



STANDARDNÍ A MIKROMLETÉ FLUIDNÍ POPÍLKY VE STMELENÝCH SMÍŠKÁCH PRO PODKLADNÍ VRSTVY, DATABÁZE ODPADNÍCH A DRUHOTNÝCH SUROVIN VYUŽITELNÝCH V OBLASTI INFRASTRUKTURY

Zpracovali: Ing. Jakub Šedina, Ing. Jan Valentin, Ph.D. (Fakulta stavební VUT v Praze), Ing. Adam Hubáček, Ph.D., Ing. Jakub Hodul (Fakulta stavební VUT v Brně)

Souhrn

Řešení aktivity se snažilo v roce 2016 pokrýt problematiku možného využívání zejména fluidních popílků v běžně dodávané podobě a alternativně jako mechano-chemicky aktivované jemně mleté pojivo nebo aktivní plnivo v silničním stavitelství s využitím v hydraulicky stmelovaných směsích pro podkladní vrstvy vozovek. Cílem bylo poukázat na možné přínosy, ale i na která úskalí, jež při takovém řešení lze laboratorně identifikovat a jež mohou ovlivnit praktické využití. V rámci řešení byly laboratorní studii porovnány popílků z různých zdrojů, kdy je substituován per vodní materiál a je posouzen vliv popílků a jejich případné mechano-chemické aktivace na výsledné parametry směsi, zejména na pevnost v tlaku a odolnost směsi v mrazu a vodě. Z hlediska základních zrnitých materiálů pro stmelování směsi do podkladních vrstev byly zvoleny jílovitá zemina a stará přepracovaná cementová stabilizace pocházející z modernizace dálnice D1.

V roce 2016 byla v rámci projektu vytvořena databáze odpadních materiálů a druhotných surovin, které se již v současnosti využívají v oblasti infrastruktury nebo se jejich využití ještě jen plánuje. Databáze vytvořená v programu MS Excel obsahuje široké spektrum různých odpadních materiálů, přičemž u každého jsou popsány charakteristické vlastnosti a možný způsob využití ve stavebnictví. V rámci průzkumu bylo zjištěno, že existuje velké množství odpadů, které se zatím v oblasti infrastruktury nevyužívají, avšak vyznačují se takovými vlastnostmi, že by mohly plně nahradit primární suroviny, které je potřeba těžít nebo vyrábět složitým technologickým postupem. Jedná se především o oblast výroby stavebních hmot, kde se jako plniva využívají především primární suroviny a možnost využití druhotných a odpadních surovin zatím nebyla ani prozkoumána. Součástí databáze potenciálně využitelných odpadů je také seznam teoreticky vhodných druhů nebezpečných odpadů, které se jeví jako potenciálně vhodné pro využití při výstavbě infrastruktury. Je nutné mít však

na paměti, že využití nebezpečných odpadů s sebou také přináší ekologická rizika.

Oblast použití

Ilustrací se snažíme získávat čím dál tím více energie z obnovitelných zdrojů je uhlí spalované v uhelných elektrárnách jedním z hlavních zdrojů elektrické energie. Celosvětově se uhlí na produkci elektrické energie podílí 44 %, v České republice dokonce přibližně 55 %. Samotný proces spalování se v posledních desetiletích výrazně proměnil. V současné době je většina uhelných elektráren provozovaných na území EU vybavena moderními odsířovacími jednotkami, které výrazně snižují množství nebezpečných látek vypouštěných do ovzduší. Samotnou kapitolou je technologie fluidního spalování, která umožňuje efektivnější spalování při nižších teplotách, a má za následek snížení množství vypouštěných SO_x , NO_x , pevných částic popílku a dalších škodlivých látek, které jsou zachyceny, a je tak nutné je dále zpracovávat. Rostoucí vyprodukují uhelné elektrárny na území České republiky přibližně 13 milionů tun odpadního materiálu z uhlého spalování, který se s rozvojem moderních technologií pomalu stává cenným zdrojem pro alternativní plniva i pojiva. Zaměření aktivity na možné využití těchto vedlejších produktů ideálně v kombinaci s lokálně dostupnými zrnitými materiály pro konstrukce vozovek pozemních komunikací, zejména potom na využití fluidního popílku, který tvoří asi 13 % všech odpadů uhelných elektráren, může představovat zajímavý ekonomický potenciál pro přemysl. Provedený výzkum poukazuje na možnou substituci perírodních materiálů v podkladních vrstvách vozovky, kdy je využito hydratační schopnosti fluidních popílků, které jsou spojeny s procesem fluidního spalování v uhelných elektrárnách.

