

Vývoj alkalicky aktivovaného směsného pojiva s cílem minimalizace objemových deformací

Michal HIMMEL, Rostislav ŠULC

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29, Praha 6

e-mail: michal.himmel@fsv.cvut.cz, rostislav.sulc@fsv.cvut.cz

Souhrn

V této práci je zkoumána možnost výroby směsného pojiva na bázi alkalicky aktivovaných elektrárenských popílků. Fluidní úletový popílek (FBC) je rozpínavý, a díky příměsi vápence je reaktivní. Na druhou stranu vysokoteplotní ložový popílek (FA) vykazuje značné smrštění a zároveň má extrémně pomalý náběh pevnosti. Smísením těchto dvou popílků očekáváme vytvoření pojiva, které bude objemově stálé a bude mít i další parametry (zpracovatelnost, dlouhodobé pevnosti) také na dostatečných úrovních. V této práci bylo využito pojivo SORFIX na bázi fluidního popílku a vysokoteplotní ložový popel z elektrárny Tušimice. Ložový popel byl alkalicky aktivován (AA) roztokem hydroxidu sodného a sodného vodního skla. Hlavním sledovaným parametrem experimentu byla objemová stálost, sekundárně pak pevnost v tlaku. Byly vyrobeny i referenční směsi pouze z jednotlivých pojiv. Směsi s poměrem blízkým 50:50 nebylo, z důvodu vysoké reaktivity FBC, možné vyrobit. Kaše s poměrem 10:90 až 20:80 se jeví jako optimální z hlediska kontrolovaných parametrů.

Klíčová slova: Alkalická aktivace; směsné pojivo; úletový popílek, fluidní popílek; objemové změny; smrštění; FA; FBC

Úvod

V České republice každoročně vznikají stovky tisíc tun fluidních popílků (FBC) jako vedlejší produkt spalování uhlí ve fluidních kotlích. Přestože tyto materiály vykazují zajímavé technické hydraulické a pucolánové vlastnosti a potenciál pro využití ve stavebnictví či při rekultivacích, jejich praktické využití zůstává minimální. Důvodem je nedostatek komplexního výzkumu, legislativní nejasnosti a nízká informovanost odborné i laické veřejnosti. Výsledkem je, že většina fluidních popílků končí bez dalšího využití na skládkách, což představuje nejen ekologickou zátěž, ale i příležitost pro cirkulární ekonomiku. Zejména v dnešní době významných změn ve složení cementů a jejich dostupnosti.^{1,2}

Na druhou stranu vysokoteplotní úletový popílek (FA), vznikající při spalování uhlí v klasických roštových a práškových ohništích, představuje významnou druhotnou surovinu. Přestože jeho přídavek do betonu přináší ekologické i ekonomické výhody, jeho širší aplikaci v bezcementových směsích brání technické komplikace. Mezi nejvýznamnější patří pomalý náběh pevnosti v počátečních fázích zrání a riziko smršťování, které může vést ke vzniku trhlin. Tyto vlastnosti vyžadují pečlivou optimalizaci receptur a kombinaci s dalšími příměsemi.³

Perspektivní cestou pro eliminaci pomalého náběhu pevnosti FA je alkalická aktivace. Alkalická aktivace (AA) představuje komplexní chemický proces, při němž dochází k transformaci aluminosilikátových surovin za přítomnosti silně alkalického prostředí. Základním principem tohoto procesu je rozklad původních struktur a následná tvorba nových polymerních fází. Přestože je alkalická aktivace intenzivně studována, její detailní reakční mechanismus zůstává dosud ne zcela objasněn.⁴

Na základě současných poznatků lze tento proces popsat jako vícestupňovou reakci, která začíná narušením vazeb Si–O–Si (tzv. depolymerizací, jak ji definuje Davidovits⁵). Tím vznikají reaktivní oligomery obsahující křemík, hliník, kyslík a hydroxylové skupiny. Tyto oligomery následně podléhají kondenzaci, při níž se formují nové amorfni nebo krystalické fázové struktury, které tvoří základ geopolymerní matrice.^{5,6}

Složení alkalického aktivátoru má zásadní vliv na vývoj mikrostruktury a mechanických vlastností geopolymerních materiálů. Studie Criado a kol.⁷ ukázala, že vyšší poměr vodního skla k hydroxidu sodnému ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) podporuje vznik amorfni geopolymerní matrice a vede ke zvýšení pevnosti v tlaku. Naopak nadměrná koncentrace NaOH může iniciovat tvorbu krystalických fází, což negativně ovlivňuje mechanickou pevnost výsledného kompozitu.

