



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

CIHELNÝ PRACH VZNIKAJÍCÍ PŘI BROUŠENÍ PÁLENÝCH ZDÍČÍCH TVAROVEK A MOŽNOSTI JEHO VYUŽITÍ

BRICK DUST ARISING DURING GRINDING OF BURNT BRICKWORK AND
POSSIBILITIES OF ITS UTILIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kocmánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA NEVŘIVOVÁ, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Tomáš Kocmánek
Název	Cihelný prach vznikající při broušení pálených zdících tvarovek a možnosti jeho využití
Vedoucí práce	Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] PYTLÍK P. a SOKOLÁŘ R. Stavební keramika. Technologie, vlastnosti a využití, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 287 s. ISBN 80-7204-234-3.
- [2] PYTLÍK P. Cihlářství. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1995. 264 s. ISBN 80-214-0612-7.
- [3] VALENTA L. Keramická příručka. 2. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2007. 417 s. ISBN 978-80-86821-46-7.
- [4] HANYKÝŘ V. a KUTZENDÖRFER J. Technologie keramiky. 1. vyd. Praha: Vega, s.r.o., 2008. 387 s. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [5] KRIŽAN D. Vliv recyklace brusného prachu na výrobu a vlastnosti cihel, Diplomová práce, VŠB Ostrava 2018
- [6] KULOVANÁ T. Vliv jemně mleté keramiky na vlastnosti cementových kompozitů, Disertační práce ČVUT v Praze 2018
- [7] ALBLOVÁ N. Vlastnosti materiálů na bázi alkalicky aktivovaného cihelného prachu, Diplomová práce, ČVUT v Praze 2017

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Stále vyšší objem výroby broušených cihel zároveň představuje stále vyšší množství produkovaného cihelného prachu, který vzniká při broušení vypálených tvarovek na přesné rozměry. Broušení je poměrně zdoluhavý proces, při kterém cihly prochází brusnými kotouči a vznikající prach je odsáván výkonnou vzduchotechnikou. Objem na filtrech zachycených keramických mikročástic meziročně roste, a proto jsou hledány nové cesty, jak tento cihelný odpad efektivně využít.

Cílem teoretické části diplomové práce je provést rešerši doposud publikovaných výsledků výzkumu týkajících se využití cihelného prachu v různých odvětvích průmyslu a navrhnout možnosti jeho využití v keramickém průmyslu.

Úkolem praktické části diplomové práce je experimentálně ověřit vlastnosti cihelného prachu z cihelny v Dolním Bukovsku. Ověřit vliv přídatku cihelného prachu na reologii plastického těsta a na reologii licí břčky. Zhodnotit vliv přídatku cihelného prachu na průběh sušení keramického střepe a na vlastnosti keramického střepe po výpalu. Porovnat fyzikálně mechanické charakteristiky standardně vyráběného cihelného střepe na závodě v Dolním Bukovsku s vlastnostmi cihelného střepe modifikovaného přídatkem prachu z broušení cihel.

Doporučený rozsah práce 60 - 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá cihelným prachem, vznikajícím při broušení pálených zdících tvarovek a možnostmi jeho využití.

V teoretické části práce je popsán cihelný prach, jeho vznik, základní vlastnosti. Jsou zde uvedeny některé publikované výsledky výzkumů týkajících se potencionálního využití cihelného prachu v různých průmyslových odvětvích. Také je uveden návrh využití cihelného prachu v keramickém průmyslu.

V praktické části práce byly vybrány dvě pracovní hmoty a z nich vzniklý cihelný prach s odlišnou granulometrií a byl zkoumán vliv přídavku cihelného prachu do pracovní hmoty na fyzikálně - mechanické vlastnosti keramického střepeu po výpalu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cihelný prach, cihelný střep, vliv, využití

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the brick dust arising during grinding of burnt brickwork and the possibilities of its utilization.

In the theoretical part origin and basic properties of brick dust is described. Some published results of research on the potential utilization of brick dust in various industries are presented here. Also proposal of utilization of brick dust in the ceramic industry is presented.

In the practical part two ceramic raw materials and the two brick dust with different granulometry arising during grinding of burnt brickwork (made from these two ceramic raw materials) were selected. The effect of the addition of brick dust to the ceramic raw materials on the physical - mechanical properties of ceramic body after sintering was investigated.

KEYWORDS

Brick dust, brick body, effect, utilization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Tomáš Kocmánek *Cihelný prach vznikající při broušení pálených zdících tvarovek a možnosti jeho využití*. Brno, 2020. 63 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lence Nevřivové, Ph.D. za odborné vedení, rady a za čas strávený konzultacemi této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a blízkým za morální podporu a trpělivost.

Obsah

1 Úvod	9
Teoretická část	10
2 Cihelný prach	10
2.1 Vlastnosti cihelného prachu	11
2.2 Využití cihelného prachu	11
2.2.1 Binární alkalicky aktivované kompozitní materiály s cihelným prachem	12
2.2.2 Vliv recyklace cihelného prachu na výrobu a vlastnosti cihel	13
2.2.3 Možnosti uplatnění fosforečné vazby při zpracování cihelného prachu	13
2.2.4 Možnosti využití cihelného prachu v alkalicky aktivovaných systémech	14
2.2.5 Možnosti využití cihelného prachu v systémech na bázi portlandského cementu	15
2.2.6 Možnosti využití cihelného prachu v alternativních pojivových systémech na bázi fluidních popílků	16
2.2.7 Využití alkalické aktivace při zpracování cihelného prachu	17
2.2.8 Použití cihelného prachu v omítkových směsích	17
2.2.9 Využití odpadního cihelného prachu jako plniva v samozhutnitelném betonu	18
2.2.10 Vlastnosti vysokohodnotného betonu obsahujícího cihelný prach jako náhradu portlandského cementu	18
2.2.11 Náhrada části plniva cementové malty cihelným prachem	19
2.2.12 Hodnocení vlivu cihelného prachu jako příměsi v alkalicky aktivovaných maltách vystavených zvýšeným teplotám	19
2.2.13 Vápenné malty modifikované jemně mletým cihelným střepelem	20
2.2.14 Vybrané vlastnosti alkalicky aktivovaného cihelného prachu	20
2.2.15 Závěr	21
2.3 Návrh využití cihelného prachu v keramickém průmyslu.....	22
Praktická část	23
3 Metodika	23
3.1 Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem dle ČSN 72 1074	25
3.2 Délková změna sušením, pálením a délková změna celková dle ČSN 72 1565 – 5	27
3.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ	28
3.4 Stanovení pevnosti v ohybu dle ČSN 72 1565 – 7	30
3.5 Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti pomocí vakuové metody a hydrostatického vážení dle ČSN 72 1565 – 6	31

4	Vstupní suroviny	34
4.1	Suroviny z výrobního závodu Heluz	34
4.2	Suroviny z výrobního závodu Wienerberger	37
5	Ověření vlivu cihelného prachu na vlastnosti vypáleného keramického střepu	40
5.1	Návrh nových receptur	40
5.2	Příprava zkušebních těles	41
5.3	Výsledky provedených zkoušek	43
5.4	Diskuse výsledků.....	45
6	Závěr	59
	Seznam použitých zdrojů	60
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	63

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá cihelným prachem vznikajícím při broušení keramických pálených tvarovek na přesné rozměry. Objem výroby broušených cihel roste a zároveň s ním roste množství vznikajícího cihelného prachu. Proto jsou hledány cesty, jak tento cihelný odpad efektivně využít. V současnosti je prach využíván pouze minimálně, je přidáván k pracovní hmotě v množství 2 – 3 %.

Cílem teoretické části diplomové práce je provést rešerši doposud publikovaných výsledků výzkumu týkajících se využití cihelného prachu v různých odvětvích průmyslu a navrhnout možnosti jeho využití v keramickém průmyslu.

Úkolem praktické části diplomové práce je experimentálně ověřit vlastnosti cihelného prachu. Ověřit vliv přídatku cihelného prachu na reologii plastického těsta a na reologii lící břechky. Zhodnotit vliv přídatku cihelného prachu na průběh sušení keramického střepu a na vlastnosti keramického střepu po výpalu. V neposlední řadě pak porovnat fyzikálně – mechanické charakteristiky standardně vyráběného cihelného střepu s vlastnostmi cihelného střepu modifikovaného přídatkem prachu z broušení cihel.

Teoretická část

V teoretické části práce je popsán vznik cihelného prachu a jeho základní vlastnosti. Jsou zde uvedeny některé publikované výsledky výzkumů týkajících se využití cihelného prachu v různých odvětvích průmyslu. V závěru teoretické části práce jsou uvedeny možnosti, jak využít cihelný prach v keramickém průmyslu.

2 Cihelný prach

Cihelný prach vzniká několika způsoby. Prvním způsobem je demolice cihelného zdiva, následné třídění a prosátí vzniklé stavební suti. Tento prach ovšem obsahuje kromě cihelného střeptu také další materiály, zejména proměnlivé množství zdící malty, které je závislé zejména na druhu demolovaného zdiva, ale také na použité třídící mechanizaci. Dalším způsobem vzniku cihelného prachu je drcení materiálu z vadných výrobků. [1] Cihelný prach, kterému se věnuje tato diplomová práce je odpad z opracování (broušení) pálených cihelných tvarovek přímo ve výrobních závodech.

V současnosti se cihelné zdící tvarovky spojují převážně pomocí tenkovrstvého lepidla či zdící pěny a pro tyto způsoby zdění je nutné, aby tvarovky měly hladký povrch. Mezi další požadavky pro použití výše zmíněných spojovacích materiálů patří přesné rozměry zdících tvarovek. Po výpalu však mají tvarovky ze stran děrování nerovný povrch a ve středu těchto stran jsou nižší než na okrajích. Z těchto důvodů je nutné je brousit. Pro výrobce cihlových bloků to znamená nové náklady na technologii broušení a vzniká také otázka, jak nakládat s brusným velmi jemným prachem, okolo 65 hm. % materiálu má velikost zrna menší než 63 μm .

Po výpalu jsou cihelné tvarovky naloženy na dopravník a přemístěny k soustavě brusných kotoučů s diamantovými brusnými segmenty, které nerovný povrch ložných ploch zarovnají a upraví výšku tvarovek na požadovanou hodnotu. Tím vzniká prach, který tvoří z velké většiny drobné prachové částičky cihelného střeptu a z velmi malé části také brusný materiál oddělující se z brusných kotoučů při jejich namáhání. Prach je při procesu broušení neustále odsáván ze skříně brusky a potrubím dopravován do sil či kontejnerů. [2] [3] [4]

2.1 Vlastnosti cihelného prachu

Fyzikálně – chemické vlastnosti cihelného prachu jsou totožné s vlastnostmi cihlářských výrobků, ze kterých je prach obroušen. Mineralogicky tvoří cihlářské výrobky zejména křemen, živec, slída a také amorfní fáze (amorfní bezvodé jíly). U těchto látek, mezi které patří například metakaolín, došlo během procesu výpalu ke ztrátě vody a v důsledku toho ke zhroucení krystalové mřížky. Mohou však reagovat s hydroxidem vápenatým za vzniku C_4AH_{13} , C_3AH_6 , C_2ASH_8 a CAS, které vykazují hydraulické vlastnosti. Látka vyznačující se hydraulickými vlastnostmi je schopna po přidavku vody tuhnout a tvrdnout. Cihelný prach můžeme také považovat za průmyslový pucolán. Pucolán je definován jako křemičitý či hlinitokřemičitý materiál, který v přítomnosti vody reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku sloučenin s pojivovými vlastnostmi. [8]

2.2 Využití cihelného prachu

Ačkoliv je cihelnami část cihelného prachu opětovně využívána ve výrobních směsích (v současnosti dávky cca do 3 %), je to pouze zlomek z celkové produkce cihelného prachu. Naprostá většina končí na skládkách. Objem výroby přesných cihelných tvarovek stále narůstá, což má samozřejmě za následek rostoucí objem vyprodukovaného cihelného prachu. [1] [2]

V Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024 je jedním z cílů „Zvýšit do roku 2020 nejméně na 70 % hmotnosti míru přípravy k opětovnému použití a míru recyklace stavebních a demoličních odpadů a jiných druhů jejich materiálového využití, včetně zásypů, při nichž jsou materiály nahrazeny v souladu s platnou legislativou stavebním a demoličním odpadem kategorie ostatní s výjimkou v přírodě se vyskytujících materiálů uvedených v Katalogu odpadů pod katalogovým číslem 17 05 04 (zemina a kamení)“. [5]

Z výše zmíněného cíle mimo jiné vyplývá, že produkci cihelného prachu, respektive jeho skládkování, je třeba minimalizovat i při výrobě přesných cihelných tvarovek, nebo také hledat jeho další možná uplatnění v průmyslu. Vzhledem k budoucímu stále intenzivnějšímu omezování skládkování je možné předpokládat, že náklady na ukládání cihelného prachu se budou stále zvyšovat. [6] [7]

Hledání nového využití cihelného prachu ve stavebním či jiném průmyslu má proto více výhod, ať už je to zmenšení prostoru nutného ke skládkování a tím také snížení finanční zátěže na tyto skládky vynakládané, nebo snižování spotřeby neobnovitelných přírodních zdrojů a ochranu životního prostředí. [1]

2.2.1 Binární alkalicky aktivované kompozitní materiály s cihelným prachem [1]

Reaktivita cihelného prachu při alkalické aktivaci je při běžných podmínkách poměrně malá, a proto vyžaduje pečlivou optimalizaci alkalického aktivátoru a podmínek při hydrataci. Cílem experimentální části práce bylo posoudit chování cihelného prachu ve směsných pojivech se struskou, metakaolinem a popílkem.

Z první etapy, ve které se zkoumaly vhodné kombinace k dalšímu zkoumání, bylo pro druhou etapu vybráno po dvou skupinách pojiv z cihelného prachu s metakaolinem či struskou ($M_s = 1,6/1,3$) a jedna skupina pojiv s popílkem ($M_s = 1,0$). U všech vybraných variant křemičitého modulu (M_s) byla zkoumána kombinace cihelného prachu s podílem metakaolinu, strusky či popílku v dávkách 0, 25, 50, 75 a 100 %. Zamíchání pojiv z cihelného prachu s popílkem se projevilo jako problematické, protože alkalický aktivátor byl vysoce koncentrovaný, způsoboval velice rychlé tuhnutí a bylo tedy nutné použít vhodný regulátor. Byl použit citronan draselný, který posunul tuhnutí pojiva nad dobu nutnou ke zpracování malty. Mechanické vlastnosti popílkových geopolymérů se však rapidně zhoršily, zatímco v první etapě dosáhla pasta s 50 % popílku pevnosti v tlaku 60 MPa, u malty se zpomalovačem tuhnutí to bylo jen 12 MPa.

Některé vzorky byly po 28 dnech zrání rovněž silně pokryty nevzhlednými výkvěty. Geopolymery z cihelného prachu s metakaolinem dosáhly maximální pevnost (nad 50 MPa v tlaku a téměř 10 MPa v tahu za ohybu) s obsahem metakaolinu 50 % ($M_s = 1,6$), u koncentrovanějšího aktivátoru ($M_s = 1,3$) se 75 % metakaolinu. Těmto výsledkům odpovídala také maximální objemová hmotnost vzorků a homogenita matrice ze SEM snímků. U pojiv se struskou se při rostoucím podílu strusky postupně zvyšovala pevnost v tlaku až k 80 MPa, pevnost v tahu za ohybu byla podobná jako u směsí s metakaolinem. Přitom nebyl zaznamenán výrazný vliv koncentrace aktivátoru na mechanické vlastnosti. Struskové malty měly také vyšší objemovou hmotnost, která stoupala současně s podílem strusky ve směsi.

Metakaolin jako jediný z hodnocených příměsí při konstantní dávce vody postupně zvyšoval napětí směsných past, zároveň rostla i jejich mez toku a viskozita. Tento trend byl více patrný u koncentrovanějšího alkalického aktivátoru, který dále zvyšuje viskozitu směsi. Naopak struska i popílek u past z cihelného prachu snižovaly napětí i viskozitu směsi. V obou případech způsobil nejvýraznější změnu 25% obsah příměsí, s dále rostoucí dávkou se vlastnosti měnily už podstatně méně. [1]

2.2.2 Vliv recyklace cihelného prachu na výrobu a vlastnosti cihel [2]

Práce se zabývá změnami vlastností cihelného materiálu po přidání různého množství prachu z broušení cihel do výrobní směsi. Na zkušebních tělesech ve tvaru válce o průměru 35 mm vytvořených lisováním tlakem 160 kN byly sledovány fyzikálně – mechanické vlastnosti jako je objemová hmotnost, objemové smrštění, nasákavost, zdánlivá pórovitost, ztráta hmotnosti pálením a pevnost v tlaku a změny těchto vlastností s rostoucím množstvím cihelného prachu ve směsi. S přidáním cihelného prachu rostla hmotnost vypálených zkušebních těles, avšak zároveň se snižovalo celkové objemové smrštění, takže výsledná objemová hmotnost těles se téměř neměnila. Nárůst hodnot nasákavosti a zdánlivé pórovitosti receptury s přidáním 8,26 % cihelného prachu k hmotnosti základní výrobní směsi oproti hodnotám referenční receptury bez přidání je pouze okolo 1,5 % (u obou veličin). Naopak pevnost v tlaku receptury s přidáním 8,26 % cihelného prachu je o 27 % nižší (11,4 MPa), než u receptury referenční (15,6 MPa). [2]

2.2.3 Možnosti uplatnění fosforečné vazby při zpracování cihelného prachu [3]

Vzhledem ke skutečnosti, že cihelný prach neobsahuje dostatečné množství hlinitých složek pro tvorbu fosforečné vazby, byly tyto složky přidávány formou různých přísad. Jako zdroje hlinitých složek byly testovány klasický vysokoteplotní popílek, kaolín a suspenze korundu. Tyto příměsi byly postupně v různých dávkách přidávány k záměsem a míchány spolu s cihelným prachem a fosforečným pojivem.

Bylo zjištěno, že nejlepším zdrojem hlinitých složek pro fosforečnou vazbu v systému s cihelným prachem je kaolin. Při rostoucím poměru kaolinu vůči cihelnému prachu pevnosti v tlaku stále rostly (do přísady 30 %, kdy byly experimenty ukončeny). Tyto pevnosti se pohybovaly v rozmezí 3 – 5 MPa.

Tento materiál by mohl být využit například pro nekonstrukční aplikace, u kterých požadujeme odolnost vůči teplotě do 1000 °C. Při použití korundové suspenze jako zdroje hlinitých složek, se pevnosti pohybovaly v intervalu 2 – 3 MPa.

Po žárové mikroskopii nebyly na vzorku patrné téměř žádné změny a měl nejvyšší teplotu počátku sintrace. Z výsledků lze předpokládat, že i tyto materiály by mohly být využitelné v nekonstrukčních aplikacích s požadavkem na odolnost vůči teplotám vyšším než 1000 °C, například jako materiály pro pálicí pomůcky v cihlářském průmyslu. Zkušební tělesa s přídatkem popíku dosahovala velmi nízkých pevností a teplota sintrace u nich činila méně než 1000 °C. Tyto vlastnosti značně omezují využitelnost, proto tento materiál nebyl dále zkoumán. [3]

2.2.4 Možnosti využití cihelného prachu v alkalicky aktivovaných systémech [4]

Systémy byly složeny z cihelného prachu a vysokopecní strusky v různých poměrech, přídatku alkalického aktivátoru (hydroxidu nebo jeho kombinace s příslušným vodním sklem) a vody. Přídatky aktivátorů byly vzhledem k obsahu cihlového prachu a strusky poměrově stejné s cílem zachovat stejné množství alkálií ve vzorku.

Obecně se s rostoucím obsahem vysokopecní strusky ve směsi přibližně lineárně zvyšovaly i pevnosti v tlaku. Použitím samotného hydroxidu sodného jako aktivátoru bylo dosaženo průměrně nižších pevností než při použití hydroxidu draselného. Při použití KOH totiž vzniká větší množství M-C-S-H gelu (M = Na, K), což vede k vyšší pevnosti.

Aktivace cihelného prachu bez strusky alkalickým aktivátorem nevedly k tak dobrým výsledkům. Pevnost směsí pouze cihelného prachu s aktivátorem činila po 28 dnech 8,54 MPa při použití NaOH a 6,29 MPa při použití KOH. Výsledky jsou nejspíše zapříčiněny schopností NaOH efektivněji rozpouštět amorfní fázi, což zapříčiňuje zlepšení mechanických vlastností. Přídatkem 5 % vysokopecní strusky z hmotnosti směsi bylo dosaženo zhruba dvojnásobné pevnosti. Vyšších pevností však bylo dosaženo při použití kombinací hydroxidů a jejich vodních skel. Nejvyšší pevnosti v tlaku, 45,16 MPa bylo dosaženo ve směsi 50 % cihelný prach, 50 % struska, při použití směsi KOH + $K_2O \cdot nSiO_2$ jako aktivátoru. Zlepšení pevností je přisuzováno faktu, že vodní skla obsahují amorfní SiO_2 , který se zabuduje do struktury alkalicky aktivovaného materiálu a zvyšuje tak pevnost.

Z celkového hlediska jsou nejlépe hodnoceny směsi s 80 % cihelného prachu a 20 % strusky (ať už aktivované sodným či draselným vodním sklem) díky právě vysokému poměru cihelného prachu k vysokopeční strusce a příznivým pevnostem v tlaku. Zvýšením teploty tuhnutí na 100 °C bylo docíleno dvojnásobné jednodenní pevnosti v tlaku. Po 7 a 28 dnech však tato tělesa vykazovala horší mechanické vlastnosti z důvodu příliš rychlého vysoušení a s tím spojeným popraskáním. [4]

2.2.5 Možnosti využití cihelného prachu v systémech na bázi portlandského cementu [6]

V práci bylo analyzováno pět druhů cihelných prachů a dva druhy cihelných písků. Po analýze těchto vstupních surovin byl pro výrobu zkušebních těles použit cihelný prach, ze kterého byla připravena řada poživ s různým obsahem cementu a dále sada těles s různým přídatkem komerčně dostupného superplastifikátoru na bázi polykarboxylátů. Dále byly připraveny záměsi z cihelného písku frakce 1,4 – 0,4 mm, opět s různým obsahem cementu. Byly sledovány fyzikálně – mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tlaku a tahu za ohybu, délkové změny a objemová hmotnost. Na vybraných zástupcích bylo zkoumáno jejich fázové složení pomocí rentgenové difrakční analýzy a průběh jejich hydratace pomocí izotermální kalorimetrie.

