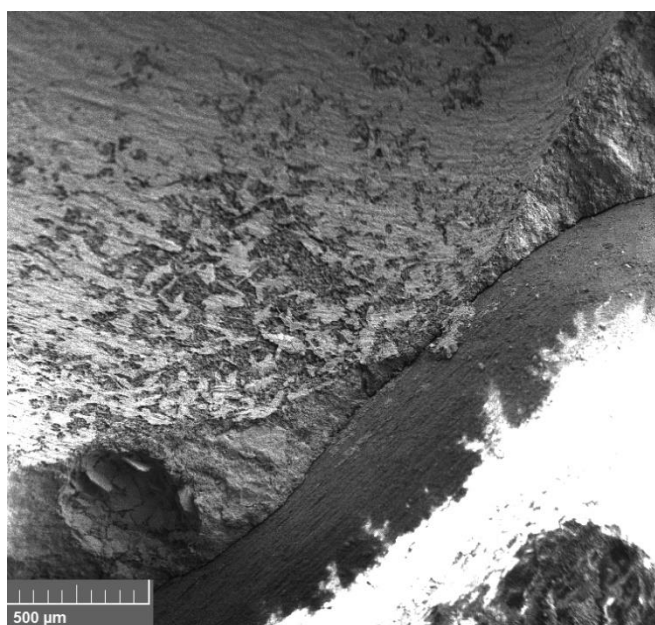
Obr. 64: Sorpční izotermy lehkých betonů s obsahem PP-Reg

Vyrobené vzorky lehkých betonů byly zkoumány pomocí digitálního optického mikroskopu Dino-Lite s rozlišením 5Mpx. Získané snímky (Obr. 65) indikují hutnou strukturu získaného materiálu, patrná je i kompaktní přechodová zóna mezi cementovou matricí a plastovými částicemi.



Obr. 65: Snímky z optického mikroskopu při zvětšení 55x; lehké betony s náhradou písku 10 %: a) PP-R, b) PP-GF, c) PP-Reg

Obr. 66 znázorňuje morfologii lehkého betonu s obsahem PP-R získanou pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) přístrojem Tescan Lyra s duálním paprskem (LYRA) na pracovišti VŠCHT v Praze.



Obr. 66: SEM snímek lehkého betonu s náhradou písku 10 % PP-R

SEM analýza ukázala pevnou strukturu studovaných materiálů a dobré začlenění plastových částic do cementové matrice. Lze pozorovat, že PP částice dostatečně přiléhá

k matici kompozitu. Při nižší úrovni náhrady písku přítomnost plastových částic negativně neovlivňovala tvorbu hutné struktury vyrobených lehkých betonů.

4.1.2 Odpadní expandovaný polypropylen

Konzistenci (zpracovatelnost) směsi se začleněným odpadním expandovaným polypropylenem (EPP) pomocí zkoušky rozlitím dle ČSN EN 12350-5 [125] uvádí Tab. 50.

Tab. 50: Výsledky zkoušky rozlitím pro testovaný kompozit s obsahem EPP

Vzorek	Rozliv [mm]
R	150×150
EPP	140×140

Obě záměsi (referenční i s obsahem EPP) byly snadno zpracovatelné a kompaktní. Problémy, spojené se segregací a nevhodnou distribucí částic EPP v kompozitu, byly vyřešeny přidavkem siliky VP4, která spolu s plastifikátorem vylepšila soudržnost čerstvé směsi.

Výsledky měření hustoty matrice, objemové hmotnosti a pórovitosti cementového kompozitu s obsahem EPP a referenčního cementového kompozitu s dobou ošetřování 28 a 90 dní jsou uvedeny v Tab. 51.

Tab. 51: Základní fyzikální vlastnosti cementového kompozitu s obsahem EPP

Vzorek		ρ_{mat} [kg/m ³]	ρ_v [kg/m ³]	Ψ [%]
28 dní	R	2306	1984	14,0
	EPP	1798	1437	20,1
90 dní	R	2320	1998	13,9
	EPP	1800	1443	19,8

Objemová hmotnost vzorků s obsahem EPP dosahovala hodnoty cca 1440 kg/m³, tyto kompozity mohou být proto klasifikovány jako lehké betony (objemová hmotnost < 2000 kg/m³) třídy D 1,6 podle normy ČSN EN 206 [137]. Dle očekávání hodnoty objemové hmotnosti i hustoty matrice vzorků po 90 dnech ošetřování ve vodě lehce vzrostly v porovnání se vzorky po 28 dnech ve vodě a naopak, pórovitost s dobou ošetřování klesla. Objemová hmotnost i hustota matrice vzorků s obsahem EPP jsou nižší než hodnoty obdržené

pro referenční vzorky. To koresponduje např. se studií Gu a Ozbakkaloglu [25], kde autoři uvádí, že hustota betonů s obsahem plastů klesá s rostoucí náhradou písku plastovými částicemi. Tyto výsledky byly pozorovány nezávisle na typu nebo velikosti zkoumaného plastu, protože obecně jsou plastové částice lehčí než přírodní kamenivo. V souladu s výsledky jiných autorů, např. Colangela a kol. [142] bylo zjištěno, že použití odpadních plastů jako náhrady kameniva má za následek zvýšení pórovitosti v porovnání s referenční záměsí. Toto zvýšení porozity lze vysvětlit tím, že (i): do záměsí je přidán materiál s extrémně heterogenní morfologií, který mění zpracovatelnost a množství vzduchu zachyceného ve směsi, (ii): hydrofobním chováním plastových částic, které může vést k vytvoření dutin v přechodových zónách mezi plastovými zrny a cementovou pastou.

Pevnostní charakteristiky materiálu s obsahem EPP prezentuje Tab 52.

Tab. 52: Mechanické vlastnosti cementového kompozitu s obsahem EPP

	Vzorek	f_c [MPa]	f_{cf} [MPa]	E [GPa]
28 dní	R	53,6	9,7	25,7
	EPP	20,8	5,1	8,1
90 dní	R	54,3	10,7	25,8
	EPP	21,4	5,9	10,9

Babu a Babu [110] uvádějí, že pevnost betonu je ovlivněna především pevností aplikovaného plniva. Tento fakt, spolu s vyšší pórovitostí a s nižší pevností vazby mezi povrchem částic EPP a cementovou pastou, vedl k pozorovanému poklesu mechanických vlastností lehkého betonu s obsahem EPP v porovnání s betonem bez plastových částic. Dalším faktorem, který se může podílet na snížení výsledné pevnosti, je, že plastové částice díky svému hydrofobnímu charakteru mohou omezovat pohyb vody a tím způsobovat inhibici hydratace cementu [15]. Zjištěné výsledky mechanických vlastností kompozitů s obsahem EPP jsou v souladu s výsledky jiných studií, kde odpadní plasty byly použity jako náhrada kameniva při výrobě betonu nebo malty [15; 19; 25; 138]. Brooks a kol. [144] uvádějí pokles pevnosti v tlaku pro beton s obsahem 28 % obj. expandovaného polystyrenu (EPS) z 39,3 MPa pro referenční vzorek na 12,5 MPa pro vzorek s EPS.

Hodnoty všech mechanických vlastností vzorku s obsahem EPP i referenčního vzorku s delším časem ošetřování ve vodě stoupaly díky prodloužené době hydratace a vývoji hustší betonové struktury.

Dynamický modul pružnosti cementového kompozitu s obsahem EPP s dobou ošetřování 28 dní klesl na 32 % hodnoty referenčního kompozitu, resp. na 42 % pro vzorky s dobou ošetřování 90 dní. Tang a kol. [145] pozorovali pokles modulu pružnosti z 34,2 GPa (referenční vzorek) na 14,5 GPa (vzorek s 60 % objemovou náhradou přírodního kameniva EPS). Gu a Ozbakkaloglu [25] uvádějí, že modul pružnosti cementového kompozitu s obsahem plastových částic závisí na více parametrech, jako je v/c , typ odpadních plastových částic, porozita plastových částic, míra nahrazení přírodního kameniva plasty atd. Stejně jako v případě pevnosti v tlaku, je i Youngův dynamický modul pružnosti cementového kompozitu s obsahem plastů obecně nižší, než u konvenčního betonu se stejným v/c . Toto pozorování je v souladu s výsledky získanými pro kompozit s obsahem EPP.

Výsledky měření tepelných vlastností kompozitů s obsahem EPP a referenčních kompozitů s dobou ošetřování 28, resp. 90 dní, získané v suchém stavu, jsou uvedeny v Tab. 53.

Tab. 53: Tepelné vlastnosti cementového kompozitu s obsahem EPP v suchém stavu

	Vzorek	λ [W/(m·K)]	C_v [10^6 J/(m ³ ·K)]
28 dní	R	1,86	1,81
	EPP	0,69	1,58
90 dní	R	1,88	1,82
	EPP	0,71	1,66

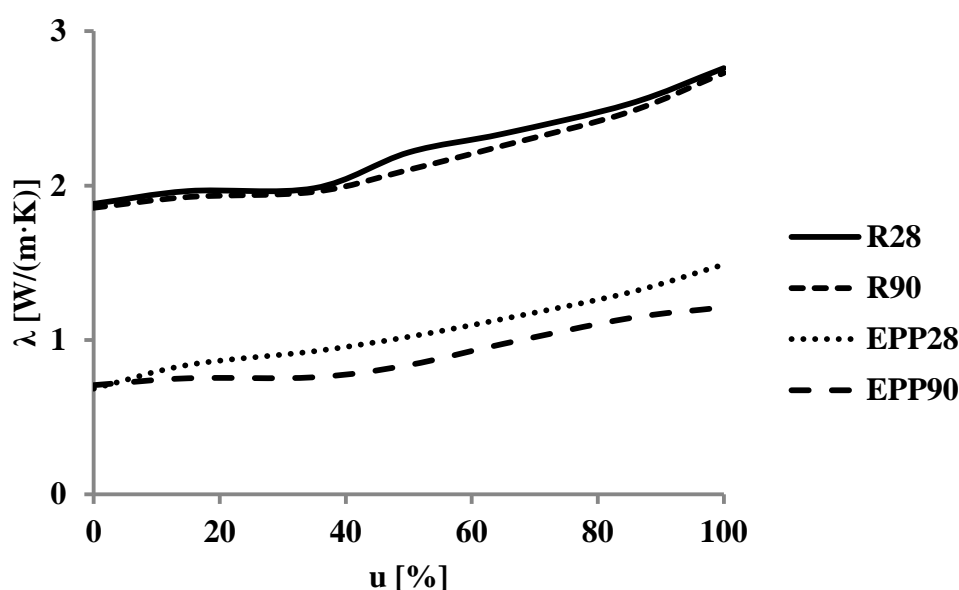
Nahrazení 60 % objemových písku částicemi EPP vedlo ke snížení tepelné vodivosti o 63 % v porovnání s referenčním vzorkem. Tento výsledek demonstruje pozitivní efekt EPP na tepelně-izolační vlastnosti vyvinutého lehkého betonu. Vzorky, které byly ošetřovány ve vodě 90 dní, vykazují o málo vyšší tepelnou vodivost než 28denní vzorky, to pravděpodobně souvisí s tím, že starší vzorky mají nižší pórovitost.

Wang a Meyer [146] pozorovali pokles tepelné vodivosti omítky s obsahem odpadního houževnatého polystyrenu (HIPS) na 87 %, 69 % a 44 % hodnoty pro referenční vzorek při objemové náhradě písku HIPS v množství 10%, 20 % a 50 %. Brooks a kol. [144] zaznamenali pokles tepelné vodivosti pro kompozity s obsahem EPS z 2,45 W/(m·K) (referenční vzorek) na 0,86 W/(m·K) (vzorek s 28 % obj. EPS).

Vliv obsahu vlhkosti na tepelnou vodivost zkoumaných lehkých betonů ilustruje Tab. 54 a Obr. 67, kde jsou uvedeny výsledky měření vzorků od suchého do plně nasyceného stavu. 100 % vlhkost odpovídá obsahu vody plně saturovaného vzorku, vyjádřeno v hmotnostních procentech.

Tab. 54: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s EPP v závislosti na obsahu vlhkosti

λ [W/(m·K)]		Relativní obsah vlhkosti [%]						
		0	15	35	50	65	85	100
28 dní	R	1,86	1,96	1,98	2,21	2,34	2,53	2,76
	EPP	0,69	0,84	0,93	1,02	1,14	1,31	1,49
90 dní	R	1,88	1,93	1,96	2,10	2,26	2,48	2,73
	EPP	0,71	0,75	0,76	0,84	0,98	1,14	1,21



Obr. 67: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s EPP v závislosti na obsahu vlhkosti

Podle předpokladu, s růstem obsahu vlhkosti hodnota součinitele tepelné vodivosti vzrůstala pro všechny analyzované vzorky. Zakomponování EPP vedlo k redukci tepelné vodivosti v porovnání s referenčními vzorky i v přítomnosti vlhkosti, jelikož EPP částice jsou inertní vůči průniku vody a jejich vysoce porézní charakter uzavřené buněčné struktury přispívá ke snížení tepelné vodivosti bez negativního ovlivnění vlhkostí. V případě 28denních vzorků byla tepelná vodivost kompozitu s EPP ve srovnání s referenčním vzorkem nižší o 62,9 % (suché vzorky), 53,8 % (vzorky s 50 % relativním obsahem vlhkosti) a o 46,0 % pro vzorky plně saturované. Pro referenční i pro EPP kompozity byl za přítomnosti vlhkosti pozorován pokles tepelné vodivosti 90denních vzorků ve srovnání se vzorky 28denními, díky jejich nižší pórovitosti. Pro plně saturované EPP kompozity byla tepelná vodivost 90denních

vzorků o 18,8 % nižší než u 28denních vzorků; u plně saturovaných referenčních vzorků byl rozdíl v tepelné vodivosti pro 90 a 28denní vzorky menší, pouze 1,1 %.

Vypočtené hodnoty tepelného odporu R a součinitele prostupu tepla U pro uvažovanou vrstvu podlahy z EPP kompozitů o tloušťce 0,1 m jsou spolu se součinitelem tepelné vodivosti λ uvedeny v Tab. 55.

Tab. 55: Součinitel tepelné vodivosti a vypočtené tepelně-technické vlastnosti pro konstrukci podlahy (0,1 m) z lehkého betonu obsahujícího EPP

Vzorek		λ [W/(m·K)]	U [W/(m ² ·K)]	R [(m ² ·K)/W]
28 dní	R	1,86	3,790	0,054
	EPP	0,69	2,809	0,146
90 dní	R	1,88	3,800	0,053
	EPP	0,71	2,847	0,141

Pro porovnání lze uvést součinitel prostupu tepla U pěnového polystyrenu používaného k izolaci podlah. Pro vrstvu podlahy o tloušťce 0,1 m se hodnoty součinitele prostupu tepla pohybují v závislosti na objemové hmotnosti polystyrenu mezi 0,3 - 0,5 W/(m²·K) [141].

Výsledky měření transporu kapalné vody pro referenční cementové kompozity a pro cementové kompozity s obsahem EPP jsou zobrazeny v Tab. 56.

Tab. 56: Transport kapalné vlhkosti u cementového kompozitu s EPP

Vzorek		A [kg/(m ² ·s ^{1/2})]	κ [m ² /s]	S [m ² /s ^{1/2}]
28 dní	R	0,0347	4,82.10 ⁻⁸	3,48.10 ⁻⁵
	EPP	0,0356	3,13.10 ⁻⁸	3,57.10 ⁻⁵
90 dní	R	0,0337	4,74.10 ⁻⁸	3,38.10 ⁻⁵
	EPP	0,0345	3,09.10 ⁻⁸	3,46.10 ⁻⁵

Z tabulky vyplývá, že absorpční koeficient A je pro lehký beton s obsahem EPP jen o 2,6 % vyšší než pro referenční materiál (28denní vzorky). To je pravděpodobně spojeno s vyšší otevřenou pórovitostí cementových kompozitů s EPP, kde ale na druhou stranu povrch plastových zrn je inertní z hlediska pronikání vody. Tyto dvě skutečnosti působí opačným směrem. Podobné výsledky, kde absorpce vody stoupala se stoupajícím množstvím plastového kameniva, uvádí ve své práci např. da Silva a kol. [31].

Výsledky měření transportu vodní páry metodou dry-cup a wet-cup jsou uvedeny v Tab. 57 a 58.