Okoye a kol.⁸ dále prokázali, že přídavek mikrosiliky do geopolymerního betonu zlepšuje soudržnost struktury a přispívá k vyšší pevnosti, čímž potvrzují význam optimalizace nejen složení aktivátoru, ale i použitých příměsí. Přehledová studie Qaidiho⁹ uvádí, že výsledné vlastnosti geopolymerních kompozitů jsou ovlivněny nejen typem a koncentrací aktivátoru, ale také jeho poměrem k výchozímu materiálu. Správně zvolená kombinace složek může výrazně zvýšit mechanickou odolnost i trvanlivost geopolymerních systémů.

Druhým hlavním problémem vysokoteplotního popílku je smrštění. Chemické smrštění v alkalicky aktivovaných materiálech úzce souvisí s procesem alkalické aktivace, během něhož dochází k rozpouštění amorfních složek – zejména oxidu křemičitého (SiO_2) a oxidu hlinitého (Al_2O_3) – v silně alkalickém prostředí. Následná polykondenzace vede k tvorbě trojrozměrné gelové sítě typu N-A-S-H nebo C-A-S-H. Tento proces spotřebovává vodu, která není chemicky vázána, ale slouží jako transportní médium pro ionty. Její úbytek způsobuje pokles vnitřní relativní vlhkosti, což vede ke vzniku kapilárního tlaku v jemných pórech a následným objemovým změnám.^{10,11,12}

Autogenní smrštění, které probíhá bez výměny vlhkosti s okolím, je důsledkem samodesikace během polymerizační reakce. V této fázi dochází ke spotřebě vody a poklesu vnitřní vlhkosti materiálu. Podle studie Sun a Fan¹⁰ je autogenní smrštění u geopolymerních systémů výrazně vyšší než u cementových kompozitů, což souvisí s jemnější pórovou strukturou a vyšším podílem mezipórů generujících kapilární tlak. Ten působí na stěny pórů a způsobuje jejich deformaci, což se projevuje jako objemová kontrakce. Tento jev je obzvláště výrazný u směsí s vysokým obsahem aktivátoru a nízkým poměrem kapalné a tuhé fáze.^{10,11,12}

Dalším faktorem přispívajícím ke smrštění je chemická reorganizace gelové fáze během zrání. Gelové struktury typu N-A-S-H a C-A-S-H vykazují viskoelastické chování, které se v čase mění v závislosti na teplotě, vlhkosti a složení směsi. Během zrání dochází k redistribuci iontů a restrukturalizaci gelové sítě, což vede ke změně pórové struktury a dodatečnému smrštění.^{11,12,13}

Vijayakumar¹⁴ ve své práci upozorňuje, že míra chemického smrštění závisí na typu prekurzoru. Systémy na bázi strusky vykazují nižší autogenní smrštění než směsi na bázi popílku, což je přičítáno rozdílné reaktivitě a schopnosti gelové fáze vázat vodu.

Smísením FA a FBC si slibujeme eliminaci nežádoucích objemových změn při co možná největší míře zachování pozitivních vlastností jednotlivých složek jako je zpracovatelnost, náběh pevnosti (FBC), pevnost v tlaku.

Experimentální část

Suroviny

První hlavní surovinou bylo FBC pojivo SORFIX. SORFIX je bezcementové hydraulické pojivo na bázi sulfátovápenatého systému, vyvinuté z vedlejších energetických produktů z fluidního spalování. Po zatvrdnutí vytváří amorfni hydratovaný hlinitokřemičitan vápenatý (C-A-S-H fázi), který je analogický pojivové fázi římského betonu, a hlavní krystalickou složkou je stabilní ettringit. Díky této mineralogii vykazuje SORFIX vysokou odolnost vůči agresivním prostředím, včetně solných roztoků, a dlouhodobou trvanlivost. Avšak díky ettringitu je také objemově expanzivní. I když je ověřeno, že objemová stálost tohoto pojiva je v normách tak ze znalostí tohoto pojiva víme, že vykazuje určitou míru expanze.^{15,16}

Druhou hlavní surovinou byl vysokoteplotní ložový popel (FA) z elektrárny Tušimice II. Elektrárna Tušimice II je hnědouhelná kondenzační elektrárna s instalovaným výkonem 4×200 MW, která využívá kotle typu PG 660 s granulačním ohništěm a přímým foukáním uhelného prášku. Mezi roky 2007 – 2012

dosáhla díky komplexní modernizaci zvýšení účinnosti a snížení emisí SO_2 a NO_x .¹⁷ Na základě předchozích experimentů byl popílek před použitím upraven mletím v kulovém mlýnu po dobu 45 minut.

Dalšími použitými surovinami byly: laboratorní hydroxid sodný ve formě perliček, sodné vodní sklo s obsahem sušiny 35,33 %, hustotou 1373 kg/m^3 a molárním poměrem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,87$. Superplastifikátor MasterGlenium ACE 40, pro snížení vodního součinitele směsi, a voda z vodovodního řadu v laboratoři.