Rostoucí dávka cihelného prachu vykazovala do určité hranice (poměr 8/2 cihelný prach ku cementu) a za přídatku superplastifikátoru nárůst převážně dlouhodobých pevností, což bylo přisuzováno pucolánové aktivitě.

Rentgenovou difrakční analýzou připravených záměsí nebyl prokázán vznik nové fáze hydratačních produktů cementu a cihelného prachu, což podpořilo pravděpodobnost vzniku amorfních hydratačních produktů tohoto pucolánu. Následně byla provedena izotermická kalorimetrie na vzorcích s měnícím se poměrem cementu k cihelnému prachu, která na základě porovnání celkových hydratačních tepel potvrdila, že dochází k pucolánové reakci, protože pokles hydratačních tepel není přímo úměrný snižování obsahu cementu. Díky kalorimetrii byla také navržena kompenzace vlivu aktivní „aluminy“ z cihelného prachu na hydratační proces přidávkem sádrovce. Dalším mechanismem pozitivně ovlivňujícím vlastnosti těchto alternativních pojiv, který vyplývá z experimentu a z granulometrie cihelných prachů je takzvaný filler efekt. [6]

2.2.6 Možnosti využití cihelného prachu v alternativních pojivových systémech na bázi fluidních popílků [8]

K experimentům byly použity fluidní filtrové popílký z elektráren Tušimice a Tisová, jemně mletý ložový popel z elektrárny Tisová a cihelný prach ze závodu HELUZ v Hevlíně v různých poměrech. Dále byly testovány vlivy přídavku vápenné kaše nebo plastifikační přísady k těmto pojivovým systémům. Sledovanými hodnotami byly pevnost v tlaku a délkové změny.

U vzorků z filtrového popílku Tušimice bylo zjištěno, že optimálním poměrem je 95 % popílku ku 5 % cihelného prachu. Celkově však mají pevnosti v tlaku nízké hodnoty. Modifikací vápennou kaší (20 % z hm. popílku + cihelný prach) bylo po 90 dnech zrání dosaženo nejvyšších pevností, 15 MPa, opět u směsi obsahující 5 % cihelného prachu. V případě, že směs obsahovala 70 % cihelného prachu, dosahovala tělesa přibližně 8 MPa po 90 dnech zrání. V případě zkušebních těles připravených z filtrového popílku Tisová bylo optimálních hodnot dosaženo s 10 % cihelného prachu. Pomocí tentokrát modifikace plastifikátorem byla snížena spotřeba záměsové vody a tím i pevnosti a počáteční smrštění. Jako nejlepší se jevila receptura 70 % popílku ku 30 % prachu + 2 % plastifikátoru (z hmotnosti pevného podílu), která dosáhla pevnosti přibližně 14 MPa po 60 dnech zrání. U vzorků připravených z ložového popílku Tisová bylo dosaženo, opět po přidání plastifikátoru, nejvyšších hodnot pevností v tlaku, ale také nejvyšších délkových změn, ze všech zkoumaných zkušebních těles. Konkrétně šlo o recepturu s obsahem 50 % cihelného prachu a 2 % plastifikátoru. Tato tělesa dosahovala pevnosti v tlaku více než 45 MPa po 28 dnech zrání a téměř 50 MPa po 60 dnech. [8]

2.2.7 Využití alkalické aktivace při zpracování cihelného prachu [9]

V práci byl použit cihelný prach smíšený v různém poměru s normovým pískem a jako aktivátor byl pro jednu sadu těles použit roztok KOH a pro další sodné vodní sklo. Sledovanými hodnotami byly pevnost v tlaku i v tahu za ohybu a nasákavost. U těles, kde byl použit jako aktivátor 50% roztok KOH (cca 40 % z hmotnosti pevného podílu), bylo dosaženo pevností v tlaku 5 MPa po 28 dnech ve vlhkém uložení. U těles se sodným vodním sklem (cca 33 % z hmotnosti pevného podílu) bylo dosaženo pevnosti více než 30 MPa. [9]

2.2.8 Použití cihelného prachu v omítkových směsích [10]

V disertační práci byly podrobně studovány vápenné pasty a omítky s různým procentuálním zastoupením cihelného prachu. Konkrétně se jednalo o složení materiálů, kde se vápenný hydrát nahrazoval 10, 50 a 70 % cihelného prachu. Z distribučních a kumulativních křivek pórů byl patrný trend, že se zvyšujícím se množstvím pucolánové příměsi v pastách se zvyšoval i objem větších pórů (avšak všechny v kategorii tzv. gelové póry).

Z výsledků 28denních pevnostních charakteristik je patrný narůstající trend spolu se zvyšujícím se zastoupením cihelného prachu, a to až do 70% náhrady (MP70), poté byl zaznamenán výrazný pokles hodnot pevnostních charakteristik. V delším časovém horizontu se hodnoty pevností již příliš nevyvíjí. Pokud se do tohoto systému přidal cihelný prach, a to i v malém množství, docházelo k výraznému zpomalení karbonatace (nezáleží na množství pucolánu ve směsi). Pasta MP70 s nejvyšším obsahem cihelného prachu vykazovala nejrychlejší celkový úbytek portlanditu, ale i jeho nejrychlejší konverzi na CSH produkty.

Na základě předchozích studií byla navržena omítková směs, jejíž materiálové charakteristiky byly podrobněji zkoumány i v delším časovém horizontu. Směsi byly navrženy tak, aby obsahovaly 10 až 30 % cihelného prachu (vztaženo k součtu všech suchých složek). Objemové hmotnosti se pohybovaly kolem $1650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a hustoty matrice okolo $2550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U otevřené pórovitosti je vidět trend pozvolného navyšování jejich hodnot s rostoucím procentuálním zastoupením cihelného prachu. S nárůstem cihelného prachu v omítkových směsích se zmenšuje množství kapilárních pórů, a také se zjemňuje pórový systém. Lze konstatovat, že s narůstajícím podílem pucolánu ve směsi narůstaly pevnosti omítek v tlaku i pevnosti v tahu za ohybu. Byl zaznamenán klesající trend faktoru difúzního odporu s narůstajícím zastoupením cihelného prachu.

Výsledné hodnoty součinitele vlhkostní vodivosti a absorpčního koeficientu pro kapalnou vodu vykazovaly klesající trend spolu s narůstajícím procentuálním zastoupením pucolánové příměsi. Narůstající obsah cihelného prachu v omítkových směsích vykazuje mírné zlepšení tepelněizolačních vlastností. Jako nejlepší se dle autorky jeví 50% náhrada za plnivo i pojivo. Ke zlepšení docházelo i ve zkoumaném časovém horizontu, což lze považovat také za pozitivní vlastnost studovaných omítek. [10]

2.2.9 Využití odpadního cihelného prachu jako plniva v samozhutnitelném betonu [11]

Byly zkoumány vlastnosti samozhutnitelného betonu vyrobených s 550 kg/m^3 pojiva, které se skládalo z cementu, který byl částečně nahrazován cihelným prachem v množstvích 5 %, 10 %, 15 % a 20 % (hmotnostních).

Schopnost tečení čerstvého betonu se zvyšovala s rostoucím podílem cihelného prachu. Stejně tak se zvýšila schopnost betonu protéci skrz úzké otvory (zkoušeno metodou L-box). Hodnoty pevnosti v tlaku, v příčném tahu a soudržnosti oceli s betonem se však s rostoucím podílem cihelného prachu naopak mírně snižovaly. Lze však říci, že cihelný prach má určitý potenciál proto, aby mohl být použit v samozhutnitelném betonu jako náhrada cementu až do 15 % díky jeho pozitivním účinkům na vlastnosti v čerstvém stavu. [11]

2.2.10 Vlastnosti vysokohodnotného betonu obsahujícího cihelný prach jako náhradu portlandského cementu [12]

V této práci byl použit cihelný prach, vytvořený pomletím cihelného odpadu z několika cihelen, jako náhrada portlandského cementu pro vysokohodnotný beton v množství až 60 % hmotnosti.

Objemová hmotnost analyzovaných vysokohodnotných betonových směsí se snížila s rostoucím množstvím cihelného prachu ve směsi a otevřená pórovitost se odpovídajícím způsobem zvyšovala. To naznačuje možné problémy jak s mechanickými vlastnostmi, tak s trvanlivostí u směsí s vyšším obsahem cihelného prachu. Pevnost v tlaku se u náhrady vyšší než 20 % velmi rychle snižovala, takže již nebylo možné zařadit beton do třídy vysokohodnotných betonů. Na druhé straně se účinná lomová houževnatost a specifická lomová energie snižovaly jen pomalu do 40 %. Z hlediska transportu kapalné vody bylo limitní množství náhrady cihelným prachem také 20 %.

Mrazuvzdornost všech studovaných betonových směsí byla vynikající. Z hlediska odolnosti vůči mrazu a rozmrazovacím solím byly uspokojivé pouze směsi obsahující cihelný prach do 10 %. Tepelná vodivost zkoumaných betonů v suchém stavu klesala s rostoucím množstvím náhrady cementu cihelným prachem, což bylo ve shodě rostoucí otevřenou pórovitostí. [12]

2.2.11 Náhrada části plniva cementové malty cihelným prachem [13]

Práce se zabývá proveditelností zlepšení vlastností cementových omítkových malt, pomocí přídavku velmi jemného kameniva ve formě drcené cihelné keramiky.

Analýza hodnot všech vlastností zkoušených pro maltu s 10% náhradou plniva ukazuje, že začlenění jemného cihelného prachu do omítkové malty má za následek obecné zlepšení jejích vlastností (byla snížena nasákavost, zvýšena přídržnost k podkladu, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu,...) ve srovnání s konvenční maltou. Výjimkou je však smrštění a propustnost pro vodní páry. Smrštění se zvýšilo o přibližně 13 % a propustnost pro vodní páry byla snížena zhruba o 12 %. [13]

2.2.12 Hodnocení vlivu cihelného prachu jako příměsi v alkalicky aktivovaných maltách vystavených zvýšeným teplotám [14]

Byl hodnocen vliv vysokého obsahu cihelného prachu na vlastnosti ternárních alkalicky aktivovaných malt z hlediska odolnosti vůči zvýšené teplotě. Na základě experimentálních výsledků byly vyvozeny následující závěry.

Zvýšení obsahu cihelného prachu z 50 na 70 % zvýšilo odolnost alkalicky aktivovaných malt při zvýšených teplotách až do 900 °C. Nahrazením vysokopecní strusky cihelným prachem s fluidním popílkem způsobilo snížení ztráty pevnosti a hmotnosti vzorků při vystavení vyšším teplotám. Vzorky připravené ze 70 % cihelného prachu, 20 % z vysokopecní strusky a 10 % z fluidního popílku vykazovaly optimální odolnost při zvýšených teplotách. [14]

2.2.13 Vápenné malty modifikované jemně mletým cihelným střepem [15]

V práci se autorka zabývá náhradou vápna pro vápennou maltu rostoucím množstvím cihelného prachu. Na základě experimentů lze konstatovat následující tvrzení.

Metodou stanovení zbytkového Ca(OH)_2 byla prokázána pucolánová aktivita cihelného prachu. Rostoucí přídavek cihelného prachu ke konstantnímu množství vápna zvyšuje pevnost v tlaku malty v čase a snižuje nasákavost. Náhrada vápna rostoucím množstvím cihelného prachu má za následek snížení spotřeby záměsové vody, což vede opět ke zvýšení pevností a snížení nasákavosti vápenných malt. Pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu dále mírně rostou díky pucolánové reakci s Ca(OH)_2 , při které vzniká amorfnní fáze CSH, CAH sloučenin. Použití cihelného prachu ve vápenných maltách má také za následek snížení křehkosti malt i odolnosti proti šíření trhlin. Dobrých výsledků bylo dosaženo také u vápenných malt s poměrem 1/3 pojivo ku kamenivu s náhradou vápna cihelným prachem v množství 60, 70 i 80 %. Ve stáří 90 dní zde dochází ke 2,5 – 3 násobnému nárůstu pevností jak v tlaku, tak v tahu za ohybu. U vápenocementové malty vedla náhrada poloviny vápenného hydrátu cementem ke snížení obsahu hydroxidu vápenatého zhruba o 40 %. Reakce cihelného prachu byla možná pouze do poměru 60/40 (vápenný hydrát ku cihelnému prachu), vyšší obsah prachu již neměl dostatek hydroxidu vápenatého pro reakci, a naopak jemný prach v maltě měl za následek větší nároky na celkové množství pojiva. Mechanické vlastnosti se zvyšujícím se zastoupením cihelného prachu klesají. [15]

2.2.14 Vybrané vlastnosti alkalicky aktivovaného cihelného prachu [16]

Cílem této diplomové práce bylo studium alkalicky aktivovaného materiálu vyrobeného z cihelného prachu, vodního skla, vody a hydroxidu sodného. Pro účely práce byl použit prach o velikosti zrna ≤ 1 mm ze dvou různých cihelen (dále značeny jako prach H a L). Byl zkoumán vliv zvýšené teploty ošetření a složení vybraných směsí na objemovou hmotnost, pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu a porézní systém (otevřenou pórovitost).

U směsí označených jako typ A se měnilo množství hydroxidu sodného. Hodnota silikátového modulu M_s se pohybovala v rozmezí od 0,8 do 1,2. U směsí označených jako typ B bylo ke konstantní dávce cihelného prachu přidáváno proměnlivé množství ostatních surovin tak, aby byl zachován silikátový modul s hodnotou 1,4.

Objemová hmotnost u materiálu s cihelným prachem H klesala jak s rostoucí teplotou ošetření tak i se zvyšujícím se silikátovým modulem (směsi typu A), nebo množstvím vodního skla a NaOH (směsi typu B). U materiálu s cihelným prachem L objemová hmotnost také rostla u směsí typu A, ale u směsí typu B naopak rostla. Pevnost v tlaku se zvyšovala se zvyšující se teplotou ošetření u všech materiálů vyrobených z obou typů prachů. Se zvyšujícím se silikátovým modulem u směsí z prachu H také rostla, prachu L naopak klesala. Se zvyšujícím se množstvím vodního skla a NaOH v případě směsí z prachu H pevnost v tlaku klesala, u prachu L naopak rostla. Otevřená pórovitost se také zvyšovala nebo snižovala v závislosti na podmínkách u obou cihelných prachů rozdílně.

Z těchto mnohdy rozcházejících se tendencí cihelného prachu z různých zdrojů je patrné, že nelze vyvozovat závěry pro cihelný prach jako takový, ale je nutné posuzovat každý prach z každé jednotlivé výroby zvlášť. [16]

2.2.15 Závěr

Potřeba zpracování cihelného prachu se na cihelnách objevila teprve nedávno, s tím, jak začal narůstat jeho objem. Na základě rešerše dostupných publikací jak v českém, tak v anglickém jazyce je možné konstatovat, že:

- Doposud bylo zkoumáno využití cihelného prachu zejména v jiném, než keramickém průmyslu. Pouze zlomek studií recyklace/použití cihelného prachu se zabývá jeho znovuvyužití v keramice
- Je uvažováno o využití cihelného prachu v betonech, maltách a omítkách, asfaltu a studována byla také možnost alkalické aktivace cihelného prachu.
- Použití cihelného prachu při výrobě sebou přinese řadu technologických problémů, které bude nutné řešit.
- Použití cihelného prachu při výrobě keramických tvarovek z plastického těsta bude pravděpodobně doprovázeno poklesem pevností vyráběných tvarovek.
- Nelze vyvozovat závěry pro cihelný prach jako takový, ale je nutné posuzovat každý prach z každé jednotlivé výroby zvlášť

2.3 Návrh využití cihelného prachu v keramickém průmyslu

Odpad vznikající při broušení keramických tvarovek, cihelný prach, je ideální využít přímo v místě jeho vzniku, tedy v cihelně. Existují tři základní technologie výroby keramických výrobků. Výroba ze zavlhle pracovní hmoty na hydraulickém lisu, výroba z plastického těsta na šnekovém lisu a vytváření z keramické suspenze odléváním do sádrových forem. Objem výrobků vytvářených z plastického těsta představuje více než 90 % celkové produkce keramických výrobků v ČR. Z tohoto důvodu by bylo vhodné využít cihelný prach právě v této technologii.

V rámci rešerše byla nalezena pouze jedna práce týkající se využití cihelného prachu při výrobě tvarovek z plastického těsta [2]. Jednalo se o cihelný prach ze závodu společnosti Wienerberger v Jezernici. Cihelna v Jezernici je velmi výkonný závod, který dokáže vyprodukovat až 20 tun prachu z broušení denně a proto byla jedním z prvních závodů v České republice, který se začal aktivně zabývat recyklací prachu zpět do výroby [2]. V rámci studie byl testován přírůstek 3, 6, a 8,5 % prachu do pracovní hmoty na výrobu broušených tvarovek. Celková délková změna sušením a pálením s přírůstkem prachu klesala, nasákavost a zdánlivá pórovitost narůstala. Pevnost v tlaku klesla o 27 %. Právě pokles pevností při požití cihelného prachu je nežádoucí.

Jak bylo uvedeno výše, vlastnosti cihelného prachu jsou různé, stejně jako je různá surovina na každém z výrobních závodů. Vliv na vlastnosti cihelného prachu má také způsob broušení tvarovek, tedy granulometrie cihelného prachu. Na základě chování jednoho druhu cihelného prachu, posuzovaného v publikované studii, není možné posuzovat všechny ostatní. Bylo by vhodné testovat také jiné suroviny a jiné dávkování cihelného prachu.

Je možné posuzovat také vliv cihelného prachu na keramický střep vyráběný jinou technologií než tažením na šnekovém lisu z plastického těsta, například lisování ze zavlhle pracovní hmoty do kovové formy na hydraulickém lisu, nebo při vytváření keramických suspenzí.

Praktická část

Vzhledem k poznatkům z teoretické části, ve které bylo zjištěno, že se drtivá většina výzkumů v oblasti využití cihelného prachu zabývá jeho využitím v jiném než keramickém průmyslu (byl nalezen pouze zdroj ze zadání, viz 2.2.2), jsme se rozhodli zaměřit se právě na tuto opomíjenou oblast. Cihelný prach vznikající při broušení pálených zdících tvarovek, je nejlépe využít přímo v místě jeho vzniku, tedy v cihelně. Odpadnou tak další finanční náklady spojené s dopravou cihelného prachu, nebo s jeho uložením na skládku.

3 Metodika

Cílem experimentální části práce bylo ověřit vlastnosti cihelného prachu ze závodu společnosti Heluz (cihelný prach A), ověřit vliv přídavku cihelného prachu na reologii pracovní hmoty a na výsledné parametry vypáleného keramického střepu. V průběhu řešení byla experimentální část práce rozšířena o cihelný prach ze závodu společnosti Wienerberger (cihelný prach B).

Nejdříve bylo na cihelném prachu stanoveno granulometrické složení. Za účelem stanovení mineralogického složení byla provedena rentgenová difrakční analýza a diferenciální termická analýza.

V dalším kroku bylo navrženo dávkování cihelného prachu do pracovní hmoty. Pracovní hmotu, ze které byly vyrobeny tvarovky, jejichž broušením vznikl cihelný prach A, označujeme jako pracovní hmotu A. Stejně tak pracovní hmotu, ze které byly vyrobeny tvarovky, jejichž broušením vznikl cihelný prach B, označujeme jako pracovní hmotu B.

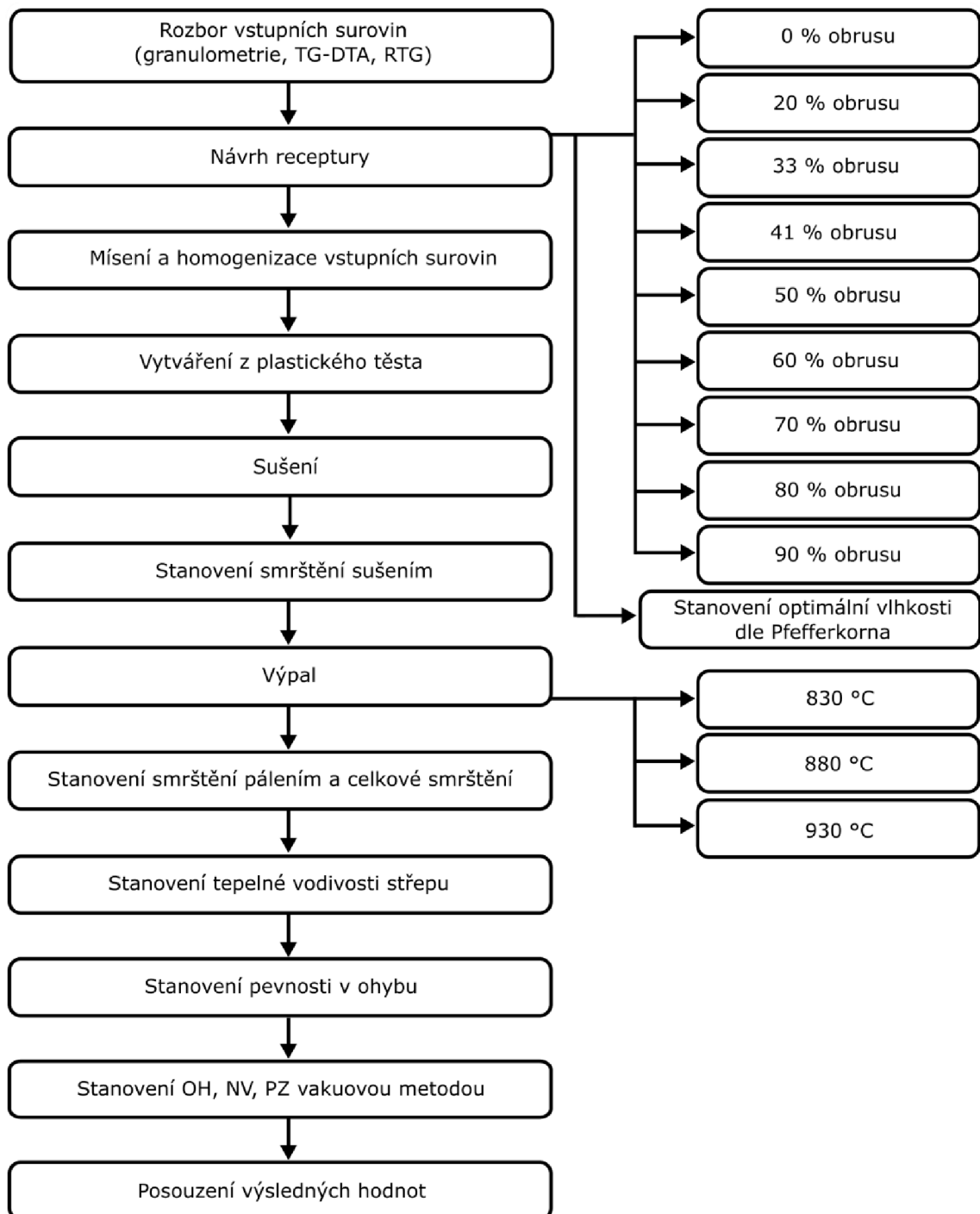
Dávkování cihelného prachu mělo vliv na optimální vlhkost plastického těsta, která byla pro každou recepturu stanovována zvlášť tak, aby byl dodržen deformační poměr podle Pfefferkorna v rozmezí 0,5 – 0,6.