Tab. 57: Transport plynné vlhkosti u cementového kompozitu s EPP – dry-cup

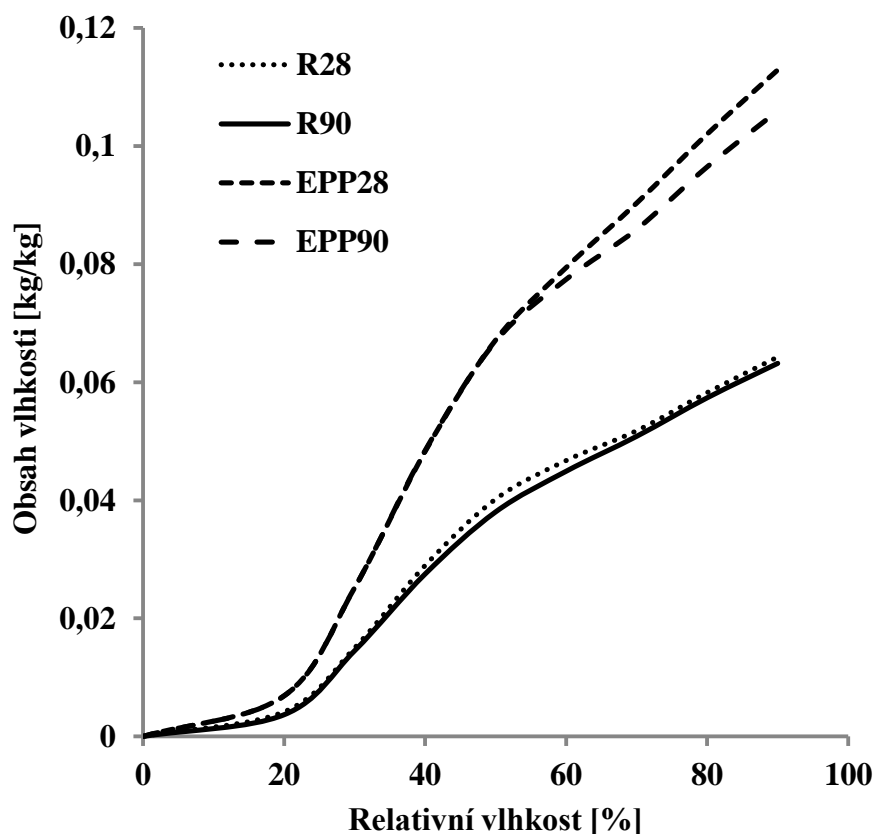
Vzorek		δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]
28 dní	R	$4,63 \cdot 10^{-12}$	$6,29 \cdot 10^{-7}$	39,4
	EPP	$9,14 \cdot 10^{-12}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$	20,0
90 dní	R	$4,35 \cdot 10^{-12}$	$5,91 \cdot 10^{-7}$	41,9
	EPP	$8,47 \cdot 10^{-12}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	21,5

Tab. 58: Transport plynné vlhkosti u cementového kompozitu s EPP – wet-cup

Vzorek		δ [s]	D [m ² /s]	μ [-]
28 dní	R	$6,71 \cdot 10^{-12}$	$9,12 \cdot 10^{-7}$	27,2
	EPP	$1,32 \cdot 10^{-11}$	$1,79 \cdot 10^{-6}$	13,8
90 dní	R	$6,19 \cdot 10^{-12}$	$8,41 \cdot 10^{-7}$	29,5
	EPP	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$1,55 \cdot 10^{-6}$	16,0

Výsledky měření transportu plynné vlhkosti pro referenční vzorky a pro vzorky kompozitu obsahující EPP se liší více, než bylo pozorováno u výsledků měření transportu kapalné vody. Byl pozorován nárůst hodnoty součinitele difúze vodní páry lehkých betonů s obsahem EPP a s tím související pokles faktoru difúzního odporu v porovnání s referenčními vzorky (o 49,2 % pro 28denní vzorky a o 48,7 % pro 90denní vzorky v dry-cup uspořádání). Vyšší propustnost vzorků lehkých betonů lze přisoudit jejich větší pórovitosti. V souladu s principy měření byly získány nižší hodnoty faktoru difúzního odporu při wet-cup uspořádání experimentu než při měření metodou dry-cup. Data, získaná měřením kompozitů s obsahem EPP, jsou v souladu s výsledky publikovanými ve studiích [142; 143].

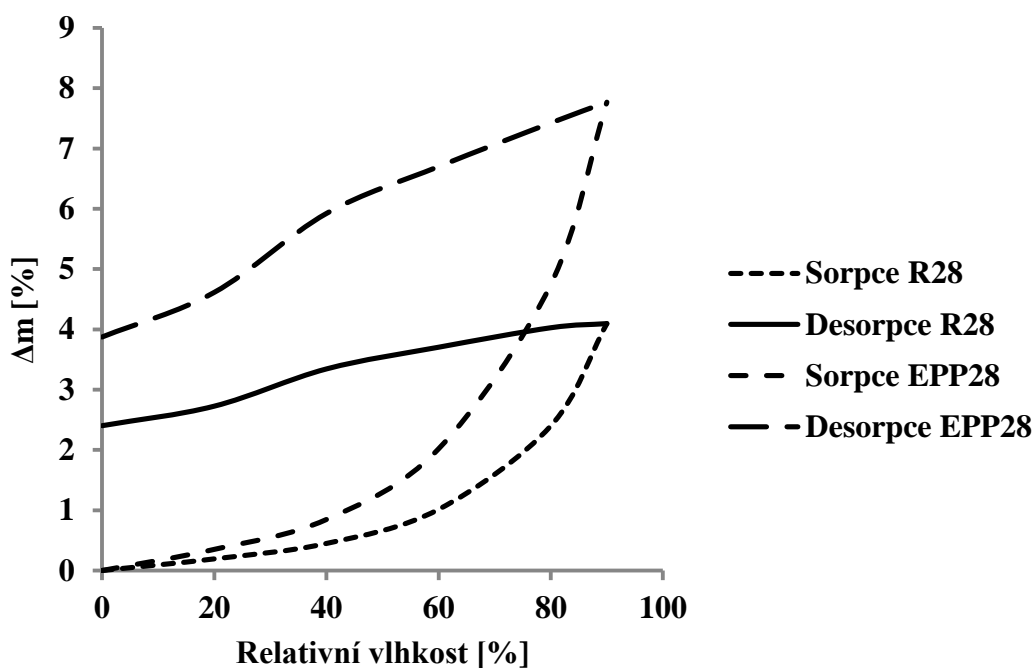
Sorpční izotermy zkoumaných materiálů získané měřením v klimatické komoře jsou znázorněny na Obr. 68.



Obr. 68: Sorpční izotermy cementových kompozitů s obsahem EPP

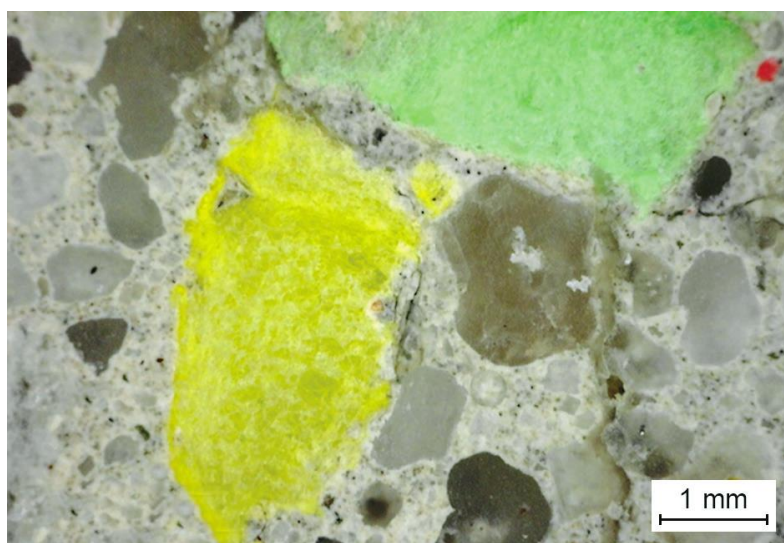
S nárůstem relativní vlhkosti prostředí se zvyšoval obsah vlhkosti ve všech zkoumaných vzorcích díky adsorpci většího množství plynné vlhkosti. Lehké betony obsahující EPP vykazovaly větší sorpční kapacitu než referenční vzorky. Obr. 68 ukazuje různé tvary křivek pro referenční a pro EPP vzorky. Sorpční izotermy měřené pro referenční vzorek vykazovaly pro oba časy ošetření ve vodě (28 a 90 dní) v celém rozsahu relativní vlhkosti prostředí podobný tvar. Naopak, vzorky obsahující EPP vykazují pro oblast relativní vlhkosti nad 50 % více akumulované vlhkosti pro 28denní vzorek.

Sorpční a desorpční izotermy získané měřením metodou DVS jsou prezentovány na Obr. 69. Analogicky jako v případě měření sorpcí v klimatické komoře, vyšší akumulaci plynné vlhkosti vykazovaly vzorky s obsahem EPP, což souvisí s jejich větší pórovitostí.



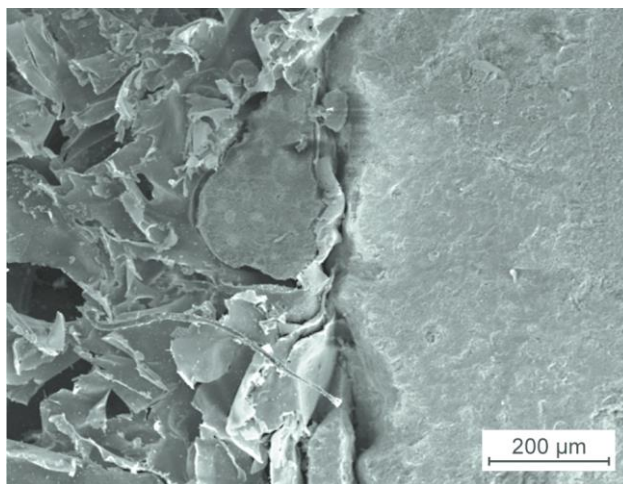
Obr. 69: Sorpční a desorpční izotermy cementových kompozitů s obsahem EPP, 28 dní

Na Obr. 70, získaném pomocí optické mikroskopie (přístroj Dino-Lite s rozlišením 5Mpx), lze pozorovat hustou strukturu materiálu a dobré začlenění EPP částic do cementové matrice.



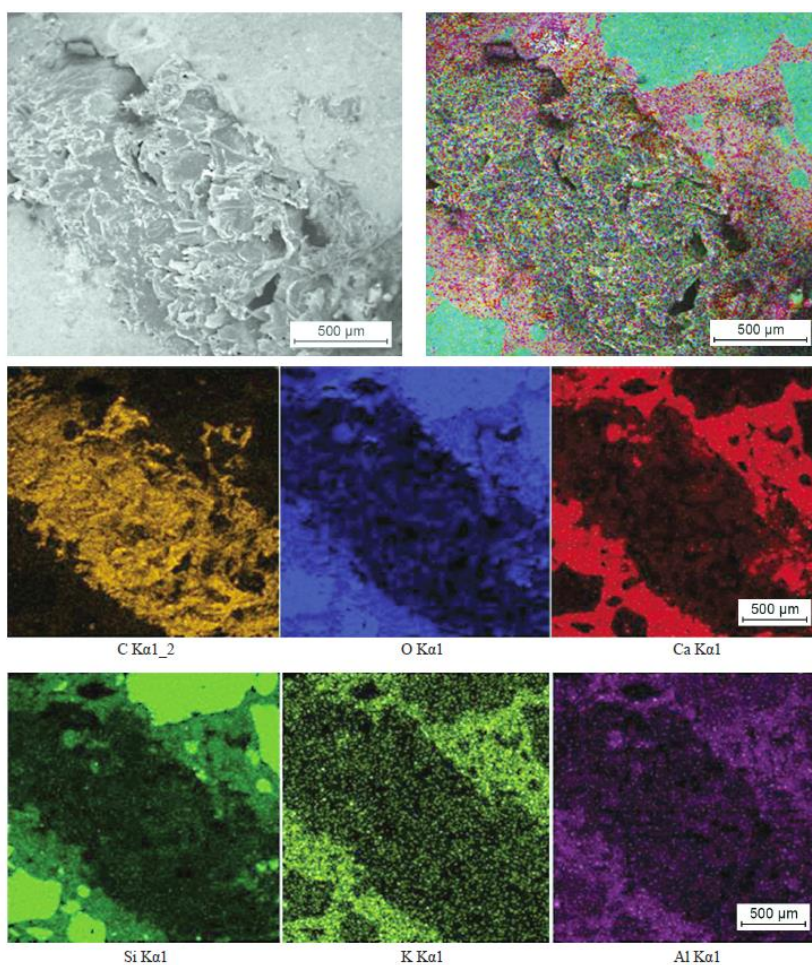
Obr. 70: Lehký beton s obsahem EPP, optický mikroskop

Morfologie lehkého betonu s EPP analyzovaná na pracovišti VŠCHT v Praze pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM), přístrojem Tescan Lyra s duálním paprskem (LYRA), je znázorněna na Obr. 71. Navzdory šupinovitému povrchu částice EPP dostatečně přiléhá k cementové matrici.



Obr. 71: SEM snímek lehkého betonu s obsahem EPP

Na Obr. 72 je prezentována SEM fotografie EPP částice v cementové matrici spolu s korespondující celkovou mapou prvkového složení a s mapami jednotlivých prvků, získané pomocí energo disperzní spektrometrie (EDS) (analyzátor X-Max^N s SDD detektorem a AZtecEnergy softwarem, VŠCHT v Praze).



Obr. 72: SEM snímek a příslušné EDS prvkové mapy lehkého betonu s obsahem EPP

Uhlík byl nalezen zejména v centrální části analyzovaného lehkého betonu, kde se nachází EPP částice. Pomocí prvkové mapy byla potvrzena přítomnost SiO_2 (viz. zelená barva v pravé horní části obrázku). Červená barva, korespondující s přítomností vápníku, potvrzuje vznik produktů hydratace cementu a siliky, jmenovitě portlanditu (C-H) a C-S-H gelů. Přítomnost hliníku (fialová barva) lze přiřadit vzniklým C-A-H a C-S-A-H fázím.

4.2 Kaly z čistíren odpadních vod

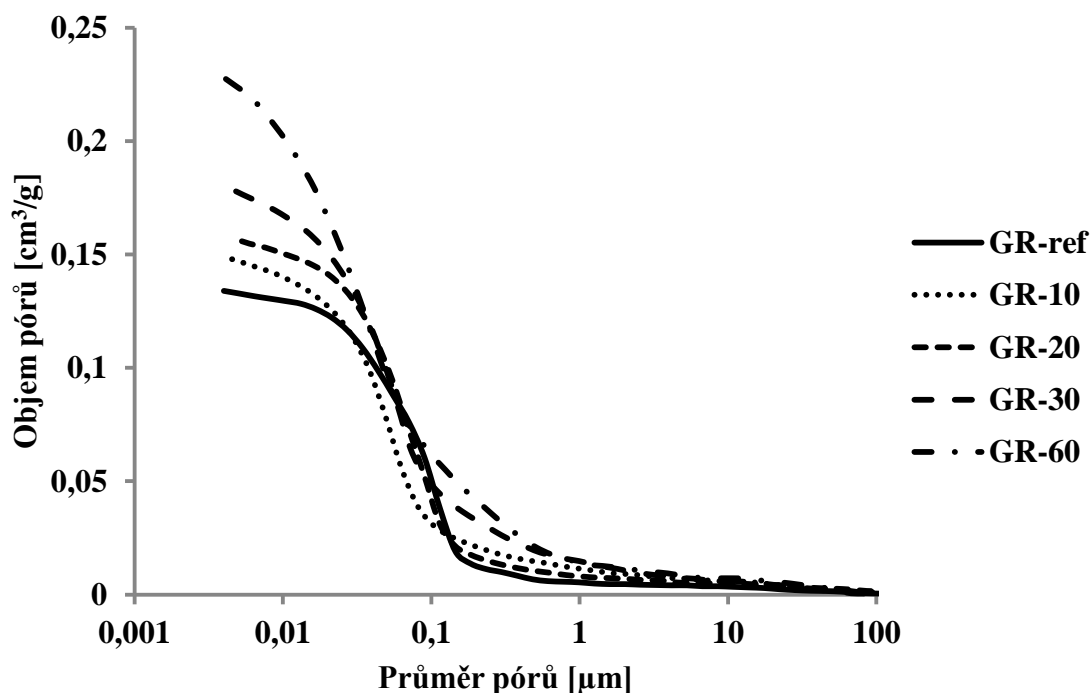
4.2.1 Kal z řecké čistírny odpadních vod

Tab. 59 ukazuje základní fyzikální vlastnosti vyrobených cementových past s obsahem vypáleného řeckého čistírenského kalu. Se stoupající náhradou cementu kalem celková porozita výrazně stoupá, pro vzorek obsahující 60 % kalu až o téměř 70 % ve srovnání s referenčním kompozitem. Hustota matrice zůstává přibližně stejná pro všechny záměsi, zatímco objemová hmotnost klesá způsobem odpovídajícím stoupající pórovitosti.