Tabulka 1: Složení surovin zjištěné metodou XRF (hm. %)

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MgO	Na_2O	SO_3	P_2O_5
FA	51,27	33,3	8,13	1,86	1,6	1,12	1,08	0,56	0,52	0,18
FBC	34,81	27,4	4,71	0,55	19,89	2,47	0,7	0,17	8,84	0,17

Příprava kaší

Prvním krokem bylo navážení surovin a odměření kapalin. Vodní sklo, voda a hydroxid sodný byly smíseny a výsledný roztok byl ponechán na vychladnutí. Roztok byl následně ponechán na vychladnutí na pokojovou teplotu. Následně byl roztok přidán za pomalého míchání do míchačky s popínkem. Po několika minutách míchání bylo přidáno ACE 40. Směs byla míchána celkem cca 10 minut. Obě směsi (AA FA a FBC) byly pro výrobu směsného pojiva, vyráběny současně ve dvou míchačkách, a nakonec byly krátce (1 – 2 minuty) smíchány dohromady.

Pro referenci byly vyrobeny i série pouze z FBC nebo FA. Složení těchto sérií bylo určeno na základě předchozího výzkumu. Směsné pojivo (AA FBC/FA) bylo vyrobeno vždy z těchto referenčních sérií v poměru popínku dle názvu série.

Tabulka 2: Složení sérií

Série	FBC	FA	vodní sklo	vodní sklo	NaOH	voda	ACE 40
	IV	2018	[l]	Sušiny	[kg]	[l]	[%]
	[kg]	[kg]		[kg]			
AA FBC 3	1,3	0,0	0,000	0,000	0,030	0,477	3
AA FBC/FA 90/10	1,17	0,13	0,342	0,166	0,085	0,156	3
AA FBC/FA 80/20	1,04	0,26	0,304	0,147	0,079	0,191	3
AA FBC/FA 70/30	0,91	0,39	0,266	0,129	0,073	0,227	5
AA FBC/FA 60/40	0,78	0,52	0,228	0,111	0,067	0,263	5
AA FBC/FA 50/50	0,65	0,65	0,190	0,092	0,061	0,298	5
AA FBC/FA 40/60	0,52	0,78	0,152	0,074	0,054	0,334	5
AA FBC/FA 30/70	0,39	0,91	0,114	0,055	0,048	0,370	5
AA FBC/FA 20/80	0,26	1,04	0,076	0,037	0,042	0,405	3
AA FBC/FA 10/90	0,13	1,17	0,038	0,018	0,036	0,441	3
AA FA IV	0,0	1,3	0,380	0,184	0,091	0,120	3

Metody

Za účelem zjištění prvkového složení surovin byla provedena rentgenová fluorescenční analýza (XRF). Měření bylo provedeno na sekvenčním rentgenovém spektrometru ARL 9400 XP (Thermo Scientific ARL, CH). Intenzity spektrálních čar prvků byly měřeny programem WinXRF a naměřená data byla vyhodnocena pomocí softwaru Uniquant 4. Za účelem zjištění fázového rozložení prvků ve směsi byla provedena rentgenová difrakční analýza (XRD). Byla měřena na práškovém difraktometru X'Pert³ (PANalytical, NL). Výsledky kvalitativní a kvantitativní analýzy byly vyhodnoceny pomocí programu HighScore Plus 5 (PANalytical, NL). Do vzorků bylo přidáno ZnO jako interní standard pro kvantifikaci amorfnní fáze. Dále byly měřeny vybrané fyzikální vlastnosti surovin. Pevnost v tlaku byla měřena na zařízení Matest Servo-plus progress. Na speciální vlnovcové formě¹⁸ byla měřena chemická objemová změna v prvních dnech zrání. Dále byly na trámčích měřeny dlouhodobé objemové změny v soupravě Matest Treviolo E077.



