

CHARAKTERISTIKA FILERŮ A JEJICH POUŽITÍ DO BETONU

Luboš Musil, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
lubos.musil@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek popisuje jednotlivé druhy filerů vzniklé z přírodního kamene. Filery dělí dle druhu horniny a způsobu zpracování. Podrobně zkoumá například chemické složení (EDS), pucolánovou aktivitu (Chapelleho test), velikost a tvar zrn (SEM). V článku jsou porovnány vlastní výsledky filerů a jejich vliv na betonový kompozit s celosvětovým výzkumem. Studie byla zaměřena především na žulový filer, který není v současné době tolik prozkoumán. Dle vlastního výzkumu a porovnání je žulový filer jednou z nejlepších přísad tohoto druhu z hlediska čerstvého i ztvrdlého cementového kompozitu. Výzkum zároveň ukazuje možnou aktivaci žulového fileru (přibližně o 50%) pro ještě vhodnější použití do betonu. Cílem článku je lépe zařadit vzniklé filery, maximalizovat jejich využití a navrhnout efektivní směs cementových kompozit.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přírodní filler • Beton • Žulový filler • Charakteristika filleru

ABSTRACT

The article describes individual types of fillers made of natural stone. Fillers are divided according to the type of rock and the processing method. It examines in detail, for example, the chemical composition (EDS), pozzolanic activity (Chapelle test), size and shape of grains (SEM). The article compares the actual results of fillers and their influence on concrete composites with worldwide research. The study focused mainly on granite filler, which is not currently so much explored. According to our own research and comparison, granite filler is one of the best admixtures of this kind in terms of fresh and hardened cement composite. Research also shows the possible activation of granite filler (approximately 50%) for even more suitable use in concrete. The aim of the article is to better classify the resulting fillers, maximize their use and design an effective mixture of cement composites.

KEYWORDS

Natural Filler • Concrete • Granite Filler • Characteristics of Filler

1. ÚVOD

V dnešní době je zkoumáno mnoho druhů filerů. Základním důvodem je úspora cementu v kompozitech. Snižuje se tak cena i energetická náročnost výroby betonu. Mnohé filery jsou zároveň druhotnou nebo odpadní surovinou a jejich zpracováním zaniká problém se skládkováním. Obecně jsou filery používány do cementových kompozit jako inertní přísady. Uvažuje se, že jsou chemicky neaktivní a do betonu se přidávají především za účelem zlepšení zpracovatelnosti, zvýšení podílu jemné cementové matrice, změny barvy kompozitu, atd. [1]. Dle výzkumů mohou mít pozitivní dopad i na další vlastnosti ztvrdlých kompozit. Například nejen na propustnost a pórovitost, ale i na pevnostní charakteristiky. Výsledné charakteristiky kompozit jsou velice závislé na použitém fileru. Je mnoho výzkumů zdánlivě stejných filerů, které se vzájemně vyvracejí. Proto je důležitou součástí výzkumu (návrhu kompozita) podrobná charakteristika fileru. Nejen tedy základní vlastnosti (objemová hmotnost, zrnitost, obsah chloridů, síranů, čistota fileru) jak požaduje například norma ČSN EN 12620+A1 [2], ale také podrobné chemické složení (případně mineralogické složení), tvar zrn, měrný povrch, atd. Základní rozdělení filerů je dle původu materiálu. Mohou to být uměle vyrobené materiály (cihelný, keramický střepek, betonové recykláty [3]) nebo přírodní suroviny. V tomto článku jsou popsány filery vzniklé z přírodních surovin – hornin. Filery můžeme dělit dle jednotlivých hornin, což má podstatný vliv na jejich charakteristiku. Kromě nejdůležitějšího rozdílu, chemického složení, má druh horniny také zásadní vliv na lom a štěpnost materiálu a tím pádem i na tvar jednotlivých zrn. Samostatný vznik fileru lze také rozdělit do základních skupin. Primární vznik, kdy je filer požadovaným produktem a vyrábí se mikromletím. Sekundárně, kdy filer vzniká jako druhotná (odpadní) surovina. Sekundárně vzniklý filer lze rozdělit například dle způsobu zpracování horniny. Horninu můžeme drtit na kamenivo a vznikají tzv. odprašky. Dále lze horninu zpracovávat a upravovat pod vodou například na dekorativní kamen. Při tomto procesu vzniká kal, obsahující filer a je ho nutné vysušit. Z tohoto rozdělení je patrné, že existuje velké množství filerů. Každý má specifické charakteristiky a tudíž jiný vliv v cementových kompozitech.

* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

Zřejmě nejvíce fileru vzniká při opracování horniny na deko- rační kámen. Dle některých výzkumů je z vytěžených horniny až 58% odpadem, z čehož 18% tvoří odpad (kal) vzniklý při leš- tění [4]. Jiné výzkumy ukazují, že vznik kalu při řezání bloků je v rozmezí 20 – 30 % horniny [5]. Tyto hodnoty jsou velmi individuální, jelikož závisí na způsobu těžby horniny a výsled- ném produktu. Zároveň z daných hodnot vyplývá, že při těžbě a úpravě bloků na deko- rační kámen vzniká značné množství odpadních surovin, které jsou z velké části tvořeny filerem. S tímto problémem souvisí i skládkování vzniklých odpadů. Z důvodů velkého vzniku odpadních surovin a problémem s jejich skládkováním je vhodné tyto suroviny využít jako zdroj druhotného materiálu – v tomto případě fileru do cemen- tových kompozit. Pro optimální návrh kompozitu je ale důle- žité znát vlastnosti fileru, které mohou být velice odlišné. Člá- nek proto upozorňuje na podrobnější rozdělní a charakteristiku filerů (například než udává norma ČSN), což má podstatný vliv na použití do cementových kompozit.

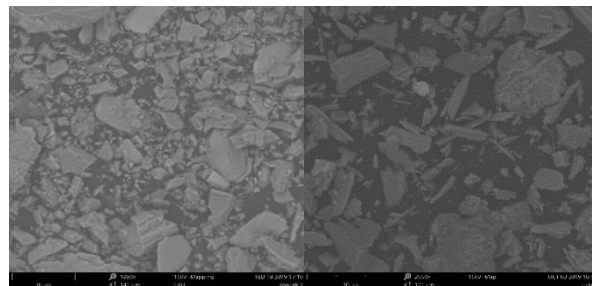
V článku jsou porovnány nejprve filery ze základních hornin. Jelikož může vznikat velmi mnoho druhů filerů, podrobněji se zaměřuje článek pouze na žulový kal vzniklý při mokřím opra- cování kamene (řezání, broušení, leštění). Tento materiál byl vybrán, jelikož není podrobněji zkoumán jako ostatní filery na- příklad z mramoru nebo vápence. Základní výzkumy žulového prachu na vliv cementových kompozit, které byly provedeny, jsou často ve vzájemném rozporu. Článek proto upozorňuje na podrobnější rozdělní a charakteristiku filerů, což má podstatný vliv na cementový kompozit.

2. METODY

Mezi zkoumané materiály byl zařazen žulový a mramorový filer, jelikož jsou to nejčastější horniny používané jako deko- rační kámen, u kterého vzniká velké množství odpadu při opra- cování. Dále byla porovnávaná vápencová moučka, která je nejčastěji využívaná do samozhutnitelných betonů. Ostatní filery byly zvoleny s ohledem na těžbu kameniva v České republice – rula, amfibolit. Podrobněji je zkoumán žulový prach, u kterého bylo provedeno více vlastních výzkumů. Výsledky byly porovnány s českým, ale i celosvětovým výzkumem.

Mezi základní vlastnosti fileru patří granulometrie. Nejprve proběhla zkouška měrné hmotnosti pomocí pyknonetru. V zá- vislosti na této hodnotě byl určen měrný povrch. Samostatná zkouška měrného povrchu proběhla permeabilní metodou po- mocí Blainova přístroje. Dále byla zkoumaná velikost a distri- buce částic. U vlastního výzkumu byly výsledky odečteny z křivky zrnitosti. Křivka zrnitosti je většinou měřena na pro- sévacích sítích. Dle evropských norem by měla být zkouška zrnitosti fileru jako kameniva proséváním proudem vzduchu (ČSN EN 933-10) [2]. Ideálním řešením stanovení křivky zr- nitosti, jak bylo zde provedeno u žulového prachu, je metoda laserovou difrakcí, která dává přesnější a podrobnější hodnoty. Lze navíc určit základní statistické údaje jako je modus, me- dian, aritmetický průměr zrna nebo směrodatná odchylka. Vět- šina dohledaných výzkumů ale uvádí pouze maximální nebo průměrné zrna kameniva. Poslední, ale neméně důležitou vlastností je tvar zrn. Tato zkouška se také často neprovádí. Tvar zrn fileru má podstatný vliv především na čerstvou směs