Tab. 59: Základní fyzikální vlastnosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV

Vzorek	$\rho_{\text{mat}} [\text{kg/m}^3]$	$\rho_v [\text{kg/m}^3]$	$\psi [\%]$
R	2197	1686	23
10 %	2168	1597	26
20 %	2199	1560	29
30 %	2203	1494	32
60 %	2211	1350	39

Z frekvenčních křivek distribuce velikosti pórů (Obr. 73) je zřejmé zanedbatelné množství velkých pórů nad $1 \mu\text{m}$ ve všech cementových pastách. Vzorek s 60 % náhradou cementu kalem má nejvyšší objem pórů téměř v celé jejich průměrové škále, což koresponduje s jeho nejvyšší porozitou. Oproti tomu referenční kompozit s nejmenší porozitou vykazuje nejnižší objemové zastoupení pórů o velikosti cca $0,007 - 0,03 \mu\text{m}$ a pórů větších než cca $0,2 \mu\text{m}$.



Obr. 73: Frekvenční křivky distribuce velikosti pórů cementových past s obsahem vypáleného říckého kalu

Mechanické vlastnosti cementových past obsahujících vypálený řícký kal jsou uvedeny v Tab. 60.

Tab. 60: Mechanické vlastnosti cementové pasty s obsahem vypáleného říckého kalu z ČOV

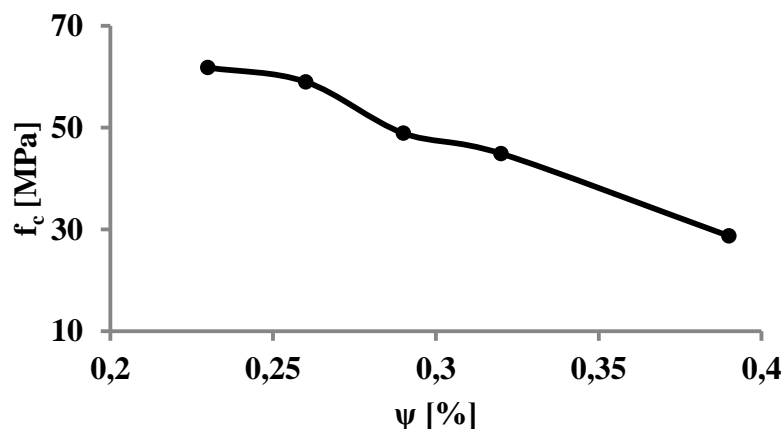
Vzorek	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	E [GPa]
R	61,8	10,6	20,4
10 %	59,0	9,5	16,5
20 %	48,9	8,2	15,1
30 %	44,9	7,3	13,6
60 %	28,7	5,9	9,0

Pevnost v tlaku, stejně jako pevnost v tahu za ohybu a dynamický Youngův modul pružnosti po 28 dnech klesají s rostoucí náhradou cementu kalem. Ve srovnání s referenční směsí byl pozorován pokles pevnosti v tlaku o 4,5 %, 20,9 %, 27,3 % a 53,6 % pro kompozity s náhradou cementu kalem ve výši 10 %, 20 %, 30 % a 60 %.

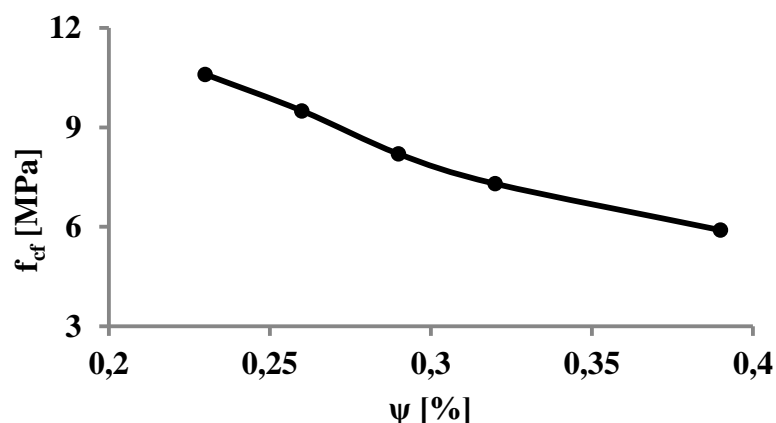
Vypálený kal po 28 dnech ve směsi figuruje pravděpodobně pouze jako plnivo a jeho pucolánové vlastnosti se ještě plně neprojevily. Pozorovaný rozpor mezi výsledky mechanických vlastností a zjištěnou pucolánovou aktivitou podle Frattiniho testu a modifikovaného Chappelleho testu (viz. kapitola 3.1.3) a rovněž podpořenou obsahem amorfni

fáze určené pomocí XRD (41 % hm.) může být vysvětlen tím, že částice vypáleného kalu jsou relativně velké (viz. Obr. 16), tudíž pucolánová reakce probíhá příliš pomalu, než aby bylo zřejmé významnější zlepšení mechanických vlastností již po 28 dnech stáří vzorků. V obsáhlé studii, týkající se hodnocení pucolánové aktivity SSA, provedené Donatellem a Cheesmanem [104], bylo zjištěno, že SSA dává vysoce pozitivní výsledky při použití metody nasyceného roztoku hydroxidu vápenatého, negativní výsledky pomocí stanovení indexu pevnostní aktivity (the strength activity index test – SAI) a pozitivní nebo negativní výsledky v závislosti na procentu náhrady cementu SSA v měření pucolánové aktivity dle Frattiniho.

Pevnost v tlaku cementových past s obsahem vypáleného řeckého kalu vykazuje podobný trend jako data publikovaná Rodríguezem [147], kde přídavek 20 % hm. Algeriánského kalu z nádrží snížil pevnost v tlaku cementové pasty na 40,9 MPa v porovnání s pevností v tlaku referenční záměsí bez přídavku kalu, která byla 50,8 MPa. To znamená 20 % pokles pevnosti v tlaku pro 28denní vzorky. V tomto případě byl nicméně kal aplikován jako přídavek k cementu, nikoli jako náhrada. Dobré mechanické vlastnosti směsných pojiv na bázi SSA jako částečné náhrady cementu popisuje Baeza a kol. [91]. V této práci 20 % náhrada cementu SSA vedla k 16 % poklesu pevnosti v tlaku. Autoři studovali kal z ČOV, který byl vypálený ve spalovně s fluidním ložem při 800 °C. Podobný výsledek obdržel rovněž Chang a kol. [148], který také zkoumal kaly z ČOV vypálené při 800 °C ve spalovně; autoři uvádějí 17 % pokles pevnosti v tlaku pro 20 % náhradu cementu SSA. Zde byl ovšem kromě vyšší teploty vypalování aplikován i nižší vodní součinitel (0,35) než ve zkouškách s řeckým kalem. Obr. 74 a 75 ukazují závislost pevnosti v tlaku, resp. pevnosti v tahu za ohybu na pórovitosti cementové pasty s vypáleným řeckým kalem.



Obr. 74: Závislost pevnosti v tlaku na pórovitosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV



Obr. 75: Závislost pevnosti v tahu za ohybu na pórovitosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV

Výsledky vyluhovacích testů (Tab. 61) ukazují relativně vysokou koncentraci chloridů ve všech analyzovaných vyluzích cementových past, přičemž množství chloridů stoupá s rostoucím množstvím kalu ve směsném pojivu.

Tab. 61: Obsah vyluhovatelných solí v cementových pastách s vypáleným řeckým kalem z ČOV

Vzorek	Chloridy [mg/g]	Dusičnany [mg/g]	Sírany [mg/g]
R	0,4	-	0,1
10 %	1,7	-	0,1
20 %	4,2	-	0,1
30 %	4,4	-	0,2
60 %	8,5	-	0,2

Ze získaných výsledků vyplývá, že chloridy obsažené jak v surovém kalu (4,23 % hm. – Tab. 21), tak ve vypáleném kalu (4,14 % hm. – Tab. 23), nebyly plně inkorporovány do cementové matrice. V souladu s normou ČSN EN 206 [137] je maximální akceptovatelné množství chloridů v betonu 0,2 % hm. Podíváme-li se na naměřená data, množství vyluhovaných chloridů z referenční pasty bylo 0,4 mg/g, což odpovídá 0,04 % hm. V cementu CEM I 42,5 R, použitým při výrobě past, byl zjištěn obsah chloridů 0,05 % hmotnostních. Obsah chloridů v referenčním vzorku může být vysvětlen jejich přítomností v cementu s tím, že část chloridových iontů byla inkorporována do cementové matrice díky přítomnému hliníku v podobě trikalciumaluminátu C_3A a tetrakalciumaluminátferitu C_4AF za vzniku

sloučenin typu Friedlova sůl ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot Cl_2 \cdot 10H_2O$). Množství volných chloridů závisí na vazebné kapacitě cementové matrice a rovněž na její chemické rovnováze obecně. Obsah vázaných chloridů může být změněn v závislosti na změnách obsahu vody v porézním prostředí betonu nebo na jeho karbonataci. Z hlediska bezpečného upotřebení vypáleného řeckého kalu v cementových kompozitech, co se týká obsahu chloridů, lze tímto kalem nahradit max. 10 % hm. cementu. Je nicméně třeba poznamenat, že množství chloridů by bylo možné snadno snížit promytím surového kalu vodou, jak doporučuje např. Keppert a kol. [149] pro popílky ze spalování komunálního odpadu. Lze očekávat, že tato metoda bude vhodná rovněž pro analyzovaný řecký kal.

4.2.2 Kal z polské čistírny odpadních vod

U čerstvých cementových kompozitů byla stanovena jejich konzistence (zpracovatelnost) pomocí zkoušky rozlitím dle ČSN EN 12350-5 [125]. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 62.

Tab. 62: Výsledky zkoušky rozlitím pro kompozity s obsahem polského kalu

R	Rozliv [mm]		
	10 %	20 %	30 %
165x165	150x150	135x135	110x115

V souladu se zprávami jiných autorů byla pozorována zhoršující se zpracovatelnost záměsí se stoupajícím přídatkem kalu k cementu [4; 67; 87]. Toto chování je vysvětlováno porézním charakterem vypáleného kalu, nepravidelnou morfologií jeho částic a vysokou absorpcí vody na povrchu částic vypáleného kalu [67].

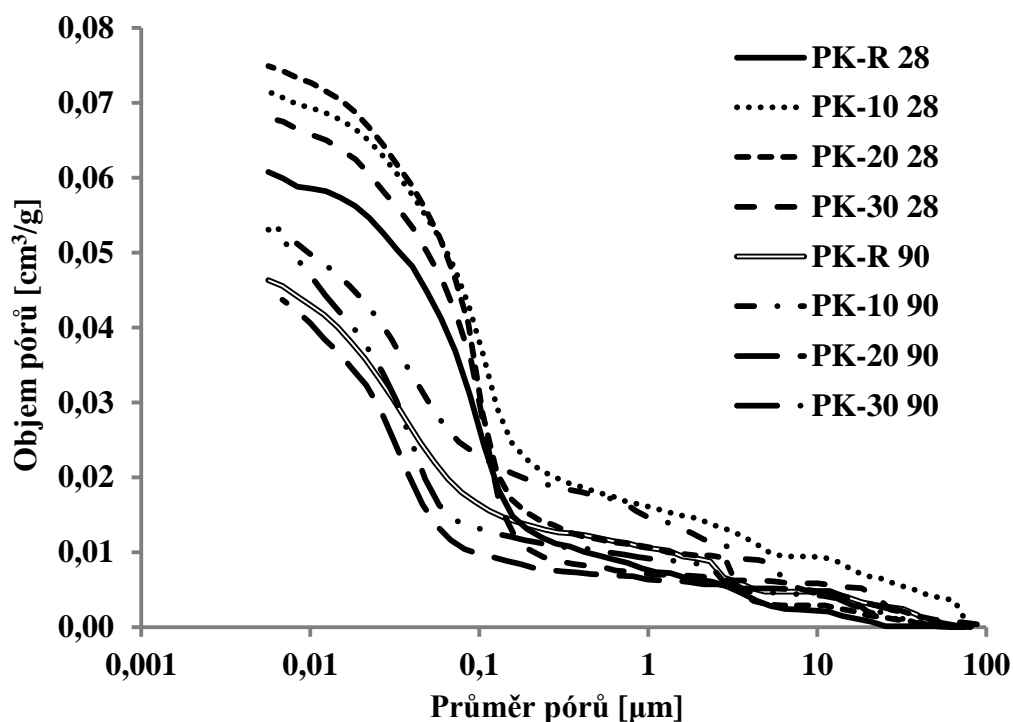
V Tab. 63 jsou uvedeny výsledné hodnoty hustoty matrice, objemové hmotnosti a pórovitosti cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu po 28 a 90 dnech ošetřování ve vodě.

Tab. 63: Základní fyzikální vlastnosti cementového kompozitu s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV

Vzorek	$\rho_{\text{mat}} [\text{kg/m}^3]$	$\rho_v [\text{kg/m}^3]$	$\psi [\%]$
R	2507	2035	18,8
28 dní	10 %	2513	18,7
	20 %	2514	20,1
	30 %	2509	20,3
	R	2508	2047
90 dní	10 %	2514	18,3
	20 %	2516	19,0
	30 %	2512	20,2
	R	2508	2047

S nárůstem množství vypáleného polského kalu ve směsi objemová hmotnost klesala, zatímco pórovitost stoupala; tyto změny nicméně byly velmi malé, řádově v jednotkách procent. Hodnoty hustoty matrice kompozitů se lišily ještě méně. Tento trend byl patrný v obou ošetřovacích obdobích.

S časem ošetřování ve vodě byl pozorován vzrůst hodnot hustoty matrice a objemové hmotnosti a pokles porozity. Rozdíl mezi hustotou matrice jednotlivých studovaných kompozitů po 28 dnech a 90 dnech hydratace byl pod jedno procento, pro objemovou hmotnost a porozitu se změny pohybují v řádu jednotek procent. Distribuce velikosti pórů v závislosti na jejich objemovém zastoupení, měřená pro obě ošetřovací období cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu, je prezentována na Obr. 76.



Obr. 76: Frekvenční křivky distribuce velikosti pórů cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV, 28 a 90 dní

Výrazné rozdíly v distribuci velikosti pórů a jejich objemovém zastoupení u kompozitů ošetřovaných po dobu 28 a 90 dnů jsou viditelné zejména v rozmezí 0,008 - 0,1 μm , přičemž 90denní vzorky vykazují nižší objemové zastoupení pórů.

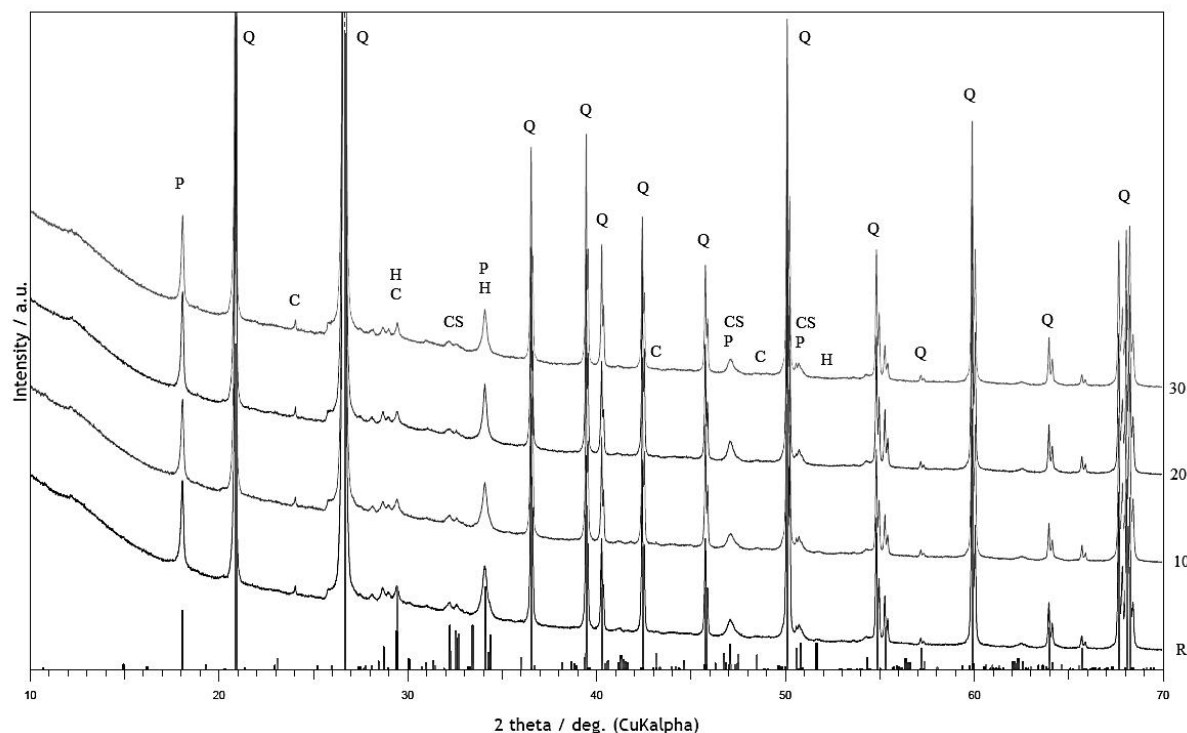
Výsledky měření pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu za ohybu a Youngova dynamického modulu pružnosti cementových kompozitů obsahujících vypálený polský kal jsou uvedeny v Tab. 64.