Databáze bude sloužit především jako přehled v současnosti vznikajících odpadních a druhotných surovin využitelných v oblasti infrastruktury. Uplatnění najde při informovanosti odborné ale i široké veřejnosti a nejvíce by měla posloužit

stavebním firmám podílejícím se na rozvoji infrastruktury. P edevším výrobci r zných stavebních hmot si budou moci na základ vlastností jednotlivých odpadních materiál vybrat n které z nich jako náhradu za sou asn využívané primární suroviny používané p i výrob . Samoz ejm je tuto možnost nutné nejprve ádn laboratorn a poloprovozn ov it, nicmén pokud by byla tato substituce úsp šn ov ena a zavedena do výroby, m lo by to pozitivní vliv jak z environmentálního, tak ekonomického hlediska.

Metodika a postup ešení

Možné využití fluidních popílk lze spat ovat v áste né substituci p írodních nebo recyklovaných materiál ur ených pro další využití v konstrukci vozovky. V provedené experimentální studii byla provedena substituce staré cementové stabilizace získané s rekonstrukce dálnice D1 (úsek 9, 72. km). Dále byla provedena substituce p írodního materiálu, klasifikovaného jako jílovitý písek (S5), pocházejícího z modernizace železni ního koridoru z lokality Veselí nad Lužnicí. Tyto dva materiály byly z 50 % nahrazeny popílkem z elektráren M lník, Ledvice a Tisová. Množství p ídávaného pojiva bylo stanoveno na základ klasifikace zeminy a výsledk testu. Hutn ní probíhalo Proctorovým p chem. Vzhledem k zrnitosti materiálu byla zvolena Proctorova forma o pr m ru 100 ± 1 mm a výšce 120 ± 1 mm. Hutn ní probíhalo modifikovaným Proctorovým postupem. Optimální vlhkost zjišt ná p i Proctorov zkoušce byla dále upravena vzhledem k množství p ídávaného pojiva a množství p ídávaného popílku. Hodnoty optimální vlhkosti a množství p ídávaného pojiva (cement CEM II/B-M 32,5R) jsou uvedeny v tabulce 1. Po zhutn ní byla t lesa uchována dle požadavk p íslušných norem 28 dní v neprodyšném obalu, následn zkoušena na pevnost v tlaku a odolnost v í mrazu a vod . Pro zkoušku odolnosti v í mrazu a vod bylo z hlediska normy p istoupeno ke krajn nevhodným podmínkám, kdy t lesa byla vystavena 13 cykl m s 18 h p i laboratorní teplot a 8 h v klimatické komo e p i teplot -20 °C.

Na základ provedené rešerše v sou asnosti kumulovaných r zných druh odpadních materiál a druhotných surovin v R í v zahrani í byla vytvo ena databáze odpadních a druhotných surovin využitelných v oblasti infrastruktury. Bylo zjišt no, že nejvyšší podíl t chto využitelných surovin tvo í vedlejší energetické produkty (VEP), jako nap . popílek a struska. V R a také v zahrani í existuje více druh t chto VEP, a proto bylo pot eba v prvním kroku nalézt a popsat jednotlivé druhy t chto odpadních surovin. Jako p íklad lze uvést popílek, který se liší svými vlastnostmi a chemickým

složením s ohledem na typ spalování (vysokoteplotní, fluidní), druh spalovaného uhlí, typ kotle a další specifikace. Prvním a velice d ležitým krokem tedy bylo ádné rozd lení dostupných odpadních a druhotných surovin využitelných v oblasti infrastruktury dle principu a místa vzniku. Po této selekci se výzkumný tým zabýval stanovením primárních parametr , mezi které pat í nap . chemické a mineralogické složení, konzistence a velikost ástic. P edevším na základ t chto vlastností se stanovily r zné oblasti využití daných odpadních a druhotných surovin v oblasti infrastruktury. Databáze zahrnuje také vý et r zných nebezpe ných odpad , které by bylo možné díky jejich optimálním fyzikálním vlastnostem využít, nicmén p ekro ením ekologických a hygienických limit není jejich využití p íjatelné. Z toho dvodu byla pro každý takový nebezpe ný odpad uvedena také možnost jeho úpravy na mén nebezpe nou surovinu spl ující legislativní limity pro využití ve stavebnictví. Mezi takovéto možnosti adíme nap . solidifikaci, kdy jsou polutanty inkorporovány do silikátové nebo polymerní matrice a následn se naskytuje široké spektrum využití tohoto nového materiálu v oblasti infrastruktury. P i výb ru vhodné odpadní a druhotné suroviny je nevyhnutné klást d raz na ekologické a ekonomické aspekty a také zabezpe it efektivní p ínos pro praxi.