Obrázek 1: Vlnovcová forma se směsí; trámček při měření délkových změn

Výsledky a diskuse

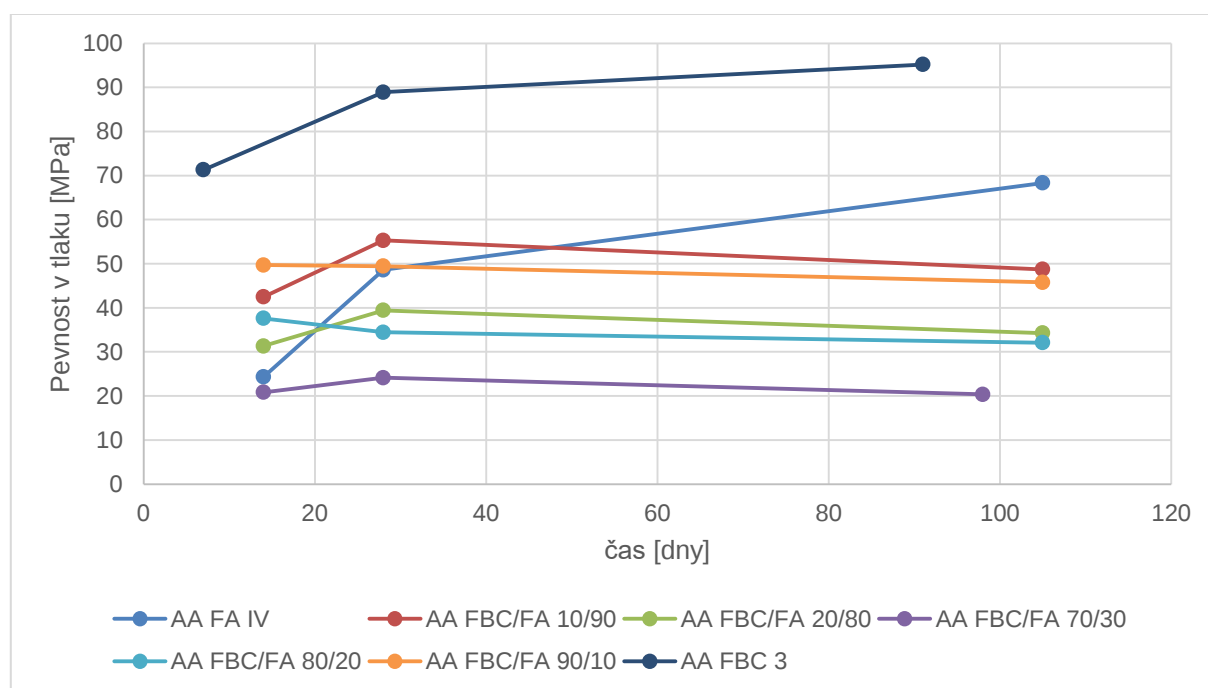
Počátek tuhnutí a tvrdnutí

Prvním krokem bylo vyhodnocení zpracovatelnosti čerstvé směsi. Směsi poměrem FBC/FA 60:40 až 30:70 nebylo možné vůbec vyrobit. Tyto směsi byly natolik reaktivní, že tvrdly už během míchání, a proto nejsou dále uváděny. Všechny ostatní směsi měly dobrou zpracovatelnost s výjimkou směsi AA FBC/FA 70/30, která již během míchání začala tuhnout. Směs čistého AA FA projevila svou nižší reaktivitu a začala tuhnout po dlouhých 960 minutách (16 h).

Tabulka 3: Vyhodnocení počátku a konce tuhnutí na směsích FBC-FA

Název sady	Počátek tuhnutí	Konec tuhnutí
AA FBC 3	100 min	160 min
AA FBC/FA 90/10	80 min	110 min
AA FBC/FA 80/20	60 min	90 min
AA FBC/FA 70/30	10 min	50 min
AA FBC/FA 60/40	XX min	XX min
AA FBC/FA 50/50	XX min	XX min
AA FBC/FA 40/60	XX min	XX min
AA FBC/FA 30/70	XX min	XX min
AA FBC/FA 20/80	220 min	340 min
AA FBC/FA 10/90	580 min	750 min
AA FA IV	960 min	1270 min