(reologii, zpracování) i na zatvrdlý kompozit. Zkoušky probí- haly pomocí softwaru na snímcích pořízených elektronovým mikroskopem (Obrázek 1). V článku je pomocí softwaru zkou- mán prach ze žuly a amfibolitu. Zkoušky proběhly na více než 10 vzorcích a vždy byl uveden počet zkoumaných částic. Byl měřen ekvivalentní průměr zrna, poměr stran, kruhovitost.



Obrázek 1: SEM žulový prach (vlevo), amfibolitový prach (vpravo)

Klíčový rozdíl při použití fileru do cementových kompozit je jejich chemické složení a reaktivita při tvrdnutí kompozita. Proto byla provedena na vzorcích plošná EDS (Energy Dis- persive Spectroscopy) analýza. Bylo zkoušeno více vzorků žuly a vzorek amfibolitu. Výsledky byly porovnány s ostat- ními výzkumy, tudíž je vidět rozsah možného chemického slo- žení jedné horniny v různých lomech. Jelikož bylo zkoumáno více vzorků žuly z jednoho lomu a současně z více míst od- běru, je vidět, jak se mění chemické složení i v rámci jednoho lomu. Pro ukázání chemické aktivity fileru v cementovém kompozitu byla provedena zkouška pucolánové aktivity. Tato zkouška je obvyklá pro chemicky aktivní příměsi do betonu, jako je popílek, metakaolin, mikrosilika aj. Jelikož je filer uva- žován pouze jako inertní materiál, tato zkouška (především přímá pucolánová aktivita) se u něj běžně neprovádí. Pro po- rovnání jednotlivých filerů je vhodné zkoušku do výzkumu za- řadit. Existuje několik druhů zkoušek přímé pucolánové akti- vity. Zde byl použit modifikovaný Chapelleho test. Metoda je založena na schopnosti pucolánu slučovat se s CaO. Výsledek Chapelleho testu je vyjádřen jako množství Ca(OH)₂ v mg vá- zaného na 1 g pucolánu. Materiál je považován za pucolánově aktivní, pokud je výsledek testu nejméně 650 mg Ca(OH)₂ g⁻¹ [3],[6]. Zkoušky byly provedeny na odprašcích z lomu České republiky (amfibolit), žulovém kalu a jeho tepelnou úpravou při 800°C s výdrží 2 hodiny. U mramoru a vápence nemá tato zkouška smysl, jelikož neobsahují SiO₂.

3. VÝSLEDKY

Byly provedeny vlastní zkoušky, které byly částečně porov- nány s ostatními výzkumy. Mezi prvními charakteristikami je měrný povrch. Ten lze současně porovnat s hodnotou cementu, která je přibližně známá nebo zapsaná v technickém listě. Zá- roveň nám toto porovnání naznačuje vhodnost použití fileru. Dle výzkumů se nejčastěji pohybuje měrný povrch filerů v roz- mezi 300 - 450 m²kg⁻¹. Objevují se i menší hodnoty okolo 240 m²kg⁻¹ [4], [8], [14], kde jsou častěji filery z mramorů a vá- penců. Dle vlastního výzkumu je měrný povrch žulového pra- chu 437 m²kg⁻¹.

Mezi dalšími charakteristikami je křivka zrnitosti, respektive maximálního zrna fileru. Některé literatury uvádí pouze maximální zrna (průchod sítem). Tyto hodnoty jsou nejčastěji uváděny jako 0,125 mm; 0,100 mm; 0,075 mm; 0,063 mm; 0,060 mm. Jiné uvádějí průměrné zrna kameniva. Nejvhodnější vyjádření je pomocí křivky zrnitosti nebo distribuce velikosti částic, které je vyjádřeno číselně (např. D10, D25, D50, D75, D90). V dohledaných článcích se udávají především hodnoty D10, D50 a D90 (viz Tabulka 1).

