

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague
Faculty of Civil Engineering

Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.

Vápenné omítky s pucolánovými příměsmi
Lime based plasters with pozzolanic admixture

Summary

Pozzolanic mineral admixtures have already been used over thousands of years for construction purposes. The attempts to seek for new materials with enhanced properties and to continuously improve the existing ones were and still are an issue of interest. Except from the improvement of conventionally used construction materials based on the traditional raw materials, the eligible way of development appears to be in the utilization of **by-products** from industrial production, which are classified as waste materials (**ceramic powder; fly ash from combustion of organic materials, fly ash from municipal waste incineration plants or from sewage sludge**). Although, these materials have in comparison to natural materials (volcanic ash, tuff, natural zeolite) the disadvantage in wide variations of their characteristics, they are still suitable for further utilization. Another option is the search for new raw materials (e.g. **shales**) and subsequently its treatment (such as heat treatment, milling etc.). Such technogenic pozzolanas are characterized by its relatively constant composition and its application seems to be very advantageous (metakaolin). The characteristics determining their applicability are particularly its chemical and mineralogical composition, the content of reactive species, the size of particles and the specific surface area.

The research in the field of partial replacement of lime or cement binder by an appropriate alternative materials in the form of the pozzolanic mineral admixtures (either technogenic or natural) in the manufacture of mortars or concrete is becoming an issue of great interest. The still more restrictive requirements on the industrial production, especially from the view point of ecological impacts on the environment (CO₂ emissions) are huge motivation for finding new ways, how to change the technology of mortars and concrete manufacture with the use of the partial binder replacement. A significant way among the possibilities of pozzolana's utilization is also the partial substitution of the binder in mortar blends for final application, when maintaining or enhancing its desired properties. Equally important point of view is the economical aspect and also the approach of conservationists, historians or restorers, who prefer mainly the attempt to move towards the original materials corresponding to each historical period together with the use of the technological production procedures.

From the above mentioned reasons it implies, that the utilization of such materials appears to be very perspective and also that there are many topics which are not sufficiently clarified or are not known yet. These will certainly be part of many research works in the following years.

Souhrn

Pucolánové příměsi jsou ke stavebním účelům používány již tisíce let. V každé době bylo a je snahou hledat vhodné materiály s vyššími užitnými vlastnostmi a stále vylepšovat materiály stávající. Kromě klasicky používaných materiálů na bázi tradičních surovin se jako jeden z vhodných směrů jeví použití **vedlejších produktů** vznikajících při průmyslové výrobě (**cihelný prach, popely vzniklé spalováním organických materiálů, ze spaloven komunálního odpadu, z kalů čistíren odpadních vod**). Tyto materiály mají ve srovnání s přírodními materiály (trasy, tufy, zeolity) nevýhodu především v širším rozptylu hodnot vlastností, které je charakterizují, ale i přesto se často jedná o vhodné suroviny pro další využití. Další možností je cílené hledání a úprava (tepelná, mletí) nerostných surovin (kaolín, **lupky**). Takto vzniklé technogenní pucolány se vyznačují poměrně stálým složením a jejich aplikace se jeví jako velmi výhodná (metakaolin, **metalupek**). Podstatou a možností aplikace těchto nových reaktivních příměsí je především jejich chemické a mineralogické složení, obsah amorfní fáze, velikost částic a s tím související měrný povrch.

Výzkum v oblasti náhrady části vápenného nebo cementového pojiva vhodnými alternativními surovinami v podobě pucolánových příměsí při výrobě maltovin nebo betonu, ať již technogenními nebo přírodními, se zejména v poslední době stává velmi aktuálním tématem. Zpřísňující se požadavky na průmyslovou výrobu především z hlediska ekologického dopadu (emise CO₂) na životní prostředí jsou velkou motivací pro nalezení vhodného směru změny technologie samotné výroby klasického pojiva. Neméně významným hlediskem pro aplikaci vhodných náhradních surovin jsou i aspekty ekonomické. Další motivací pro nalezení vhodných pucolánových příměsí je i dnešní přístup památkářů, historiků a restaurátorů, kteří upřednostňují především snahu co nejvíce se přiblížit původním materiálům v rámci jednotlivých historických slohů i s využitím původních technologických postupů výroby.

Ze všech výše uvedených důvodů je zřejmé, že využití těchto surovin se jeví jako velice perspektivní. Je zde však ještě mnoho témat, která nejsou dostatečně objasněna, případně nejsou dosud známá, a která budou zcela jistě součástí mnoha výzkumů v dalších letech.

Klíčová slova

Vápenné omítky, pucolánové příměsi, pucolánová reakce, základní fyzikální parametry, mechanické parametry, vlhkostní parametry, trvanlivost

Keywords

Lime plasters, pozzolanas, pozzolanic reaction, basic physical properties, mechanical properties, hygric properties, durability

Obsah

1	Úvod	7
2	Použití pucolánů v historii vápenných omítek	9
3	Pucolánové příměsi ve vápenných omítkových směsích	11
3.1	Metakaolin	14
3.2	Jemný keramický prach	16
3.3	Přírodní zeolity	17
4	Působení pucolánů ve vápenných omítkových směsích	20
5	Metody stanovení pucolánové aktivity	23
5.1	Zkouška vaznosti směsi pucolánu s vápnem (cementem)	23
5.2	Sledování průběhu reakce pucolánu s hydroxidem vápenatým	23
6	Vlastní dosažené výsledky v dané oblasti - výběr	24
6.1	Stanovení vlivu nového typu pucolánu „metalupku“ na fyzikální vlastnosti vápenných omítek	24
6.2	Stanovení vlivu rozdílného množství pucolánové příměsi jako částečné náhrady vápenného hydrátu na fyzikální vlastnosti	30
7	Závěr a směřování dalšího výzkumu	35
8	Použitá literatura	37

1 Úvod

Použití a výzkum reaktivních minerálních příměsí, ať již v podobě pucolánově aktivních nebo latentně hydraulických látek, jako součásti tradičního vápenného případně cementového pojiva, jsou předmětem zájmu již poměrně dlouhou dobu [1, 2]. V literatuře jsou zmínky o materiálech, které za určitých podmínek dosahují významných pojivových schopností, zaznamenány již v dobách před naším letopočtem (Vitruvius, 33 – 22 př. n. l) [3]. Lze tedy konstatovat, že chování těchto materiálů je do určité míry známé již tisíce let, ale v různých časových obdobích jim byl přikládán různý význam.

Při výrobě stavebních materiálů je kladen velký důraz na snížení emisí CO_2 , jehož velké množství se uvolňuje např. při výpalu vápna nebo slínku [4, 5]. Cestou ke snížení emisí CO_2 je právě možnost využití vhodných příměsí jako částečné náhrady tradičního pojiva, a tím omezení ekologických dopadů na životní prostředí. Neméně výraznou motivací použití těchto materiálů je také zvyšující se cena energií a s tím související dopad ekonomický. Tento problém může být řešen použitím reaktivních příměsí, zejména vedlejších produktů vznikajících při průmyslové výrobě, jako je např. cihelný obrus, popely ze spalování organických materiálů atd. Využívání a recyklace odpadních surovin patří také k celosvětově velmi aktuálním tématům a je široce podporovanou a řešenou problematikou. Jejich skládkování je totiž ekonomicky náročné a navíc má i poměrně značné ekologické dopady na životní prostředí. Proto právě aplikace vhodných vedlejších produktů ve stavebním průmyslu je řešením několika aspektů zároveň.

Mezi další používané pucolánové příměsí patří tepelně upravované jíly, do této skupiny lze zařadit především metakaolin nebo metalupek. V současné době se sice cena těchto uměle vyráběných pucolánově aktivních látek pohybuje výše, než je cena běžně vyráběných stavebních pojiv (vápno, cement), nicméně jejich výroba je ekologičtější než výroba cementu a zvýšením poptávky po těchto materiálech, nárůstem jejich produkce a změnou technologie jejich přípravy by se snížila i jejich vysoká cena. Z přírodních pucolánů našly své největší uplatnění zejména zeolitické tufy, tras nebo křemelina.

Další motivací pro nalezení vhodných pucolánových příměsí je i dnešní přístup památkářů, historiků a restaurátorů, kteří vyžadují přiblížení se původním materiálům v rámci jednotlivých historických slohů i s využitím původních technologických postupů výroby. Vzhledem k tomu, že

portlandský cement se začal používat až od poloviny 19. století, jeví se jako zcela nevhodné použití cementových, případně cementovápenných, resp. vápenocementových omítek. Na základě mnoha výzkumů bylo zjištěno, že právě obsah pucolánů a jejich zapojení se do hydratačních produktů, znamenal výrazné zlepšení trvanlivosti historicky používaných vápenných omítek.

Celou řadou výzkumů bylo zjištěno, že při použití vhodných reaktivních minerálních příměsí může dojít k významnému ovlivnění a zlepšení vlastností výsledných materiálů, ať již v čerstvém nebo ve ztvrdlém stavu. Tyto látky mohou mít vliv na zpracovatelnost, pórovitost, mechanické vlastnosti, odolnost vůči agresivním látkám, a další.

2 Použití pucolánů v historii

První zmínky o použití bílého vápna a sopečného popela nebo drcených cihel v podobě jednodílného staviva jsou datovány již do starověku. Staří Řekové zjistili, že pokud smíchají vápno se zeminou z ostrova Santorin, získají maltu, která má schopnost tvrdnout i pod vodou. Féničané již v 700 let př. n. l. betonovali ze směsi vápna a cihelné moučky. Nejvíce však těchto znalostí využívali ve stavitelství Římané. Ti ve svých stavbách využívali hydraulické maltoviny připravované z dobře vyhašeného vápna a 25 až 75 % sopečného popela od Puteoli (dnešní Pozzuolo v Kampanii), odtud název pucolán. Používali i jiné aktivní příměsi jako např. cihelnou moučku.

Mleté cihly, nazývané „horasan“ v Turecku, „surkhi“ v Indii, „homra“ v arabských zemích nebo „cocciopesto“ v Římě, užívané jako plnivo do malt a omítek, zajišťovaly po smíchání s vápnem a vodou vysoké pevnosti. Vyznačovaly se tuhostí, kompaktností a vysokou porozitou. Pro svou stálost ve vlhkém prostředí byly s oblibou používány na konstrukce akvaduktů, mostů, kleneb, silnic, vodních nádrží nebo lázní, přístavů [6]. Stejně tak jako zdící malty, finální omítky vnitřního zdiva veřejných lázní nebo jako výplňový materiál pro dláždění podlahy, teracco či mozaiky.

Římský stavitel Marcus Vitruvius Pollio, který čerpal ze zkušeností řeckých, egyptských, peršských a mezopotámských stavitelů, ve svém díle „Deset knih o architektuře“ (De Architectura libri decem) [3] před rokem 13 př. n. l. popisuje přípravu maltovin takto: „Mísí-li se vápno s drolinou od Pozzuoli tvrdne pod vodou tak dobře, jako na obyčejné stavbě“, nebo „Existuje také jeden druh práškovitého písku, který vytváří přirozeným způsobem věci obdivuhodné. Vyskytuje se u Bájí na území městeček, ležících okolo Vesuvu. Tento práškovitý písek, smísen s vápnem a s kusovým kamenem, dodává pevnosti nejen stavbám vůbec, ale dokonce tvrdnou s jeho pomocí pod vodou i hráze stavěné na moři“. Gaius Plinius Secundus ve svém díle Naturalis historia (77 n. l.) zmiňuje hmotu, sestávající z vápna a jemně drcených střepů hliněných nádob, z níž lze vytvářet i trvanlivé nádoby. Plinius také hovoří o kameni, vyrobeném z vápna a pucolánu „položen proti mořským vlnám, jakmile se ponoří do moře, stává se tvrdým a odolným, každopádně pevnějším.“ Z takového betonu byly postaveny nejen panteon, koloseum a Konstantinova basilika, ale také velký most Pont du Gard u Nîmes v jižní Francii v 1. st. n. l., který je sice kamenný, ale byla zde právě použita malta s pucolánem. Malta s pucolánem byla také použita na stavbu mořského přístavu u Neapole za císaře Caliguly (12 – 14 n. l.). Betonu výtečných vlastností bylo také použito při stavbě římského kolínského vodovodu za císaře Trajana (90 –

117 n. l.) a Hadriana (117 – 138 n. l.), kde byla použita směs vápna a rozemletých tufových kamenů a tras [1].