Po vysušení zkušebních těles bylo stanoveno smrštění sušením.

Výpal byl prováděn na tři různé teploty, které odpovídají reálným teplotám výpalu ve výrobních závodech.

Po výpalu bylo stanoveno smrštění výpalem a celkové smrštění keramického střepu. Dále byla stanovena pevnost v ohybu, objemová hmotnost, nasákavost a zdánlivá pórovitost.

Pro výrobce zdících tvarovek je velmi důležitá také tepelná vodivost keramického střepe. Tepelný odpor zdiva je ostře sledovanou charakteristikou. Proto byl na vypálených zkušebních tělesech stanoven také součinitel tepelné vodivosti λ .



3.1 Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem dle ČSN 72 1074 [17]

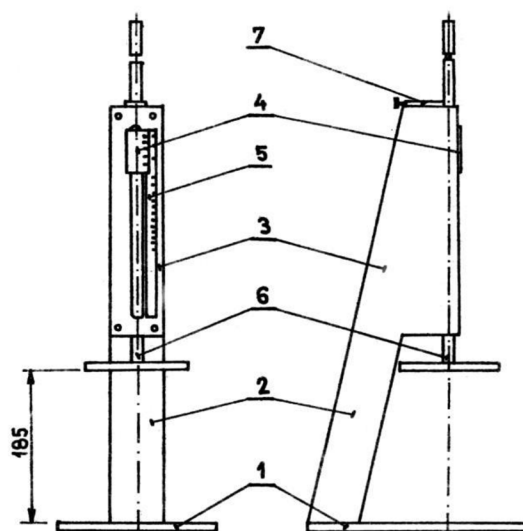
Tato zkušební metoda umožňuje stanovit optimální vlhkost keramického těsta pro snadné zpracování, která může být stanovena jak graficky, tak výpočtem pomocí vzorce. Pro oba způsoby stanovení je třeba znát vlhkost a tzv. deformační poměr dvou vzorků keramických těst.

Deformační poměr označujeme d a je stanovován na zkušebních vzorcích ve tvaru válce o výšce $40 \pm 0,1$ mm a průměru $33 \pm 0,5$ mm. Vzorky přesných rozměrů vytvořené pomocí formy vložíme do Pfefferkornova přístroje, uvolníme spoušť a necháme na ně z výšky 185 mm spadnout závaží o hmotnosti 1192 g. Poměr mezi výškou válce po deformaci závažím a před deformací je pak označován právě jako deformační poměr a vypočítáme jej pomocí vzorce:

$$d = \frac{h_i}{h_0} \quad [-]$$

(3.1)

d	deformační poměr s přesností 0,01 [-]
h_0	výška válce před deformací, s přesností 0,1 [mm]
h_i	výška válce po deformaci s přesností 0,1 [mm]



Obr. 1: Schéma Pfefferkornova deformačního přístroje dle ČSN 72 1074

(1 - podložka; 2 - nosný rám; 3 - uložení vodící tyče; 4 - nonius; 5 - milimetrová stupnice; 6 - vodící tyč s padací deskou; 7 - spoušť)

Optimální vlhkost cihlářského těsta je stanovena při deformačním poměru $d = 0,6$. Pro její stanovení je třeba vytvořit výše zmíněné dva zkušební vzorky (lépe dvě sady vzorků) z těst konzistence tužší než optimální, odpovídající hodnotě deformačního poměru vyššího než 0,6, a konzistence tvárnější, odpovídající nižší hodnotě. Požadované konzistence dosáhneme postupným přidáním různého množství vody do těsta a důkladnou homogenizací intenzivním ručním hnětením.

Po dosažení homogenní struktury nejprve odebereme z obou těst vzorky pro stanovení vlhkosti. Vzorky libovolného tvaru nejprve zvážíme, s přesností na setiny, při současné vlhkosti. Následně je vložíme do sušárny a sušíme při konstantní teplotě 110 °C až do dosažení konstantní hmotnosti.

Poté opět zvážíme a stanovíme vlhkost těsta dle vztahu:

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

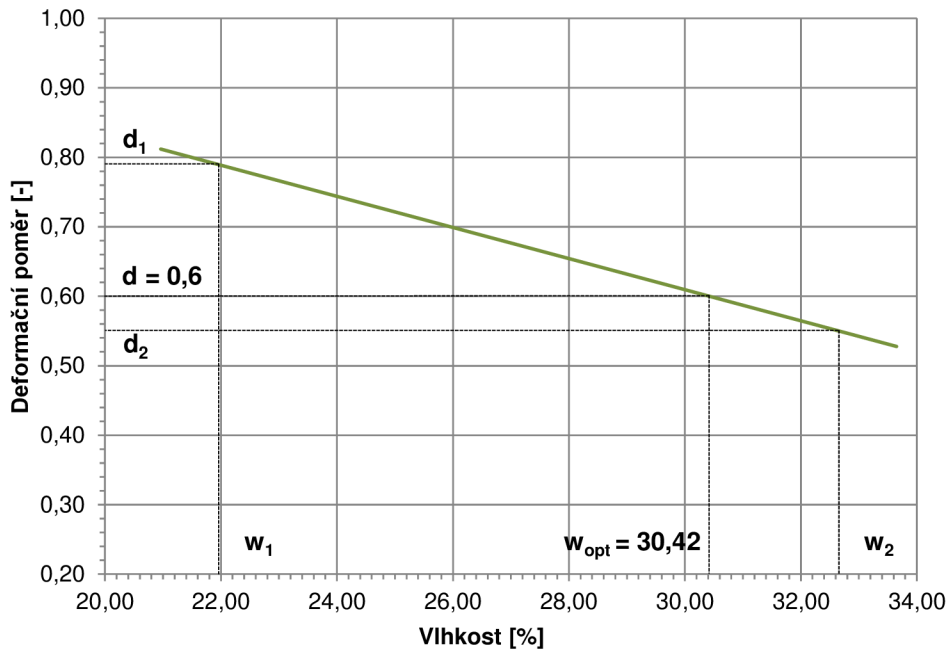
w	vlhkost vzorku s přesností 0,01 [%]
m_v	hmotnost vlhkého vzorku s přesností 0,01 [g]
m_s	hmotnost vysušeného vzorku s přesností 0,01 [g]

Jakmile jsme stanovili vlhkost a deformační poměr obou těst, můžeme určit optimální vlhkost keramického těsta, které budeme používat dále. Výpočet optimální vlhkosti a tedy i optimálního množství rozdělovací vody provedeme dle následujícího vztahu:

$$w_{opt} = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{d_2 - d_1} \cdot (d - d_1) \quad [\%] \quad (3.3)$$

w_{opt}	optimální vlhkost keramického těsta s přesností 0,1 [%]
$w_1; w_2$	vlhkost tužšího ₍₁₎ a tvárnějšího ₍₂₎ těsta s přesností 0,01 [%]
$d_1; d_2$	deformační poměr tužšího ₍₁₎ a tvárnějšího ₍₂₎ těsta s přesností 0,01 [-]
d	deformační poměr konstantní hodnoty, pro cihlářská těsta $d = 0,6$

Tento vztah je rovnicí přímky, jelikož deformační poměr je lineárně závislý na vlhkosti keramického těsta. Proto je také možné optimální vlhkost zjistit bez výpočtu přesným vynesemím hodnot vlhkosti obou těst na svislou osu a deformačního poměru na vodorovnou osu. Spojením obou bodů vznikne přímka, pomocí které můžeme odečíst optimální pracovní vlhkost těsta, jelikož víme, že optimální deformační poměr pro cihlářská těsta je 0,6. [17]



Obr. 2: Příklad grafického stanovení optimální vlhkosti keramického těsta Pfefferkornovým přístrojem

V práci byla každá receptura upravena tak, aby splňovala optimální deformační poměr v rozsahu 0,55 – 0,6. Toho bylo docíleno postupným přidavkem vlhkosti, homogenizací a následnou zkouškou plastického těsta v Pfefferkornově deformačním přístroji. Postup byl opakován, dokud nebylo dosaženo deformačního poměru v požadovaném rozmezí. Optimální pracovní vlhkost keramického těsta každého těsta byla poté zjišťována zpětně.

3.2 Délková změna sušením, pálením a délková změna celková dle ČSN 72 1565 – 5 [18]

Podstatou zkoušky je stanovení změn délky úseček vyražených na zkušebním tělese za předepsaných podmínek. Délka úsečky se stanoví po vytvoření, po vysušení a po výpalu. Zjištěné rozdíly délek se vyjadřují v procentech původní délky. [18]

délková změna sušením DS s přesností na 0,1 %

$$DS = \frac{l_s - l_z}{l_z} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

délková změna pálením DP s přesností na 0,1 %

$$DP = \frac{l_p - l_s}{l_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.5)$$

délková změna celková DC s přesností na 0,1 %

$$DC = \frac{l_p - l_z}{l_z} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

l_z	vzdálenost otisků při vytvoření [mm]
l_s	vzdálenost otisků po vysušení [mm]
l_p	vzdálenost otisků po výpalu [mm]

Do každého zkušebního tělesa byly při výrobě otisknuty měřicí břity posuvného měřítka, nastavené na vzdálenost 80 mm. Po vysušení a po výpalu všech zkušebních těles byla vzdálenost otisků znovu přeměřena a byly stanoveny délkové změny dle vztahů uvedených výše.

3.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti λ

Měrná tepelná vodivost λ je definována jako množství tepla prošlého při teplotním spádu 1 K/m plochou 1 m². Obecně je funkcí více veličin, zejména objemové hmotnosti a pórovitosti.

Stanovení součinitele tepelné vodivosti je možné provést několika způsoby. Metody stanovení lze obecně rozdělit na:

- Stacionární metody
- Nestacionární metody

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti keramického střepu v diplomové práci byla použita nestacionární modifikovaná metoda horkého drátu, založená na metodě topného drátu dle ČSN EN ISO 8894 – 1. [19], která je v souladu s normou ČSN 72 7306 [20]

Na rozdíl od stacionárních metod je měření nestacionárními metodami založeno na sledování dynamického vývoje teplot. Při stanovení nestacionární metodou však není vyžadován ustálený teplotní stav, ale sleduje se průběh šíření teplotní vlny měřeným zkušebním tělesem.

Hodnota měrné tepelné vodivosti byla měřena na přístroji Shoterm QTM (viz obr. 3). Přístroj pracuje na principu topného drátu, jenž spočívá v působení konstantního příkonu na topný drát a v dané vzdálenosti měří v závislosti na čase rozdíly teplot. Výstupní veličinou přístroje je přímo hodnota součinitele tepelné vodivosti zkoušeného tělesa ve W/(m·K).



Obr. 3: měření tepelné vodivosti přístrojem Shotherm QTM

Před samotným měřením byl povrch každého zkušební tělesa upraven zbrúšením tak, aby odchylka od rovinnosti povrchu byla co nejnižší. Na upravený povrch zkušební tělesa přiložíme zkušební sondu. Po přiložení sondy je třeba nechat měřící soustavu nejméně 60 sekund vytemperovat a následně můžeme na řídicím přístroji spustit stisknutím tlačítka START samotné měření. Přístroj po ukončení měření na displeji zobrazí číselný údaj představující přímo naměřenou hodnotu součinitele tepelné vodivosti zkušební tělesa. Zkušební sonda musí být po celou dobu měření přístroje v kontaktu s povrchem zkušební tělesa. Měření opakujeme na každém zkušebním tělese nejméně třikrát. Mezi dvěma po sobě jdoucími měřeními je třeba ponechat interval 5 minut a měřící sondu přikládáme pokaždé znovu, nejlépe na dosud neměřené místo zkušební tělesa. Výslednou hodnotu součinitele tepelné vodivosti stanovíme jako aritmetický průměr z naměřených hodnot, případné odlehlé hodnoty je třeba vyloučit.

3.4 Stanovení pevnosti v ohybu dle ČSN 72 1565 – 7 [21]

Podstatou zkoušky je stanovení velikosti síly potřebné k porušení zkušebního tělesa předepsaného tvaru a rozměrů při rovnoměrném zatěžování (namáhání) ohybem. [21]

Pro stanovení byl použit Michaelisův přístroj s roztečí podpěrných břitů 80 mm a poměrem 1:50. Nejdříve změříme přesnou vzdálenost podpěr, vyrovnáme Michaelisův přístroj a upravíme zkušební tělesa tak, aby se podpěrné břity dotýkaly vždy po celé šířce tělesa. Poté vložíme zkušební těleso tak, aby oba konce symetricky přesahovaly a otevřeme zásobník s broky. Michaelisův přístroj sám plynule zatěží zkušební těleso až do porušení. Po zlomení tělesa zvážíme hmotnost broků potřebných pro zlomení a hmotnost pomocí gravitačního zrychlení a poměru 1:50 přepočítáme na silové zatížení. Zlomené těleso také přeměříme v místě zlomu a stanovíme jeho tloušťku a šířku s přesností na ± 1 mm.



Obr. 4: stanovení pevnosti střepe v ohybu na Michaelisově přístroji

Stanovení pevnosti v ohybu provedeme dle následujícího vztahu:

$$f_{cf} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{cf} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (3.7)$$

f_{cf}	pevnost v ohybu s přesností na 0,1 [MPa]
F_{cf}	síla potřebná pro porušení zkušební tělesa [N]
l	vzdálenost podpěrných břitů [mm]
b	šířka zkušební tělesa [mm]
h	výška zkušební tělesa v místě zlomu [mm]

3.5 Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti pomocí vakuové metody a hydrostatického vážení dle ČSN 72 1565 – 6 [22]

Podstatou zkoušky je dle ČSN 72 1565 – 6 nasycení vypáleného zkušební tělesa vodou a zvážení. Objem zkušební tělesa se stanoví hydrostatickým vážením. Ze získaných hodnot se vypočítá nasákavost, zdánlivá pórovitost a objemová hmotnost.

Nasákavost je definována jako poměr hmotnosti vody pohlcené vypáleným zkušebním tělesem ku hmotnosti tělesa po vysušení na $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyjadřuje se v procentech hmotnosti vzorku.

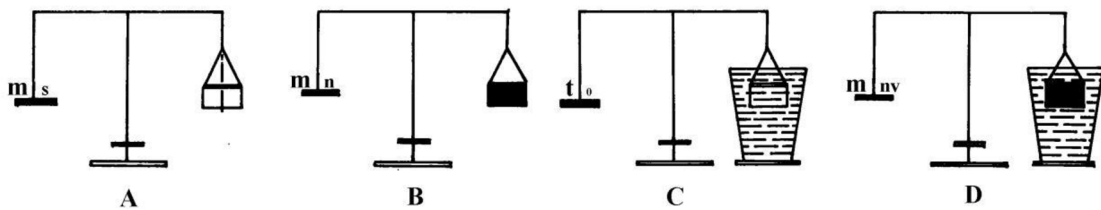
Zdánlivá pórovitost je definována jako poměr objemu otevřených pórů a dutin vzorku k jeho objemu včetně pórů a dutin. Vyjadřuje se v procentech objemu vzorku.

Objemová hmotnost je definována jako poměr hmotnosti vzorku k jeho objemu včetně uzavřených a otevřených pórů a dutin. Vyjadřuje se v kg/m^3 . [22]

Stanovení provedeme na zlomcích zkušebních těles ze zkoušky pevnosti v ohybu. Nejdříve všechny zlomky vysušíme při $110 \text{ }^\circ\text{C}$ do konstantní hmotnosti a zvážíme. Poté je umístíme na rošt do nádoby umístěné v exikátoru. Zlomky klademe tak, aby se nedotýkaly stěn nádoby ani vzájemně mezi sebou.

Uzavřeme exikátor a odčerpáme veškerý vzduch. Počkáme, dokud se tlakoměr připevněný k exikátoru neustálí a poté podtlak udržujeme po dobu alespoň 10 minut. Následně zlomky zalejeme do poloviny výšky vodou a dále udržujeme podtlak po dobu 10 minut. Poté dopustíme do exikátoru takové množství vody, aby byl každý ze zlomků ponořen 2 cm pod hladinou, a udržujeme podtlak ještě po dobu 15 minut.

Nakonec podtlak zrušíme a zlomky vyjmeme z exikátoru stále uložené v nádobě a zalité vodou. Během přestávek a udržování podtlaku, nebo po vyjmutí zkušebních těles z exikátoru, si připravíme soustavu pro hydrostatické vážení.



Obr. 5: Schématický princip hydrostatického vážení (A – vážení suchého vzorku (m_s), B – vážení nasáklého vzorku (m_n), C – tárování válce s vodou a závěsem pro hydrostatické vážení, D – hydrostatické vážení vzorku (m_{nv})); [ČSN 72 1565 – 6]

Každé těleso vyjmeme z misky, upevníme do úchyty v hydrostatické sestavě a pod vodou zvážíme. Po zvážení každého tělesa jej ihned přemístíme opět do nádoby s vodou, při přesunech mezi jednotlivými vodními prostředími se snažíme, aby těleso bylo na vzduchu co nejkratší dobu.

Jakmile zvážíme všechna nasáklá tělesa hydrostaticky, odstraníme z vah sestavu pro hydrostatické vážení a každé těleso zvážíme na vzduchu. Povrch každého tělesa před vážením vždy otřeme navlhčeným hadříkem.



Obr. 6: Sestava pro hydrostatické vážení

Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti provedeme dle vztahů:

- Nasákavost NV s přesností na 0,1 %

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

- Zdánlivá pórovitost PZ s přesností na 0,1 %

$$PZ = \frac{m_n - m_s}{m_n - m_{nw}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.9)$$

- Objemová hmotnost OH s přesností na 10 kg/m³

$$OH = \frac{m_s}{m_n - m_{nw}} \cdot \rho_v \quad [kg/m^3] \quad (3.10)$$

m_s	hmotnost zkušební tělesa po vysušení [g]
m_n	hmotnost nasáklého zkušební tělesa váženého na vzduchu [g]
m_{nw}	hmotnost nasáklého zkušební tělesa váženého hydrostaticky [g]
ρ_v	hustota kapaliny, v níž bylo zkušební těleso ponořeno při hydrostatickém vážení [kg/m ³]

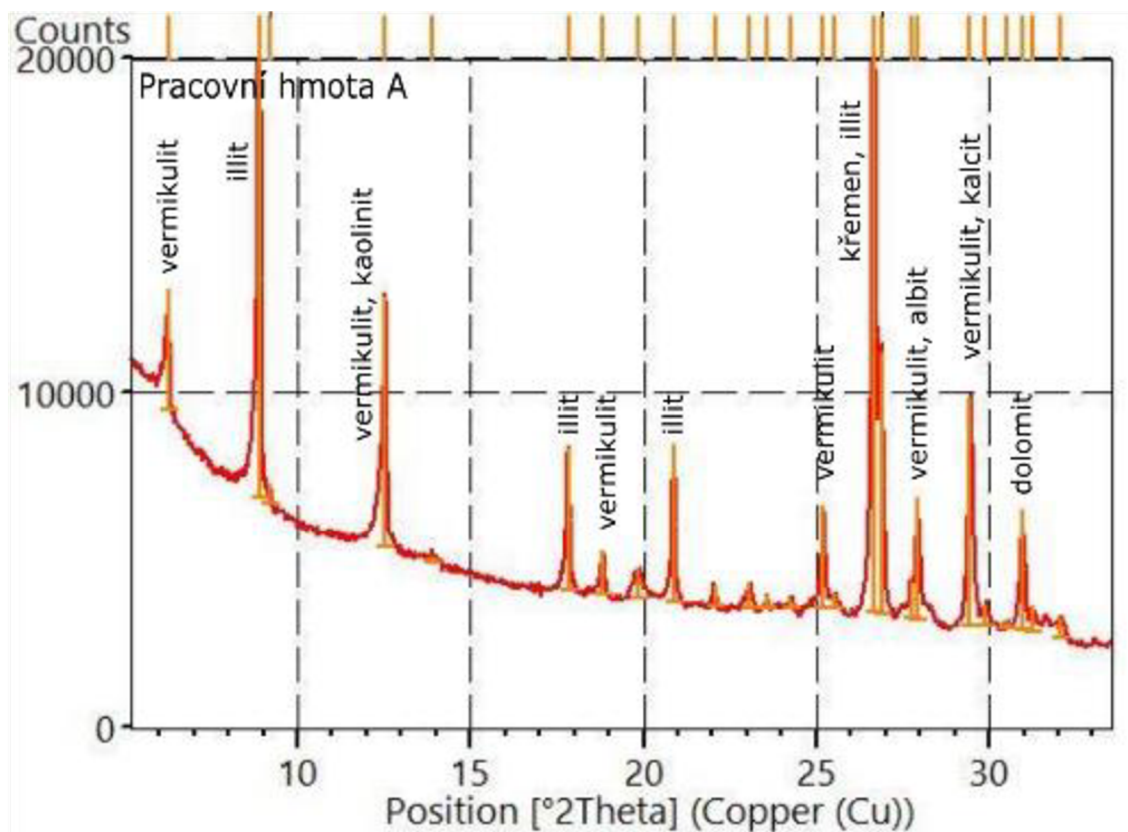
[23]

4 Vstupní suroviny

4.1 Suroviny z výrobního závodu Heluz

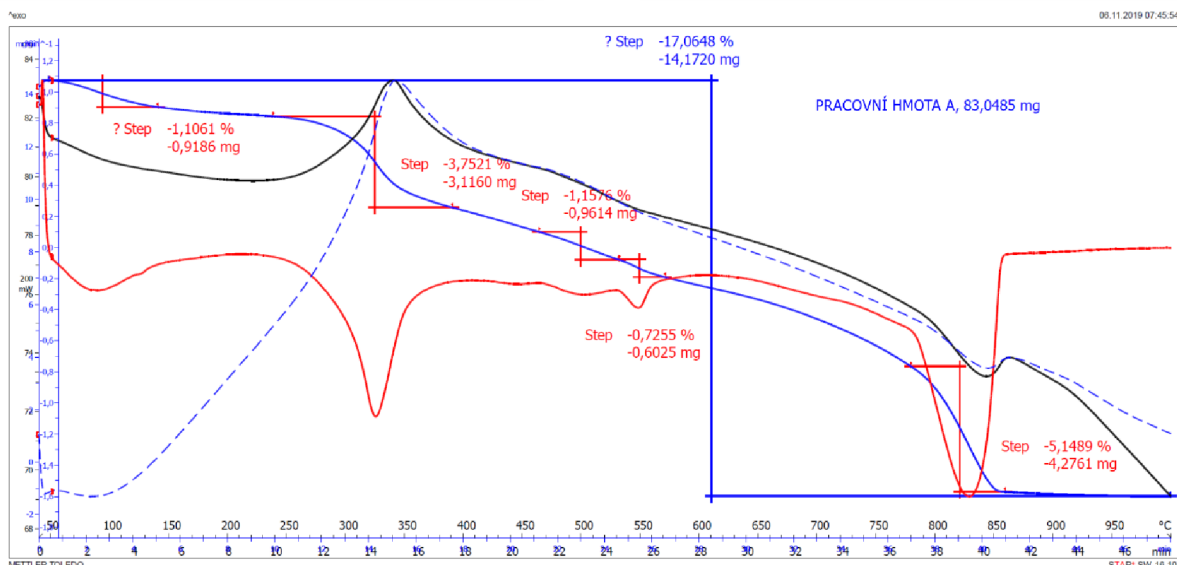
Pro praktickou část práce byly použity suroviny z výrobního závodu Heluz, vyrábějícího pálené zdící tvarovky. Pro účely této práce bude dále závod označován jako „závod A“ a pracovní hmota zde získaná jako „pracovní hmota A“. Dle informací poskytnutých závodem jsou k jílové zemině natěžené v místním hliništi přidávány další korekční suroviny v množství, které je závislé na aktuální výrobě. Mezi tyto suroviny patří vysušený papírenský kal, dřevěné piliny, uhelný prach a v malém množství cihelný prach z finální úpravy rozměrů tvarovek broušením.

