

# Vliv množství alkalických aktivátorů na pevnost POPbetonu®

**Rostislav Šulc<sup>1</sup>, Pavel Svoboda<sup>2</sup>**

## **Abstrakt**

POPbeton jako nový typ bezcementového betonu využívá jako pojivo alkalicky aktivovaný úletový popílek z našich hnědouhelných a černouhelných elektráren. V silně alkalickém prostředí tento popílek vytváří kompaktní hmotu, kterou lze s úspěchem použít jako pojivo v betonu.

Pro výsledné pevnostní charakteristiky jsou velice důležité zejména výrobní procesy a množství a vzájemný poměr jednotlivých složek alkalického aktivátoru. Stejně důležitý je i vliv času na zejména na POPbeton vyrobený „za studena“. V této studii bylo ověřeno optimální složení pro pojivo vyrobené na základě hnědouhelného popílku z lokality Opatovice.

## **Úvod**

Od roku 2003, kdy byla navázána úzká spolupráce mezi Ústavem skla a silikátů VŠCHT a katedrou technologie staveb ČVUT FSv v Praze probíhá výzkum využití úletových popílků z velkých topenišť na základě výzkumu alkalické aktivace, který již několik let probíhal v Ústavu skla a silikátů. Cílem této spolupráce je aplikace získaných výsledků výzkumu do praktického užití ve stavební praxi. V příspěvku jsou předloženy některé výsledky ověřovacího průzkumu základního stavebního prvku POPbetonu připravovaném takzvanou studenou aktivací. Zejména je zaměřen na ověření vlivu množství alkalických aktivátorů popílku ve směsi a ověření vlivu tzv. intenzifikátoru tvrdnutí.

## **1 Ověření vlivu množství alkalických aktivátorů a intenzifikátoru tvrdnutí ve směsi**

Na základě dřívějších zjištění a průzkumů provedených na Ústavu skla a silikátů VŠCHT, bylo dokázáno, že úletový popílek je možné aktivovat pomocí silných zásad. Přidává se vodní sklo a to buďto sodné nebo draselné a dále hydroxid sodný nebo draselný. Dále bylo prokázáno, že při použití sodných aktivátorů, je výsledná směs pevnější a stálejší v agresivním prostředí. Další výhodou této technologie je i cena, která je sodných aktivátorů nižší. Dalším problémem se ukázala doba tvrdnutí celé POPbetonové směsi. Bylo proto nutné nalézt vhodný tzv. intenzifikátor tvrdnutí, který zaručí dostatečnou pevnost směsi pro možné dřívější odformování. Na pokusech se samotným POPbetonem bylo prokázáno, že tímto vhodným intenzifikátorem by mohl být hydroxid hlinitý ve formě prášku. Jeho použití se osvědčilo na větších vzorcích POPbetonu.

Proto bylo potřeba zjistit vlastnosti samotného takto připraveného popílkového pojiva, tak aby bylo možné určit základní technologické postupy a technologický postup jeho přípravy a stejně tak i technologický postup přípravy POPbetonu.

---

<sup>1</sup>ŠULC, Rostislav, Ing., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K122 – Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, [rostislav.sulc@fsv.cvut.cz](mailto:rostislav.sulc@fsv.cvut.cz)

<sup>2</sup>SVOBODA Pavel, Doc. Ing., CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, K122 – Katedra technologie staveb, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, [svobodap@fsv.cvut.cz](mailto:svobodap@fsv.cvut.cz)

## 1.1 Vliv množství alkalických aktivátorů

V současné době existují dva zásadní modely struktury geopolymery. První starší je monolitický polymer (model dle prof. Davidovitse) a druhý je tzv. náhodně uspořádaný. V obou případech se předpokládají vazby mezi oxidy křemíku a oxidy hliníku, na které jsou navázány sodné ionty. Základní stavební prvky geopolymery tak pocházejí jak z matrice popílku, tak z vodního skla a přidaného hydroxidu (sodného či draselného). Proto bylo potřeba ověřit množství přidávaných aktivátorů a jejich vliv na výsledné pevnosti těles. Výsledkem mělo být zjištění konkrétního poměru pro daný popílek a dané aktivátory nehlédě na jejich koncentrace v roztoku.