Ve středověku se pucolány používaly minimálně a na hydraulické vlastnosti a pucolánovou aktivitu některých materiálů se zapomělo. Hydraulické malty tohoto typu byly po době římské požívány jen zřídka. Římská tradice se dochovala nejdéle v Porýní, kde Nizozemci ještě kolem roku 1200 přidávali do malt tras od Arden. Název pochází od slova „tyrass“, tj. pojivo nebo tmel [1,7]. V 18. století Francouz M. Lorient vydal brožuru, ve které uvádí předpis malty ve složení jeden díl jemně mleté cihly, dva díly jemného tříděného říčního písku a co nejdéle uloženého hašeného vápna. Dále popsal několik dalších směsí s obsahem jemně semletých pálených jíílů na místo cihelného prachu a tvrdil, že malty s těmito příměsmi tvrdnou mnohem rychleji a vytváří vodonepropustné produkty [7]. Popularita těchto materiálů začala růst a zasloužil se o to i Dr. B. Higgins, který v roce 1780 vydal knihu „Experimenty a pozorování zlepšení složení a aplikace vápenných tmelů a příprava vápna“. Ten ve svých omítkových směsích, za které mu byl udělen patent (1779), používal jako pucolánovou příměs jemný kostní popel [7]. Poznatky dosažené v této době shrnul ve svých publikacích Beliodor. Pro přípravu svých maltových směsí používal pucolány, tras a mletý keramický střep. Dále pak následovalo mnoho dalších výzkumníků, kteří pomohli velkému rozvoji a použití těchto příměsí. Mezi nejznámější patří např. L. B. Alberti, J. Smeaton, J. Parker, L. J. Vicat, I. Ch. Johnson a další.

Na našem území to byl např. v 16. století Bavor Rodovský z Hustiřan, který uvádí předpisy, kde je využito drcených střepů a popela z lesních stromů [1], dále L. A. F. Herget, F. Bárta, R. Bárta a mnoho dalších. V dnešní době se pucolánovými příměsmi zabývá velké množství vědců a výzkumných týmů. Snahou je určit vlastnosti jednotlivých pucolánových příměsí, objasnit procesy odehrávající se v materiálech po jejich aplikaci a odhalení jejich pozitivních i negativních vlivů. Hledají se také nové zdroje a možnosti těchto reaktivních příměsí, které by alespoň do určité míry mohly nahradit část tradičních pojiv a tím odlehčit především ekologické zátěži, která je s jejich výrobou spojena.

3 Pucolánové příměsi ve vápenných omítkových směsích

Obecně jsou příměsi pevné jemně práškové látky o velikost zrn do 0,25 mm, které svým použitím jako náhrady části pojiva zlepšují, případně ovlivňují a upravují některé vlastnosti čerstvé směsi (zpracovatelnost, zpomalení nebo urychlení tuhnutí) i zatvrdlé malty (mechanické vlastnosti, zvýšení odolnosti proti průniku vody, změna pórové struktury, ochrana proti degradaci, přídržnost k podkladu a další). Obvykle se dávkuje ve větším množství než přísady (více než 5 %), proto jsou již započítávány do objemové skladby materiálu. Reaktivní příměsi lze podle způsobu chemických reakcí, působení a původu rozdělit na:

- pucolánové látky
 - technogenní - křemičité úlety, elektrárenský popílek, pálené jíly (např. metakaolin, cihelný střep), jemně drcené sklo, kalcinovaná břidlice
 - přírodní - zeolity, tras, křemelina, sopečné sklo, pemza, tufy
- latentně hydraulické látky - strusky, některé typy popílků.

Obě formy látek se v zásadě liší obsahem oxidu vápenatého. Latentně hydraulické látky obsahují vápník a jsou schopny po smíchání s vodou za určitých podmínek samy tvrdnout. Pucolánové příměsi vápník neobsahují (nebo jen v malém množství) a nejsou bez jeho přítomnosti samy o sobě schopné tvrdnout.

Chemické složení vybraných pucolánových a latentně hydraulických příměsí vhodných pro použití jako částečná náhrada tradičního pojiva je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Chemické složení reaktivních minerálních příměsí

Minerální příměs	Složení [%]						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
Vysokopecní struska	30-50	7-20	2-10	25-40	1-15	0,6-2,4	2-3
Křemičité úlety	až 97	< 2	< 1,5	< 5		< 3	-
Elektrárenský popílek	25-55	15-25	0,3-5	< 10	< 4	< 5	< 3
Metakaolin	50-55	45-50	0,5-1,5	0,1-0,5	0,1-0,4	0,2-1	0,1-0,3
Jemný keramický prach	49-65	18-25	5-10	4-12	2-5	0,4-1,5	0,5-3
Zeolity	45-70	10-20	3-10	2-12	2	3-10	-

Pucolány jsou dle ASTM C125 [8] definovány jako křemičité nebo hlinitokřemičité materiály, které samy o sobě nemají žádnou vazebnou schopnost, ale s hydroxidem vápenatým (případně jiným budičem pucolánové reakce) a vodou reagují za běžných teplot za vzniku sloučenin, které tuhnou, tvrdnou a jsou stále na vzduchu i pod vodou.

Z chemického hlediska jsou pucolány materiály, které vnášejí do směsi hydraulické složky (SiO_2 , Al_2O_3). Nejdůležitější je obsah amorfního oxidu křemičitého SiO_2 , a reaktivních křemičitanů, hlinitanů a hlinitokřemičitanů. Oxid křemičitý, oxid hlinitý a hlinitokřemičitany reagují s oxidem vápenatým za vzniku hydratovaných křemičitanů (C-S-H) a hlinitanů vápenatých (C-A-H), které jsou stále na vzduchu i pod vodou. Tyto produkty jsou podobné hydratačním produktům slínkových minerálů a liší se především v množství, ne v podstatě [9]. Velikost částic, měrný povrch, chemické složení, mineralogické složení, ale především obsah amorfni fáze SiO_2 a Al_2O_3 v těchto látkách, dále pak obsah Fe_2O_3 a CaO , hraje významnou roli z hlediska jejich reaktivnosti a zapojení se do pojivového systému v rámci nově vznikající struktury. Svým vstupem do těchto reakcí se podílejí na tvorbě struktury a ovlivňují tak vlastnosti výsledných materiálů.

Přírodní pucolány mohou být původu vulkanického (tufy) nebo sedimentárního (tufity, křemelina). Velmi jemné přírodní materiály sopečného původu jsou vysoce reaktivní. Nejvíce reaktivní se pak jeví pucolány sopečného původu, které obsahují velké množství malých sklovitých částic složených převážně z amorfního oxidu křemičitého. Další mohou být tvořeny oxidem křemičitým, oxidem hlinitým a malým množstvím jiných oxidů. Reaktivita vyvřelých hornin je především spjata přítomností skelné fáze. Pucolány sopečného původu obsahují průměrně 50 % oxidu křemičitého, okolo 30 % oxidu hlinitého a železitého spolu s nízkým obsahem oxidu vápenatého a hořečnatého. Jako pucolánově aktivní materiály se dají použít i materiály, které se v přírodě vyskytují v kusové podobě, nicméně je nutné je rozemlít na velmi jemné částice. Takto se dají využívat takové suroviny jako mletá pemza, čedič, chalcedony, opály, živce, slídy, apod. Dále se do této skupiny řadí sedimenty s vysokým obsahem reaktivního oxidu křemičitého, např. zeolity a rozsivkové zeminy, tzv. křemeliny. Zeolity patří mezi přírodní pucolány s významnými pucolánovými schopnostmi. Jsou to hydratované hlinitokřemičitany, obsahující kromě oxidu křemičitého a hlinitého další složky jako jsou např. oxid sodný. Významné ze zeolitů jsou analcim a chabazit, které jsou součástí trasů a představují významné pucolánově reagující materiály [7].

Mezi nejznámější zdroje patří ložiska vulkanického popela z Latia severně od Říma a z Kampanie západně od Neapole, santorínské zeminy z Řecka, rýnský a bavorský tras v Německu, ryolitická pemza v USA [4]. Podobné vulkanické materiály, které se dají použít jako pucolány, se

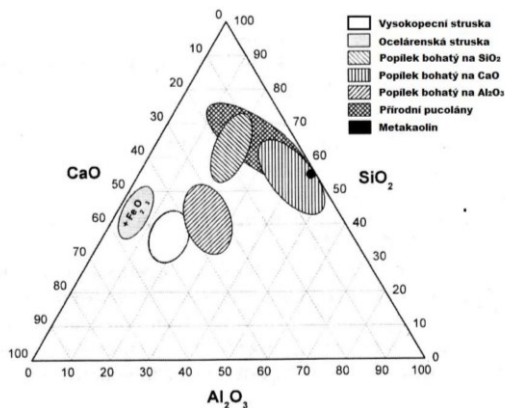
vyskytují v jihovýchodní Francii, ve Španělsku, na Kanárských a Azorských ostrovech, na Novém Zélandu a v Japonsku.

Technogenní pucolány patří mezi uměle vytvořené pucolány a jsou cíleně připravovány pálením jílových surovin montmorillonitického nebo kaolinitického typu při nižších teplotách, které jsou následně mlety. Nejčastěji se k tomuto účelu používá kaolin, případně jílovec, který se pálením při teplotě 600 - 800 °C převede na tzv. metakaolin (metalupek). V podstatě dochází výpalem k odstranění vody z krystalové mřížky minerálu kaolinitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), který je hlavní složkou kaolinu, za vzniku bezvodné a reaktivní sloučeniny o chemickém složení $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Odvodnění je spojeno s vývinem páry, která způsobí, že metakaolinit má silně porézní strukturu. Kromě toho je jeho struktura amorfni (nekrytalická), která je mimo jiné příčinou jeho reaktivity [7, 11].

Pucolánovou aktivitu vykazují také některé silikátové odpady, které obsahují složky reagující s hydroxidem vápenatým. Zbytky z organických látek v podobě popelů vykazují pucolánovou aktivitu, díky obsahu reaktivní formy oxidu křemičitého a hlinitého. Historicky se do omítek používal kostní popel, dřevní popel, popely ze spalování obilné slámy nebo výhonků vinné révy. V současné době v oblastech, kde se pěstuje rýže (rýžová sláma) [7, 10], kokosové palmy (dužina a zbytky z kokosových ořechů) [12, 13, 14, 15], olejové palmy (listy, odpad po lisování oleje) [16, 17, 18, 19] zkoumá využití popela vzniklého spalováním vedlejších produktů příslušné výroby.

Ve stavební praxi se pro řadu aplikací využívají i umělé pucolány, které vznikají jako odpadní materiály z různých výrobních procesů. Patří mezi ně např. křemičité úlety (mikrosilika) a elektrárenské popílky. Použití popílků s sebou však přináší spoustu rizik v podobě jejich nestálého složení a obsahu nevhodných složek (sírany, radioaktivita), které omezují jejich použití.