Po homogenizaci jílové zeminy s ostatními příměsemi uvedenými výše byla pracovní hmota A odebrána z dopravníku, který je umístěn ihned za protlačovacím mísidlem.



Obr. 7: výstup z rentgenové difrakční analýzy pracovní hmoty A

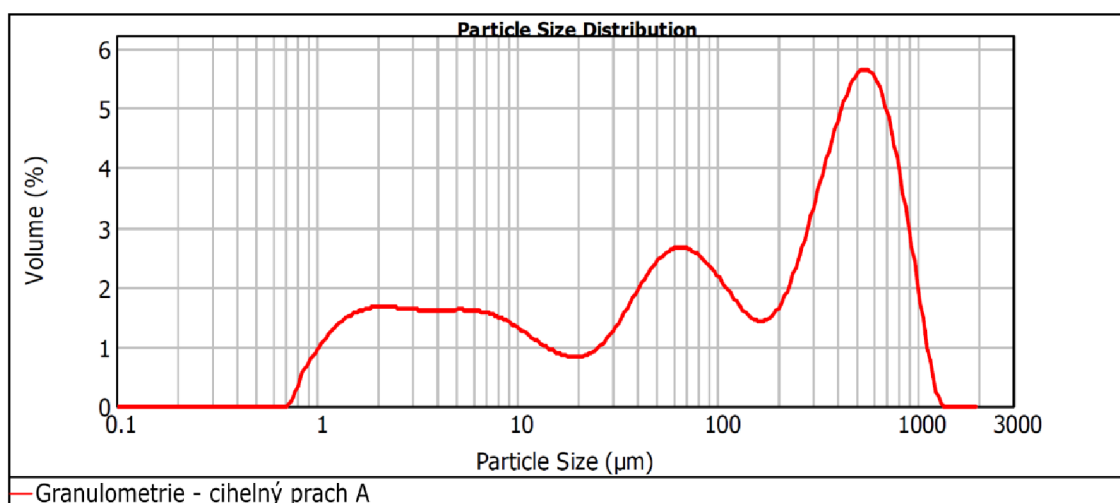
Na výstupu z RTG difrakční analýzy je patrné, že pracovní hmota A je mineralogicky tvořena zejména ilitem, vermikulitem, kaolinitem, kalcitem, albitem, dolomitom a křemenem. Obsah kalcitu a illitu (vermikulitu) byl potvrzen také diferenciální termickou analýzou suroviny.



Obr. 8: výstup z termogravimetrické a diferenciální termické analýzy pracovní hmoty A

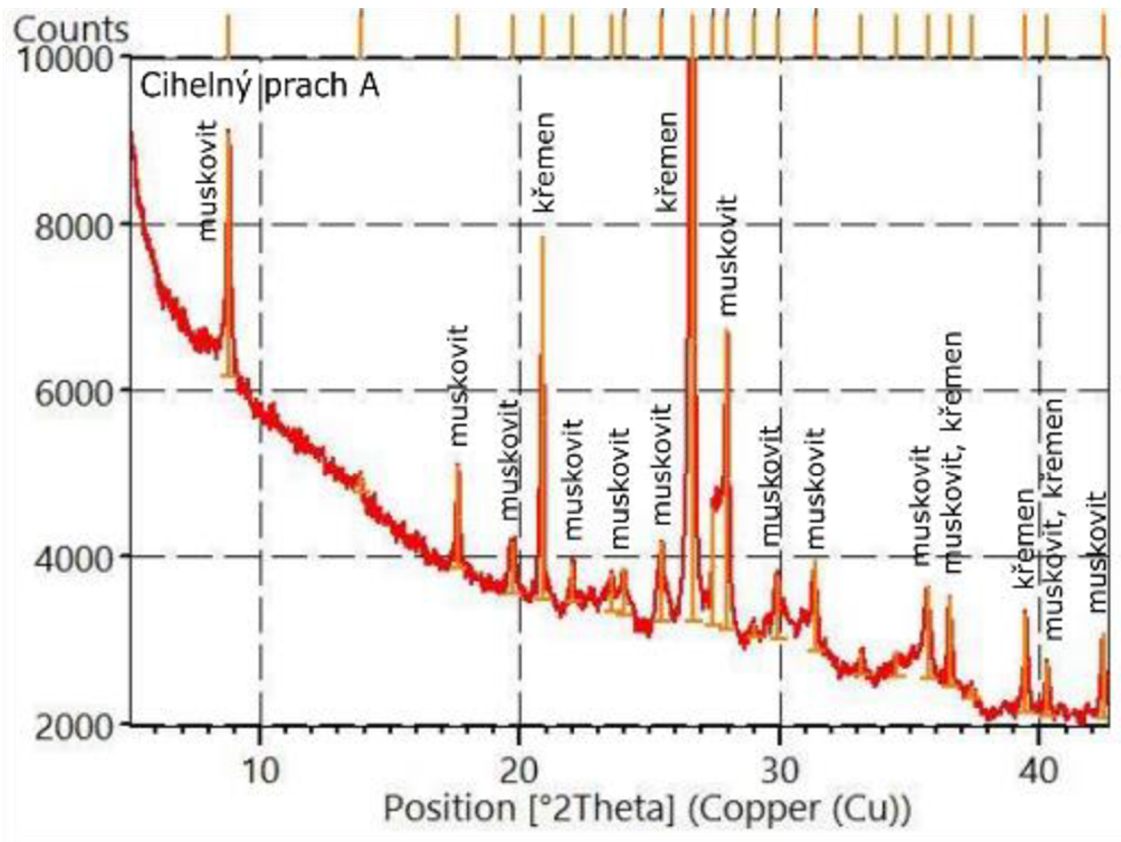
Na výstupu z termogravimetrické a diferenciální termické analýzy je patrná ztráta žíháním pracovní hmoty A, která činila 17,1 % a endotermické reakce při 80 °C (ztráta hygroskopické vody), 325 °C (ztráta vody vázané v Illitu) a poté při 825 °C (rozklad kalcitu).

Ze závodu A byl získán také cihelný prach vznikající při finální úpravě rozměrů pálených zdíček tvarovek broušením. Dále je prach označován jako „cihelný prach A“. Předpokladem bylo, že prach tvoří z velké většiny jemnozrné částičky cihelného střepu a z velmi malé části také brusný materiál oddělující se z brusných kotoučů při jejich namáhání. Prach je tvořen pracovní hmotou A, která prošla výpalem při maximální pálicí teplotě 880 °C.



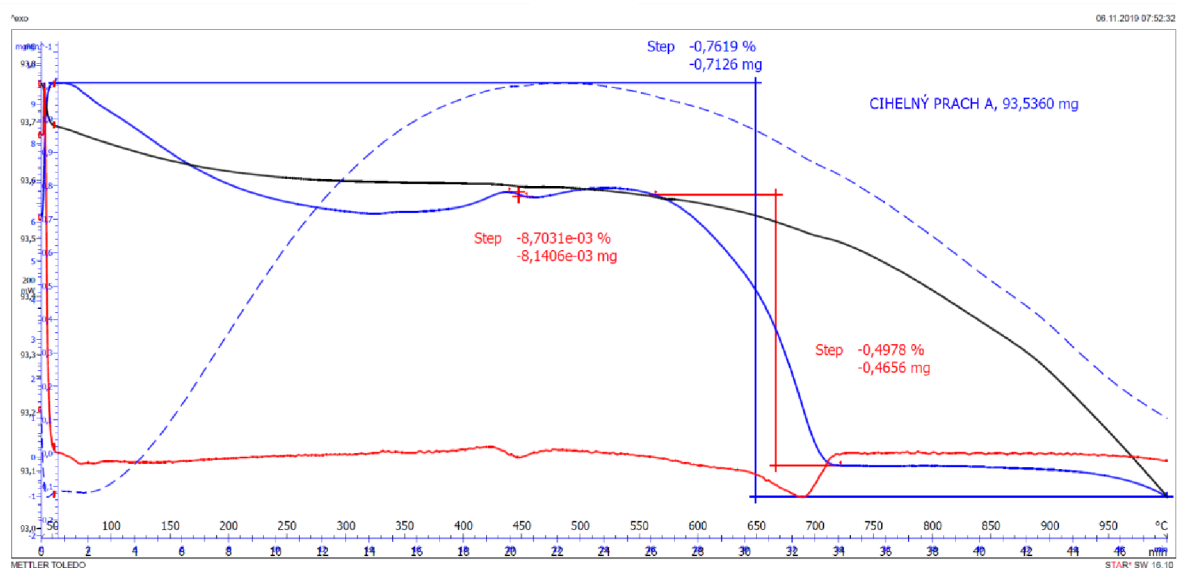
Obr. 9: distribuce velikosti částic cihelného prachu A

Při analýze cihelného prachu A laserovou granulometrií bylo zjištěno, že velikost částic se v mezidecilovém rozpětí $d_{0,1}$ – $d_{0,9}$ pohybuje v rozmezí 2,52 – 699,68 μm s průměrnou velikostí zrn 108,08 μm .



Obr. 10: výstup z rentgenové difrakční analýzy cihelného prachu A

Pomocí RTG difrakční analýzy byl v cihelném prachu identifikován křemen a muskovit.

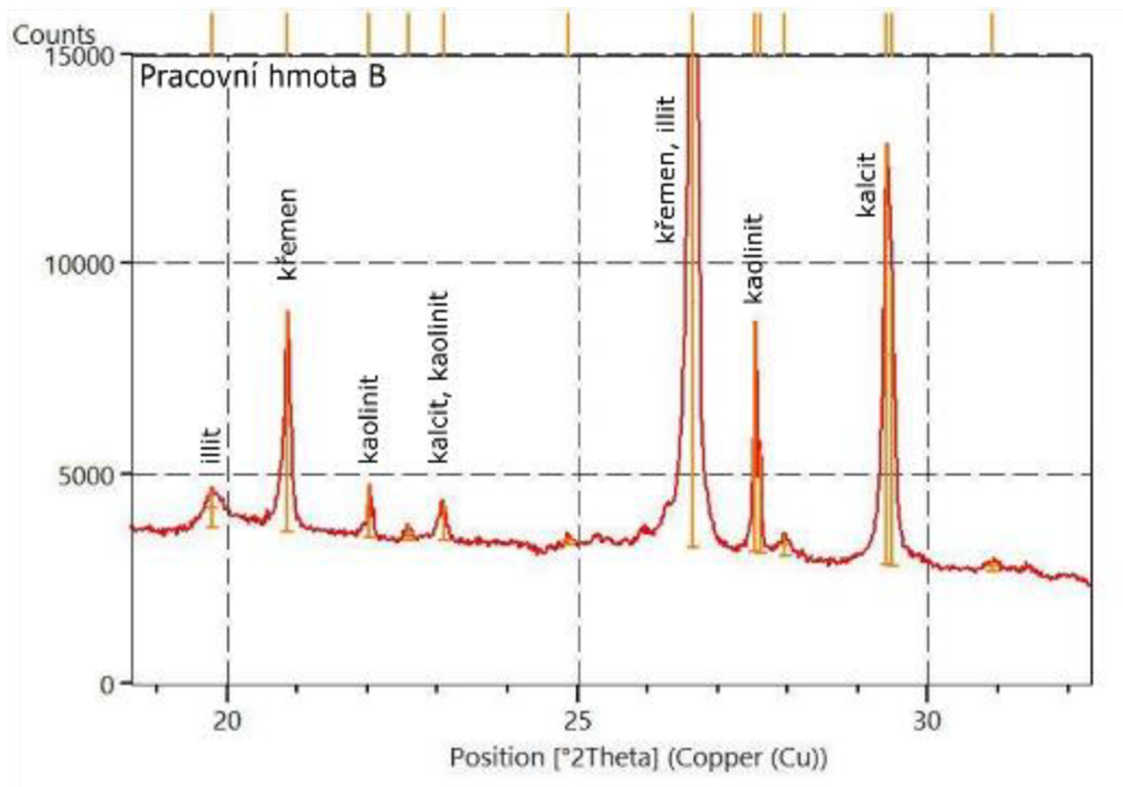


Obr. 11: výstup z termogravimetrické a diferenciální termické analýzy cihelného prachu A

Diferenciální termická analýza ukázala celkovou ztrátu žháním do 1000 °C 0,76 %. Většinu z této ztráty (0,5 %) představuje odchod CO₂ při rozkladu uhličitánů, endotermická reakce při 690 °C.

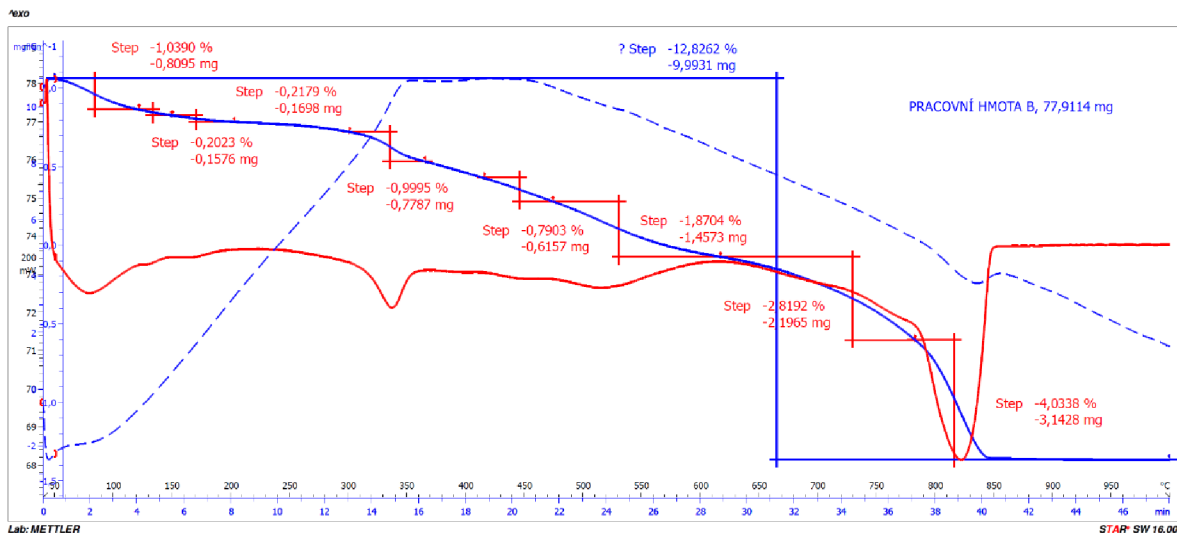
4.2 Suroviny z výrobního závodu Wienerberger

Pro porovnání vlivu cihelného prachu na finální vlastnosti keramického střepe byla použita také surovina, z výrobního závodu Wienerberger, která je pro účely této práce dále označována jako „pracovní hmota B“.



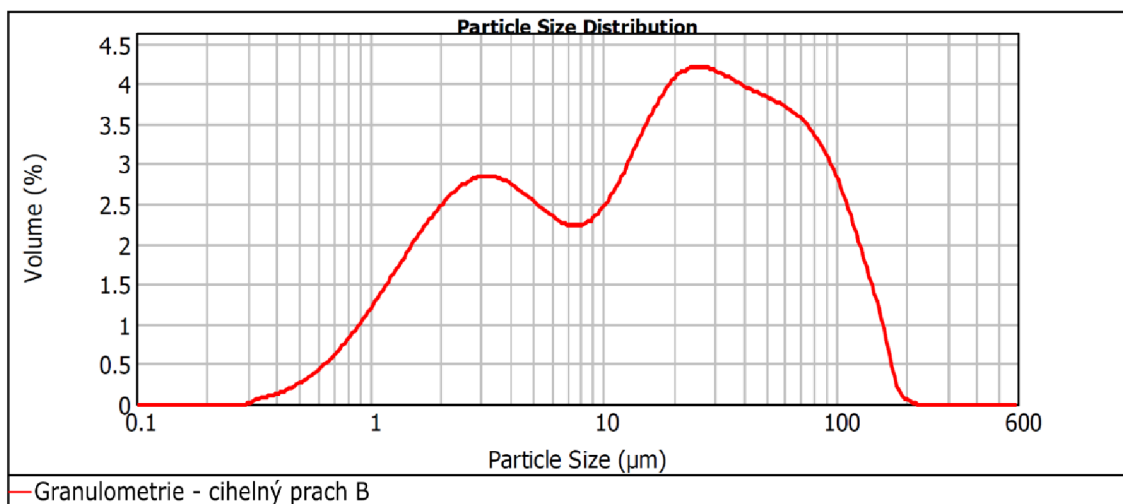
Obr. 12: výstup z rentgenové difrakční analýzy pracovní hmoty B

Na výstupu z RTG difrakční analýzy je patrné, že pracovní hmota B je mineralogicky tvořena zejména ilitem, kaolinitem, kalcitem a křemenem. Obsah jílových minerálů byl potvrzen diferenční termickou analýzou, kde byly zaznamenány charakteristické endotermické reakce v rozmezí teplot 50 °C – 200 °C (cca 1,3 %) a v intervalu 300 °C – 370 °C (cca 1,0 %). Přítomnost kaolinitu byla prokázána rozkladem v teplotním intervalu 500 °C – 600 °C. Celková ztráta žháním pracovní hmoty B, činila 12,8 %.



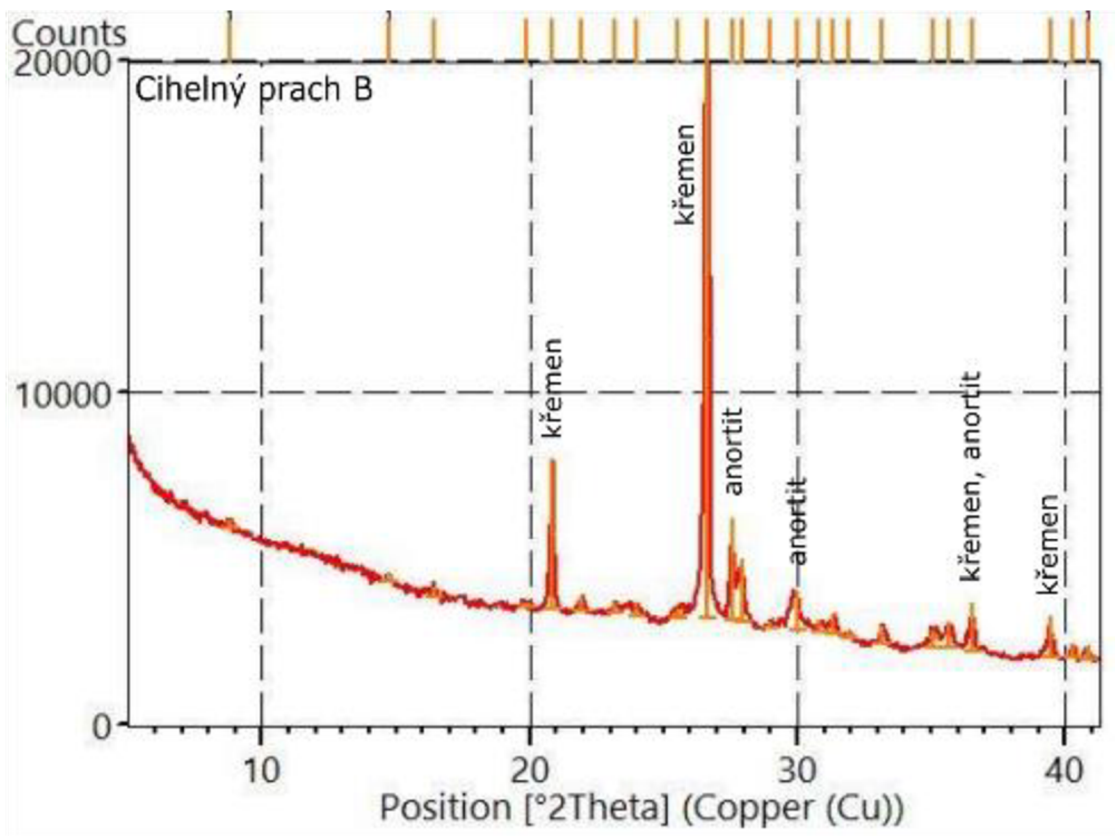
Obr. 13: výstup z termogravimetrické a diferenciální termické analýzy pracovní hmoty B

Cihelný prach, vznikající při finální úpravě rozměrů pálených zdících tvarovek broušením ve výrobním závodě Wienerberger je označován písmenem „B“. Prach je tvořen jemnými částicemi cihelného střeptu, který je vypálen z pracovní hmoty B.