Výsledky

Hlavním p ínosem fluidního spalování je nižší teplota spalování (800 - 900 °C), možnost regulovat výkon elektrárny, vyšší ú innost a nižší emise škodlivých látek do ovzduší, kdy samotný proces spalování zabra uje vzniku škodlivých látek. Ke spalování dochází na tzv. fluidním loži, kdy je palivo (erné nebo hn dé uhlí) p edrceno na zrnitost okolo 20 mm a společn s vápencem vhn no do kotle proudem vzduchu. P i tom dochází k turbulentnímu proud ní této sm si, a tím k ú innému vyho ení paliva (až 90 %). P ídaný vápene (CaCO₃), p ípadn dolomit, reaguje p ímo v kotli s oxidem si ítým (SO₂) a tuhý produkt (CaSO₄) je tak sou ástí popela. Vzniklý produkt pak p edstavuje sm s popela z p vodního paliva, nezreagovaného odsi ovacího inidla (CaO s p ípadnými zbytky CaCO₃), síranu vápenatého, produkt reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. P ítomnost reaktivního vápna p edstavuje jeden z možných potenciál pro využití popílku ve stavebnictví.

Mineralogické složení popílk je závislé p edevším na druhu a obsahu minerál ve spalovaném uhlí a na stupni jejich tepelné p em ny. Fyzikální a chemické vlastnosti jsou závislé na velikosti popílkových zrn, kterou významn ovliv uje obsah nespáleného podílu. Podle granulometrie se nejvíce klasickým

popílek m podobá fluidní popílek z cyklón , naopak fluidní popílek z l žka svou nestejnorodostí chemických vlastností p ipomíná spíše písek. Rozhodující faktor, který výrazn ovliv uje granulometrii popílek , je obsah prchavých složek a macerálové složení spalovaného uhlí. Z hlediska posuzování vyluhovatelnosti je d ležitý m rný povrch, jehož velikost je ovliv ována množstvím nedopalu v popílku.

Tab. 1 Optimální vlhkosti a množství p idávaného pojiva pro jednotlivé varianty stmelených sm sí.

Varianta sm sí	Optimální vlhkost	Pojivo (cement)
Jílovitý písek S5 100 %	8,50 %	6 %
Fluidní popílek Tisová lože : jílovitý písek (50:50)	15,69 %	6 %
Fluidní popílek Tisová úlet : jílovitý písek (50:50)	23,37 %	6 %
Fluidní popílek Ledvice lože : jílovitý písek (50:50)	20,75 %	6 %
Cementová stabilizace D1 100 %	11,20 %	3 %
Popílek z klasického spalování M lník úlet : cementová stabilizace D1 (50:50)	16,10 %	3 %
Fluidní popílek Tisová lože : cementová stabilizace D1 (50:50)	16,79 %	3 %
Fluidní popílek Tisová úlet : cementová stabilizace D1 (50:50)	24,10 %	3 %
Fluidní popílek Ledvice lože : cementová stabilizace D1 (25:75)	16,53 %	3 %
Fluidní popílek Ledvice lože : cementová stabilizace D1 (50:50)	21,85 %	3 %

Z hlediska navržených hydraulicky stmelených sm sí bylo množství cementu CEM II/B-M 32,5R p idávaného ke staré cementové stabilizaci v úrovni 3 % a u jílovitého písku 6 %. Optimální vlhkost byla stanovena dle zkoušky Proctor modifikovaný a následn mírn navýšena s ohledem na množství p idávaného pojiva a na pom rn vysoké procento p idávaného popítku, který m l zvýšenou spot ebu vody pro optimální nasycení. Vlhkosti jsou uvedeny v tabulce 1.