Mezi hydraulické příměsi se řadí vysokopecní granulovaná struska, jejíž skrytá hydraulická se vyvolává hydroxidem vápenatým anebo alkalickými hydroxidy (NaOH, KOH). Na Obr. 1 je znázorněn Rankinův diagram $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ s vyznačenou polohou pucolánově aktivních a latentně hydraulických materiálů.



Obr. 1: Složení latentně hydraulických a pucolánových látek v systému CaO-SiO₂-Al₂O₃

3.1 Metakaolin

Metakaolin se řadí mezi technogenní pucolány, které se vyrábí tepelnou úpravou plavených kaolínů, kaolinických jíílů a jíilovců, jejichž významnou složkou je minerál – kaolinit.

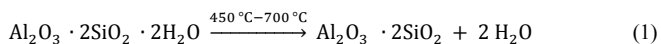
Kaolin, jako nejvýznamnější zdroj kaolinitu (dále zde může být v nepatrném množství zastoupen křemen, muskovit, rutil, illit, turmalín, staurolit, granát, limonit), je jednou z nejvíce používaných surovin ve světě (více než 25 miliónů tun/rok). Jako surovina je využíván v mnoha oblastech (stavební a keramický průmysl, papírenský průmysl, výroba porcelánu, jako plnivo do nátěrových hmot, plastů a v gumárenském průmyslu, ve zdravotním, kosmetickém a textilním průmyslu, pro výrobu žárovzdorných a chemicky odolných materiálů, v ropném průmyslu a mnoha dalších) [24, 25, 26]. Vlastní použití a reaktivitu metakaolinu ovlivňuje především jeho tepelná úprava a jeho mikrostruktura.

Kaolinit je jíilový minerál ze skupiny fylosilikátů (lískové vodnaté hlinitokřemičitanu o sumárním složení Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O (AS₂H₂), může obsahovat malá množství dalších oxidů (Fe₂O₃, TiO₂, CaO and MgO). Kaolin tvoří nejdůležitější složku výchozí suroviny pro výrobu metakaolinu, jeho barva je bílá, mímě nažloutlá nebo lehce načervenalá [25]. Velikost částic kaolinitu se pohybuje v rozmezí od 0,2 – 15 μm a měrný povrch od 10 000 – 29 000 m²·kg⁻¹. V krystalickém stavu (podobně jako většina jíilových minerálů) vykazují tyto minerály jen velmi nízkou pucolánovou aktivitu, ale tepelnou úpravou a zborcením krystalové struktury lze dosáhnout vysoce pucolánově aktivních materiálů. Tato úprava závisí kromě přesně zvolené teploty, době výpalu, způsobu chlazení také na

krystalické struktúre, veľkosti častíc a chemickém složení vstupní suroviny [27]. Řada výzkumných prací řeší problematiku tepelné úpravy těchto surovin a jednotlivých reakčních procesů v rámci konkrétních teplot [26, 27, 28]. Některé dosažené poznatky se nepatrně liší, především v rozsahu teplot pro jednotlivé fáze, nicméně většinu z nich lze shrnout do 3 podstatných navazujících fází:

- dehydratace – pod 300 °C
- dehydroxylace jílových minerálů – 450 - 800 °C
- rekrytalizace a vznik nových fází (mullit, cristobalit) – nad 1 000 °C.

V počáteční fázi kalcinace (dehydratace) dochází v materiálech k odstranění veškeré fyzikálně vázané vody. S postupným zvyšováním teploty v intervalu cca 400 až 800 °C, dochází k dehydroxylaci, tedy ke zbavení se chemicky vázané vody v kaolinitu. Zároveň dochází k rozpadu původní krystalické struktury, naruší se hlinitanové oktaedry a vzniknou hlinitanové tetraedry. V důsledku tohoto narušení vzniká ze stabilního jemně krystalického kaolinitu nestabilní amorfni metakaolinit. Zastoupení většího množství tetraedrů znamená pro metakaolin vyšší reaktivitu.



Při překročení teploty nad 1 000 °C (a setrváním na této teplotě delší dobu) dochází k výraznému poklesu pucolánové aktivity tepelně upraveného kaolínu. Vznikají nové nereaktivní vysokoteplotní krystalické fáze v podobě spinelu (MgAl_2O_4) a mullitu ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) a odděluje se amorfni SiO_2 . Souhrn změn probíhajících při tepelné úpravě kaolínu je uveden v Tab. 2.

Tabulka 2: Změny ve struktuře kaolínu během výpalu

Fáze	Teplota [°C]	Strukturní změny
I.	do 200	ztráta fyzikálně vázané vody
II.	450 - 700	dehydroxylace jílové struktury
III.	400 - 1000	vratné a nevratné modifikační přeměny
IV.	nad 1000	vznik nových vysokoteplotních fází

Použití metakaolínu

Metakaolin je využíván jako vhodná pucolánová příměs, lze ji použít nejen jako částečnou náhradu, ale i přídavek k tradičním pojivům. Reaktivita metakaolínu je závislá především na velikosti častíc, měrném

povrchu, chemickém složení, krystalické/amorfní struktúře. Díky velmi malým rozměrům částic, a tudíž i velkému měrnému povrchu, musí být při návrhu směsi počítáno s větším množstvím záměsové vody.

Výhody použití metakaolinu

- změna distribuční křivky pórů v závislosti na velikosti částic použitého metakaolinu, zjemnění pórové struktury, zvýšení celkové pórovitosti [29, 30, 31], nižší sorptivita, zvýšená mrazuvzdornost zvýšená odolnost vůči agresivním látkám (průniku chloridů, síranová koroze).

Nevýhody použití metakaolinu

- větší spotřeba záměsové vody, nepříznivě ovlivňuje zpracovatelnost [32].

3.2 Jemný keramický prach

Výskyt, použití a úprava keramických zemin je velmi podobná jako v případě úpravy kaolinů, kaolinitických jílu a jílovců při výrobě metakaolinu a jejich konkrétní použití závisí především na jejich složení a obsahu potřebných jílových minerálů. Pucolánová reaktivita jílových zemin závisí zejména na teplotě kalcinace, na jejich chemickém a mineralogickém složení a měrném povrchu výsledného materiálu (velikost částic). Z chemického hlediska musí jílové zeminy obsahovat více než 80 % $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, aby mohly být hodnoceny jako přírodní pucolány, což prakticky většina jílových zemin splňuje [33, 34, 35].

Z mineralogického hlediska je důležitý především obsah jílových minerálů jako jsou kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), montmorillonit ($(\text{Na},\text{Ca})_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$), illit ($(\text{K},\text{H}_2\text{O})\text{Al}_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), dickit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), halloysit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Teplota kalcinace těchto jílových minerálů je různá a v závislosti na ní se mění i jejich složení a struktura z krystalické na amorfni, uvolňuje se chemicky vázaná voda, narůstá pórovitost a zvyšuje se pucolánová reaktivita vzniklých produktů. Teploty rozkladu jednotlivých jílových minerálů jsou v rozmezí [28]:

- kaolin – 450 – 600 °C
- illit – 500 – 600 °C
- montmorillonit – 600 – 750 °C.

Důležitým parametrem je velikost částic a s ní související měrný povrch tepelně upraveného jílu. Čím vyšší je hodnota měrného povrchu, tím se jedná v daném případě o reaktivnější materiál. Je dokázáno, že kromě kaolinitu, dochází u ostatních jílových minerálů při vyšších teplotách k jistému stupni aglomerace částic [33], což pak může působit negativně na

průběh pucolánové reakce, pórový prostor a následně způsobit nižší pevnosti.

Jemně mletý keramický stěp se kromě cílené úpravy jílových zemin dá získat i recyklací a následným mletím materiálu z demolic cihelných objektů, podlahových prvků a střešních tašek [36, 37]. Jednodušším a ekonomicky méně náročným způsobem je využití cihelného obrusu v podobě jemného keramického prachu, který vzniká broušením přesných tepelně izolačních bloků. Bylo zjištěno, že jemnost tohoto obrusu je dostatečná, a pokud má vstupní surovina vhodné chemické a mineralogické složení a je vypálena v odpovídajícím teplotním rozsahu, pak je tento keramický materiál vhodný jako pucolánově aktivní příměs [38, 39].

Použití jemného keramického prachu

Jemně mletý cihelný prach patří v podstatě do skupiny tepelně upravovaných jíílů. Tento prach vykazuje horší pucolánové vlastnosti než má komerčně vyráběný metakaolin, vzhledem k použití méně kvalitních zemin s nízkým zastoupením minerálu kaolinitu při primární výrobě. Jelikož se však jedná o odpadní surovinu, která je případně pouze domílána a jeho aplikace umožňuje vylepšení vlastností výsledných materiálů, má jeho využitelnost velký potenciál nejen z hlediska technologického, ekonomického, ale i ekologického.

Výhody použití jemného keramického prachu

- výrazné zjemnění struktury, nárůst obsahu mikropórů a snížení pórů kapilárních, uvolňování menšího množství hydratačního tepla, zvýšení pevností, snížení penetrační schopnosti, zvýšení odolnosti vůči agresivním látkám (sírany a chloridy), zvýšení trvanlivosti.

Nevýhody použití jemného keramického prachu

- zhoršuje zpracovatelnost, větší spotřeba záměsové vody (díky velkému měrnému povrchu).

3.3 Přírodní zeolity

Zeolity jsou podstatnou složkou vulkanických tuřů a vulkanoklastických sedimentů, vznikají reakcí vulkanických skel a vody v sedimentačních bazénech (klinoptilolit, heulandit, analcim, chabazit, mordenit, phillipsit). Vznikají též reakcí vulkanických skel s prosakující meteorickou vodou (ložiska až X00 m mocná) – klinoptilolit, mordenit zde tvoří až přes 90 % horniny. Zeolity jsou masivně zastoupeny v hlubokoceanických sedimentech (phillipsit, klinoptilolit – někdy tvoří až přes 80 % sedimentu). Zeolity jsou čiré až průsvitné se skelným (občas perleťovým) leskem, nebo od příměsí světle zbarvené (výjimečně sytě červené). Mají nízkou až střední

tvrdost (3,5 - 5) a nízkou hustotu (okolo 2,5 gcm⁻³ [40]. Je známo zhruba 45 druhů přírodních zeolitů (z 200 evidovaných je převážná část synteticky vyrobena) [41].