Tab. 64: Mechanické vlastnosti cementového kompozitu s vypáleným polským kallem z ČOV

Vzorek		f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	E [GPa]
28 dní	R	54,7	11,4	28,1
	10 %	54,3	9,9	26,1
	20 %	53,4	8,2	25,1
	30 %	53,2	7,7	24,3
90 dní	R	55,7	11,6	28,8
	10 %	55,4	10,1	28,7
	20 %	54,1	8,9	27,1
	30 %	53,4	8,4	26,4

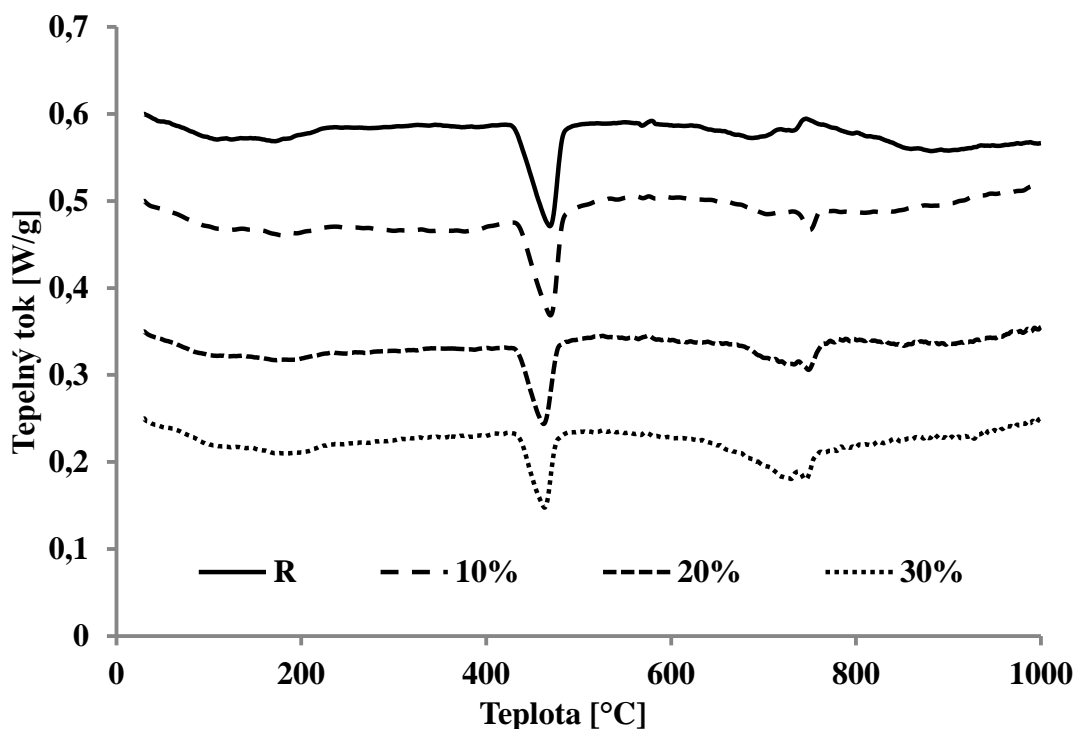
Mechanické vlastnosti cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu vykazují podobný trend jako jejich základní fyzikální vlastnosti; tj. s rostoucím obsahem kalu ve směsi klesají. Velikost poklesu se nicméně pro jednotlivé mechanické parametry lišila. Pro 10, 20 a 30 % přídavek kalu k cementu byl u 28denních těles pozorován pokles pevnosti v tlaku o 0,7 %, 2,4 % a 2,7 %, pevnost v tahu za ohybu se snížila o 13,2 %, 28,1 % a 32,4 % a u Youngova dynamického modulu pružnosti byl pozorován pokles o 7,1 %, 10,7 % a 13,5 %. Vývoj pevnostních charakteristik v závislosti na době ošetřování byl mezi 28 a 90 dnem relativně pomalý, což souhlasí i s měřením základních fyzikálních vlastností. Ve studiích publikovaných jinými autory [4], kteří používali vypálený kal jako náhradu pojiva nebo kameniva, byl nejčastěji pozorován pokles mechanických vlastností s nárůstem kalu ve směsi. Pouze několik autorů uvedlo pevnost stejnou, nebo větší, než vykazoval referenční vzorek [5].

Vzorky cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV byly po 28 dnech hydratace podrobeny XRD analýze za účelem získání difrakčních spekter, které jsou komparativně zobrazeny na Obr. 77. Byly identifikovány tyto fáze: Q – Křemen (syn-SiO_2); P – Portlandit (syn-Ca(OH)_2); C – Kalcit (syn-CaCO_3); CS – Kalcium silikát (alfa- Ca_2SiO_4 , C_2S) a H – Hatrurit ($\text{syn-Ca}_3\text{SiO}_5$, C_3S). Lze pozorovat pokles intenzit píků náležících portlanditu s narůstajícím množstvím kalu ve směsi, což indikuje pucolánovou reakci probíhající v prvních 28 dnech ošetřování vzorků.

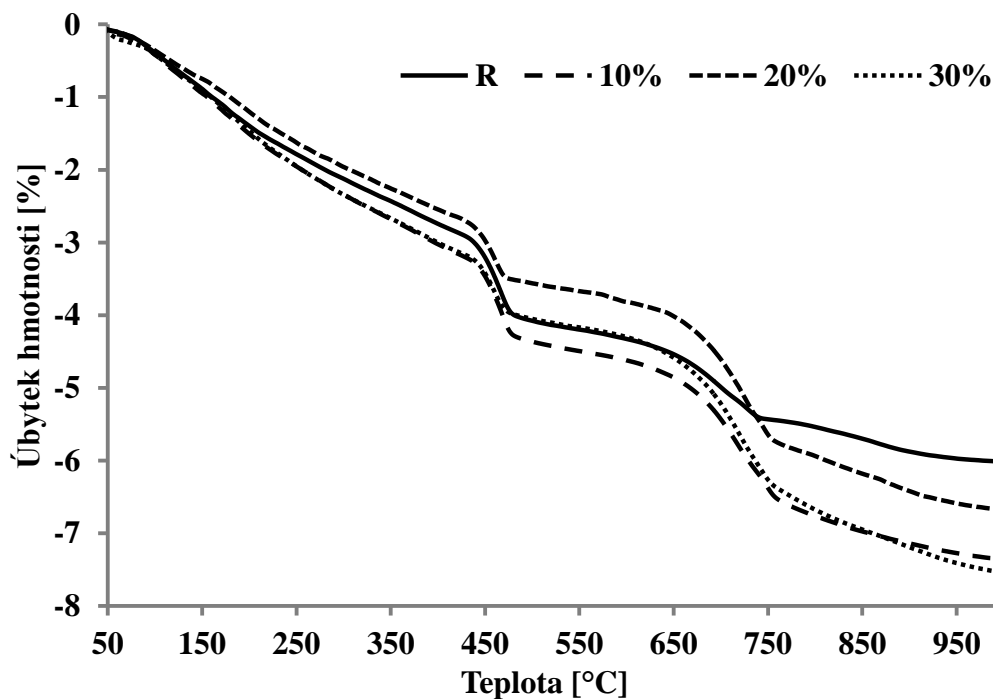


Obr. 77: XRD spektra testovaných cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV po 28 dnech, Q – křemen, P – Portlandit, C – Kalcit, CS – Kalcium silikát, H – Hatrurit

Simultánní termická analýza zahrnující termogravimetrickou analýzu (TGA) a diferenční kompenzační kalorimetrii (DSC) byla provedena na vzorcích ošetřovaných 28 dní ve vodě s cílem určit množství portlanditu ve vzorcích. DSC analýza cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu (Obr. 78) ukázala endotermický proces v teplotním intervalu 50 – 250 °C, který koresponduje s uvolňováním fyzikálně vázané vody z pórů, společně s úbytkem vody z C-S-H gelů. V tomto teplotním intervalu byl pozorován pokles hmotnosti cca o 2 % (Obr. 79). Významný endotermický pík mezi 420 – 480 °C náleží dehydroxylaci portlanditu. Další zřetelný pík mezi 650 – 795 °C je spojen s rozkladem kalcitu a C-S-H gelů.



Obr. 78: DSC analýza cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu – 28 dní



Obr. 79: TG analýza cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu – 28 dní

Obsah portlanditu ve zkoumaných kompozitech byl získán na základě dat obdržných pomocí TG analýzy. Výpočet spočíval v porovnání známé hodnoty úbytku hmotnosti čistého $\text{Ca}(\text{OH})_2$, která činí 24,34 % a úbytků hmotnosti studovaných vzorků ve stejném teplotním intervalu. Tab. 65 ukazuje, že obsah portlanditu významně klesá s rostoucím množstvím

vypáleného polského kalu ve směsi. To potvrzuje pucolánovou reakci ve zkoumaných cementových kompozitech, která byla rovněž indikována XRD analýzou.

Tab. 65: Relativní změny hmotnosti korespondující s rozkladem portlanditu a obsah portlanditu

Vzorek	Změna hmotnosti [%]	Obsah portlanditu [% hm.]
R	-1,26	5,18
10 %	-1,25	5,14
20 %	-0,90	3,68
30 %	-0,86	3,53

Výsledky vyluhovacích testů v Tab. 66 ukazují, že analyzované vzorky obsahují pouze stopová množství vyluhovatelných chloridů, dusičnanů a síranů. Chloridy, obsažené ve vypáleném polském kalu (0,7 mg/g – Tab. 31), byly inkorporovány do cementové matrice ve všech vzorcích, jelikož množství vyluhovaných chloridů bylo stejné pro vzorky s různým obsahem vypáleného kalu jako pro referenční vzorek.

Tab. 66: Obsah vyluhovatelných solí v cementových kompozitech s vypáleným polským kalem z ČOV – 28 dní

Vzorek	Chloridy [mg/g]	Dusičnany [mg/g]	Sírany [mg/g]
R	0,4	0,6	0,7
10 %	0,4	0,6	0,7
20 %	0,4	0,6	0,7
30 %	0,4	0,6	0,7

Pozitivní efekt chemické vazby chloridů do cementové matrice díky přítomnému hliníku v podobě trikalciualuminátu C_3A a tetrakalciualuminátferitu C_4AF byl rovněž pozorován dalšími autory [4; 72; 150].

Norma ČSN EN 206 [137] udává maximální akceptovatelný obsah chloridů v betonu 0,2 % hmotnostní. Z naměřených hodnot je zřejmé, že množství vyluhovatelných chloridů pro referenční vzorek i pro testované kompozity s polským kalem je 0,4 mg/g, což odpovídá 0,04 % hmotnostním. Pomocí XRF analýzy cementu CEM I 42,5 R, použitého při výrobě

kompozitů, byl zjištěn obsah chloridů 0,05 % hmotnostních. Proto množství vyluhovatelných chloridů, zjištěné v referenčním vzorku, může být vysvětleno jejich přítomností v cementu.

4.2.3 Hodnocení životního cyklu (LCA)

Za účelem kvantifikovat environmentální dopady využívání vypálených kalů z čistíren odpadních vod jako částečné náhrady cementu ve stavebnictví byla provedena analýza životního cyklu (LCA). Důležitou součástí každé LCA je inventarizace životního cyklu (LCI), která popisuje vstupy a výstupy při produkci daného materiálu. LCI výroby cementu analyzovali v EU Josa a kol. [151], kteří získali data pro tuto analýzu z referencí zaměřených na emise oxidu uhličitého (CO₂), oxidu siřičitého (SO₂), oxidů dusíku (NO_x) a prachu. Efekt emisí skleníkových plynů (greenhouse gases – GHG) byl vyjádřen pomocí ekvivalentu oxidu uhličitého, přičemž byly vzaty v úvahu rovněž škodlivé účinky ostatních plynů. Hlavními zdroji CO₂ z produkce cementu jsou rozklad CaCO₃ a spalování fosilních paliv při cca 1450 °C. Příspěvek produkce cementu k emisím GHG popsali Boesch a Hellweg [152], kteří uvádí, že produkce 1 tuny portlandského cementu generuje cca 800 kg ekvivalentu CO₂ (CO_{2,eq}). Množství produkovaného CO₂ lze snížit buď nahrazením cementu jiným materiálem, šetrnějším k životnímu prostředí, nebo použitím alternativních zdrojů energie.

V této práci byla provedena zjednodušená LCA analýza zaměřená na emise CO₂ a na spotřebu energie. Hodnoceny byly dopady na životní prostředí pro navrhované tepelné zpracování kalu z čistíren odpadních vod při teplotě 700 °C a jeho následnou aplikaci ve formě částečné náhrady cementu. Byla analyzována funkční jednotka 1 tuna směsných cementů složených z portlandského cementu CEM I 42,5 R a vypáleného kalu z ČOV, kde obsah kalu byl 10, 20, 30 a 60 % hm. V úvahu byla brána pouze energie potřebná pro tepelné zpracování a emise spojené se spotřebou energie. Emise spojené s přepravou, skladováním, mletím a mícháním vysušeného kalu byly zanedbány. Jedním z významných faktorů ovlivňujících spotřebu energie spojenou se zpracováním kalu je jeho odvodnění, které je nutné vzhledem k vysokému počátečnímu obsahu vody. Zkoumaný kal byl nicméně sušen venku pomocí slunečního záření, což umožnilo výrazné úspory energie.

Energie potřebná pro navrhované tepelné zpracování při 700 °C, E_{700} (J), byla určena pomocí rovnice:

$$E_{700} = m_k \cdot c_{pk} \cdot \Delta t \quad (19)$$

kde

m_k je hmotnost vysušeného kalu (kg),

c_{pk} je měrná tepelná kapacita kalu (J/(kg·K)),

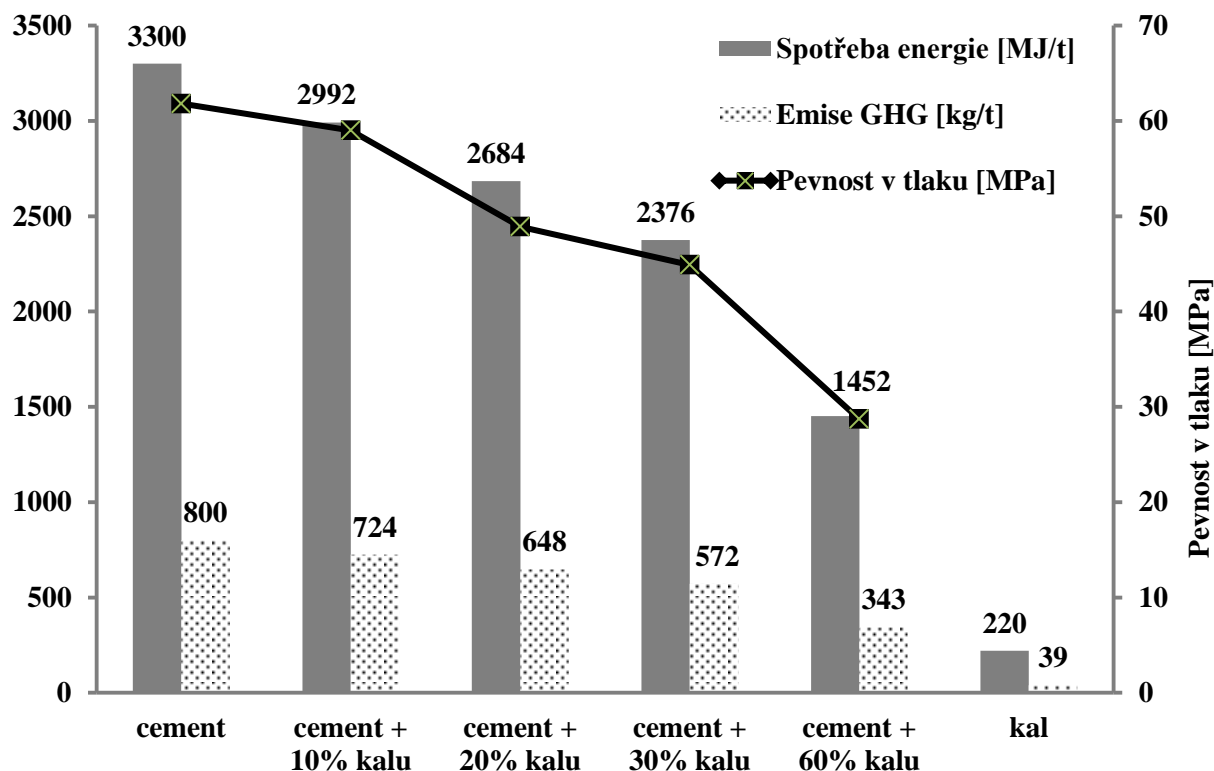
Δt je rozdíl mezi počáteční a cílovou teplotou kalu (K).