Dlouhodobé pevnosti

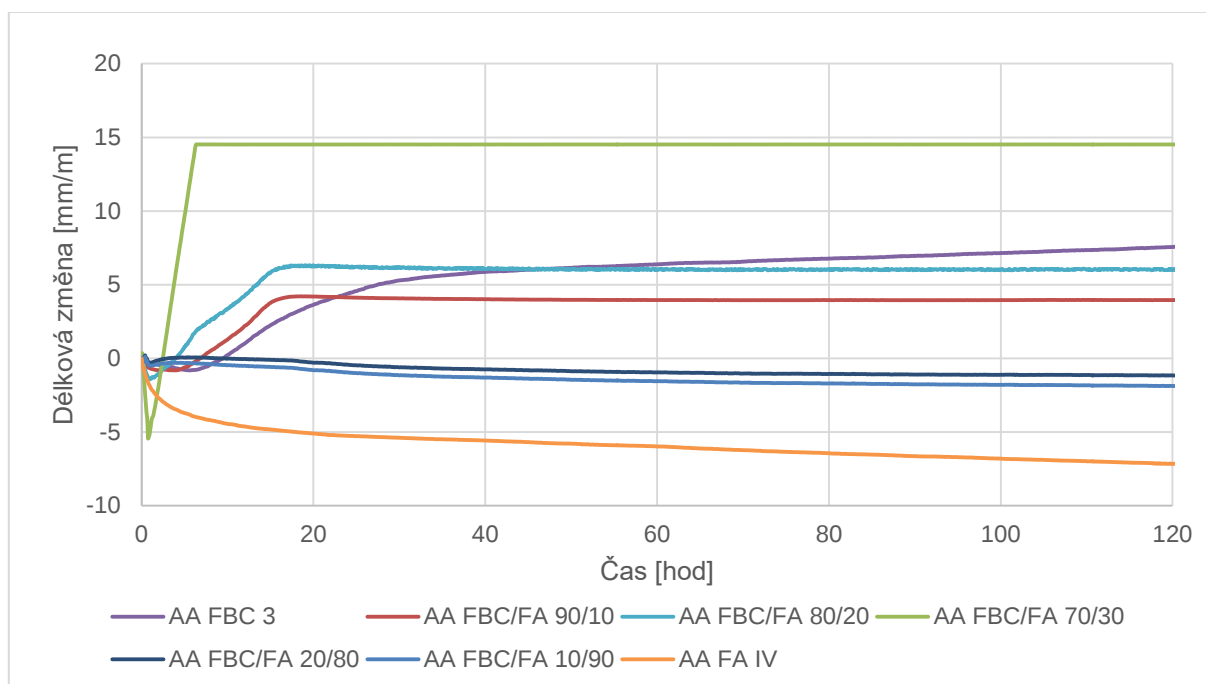


Graf 1: Vývoj pevnosti v čase na směsích AA FBC/FA

Experiment dlouhodobé pevnosti byl prováděn na trámcích 160x40x40 mm, a to vždy na třech tělesech. v grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty. Nejvyšší pevnosti dosáhla referenční směs AA FBC 3, a to cca 90 MPa po 28 dnech. Směs AA FBC/FA 70/30 dosáhla dlouhodobé pevnosti pouze 20 MPa a to již po 14 dnech od té doby pevnost prakticky nezměnila. Předpokládám, že tomu nastalo, protože poměr FBC a alkalického aktivátoru ve FA byl již značně nevhodný, příliš rychle se vytvářely primární polymery a nedošlo ke kvalitnímu vývoji matrice. Tím lze vysvětlit i obtížnou manipulaci během výroby těles, jelikož byla směs již značně zatuhlá, jak značí výsledky v kapitole tuhnutí a tvrdnutí.

Referenční směs čistého AA FA vykazuje pozvolný dlouhodobý růst pevnosti až na hodnotu 70 MPa po 105 dnech. Ostatní směsi mají 28denní i 90 denní pevnosti v rozmezí mezi 30-55 MPa.

Objemové změny – Chemické změny na vlnovci



Graf 2: Vývoj objemových změn na vlnovcích

V prvních hodinách po výrobě směsí dochází u všech variant k počátečnímu sedání, které se projevuje jako drobné propady na začátku grafu. Tento jev je typický pro čerstvé směsi, kdy dochází k redistribuci záměsové vody a ustálení struktury před zahájením hydratace.