Na základě výše zmíněných strukturních charakteristik lze zeolity rozdělit do 6 skupin:

- skupina phillipsitu (phillipsit, harmotom, gismondin) – tabulkovité nebo lískové zeolity
- skupina analcimu (analcim, wairakit, laumontit) – vláknité nebo kubické zeolity
- skupina chabazitu (chabazit, faujasit) – kubické zeolity
- skupina natrolitu (natrolit, mezolit, skolecit, thomsonit) – vláknité zeolity
- skupina heulanditu (heulandit, klinoptilolit, stilbit) – tabulkovité nebo lískové zeolity
- skupina mordenitu (mordenit, epistilbit) – vláknité, tabulkovité nebo lískové zeolity

Jedná se o anorganické krystalické mikroporézní materiály na bázi hydratovaných hlinitokřemičitanů. Jejich struktura je založena na prostorově uspořádaném skeletu, složeném z tetraedrů SiO₄ a AlO₄, které jsou vzájemně propojeny společně sdíleným vrcholovým kyslíkem. Negativní náboj na mřížce zeolitů vyrovnávají kationty, které jsou obsaženy v mřížkové dutině, jedná se především o kationty alkalických kovů (Na, K, Li, Cs) a kovů alkalických zemin (Ca, Mg, Ba, Sr) [40, 41]. Na stavbě základního skeletu se může podílet i fosfor zastupující Si či železo substituující Al. Dále se ve struktuře vyskytují slabě vázané, tedy v podstatě pohyblivé molekuly vody. Celá struktura je otevřená ke svému okolí a je tvořena vzájemně propojenými kanály a dutinami. Zeolity jsou navzájem odlišné různým sestavením tetraedrů v rámci trojrozměrné sítě a také velikostí a tvarem výsledných kanálů. Typickým znakem zeolitů je možnost dehydratace při vyšších teplotách a opakované rehydratace. Tuto schopnost si uchovávají až do vystavení teplotě 700 °C. Nejdůležitějším strukturním rozdílem mezi zeolity a ostatními tektosilikáty jsou větší rozměry mřížkových dutin a jejich vzájemné propojení kanály. Při vypuzení vody jsou zeolity schopné vázat různé látky v důsledku adsorpčních a iontově-výměnných dějů apod. Přesný a obecně uznávaný vzorec minerálů zeolitové skupiny doposud není k dispozici, nicméně řada autorů se již o jeho vyjádření pokusila. Gottardi (1978), Gottardi a Galli (1985) [42, 43] uvádějí obecný vzorec zeolitů takto: M_xD_v[Al_x + 2_ySi_(x+2y)O_{2n}]·mH₂O, kde M představuje jednomocné (Li, K, Na) a D dvojmocné (Mg, Ca, Sr, Ba) kationty. Množství vody v tomto obecném vzorci je dáno vztahem $n / 2 < m$

< n. Tschernich (1992) tento obecný vzorec potom modifikuje do podoby $(Ca, Na_2, K_2, Ba, Sr, Mg, Cs_2, Li_2)_H[Al_nSi_mO_{2n}] \cdot xH_2O$, když prvky uvedené v hranaté závorce reprezentují aluminosilikátovou zeolitovou kostru a prvky mimo tuto hranatou závorku jsou považovány za vyměnitelné kationy, obsazující kanálové dutiny zeolitové mřížky a vodu [41]. Sorpční vlastnosti přírodních zeolitů lze úspěšně prakticky využít v mnoha oblastech, zejména v zemědělství, v chemickém a stavebním průmyslu a v ochraně životního prostředí.

Použití přírodního zeolitu

Přírodní zeolit lze ve smyslu evropské normy EN 197-1 [44] označit za přírodní pucolán, který se vyznačuje podobnými vlastnostmi jako ostatní pucolány. Po smíchání s vodou sám nereaguje, avšak pokud je jemně namletý (velký měrný povrch), reaguje v přítomnosti vody s hydroxidem vápenatým za tvorby sloučenin hydratovaných vápenatých silikátů a vápenatých aluminátů. Díky svým vlastnostem (hlavně vysokému obsahu SiO_2 a Al_2O_3) a uspořádání struktury se ve stavebním průmyslu používají nejčastěji zeolity s největším zastoupením těchto minerálů – heulandit $(Na, K)Ca_4(Al_9Si_{27}O_{72}) \cdot 24H_2O$, klinoptilolit $((Na, K)_6(Al_6Si_{30}O_{72}) \cdot 20H_2O)$, analcim $(Na(AlSi_2O_6) \cdot H_2O)$ a chabazit $Ca_2(Al_4Si_8O_{24}) \cdot 13H_2O$.

Reaktivita zeolitických tufů, jejichž jsou zeolity podstatnou součástí, záleží především na chemickém složení, obsahu amorfních fází, mineralogickém složení, struktuře, obsahu vody a velikosti měrného povrchu.

Výhody použití přírodního zeolitu:

- vliv na pórovou strukturu (záleží na velikosti částic, množství použitého zeolitu), pucolánové aktivitě, snížení hydratačního tepla, zvýšení pevnosti v dlouhodobějším časovém horizontu [45], snížení permeability (vlivem odlišných hydratačních produktů a změnou pórového systému), snížení penetrace, zvýšená odolnost vůči průniku síranů a síranové korozi [46, 47].

Nevýhody použití přírodního zeolitu

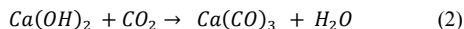
- horší zpracovatelnost, potřeba většího množství záměsové vody.

4 Působení pucolánů ve vápenných omítkových směsích

Ve stavební praxi lze pod pojmem “vápno” chápat: pálené vápno CaO , suchý vápenný hydrát Ca(OH)_2 , hašené vápno (vápenná kaše) suspenze Ca(OH)_2 ve vodě, karbidové vápno Ca(OH)_2 , hydraulické vápno [7]. Vápno patří mezi vzdušná pojiva, která tuhnou a tvrdnou pouze na vzduchu. pojivo je tvořeno vzdušným vápnem ve formě vápenné kaše nebo v pevné formě v podobě vápenného hydrátu a jemně mleté reaktivní pucolánové příměsi.

U omítek obsahujících reaktivní minerální příměs, probíhají zároveň dva konkurenční procesy v podobě karbonatace a pucolánové reakce [48]. Proto se doporučuje záměsí vápenné omítky s pucolánovou příměsí ošetřovat po dobu 28 dní vodou, tím podpořit hydratační reakce a zaručit tak dostatečný vývoj počátečních pevností. Podle složení pucolánové příměsi se tvoří látky podobné hydratačním produktům tvrdnutí portlandského cementu [49].

Karbonatace je zpevňovací proces, při kterém u čistě vápenných malt vzniká ze vzdušného vápna nerozpustný uhličitán vápenatý dle následující chemické rovnice:

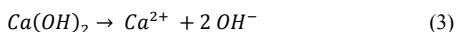


Proces karbonatace vápna je pomalý a je závislý na koncentraci oxidu uhličitého ve vzduchu, na relativní vlhkosti vzduch (RH) a na teplotě. Je-li $\text{RH} < 50 \%$ nebo $\text{RH} > 95 \%$, probíhá reakce velmi pomalu [7]. Negativní vliv na karbonataci má také nízká teplota. Vytváření pevné struktury ve vápenných omítkách probíhá vždy ve dvou krocích. Nejprve dochází v odsátí vody z malty porézním materiálem zdiva. Ve druhém kroku dochází k vlastní karbonataci, tj. reakci hydroxidu vápenatého se vzdušným oxidem uhličitým. V okamžiku kritické koncentrace iontů v roztoku se srážejí částice CaCO_3 , což je doprovázeno objemovými změnami (portlandit – kalcit) o 11,8 %. Ačkoliv obecně platí, že rychlost chemických reakcí s rostoucí teplotou stoupá, rozpustnost oxidu uhličitého ve vodě s rostoucí teplotou naopak klesá. Snížení rychlosti rozpouštění oxidu uhličitého má za následek zpomalení rychlosti postupu čela karbonatace [50].

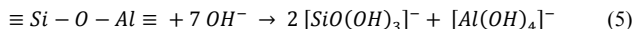
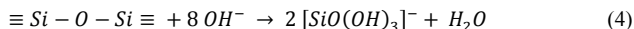
Průběh vytváření pevné struktury v přítomnosti pucolánové příměsi závisí na mnoha faktorech: na druhu pucolánu (složení, velikost částic), na pucolánové aktivitě, na kvalitě použitého vápna, okolních podmínkách (teplota, relativní vlhkost vzduchu, koncentraci CO_2).

Neméně důležité pro pucolánovou reakci je složení pucolánu, především obsah amorfního oxidu křemičitého, reaktivních forem oxidu hlinitého a bezvodných hlinitokřemičitanů, které snadno reagují s hydroxidem vápenatým. Jíly pálené nad 1 000 °C jsou pro tyto účely nevhodné, protože produkty vzniklé pálením jíelů na takto vysokou teplotu nejsou již reaktivní. Hydroxid vápenatý reaguje se vzdušným oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu vápenatého. Typ a průběh reakcí závisí na podmínkách, ve kterých se omítka nachází. K reakci pucolánu s hydroxidem vápenatým je potřeba voda, která s hydroxidem vápenatým vytváří roztok. Pokud je nízká vlhkost omítky a nízká relativní vlhkost okolního prostředí, probíhá pucolánová reakce pomalu nebo neprobíhá vůbec a uplatňuje se zejména karbonatace, která probíhá největší rychlostí mezi 70 a 95 % relativní vlhkostí vzduchu, nicméně její rychlost není zanedbatelná ani při 50 RH. V místech vyšší koncentrace oxidu uhličitého se rychlost karbonatace zvyšuje.

Pucolánová reakce probíhá v systému hydroxid vápenatý - pucolán - voda. Hydroxid vápenatý je silný hydroxid a je zcela disociován na ionty:



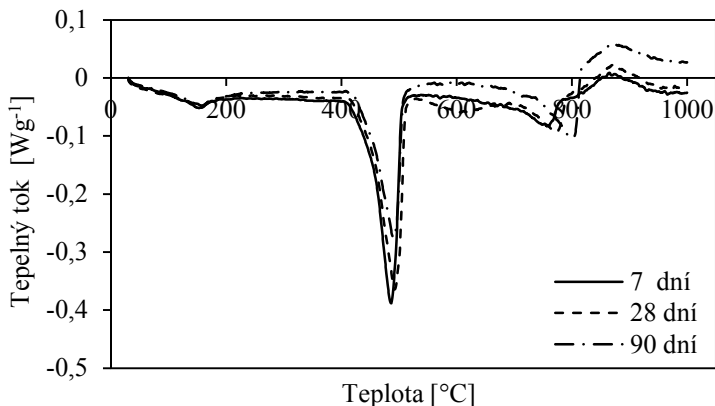
Při 25 °C má nasycený roztok hydroxidu vápenatého hodnotu pH = 12,45. Tato vysoká koncentrace OH⁻ iontů převádí do roztoku vápenaté, sodné, a draselné ionty, a dále dochází ke štěpení vazeb v SiO₂, křemičitanech a hlinitanech za vzniku jednoduchých iontů [7]:



Při kontaktu vzniklých křemičitanových a hlinitanových iontů s Ca²⁺ ionty dojde ke tvorbě hydratovaných křemičitanů (C-S-H gelů) a hlinitanů vápenatých (C-A-H) [7, 10, 11, 52]. Dalšími produkty pucolánové reakce, mohou být také C₃AH₆, C₃AS₂, C₃A·CaCO₃·12H₂O a C₂ASH₈, což jsou sloučeniny podobné produktům vznikajícím reakcí zeolitických sloučenin s hydroxidem vápenatým. Jiné studie prokázaly opět přítomnost sloučenin zeolitického charakteru např. filipsit C₃A₃S₁₀H₁₂ a analcim NAS₄H₂, ve spojení s mikrokrytalickým kalcitem. Slížková našla rentgenovou analýzou v zatvrdlém vápenometakaolinovém pojivu strätlingit (hydratovaný gehlenit) C₂ASH₈, CH a CC [53], Rojas navíc CSH a C₄AH₁₃ [54].

Přítomnost těchto sloučenin je příčinou zvýšené odolnosti trvanlivosti pucolánových omítek [10].

Křemičitanové složky se rozpouštějí rychleji než hlinitanové a pro tvorbu hlinitanů vápenatých je třeba vyšší koncentrace Ca^{2+} iontů, na částech pucolánu se srážejí nejprve C-S-H gely a na jejich povrchu hlinitany vápenaté ve formě hexagonálních lístků. Na Obr. 2 je zobrazena termická analýza (diferenční kompenzační kalorimetrie – DCS) omítky s obsahem pucolánové příměsi (7 dní, 28 dní, 90 dní).



Obr. 2: Termická analýza (diferenční kompenzační kalorimetrie – DSC) omítky s obsahem pucolánové příměsi

Rozhodující význam pro použití pucolánů do vápenných nebo cementových malt je jejich pucolánová aktivita. Pucolány lze podrobit zkouškám, kterými se zjistí jejich reaktivita, jež vede ke tvorbě pevné struktury ve vodě nerozpustných sloučenin.