Emise CO_{2,eq} byly počítány s použitím distribuce zdrojů energie v ČR (Tab. 67).

Tab. 67: Distribuce zdrojů energie [72]

Typ zdroje	Podíl [%]
Spalování uhlí	62,20
Jaderná energie	30,87
Plyn	2,11
Voda	3,85
Ostatní, obnovitelné	1,15

Výsledky LCA analýzy jsou prezentovány na Obr. 80.



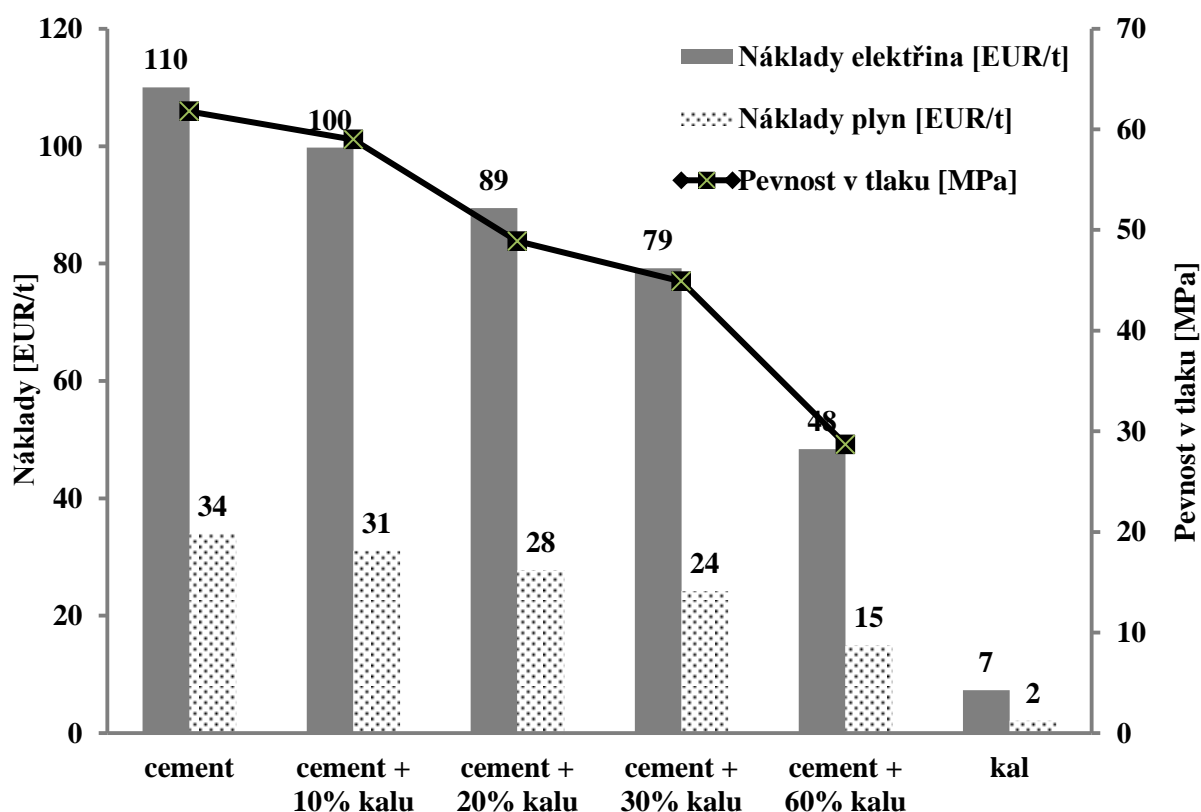
Obr. 80: Porovnání pevnosti v tlaku, spotřeby elektrické energie a emisí skleníkových plynů (GHG) odpovídající zkoumaným částečným náhradám cementu kalem

Pozitivní efekt využití vypáleného kalu z ČOV jako částečné náhrady cementu s ohledem na spotřebu energie a emise skleníkových plynů, s přihlédnutím k výsledným pevnostem v tlaku analyzovaných past, je zcela zřejmý. Pokles spotřeby energie nutné pro produkci zkoumaných směsných pojiv byl téměř 10 % pro každých 10 % kalu užitého jako náhrada

cementu. Energie potřebná pro tepelné zpracování kalu při 700 °C byla 220 MJ/t. Emise skleníkových plynů spojených s tepelným zpracováním kalů byly 40 kg/t. Je třeba poznamenat, že výše prezentovaná data jsou významně ovlivněna distribucí zdrojů elektrické energie s vyšším podílem uhelných elektráren. Státy s větším podílem alternativních zdrojů energie (bez produkce skleníkových plynů) mohou dosahovat lepších výsledků.

4.2.4 Nákladová analýza

Byla provedena zjednodušená nákladová analýza využití vypálených čistírenských kalů do směsných cementů. Vzhledem k tomu, že zamýšlené aplikace jednotlivých materiálů nebylo možné přesně definovat, byly v analýze zanedbány budoucí náklady. Při odhadu úspor nákladů spojených s využíváním kalů jako částečné náhrady cementu, provozní náklady vynaložené na produkci daného materiálu byly dány jako náklady na energii potřebnou na tepelné zpracování. S využitím průměrných cen elektrické energie (0,12 EUR/kWh) a plynu (0,037 EUR/kWh) daných Eurostatem [153] byly vypočteny náklady na produkci jednotlivých druhů směsných cementů. Výsledky jsou prezentovány na Obr. 81.



Obr. 81: Porovnání pevnosti v tlaku a nákladů na elektřinu a plyn odpovídající zkoumaným částečným náhradám cementu kalem

Lze pozorovat podstatný pozitivní efekt využití kalů z ČOV ve směsných cementech.

5 Závěr

Aplikace vybraných druhů odpadů jako náhrady pojiva nebo kameniva při výrobě cementových kompozitů může příznivě modifikovat vlastnosti výsledných materiálů a zároveň představuje důležitý přínos pro životní prostředí. Teoretická část práce byla zaměřena na mapování produkce a nakládání s odpadními plasty a kaly z čistíren odpadních vod a shrnula poznatky o možnostech jejich využívání ve stavebním průmyslu.

V experimentální části byly nejprve podrobně charakterizovány studované odpady, zejména z hlediska jejich fyzikálních, chemických a tepelných vlastností. Kaly byly testovány ve vysušeném stavu a následně i po jejich tepelném zpracování, pro které byla na základě výsledků termické analýzy zvolena teplota 700 °C.

Náhrada písku odpadním plasty z výroby potrubí (PP-R, PP-GF a PP-Reg) byla realizována v množství 10-50 % hmotnostních. Bylo pozorováno výrazné snižování zpracovatelnosti se vzrůstajícím podílem plastu ve směsi, receptury s 30 % náhradou písku plasty již nevykazovaly žádný rozliv. Tvar částic významně ovlivňoval zpracovatelnost čerstvé směsi, částice s ostrými a nepravidelnými rohy (drcený PP-R a PP-GF) snižovaly rozliv při 10 % a 20 % náhradách více než částice s oblými tvary (PP-Reg). Všechny záměsi byly dobře zhutnitelné. Aplikace PP plastů vedla ke snížení hustoty matrice a objemové hmotnosti, největší pokles hodnoty objemové hmotnosti ve srovnání s referenčním materiálem, 56,6 %, byl zaznamenán u vzorku 50 % náhrady písku PP-GF. Objemová hmotnost se snižovala v závislosti na obsahu PP téměř lineárně, toto chování bylo pozorováno u všech tří typů plastů. Podle dosažené objemové hmotnosti lze vyvinuté materiály klasifikovat jako lehké betony. Byla zjištěna výrazně nižší pórovitost vzorků obsahujících regranulované částice PP-Reg v porovnání se vzorky s obsahem drcených částic PP-R a PP-GF; tento vliv byl zřetelný zejména při vyšších stupních náhrady. S rostoucím množstvím plastových částic v betonech postupně klesala pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu i dynamický modul pružnosti. Nejlepší výsledky byly pozorovány u lehkého betonu s PP-Reg, kde u vzorku s 50 % náhradou písku poklesla pevnost v tlaku o 89,2 %. Je třeba poznamenat, že i když bylo nahrazeno 50 % písku PP, vyrobené lehké betony stále vykazovaly mechanické vlastnosti přijatelné pro nenosné betonové konstrukce, tj. lze je využít do stavebního podloží, do vícevrstvých podlahových konstrukcí nebo do sendvičových panelů. U vyrobených lehkých betonů byl zjištěn velice příznivý vliv plastových částic na moderování přenosu tepla.

Aplikace všech druhů PP vedla k významnému poklesu hodnot součinitele tepelné vodivosti (v případě PP-R klesl součinitel tepelné vodivosti ve srovnání s referencí o 86,1 %), a to i v přítomnosti vlhkosti. Pozorované výrazné vylepšení tepelně-izolačních vlastností je způsobeno nižší tepelnou vodivostí plastových částic v porovnání s křemičitým pískem a větší otevřenou pórovitostí lehkých betonů s obsahem plastů. Do 20 % náhrady klesl součinitel tepelné vodivosti u všech PP částic přibližně stejně v porovnání s referenčním betonem, od 30 % náhrady výše se vyznačovaly lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi vzorky s PP-R a PP-GF. Transport vlhkosti ve formě kapalné vody a vodní páry se zvyšoval se zvětšujícím se množstvím plastových částic v analyzovaných vzorcích, zatímco akumulací kapacita plynné vlhkosti ve většině případů klesala. Nejnižší nárůst absorpčního koeficientu vykazovaly záměsi do 20 % náhrady PP-GF a 10 % náhrady PP-Reg. Pro dry- i wet-cup metody byly získány nejvyšší faktory difúzního odporu pro lehký beton s obsahem PP-Reg, rovněž nejnižší sorpční kapacita plynné vlhkosti byla prokázána u vzorků s tímto typem plastu. Tvar částic významně ovlivňoval zpracovatelnost čerstvé směsi, a tudíž i výslednou pórovitost ztvrdlého kompozitu. Následně byly ovlivněny všechny ostatní vlastnosti vyvinutých lehkých betonů, jako je mechanická odolnost, tepelné a vlhkostní parametry. Byly pozorovány podobné vlastnosti u kompozitů, ve kterých písek nahrazovaly drcené plastové částice s ostrými hranami PP-R a PP-GF, ačkoliv se tyto polypropyleny liší svým složením (PP-GF obsahuje skelná vlákna); zatímco lehké betony obsahující regranulované částice PP-Reg sloupcovitého tvaru, i když jsou tvořeny stejným random kopolymenerem jako PP-R, vykazovaly rozdílné vlastnosti v porovnání se vzorky připravenými s oběma typy drcených plastů.

Drcený EPP byl použit jako 60 % objemová náhrada písku při výrobě lehkého betonu. Na základě předběžných zkoušek byla vybrána jedna záměs, která obsahovala nejvyšší množství EPP, které bylo možné přidat do směsi, aby bylo dosaženo požadované zpracovatelnosti a vyhovujících mechanických vlastností. Zpracovatelnost čerstvé směsi s obsahem EPP se v porovnání s referenční záměsí snížila jen velmi málo (o 6,7 %). Problém spojený se segregací a zhoršenou distribucí částic EPP ve směsi byl zcela vyřešen přidávkou vhodného množství siliky VP4 a plastifikátoru. Modifikace směsi EPP částicemi vedla ke snížení hustoty matrice a objemové hmotnosti výsledného materiálu a k nárůstu jeho pórovitosti v porovnání s referenční záměsí. Po 90 dnech ošetřování ve vodě hodnoty objemové hmotnosti i hustoty matrice vzorků lehce vzrostly v porovnání se vzorky po 28 dnech ve vodě a naopak, pórovitost s dobou ošetřování klesla. Tyto změny byly nicméně velmi malé, do jednoho procenta. Na základě dosažené objemové hmotnosti lze vyvinutý kompozit obsahující EPP částice klasifikovat jako lehký beton. U všech mechanických charakteristik

EPP kompozitu byl zjištěn pokles ve srovnání s referenčními vzorky; 90denní pevnost v tlaku poklesla na 39 %, pevnost v tahu za ohybu se snížila na 55 % a dynamický modul pružnosti klesl na 42 % hodnoty naměřené pro referenční vzorky. Tyto mechanické vlastnosti jsou nicméně zcela dostačující pro nenosné betonové aplikace jako stavební podloží, vícevrstvé podlahové konstrukce nebo sendvičové panely. Hodnoty testovaných mechanických vlastností vzorku s obsahem EPP i referenčního vzorku s delším časem ošetřování ve vodě mírně stoupaly díky prodloužené době hydratace a vývoji hustší betonové struktury. EPP částice vykazovaly významně nižší parametry transportu tepla než křemičitý písek. Jejich přítomnost v cementovém kompozitu způsobila výrazné snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti, o 62,9 % ve srovnání s referenčním vzorkem. Pokles součinitele tepelné vodivosti byl zaznamenán i v přítomnosti vlhkosti. Vlhkostní parametry lehkého betonu s obsahem EPP jsou úzce spojeny s jeho pórovitostí stejně jako s nepropustností plastových částic pro vodu. Byl pozorován pouze malý nárůst transportu kapalné vody lehkého betonu obsahujícího EPP v porovnání s referenční směsí (o 2,6 % u 28denních vzorků), zatímco transport plynné vlhkosti byl významně větší (faktor difúzního odporu poklesl o 49,2 % pro 28denní vzorky s EPP ve srovnání s referenčním kompozitem). Co se týká akumulace plynné vlhkosti, u vzorků s EPP byla naměřena větší sorpční kapacita než u referenčního materiálu.

Vypálení řeckého i polského vysušeného kalu v laboratorní peci na 700 °C po dobu dvou hodin zlepšilo jejich chemické a mineralogické složení. Byl zjištěn nárůst obsahu SiO_2 (na 22,9 % u řeckého kalu a 30,8 % u polského kalu) a Al_2O_3 (na 8,9 % pro řecký kal a 7,9 % pro polský kal). Amorfnní fáze po vypálení tvořila 41,0 % řeckého kalu a 52,3 % polského kalu. Po tepelném zpracování kalů stouply rovněž hodnoty jejich sypaných hmotností a hustot matrice. Poměr sypané hmotnosti a hustoty matrice vypáleného řeckého kalu byl 0,38, zatímco polský kal měl tento poměr nižší, 0,24, což indikuje více porézní charakter tohoto materiálu. Oba tepelně zpracované kaly vyhověly zkoušce pucolánové aktivity provedené modifikovaným testem dle Chapelleho. Ve zkoušce realizované pomocí Frattiniho testu byly pucolánově aktivní všechny směsi cementu s řeckým kalem, polský kal vyhověl zkoušce ve směsi s cementem v hmotnostním poměru 30 % a 40 %, zatímco ve směsi s poměrem 10 % a 20 % pucolánovou aktivitu nevykazoval. Koncentrace těžkých kovů v obou studovaných kalech byla pod limity vyhlášky sloužící k hodnocení kalů aplikovaných na zemědělskou půdu. Vyluhovací testy zaměřené na rozpustné soli (chloridy, sírany a dusičnany) ukázaly relativně vysoký obsah chloridů ve vypáleném řeckém kalu, zatímco v polském kalu byla identifikována pouze stopová množství těchto analyzovaných látek.

Pro přípravu cementových past byl cement nahrazen tepelně zpracovaným řeckým kalem v množství 10, 20, 30 a 60 % hmotnostních. V cementových pastách se celková porozita se stoupající náhradou cementu kalem výrazně zvyšovala, pro vzorek obsahující 60 % kalu až o téměř 70 % ve srovnání s referenčním kompozitem. Hustota matrice zůstala přibližně stejná pro všechny záměsi, zatímco objemová hmotnost klesala s vyšším množstvím kalu způsobem odpovídajícím stoupající pórovitosti. Ačkoliv analýza prokázala pucolánovou aktivitu vypáleného řeckého kalu, na mechanických vlastnostech výsledných past tento vliv nebyl zřejmý. Ve srovnání s referenční směsí byl pozorován pokles pevnosti v tlaku o 4,5 %, 20,9 %, 27,3 % a 53,6 % pro kompozity s náhradou cementu kalem ve výši 10 %, 20 %, 30 % a 60 %. Kal se zde choval spíše jako plnivo a jeho pucolánové vlastnosti se během 28 dní plně neprojevily. Tento rozpor mezi mechanickými vlastnostmi a pucolánovou aktivitou byl pravděpodobně způsoben větší velikostí částic kalu, což zpomalilo pucolánovou reakci. Vyluhovací testy vykazaly v cementových pastách s obsahem vypáleného řeckého kalu vysoký obsah chloridů. Limit pro bezpečné použití zkoumaného kalu jako náhrady portlandského cementu by z hlediska obsahu chloridů měl být stanoven na 10 % hmotnostních.