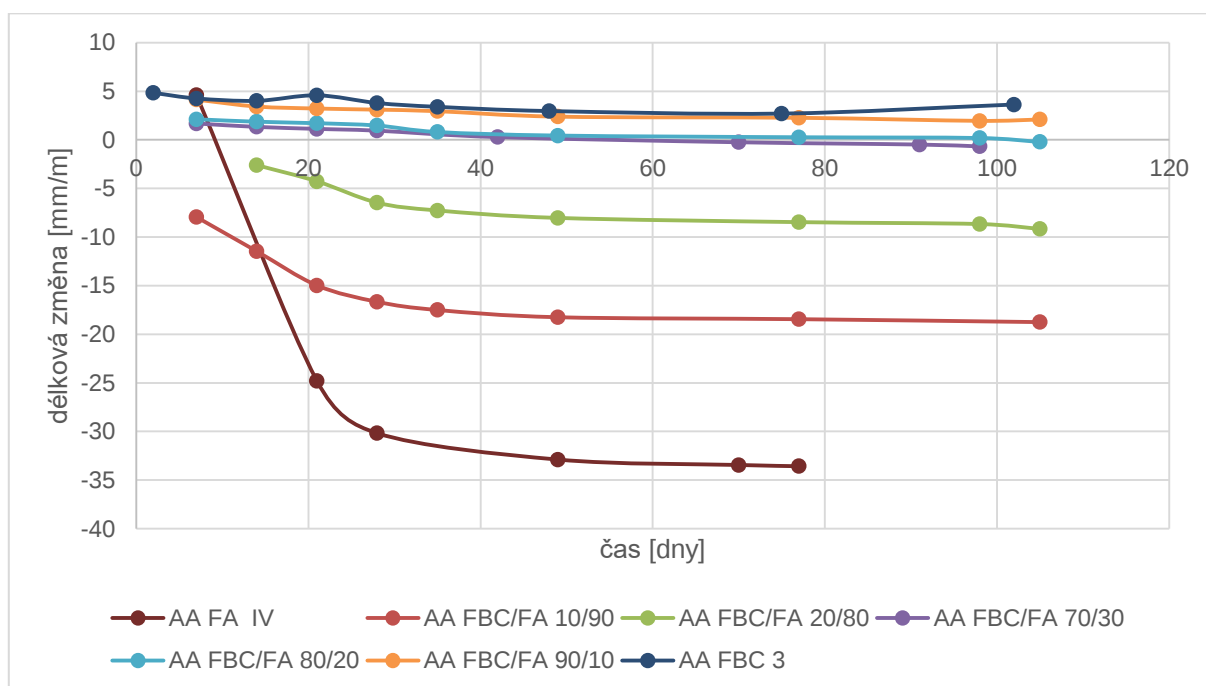
Směs AA FBC/FA 70/30 se po této fázi začíná velmi rychle rozpínat, a to natolik intenzivně, že její expanze překročila měřitelné rozmezí přístroje. Tato extrémní expanze je pravděpodobně důsledkem prudké tvorby ettringitu, jak naznačuje XRD analýza (ettringit 9 %, portlandit 1 %, kalcit 8 %), v kombinaci s vysokou reaktivitou FBC. V pozdějších fázích však dochází k výraznému smrštění vlivem vysychání, které tuto chemickou expanzi kompenzuje. Výsledkem je, že směs AA FBC/FA 70/30 vykazuje téměř nulovou celkovou objemovou změnu po 48 dnech, jak je vidět v další kapitole

Směsi AA FBC 3, AA FBC/FA 90/10 a 80/20 rovněž vykazují počáteční expanzi, avšak mírnější než směs 70/30. Tato expanze odpovídá jejich XRD složení, kde je patrný vyšší obsah ettringitu (10 – 12 %) a dalších CaO-fází. Jejich chování je konzistentní s očekáváním pro směsi s dominantním podílem FBC.

Naopak směsi s převahou FA jako AA FA IV, vykazují chemické smrštění. Největšího smrštění dosáhla právě směs AA FA IV, a to 7,2 mm/m po 120 hodinách. XRD analýza této směsi ukazuje vysoký podíl mullitu (24 %) a nulový obsah expanzních fází, což potvrzuje její nízkou reaktivitu a tendenci ke kontrakci.

Z hlediska rešeršních předpokladů (např. práce Formáčka¹⁹) se chování směsí s dominantním FBC a FA obecně shoduje s očekáváním. Výjimku tvoří právě směs AA FBC/FA 70/30, jejíž extrémní expanze v rané fázi a následná kompenzace vysycháním ji činí výrazně odlišnou od ostatních variant.

Objemové změny – Celkové změny na trámcích



Graf 3: Vývoj dlouhodobých objemových změn na trámcích

Pro zjištění informací o dlouhodobém chování připravených AA směsí, bylo provedeno dlouhodobé měření změny délky na trámcích 160x40x40mm.

Po 48 dnech zrání jsou objemové změny všech směsí již prakticky nulové, což naznačuje ustálení rozměrů trámečků jednotlivých směsí. Největší smrštění vykazovala směs s popínkem FA IV, a to až 32,8 mm/m po 48 dnech od výroby. Se zvyšujícím se podílem FBC ve směsi se míra smrštění snižuje. Naopak největší expanze byla zaznamenána u směsi tvořené čistým FBC, která dosáhla 3,3 mm/m po 48 dnech.

Směs AA FBC/FA 70/30 vykazuje prakticky nulovou celkovou délkovou změnu, přestože chemické měření naznačuje výrazné rozpínání. Pravděpodobně dochází k rychlému vzniku primárních hydratačních fází, po kterém následuje odpařování záměsové vody. Výsledné chemické rozpínání je tak kompenzováno fyzikálním smrštěním.

Podobný průběh lze pozorovat u směsí AA FBC/FA 90/10 a 80/20, které rovněž vykazují velmi malé celkové objemové změny.

Zvláštní chování vykazuje směs AA FA IV, která v počáteční fázi zrání expanduje, přestože chemické procesy naznačují smrštění. Následné vysychání vede k výraznému smrštění až -32,8 mm/m po 48 dnech.

Příměs AA FA snižuje expanzní chování směsi FBC. Při přidavku 30 % AA FA byla dlouhodobá délková změna prakticky nulová. Tato směs však vykazuje nejnižší pevnosti a zpracovatelnost ze všech testovaných variant.