### 1.1.1 Vstupní materiály

Tento ověřovací průzkum byl proveden na úletovém popílku z elektrárny Opatovice. Jeho složení uvádí tabulka 1. Dále bylo přidáváno sodné vodní sklo o jehož charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2. Samotný NaOH byl přidáván v pevném skupenství do vodního skla, kde byl rozmíchán až do úplného rozpuštění. Nebyla přidávána žádná záměsová voda, takže vodní součinitel byl konstantní, viz. tabulka 3. Intenzifikátor tvrdnutí byl též přidáván v ověřeném množství, které bylo pro celou sérii stejné (viz. tabulka 3).

Tabulka 1 – Složení popílku Opatovice

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Σ
52,85%	31,84%	0,36%	7,34%	2,12%	1,69%	1,14%	1,51%	0,41%	0,21%	99,47%

Tabulka 2 – Složení vodního skla

SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Σ
25,73%	8,64%	65,50%	99,87%

### 1.1.2 Příprava vzorků

Do popílku byl volně nasypán NaOH v pevném skupenství a poté byl přidán intenzifikátor tvrdnutí - hydroxid hlinitý. Poté byl popílek s NaOH a Al(OH)<sub>3</sub> v laboratorní míchačce smíchán s roztokem vodního skla.

Míchání probíhalo až do kulminace teploty a poté byla směs uložena do forem 40x40x160 mm. Poté byla směs ve formách vibrována na vibračním stolku po dobu dvou minut.

Takto připravené vzorky byly označeny A až K podle tabulky 3 a uloženy k volnému vytvrzení. Po sedmi dnech byly vzorky vyndány z forem a opět nechány dalšímu vytvrzení po dalších 7 dní. Po 14 dnech byla zkoušena první série na tah za ohybu a na obou úlomcích byly provedeny zkoušky v prostém tlaku. To samé se opakovalo po 28 dnech a po 90 dnech stáří vzorku.

Množství NaOH bylo voleno s ohledem na technologický postup dávkování. Tj. bylo zvoleno po procentech (od 0% do 10%) na množství popílku. Tento krok sice nezaručuje rovnoměrné rozložení z hlediska poměrů oxidů vstupujících do reakce, ale je vhodný zejména pro praktický způsob dávkování, které je nejjednodušší určovat v procentech na množství právě popílku.

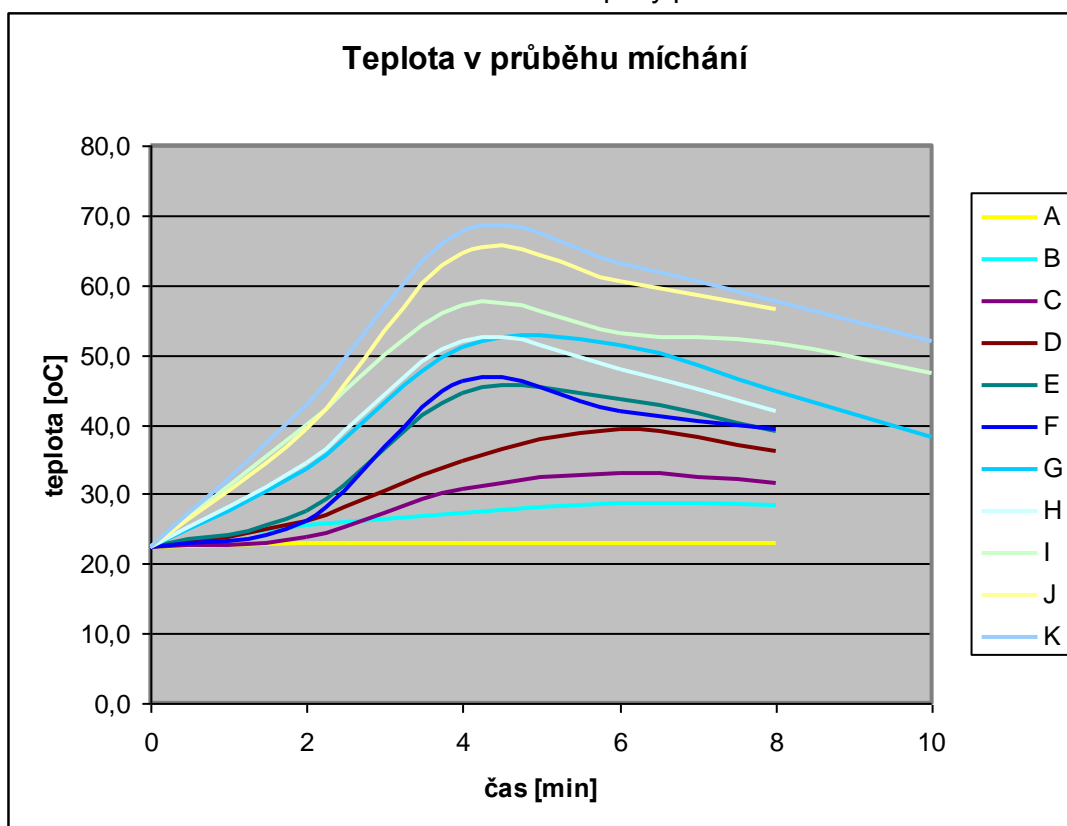
Zrovna tak množství vodního skla je určeno v množství sušiny na množství popílku. To zaručuje přesný popis složení směsi pro různé koncentrace vodního skla. Toto množství je však již třeba upravit vzhledem k různému množství oxidu křemičitého v různých druzích vodního skla. Toto je zohledněno i ve výsledcích a udávaný optimální poměr je vždy kromě celkového udávan i pro samotné aktivátory.