Vypálený polský kal byl aplikován jako přídatek k cementu při přípravě cementových malt v množství 10, 20 a 30 % hmotnostních. Byla pozorována zhoršující se zpracovatelnost záměsí se stoupajícím přídatkem kalu k cementu (o 9 %, 18 % a 30 % oproti referenční záměsí pro kompozity s 10, 20 a 30% přídatkem kalu). Toto chování je vysvětlováno porézním charakterem vypáleného kalu, nepravidelnou morfologií jeho částic a vysokou absorpcí vody na povrchu částic vypáleného kalu. Cementové kompozity připravené s přídatkem polského vypáleného kalu vykazovaly dobré funkční vlastnosti. Pro 28denní kompozity s přídatkem 30 % kalu pórovitost stoupla o 6 % a pevnost v tlaku klesla pouze o 3 %, což je velice příznivý výsledek. Stále akceptovatelný je pokles 30 % pevnosti v tlaku za ohybu a 15 % pokles Youngova dynamického modulu pružnosti. S prodlouženou dobou ošetřování ve vodě se vlastnosti kompozitů měnily jen velmi málo. Charakterizace 28denních vzorků pomocí XRD a STA analýz ukázala významný pokles obsahu portlanditu s nárůstajícím množstvím kalu v kompozitu, což potvrzuje pucolánovou reakci v těchto materiálech. Vyluhovací testy cementových malt potvrdily přítomnost pouze stopových množství chloridů, síranů a dusičnanů.

Energie potřebná pro navrhované tepelné zpracování kalu při 700 °C byla podle hodnocení životního cyklu (LCA) 220 MJ/t. Pokles spotřeby energie pro přípravu směsného pojiva tvořeného cementem a tepelně zpracovaným kalem byl téměř 10 % pro každých 10 %

náhrady cementu kalem ve srovnání s pojivem tvořeným pouze cementem. Emise skleníkových plynů během tepelného zpracování kalů byly téměř dvacetkrát nižší než při produkci portlandského cementu. Analýza nákladů ukázala podstatné ekonomické benefity spojené s aplikací kalu jako náhrady cementu. Patří mezi ně zejména náklady ušetřené za spotřebu elektrické energie a rovněž ušetřené finance za skládkování odpadního kalu.

Aplikace vybraných odpadních materiálů ve stavebnictví může představovat perspektivní řešení pro stavební průmysl jak z hlediska ekologického, tak ekonomického. Lehký beton s obsahem polypropylenových odpadů může nalézt uplatnění např. při výrobě obkladových panelů a desek, lze jej využít ve struktuře vícevrstvých podlah, jako litý beton pro izolaci podloží atd. Vzhledem k tomu, že odpadní polypropylen má velmi nízký recyklační poměr, lze v rámci zpracování odpadů vyrábět velká množství různých druhů plniv na bázi PP, která budou splňovat specifické požadavky stavebního průmyslu. Lze předpokládat, že plniva na bázi PP budou dále intenzivně studována s cílem navrhnout a vyvinout pokročilé typy kompozitních materiálů pro stavební účely. Na základě výsledků získaných při analýze dvou různých čistírenských kalů je možné konstatovat, že teplota 700 °C, použitá k tepelnému zpracování vysušených kalů, je dostatečná k jejich úpravě pro následné využití ve stavebnictví jako částečná náhrada/přídavek k portlandskému cementu pro výrobu cementových kompozitů. Tento postup umožňuje jak redukcii energetické náročnosti, tak použití méně technologicky sofistikovaných procesů ve srovnání s běžně používanými technikami tepelného zpracování kalů z ČOV. Vzhledem k velké různorodosti kalů z jednotlivých čistíren odpadních vod je pro přípravu směsných cementů s obsahem tepelně zpracovaných kalů vždy nutné analyzovat konkrétní vybraný kal, zda má pro toto využití vhodné parametry.

Literatura

- [1] MEYER, C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*. 2009, **31**(8), 601-605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509000031>
- [2] SANCHEZ SOLOAGA, Iris, Angel OSHIRO a Maria POSITIERI. The use of recycled plastic in concrete: An alternative to reduce the ecological footprint: An alternative to reduce the ecological footprint. *Revista de la construcción*. scielocl, 2014, **13**, 19-26. ISSN 0718-915X.
- [3] PAVLÍK, Z., M. ZÁLESKÁ, M. PAVLÍKOVÁ a R. ČERNÝ. Thermal and mechanical performance of cement-based composite with enhanced thermal insulation properties. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2014, (83), 251-260. DOI: 10.2495/HT140231.
- [4] LYNN, Ciarán, Ravindra DHIR, Gurmel GHATAORA a Roger WEST. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*. 2015, **98**, 767-779. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815303408>
- [5] CYR, Martin, Marie COUTAND a Pierre CLASTRES. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2007, **37**(8), 1278-1289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.003>. ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000956>
- [6] BARCHÁNEK, M. Pod lupou soudního znalce - Odpad/Neodpad. *Odpadové fórum*. 2013, (2), 26.
- [7] BARCHÁNEK, M. Pod lupou soudního znalce - Výrobky z odpadu. *Odpadové fórum*. 2013, (5), 34.
- [8] ČSN EN ISO 7346-2. *Jakost vod - Stanovení akutní letální toxicity látek pro sladkovodní ryby [Brachydanio rerio Hamilton-Buchanan (Teleostei, Cyprinidae)] - Část 2: Obnovovací metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a

státní zkušebnictví, 1999.

- [9] ČSN EN ISO 6341. *Kvalita vod - Zkouška inhibice pohyblivosti Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea) - Zkouška akutní toxicity*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [10] ČSN EN ISO 8692. *Kvalita vod - Zkouška inhibice růstu sladkovodních zelených řas*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [11] *Test inhibice růstu kořene hořčice bílé (Sinapis alba): Metodický pokyn MŽP ke stanovení ekotoxicity odpadů, Věstník MŽP*. In: . 2007, XVII, částka 4.
- [12] ČSN EN ISO 11348-1. *Jakost vod - Stanovení inhibičního účinku vzorků vod na světelnou emisi Vibrio fischeri (Zkouška na luminiscenčních bakteriích) - Část 1: Metoda s čerstvě připravenými bakteriemi*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [13] ČSN EN ISO 11348-2. *Jakost vod - Stanovení inhibičního účinku vzorků vod na světelnou emisi Vibrio fischeri (Zkouška na luminiscenčních bakteriích) - Část 2: Metoda se sušenými bakteriemi*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [14] ČSN EN ISO 11269-1. *Kvalita půdy - Stanovení účinků znečišťujících látek na půdní flóru - Část 1: Metoda měření inhibice růstu kořene*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [15] SAIKIA, Nabajyoti a Jorge DE BRITO. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review: A review. *Construction and Building Materials*. 2012, **34**, 385-401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812001432>
- [16] VÖRÖS, F. Nejnovější údaje o plastech a využití plastových odpadů. *Odpadové fórum*. 2014, (1), 10-12.
- [17] Plastics – the Facts 2016, An analysis of European plastics production, demand and waste data. In: *PlasticsEurope* [online]. b.r. [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: www.plasticseurope.org
- [18] IUCOLANO, F., B. LIGUORI, D. CAPUTO, F. COLANGELO a R. CIOFFI. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties: Effect on physical and mechanical properties. *Materials &*

- Design* (1980-2015). 2013, **52**, 916-922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>. ISSN 0261-3069. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913005591>
- [19] SHARMA, Raju a Prem BANSAL. Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. *Journal of Cleaner Production*. 2016, **112**, 473-482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>. ISSN 0959-6526. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615011324>
- [20] PlasticsEurope, Plastics – the Facts 2017, An analysis of European plastics production, demand and waste data. In: *PlasticsEurope* [online]. b.r. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: www.plasticseurope.org
- [21] ČERMÁK, J., J. JOHN a S. ŠŤASTNÍK. Možnosti využití odpadních termoplastů ve stavebnictví. *Waste Forum*. 2016, (4), 202-208.
- [22] Analysis of recovery of plastic waste in the building and construction sector (2010). In: *PlasticsEurope* [online]. b.r. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: www.plasticseurope.org
- [23] EVROPSKÁ KOMISE, . *Zelená kniha, Evropská strategie pro řešení problematiky plastového odpadu v životním prostředí*. Brussels: Evropská komise, 2013.
- [24] EVROPSKÁ UNIE - VÝBOR REGIONŮ, . *Stanovisko k Zelené knize Evropská strategie pro řešení problematiky plastového odpadu v životním prostředí: 103. Plenární zasedání ve dnech 7.–9. října 2013*. 2013.
- [25] GU, Lei a Togay OZBAKKALOGLU. Use of recycled plastics in concrete: A critical review: A critical review. *Waste Management*. 2016, **51**, 19-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16300915>
- [26] AL-SALEM, S.M., P. LETTIERI a J. BAEYENS. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review: A review. *Waste Management*. 2009, **29**(10), 2625-2643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002190>
- [27] BERARDI, U. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. Resources. *Conservation and Recycling*. 2017, (123), 230-241.

- [28] EVROPSKÁ KOMISE, . *2030 climate & energy framework* [online]. In: . Evropská komise, 2014 [cit. 2018-06-14]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- [29] MA, M., W. LIN, J. ZHANG, P. WANG, Y. ZHOU a X. LIANG. Towards energy-awareness smart building: Discover the fingerprint of your electrical appliances. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018, (14), 1458-1468. DOI: 10.1109/TII.2017.2776300. ISSN 1551-3203.
- [30] CERANIC, Boris, John BEARDMORE a Adrian COX. Rapid deployment modular building solutions and climatic adaptability: Case based study of a novel approach to “thermal capacity on demand”: Case based study of a novel approach to “thermal capacity on demand”. *Energy and Buildings*. 2018, **167**, 124-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.044>. ISSN 0378-7788. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817315529>
- [31] DA SILVA, Alexandra, Jorge DE BRITO a Rosário VEIGA. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*. 2014, **71**, 226-236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814009374>
- [32] VERDOLOTTI, Letizia, Fabio IUCOLANO, Ilaria CAPASSO, Marino LAVORGNA, Salvatore IANNACE a Barbara LIGUORI. Recycling and recovery of PE-PP-PET-based fiber polymeric wastes as aggregate replacement in lightweight mortar: Evaluation of environmental friendly application: Evaluation of environmental friendly application. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014, **33**(4), 1445-1451. DOI: 10.1002/ep.11921. ISSN 1944-7442. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1002/ep.11921>
- [33] FRATERNALI, F., V. CIANCIA, R. CHECHILE, G. RIZZANO, L. FEO a L. INCARNATO. Experimental study of thermal-mechanical properties of recycled PET fiber reinforced concrete. *Composite Structures*. 2011, **93**(9), 2368-2374. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.03.025.
- [34] OCHI, T., S. OKUBO a K. FUKUI. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2007,

29(6), 448-455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946507000273>

- [35] PELISSER, Fernando, Oscar MONTEDO, Philippe GLEIZE a Humberto ROMAN. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials Research*. sciELO, 2012, **15**, 679-686. ISSN 1516-1439.
- [36] CORINALDESI, Valeria, Jacopo DONNINI a Alessandro NARDINOCCHI. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials*. 2015, **94**, 337-345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.069>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815300829>
- [37] SAFI, Brahim, Mohammed SAIDI, Djamila ABOUTALEB a Madani MAALLEM. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties: Effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2013, **43**, 436-442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813001785>
- [38] SAIKIA, Nabajyoti a Jorge DE BRITO. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*. 2014, **52**, 236-244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813010817>
- [39] LIGUORI, Barbara, Fabio IUCOLANO, Ilaria CAPASSO, Marino LAVORGNA a Letizia VERDOLOTTI. The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars. *Materials & Design*. 2014, **57**, 578-584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.006>. ISSN 0261-3069. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691400017X>
- [40] ASOKAN, P., M. OSMANI a A.D.F. PRICE. Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. *Journal of Cleaner Production*. 2009, **17**(9), 821-829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.12.004>. ISSN 0959-6526. Dostupné také z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260800317X>

- [41] ELZAFRANEY, M., P. SOROUSHIAN a M. DERU. Development of energy-efficient concrete buildings using recycled plastic aggregates. *Journal of Architectural Engineering*. 2005, **11**(4), 122-130.
- [42] YANG, Shutong, Xiaoqiang YUE, Xiaosong LIU a Yao TONG. Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*. 2015, **84**, 444-453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.038>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815002858>
- [43] TOGAY, Ozbakkaloglu, Gu LEI a Gholampour ALIAKBAR. Short-Term Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Polypropylene Coarse Aggregates under Ambient and Elevated Temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*. American Society of Civil Engineers, 2017, **29**(10), 04017191. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002046. Dostupné také z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002046](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002046)
- [44] DISSANAYAKE, D.M.K.W., C. JAYASINGHE a M.T.R. JAYASINGHE. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. *Energy and Buildings*. 2017, **135**, 85-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.044>. ISSN 0378-7788. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816315985>
- [45] BATAYNEH, Malek, Iqbal MARIE a Ibrahim ASI. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*. 2007, **27**(12), 1870-1876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06002601>
- [46] SAIKIA, Nabajyoti a Jorge BRITO. Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research*. scielo, 2013, **16**, 341-350. ISSN 1516-1439.
- [47] ISMAIL, Zainab a Enas AL-HASHMI. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*. 2008, **28**(11), 2041-2047. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X07002784>

- [48] GONCALVES, M. a F. MARGARIDO. *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-08235-6.
- [49] LEDNICKÁ, T. *Druhy odpadních plastů z hlediska následného využití*. Brno, 2006. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [50] DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování a použití*. Praha: VŠCHT, 1995.
- [51] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [52] ZHENG, Hao, Fangxinyu ZENG, Zhengfang CHEN, Jian KANG, Jinyao CHEN, Ya CAO a Ming XIANG. Exploring the roles of molecular structure on the β -crystallization of polypropylene random copolymer. *Journal of Polymer Research*. 2017, **24**(12), 225. DOI: 10.1007/s10965-017-1358-5. ISSN 1572-8935. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s10965-017-1358-5>
- [53] *British Plastic Federation* [online]. b.r. [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://www.bpf.co.uk>
- [54] YU, Liping, Qiqiang ZHU a Jiaying YU. Development and application of expanded polypropylene foam. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013, **28**(2), 373-379. DOI: 10.1007/s11595-013-0698-1. ISSN 1993-0437. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11595-013-0698-1>
- [55] NAVRÁTILOVÁ, V. *Materiály na bázi polypropylenu v automobilovém průmyslu*. 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [56] *Akvinaservis.cz* [online]. b.r. [cit. 2014-04-8]. Dostupné z: <http://akvinaservis.cz/PPR>
- [57] MAREK, P. Výroba a aplikace expandovaného polypropylenu. *MM Průmyslové spektrum*. 2013, (1), 16.
- [58] JEONG, Young a Ki YU. Experimental Study of Thermal Conductivity of Insulation Materials Made of Expanded Polypropylene, Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer and Polyethylene. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2014, **831**, 40-43. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.831.40. ISSN 1662-8985. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/AMR.831.40>
- [59] HANWHA ADVANCED MATERIALS EUROPE, . *Hanwha Advanced Materials Europe* [online]. b.r. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.hanwhacz.cz/produkty>

- [60] PAVLÍK, Z., M. PAVLÍKOVÁ a M. ZÁLESKÁ. Properties of concrete with plastic polypropylene aggregates. PACHECO-TORGAL, F. *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*. Elsevier Ltd., 2019, s. 189-211. ISBN 978-0-08-102676-2.
- [61] DOHÁNYOS, M. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom* [online]. b.r. [cit. 2014-12-19]. Dostupné z: http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu?all_ids=1
- [62] MACNICOL, R.D. a P.H.T. BECKETT. The distribution of heavy metals between the principal components of digested sewage sludge. *Water Research*. 1989, **23**(2), 199-206. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(89\)90044-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(89)90044-4). ISSN 0043-1354. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135489900444>
- [63] MATĚJŮ, L. a M. ZIMOVÁ. Mikrobiologická problematika kalů z čistíren odpadních vod. In: HALOUSKOVÁ, O. *Rekultivační materiály*. 2000, s. 8-14. ISBN 80-7080-399-1.
- [64] GRODA, B. *Čištění odpadních vod jako nástroj k ochraně životního prostředí v zemědělské praxi a na venkově: Metodika pro Mze*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007.
- [65] SEGGIANI, Maurizia, Monica PUCCINI, Giovanni RAGGIO a Sandra VITOLO. Effect of sewage sludge content on gas quality and solid residues produced by cogasification in an updraft gasifier. *Waste Management*. 2012, **32**(10), 1826-1834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.018>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12001821>
- [66] FYTILI, D. a A. ZABANIOTOU. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, **12**(1), 116-140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>. ISSN 1364-0321. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106000827>
- [67] SMOL, Marzena, Joanna KULCZYCKA, Anna HENCLIK, Katarzyna GORAZDA a Zbigniew WZOREK. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2015, **95**, 45-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>.