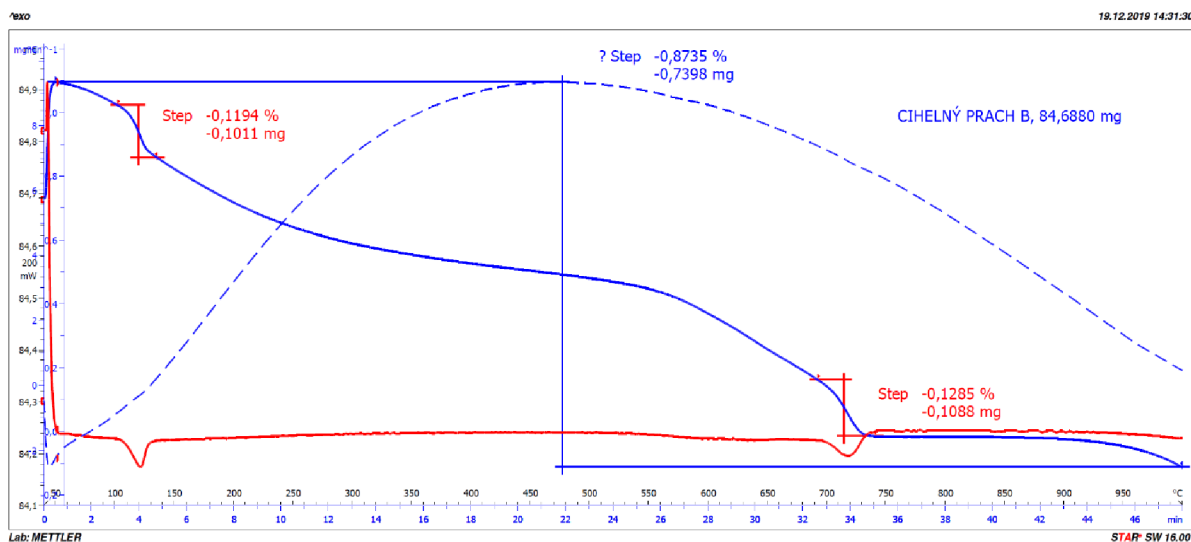
Obr. 14: distribuce velikostí částic cihelného prachu B

Při analýze cihelného prachu B laserovou granulometrií bylo zjištěno, že velikost částic se v mezidecilovém rozpětí $d_{0,1} - d_{0,9}$ pohybuje v rozmezí 1,80 – 84,15 μm s průměrnou velikostí zrn 17,60 μm .



Obr. 15: výstup z rentgenové difrakční analýzy cihelného prachu B

Pomocí RTG difrakční analýzy byl v cihelném prachu identifikován křemen a anortit.



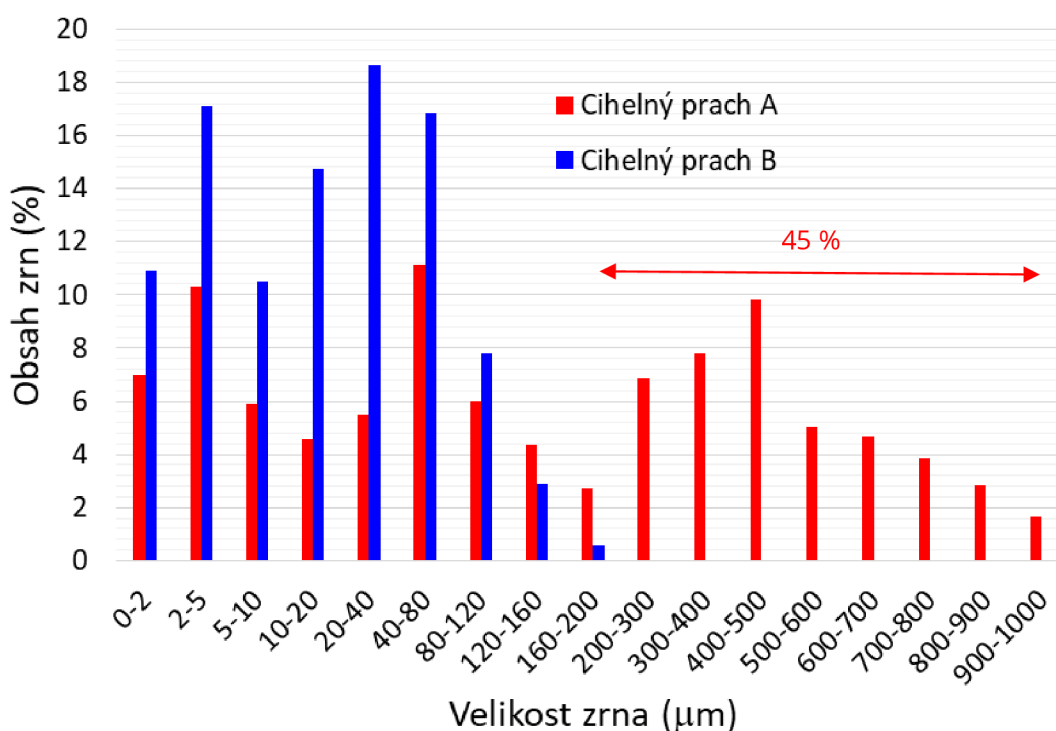
Obr. 16: výstup z termogravimetrické a diferenciální termické analýzy cihelného prachu B

Ztráta žiháním cihelného prachu B činila 0,9 %. Viditelná je endotermická reakce při 120 °C (ztráta hygroskopické vody), a při 720 °C (dodatečný rozklad uhličitánů).

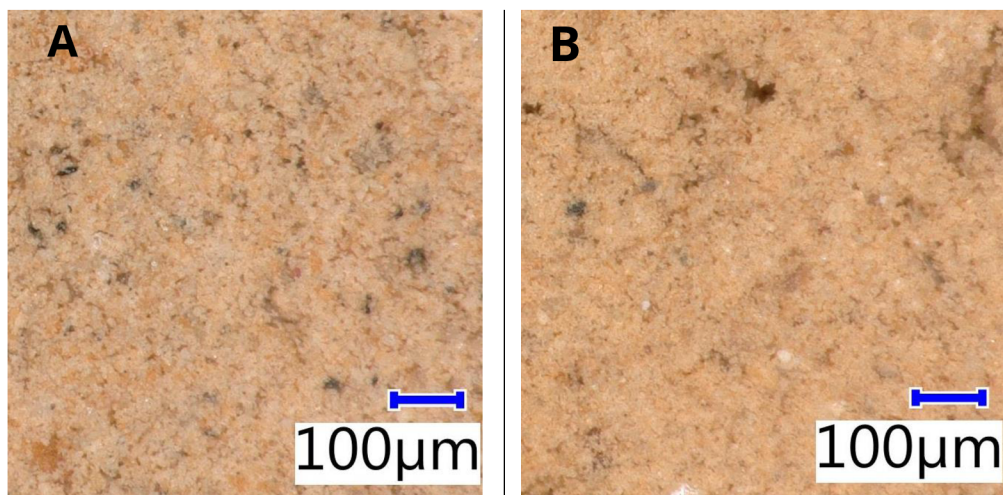
5 Ověření vlivu cihelného prachu na vlastnosti vypáleného keramického střepu

5.1 Návrh nových receptur

Pro komplexní ověření vlivu cihelného prachu na vypálený keramický střep byly vybrány dva odpadní materiály s různou granulometrií. Cihelný prach A je v porovnání s prachem B více hrubozrný. Téměř 45 % zrn je větších, než je maximální velikost částice prachu B. Nejmenší zrno prachu A má průměr 0,6 μm , jemný prach B obsahuje i zrna menší. Byla připravena referenční zkušební tělesa bez cihelného prachu a byl testován přídavek prachu od 20 % až po 90 %.



Graf 1: Distribuce zrn cihelného prachu A a B



Obr. 17: mikroskopický snímek cihelného prachu A a B

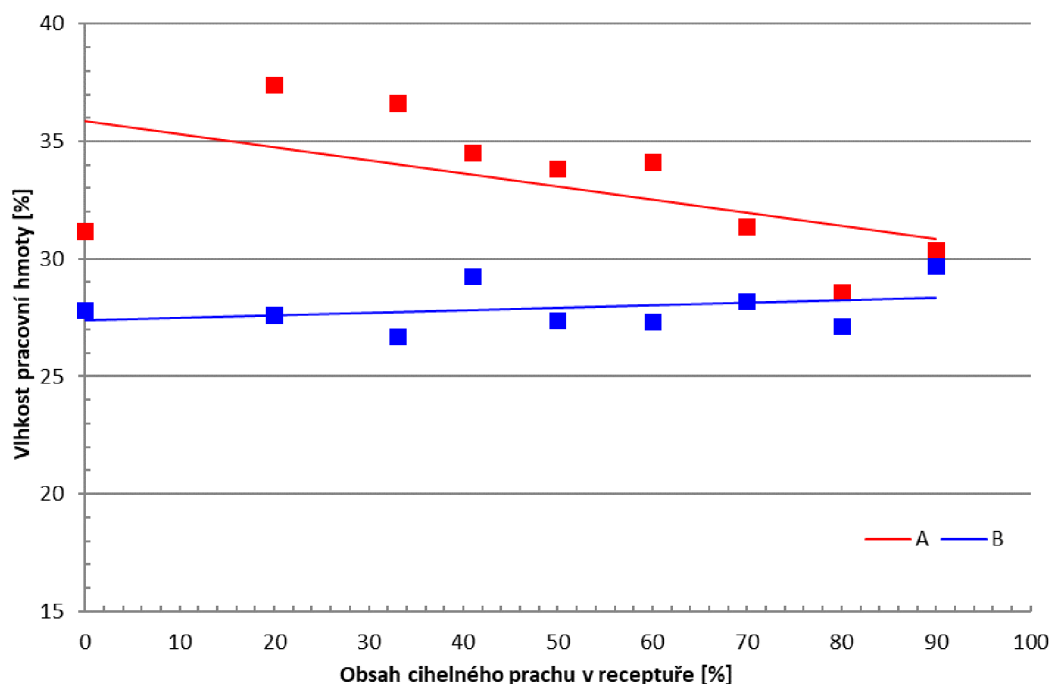
Značení zkušebních těles										
receptura	teplota výpalu	dávka ohrusu								
		0 %	20 %	33 %	41 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
A	830 °C	R 1/0	R 1/20	R 1/33	R 1/41	R 1/50	R 1/60	R 1/70	R 1/80	R 1/90
	880 °C	R 2/0	R 2/20	R 2/33	R 2/41	R 2/50	R 2/60	R 2/70	R 2/80	R 2/90
	930 °C	R 3/0	R 3/20	R 3/33	R 3/41	R 3/50	R 3/60	R 3/70	R 3/80	R 3/90
B	830 °C	H 1/0	H 1/20	H 1/33	H 1/41	H 1/50	H 1/60	H 1/70	H 1/80	H 1/90
	880 °C	H 2/0	H 2/20	H 2/33	H 2/41	H 2/50	H 2/60	H 2/70	H 2/80	H 2/90
	930 °C	H 3/0	H 3/20	H 3/33	H 3/41	H 3/50	H 3/60	H 3/70	H 3/80	H 3/90

Tab. 1: značení zkušebních těles

5.2 Příprava zkušebních těles

Poté, co byla stanovena aktuální vlhkost pracovních hmot A a B, byla dle hmotnosti sušiny vypočtena dávka cihelného prachu. K pracovní hmotě A byl přidáván cihelný prach A (dále receptury A) a stejně tak k pracovní hmotě B cihelný prach B (dále receptury B). Bylo připraveno 9 receptur s rostoucím podílem cihelného prachu ve výsledném plastickém těstě, od referenční receptury čistě z pracovní hmoty A či B, tedy s 0 % cihelného prachu, až po 90% dávku prachu. Byly zvoleny 3 různé maximální teploty výpalu, 830 °C, 880 °C a 930 °C, tedy teploty v okolí teploty výpalu používané ve výrobním závodě A. Pracovní hmota byla spolu s příslušným cihelným prachem homogenizována v kolovém mlýně.

Zároveň byla ještě v kolovém mlýně a poté při ručním hnětení upravena vlhkost tak, aby bylo vytvořeno plastické těsto o optimálním deformačním poměru (viz 3.1 Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem). Přídavek cihelného prachu k surovině A se projevil snižováním optimální vlhkosti pracovní hmoty. Přídavek cihelného prachu k surovině B (jemný prach) neměl na optimální vlhkost pracovní hmoty žádný vliv. Viz Graf 2. Poté byla z každého těsta za pomoci formy a drátu vytvořena zkušební tělesa ve tvaru cihelk o rozměrech 100 x 50 x 15 mm.



Graf 2: vliv obsahu cihelného prachu v receptuře na vlhkost pracovní hmoty

Od každé receptury byla připravena tři zkušební tělesa pro každou teplotu výpalu. Celkem tedy 162 zkušebních těles. Tělesa byla vysušena v laboratorním prostředí a nejdříve po jednom dni byla přemístěna do sušárny, kde byla při teplotě 110 °C sušena až do ustálené hmotnosti. Po vysušení těles na nich bylo stanoveno smrštění sušením. Následně byla tělesa vypálena na zvolené maximální teploty (nárůst 4 °C/min; izotermická výdrž na maximální teplotě 1 hodina). Na vypálených tělesech bylo stanoveno smrštění pálením a celkové smrštění. Aby bylo možné na zkušebních tělesech stanovit součinitel tepelné vodivosti, bylo zapotřebí povrch každého tělesa z jedné strany mírně zbrousit tak, aby bylo docíleno co nejrovnějšího povrchu, který mohl být po výpalu vypuklý, vydutý či obsahoval nerovnosti již z vytváření. Po stanovení součinitele tepelné vodivosti byly na výpalcích prováděny zkoušky pro zjištění dalších fyzikálně – mechanických vlastností: pevnost v ohybu, objemová hmotnost, nasákavost a zdánlivá pórovitost.

5.3 Výsledky provedených zkoušek

dávka prachu [%]	označení receptury	teplota výpalu [°C]	značení zkušebních těles	d [-]	w [%]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	OH [kg/m ³]	NV [%]	PZ [%]	f _{cf} [MPa]	λ [W/(m·K)]
0	A Ref	830	R 1/0	0,58	31,17	-4,7	-0,1	-5,1	1420	34,6	49,1	7,0	0,2963
		880	R 2/0				0,0	-4,1	1430	33,9	48,5	8,5	0,2954
		930	R 3/0				0,0	-5,0	1440	33,3	48,0	11,0	0,2953
20	A 20 %	830	R 1/20	0,58	37,42	-5,0	-0,6	-5,6	1400	35,9	50,1	4,6	0,2907
		880	R 2/20				-0,3	-5,1	1370	37,1	50,9	4,4	0,2949
		930	R 3/20				-0,2	-5,5	1320	40,1	53,0	4,1	0,2869
33	A 33 %	830	R 1/33	0,58	36,66	-4,3	-0,6	-4,9	1400	35,9	50,2	4,5	0,2822
		880	R 2/33				-0,2	-4,4	1400	35,8	50,1	4,5	0,2827
		930	R 3/33				-0,5	-4,8	1390	36,7	50,9	5,2	0,2866
41	A 41 %	830	R 1/41	0,59	34,49	-3,8	0,5	-3,9	1460	32,7	47,8	4,5	0,2856
		880	R 2/41				-0,2	-3,6	1460	33,2	48,3	4,2	0,2803
		930	R 3/41				0,1	-3,6	1460	33,2	48,3	4,6	0,2862
50	A 50 %	830	R 1/50	0,59	33,84	-3,5	-1,1	-4,9	1450	33,2	48,2	3,7	0,2791
		880	R 2/50				-0,5	-3,9	1450	33,6	48,6	3,4	0,2799
		930	R 3/50				-0,6	-4,0	1460	33,3	48,5	4,1	0,2760
60	A 60 %	830	R 1/60	0,55	34,14	-2,0	-0,3	-2,0	1390	36,1	50,2	1,2	0,2773
		880	R 2/60				-0,3	-2,4	1390	36,6	50,8	1,5	0,2788
		930	R 3/60				-0,5	-2,8	1390	36,4	50,7	2,1	0,2711
70	A 70 %	830	R 1/70	0,57	31,36	-2,0	0,2	-2,0	1510	29,8	45,0	2,4	0,2780
		880	R 2/70				0,0	-2,4	1490	31,9	47,5	1,5	0,2731
		930	R 3/70				-0,7	-2,2	1500	31,6	47,2	3,3	0,2733
80	A 80 %	830	R 1/80	0,57	28,60	-1,2	0,2	-1,5	1540	29,3	45,2	2,3	0,2760
		880	R 2/80				0,1	-1,0	1540	29,9	46,0	1,1	0,2648
		930	R 3/80				-0,1	-0,9	1540	29,6	45,6	2,7	0,2534
90	A 90 %	830	R 1/90	0,58	30,36	-0,2	0,2	-0,4	1510	30,6	46,2	0,9	0,2584
		880	R 2/90				0,1	0,1	1520	30,7	46,7	0,8	0,2550
		930	R 3/90				-0,3	-0,3	1530	30,0	45,9	0,8	0,2557

Tab. 2: hodnoty fyzikálně – mechanických vlastností receptur A

Tab. 3: hodnoty fyzikálně – mechanických vlastností receptur B

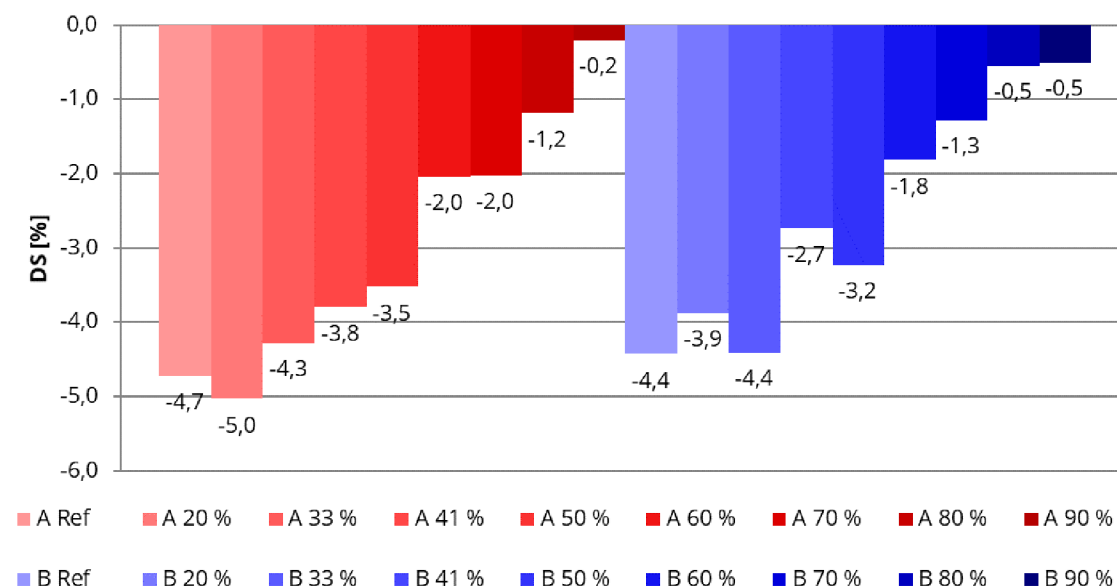
dávka prachu [%]	označení receptury	teplota výpalu [°C]	značení zkušebních těles	d [-]	w [%]	DS [%]	DP [%]	DC [%]	OH hydro [kg/m ³]	NV [%]	PZ [%]	f _{cf} [MPa]	λ [W/(m·K)]
0	B Ref	830	H 1/0	0,57	27,82	-4,4	-0,7	-5,0	1510	25,3	38,2	7,1	0,3654
		880	H 2/0				-0,9	-5,5	1520	26,2	39,9	7,6	0,3680
		930	H 3/0				-1,3	-5,6	1510	26,6	40,2	7,3	0,4009
20	B 20 %	830	H 1/20	0,60	27,63	-3,9	-0,4	-4,1	1540	25,9	40,0	7,8	0,3420
		880	H 2/20				-0,8	-4,4	1550	26,1	40,4	8,4	0,3828
		930	H 3/20				-0,8	-5,0	1550	25,9	40,3	8,9	0,3929
33	B 33 %	830	H 1/33	0,58	26,69	-4,4	-0,7	-5,0	1610	24,0	38,7	8,2	0,3545
		880	H 2/33				-0,7	-4,7	1610	24,3	39,1	9,2	0,3797
		930	H 3/33				-0,7	-5,5	1610	24,1	38,7	9,1	0,3779
41	B 41 %	830	H 1/41	0,58	29,25	-2,7	-0,5	-3,0	1540	27,1	41,8	6,9	0,3358
		880	H 2/41				-0,6	-3,3	1540	27,1	41,8	6,3	0,3590
		930	H 3/41				-0,6	-3,5	1550	26,7	41,4	8,9	0,3644
50	B 50 %	830	H 1/50	0,59	27,39	-3,2	-0,7	-3,6	1580	25,6	40,5	5,5	0,3225
		880	H 2/50				-0,5	-4,1	1580	25,8	40,7	5,8	0,3295
		930	H 3/50				-0,7	-3,9	1590	25,3	40,3	6,9	0,3432
60	B 60 %	830	H 1/60	0,59	27,32	-1,8	-0,4	-2,3	1590	25,6	40,7	5,1	0,3181
		880	H 2/60				-0,5	-2,4	1590	25,4	40,5	5,4	0,3355
		930	H 3/60				-0,7	-2,3	1590	25,6	40,7	5,5	0,3414
70	B 70 %	830	H 1/70	0,60	28,21	-1,3	-0,4	-0,8	1590	25,6	40,8	3,4	0,3153
		880	H 2/70				-0,5	-1,9	1590	26,0	41,2	4,4	0,3098
		930	H 3/70				-0,8	-2,9	1560	26,9	42,1	3,4	0,3070
80	B 80 %	830	H 1/80	0,56	27,16	-0,5	-0,7	-1,9	1630	24,4	39,7	3,0	0,3132
		880	H 2/80				-0,6	-1,6	1620	25,0	40,4	3,1	0,3177
		930	H 3/80				-0,6	0,0	1600	25,6	41,1	3,0	0,2974
90	B 90 %	830	H 1/90	0,60	29,67	-0,5	-1,5	-1,4	1490	30,3	45,1	1,7	0,2504
		880	H 2/90				-0,2	-1,3	1550	27,8	43,0	1,5	0,2565
		930	H 3/90				-0,5	-1,0	1570	26,5	41,5	1,6	0,2592

5.4 Diskuse výsledků

Při výrobě keramických tvarovek je nutné dodržovat rozměrovou přesnost výrobků. Čím je výrobek přesněji vyroben, tím je nižší množství cihelného prachu, odpadního materiálu vznikajícího při jeho kalibraci. Zdící tvarovky jsou páleny na velmi nízké teploty blízké se 800 °C. Délková změna pálením je oproti délkové změně sušením velmi malá (do 1 %). Čím menší jsou rozměrové změny výrobku při sušení a pálení, tím snadnější je dodržování rozměrových tolerancí výrobku. Čím je menší smrštění sušením, tím je výrobek také méně náchylný ke vzniku prasklin.