Vápenné omítky s pucolánovými příměsmi mají vyšší pevnosti než omítky vápenné, vyšší hustotu matrice a mezifázové přechodové oblasti, nižší permeabilitu, a tím omezené pronikání plynů a roztoků do porézní struktury, tudíž jsou odolnější vůči agresivním látkám, čímž se zvyšuje jejich odolnost a trvanlivost. Pucolánové příměsi mají vliv na pórovou strukturu materiálu, dochází ke zmenšení velikosti pórů a celkově nižšímu objemu otevřených pórů.

5 Metody stanovení pucolánové aktivity

Schopnost reakce pucolánů s hydroxidem vápenatým ve vodném prostředí za běžných teplot se nazývá pucolánová aktivita.

Pucolánová aktivita je rozhodujícím faktorem pro použití pucolánových příměsí do vápenných malt. Reaktivitu pucolánů lze v současnosti určit pomocí následujících metod.

5.1 Zkouška vaznosti směsi pucolánu s vápnem (cementem)

Ke stanovení vaznosti se používá směs pucolán – vápno nebo pucolán – cement. Ze směsi pucolán – pojivo – křemenný písek (1:0,8:1) se vyrobí zkušební tělesa, která se po třech dnech uložení ve vlhkém prostředí (na vzduchu) vloží do vodní lázně. U takto ošetřených těles se po 7 a 28 dnech stanovují pevnosti v tlaku a tahu za ohybu. Pevnosti musí dosahovat minimálních hodnot 4,5 / 0,5 MPa po 7 dnech a 14 / 1,6 MPa po 28 dnech [56].

5.2 Sledování průběhu reakce pucolánu s hydroxidem vápenatým

Dalším možným způsobem jak určit reaktivitu pucolánových látek je pomocí přímé reakce s roztokem hydroxidu vápenatého, kdy se stanovuje zbytkový hydroxid vápenatý, tzv. Chappelleho test dle NF P 18-513. Jedná se o reakci pucolánu s přesně definovaným množstvím CaO po dobu 16 hodin ve vodném prostředí. Reakce probíhá za zvýšené teploty 90 °C a výsledek zkoušky je uváděn jako množství v mg Ca(OH)₂, které zreagovalo s 1g pucolánu. Vzorek se označuje za pucolánově aktivní, pokud 1 g pucolánu absorbuje více než 650 mg Ca(OH)₂ [10].

6 Vlastní dosažené výsledky v dané oblasti - výběr

V rámci řešené problematiky z oblasti vápenných omítek s pucolánovými příměsmi byla prováděna následující měření.

6.1 Stanovení vlivu „metalupku“ na fyzikální vlastnosti vápenných omítek [57]

6.1.1 Studované materiály

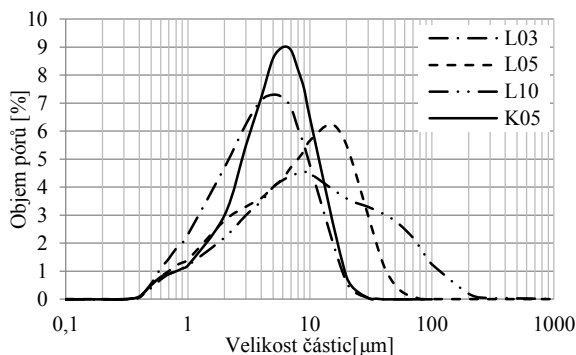
Omítková směs byla tvořena vápenným hydrátem CL 90 (Kotouč Štramberk, spol. s r. o.) vyhovující normě ČSN EN 459-1 [58]. Dále byly použity 3 typy pucolánové příměsi firmy ČLUZ a. s. vyrobené z jílovce (lupku) - L03, L05, L10 - s různou granulometrií (L03, L05, L10 – značí D50, tj. 50 % zrn menších než 3, 5, 10 μm), podobnou technologií výroby jakou je výroba metakaolinu - pálením kaolinu (lupku s vysokým obsahem kaolinitu). Omítkové směsi s těmito pucolány (metalupky) byly označeny jako LCS03, LCS05, LCS10. Dále byla použita pucolánová příměs opět od firmy ČLUZ a. s. K05, která je připravována výpalem kaolinu (metakaolin) - LM. Pucolánové příměsi tvořily 20% náhradu vápenného hydrátu (množství určeno na základě předchozí studie [59]). Jako referenční byla použita vápenná omítka bez pucolánu (LR). Složení omítkových směsí je uvedeno v Tab. 3 a chemické složení vstupních surovin v Tab. 4. Granulometrické křivky jednotlivých složek jsou uvedeny na Obr. 3. Pro jednotlivé omítkové směsi byl dodržován takový poměr vody k suché směsi, aby bylo dosaženo rozlivu čerstvé malty 160 mm, zkouška byla stanovena dle normy ČSN EN 1015 – 3 [60].

Tabulka 3: Složení studovaných omítkových směsí

Materiál	Druh pucolánu	Hmotnost pucolánu	Vápenný hydrát	Křemičitý písek 0-4	v/směs
		[kg]	[kg]	[kg]	
LR	-	-	2,5	7,5	0,29
LCS10	L10	0,42	2,08	7,5	0,25
LCS05	L05	0,42	2,08	7,5	0,23
LCS03	L03	0,42	2,08	7,5	0,24
LM	K05	0,42	2,08	7,5	0,26

Tabulka 4: Chemické složení vstupních surovin

Složení	Mefisto K05	Mefisto L03, L05, L10	Vápenný hydrát
	[%]	[%]	[%]
Al ₂ O ₃	38,50	41,90	-
SiO ₂	58,70	52,90	-
K ₂ O	0,85	0,77	-
Fe ₂ O ₃	0,72	1,08	-
TiO ₂	0,50	1,80	-
MgO	0,38	0,18	1,1
CaO	0,20	0,13	95,7
SO ₃	-	-	0,1
CO ₂	-	-	0,9



Obr. 3: Distribuční křivka rozdělení velikosti částic pucolánů

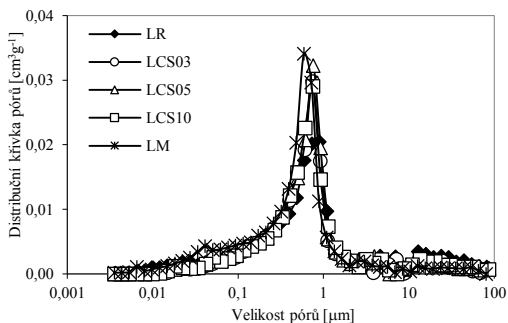
6.1.2 Základní fyzikální vlastnosti

Objemová hmotnost ρ [kgm^{-3}], hustota matrice ρ_{mat} [kgm^{-3}] a otevřená pórovitost ψ_0 [%] byly měřeny na vzorcích o rozměrech $50 \times 50 \times 50$ mm a pomocí gravimetrické metody a nasákavosti [61] jsou uvedeny v Tab. 5. Nejnižší hodnoty otevřené pórovitosti vykazují materiály s obsahem jemněji mleté pucolánové příměsi L05 a L03 (metalupku) – LCS05 a LCS03. Materiál LCS10 s obsahem metalupku L10 dosáhl průměrně o 5 % vyšších hodnot než materiály LCS05 a LCS03 a podobných hodnot jako materiál s obsahem metakaolinu LM. Objemové hmotnosti a hustoty pevných matic všech studovaných materiálů byly podobné a lišily se v rozmezí do 3 %.

Tabulka 5: Základní fyzikální vlastnosti studovaných omítkových směsí

Materiál	ρ	ρ_{mat}	Ψ
	[kgm^{-3}]	[kgm^{-3}]	[%]
LR	1726	2648	34,6
LCS10	1660	2573	35,5
LCS05	1689	2533	33,3
LCS03	1689	2543	33,6
LM	1716	2669	35,7

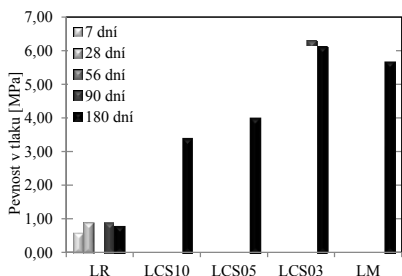
Rozdělení pórů reprezentované distribučními porozimetrickými křivkami (Obr. 4) omítkových směsí s pucolánovými příměsími vykazovaly podobné průběhy a příliš se nelišily od referenční směsi LR.



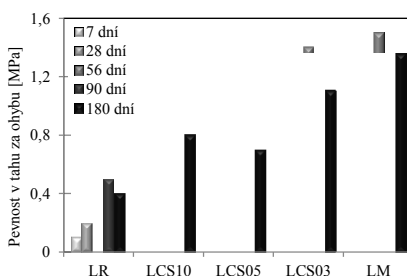
Obr. 4: Distribuční porozimetrické křivky studovaných omítek

6.1.3 Mechanické vlastnosti

Hodnoty pevnosti v tlaku a tahu za ohybu studovaných omítek jsou zobrazeny na Obr. 5. a Obr. 6. Zkoušky byly provedeny dle normy ČSN EN 1015 – 11 [62] na tělesech 40 × 40 × 160 mm.



Obr. 5: Pevnosti v tlaku studovaných omítek



Obr. 6: Pevnosti v tahu za ohybu studovaných omítek

Nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku ve všech měřených časových intervalech vykazoval materiál LCS03 s nejjemněji mletým metalupkem L03. O něco nižších hodnot a nižší rychlosti nárůstu počátečních pevností dosáhl materiál LM s obsahem metakaolinu, pravděpodobně i díky nepatrně hrubšímu mletí než v případě materiálu LCS03. Ostatní materiály LCS05 a LCS10 dosahovaly nižších hodnot než materiály LCS03 a LM, nicméně, stále jejich hodnoty pevností byly vyšší než u referenční vápenné omítky LR. Hodnoty pevností v tahu za ohybu vykazovaly u všech studovaných omítek podobný trend jako v případě pevností v tlaku (Obr. 6). Zajímavé je

také zjištění nepatrného poklesu hodnot pevností v tlaku po 180 dnech u všech studovaných omítek.

Mrazuvzdornost omítek byla hodnocena podle ČSN 73 1322 [63]. Studované omítky připravené s pucolánovou příměsí - metalupkem byly vyhodnoceny jako mrazuvzdorné z hlediska tlakových pevností, tj. koeficient mrazuvzdornosti K , získaný z poměrů pevností v tlaku, je větší než 0,75. Koeficienty mrazuvzdornosti určený z poměrů pevností tlaku za ohybu, nevyhověly u žádného ze studovaných materiálů, nejlepších výsledků dosáhl materiál LCS03. Omítky s obsahem metakaolinu LM nevyhověly ani v jednom případě posuzování, stejně tak nevyhověla ani referenční vápenná omítka LR, která dosáhla nejhorsích výsledků.

Tabulka 6: Mrazuvzdornost omítkových směsí

Materiál	Koeficient mrazuvzdornosti K z poměru pevností v tlaku		Koeficient mrazuvzdornosti K z poměru pevností v tahu ohybem	
	[-]		[-]	
	1. etapa	2. etapa	1. etapa	2. etapa
LR	0,89	0,89	0,5	0,5
LCS10	1,03	1,03	0,5	0,5
LCS05	1,18	1,04	0,63	0,38
LCS03	0,96	0,85	0,57	0,57
LM	0,62	0,54	0,63	0,22

6.1.4 Transport kapalné vlhkosti a vodní páry

Parametry určující schopnost vést kapalnou vlhkost a vodní páru jsou uvedeny v Tab. 7. Absorpční koeficient A [$\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$] a průměrný součinitel vlhkostní vodivosti κ [m^2s^{-1}] byly určeny pomocí absorpčního experimentu – absorpce kapalné vody z volné hladiny [60] na kruhových vzorcích o průměru 120 mm a tloušťce 25 mm. Rychlost transportu vodní páry byla měřena tzv. cup metodou [64] a byly určovány difúze vodní páry D [m^2s^{-1}] a faktor difúzního odporu μ [-], na vzorcích 50 x 50 x 25 mm.