ISSN 0959-6526. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261500164X>

- [68] TAMRABET, L., H. BOUZERZOU, M. KRIBAA a M. MAKHLOUF. The effect of sewage sludge application on durum wheat (*Triticum durum*). *International Journal of Agriculture and Biology*. 2009, (11), 741-745.
- [69] SIROTKOVÁ, D. a D. VOLOŠINOVÁ. *Kvalita kalů z ČOV a jejich využívání*. 18. mezinárodní vodohospodářská výstava Vodovody a kanalizace, 21-23.5.2013, Praha, 2013.
- [70] KELESSIDIS, A. a A. STASINAKIS. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*. 2012, (32), 1186-1195. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.01.012.
- [71] Statistická ročenka České republiky 2016. In: *Český statistický úřad* [online]. b.r. [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/3-zivotni-prostredi-vt3v69q7vi>
- [72] PAVLÍK, Zbyšek, Jan FOŘT, Martina ZÁLESKÁ et al. Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. *Journal of Cleaner Production*. 2016, **112**, 409-419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.072>. ISSN 0959-6526. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615012998>
- [73] EUROSTAT, . Sewage sludge production and disposal from urban wastewater. In: *Evropská komise* [online]. 2015 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00030&plugin=1>
- [74] EUROSTAT, . Water statistic. In: *Evropská komise* [online]. 2016 [cit. 2016-09-22]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_statistics
- [75] RODRÍQUEZ, N., R. GRANADOS, M. BLANCO-VARELA, J. CORTINA a S. MARTÍNEZ-RAMÍREZ. Evaluation of a lime-mediated sewage sludge stabilisation process. Product characterisation and technological validation for its use in the cement industry. *Waste Management*. 2012, (32), 550-560. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.10.021.
- [76] HONG, G., D. YANG, H. LEE, S. YANG a H.W. CHUNG. Surveillance of

waste disposal activity at sea using satellite ocean color imagers: GOCI and MODIS. *Ocean Science Journal*. 2012, (47), 387-394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12601-012-0036-0>. ISSN 1738-5261.

- [77] XU, Wei, Jingcheng XU, Jia LIU, Haoxin LI, Bo CAO, Xiangfeng HUANG a Guangming LI. The utilization of lime-dried sludge as resource for producing cement. *Journal of Cleaner Production*. 2014, **83**, 286-293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.070>. ISSN 0959-6526. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007987>
- [78] ROUSE, J. Sustainability of wastewater treatment and excess sludge handling practices in the Federated States of Micronesia. *Sustainability*. 2013, (5), 4183-4194. DOI: 10.3390/su5104183.
- [79] CHENG, W., J. ROESSLER, N. BLAISI a T. TOWNSEND. Effect of water treatment additives on lime softening residual trace chemical composition - implications for disposal and reuse. *Journal of Environmental Management*. 2014, (145), 240-248. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.004.
- [80] S., Bittencourt, Serrat B. M., Aisse M. M. a Gomes D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. *Water, Air & Soil Pollution*. 2014, (225), 2074. ISSN 0049-6979.
- [81] SORTINO, Orazio, Enzo MONTONERI, Cristina PATANÈ, Roberta ROSATO, Silvia TABASSO a Marco GINEPRO. Benefits for agriculture and the environment from urban waste. *Science of The Total Environment*. 2014, **487**, 443-451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.027>. ISSN 0048-9697. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971400521X>
- [82] KRZYWY-GAWRONSKA, E. Impact of composts with the participation of municipal sewage sludge on the content of the total forms of copper, manganese and zinc in soil. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2010, (12), 15-18. DOI: 10.2478/v10026-010-0042-x.
- [83] BARRERA-DÍAZ, Carlos, Gonzalo MARTÍNEZ-BARRERA, Osman GENCEL, Lina BERNAL-MARTÍNEZ a Witold BROSTOW. Processed wastewater sludge for improvement of mechanical properties of concretes. *Journal of Hazardous Materials*. 2011, **192**(1), 108-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.103>. ISSN 0304-3894. Dostupné také z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411005413>

- [84] PAVLÍK, Z., J. FOŘT, M. ZÁLESKÁ, M. PAVLÍKOVÁ, A. TRNÍK, J. STUDNIČKA, I. MPOUNTAS a P. KOUTSOUKOS. Preliminary analysis of possible use of dried sewage sludge in cement based composites mix design. In: *Thermophysics 2013*. Brno: University of Technology, 2013, s. 119-130.
- [85] D., Barnat-Hunek, Smarzewski P., Lagód G. a Suchorab Z. Evaluation of the contact angle of hydrophobized lightweight-aggregate concrete with sewage sludge. *Ecological Chemistry and Engineering*. 2015, (22), 625-635.
- [86] SUCHORAB, Zbigniew, Danuta BARNAT-HUNEK, Małgorzata FRANUS a Grzegorz ŁAGÓD. Mechanical and Physical Properties of Hydrophobized Lightweight Aggregate Concrete with Sewage Sludge. *Materials (Basel, Switzerland)*. MDPI, 2016, **9**(5), 317. DOI: 10.3390/ma9050317. ISSN 1996-1944. Dostupné také z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28773442>
- [87] HALLIDAY, J., M. JONES a T. DYER. Potential use of UK sewage sludge ash in cement-based concrete. *Waste Resources Management*. 2012, (165), 55-66. DOI: 10.1680/warm.2012.165.2.57.
- [88] YEN, Chi-Liang, Dyi-Hwa TSENG a Tung-Tsan LIN. Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. *Chemosphere*. 2011, **84**(2), 220-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.04.050>. ISSN 0045-6535. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653511004553>
- [89] LIN, Kae-Long a Chung-Yi LIN. Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. *Cement and Concrete Research*. 2005, **35**(10), 1999-2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.008>. ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605001675>
- [90] LIN, K.L., K.Y. CHIANG a C.Y. LIN. Hydration characteristics of waste sludge ash that is reused in eco-cement clinkers. *Cement and Concrete Research*. 2005, **35**(6), 1074-1081. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.014>. ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884605000128>
- [91] BAEZA, F., J. PAYÁ, O. GALAO, J.M. SAVAL a P. GARCÉS. Blending of

- industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*. 2014, **66**, 645-653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814005911>
- [92] PEREZ-CARRION, M., F. BAEZA-BROTOS, J. PAYÁ, J. SAVAL, E. ZOMOZA, M. BORACHERO a P. GARCÉS. Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks. *Materiales de Construcción*. 2014, (64). DOI: 10.3989/mc.2014.06312.
- [93] TANG, Chao-Wei, How-Ji CHEN, Shun-Yuan WANG a Jack SPAULDING. Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry. *Cement and Concrete Composites*. 2011, **33**(2), 292-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.008>. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946510001678>
- [94] WEI, Yu-Ling, Jing-Chiang YANG, Yong-Yang LIN, Shih-Yu CHUANG a H. WANG. Recycling of harbor sediment as lightweight aggregate. *Marine Pollution Bulletin*. 2008, **57**(6), 867-872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.03.033>. ISSN 0025-326X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X08001884>
- [95] D'ANDREA, A., C. FUSTAINO a C. TOZZO. Recycling dredged sludge in asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014, (26). DOI: 10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001085.
- [96] BAEZA-BROTOS, Francisco, Pedro GARCÉS, Jordi PAYÁ a José SAVAL. Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks. *Journal of Cleaner Production*. 2014, **82**, 112-124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.072>. ISSN 0959-6526. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261400660X>
- [97] CUSIDÓ, Joan a Lázaro CREMADES. Environmental effects of using clay bricks produced with sewage sludge: Leachability and toxicity studies: Leachability and toxicity studies. *Waste Management*. 2012, **32**(6), 1202-1208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.024>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11005940>

- [98] BORIES, Cecile, Marie-Elisabeth BORREDON, Emeline VEDRENNE a Gerard VILAREM. Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review: A review. *Journal of Environmental Management*. 2014, **143**, 186-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.006>. ISSN 0301-4797. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714002461>
- [99] SZÓKE, A., M. MUNTEAN, O. DUMITRESCU a S. MESZAROS. Studies on building ceramics manufacturing by incorporating dried sludge. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2014, (13), 15-20. DOI: 10.30638/eemj.2014.003.
- [100] DENG-FONG, Lin a Weng CHIH-HUANG. Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material. *Journal of Environmental Engineering*. American Society of Civil Engineers, 2001, **127**(10), 922-927. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:10(922). Dostupné také z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2001\)127:10\(922\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2001)127:10(922))
- [101] TANTAWY, M., A. EL-ROUDI, E. ABDALLA a M. ABDELZAHER. Fire resistance of sewage sludge ash blended cement pastes. *Journal of Engineering*. 2013, (2013). DOI: 10.1155/2013/361582.
- [102] SOLIMENE, R., M. URCIUOLO, A. CAMMAROTA, R. CHIRONE, P. SALATINO, G. DAMONTE, C. DONATI a G. PUGLISI. Devolatilization and ash comminution of two different sewage sludges under fluidized bed combustion conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010, **34**(3), 387-395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.10.033>. ISSN 0894-1777. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177709001782>
- [103] URCIUOLO, M., R. SOLIMENE, R. CHIRONE a P. SALATINO. Fluidized bed combustion and fragmentation of wet sewage sludge. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012, **43**, 97-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.019>. ISSN 0894-1777. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177712000866>
- [104] DONATELLO, Shane a Christopher CHEESEMAN. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review: A review. *Waste Management*. 2013, **33**(11), 2328-2340. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.024>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002559>

- [105] JENÍČEK, P. Spalování kalů: přednáška VŠCHT. In: *Web.vscht.cz* [online]. b.r. [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~jenicekp/Kalov%C3%A9%20hospod%C3%A1%C5%99stv%C3%AD/2010>
- [106] ŠTASTA, P. *Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva*. Brno, 2009. Disertační práce. Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústav procesního a ekologického inženýrství.
- [107] PAVLAS, M., M. MAREŠ, V. UCEKAJ, J. ORAL a P. STEHLÍK. *Optimální nastavení výše podpory výroby elektřiny z odpadu ve vztahu k ceně elektřiny pro spotřebitele*. Brno: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2011.
- [108] LEITNER, P. Energetické využívání kalů či termická degradace čistírenských kalů, první praktické zkušenosti v ČR. In: *Enviweb* [online]. b.r. [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/covky/80184/energeticke-vyuzivani-kalu-ci-termicka-degradace-cistirenskych-kalu-prvni-prakticke-zkusenosti-v-cr>
- [109] MURAKAMI, Takahiro, Yoshizo SUZUKI, Hidekazu NAGASAWA, Takafumi YAMAMOTO, Takami KOSEKI, Hitoshi HIROSE a Seiichiro OKAMOTO. Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery. *Fuel Processing Technology*. 2009, **90**(6), 778-783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.03.003>. ISSN 0378-3820. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382009000551>
- [110] BABU, K.Ganesh a D.Saradhi BABU. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*. 2003, **33**(5), 755-762. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01055-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01055-4). ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602010554>
- [111] FROST, R., M. WEIER a K. ERICKSON. Thermal decomposition of struvite – implications for the decomposition of kidney stones. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Kluwer Academic Publishers, 2004, (76), 1025-1033. DOI: 10.1023/B:JTAN.0000032287.08535.b3. ISSN 1572-8943.
- [112] ČSN EN 196-5. *Metody zkoušení cementu - Část 5: Zkoušení pucolanity*

pucolánových cementů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

- [113] NF P 18-513. *Pozzolanitic Addition For Concrete - Metakaolin. Definitions, Specifications and Conformity Criteria. Annex A*. La Plaine Saint-Denis: Association Française de Normalisation, 2009.
- [114] ČSN EN 12457-2. *Charakterizace odpadů - Vyluhování - Ověřovací zkouška vyluhovatelnosti zrnitých odpadů a kalů - Část 2: Jednostupňová vsádková zkouška při poměru kapalné a pevné fáze 10 l/kg pro materiály se zrnitostí menší než 4 mm (bez zmenšení velikosti částic, nebo s ním)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [115] ČSN EN 14346. *Charakterizace odpadů - Výpočet sušiny stanovením podílu sušiny nebo obsahu vody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [116] MAGDZIARZ, Aneta a Sebastian WERLE. Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS. *Waste Management*. 2014, **34**(1), 174-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.033>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13005199>
- [117] MÜLLER-HAGEDORN, M., H. BOCKHORN, L. KREBS a U. MÜLLER. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2003, **68-69**, 231-249. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00065-2). ISSN 0165-2370. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237003000652>
- [118] GRØNLI, M., G. VÁRHEGYI a C. BLASI. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002, (41), 4201-4208. DOI: 10.1021/ie0201157.
- [119] JINDAROM, Charothon, Vissanu MEEYOO, Thirasak RIRKSOMBOON a Pramoch RANGSUNVIGIT. Thermochemical decomposition of sewage sludge in CO₂ and N₂ atmosphere. *Chemosphere*. 2007, **67**(8), 1477-1484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.066>. ISSN 0045-6535. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653506018133>
- [120] ZÁLESKÁ, Martina, Zbyšek PAVLÍK, Milena PAVLÍKOVÁ et al. Biomass ash-

based mineral admixture prepared from municipal sewage sludge and its application in cement composites. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2018, **20**(1), 159-171. DOI: 10.1007/s10098-017-1465-3. ISSN 1618-9558. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1465-3>

- [121] ČSN EN 15169. *Charakterizace odpadů - Stanovení ztráty žháním v odpadech, kalech a sedimentech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.
- [122] ČSN EN 196-6. *Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [123] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [124] *Mapei* [online]. b.r. [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: <http://www.mapei.com/cz-cs>
- [125] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [126] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [127] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [128] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [129] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [130] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [131] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní

zkušebnictví, 2012.

- [132] ČSN EN 933-2. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 2: Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997.
- [133] ČSN EN ISO 12572. *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlastností prostupu vodní páry - Misková metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [134] DONATELLO, S., M. TYRER a C.R. CHEESEMAN. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010, **32**(2), 121-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509001644>
- [135] RAVERDY, M., F. BRIVOT, A. PAILLÈRE a R. DRON. *Appreciation de l'activite pouzzolanique dos constituents secondaires: 7th International Congress on the Chemistry of Cement*. Paris, 1980.
- [136] RAHMANI, E., M. DEHESTANI, M.H.A. BEYGI, H. ALLAHYARI a I.M. NIKBIN. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*. 2013, **47**, 1302-1308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181300559X>
- [137] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [138] RUIZ-HERRERO, José, Daniel VELASCO NIETO, Alberto LÓPEZ-GIL et al. Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Construction and Building Materials*. 2016, **104**, 298-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306784>
- [139] MARZOUK, O., R.M. DHEILLY a M. QUENEUDEC. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*. 2007, **27**(2), 310-318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>. ISSN 0956-053X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06001048>

- [140] ETCHEVERRY, M. a S. BARBOSA. Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement. *Materials*. 2012, (5), 1084-1113. DOI: 10.3390/ma5061084.
- [141] Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů. *Tzb Info* [online]. b.r. [cit. 2019-09-11]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>
- [142] COLANGELO, F., G. DE LUCA, C. FERONE a A. MAURO. Experimental and numerical analysis of thermal and hygrometric characteristics of building structures employing recycled plastic aggregates and geopolymer concrete. *Energies*. 2013, 6(11), 6077-6101. DOI: 10.3390/en6116077.
- [143] LIGUORI, B. a F. IUCOLANO. Recycled plastic aggregates in manufacturing of insulating mortars. *CSE Journal - City Safety Energy*. 2014, (1), 93-99. DOI: 10.12896/cse2014001009. ISSN 2283-8767.
- [144] BROOKS, Adam, Hongyu ZHOU a Dominic HANNA. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2018, 159, 316-328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.102>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817321566>
- [145] TANG, W.C., Y. LO a A. NADEEM. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2008, 30(5), 403-409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002>. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946508000115>
- [146] WANG, Ru a Christian MEYER. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*. 2012, 34(9), 975-981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014>. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512001412>
- [147] RODRÍGUEZ, O., L. KACIMI, A. LÓPEZ-DELGADO, M. FRÍAS a A. GUERRERO. Characterization of Algerian reservoir sludges for use as active additions in cement: New pozzolans for eco-cement manufacture: New pozzolans for eco-cement manufacture. *Construction and Building Materials*. 2013, 40, 275-279.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.10.016>. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181200801X>