• Délkové změny

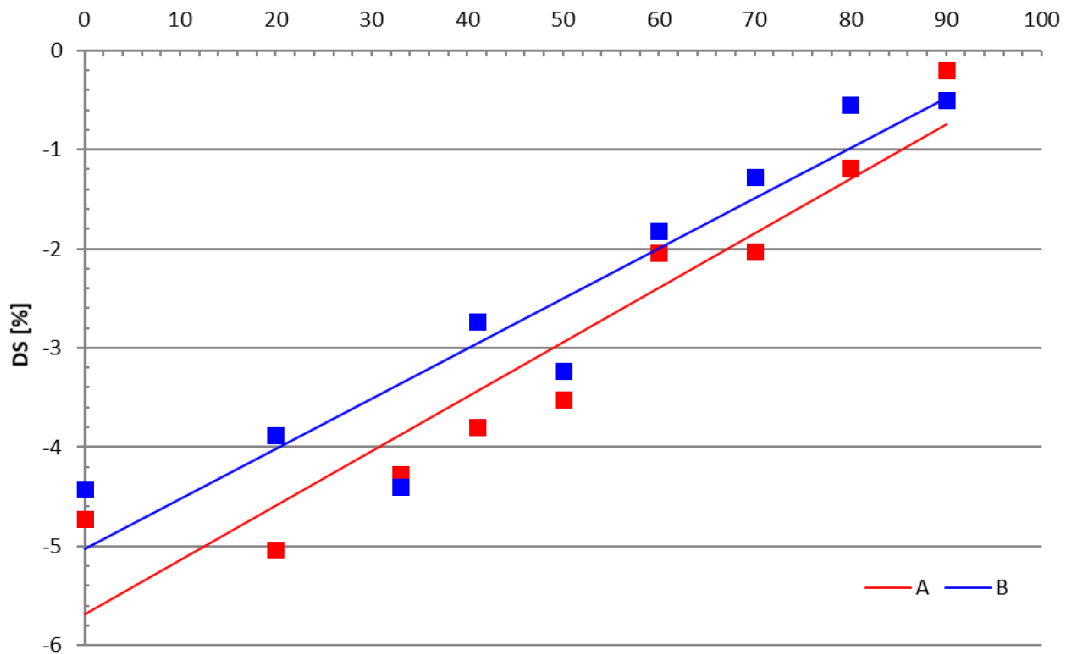
Analýzou délkových změn byl stanovován vliv přídavku cihelného prachu, velikosti jeho dávky, případně teploty výpalu, na délkovou změnu těles sušením, pálením a na délkovou změnu celkovou.



Graf 3: vliv cihelného prachu na délkovou změnu těles sušením

Již po vysušení zkušebních těles je možné pozorovat vliv dávky cihelného prachu na jejich délkové změny. Z grafického vyjádření je možné usuzovat, že rostoucí obsah cihelného prachu v receptuře snižuje smrštění výsušků. Cihelný prach tedy působí obdobně, jako běžně užívaná ostřiva.

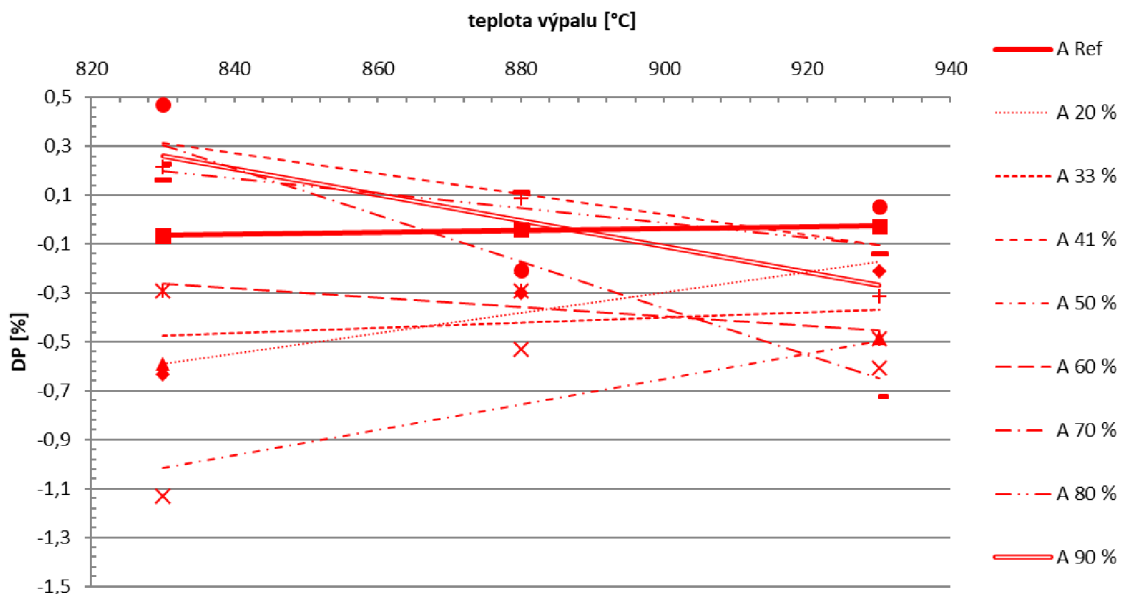
Nejnižší, téměř nulové smrštění sušením, a tedy nejvyšší rozměrovou stabilitu, vykazují receptury s 90 % cihelného prachu ve směsi. Je možné usoudit, že pracovní hmota, obsažená v receptuře pouze z 10 %, působí v takto malém množství převážně jako „pojivo“ cihelného prachu, který se již po výpalu při sušení nesmršťuje.



Obsah cihelného prachu v receptuře [%]

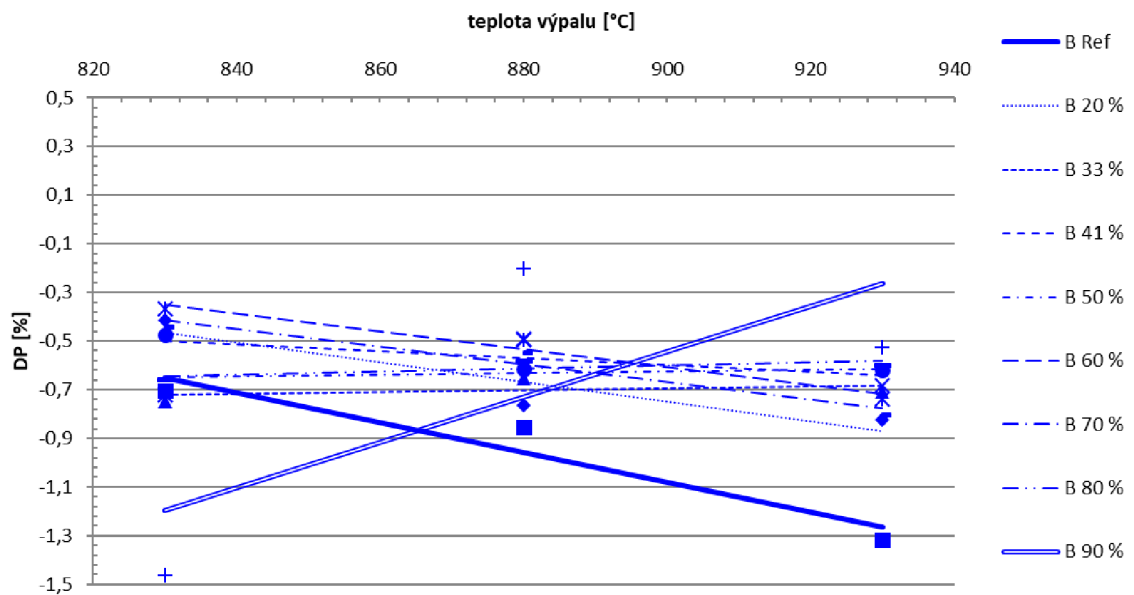
Graf 4: vliv obsahu cihelného prachu v receptuře na délkovou změnu těles sušením

Pracovní hmota A má vyšší smrštění sušením, než pracovní hmota B, vliv cihelného prachu na smrštění sušením je u obou receptur stejný.



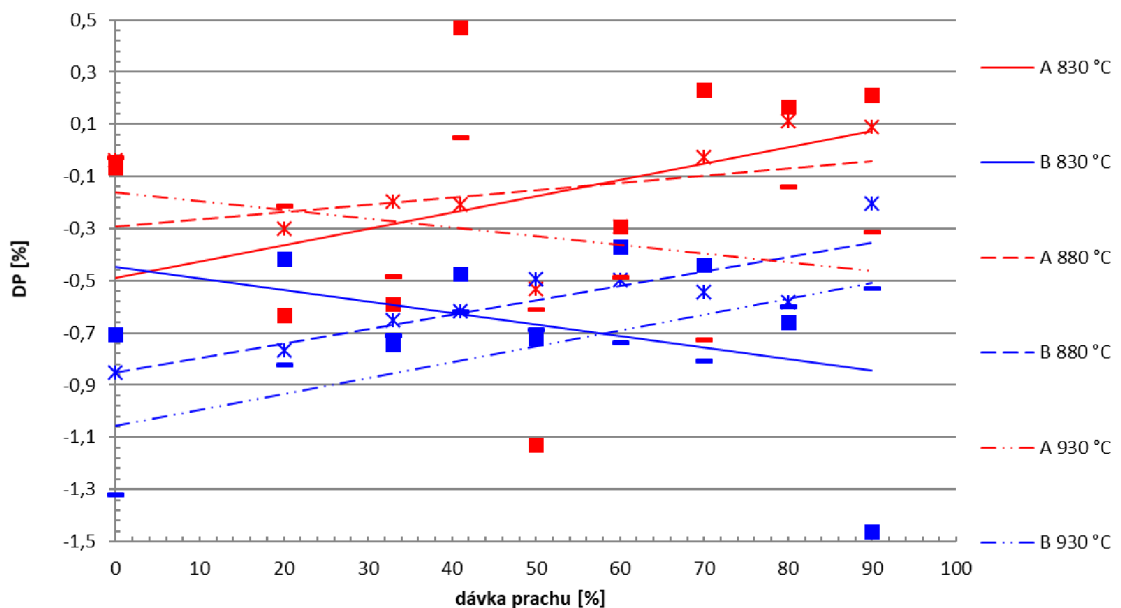
Graf 5: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na délkovou změnu těles pálením

Po výpalu zkušebních těles na zvolené teploty došlo k dalšímu smršťování. Je také možné pozorovat trend rostoucího smrštění se stoupající teplotou výpalu.



Graf 6: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na délkovou změnu těles pálením

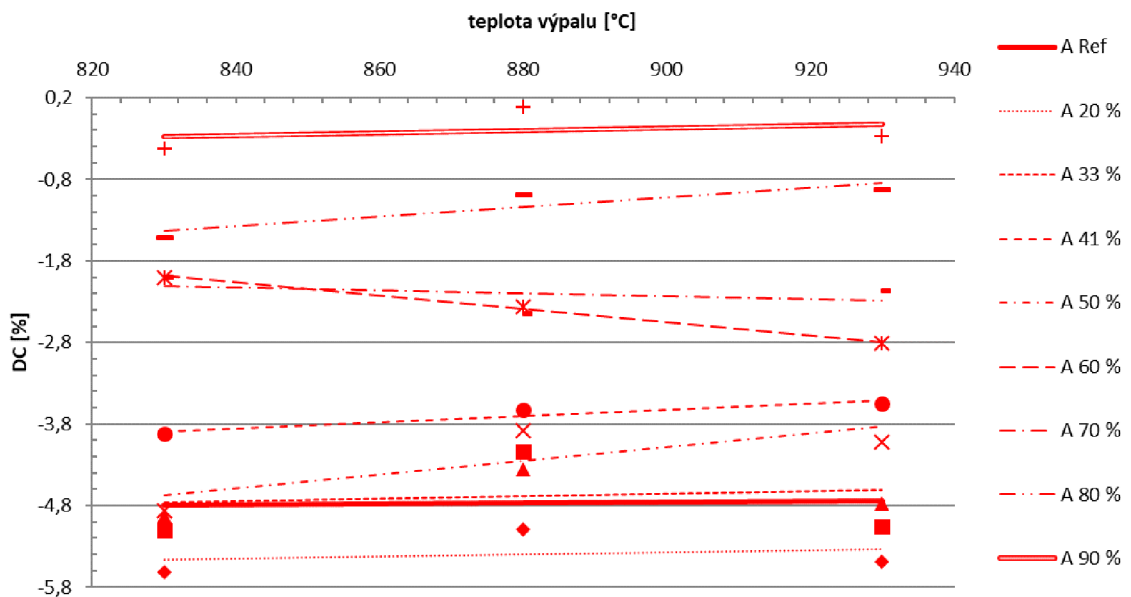
Z grafu výše je patrné, že s rostoucím poměrem cihelného prachu v receptuře převážně klesá smrštění pálením. U receptury A docházelo v některých případech dokonce k nárůstu rozměrů (zejména u nejvyšších dávek cihelného prachu). Délková změna pálením všech receptur, ať bráno jednotlivě, nebo jako závislost na obsahu cihelného prachu v receptuře, se však pohybovala do 2 %.



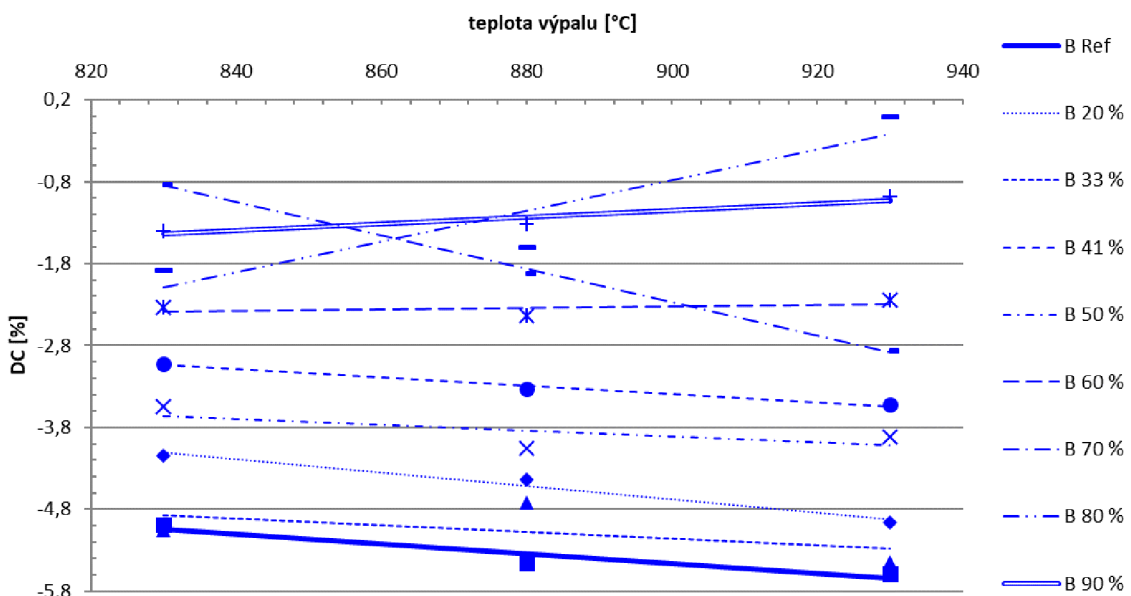
Graf 7: vliv množství cihelného prachu a teploty výpalu na délkovou změnu těles pálením

Z grafického vyjádření celkové délkové změny zkušebních těles je možné pozorovat snižující se hodnotu smrštění vzhledem k rostoucímu obsahu cihelného prachu v receptuře, stejně jako tomu je u délkové změny sušením.

Celková změna délky těles byla obecně nejnižší při nejvyšším, 90% obsahu cihelného prachu obou pracovních hmot. Pouze u receptur B bylo při dávce 70 % cihelného prachu a současně teplotě výpalu 830 °C a při dávce 80 % a současně teplotě výpalu 930 °C zaznamenáno nižší smrštění, než u nejvyšší dávky.



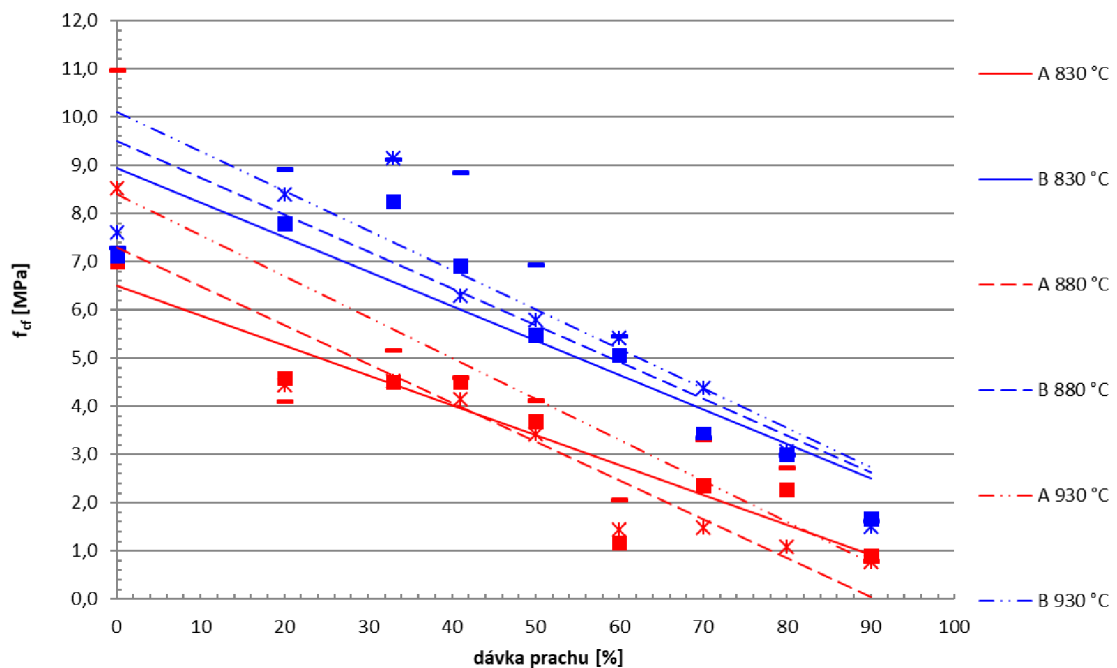
Graf 8: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na celkovou délkovou změnu těles



Graf 9: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na celkovou délkovou změnu těles

Z analýzy délkových změn je možné konstatovat, že cihelný prach má ve výrobní směsi vliv zejména na délkové změny těles při procesu sušení. V konečném důsledku snižuje rostoucí obsah cihelného prachu ve výrobní směsi celkové smrštění keramického střepeu oproti referenčnímu střepeu. Ve zvoleném rozsahu teplot, neměla měnící se teplota výpalu na délkové změny žádný významný vliv.

Analýzou pevnosti v ohybu byl stanovován vliv přídavku cihelného prachu, velikosti jeho dávky, případně teploty výpalu na maximální zatížení, kterému je zkušební těleso schopno odolat při ohybovém namáhání.



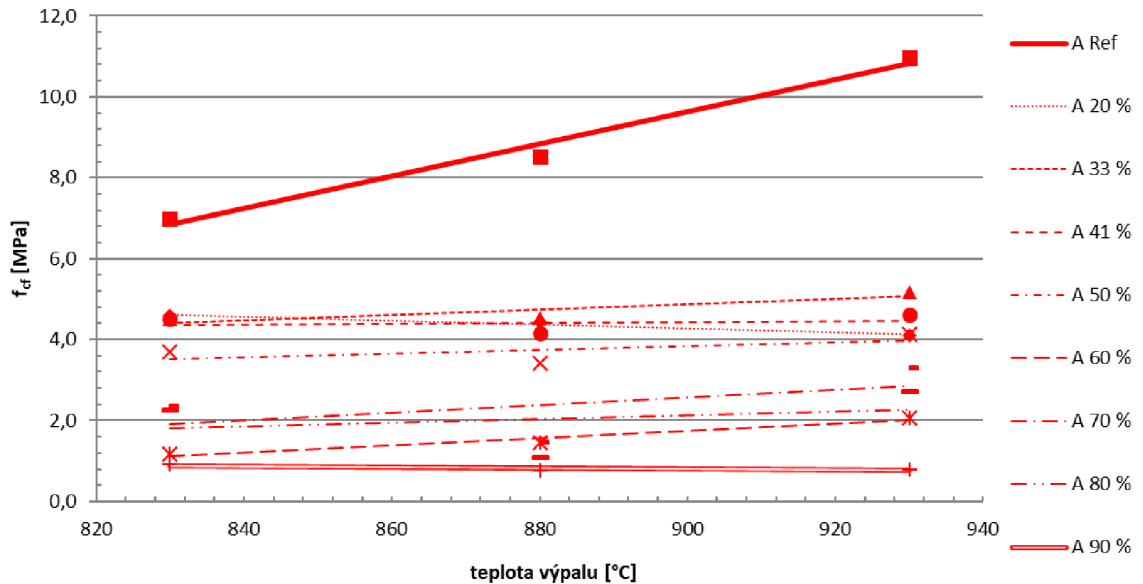
Graf 10: vliv množství cihelného prachu a teploty výpalu na pevnost těles v ohybu

Pevnost v ohybu byla stanovována pomocí Michaelisova přístroje s roztečí podpěrných břitů 80 mm a poměrem přenášeného zatížení 1:50.