Tabulka 1: Distribuce velikosti částic v μm

filer	Citace	D10	D25	D50	D75	D90
žula		1.90	5.00	13.20	28.83	51.95
žula	[7]			18.64		
žula	[8]			11.40		50.00
žula	[9]	1.55		13.05		55.46
žula ^a	[9]	0.84		3.48		13.34
žula	[10]	3.70		21.40		67.00
rula	[11]	3.46		22.83		86.67
rula	[11]	2.86		18.90		66.81
amfibolit ^b	[12]	5.66		54.45		204.69
vápenec ^b	[12]	3.44		43.25		147.62
mramor ^b	[13]	2.30		33.00		350.00

^a filer byl upraven mikromletím

^b hodnoty byly odečteny z grafu

Další zkoumanou vlastností je tvar zrn. Dle SEM obrázků z dostupné literatury [15] jsou zrna žulového, mramorového, vápencového a rulového fileru podobná, což také dokazují hodnoty poměru stran (aspect ratio) z článku [15]. Ve vlastním výzkumu (Tabulka 2) byl porovnán žulový prach a amfibolit. Velký rozdíl je vidět již na první pohled z obrázků SEM (Obrázek 1). Z obrázku je jasné vidět, že převážná většina zrn amfibolitu jsou jehličkovitá. Horší kvalitu zrn potvrzuje kruhovitost s hodnotou 0.527, která je nižší než u žulového prachu.

Tabulka 4: Chemické složení filerů

filer	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	LOI
Žula ^a	48.6-62.9	14.1-14.6	6.3-8.0	3.0-4.2	8.0-9.8	2.6-4.5	3.5-5.9	
Žula ^b [4],[16]	53.2-94.2	1.3-14.1	0.4-12.3	1.2-3.6	0.1-0.2	1.0-9.1	1.7-8.3	0.3-5.0
Žula ^c	(~ 60)	(~ 14.0)	-	(~ 3)	-	-	(~ 2)	-
Amfibolit	44.82	14.51	13.46	0	0.49	6.38	20.33	
Rula [15]	70.13	15.95	0.9	0	6.22	1.12	0.69	2.77
Mramor ^b	0.2 - 14.8	0.1 - 21.9	0.1 - 36.8	0.0 - 9.3	0.1 - 0.2	6.0 - 83.2	0.4 - 9.3	2.5 - 46.0
[4], [13], [16]								
Mramor ^c	(< 1.5)	(<1.0)	(<0.5)	(<1.0)	(<0.1)	(~ 50.0)	(<0.7)	(~ 43.0)
Vápenec ^b	0.0-3.3	0.3-0.8	0.0-0.6	0	0	42.6 - 92.9	0.0 - 9.6	1.2 - 43.7
[4], [16], [17]								
Vápenec ^c	(~ 0.10)	(~ 0.30)	-	(< 0.0)	(< 0.0)	(~ 50.0)	(~ 1.0)	(~ 43.0)

^a rozsah chemického složení v jednom lomu

^b rozsah chemického složení z více lomů

^c běžné (nejčastější) hodnoty

Kruhovitost může nabývat hodnot od 0 do 1, přičemž dokonalý kruhový tvar bude mít hodnota 1 a dlouhé, protáhlé tvary budou mít hodnoty blízké 0.

Tabulka 2: Tvar zrn

	žula	amfibolit	
Množství částic	73	106	ks
Ekvivalentní průměr	28,0	23,3	μm
Poměr stran	0,623	0,533	-
kruhovitost	0,641	0,527	-

Podstatný vliv na reakci fileru v cementovém kompozitu má chemické složení. V tabulce 4 je vidět, že velký rozdíl chemického složení je nejen mezi druhy filerů, ale i stejného fileru v jiném lomu. Rozdíl lze pozorovat dokonce v řádku 1 (Tabulky 4), kde jsou všechny vzorky z jednoho lomu.

S chemickým složením souvisí reaktivita fileru. Jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích, přímá pucolánová metoda se běžně na fileru neprovádí. Proto jsou porovnány pouze vzorky z vlastního výzkumu. Pomocí modifikovaného Chapelleho testu bylo prokázáno (Tabulka 3), že ačkoliv obsahují žula a amfibolit velké množství křemíku, nejsou příliš reaktivní a nespĺňují podmínky normy. Žulový prach je reaktivní více než amfibol a modifikací (zahřátím) je možné jeho reaktivitu navýšit přibližně o 50%. Přesto však nespĺňuje podmínky normy 650 mg Ca(OH)₂ g⁻¹.