Přidáním malého množství FBC do AA FA se podařilo částečně eliminovat negativní vlastnosti smrštění. Například směs AA FBC/FA 20/80 vykazovala smrštění 6,5 mm/m, což představuje přibližně 20 % původní hodnoty zaznamenané u čisté směsi AA FA.



Obrázek 2: Vizuální porovnání délkových změn na zkušebních tělesech

Rentgenová difrakční analýza (XRD)

Tabulka 4: Složení směsí zjištěné metodou XRD (hm. %), 28 dní

Název sady	Amorf.	křemen	mullit	ettringit	portlandit	kalcit	anhydrit	magnetit
AA FA IV	64	7	24	0	0	0	0	2
AA FBC/FA 10/90	67	7	24	0	0	0	0	2
AA FBC/FA 20/80	68	7	26	0	0	0	0	2
AA FBC/FA 70/30	67	6	7	9	1	8	1	1
AA FBC/FA 80/20	68	6	4,5	10,5	1,5	7	1,5	1
AA FBC/FA 90/10	69	6	2	12	2	6	2	1
AA FBC 3	59	6	2	18	3	8	2	2

S rostoucím podílem FBC ve směsi dochází k výrazným změnám v mineralogickém složení, což má přímý vliv na objemové chování materiálu.

Nejvýraznější změnou je nárůst obsahu ettringitu, který stoupá od 0 % u směsi AA FA IV až na 18 % u čisté směsi AA FBC 3. Tento trend je očekávaný, protože FBC obsahuje vyšší množství CaO, které podporuje tvorbu ettringitu. Ettringit je známý svou schopností způsobovat expanzi materiálu, což koreluje s pozorovaným objemovým chováním – směsi s vyšším obsahem FBC vykazují větší rozpínání.

Další změnou je pokles mullitu, stabilní fáze typické pro FA. Zatímco směsi s vysokým podílem FA obsahují až 26 % mullitu, jehož množství klesá až na 2 % ve směsi čistého FBC.

Anhydrit a magnetit se vyskytují v nízkých koncentracích, ale jejich přítomnost je rovněž spojena s FBC. Například směs AA FBC 3 obsahuje 2 % anhydritu a 2 % magnetitu, zatímco směsi s převahou FA tyto fáze neobsahují. Zajímavá je také směs AA FBC/FA 70/30, která má vyvážené složení: obsahuje 9 % ettringitu, 1 % portlanditu, 8 % kalcitu, a zároveň ještě 7 % mullitu. Tato směs vykazuje prakticky

nulovou objemovou změnu, což naznačuje rovnováhu mezi expanzními a smršťivými procesy. Bohužel tato směs vykazuje nejhorší zpracovatelnost a nejnižší dlouhodobé pevnosti.

Závěr

Syntéza směsného pojiva na bázi AA FA a FBC je možná. Na základě provedených experimentů a analýz lze jednoznačně konstatovat, že poměr mezi fluidním popílkem (FBC) a popílkem z klasického spalování (FA) zásadně ovlivňuje mechanické, objemové i mineralogické vlastnosti výsledných směsí. Rozdílné reaktivity jednotlivých materiálů však neumožňují mísení přímé, ale je nutné jednotlivé materiály smísit samostatně a následně v dalším kroku smísit dohromady. Směsi s poměrem popílků blízkým 50:50 nebylo možné vůbec vyrobit, směs zcela vytvrdla již během krátkého druhotného mísení.

Směsi s převahou FA mají výrazné dlouhodobé smrštění. Naopak směsi s převahou FBC se blíží nulovým dlouhodobým objemovým změnám. Z hlediska dalšího využití se jeví jako optimální směs s poměrem FBC/FA 90/10 až 80/20, tyto směsi vykazovaly nejmenší objemové změny za zachování vysoké pevnosti v tlaku 30 – 50 MPa.

Poděkování

Tato práce byla financována v rámci projektu SGS25/115/OHK1/3T/11 - Technologické postupy úpravy a zpracování deponovaných výrobků z VEP obsahujících primární a sekundární sádrovec.