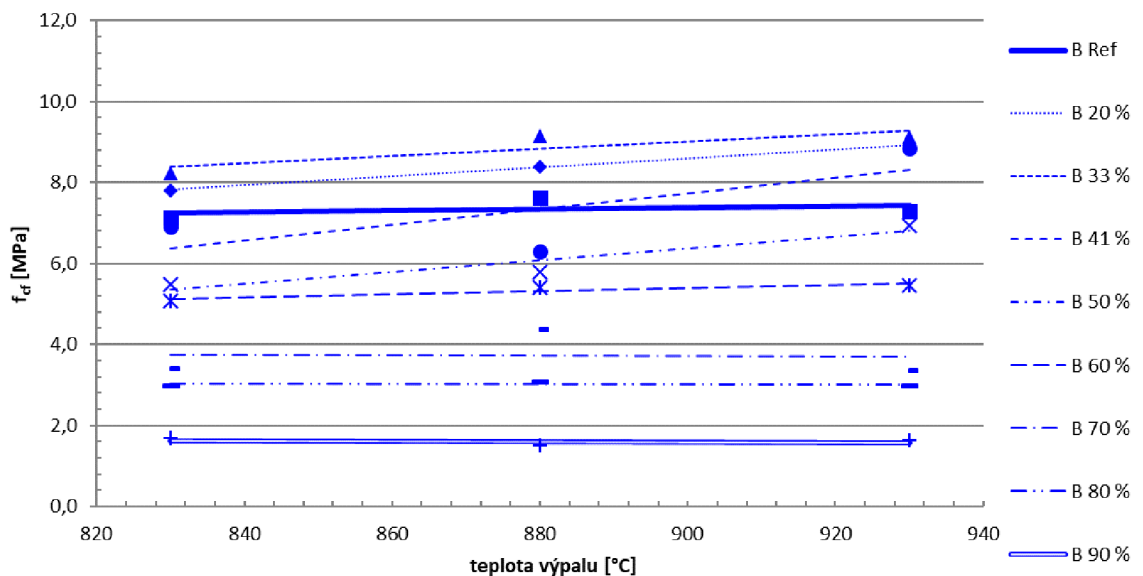
U receptur se neprojevovaly významné změny v pevnostech spolu se vzrůstající teplotou výpalu, pouze u referenční receptury A se pevnosti v ohybu zvyšovaly, a to ze 7 MPa při výpalu na teplotu 830 °C na 11 MPa při výpalu na maximální teplotu 930 °C.

Z Grafu 10 je také dobře patrné, že receptury A vykazují obecně nižší pevnosti, než receptury B.

Rostoucí obsah cihelného prachu v receptuře má za následek pokles pevnosti v ohybu. Až na výjimky u receptur B cihelný prach snižuje konečné pevnosti v ohybu. Receptury B vykazují do poměru 33 % cihelného prachu ve výrobní směsi nárůst pevnosti dle teploty výpalu až o 1,8 MPa oproti referenční receptuře B, poté následuje opět pokles.



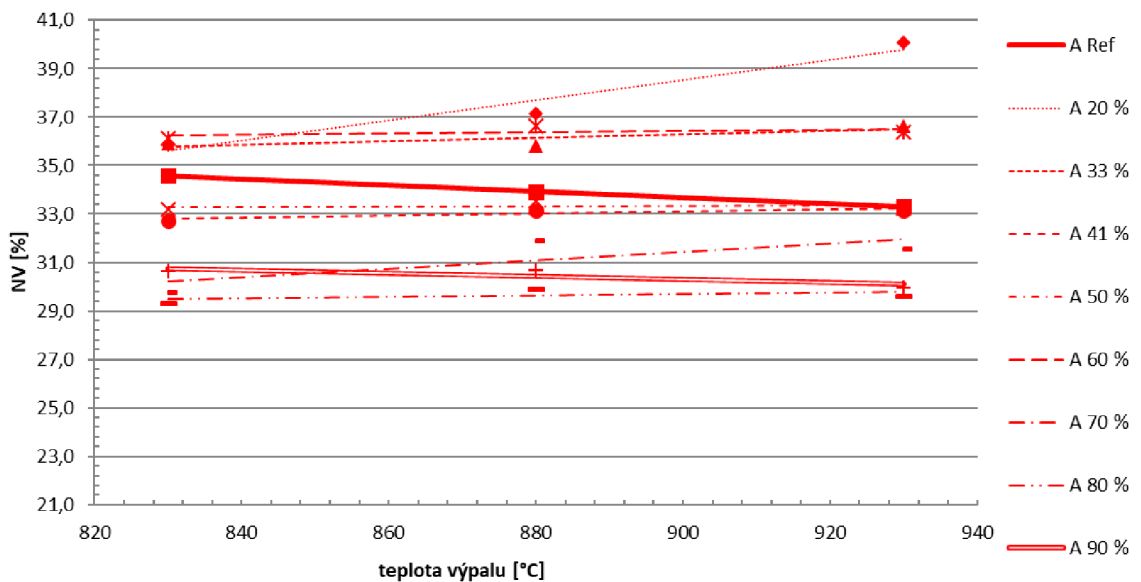
Graf 11: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na pevnost těles v ohybu



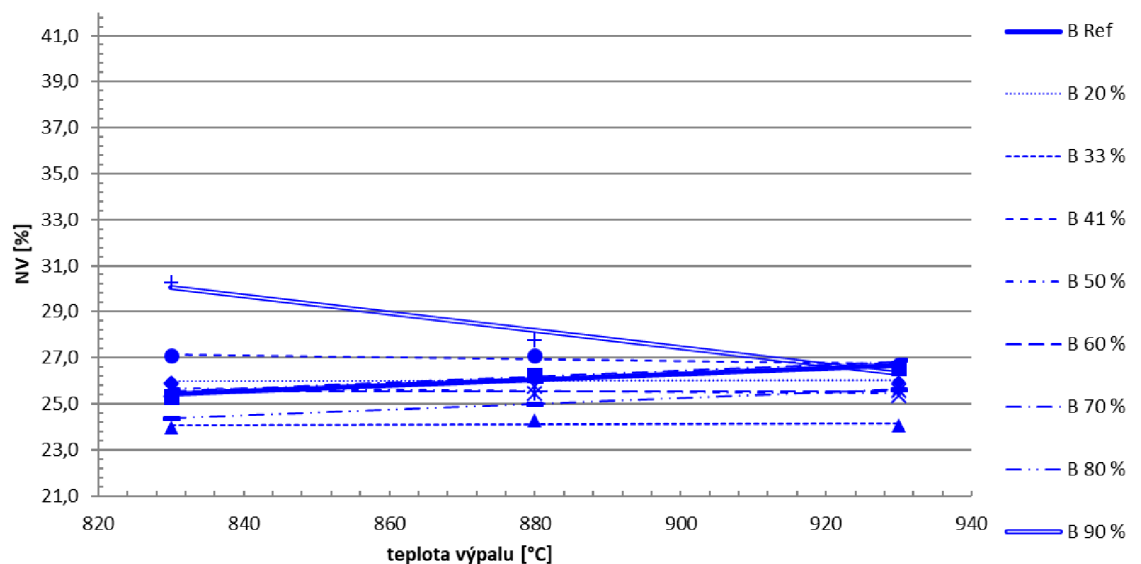
Graf 12: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na pevnost těles v ohybu

- **Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti pomocí vakuové metody a hydrostatického vážení**

Nasákavost byla stanovena zároveň při stanovení objemové hmotnosti a zdánlivé pórovitosti pomocí hydrostatického vážení těles nasáklých v exikátoru vakuovou metodou.



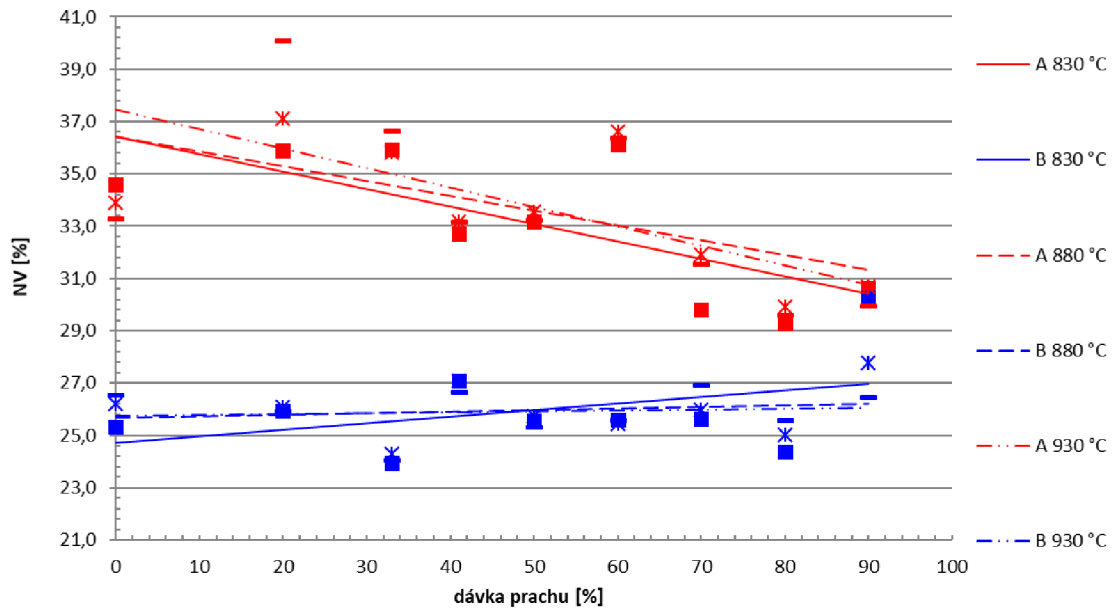
Graf 13: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na nasákavost keramického střepe



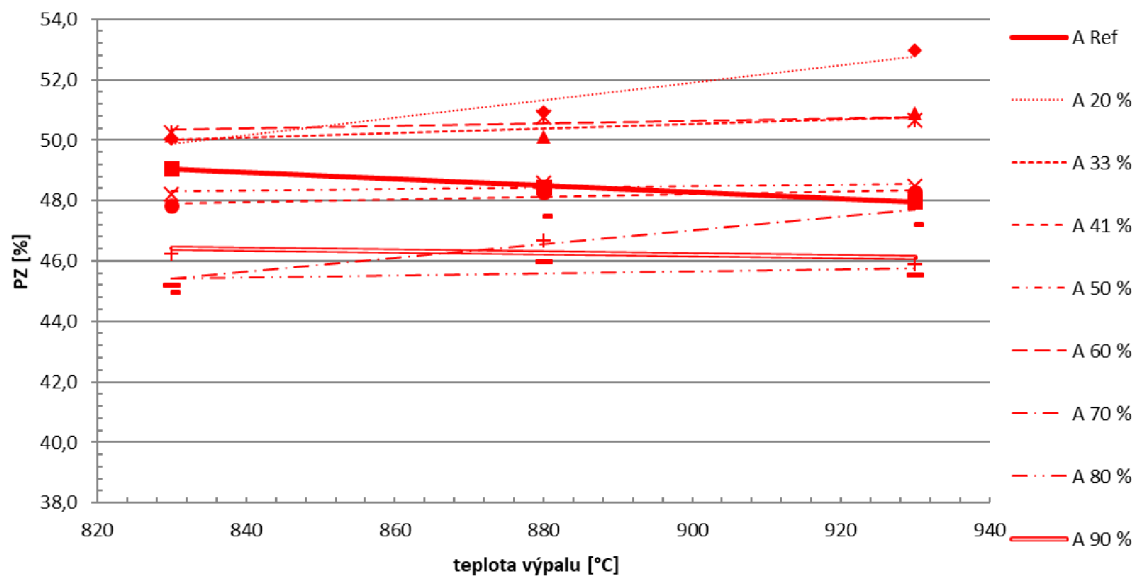
Graf 14: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na nasákavost keramického střepe

Z grafického vyjádření nasákavosti je dobře patrné, že receptury A vykazují obecně vyšší nasákavosti, než receptury B.

Nasákavost receptur A vykazuje s rostoucím obsahem cihelného prachu ve výrobní směsi klesající tendenci, naopak u receptur B tendenci mírně rostoucí. Nebyly však zaznamenány významné rozdíly v nasákavosti jednotlivých receptur ve vztahu k měnící se maximální teplotě výpalu.



Graf 15: vliv množství cihelného prachu a teploty výpalu na nasákavost keramického střepu

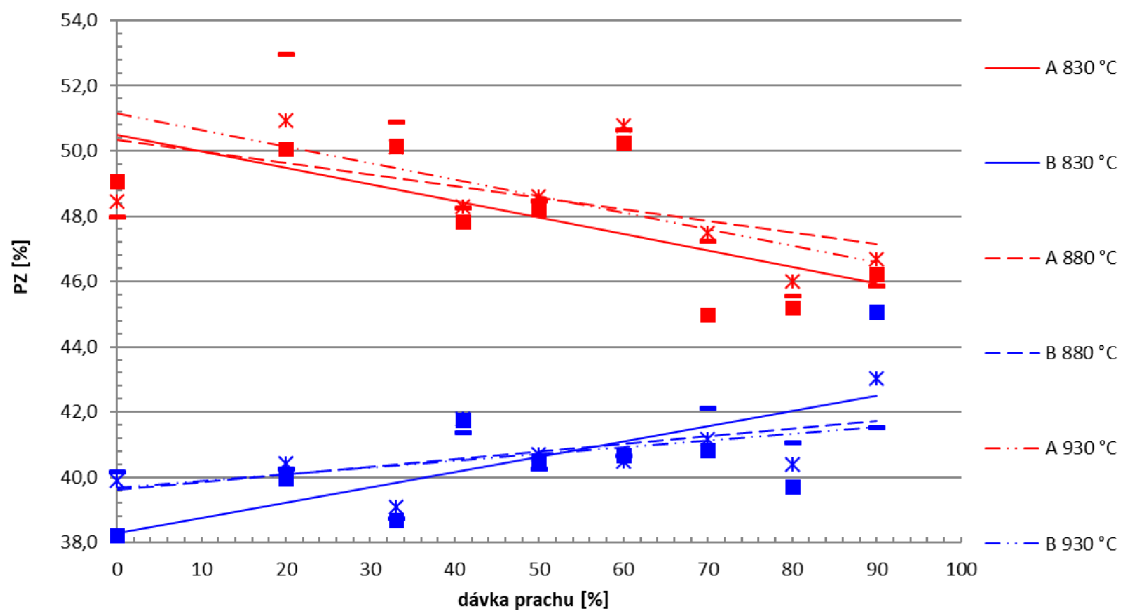


Graf 16: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na zdánlivou pórovitost keramického střepu

Zdánlivá pórovitost je přesnějším ukazatelem pórovitosti mikrostruktury střepu, jelikož při stejné hodnotě nasákavosti bude střep s vyšší měrnou hmotností vykazovat vyšší pórovitost, než střep s nižší měrnou hmotností.

Z grafických vyjádření zdánlivé pórovitosti však není patrný téměř žádný rozdíl v závislostech oproti nasákavosti. Také při rostoucí maximální teplotě výpalu nebyly opět zaznamenány významné rozdíly v nasákavosti jednotlivých receptur.

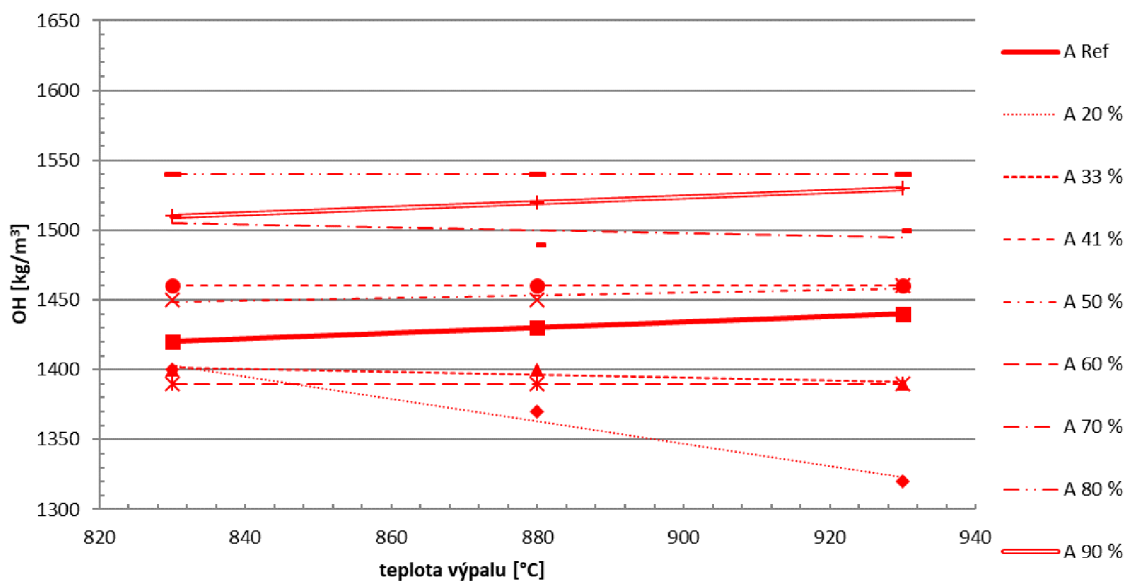
Graf 17: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na zdánlivou pórovitost keramického střepeu



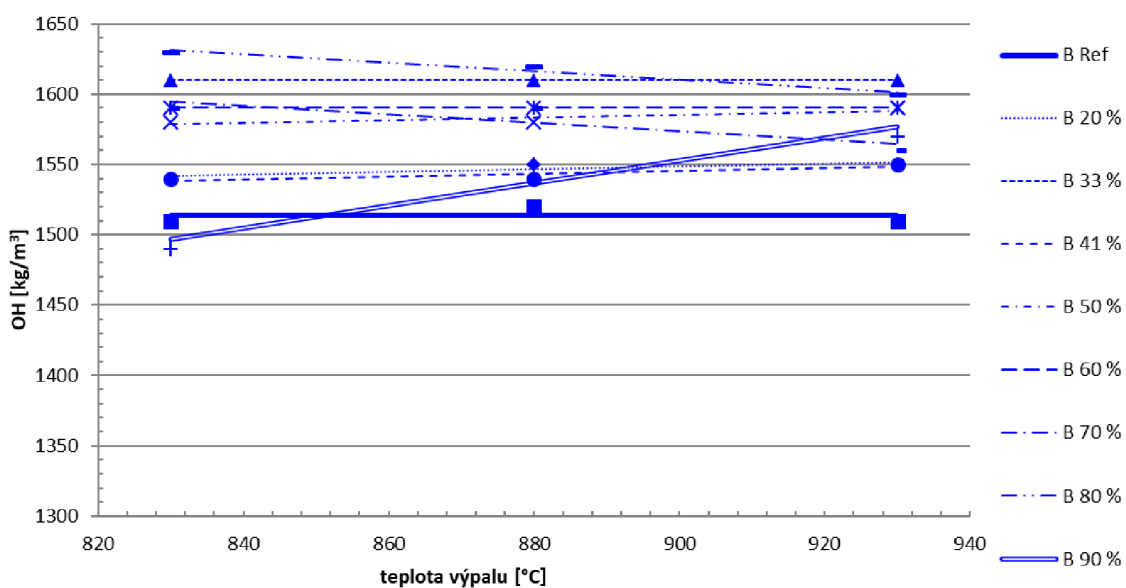
Graf 18: vliv množství cihelného prachu a teploty výpalu na zdánlivou pórovitost keramického střepeu

Zdánlivá pórovitost střepeu receptur A vykazuje s rostoucí obsahem cihelného prachu ve výrobní směsi klesající tendenci, a naopak střepeu receptur B vykazuje tendenci mírně rostoucí. Zřetelná je vyšší zdánlivá pórovitost střepeu A oproti B.

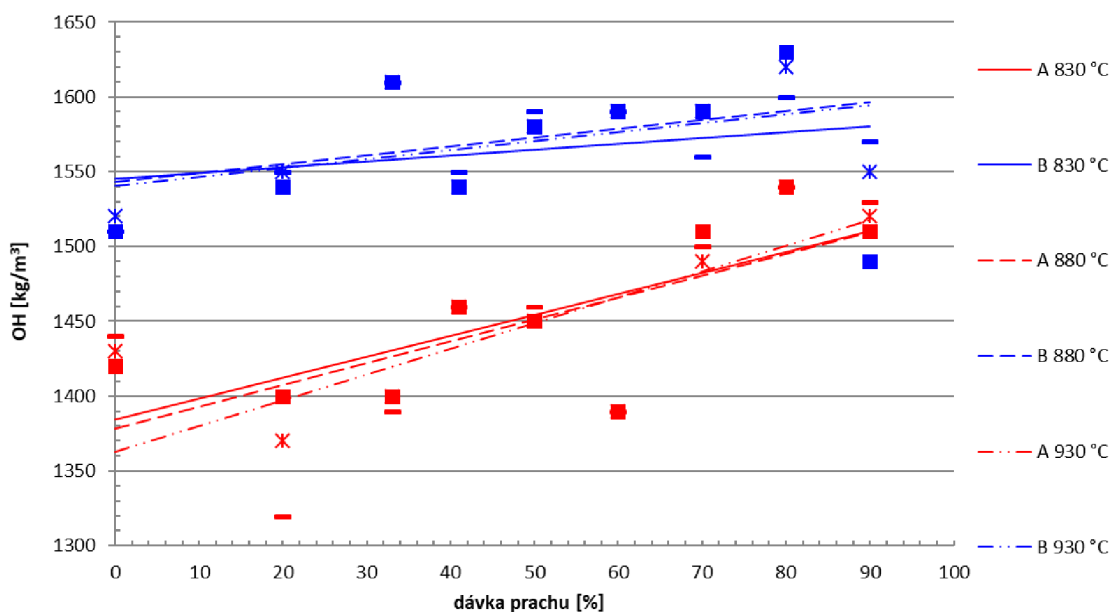
Vzhledem k velmi malému rozptylu použitých teplot, nebyl zaznamenán výrazný vliv teploty výpalu na objemovou hmotnost keramického střepeu. Obecně u obou receptur platí, že s rostoucí teplotou výpalu objemová hmotnost roste. Stejný vliv má také přidavek cihelného prachu. Čím více prachu receptura obsahuje, tím je objemová hmotnost vyšší. Receptura A je na přidavek cihelného prachu citlivější.