Prvotní posouzení bylo zam eno na stanovení optimálního množství substituovaného materiálu, kdy byla stará cementová stabilizace nahrazena z 25 % a 50 % fluidním popílkem. V obou p ípadech došlo k navýšení pevnostních charakteristik po 28 dnech. S ohledem na výsledky pevnosti po zmrazovacích cyklech byla pro další posouzení vybrána varianta, kdy je substituováno 50 % materiálu fluidním popílkem.

Z výsledk uvedených v tabulce 2 je patrný vliv jednotlivých popílk na výsledné parametry sm sí. Vcelku o ekávaný je spíše negativní vliv popítku získaného z elektrárny M lník, který je produktem klasického spalování a nelze od n j o ekávat další p idanou hodnotu. Obdobných výsledk dosahoval fluidní ložový popílek z elektrárny Tisová, kdy

pevnost v tlaku po 28 dnech a odolnosti v i mrazu a vod dosahovala výsledk referen ní sm sí.

Tab. 2 Pevnostní charakteristiky cementové stabilizace substituované popítky.

Varianta sm sí	Objemová hmotnost	28 Rc	Odolnost proti mrazu a vod	
	[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Cementová stabilizace D1	2,01	2,23	0,82	36,65 %
Cementová stabilizace D1: Popílek M lník úlet (50:50)	1,63	1,52	0,38	24,99 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Tisová lože (50:50)	1,93	2,28	0,66	29,04 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Tisová úlet (50:50)	1,74	6,22	5,14	82,62 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Ledvice lože (75:25)	1,87	7,07	4,05	57,25 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	1,75	8,67	7,25	83,62 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	1,74	6,21	1,83	29,40 %

V tomto ohledu by substituce byla možná, nicmén samotný popílek nijak nezlepšuje zkoumané parametry, a šlo by tak pouze o substituci materiálu bez další p idané hodnoty.

Positivní p ínos popítku tak lze spat ovat u fluidních popílk Tisová úlet a Ledvice lože. P ínos této substituce je zcela jednozna ný, pevnost po 28 dnech vzrostla na tí- až ty násobek pevnosti nam ené u referen ní sm sí bez popílk a odolnost v i mrazu a vod splnila podmínku normy, která vyžaduje min. pevnost po zmrazovacích cyklech vyšší jak 80 % pevnosti po 28 dnech.

Tab. 3 Pevnostní charakteristiky jílovitého písku substituovaného popítky.

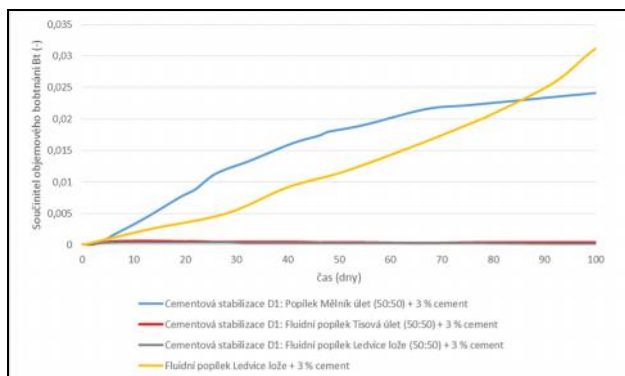
Varianta sm sí	Objemová hmotnost	28 Rc	Odolnost proti mrazu a vod	
	[g/m ³]	[MPa]	[MPa]	
Jílovitý písek S5	2,20	5,37	5,71	106,41 %
Jílovitý písek S5: Fluidní popílek Tisová lože (50:50)	2,05	2,74	1,47	53,70 %
Cementová stabilizace D1: Fluidní popílek Tisová úlet (50:50)	1,84	8,37	8,09	96,60 %
Jílovitý písek S5: Fluidní popílek Ledvice lože (50:50)	1,85	9,98	10,88	108,96 %

Velice zajímavým faktem je i nezbytnost p idání hydraulických pojiv, kdy sm sí bez p ídávku cementu vykazovaly ádov nižší hodnoty odolnosti v i mrazu a vod . Do budoucna bude velice

zajímavé detaily ji provít vliv množství cementu na výsledné parametry směsi.