Tabulka 3 – Skutečný stav

Série	označení	w	Poměr na popel v %			Al(OH) <sub>3</sub> na sušinu skla v %	Poměr NaOH : vodní sklo : Al(OH) <sub>3</sub>		
			[-]	NaOH	Vodní sklo		Al(OH) <sub>3</sub>	Al(OH) <sub>3</sub>	NaOH
2	A	0,18995	0	10,005	0,5	4,998			
2	B	0,18995	1	10,005	0,5	4,998	1	10,005	0,500
2	C	0,18995	2	10,005	0,5	4,998	1	5,003	0,250
2	D	0,18995	3	10,005	0,5	4,998	1	3,335	0,167
2	E	0,18995	4	10,005	0,5	4,998	1	2,501	0,125
2	F	0,18995	5	10,005	0,5	4,998	1	2,001	0,100
2	G	0,18995	6	10,005	0,5	4,998	1	1,668	0,083
2	H	0,18995	7	10,005	0,5	4,998	1	1,429	0,071
2	I	0,18995	8	10,005	0,5	4,998	1	1,251	0,063
2	J	0,18995	9	10,005	0,5	4,998	1	1,112	0,056
2	K	0,18995	10	10,005	0,5	4,998	1	1,001	0,050

V průběhu míchání směsi docházelo se vzrůstajícím množstvím NaOH ke značnému nárůstu teploty. Tento jev je zachycen na obrázku 1.

Obr. 1 – Průběh teploty při míchání



Je patrné, že kulminaci teploty dochází vždy po cca. 4 minutách. Pokles teploty je oproti nárůstu pozvolný. Lze jednoznačně konstatovat, že přidávání většího množství NaOH

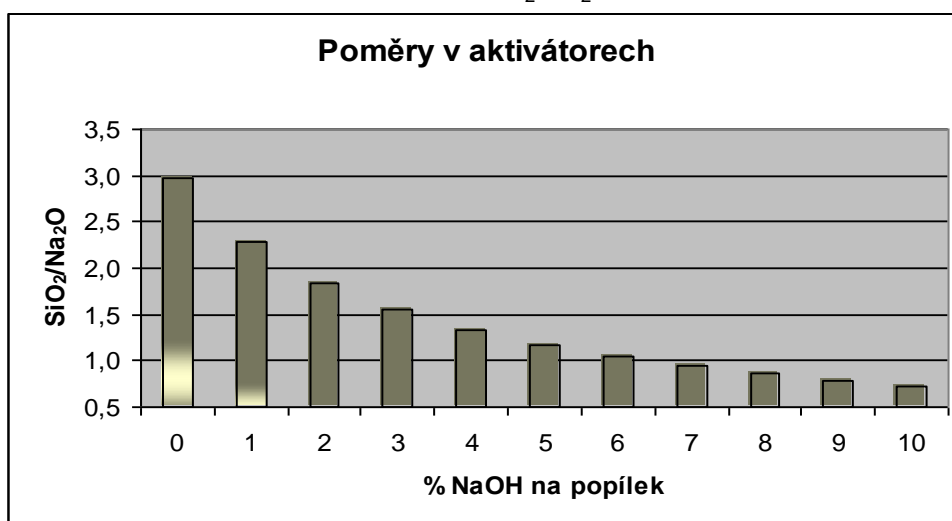
vede k nepříjemnému nárůstu teplot v průběhu přípravy materiálu. To může mít některé negativní dopady (počáteční smrštění atd.), které je třeba dále ověřit.