Nejnižších hodnot absorpčního koeficientu dosáhl materiál LCS03 a LCS05, což je v souladu s jejich nejnižší pórovitostí (Tab. 5). Omítka s obsahem metakaolinu dosahovala v průměru o 10 %, omítka LCS10 o 30 % a referenční omítka LM o 50 % vyšších hodnot absorpčního koeficientu než materiály LCS03 a LCS05.

Nejvyšších hodnot součinitele difúze vodní páry v obou uspořádání (dry-cup, wet-cup) dosahoval referenční materiál LM. Hodnoty omítek s pucolánovou příměsí (metalupku) dosahovaly o 40 – 50 % nižších hodnot, což je stále velmi dobře akceptovatelné z hlediska difúzní otevřenosti omítek a jejich aplikovatelnosti (rekonstrukce i novodobé). Hodnoty difúze vodní páry omítek s metakaolinem LM byly v obou případech nepatrně

vyšší než hodnoty omítek s metalupkem a nižší než hodnoty referenční omítky LR.

Tabulka 7: Vlhkostní vlastnosti studovaných materiálů

Materiál	Transport kapalné vody		Transport vodní páry			
	A	κ	5/50 %		97/50 %	
			D	μ	D	μ
	[kg m ⁻² s ^{-1/2}]	[m ² s ⁻¹]	[m ² s ⁻¹]	[-]	[m ² s ⁻¹]	[-]
LR	0,215	5,17E-07	1,64E-06	14,05	4,52E-06	5,24
LCS10	0,197	3,13E-07	1,16E-06	19,83	3,02E-06	7,69
LCS05	0,14	1,78E-07	1,11E-06	20,83	3,24E-06	7,15
LCS03	0,145	1,86E-07	1,02E-06	22,71	2,66E-06	8,7
LM	0,159	2,02E-07	1,43E-06	16,1	3,00E-06	7,7

6.1.5 Tepelné vlastnosti

Součinitel tepelné vodivosti λ [Wm⁻¹K⁻¹] a měrná tepelná kapacita c [Jkg⁻¹K⁻¹] byly určeny nestacionární metodou pomocí přístroje ISOMET 2104 – Applied Precision [65]. Výsledné hodnoty měřených parametrů jsou uvedeny v Tab. 8. Z dosažených výsledků lze pozorovat snížení hodnot součinitele tepelné vodivosti u materiálů s obsahem pucolánové příměsi a nepatrné zvýšení hodnoty měrné tepelné kapacity.

Tabulka 8: Tepelné vlastnosti studovaných materiálů

Materiál	λ	c
	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
LR	0,836	867
LCS10	0,747	962
LCS05	0,751	904
LCS03	0,749	937
LM	0,706	921

6.1.6 Shrnutí dosažených výsledků

Z dosažených výsledků je patrné, že tento nový materiál „metalupek“, vyráběný pálením lupků nacházejících se na území střední Evropy, se jeví jako velmi perspektivní pucolánová příměs a je schopen významně konkurovat tradičním pucolánovým příměsím (metakaolinu), které se používají již řadu let. Dosažené vlastnosti můžeme shrnout následovně:

- všechny studované materiály s obsahem metalupku L03, L05, L10 dosahovaly výrazně vyšších hodnot pevnosti v tlaku než vápenná omítka (až 7násobně), dále dosahovaly až o 30 % nižších hodnot absorpčního koeficientu
- studované omítky dosahovaly vyhovujících hodnot součinitele difúze vodní páry

- mrazuvzdornost těchto metalupkových omítek byla výrazně lepší než omítky vápenné, po 30 zmrazovacích cyklech byla jejich hodnota pevnosti v tlaku na 80 % a na více než 50 % u pevnosti v tahu za ohybu (vápenná omítka se rozpadla po 3 zmrazovacích cyklech)
- velikost částic výrazně ovlivňuje reaktivitu pucolánových příměsí, nejlepší výsledek lze pozorovat u pucolánových příměsí s velikostí částic pod 4 μm (průměrná velikost částic L03), takto malé částice umožňují vyšší rychlost reakcí křemičitanů, reaktivních hlinitanů a hlinitokřemičitanů s Ca^{2+} , což se projeví efektivnějším zapojením do systému hydratačních produktů
- ve srovnání s používaným metakaolinem jsou vlastnosti metalupku lepší, případně srovnatelné (mrazuvzdornost – lepší, mechanické vlastnosti – srovnatelné, vlhkostní vlastnosti – lepší, srovnatelné, tepelné vlastnosti - srovnatelné).

6.2 Stanovení vlivu rozdílného množství pucolánové příměsi jako částečné náhrady vápenného hydrátu na fyzikální vlastnosti vápenných omítek [66]

6.2.1 Studovaný materiál

Stejně jako v předchozím případě (kapitola 6.1) byl v omítkových směsích použit vápenný hydrát CL 90 (Kotouč Štramberk). Jako částečná náhrada vápenného hydrátu byl použit pucolán typu L05 (metalupek), a to v různých procentuálních zastoupeních (0 – 68 %). Měrný povrch tohoto pucolánu je $12,69 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, obsah amorfni fáze je 51 %, mulitu 38 %, cristobalitu 7 % a křemene 4 %. Chemické složení je uvedeno v Tab. 4. Pro srovnání byla opět použita vápenná omítka bez pucolánu a srovnávací směs s pucolánovou příměsí K05 (metakaolin). Podrobné složení je uvedeno v Tab. 9.

Tabulka 9: Složení studovaných materiálů

Materiál	Druh pucolánu	Hmotnost pucolánu	Vápenný hydrát	Křemičitý písek 0-4	v/směs [-]	Rozliv [mm]
		[kg (%)]	[kg]	[kg]		
LPM	-	0 (0)	2,5	7,5	0,29	177
LPCS1	L05	0,2 (8)	2,3	7,5	0,26	173
LPCS2	L05	0,5 (20)	2	7,5	0,22	175
LPCS3	L05	0,9 (36)	1,6	7,5	0,21	175
LPCS4	L05	1,3 (52)	1,2	7,5	0,20	175
LPCS5	L05	1,7 (68)	0,8	7,5	0,20	175
LPR	K05	0,5 (20)	2	7,5	0,24	173

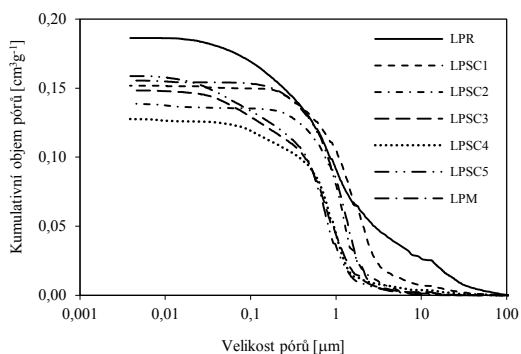
6.2.2 Základní fyzikální vlastnosti malt pro omítání

Hodnota otevřené pórovitosti referenční směsi LPR (Tab. 10) stanovené na základě měření pomocí vakuové nasákavosti a gravimetrie [61] byla vzhledem k ostatním materiálům s obsahem pucolánové příměsi průměrně o 10 % vyšší. Materiály s obsahem lupku vykazovaly vzájemně podobné hodnoty objemové hmotnosti i hustoty pevné matrice, rozdíly naměřených hodnot se vzájemně lišily do 3 %. Referenční omítka s metakaolinem měla o 5 % vyšší hodnotu otevřené pórovitosti a o 3 % vyšší hodnotu objemové hmotnosti a hustoty pevné matrice než korespondující směs s obsahem metalupku. Z dosažených hodnot není patrný vliv obsahu na zjišťované parametry. Z kumulativních porozimetrických křivek (Obr. 7) je patrné, že referenční směs vykazovala daleko větší množství mikro i makropórů než ostatní materiály. Nejnižších hodnot v celé zjišťované oblasti vykazoval materiál LPCS4 (52 % metalupku), LPCS3 a LPCS2. Omítka s obsahem metakaolinu LPR (20 % metakaolinu) vykazovala podobný průběh

kumulativní pórové křivky jako odpovídající omítka s obsahem metalupku LPCS2 (20 % metalupku).

Tabulka 10: Základní fyzikální vlastnosti studovaných malt

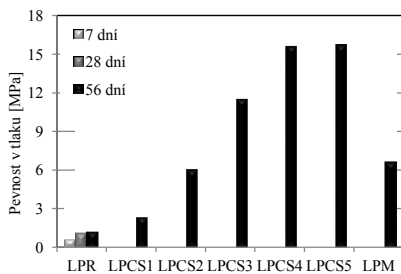
Materiál	ρ	ρ_{mat}	Ψ
	[kg m^{-3}]	[kg m^{-3}]	[%]
LPR	1805	2879	28,8
LPCS1	1692	2540	33,4
LPCS2	1741	2688	32,2
LPCS3	1783	2539	29,8
LPCS4	1760	2544	30,8
LPCS5	1719	2546	32,5
LPM	1768	2614	30,1



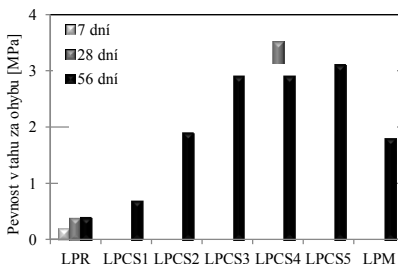
Obr. 7: Kumulativní porozimetrické křivky studovaných malt

6.2.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické parametry studovaných omítek jsou uvedeny na Obr. 8 a 9.



Obr. 8: Pevnosti v tlaku studovaných omítek



Obr. 9: Pevnosti v tahu za ohybu studovaných omítek

Z dosažených výsledků lze pozorovat, že hodnoty pevnosti v tlaku studovaných vápenopucolánových omítek v celé měřené časové periodě se zvyšují se zvyšujícím se obsahem metalupku až do poměru 1,3:1,2 (vápno:pucolán) – omítka LPCS4 (52 % metalupku). Hodnoty omítky LPCS4 a LPCS5 (68 % metalupku) je již téměř nelišily. Je patrné, že nárůst pevností se po 28 dnech výrazně zpomalil až zastavil. Lze tedy předpokládat, že v tomto časovém intervalu byla většina reakčních procesů v rámci pucolánové reakce již ukončena, což souvisí především s jemností mletí použitého pucolánu a s jeho reaktivitou. Referenční vápenometakaolinová omítka LPM vykazovala rychlejší nárůst 7denních pevností než odpovídající omítka vápenometalupková, nicméně po 28 dnech již byly hodnoty pevností srovnatelné a lišily se v rozmezí do 10 %. Pevnosti čistě vápenné omítky byly v celém měřeném časovém intervalu výrazně nižší než hodnoty vápenopucolánových omítek. Hodnoty pevností v tahu za ohybu vykazovaly podobný trend dosažených výsledků, jako v případě hodnot stanovených pro pevnosti v tlaku.

Nejlepší mrazuvzdornost vykazovala omítka s nejvyšším obsahem metalupku LPCS5 (68 %) a referenční vápenopucolánová omítka LMR, které vyhověly normovým požadavkům $K > 0,75$. Ostatní pucolánové omítky dosáhly po 15 zmrazovacích cyklech o více než 50 % nižších hodnot pevností v tlaku a v případě materiálu LPSC1 bylo měření zastaveno po 9 cyklech, kdy bylo pozorováno výrazné povrchové poškození vzorků. Nicméně i přes tato poškození nedošlo k poklesu hodnot pevnosti v tlaku. K poškození vápenných omítek došlo už po 2. cyklu. Výsledky získané z poměru hodnot pevností v tahu za ohybu byly výrazně horší než hodnoty získané z poměrů pevností v tlaku a žádný materiál nevyhověl normovým požadavkům.