Tabulka 3: Chapelleho test

vzorek	mg Ca(OH) ₂ g ⁻¹
žula	345-374
modifikovaná žula	535
amfibolit	75-150

4. DISKUZE

Nejdůležitější vlastností charakterizující filer je velikost zrn. Všechna zrna jsou menší než 0,125 mm jak ve vlastním výzkumu, tak i v dohledané literatuře kromě amfibolitu. Žulový prach měl téměř vždy 90% zrn menších než cca 55 μm , s výjimkou upraveného kalu mikromletím (13,34 μm). Filery z ruly a amfibolitu (vzniklé při drcení horniny), měly zrna větší. Výrazně větší zrna u amfibolitu jsou dána možná jejich tvarem, kdy jehlicovitá zrna dobře nepropadnou oky síta. Pozitivní vliv velikosti fileru je uveden v článku [9], kdy kompozity (malty) s menšími zrny fileru měly vyšší pevnost než kompozity s většími zrny. Jelikož byla přímá zkouška pucolanity negativní, je lepší pevnostní charakteristika způsobena spíše hutnější strukturou kompozita. Tyto výsledky rovněž potvrzuje článek [17], kde s větší objemovou hmotností kompozita roste i pevnost. Vhodným doplněním velikosti zrn je měrný povrch, který není často zkoumán. Z výsledků vyplývá, že filery mají většinou podobný měrný povrch jako cement, což ukazuje na vhodné použití filleru do cementových kompozit. Mramorové a vápencové filery mohou mít dle literatury [4], [8], [16] menší měrný povrch (zhruba 240 $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) než žulový prach. Všechny zkoumané a porovnávané filery kromě amfibolitu měly podobný tvar zrn (poměr stran, kruhovitost). Výjimkou byl amfibolit, který měl nižší kruhovitost než žulový prach. Z těchto důvodů není vhodný do cementových kompozit, jelikož může zhoršovat jejich reologické vlastnosti.

U chemického složení (Tabulka 4) lze vidět podstatné rozdíly nejen mezi druhy fileru, ale i v rámci jednoho fileru. Vliv na tuto charakteristiku má lokalita lomu a homogenita horniny. Dokonce i v jednom lomu může být v průběhu těžby změna chemického složení. V tabulce byly běžné hodnoty chemického složení, které se vyskytuje nejčastěji, napsány do závorky. Filer ze žuly, ruly a amfibolitu byly převážně tvořené oxidem křemíku (SiO_2) a oxidem hliníku (Al_2O_3). Naopak filery z mramoru a vápence obsahovaly přibližně 50 % oxidu vápnicku (CaO) a velkou část tvoří ztráta žíháním (LOI). U žulového prachu a amfibolitu byla měřena přímá pucolánová aktivita, jelikož obsahují velké množství křemíku. Výsledky potvrdily, že nedochází k dostatečné aktivitě dle normy (650 $\text{mg Ca(OH)}_2 \text{g}^{-1}$) a tudíž se z větší části nejedná o amorfní křemík. Žulový prach má výrazně lepší hodnoty než amfibolit a teplenou úpravou se dá pucolánová aktivita přibližně o 50 % navýšit na 535 $\text{mg Ca(OH)}_2 \text{g}^{-1}$. Přesto však nesplňuje hodnotu normy. Z předchozích výzkumů naopak nepřímá zkouška pucolánové aktivity vyšla dle normy pozitivně a splňuje kritérium normy ČSN EN 13263-1+A1 i ČSN EN 450-1 [18]. Jak již bylo zmíněno, nepřímá zkouška pucolanity (respektive pevnosti na maltových trámečcích) byla zapříčiněna nejspíše hutnější strukturou kompozita.

5. ZÁVĚR

Žulový prach vzniklý při úpravě kamene pod vodou má přibližně stejné velikosti zrn. Oproti porovnávaným filerům vzniklých drcením (rula, amfibolit) má zrna menší. Velikost zrn má vliv na pevnostní charakteristiky cementových kompozit. Důležitou zkouškou je měrný povrch, který není často

zkoušen. Měrný povrch filerů je podobný jako u cementu. Vápenice a mramory mohou mít měrný povrch menší. Zrna žulového, rulového, mramorového, vápencového fileru mají vhodnější použití do betonových kompozit než filer z amfibolitu, jehož zrna jsou převážně protažená a mají jehlicovitý tvar. Proto není z důvodů reologie amfibolit vhodný.