- [148] CHANG, Yu-Min, Lee-Kuo LIN a Tien-Chin CHANG. A preliminary assessment on reuse of flyash emitted from fluidized bed incineration of sludge cake. *Resources, Conservation and Recycling*. 1997, **20**(4), 245-266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00019-0). ISSN 0921-3449. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344997000190>
- [149] KEPPERT, M., Z. PAVLÍK, V. TYDLITÁT, P. VOLFOVÁ, S. ŠVARCOVÁ, M. ŠYC a R. ČERNÝ. Properties of municipal solid waste incineration ashes with respect to their separation temperature. *Waste Management Research*. 2012, (30), 1041-1048. DOI: 10.1177/0734242X12448513.
- [150] RASHEEDUZZAFAR, S., S. HUSSAIN a S. AL-SAADOUN. Influence of Cement Composition on Concrete Durability. *ACI Materials Journal*. 1992, **89**(6). DOI: 10.14359/4033.
- [151] JOSA, Alejandro, Antonio AGUADO, Arnaldo CARDIM a Ewan BYARS. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement and Concrete Research*. 2007, **37**(5), 781-788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.004>. ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000464>
- [152] BOESCH, M. a S. HELLWEG. Model cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production. *Environmental Science & Technology*. 2010, (43), 7578-7583.
- [153] EUROSTAT, . *Half Yearly Electricity and Gas Prices* [online]. In: . Brussels, 2015 [cit. 2016-08-23]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/methodology/prices>

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení plastů na trhu v EU28+Norsko+Švýcarsko podle typu, rok 2015 [20]	11
Obr. 2: PP odpad z podlahových desek a automobilových nárazníků [42].....	18
Obr. 3: PP odpad [43].....	18
Obr. 4: Způsoby nakládání s kaly z ČOV v ČR roce 2015 [71].....	31
Obr. 5: Nakládání s kaly z ČOV v EU-15 mezi lety 1992-2005 [70]	32
Obr. 6: Nakládání s kaly z ČOV v jednotlivých zemích EU v roce 2012. Procenta u jednotlivých typů nakládání jsou založena na celkovém množství kalu v jednotlivých státech [74]	32
Obr. 7: Testované polypropylenové odpady: a) drcený PP-R, b) drcený PP-GF, c) regranulovaný PP-Reg	39
Obr. 8: Sítová analýza plastových odpadů PP-R, PP-GF a PP-Reg.....	42
Obr. 9: Odpadní EPP drcený	43
Obr. 10: Sítová analýza plastového odpadu EPP	44
Obr. 11: EPP částice, optický mikroskop.....	44
Obr. 12: Sítová analýza vysušeného řeckého kalu z ČOV.....	46
Obr. 13: Morfologie vysušeného řeckého kalu z ČOV získaná pomocí SEM.....	47
Obr. 14: TGA a DTG křivky, teplotní spád 5 °C/min.....	48
Obr. 15: Vypálený řecký kal	48
Obr. 16: Distribuce velikosti částic vypáleného mletého řeckého kalu v porovnání s cementem CEM I 42,5 R	49
Obr. 17: Pucolánová aktivita vypáleného řeckého kalu dle testu Frattini.....	50
Obr. 18: Morfologie vysušeného polského kalu z ČOV získaná pomocí SEM.....	53
Obr. 19: DTG křivka, teplotní spád 5 °C/min.....	54
Obr. 20: TGA křivka, teplotní spád 5 °C/min.....	54
Obr. 21: Distribuce velikosti částic vypáleného mletého polského kalu v porovnání s cementem CEM I 42,5 R	55
Obr. 22: Morfologie vypáleného polského kalu získaná pomocí SEM	59
Obr. 23: Pucolánová aktivita polského kalu dle testu Frattini	60
Obr. 24: Distribuce velikosti částic portlandského cementu – distribuční křivka	61
Obr. 25: Distribuce velikosti částic portlandského cementu – kumulativní křivka	62
Obr. 26: Sítová analýza písku	63

Obr. 27: Distribuce velikosti částic – Silika VP4 v porovnání s cementem CEM I 42,5 R – distribuční křivka.....	64
Obr. 28: Distribuce velikosti částic – Silika VP4 v porovnání s cementem – kumulativní křivka.....	65
Obr. 29: Morfologie Siliky VP4 získaná pomocí SEM a mapa prvků obdržena EDS analýzou	66
Obr. 30: Zleva – Trámeček s referenční záměsí a trámečky s náhradou písku 10–50 hmotnostních % PP-R	70
Obr. 31: Referenční vzorek (vlevo) a vzorek s obsahem EPP	70
Obr. 32: Vzorky cementové pasty s náhradou cementu vypáleným mletým řeckým kalem 60 % hmotnostních.....	71
Obr. 33: Vzorky cementových past s náhradou cementu vypáleným a mletým řeckým kalem, připravené na měření hustoty matrice; zprava: referenční vzorek, náhrada 10, 20, 30 a 60 % hmotnostních	71
Obr. 34: Vzorky cementových kompozitů s přídavkem vypáleného a mletého polského kalu; zleva referenční vzorek, 10 - 30 % hmotnostních náhrada cementu kalem	71
Obr. 35: Zkušební lis pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu	72
Obr. 36: Zkušební lis pro zkoušku pevnosti v tlaku.....	73
Obr. 37: Ukázka měření na ultrazvukovém impulsním přístroji DIO 562.....	74
Obr. 38: Rozlivový stolek	75
Obr. 39: Automatický héliový pyknometr Pycnomatic ATC	76
Obr. 40: Analyzátor distribuce velikosti částic Analysette 22 Micro Tec plus (Fritsch).....	77
Obr. 41: Rtuťové porozimetry Pascal 140 a Pascal 440 (Thermo Scientific).....	78
Obr. 42: ISOMET 2114 (Applied Precision s.r.o.) s plošnou sondou.....	79
Obr. 43: Přístroj Labsys Evo (Setaram)	80
Obr. 44: Klimatická komora se vzorky pro měření transportu vodní páry	82
Obr. 45: Přístroj DVS – Advantage 2 device pro měření sorpčních izoterem	84
Obr. 46: EDXRF Spektrofotometr ARL Quant´X	86
Obr. 47: XRD difraktometr	87
Obr. 48: Vývoj objemové hmotnosti jako funkce obsahu PP odpadů	90
Obr. 49: Vliv obsahu plastových PP odpadů na pórovitost testovaných kompozitů	91
Obr. 50: Pevnost v tlaku cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg	93
Obr. 51: Pevnost v tahu za ohybu cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg	93

Obr. 52: Dynamický modul pružnosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg	94
Obr. 53: Součinitel tepelné vodivosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg, měření v suchém stavu.....	96
Obr. 54: Objemová tepelná kapacita cementových kompozitů obsahujících PP-R, PP-GF a PP-Reg.....	97
Obr. 55: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s PP-R v závislosti na obsahu vlhkosti.....	99
Obr. 56: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s PP-GF v závislosti na obsahu vlhkosti.....	99
Obr. 57: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s PP-Reg v závislosti na obsahu vlhkosti.....	100
Obr. 58: Závislost součinitele tepelné vodivosti cementových kompozitů s PP-R v suchém stavu: a) na pórovitosti, b) na objemové hmotnosti	100
Obr. 59: Závislost součinitele tepelné vodivosti cementových kompozitů s PP-GF v suchém stavu: a) na pórovitosti, b) na objemové hmotnosti	101
Obr. 60: Závislost součinitele tepelné vodivosti cementových kompozitů s PP-Reg v suchém stavu: a) na pórovitosti, b) na objemové hmotnosti	101
Obr. 61: Závislost faktoru difúzního odporu měřeného miskovou metodou v uspořádání dry-cup a wet-cup na obsahu plastu.....	107
Obr. 62: Sorpční izotermy lehkých betonů s obsahem PP-R	108
Obr. 63: Sorpční izotermy lehkých betonů s obsahem PP-GF.....	109
Obr. 64: Sorpční izotermy lehkých betonů s obsahem PP-Reg	109
Obr. 65: Snímky z optického mikroskopu při zvětšení 55x; lehké betony s náhradou písku 10 %: a) PP-R, b) PP-GF, c) PP-Reg	110
Obr. 66: SEM snímek lehkého betonu s náhradou písku 10 % PP-R	110
Obr. 67: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s EPP v závislosti na obsahu vlhkosti.....	114
Obr. 68: Sorpční izotermy cementových kompozitů s obsahem EPP.....	117
Obr. 69: Sorpční a desorpční izotermy cementových kompozitů s obsahem EPP, 28 dní	118
Obr. 70: Lehký beton s obsahem EPP, optický mikroskop.....	118
Obr. 71: SEM snímek lehkého betonu s obsahem EPP.....	119
Obr. 72: SEM snímek a příslušné EDS prvkové mapy lehkého betonu s obsahem EPP.....	119

Obr. 73: Frekvenční křivky distribuce velikosti pórů cementových past s obsahem vypáleného řeckého kalu	121
Obr. 74: Závislost pevnosti v tlaku na pórovitosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV	122
Obr. 75: Závislost pevnosti v tahu za ohybu na pórovitosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV.....	123
Obr. 76: Frekvenční křivky distribuce velikosti pórů cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV, 28 a 90 dní	126
Obr. 77: XRD spektra testovaných cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV po 28 dnech, Q – křemen, P – Portlandit, C – Kalcit, CS – Kalcium silikát, H – Hatrurit	128
Obr. 78: DSC analýza cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu – 28 dní	129
Obr. 79: TG analýza cementových kompozitů s obsahem vypáleného polského kalu – 28 dní	129
Obr. 80: Porovnání pevnosti v tlaku, spotřeby elektrické energie a emisí skleníkových plynů (GHG) odpovídající zkoumaným částečným náhradám cementu kalem.....	132
Obr. 81: Porovnání pevnosti v tlaku a nákladů na elektřinu a plyn odpovídající zkoumaným částečným náhradám cementu kalem	133

Seznam tabulek

Tab. 1: Tabulka č. 10.1 (vyhláška č. 294/2005 Sb.): Limitní koncentrace škodlivin v sušině odpadů	9
Tab. 2: Tabulka č. 10.2 (vyhláška č. 294/2005 Sb.): Požadavky na výsledky ekotoxikologických testů.....	9
Tab. 3: Tabulka č. 10.4 (vyhláška č. 294/2005 Sb.): Požadavky na výsledky ekotoxikologických testů.....	10
Tab. 4: Podíl jednotlivých plastů v odpadech v roce 2010 [22].....	12
Tab. 5: Podíl jednotlivých plastů ve stavebních odpadech [22].....	12
Tab. 6: Podíly odpadních plastů z jednotlivých aplikací ve stavebnictví [22].....	12
Tab. 7: Přehled produkce plastových odpadů v České republice v roce 2015 dle ISOH.....	13
Tab. 8: Nakládání s odpadními plasty v EU28+Norsko+Švýcarsko v letech 2006–2014 [17]	15
Tab. 9: Množství plastů podle jednotlivých typů v komunálním odpadu v USA v roce 2012 [25]	15
Tab. 10: Fyzikální vlastnosti polypropylenu [50; 51]	21
Tab. 11: Klasifikace odpadních polypropylenových částic jako plniva do cementových kompozitů [60]	24
Tab. 12: Limitní hodnoty koncentrací těžkých kovů v kalech používaných v zemědělství dle směrnice 86/278/EEC a vyhlášky č. 437/2016 Sb.	26
Tab. 13: Hlavní složky kalu z čistíren odpadních vod	27
Tab. 14: Produkce kalů z ČOV v České republice v letech 2009-2012.....	28
Tab. 15: Produkce kalů z ČOV v jednotlivých evropských zemích v letech 2003-2007, produkce kalů vztažená na ekvivalentního obyvatele (EO) a produkce kalů vztažená na ekvivalentního obyvatele napojeného na ČOV (EOČ) [70].....	29
Tab. 16: Hustota matrice PP odpadů.....	40
Tab. 17: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti PP-R v závislosti na zhutnění	41
Tab. 18: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti PP-GF v závislosti na zhutnění	41
Tab. 19: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti PP-Reg v závislosti na zhutnění	41
Tab. 20: Sypná hmotnost a tepelné vlastnosti EPP v závislosti na zhutnění	43
Tab. 21: Chemické složení vysušeného řeckého kalu z ČOV – hlavní oxidy.....	45
Tab. 22: Koncentrace těžkých kovů ve vysušeném řeckém kalu z ČOV v porovnání s limity vyhlášky č. 437/2016 Sb.	46

Tab. 23: Chemické složení vypáleného řeckého kalu – hlavní oxidy	49
Tab. 24: Kvantitativní XRD analýza vypáleného řeckého kalu.....	51
Tab. 25: Obsah vyluhovatelných solí vysušeného a vypáleného řeckého kalu.....	51
Tab. 26: Chemické složení vysušeného polského kalu – hlavní oxidy	52
Tab. 27: Kvantitativní XRD analýza vysušeného polského kalu.....	53
Tab. 28: Chemické složení vypáleného polského kalu – hlavní oxidy	56
Tab. 29: Koncentrace těžkých kovů ve vypáleném mletém polském kalu z ČOV v porovnání s limity vyhlášky č. 437/2016 Sb.	57
Tab. 30: Kvantitativní XRD analýza vypáleného polského kalu	57
Tab. 31: Obsah vyluhovatelných solí vysušeného a vypáleného polského kalu.....	60
Tab. 32: Chemické složení portlandského cementu CEM I 42,5 R, hm. %.....	61
Tab. 33: Sypná hmotnost písku a jeho tepelné vlastnosti v závislosti na zhutnění.....	63
Tab. 34: Chemické složení Siliky VP4, hm. %.....	64
Tab. 35: Technické údaje superplastifikátoru Dynamon SX 45	66
Tab. 36: Složení testovaných kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg	67
Tab. 37: Složení testovaného kompozitu s obsahem EPP.....	68
Tab. 38: Složení testovaných cementových past s obsahem vypáleného mletého řeckého kalu	68
Tab. 39: Složení testovaných kompozitů s obsahem vypáleného mletého polského kalu.....	69
Tab. 40: Přesnost měření přístroje ISOMET 2114 (Applied Precision s.r.o.)	80
Tab. 41: Výsledky zkoušky rozlitém pro kompozity s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg.....	88
Tab. 42: Základní fyzikální vlastnosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg	89
Tab. 43: Mechanické vlastnosti cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg.....	92
Tab. 44: Tepelné vlastnosti cementových kompozitů obsahujících PP-R, PP-GF a PP-Reg, měření v suchém stavu	95
Tab. 45: Součinitel tepelné vodivosti cementových kompozitů obsahujících PP-R, PP-GF a PP-Reg v závislosti na obsahu vlhkosti.....	98
Tab. 46: Součinitel tepelné vodivosti a vypočtené tepelně-technické vlastnosti pro konstrukci podlahy (0,1 m) z lehkého betonu s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg.....	103
Tab. 47: Transport kapalné vlhkosti u cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg	104
Tab. 48: Transport plynné vlhkosti u cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg – dry-cup	105

Tab. 49: Transport plynné vlhkosti u cementových kompozitů s obsahem PP-R, PP-GF a PP-Reg – wet-cup.....	106
Tab. 50: Výsledky zkoušky rozlitím pro testovaný kompozit s obsahem EPP.....	111
Tab. 51: Základní fyzikální vlastnosti cementového kompozitu s obsahem EPP.....	111
Tab. 52: Mechanické vlastnosti cementového kompozitu s obsahem EPP.....	112
Tab. 53: Tepelné vlastnosti cementového kompozitu s obsahem EPP v suchém stavu.....	113
Tab. 54: Součinitel tepelné vodivosti cementového kompozitu s EPP v závislosti na obsahu vlhkosti.....	114
Tab. 55: Součinitel tepelné vodivosti a vypočtené tepelně-technické vlastnosti pro konstrukci podlahy (0,1 m) z lehkého betonu obsahujícího EPP.....	115
Tab. 56: Transport kapalně vlhkosti u cementového kompozitu s EPP.....	115
Tab. 57: Transport plynné vlhkosti u cementového kompozitu s EPP – dry-cup.....	116
Tab. 58: Transport plynné vlhkosti u cementového kompozitu s EPP – wet-cup	116
Tab. 59: Základní fyzikální vlastnosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV.....	120
Tab. 60: Mechanické vlastnosti cementové pasty s obsahem vypáleného řeckého kalu z ČOV	121
Tab. 61: Obsah vyluhovatelných solí v cementových pastách s vypáleným řeckým kalem z ČOV	123
Tab. 62: Výsledky zkoušky rozlitím pro kompozity s obsahem polského kalu.....	124
Tab. 63: Základní fyzikální vlastnosti cementového kompozitu s obsahem vypáleného polského kalu z ČOV	125
Tab. 64: Mechanické vlastnosti cementového kompozitu s vypáleným polským kalem z ČOV	126
Tab. 65: Relativní změny hmotnosti korespondující s rozkladem portlanditu a obsah portlanditu	130
Tab. 66: Obsah vyluhovatelných solí v cementových kompozitech s vypáleným polským kalem z ČOV – 28 dní.....	130
Tab. 67: Distribuce zdrojů energie [72]	132