Graf 19: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na objemovou hmotnost keramického střepeu

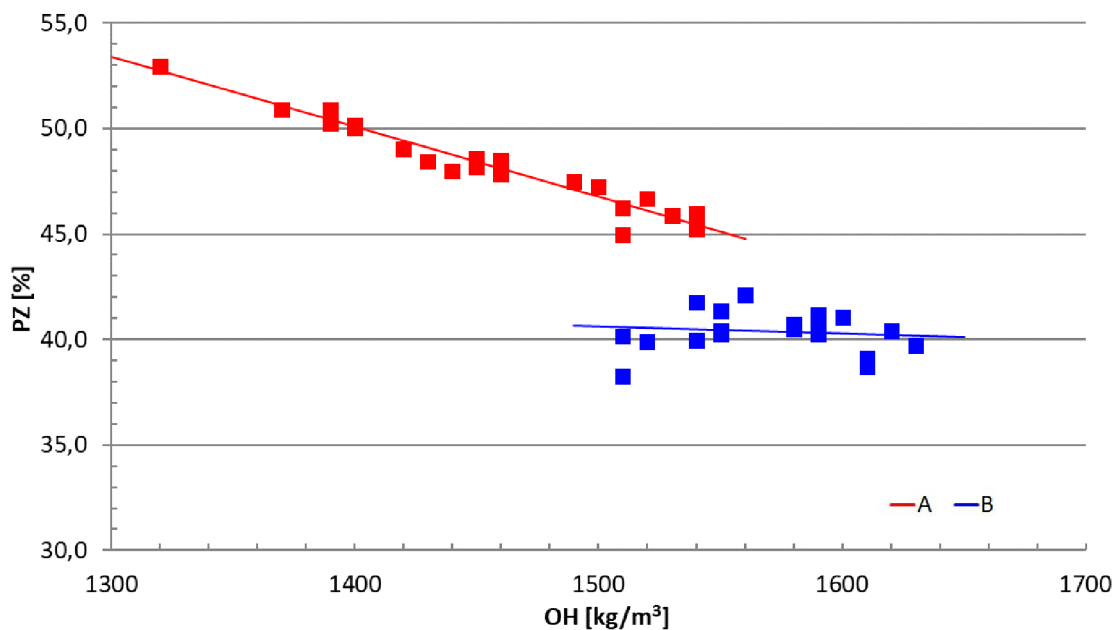


Graf 20: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na objemovou hmotnost keramického střepeu



Graf 21: vliv množství cihelného prachu a teploty výpalu na objemovou hmotnost keramického střepeu

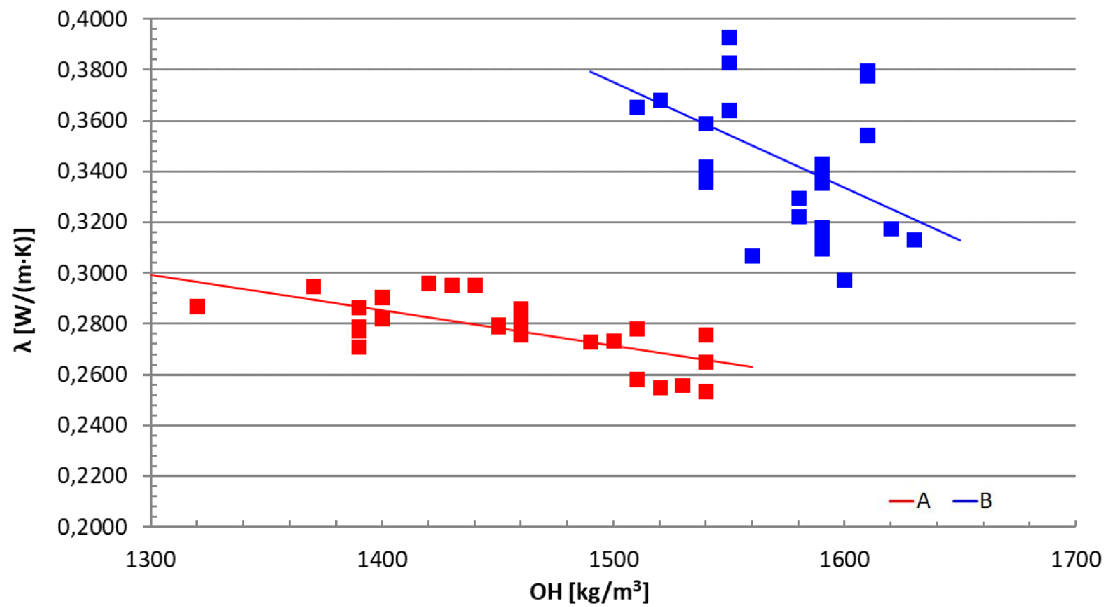
Závislost zdánlivé pórovitosti na objemové hmotnosti je typická. Se zvyšující se objemovou hmotností klesá zdánlivá pórovitost keramického střepeu.



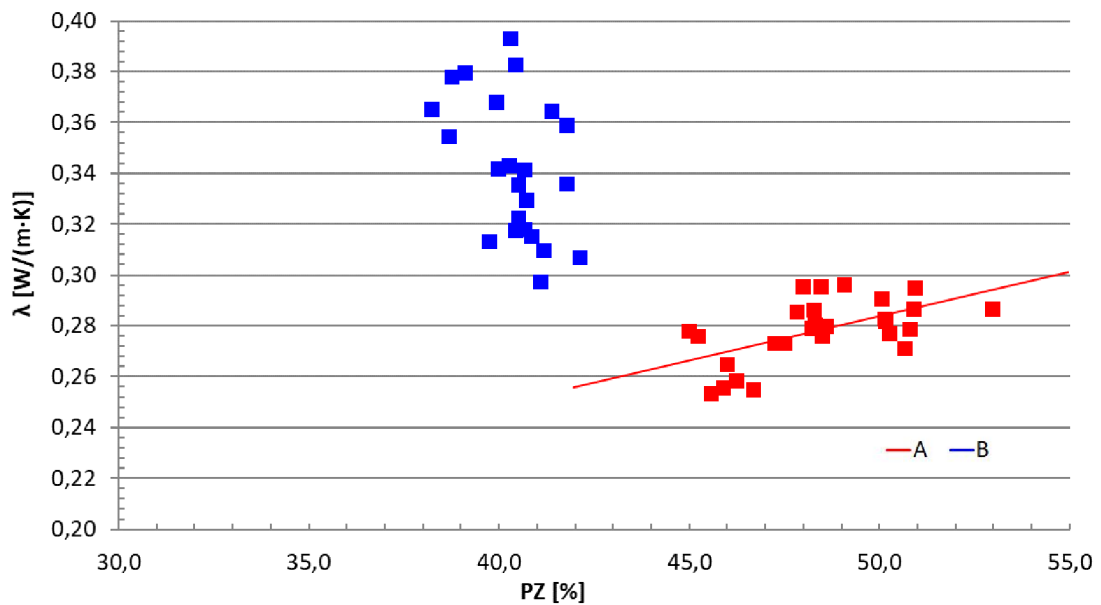
Graf 22: vliv objemové hmotnosti na zdánlivou pórovitost

Teplotná vodivost je funkcí objemové hmotnosti a pórovitosti materiálu. U keramického střepeu A se objemová hmotnost pohybovala ve větším intervalu než u keramického střepeu B a proto je závislost čitelnější. Přestože objemová hmotnost vypáleného střepeu roste, součinitel teplotní vodivosti klesá.

Objemová hmotnost roste s obsahem cihelného prachu v receptuře. Platí tedy, že se zvyšujícím se obsahem cihelného prachu v receptuře klesá tepelná vodivost materiálu. Receptura B je cihelným prachem ovlivňována mnohem více než receptura A.

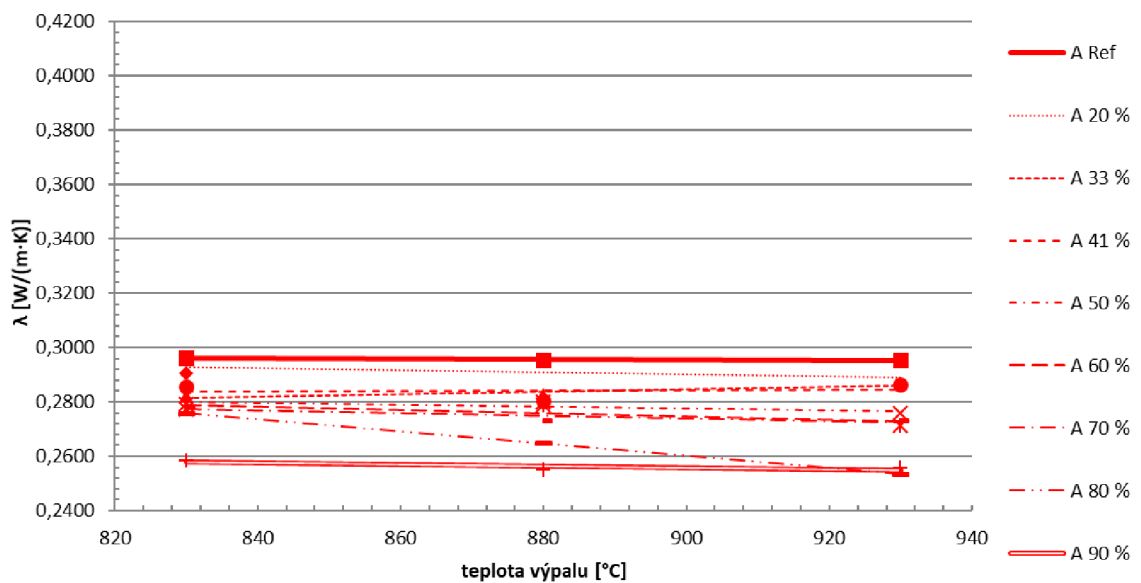


Graf 23: vliv objemové hmotnosti na součinitel tepelné vodivosti λ

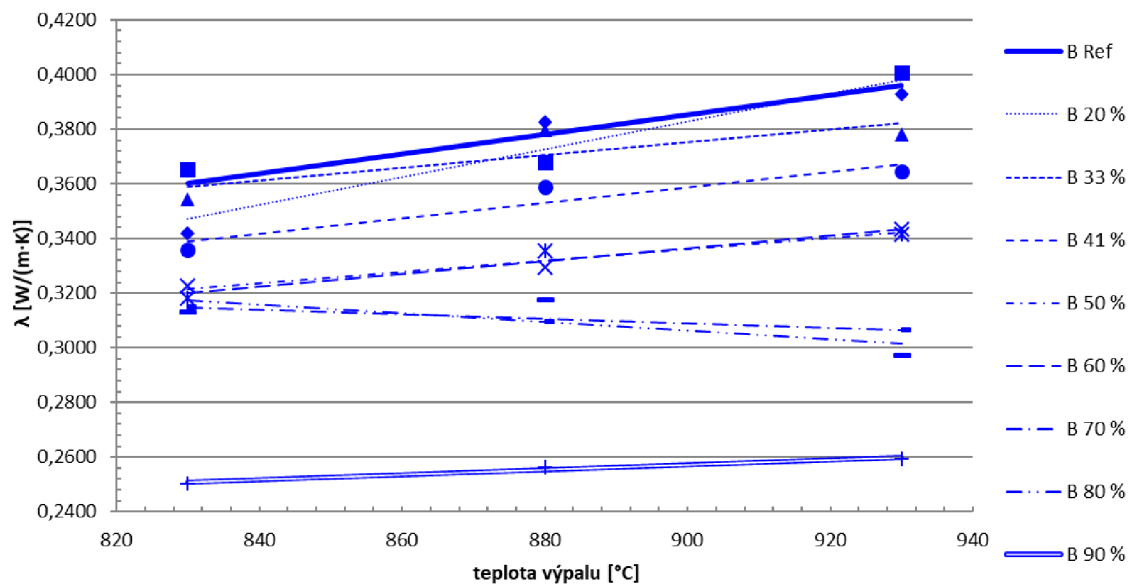


Graf 24: vliv zdánlivé pórovitosti na součinitel tepelné vodivosti λ

Vzhledem k malému rozdílu ve vypalovacích teplotách je vliv teploty výpalu na součinitel tepelné vodivosti malý, přesto je prezentován na dalších grafech.

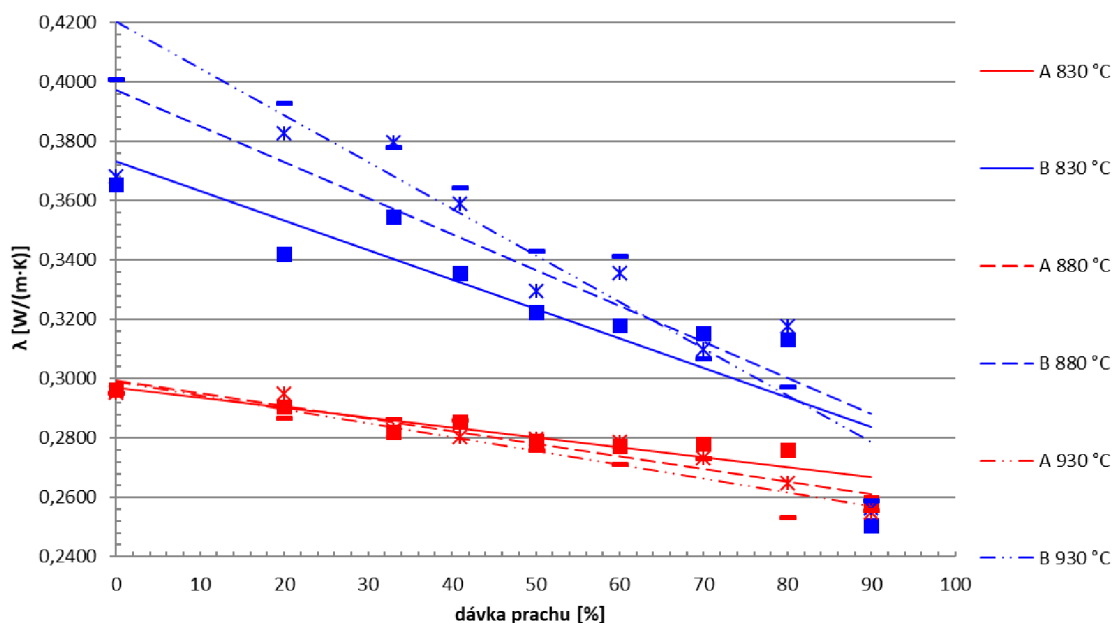


Graf 25: receptury A – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ keramického střepu



Graf 26: receptury B – vliv teploty výpalu a cihelného prachu na hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ keramického střepu

S rostoucím obsahem cihelného prachu v receptuře klesá tepelná vodivost materiálu keramického střepu. Přídavek jemného cihelného prachu (receptura B) ovlivňuje tepelnou vodivost materiálu více.



Graf 27: vliv množství cihelného prachu a teploty výpalu na hodnotu součinitele tepelné vodivosti λ keramického střepe

Průmyslově vyráběný keramický střepe, který je prezentován v diplomové práci referenčními recepturami, vykazuje oproti recepturám s obsahem cihelného prachu vyšší pevnosti v ohybu a nižší objemové hmotnosti. Můžeme tedy říci, že tyto vlastnosti ovlivňuje přidavek cihelného prachu do výrobní směsi pro cihlářský průmysl spíše negativně.

Na druhou stranu však průmyslově vyráběný keramický střepe vykazuje vyšší smrštění a vyšší součinitel tepelné vodivosti λ , takže v této oblasti působí přidavek cihelného prachu pozitivně.

Vliv cihelného prachu na nasákavost a zdánlivou pórovitost není z výsledků diplomové práce jednoznačný, výsledky však naznačují, že jemnější prach způsobuje nárůst pórovitosti a nasákavosti střepe, kdežto hrubší způsobuje pokles.

6 Závěr

Diplomová práce ve své teoretické části popsala vznik cihelného prachu a jeho základní vlastnosti. Dále sumarizovala výsledky publikovaných výzkumů týkajících se potencionálního využití cihelného prachu v různých průmyslových odvětvích a byly uvedeny návrhy využití cihelného prachu v keramickém průmyslu.

V experimentální části práce byly vybrány dvě pracovní hmoty a z nich vzniklý cihelný prach s odlišnou granulometrií a byly navrženy receptury pro přípravu zkušebních vzorků.

Na laboratorně připravených zkušebních tělesech byly ověřovány fyzikálně – mechanické vlastnosti. Zkoumány byly délkové změny sušení a po výpalu, dále pevnost v ohybu, nasákavost, zdánlivá pórovitost, objemová hmotnost a součinitel tepelné vodivosti λ . Ověřován byl vliv teploty výpalu a vliv obsahu cihelného prachu v receptuře na výše uvedené vlastnosti.

Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že:

1. Cihelný prach snižuje smrštění sušením z 5 % na 0,3 %. Receptury A mají vyšší smrštění sušením, než receptury B. Při 90% obsahu cihelného prachu je smrštění sušením u obou směsí téměř nulové.
2. S rostoucím obsahem cihelného prachu v receptuře klesá smrštění pálením. Délková změna pálením všech receptur se pohybovala do 2 %.
3. S rostoucím obsahem cihelného prachu v receptuře byla zaznamenána klesající pevnost v ohybu. Pouze u receptury B do obsahu 33 % cihelného prachu ve výrobní směsi pevnosti rostly. Receptury A vykazují obecně nižší pevnosti, než receptury B.
4. S rostoucím obsahem cihelného prachu v receptuře roste objemová hmotnost. Receptura A je na přídavek cihelného prachu citlivější, než receptura B.
5. Se zvyšujícím se obsahem cihelného prachu v receptuře klesá tepelná vodivost materiálu a to přesto, že objemová hmotnost vypáleného střepe roste.

V dalším výzkumu doporučuji ověřit pozitivní vliv jemného cihelného prachu jako ostřiva na pevnosti vypáleného keramického střepe při dávkování do 33 %, případně ověřit vliv jemnosti cihelného prachu na pevnosti vypáleného keramického střepe.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MIZEROVÁ, Cecílie. *Binární alkalicky aktivované kompozitní materiály s cihelným prachem*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph. D.
- [2] KRIŽAN, David. *Vliv recyklace brusného prachu na výrobu a vlastnosti cihel*. Ostrava, 2018. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Miroslava Klárová, Ph.D.
- [3] TMEJOVÁ, Jana. *Možnosti uplatnění fosforečné vazby při zpracování cihelného obrusu*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [4] DZUROV, Matej. *Možnosti využití cihelného obrusu v alkalicky aktivovaných systémech*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
- [5] *Nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024.*: Sběrka zákonů Česká republika. Břeclav: Moraviapress, 2014, 2014(352). ISSN 1211-1244.
- [6] PALOVČÍK, Jakub. *Možnosti využití cihelného obrusu v systémech na bázi portlandského cementu*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [7] KULOVANÁ, Tereza. *Vliv jemně mleté keramiky na vlastnosti cementových kompozitů*. Praha, 2018. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.
- [8] TUŠLA, Václav. *Možnosti využití cihelného obrusu v alternativních pojivových systémech na bázi fluidních popílků*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [9] MAZÁNKOVÁ, Eva. *Využití alkalické aktivace při zpracování cihelného obrusu*. Brno, 2018. Středoškolská odborná činnost. Gymnázium Brno, Křenová 304/36, 602 00, Brno. Vedoucí práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.; RNDr. Valerie Richterová, Ph.D.
- [10] ČÁCHOVÁ, Monika. *Použití cihelného obrusu v omítkových směsích*. Praha, 2017. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze (ČVUT). Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Keppert, Ph.D.

- [11] SUBAŞI, Serkan, Hakan ÖZTÜRK a Mehmet EMIROĞLU. *Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials [online]. 2017, 149, 567-574 [cit. 2019-12-16]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180. ISSN 09500618. Dostupné z: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817310784>>
- [12] GONZALEZ-COROMINAS, A. a M. ETXEBERRIA. *Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates*. Construction and Building Materials [online]. 2014, 68, 618-626 [cit. 2019-12-17]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016. ISSN 09500618. Dostupné z: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814007314>>
- [13] SILVA, João, Jorge de BRITO a Rosário VEIGA. *Incorporation of fine ceramics in mortars*. Construction and Building Materials [online]. 2009, 23(1), 556-564 [cit. 2019-12-17]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014. ISSN 09500618. Dostupné z: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807002474>>
- [14] HUSEIEN, Ghasan Fahim, Abdul Rahman Mohd SAM, Jahangir MIRZA, Mahmood Md. TAHIR, Mohammad Ali ASAAD, Mohammad ISMAIL a Kwok Wei SHAH. *Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated Temperatures: Performance evaluation*. Construction and Building Materials [online]. 2018, 187, 307-317 [cit. 2019-12-17]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.226. ISSN 09500618. Dostupné z: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818318890>>
- [15] ŠMERDOVÁ, Ludmila. *Vápenné malty modifikované jemně mletým cihelným střepem*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [16] SOUKUP, Zdeněk. *Vybrané vlastnosti alkalicky aktivovaného cihelného prachu*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze (ČVUT). Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.
- [17] ČSN 72 1074 (721074) *Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem*
- [18] ČSN 72 1565 – 5 (721565) *Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení délkových změn sušením a pálením*

- [19] ČSN EN ISO 8894-1 (726047) *Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)*
- [20] ČSN 72 7306 (727306) *Stanovení součinitele tepelné vodivosti stavebních materiálů a výrobků*
- [21] ČSN 72 1565-7 (721565) *Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení pevnosti v ohybu*
- [22] ČSN 72 1565-6 (721565) *Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení ztráty hmotnosti pálením, nasákavosti, zdánlivé pórovitosti a objemové hmotnosti*
- [23] KOČMÁNEK, Tomáš. *Možnosti ovlivnění barevnosti cihlářského střepu*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Seznam jednotek:

μm	mikrometr
mm	milimetr
cm	centimetr
kg/m^3	kilogram na metr krychlový
%	procento
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Watt na metr a Kelvin
MPa	megapascal
hm. %	hmotnostní procento
λ	součinitel tepelné vodivosti

Jiné zkratky:

DTA	diferenciální termická analýza
RTG	rentgenová strukturní či difrakční analýza