Chemické složení je rozdílné jak u filerů z více lomů, tak i v rámci jednoho lomu. Má podstatný vliv na reakce v betonu. U filerů z žuly, ruly, amfibolitu lze očekávat částečnou pucolánovou reakci, jelikož obsahují velké množství SiO_2 . Dle přímé zkoušky pucolánové aktivity nesplňuje žádný filer hodnoty pro pucolán. Žulový prach má větší pucolánovou aktivitu než amfibolit. Zároveň je možné žulový prach částečně aktivovat tepelnou úpravou. Nepřímá metoda zkoušení pucolánové reakce ukázala na pozitivní vliv žulového prachu na pevnostní charakteristiky cementových kompozit. Jelikož nevyhovuje přímá zkouška pucolánové aktivity, lepší pevnostní charakteristiky jsou dány spíše hutnější strukturou cementového kompozita. S ohledem na velikost zrn i bez úpravy (například mikromletím), možnou aktivaci a pozitivní výsledky nepřímé pucolánové aktivity se žulový prach jeví jako vhodnější přísada do cementových kompozit vůči porovnávaným filerům.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS20/109/OHK1/2T/11.

Reference

- [1] HELA R 2005 Technologie betonu I (Brno: Brno University of Technology)
- [2] ČSN EN 12620+A1: Aggregates for concrete, Czech Standards Institute 2008
- [3] Zaleska M, Pavlikova M, Pavlik Z, Jankovsky O, Pokorny J, Tydlit V, Svora P and Cerny R 2018 Constr Build Mater 160 pp 106-16
- [4] Rana A, Kalla P, Verma H K and Mohnot J K 2016 Journal of Cleaner Production 135 pp 312-31
- [5] Careddu N, Siotto G, Siotto R and Tilocca C 2013 Resour. Policy 38 (3) pp 258-65
- [6] NF P 18-513:2009 Pozzolanic Addition for Concrete - Metakaolin. Definitions, Specifications and Conformity Criteria. Annex A.
- [7] Zhang H, Ji T and Lin X 2019 Constr Build Mater 211 pp 688-02
- [8] Mashaly A O, Shalaby B N and Rashwan M A 2018 Constr Build Mater 169 pp 800-18
- [9] Ramos T, Matos A M, Schmidt B, Rio J and Sousa-Coutinho J 2013 Constr Build Mater 47 pp 1001-09
- [10] Li H, Huang F, Cheng G, Xie Y, Tan Y, Li L and Yi Z 2016 Constr Build Mater 109 pp 41-46
- [11] Hlavinková E., Potential replacement of blast furnace slag in blended portland cements, Brno 2012, Bachelor thesis, Brno University of Technology, thesis supervisor Fridrichová M
- [12] Gajdoš J., Self-compacting concrete SCC for monolithic construction, Brno 2015, thesis, Brno University of Technology, thesis supervisor Hela R

- [13] Nežerka V, Hrbek V, Prošek Z, Somr M, Tesárek P and Fládr J 2018 *Journal of Cleaner Production* 195 pp 1081-90
- [14] Sadek D M, El-Attar M M and Ali H A 2016 *Journal of Cleaner Production* 121 pp 19-32
- [15] Schankoski R A, Pilar R, De Matos P R, Prudêncio L R and Ferron R D 2019 *Constr Build Mater* 224 pp 659-70
- [16] Elyamany H E, Elmoaty A E M A and Mohamed B 2014 *Alexandria Engineering Journal* 53 pp 295-07
- [17] Vijayalakshmi M, Sekar A S S and Ganesh Prabhu G 2013 *Constr Build Mater* 46 pp 1-7
- [18] Musil, L., Základní vlastnosti žulového prachu a jeho vliv na pevnost betonu In: *Proceedings of the 8th PhD Workshop of the Department of Concrete and Masonry Structures*. Praha: CTU FCE. Department of Concrete and Masonry Structures, 2019. p. 97-101. ISBN 978-80-01-06574-7.