Tabulka 11: Mrazuvzdornost omítkových směsí

Materiál	Koeficient mrazuvzdornosti K z poměru pevností v tlaku	Koeficient mrazuvzdornosti K z poměru pevností v tahu za ohybu
	I	I
LPR	0,64	0,5
LPCS1	1,09	0,68
LPCS2	0,51	0,49
LPCS3	0,51	0,53
LPCS4	0,65	0,63
LPCS5	0,8	0,5
LPM	0,76	0,59

6.2.4 Transport kapalně vlhkosti a vodní páry

Charakteristiky týkající se schopnosti transportu kapalně vlhkosti a vodní páry jsou uvedeny v Tab. 12. Hodnoty absorpčního koeficientu A studovaných vápenometalupkových omítek klesaly s rostoucím množstvím

pucolánové příměsi, což koresponduje s výsledky změny pórové struktury omítek s obsahem pucolánu a úbytku pórů v oblasti 10 – 100 nm. Nejnižší hodnoty A dosáhl materiál s největším obsahem metalupku LPCS5. Vápenometakaolinová LPM omítka dosáhla nepatrně vyšší hodnoty A vzhledem ke srovnávací vápenometalupkové omítce LPCS2. Nejvyšších hodnot dosáhla referenční vápenná omítka LPR, u které se porozimetrickým měřením potvrdila přítomnost kapilárních pórů.

Hodnota součinitele difúze vodní páry D se snižovala se zvyšujícím se obsahem pucolánové příměsi (metalupku). Materiály LPCS1 (8 % metalupku) a LPCS2 (20 % metalupku) dosahovaly 2 až 3krát vyšších hodnot D omítky LPCS3 (36 % metalupku) a LPCS4 (52 % metalupku), v závislosti na použité metodě. Vápenometakaolinová omítka LPM (20 % metakaolinu) dosahovala srovnatelných hodnot D jako omítka se stejným obsahem metalupku (LPCS2) v případě uspořádání dry-cup a téměř 2násobné v případě uspořádání metody wet-cup.

Tabulka12: Vlhkostní vlastnosti studovaných materiálů

Materiál	Transport kapalné vody		Transport vodní páry			
	A	κ	5//50 %		97//50 %	
			D	μ	D	μ
	[kg m ⁻² s ^{-1/2}]	[m ² s ⁻¹]	[m ² s ⁻¹]	[-]	[m ² s ⁻¹]	[-]
LPR	0,206	8,80E-07	1,41E-06	16,42	7,88E-06	3,08
LPCS1	0,128	7,78E-08	1,39E-06	16,95	5,48E-06	4,31
LPCS2	0,133	1,71E-07	1,45E-06	15,87	6,03E-06	3,95
LPCS3	0,094	1,00E-07	9,23E-07	25,04	4,44E-06	5,39
LPCS4	0,092	8,97E-08	4,21E-07	57,38	2,77E-06	17,81
LPCS5	0,046	1,99E-08	4,23E-07	54,94	4,57E-06	7,5
LPM	0,151	1,82E-08	8,35E-07	30,05	4,09E-06	5,73

6.2.5 Tepelné vlastnosti

Výsledné hodnoty měřených parametrů jsou uvedeny v Tab. 13. Z dosažených výsledků lze pozorovat, že jednotlivé parametry se vzájemně lišily jen nepatrně a dosažené rozdíly se pohybovaly spíše v rámci chyby měření.

Tabulka 13: Tepelné vlastnosti studovaných materiálů

Materiál	λ	c
	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
LPR	0,780	817
LPCS1	0,939	952
LPCS2	0,802	899
LPCS3	0,837	869
LPCS4	0,823	855
LPCS5	0,861	887
LPM	0,842	868

6.2.6 Shrnutí dosažených výsledků

V rámci tohoto výzkumu bylo studováno několik typů vápenopucolánových omítek s různým obsahem (od 8 – 68 % metalupku) jako částečné náhrady vápenného pojiva. Pro porovnání byla studována vápenometakaolinová omítka (se shodným množstvím metakaolinu jako jedna ze studovaných omítek s obsahem metalupku) a vápenná omítka bez pucolánu. Závěry lze shrnout do následujících bodů:

- pevnost v tlaku a v tahu za ohybu studovaných vápenometalupkových omítek byla až 10krát vyšší v porovnání s referenční vápennou omítkou, omítková směs s obsahem 52 a 68% obsahem metalupku jako částečné náhrady vápenného pojiva vykazovaly nejlepší hodnoty mechanických parametrů
- se vzrůstajícím množstvím metalupku se snižovala hodnota absorpčního koeficientu a klesala tedy schopnost transportu kapalné vody, což pozitivním způsobem ovlivňuje trvanlivostní vlastnosti, hodnota součinitele difúze vodní páry se snižovala, nicméně difúzní otevřenost těchto omítek, pro jejich aplikaci v podobě exteriérové povrchové vrstvy je dostatečná
- Mrazuvzdornost vápenometalupkových omítek byla ve všech případech výrazně lepší ve srovnání s vápennou omítkou, nicméně pokles pevností po 15 zmrazovacích cyklech je značný, a proto je nutné při případném praktickém použití provést důkladné zhodnocení vzhledem ke klimatickým poměrům dané lokality
- tepelné vlastnosti studovaných omítek nebyly přidáním metalupku výrazně ovlivněny
- v porovnání s vápenometakaolinovou omítkou vykazovala vápenometalupková omítka podobného složení srovnatelné hodnoty mechanických parametrů, horší mrazuvzdornost, nižší hodnoty absorpčního koeficientu, nepatrně vyšší hodnoty součinitele difúze vodní páry a srovnatelné tepelné vlastnosti.

7 Závěr a směřování dalšího výzkumu

Díky dostupným dobovým záznamům je zřejmé, že pucolánové příměsi (jejich znalost, použití případně technologie zpracování) byly součástí stavební praxe již v době dávno minulé. Nicméně stále si budeme klást otázku, jaké technologie zpracování surovin a jejich praktickou aplikaci naši předkové volili a jak je možné, že některé z těchto staveb vydržely tisíciletí a můžeme je obdivovat i v současnosti.

V každé době bylo a je snahou hledat vhodné materiály s vyššími užitnými vlastnostmi a stále vylepšovat materiály stávající. Kromě používaných materiálů na bázi tradičních surovin se jako jeden z vhodných směrů jeví použití **vedlejších produktů**, vznikajících při průmyslové výrobě jako odpadní materiál (**cihelný prach, popely a popílký vzniklé spalováním organických materiálů, ze spaloven komunálního odpadu, z kalů čistíren odpadních vod**). Tyto materiály mají ve srovnání s přírodními materiály (trasy, tufy, zeolity), nevýhodu především v širším rozptylu hodnot vlastností, které je charakterizují, ale i přesto se často jedná o vhodné suroviny pro další využití. Další možností je cílené hledání a úprava (tepelná, mletí) nových nerostných surovin (**lupky**). Takto vzniklé technogenní pucolány se vyznačují poměrně stálým složením a jejich aplikace se jeví jako velmi výhodná (metakaolin, **metalupek**). Podstatou a možností aplikace těchto nových reaktivních příměsí je především jejich chemické a mineralogické složení, obsah amorfní fáze, velikost částic a s tím související měrný povrch. Důležitý je také jejich vliv na jednotlivé materiálové charakteristiky v delším časovém horizontu.

Výzkum v oblasti náhrady části vápenného nebo cementového pojiva vhodnými alternativními surovinami v podobě pucolánových příměsí při výrobě maltovin nebo betonu, ať již technogenními nebo přírodními, je již řadu let velmi aktuálním tématem. Zpřísňující se požadavky na průmyslovou výrobu především z hlediska ekologického dopadu (emise CO₂) na životní prostředí je velkou motivací pro nalezení vhodného směru změny technologie samotné výroby nahrazení klasického pojiva. Významnou možností je i využití pucolánů jako částečné náhrady pojiva v maltových směsích při konečné aplikaci, při zachování a vylepšení užitných vlastností běžně dostupných vstupních materiálů. Neméně významným hlediskem pro aplikaci vhodných náhradních surovin jsou i aspekty ekonomické. Lze konstatovat, že v našem povědomí ještě není zcela zakotvena myšlenka ochrany životního prostředí a ohled na budoucí generace, které v něm budou žít. Nicméně právě tato zpřísňující se ekologická kritéria umocňovaná ekonomickým hlediskem by mohla

odstartovat odpovědnější přístup a větší zájem o tuto problematiku, a to nejen v oblasti výroby vápenných a cementových pojiv, ale ve všech průmyslových oborech.

Další motivací pro nalezení vhodných pucolánových příměsí je i dnešní přístup památkářů, historiků a restaurátorů, kteří upřednostňují především snahu se co nejvíce přiblížit původním materiálům v rámci jednotlivých historických slohů i s využitím původních technologických postupů výroby.

Ze všech výše uvedených důvodů je zřejmé, že využití těchto surovin se jeví jako velice perspektivní a také to, že je zde ještě mnoho témat, která nejsou dostatečně objasněna, případně nejsou dosud známá, a která budou zcela jistě součástí mnoha výzkumů v dalších letech.

8 Použitá literatura

- [1] Bárta, R., *Chemie a technologie cementu*. Československá akademie věd. Praha 1961.
- [2] Massazza, F., 1993. Pozzolanitic Cements. *Cement & Concrete Composites* 15, s. 185-214.
- [3] Vitruvius Pollio, M., *Deset knih o architektuře*. SNKLUH, Praha 1953.
- [4] Damtof, J.S., Lukasik, J. Herfort, D., Sorrentino, D., Gartner E.M. 2008. Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and Concrete Research*. 38, s. 115–127.
- [5] Schneider M., Romer, M., Tschudin M., Bolio H. 2011. Sustainable cement production present and future. *Cement and Concrete Research*. 41, s. 642-650.
- [6] Historické omítky s použitím cihelného pojiva – starověké lázně [online]. In: [cit. 2016-01-26]. Dostupné z: <http://www.blog.cihlovyrecyklat.cz/category/historie/>
- [7] Rovnaníková, P. Omítky. Chemické a technologické vlastnosti. Praha: STOP, 2002.
- [8] ASTM C125-14, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [9] Rovnaníková, P., Rovnaník, P., *Stavební chemie*. FAST, VUT v Brně 2014.
- [10] Pavlíková, M., Fyzikální a chemická charakterizace vlivu minerálních příměsí na vlastnosti cementových a vápenných malt. Profesorské přednášky. ČVUT v Praze 2016.
- [11] Rovnaníková, P., Pucolány ve vápenných maltách. Sanace a rekonstrukce staveb, 2003.
- [12] Organizace spojených národů pro výživu a zemědělství: Food and Agriculture Organization of the United Nations. [online]. [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: <http://www.fao.org/home/en/>
- [13] Gunasekaran, K., Kumar, P. S., Lakshmiathy, M. 2011. Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Construction and Building materials*. 25 (1), s. 92-98.
- [14] Gunasekaran, K., Annadurai, R., Kumar, P. S. 2012. Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete. *Construction and Building materials*. 28(1), s. 208-215.
- [15] India Coconut Production. *Kumaran Coir* [online]. [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://kumarancoir.com/kumaran_coir_consultant.php
- [16] Alengaram, U. J., Al Muhit, B. A., Bin Jumaat, M. Z. 2013. Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete - A review. *Construction and building materials*. 38, s. 161-172.
- [17] Shafigh, P., Alengaram, U. J., Bin Mahmud, H., Jumaat, M. Z. 2013. Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. *Materials & Design*, 49, s. 613-621.
- [18] Mohammed, B. S., Foo, W. L., Hossain, K. M. A., Abdullahi, M. 2013. Shear strength of palm oil clinker concrete beams. *Materials & Design*. 46, s. 270-276.
- [19] Awal, A. S. M. A., Shehu, I. A. 2013. Evaluation of heat of hydration of concrete containing high volume palm oil fuel ash. *Fuel*, 105, s. 728-731.
- [20] Muthadhi, A., Kothandaraman, S. 2013. Experimental Investigations of Performance Characteristics of Rice Husk Ash-Blended Concrete. *Journal of materials in civil engineering*. 25(8), s. 1115-1118.
- [21] Apiwaranuwat A., Kitraporn P., Chuangcham K., Punmatharith, T. 2013. Use of Sugarcane Bagasse Ash as Raw Material in Production of Autoclaved Lightweight Concrete. *Advances in materials and materials processing*, 652-654, s. 1242-1246
- [22] De Paula, M. O., Tinoco, I. D. F., Rogrigues, C. D. S., Saraz, J. A. O. 2010. Sugarcane bagasse ash as a partial-portland-cement-replacement materiál. *Dyna-colombia*. 77 (163), s. 47-54.
- [23] Sales, A., Lima, S. A. 2010. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste management*. 30(6), s. 1114-1122.