I v případě přírodního materiálu substituovaného fluidním popílkem z elektrárny Ledvice lože a Tisová úlet byl patrný nárůst pevností a odolnosti vůči mrazu a vodě. V tomto případě lze doporučit popílek jako vhodnou náhradu přírodních materiálů, kdy vedlejším efektem této substituce je i nárůst pevnostních charakteristik. Varianta s ložovým fluidním popílkem z elektrárny Tisová se ukázala jako krajně nevhodná. Došlo k degradaci směsi, kdy poklesla jak pevnost v tlaku po 28 dnech tak směs nevyhovovala na odolnost vůči vodě a mrazu.

Výsledky objemových změn doplují poznatky o pevnostních charakteristikách směsí a potvrzují vhodnost kombinace popílku, jemnozrnné zeminy (stará cementová stabilizace) a hydraulického pojiva. V případě ložového fluidního popílku z elektrárny Ledvice byla provedena jak kombinace se zeminou, tak pouze samotný fluidní popílek. Výsledky jasně deklarují vhodnost kombinace zeminy a popílku. V tomto případě docházelo k minimálním objemovým změnám, oproti tomu samotný popílek vykazoval výrazné objemové změny. Obdobné výsledky lze pozorovat i u kombinace s úletovým popílkem Tisová.



Obr. 1 Asový průběh bobtnání dle SN EN 14 227-4.

Výsledkem v rámci aktivity zabývající se tvorbou přehledu odpadních materiálů a druhotných surovin je stromová databáze v programu MS Excel, která charakterizuje odpadní a druhotné suroviny využitelné v oblasti infrastruktury na základě následujících parametrů:

- název a typ odpadní/druhotné suroviny,
- rozdělení dle povodce a způsobu vzniku,
- kumulované množství,
- možný způsob využití v současnosti,
- chemické a mineralogické složení,
- fyzikální a mechanické parametry,
- stupeň nebezpečnosti,
- možnosti přepravy pro další využití,
- možnosti využití v oblasti infrastruktury.

Závěr

Využití výše uvedených fluidních popílků v silničním stavitelství lze doporučit. Z naměřených dat je patrný přínos substituce „přírodních“ materiálů fluidními popílky z elektrárny Ledvice (ložový) a Tisová (úletový), kdy byla prokázána vhodnost kombinace fluidních popílků, jemnozrnné zeminy a pojiva. Kromě samotné úspory materiálu na jedné straně a využití odpadních produktů na druhé, byla prokázána i předaná hodnota této kombinace v podobě zlepšení pevnostních charakteristik. V případě substituce 50 % přírodního materiálu dochází k výraznému nárůstu pevnosti v tlaku po 28 dnech, směsi vykazují dostatečnou odolnost proti mrazu a vodě a nedochází u nich k nežádoucím objemovým změnám. Předanou hodnotu této substituce lze dále spatřovat ve výhledění směsí s popílky cca o 15 % oproti referenční směsi bez popílku.

Do budoucna je třeba zpevnit nastavení poměru mezi popílkem a zeminou, a to jak pro směsi, které vykazují uspokojivé výsledky, tak především pro směsi, pro které byla navrhovaná substituce nevhodná. Rovněž je žádoucí optimalizovat množství přidávaných hydraulických pojiv.

Byla vytvořena přehledná databáze odpadních a druhotných surovin využitelných v oblasti infrastruktury. Tato databáze zahrnuje také některé nebezpečné odpady, které by se daly upravit takovým přijatelným způsobem, aby bylo možné jejich další využití, čímž by se předcházelo jejich kumulaci na skládkách. Vytvořená stromová databáze poskytuje užitečné informace o těchto odpadních materiálech a přehledně shrnuje možné způsoby jejich využití v oblasti infrastruktury.

Literatura

- [1] Wang H. a kol., Temperature dependence on reaction of CaCO_3 and SO_2 in O_2/CO_2 coal. Journal of Central South University (2009) 16: 0845–0850.
- [2] Mráz V. a kol., Limiting Factors for the Applicability of Specific Types of Energetic By-products in the Roadbed Structures, 4th GeoChina International Conference Shandong 2016. (in review).
- [3] Frýzová R., Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů, Diplomová práce Brno 2012.
- [4] Šedina J., Mondschein P., Mixtures with fly ash in pavement structures modified by modern additives, Young scientist 2016.