Literatura

- 1) Ministerstvo průmyslu a obchodu: *Politika druhotných surovin České republiky – Přílohy*. MPO, Praha 2015. <http://download.mpo.cz/get/51372/60887/635845/priloha002.pdf>, staženo 1.10.2025
- 2) Sokol P, Donát P, Tomešová Z, Formáček P. *Analýza Současného Stavů Druhotných Surovin pro MPO 08/2024.*; 2024.
- 3) Šulc R.: *Vliv přísad a příměsí na hodnoty fyzikálně mechanických a chemických vlastností POPbetonu*. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 2012. <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/13842>
- 4) Šulc, R, Svoboda P. *Alkalická aktivace mletého úletového popílku* [online]. Geopolymery.eu, 2009 [cit. 2025-10-09]. Dostupné z: http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/documents/publikace/2009/telc_2009_sulc_cd.pdf
- 5) Davidovits J.: *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute, St. Quentin 2008.
- 6) Škvára F.: *Ceram.-Silikáty* 51, 173 (2007).
- 7) Criado M., Palomo A., Fernández-Jiménez A.: *Cem. Concr. Res.* 37, 671 (2007). doi: 10.1016/j.cemconres.2007.01.013.
- 8) Okoye F. N., Durgaprasad J., Singh N. B.: *Constr. Build. Mater.* 153, 158 (2017). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.004.
- 9) Qaidi S. M. A., Najm H. M., Abed S. M., Ahmed H. U., Al Dughaihi H., Al Lawati J., Sabri M. M., Alkhatib F., Milad A.: *Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis*; *Materials* 15, 7098 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15207098>, staženo 1. 10. 2025.
- 10) Sun Z., Fan X.: v knize: *Mining and Metallurgical Wastes Based Alkali-Activated Materials* (Springer, ed.), kapitola 8. Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6285-9_8, staženo 1. 10. 2025.
- 11) Chen S., Ruan S., Zeng Q., Liu Y., Zhang M., Tian Y., Yan D.: *Pore Structure of Geopolymer Materials and Its Correlations to Engineering Properties: A Review*. University College London Repository. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10144840/1/Accepted.pdf>, staženo 1. 10. 2025.

- 12) Chen S., Wu C., Yan D., Ao Y., Ruan S., Zheng W., Sun X., Lin H.: *Relation between drying shrinkage behavior and the microstructure of metakaolin-based geopolymer*. J. Zhejiang Univ.-Sci. A 21, 778 (2020). <https://link.springer.com/article/10.1631/jzus.A2000513>, staženo 1. 10. 2025.
- 13) Palomo A., Krivenko P., Garcia-Lodeiro I., Kavalerova E., Maltseva O., Fernández-Jiménez A.: *Alkali-Activated Fly Ash–Slag Binders: A Review*. Cem. Concr. Res. 74, 68 (2015). doi: 10.1016/j.cemconres.2015.02.005.
- 14) Vijayakumar R. M.: *Evaluating Shrinkage of Fly Ash – Slag Geopolymers*. Diplomová práce. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana 2013. <https://core.ac.uk/download/pdf/19529926.pdf>, staženo 1. 10. 2025.
- 15) ČEZ Energetické produkty, s.r.o.: *SORFIX – ekologické stavební pojivo. Technická prezentace*. ČEZ Energetické produkty, Praha 2023. <https://www.asvep.cz/sorfix>, staženo 9. 10. 2025.
- 16) ČEZ Energetické produkty, s.r.o.: *SORFIX – Technický list*. ČEZ Energetické produkty, Praha 2023. <https://www.cezep.cz/webpublic/file/edee/sorfix/sorfix-technicky-list.pdf>, staženo 4. 8. 2025.
- 17) Skupina ČEZ: *Elektrárny Tušimice*. ČEZ, a. s., Praha. <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-tusimice-581751>, staženo 8. 7. 2025.
- 18) Litoš J.: *Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí*. Sborník. České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011. ISBN: 978-80-01-04700-2.
- 19) Formáček P.: *Disertační práce*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 2024. <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/114879>, staženo 9. 10. 2025.

Development of an alkaline activated mixed binder with the aim of minimizing volumetric deformations

Michal HIMMEL, Rostislav ŠULC

Faculty of Civil Engineering CTU in Prague, Czech Republic

Summary

This work explores the possibility of producing a blended binder based on alkali-activated power plant fly ashes. Fluidized bed combustion fly ash (FBC) is expansive and, due to its limestone admixture, reactive. On the other hand, high-temperature bottom ash (FA) exhibits significant shrinkage and extremely slow strength development. By mixing these two types of ash, we expect to create a binder that is dimensionally stable and also meets other performance criteria (workability, long-term strength) at sufficient levels.

In this study, the binder SORFIX, based on fluidized fly ash, and high-temperature bottom ash from the Tušimice power plant were used. The bottom ash was alkali-activated (AA) using a solution of sodium hydroxide and sodium water glass. The main parameter monitored in the experiment was volumetric stability, with compressive strength being a secondary criterion. Reference mixtures made solely from individual binders were also produced. Mixtures with a ratio close to 50:50 could not be manufactured due to the high reactivity of FBC. Pastes with ratios ranging from 10:90 to 20:80 appear optimal in terms of the monitored parameters.

Keywords: *alkali activation, composite binder, volumetric changes, shrinkage, fly ash, fluidized bed ash, FA, FBC*