- [24] Rashad, A. M., 2013. Metakaolin as cementitious material: History, sources, production and composition – A comprehensive overview, *Construction and Building Materials*. 41, s. 303–318.
- [25] Prasad, M. S, Reid, K.J., Murray H.H, 1991. Kaolin: processing, properties and applications. *Applied Clay Science*. 6(2), s. 87–119.
- [26] Filips, C, Petit, S., Deccareau, A., 2000. Hydrothermal formation of kaolinite from various metakaolins. *Clay minerals*, 35, s. 559-572.
- [27] Ambrose, J., Maximilien, S., Petra, J., 1994. Properties of metakaolin blended cement. *Advanced Cement Based Materials*. 1, s. 161-168.
- [28] Hanykýř, V., Kutzendörfer, J., 2008. Technologie keramiky. Silikátový svaz. Praha.
- [29] Khatib, J.M., Wild, S., 1996. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*. 26(10), s. 1545-1553.
- [30] Poon, C.S., Kou, S. C., Lam, L. 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20, s. 858-865.
- [31] Zhang, M., Malthora, 1995. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*. 25, s. 1713-1725.
- [32] Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites* 23 (6), s. 441–454.
- [33] Hea, Ch., Oszbekck, B., Makovick, E., 1995. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, 25(8), s. 1691-1702.
- [34] Malaiskiene, J., Maciulaitis, R. Kicaite, A., 2011. Dependence of ceramics physical–mechanical properties on chemical and mineralogical composition. *Construction and Building Materials*, 25, s. 3168–3174.
- [35] Stručně o minerálech.. [online]. [cit. 2015-03-115]. Dostupné z: <http://www.velebil.net/mineraly/>
- [36] Silva, J., De Brito, J., Veiga, R., 2008. Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. *Materials and Structures*,
- [37] Lavat, A.E., Trezza, M.T., Poggi, M., 2009. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management*, 29, s. 1666–1674.
- [38] Vejmelkova, E., Keppert, M., Rovnanikova, P., Ondracek, M., Kersner, Z., Černý, R., 2012. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Research*. 34 (1), s. 55-61.
- [39] Vejmelkova, E., Ondracek, M., Sedlmajer, M., Cerny, R., 2010. Fine-ground ceramics as an alternative binder in high performance concrete. *High performance structures and materials V*. WIT Transactions on the Built Environment. 112, s. 91-98.
- [40] Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium. [online]. [cit. 2015-03-115]. Dostupné z: <http://mineralogie.sci.muni.cz/>
- [41] Zeolity. [online]. [cit. 2015-03-115]. Dostupné z: <http://zeolity.brych.cz/zeolity.php>
- [42] Gottardi, G. and Galli, E. (1985). *Natural Zeolites*, Springer-Verlag, Berlin, Germany. s. 409.
- [43] Gottardi, G. (1978) Mineralogy and crystal chemistry of zeolites. *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use*. Pergamon Press, Elmsford. New York, s. 31-44.
- [44] ČSN EN 197-1 ed. 2 (722101), *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, Český normalizační institut, 2012

- [45] Vejmelková, E., Keppert, M., Ondráček, M., Černý, R., 2013. Effect of Natural Zeolite on the Properties of High Performance Concrete. *Cement Wapno Beton*, 18 (80), s. 150 - 159.
- [46] Janotka, I., Puertas, F., Palacios, M., Kuliffayova, M., Varga, C., 2010. Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 24, s. 791–802.
- [47] Binici, H., Aksoğan, A., 2006. Sulfate resistance of plain and blended cement. *Cement and Concrete Composites*. 28, s. 39-46.
- [48] Cizer, O. 2009. Competition between Carbonation and Hydration on the Hardening of Calcium Hydroxide and Calcium Silicate Binders. Doctoral thesis. KU Leuven.
- [49] Pavlíková, M., Falc, M., 2012. Benešová M. Karbonatace modifikovaných vápenných omítek. *Stavební obzor* 20/4 s. 123-127.
- [50] Van Balen, K., Van Gemert, D. 1994. Modelling lime mortar carbonation, *Material. Struct.* 27 s. 393–398.
- [51] Rovnaníková R., O vápně. KeimInfo Magazín, č. 1 a 2, 2000.
- [52] Anonym. Preparation and use of lime mortars. Historic Scotland Edinburgh 1995.
- [53] Slížková Z.: Vývoj směsného hydraulického pojiva na bázi metakaolinu. Sborník semináře - Obnova památek 2004 – *Omlitky historických staveb*. Praha 2004.
- [54] Rojas M. F., Cabrera J., 2001. Mechanism of hydration of the metakaloline-lime water system, *Cement and Concrete Research* 31, s. 177-182.
- [55] Jambor J. Chemické rozborý v stavebnictve. Vydavatelstvo SAV, Bratislava 1953
- [56] ČSN 72 206: Zkoušení popídku pro stavební účely. Stanovení pučolánové aktivity, ČNI, Praha 2000
- [57] Vejmelkova, E., Keppert, M., Rovnanikova, P., Kersner, Z., Černý, R., 2012. Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cement and Concrete Composites*. 34, s. 468-492.
- [58] ČSN EN 459-1-ed.2:2011/Z1 (722201): Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. ČNI, Praha 2011
- [59] Vejmelkova E., Pernicova R., Sovjak R., Černý R. 2009. Properties of innovative renders on lime basis for the renovation of historical buildings. In: Brebbia C, editor. *Structural studies, repairs and maintenance of heritage architecture* 11, Southampton: WIT Press, s. 221-229.
- [60] ČSN EN 1015-3 - Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím strásacího stolku), ČNI, Praha 2000.
- [61] Roels S., Carmeliet J., Hens H., Adan O., Brocken H., Černý R., et al. 2004. Interlaboratory comparison of hygric properties of porous building materials. *J Therm Envelope Build Sci* 27, s. 307-325.
- [62] ČSN EN 1015-11 - Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdělých malt v tahu za ohybu a v tlaku, ČNI, Praha 2000.
- [63] ČSN 73 1322 - Stanovení mrazuvzdornosti betonu, ČNI, Praha 2000.
- [64] ČSN 72 7031 - Měření součinitele difúze vodní páry stavebních materiálů metodou bez teplotního spádu, ČNI, Praha 1961.
- [65] Applied Precision - ISOMET. [User manual], Bratislava, 1999.
- [66] Vejmelkova, E., Keppert, M., Rovnanikova, P., Kersner, Z., Černý, R., 2011. Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. *Composites: Part B*, s. 3534-3540.

Životopis - Ing. Eva Vejmelková, Ph.D.

Datum narození: 22.9.1977

Vzdělání:

2002 – 2007 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, doktorandské studium, obor Fyzikální a materiálové inženýrství

1996 – 2002 ČVUT V Praze, Stavební fakulta, obor Pozemní stavby a architektura.

Odborná a pedagogická praxe:

2007 – dosud ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra materiálového inženýrství a chemie, odborný asistent v oblasti transportních procesů ve stavebních materiálech, výuka stavebních hmot, vedení laboratorních cvičení. Vedení studentských projektů, bakalářských a magisterských prací. Spolupráce na řešení projektů vědy a výzkumu.

2002 – 2006 ČVUT V Praze, Fakulta stavební, Katedra fyziky, výuka fyziky, vědecký pracovník v oblasti transportních procesů ve stavebních materiálech

Výzkumná činnost:

Studium v oblasti transportních procesů ve stavebních materiálech za běžných a vysokých teplot, betony, cementové kompozity, vápenné kompozity, alternativní materiály.

Publikační činnost:

Autorka či spoluautorka následujících publikací: následujících publikací: 30 článků v databázi WoS, 66 příspěvků na mezinárodních konferencích uvedených ve WOS nebo SCOPUS, 65 příspěvků na národních a mezinárodních konferencích, 22 článků v českých recenzovaných časopisech, h-index 10.

Aplikační výstupy

2 x užitiný vzor, 5 x certifikovaná metodika, 1 x prototyp

Udělené projekty

1 x GAČR, 2 x MŠMT – KONTAKT

Citace

Celkem 201 citací (bez autocitací) v databázi WoS.

Vybrané publikace:

1. Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J., Rovnaníková, P., Keršner, Z., Sedlmajer, M. & Černý, R.. 2015. Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, vol. 55, pp. 259-267. IF = 2,76
2. Vejmelková, E., Koňáková, D., Čáchová, M., Keppert, M. & Černý, R.. 2012. Effect of hydrophobization on the properties of lime–metakaolin plasters. *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 556-561. IF = 2,265
3. Vejmelková, E., Keppert, M., Rovnaníková, P., Keršner, Z. & Černý, R.. 2012. Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, issue 8, pp. 3534-3540. IF = 2,602
4. Vejmelková, E., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P. & Černý, R.. 2012. Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime–metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 22-28. IF = 2,265
5. Vejmelková, E., Keppert, M., Rovnaníková, P., Keršner, Z. & Černý, R.. 2012. Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, issue 4, pp. 486-492. IF = 2,76
6. Vejmelková, E., Keppert, M., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Keršner, Z. & Černý, R., 2012. Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, issue 1, pp. 55-61. IF = 2,76
7. Černý, R. & Vejmelková, E.. 2011. Apparent thermal conductivity approach at high-temperature measurements of porous materials. *Measurement*, vol. 44, issue 7, pp. 1220-1228. IF = 1,526
8. Vejmelková, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Skaliński, B. & Černý, R.. 2011. Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, vol. 25, issue 3, pp. 1325-1331. IF = 2,265
9. Vejmelková, E., Pavlíková, M., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Sedlmajer, M. & Černý, R., 2010. High performance

concrete with Czech metakaolin. *Construction and Building Materials*, vol. 24, issue 8, pp. 1404-1411. IF = 2,265

10. Vejmelková, E., Pavlíková, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Sedlmajer, M. & Černý, R.. 2009. High performance concrete containing lower slag amount. *Construction and Building Materials*, vol. 23, issue 6, pp. 2237-2245. IF = 2,265

11. Mňahončáková, E., Pavlíková, E., Grzeszczyk S., Rovnaníková P. & Černý, R.. 2009. Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers. *Construction and Building Materials*, vol. 22, issue 7, pp. 1594-1600. IF = 2,265