Dalším jevem souvisejícím s různým množstvím NaOH ve směsi byla jeho rozdílná zpracovatelnost. Lze konstatovat, že čím více NaOH bylo ve směsi, tím byla celá kompozice více plastická a tekutá. Při vysokých dávkách NaOH byla též kompozice více lepivá a rychleji na povrchu „osychala“, objevovalo se tzv. falešné tvrdnutí, které však při vibrování nepředstavovalo pro zpracování žádný problém.

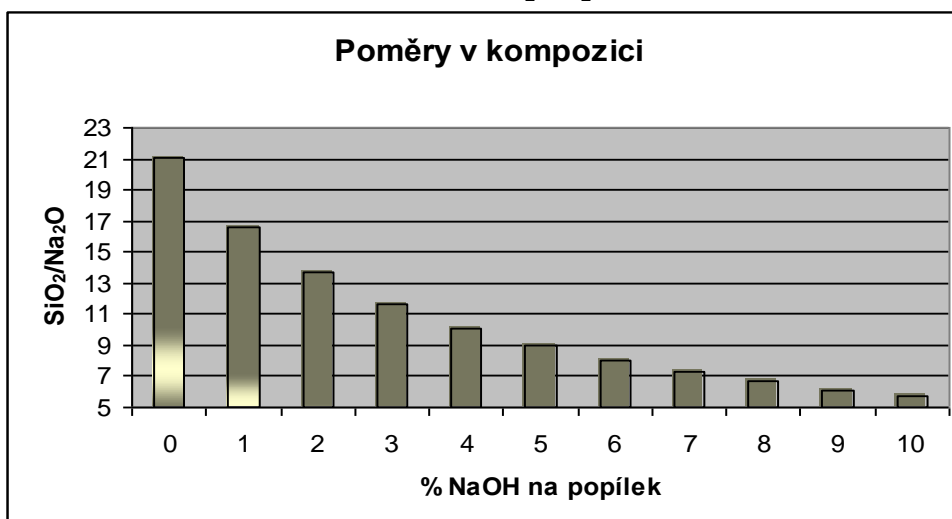
### 1.1.3 Výsledky

Cílem bylo objasnit zejména vliv  $\text{Na}_2\text{O}$  v kompozici. Proto byla jako jediná proměnná zvoleno právě množství  $\text{Na}_2\text{O}$ . Na obrázcích 2 až 5 je ukázán poměr oxidů v kompozici. Množství oxidů křemičitého i hlinitého, které se v kompozici vyskytují buď z matrice popílku nebo z aktivátorů či intenzifikátoru tak zůstává konstantní.

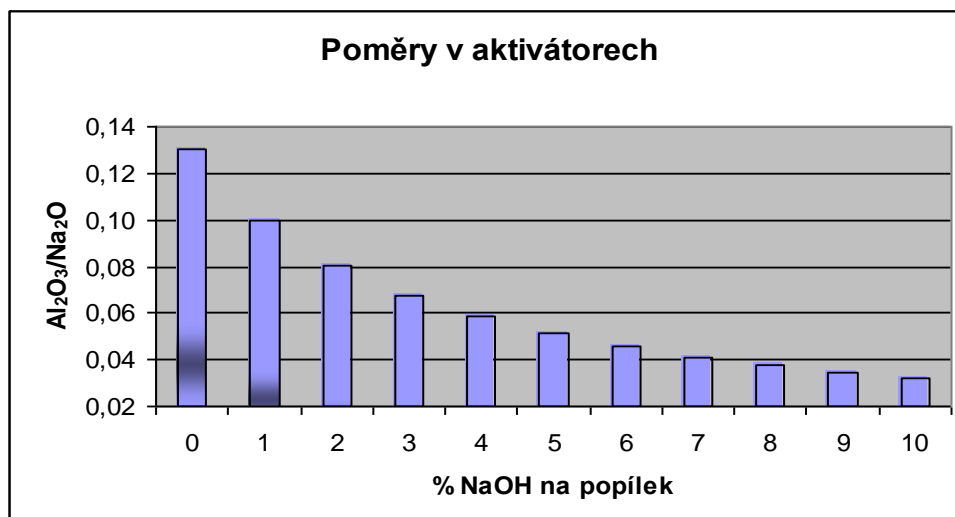
Obr. 2 –  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$



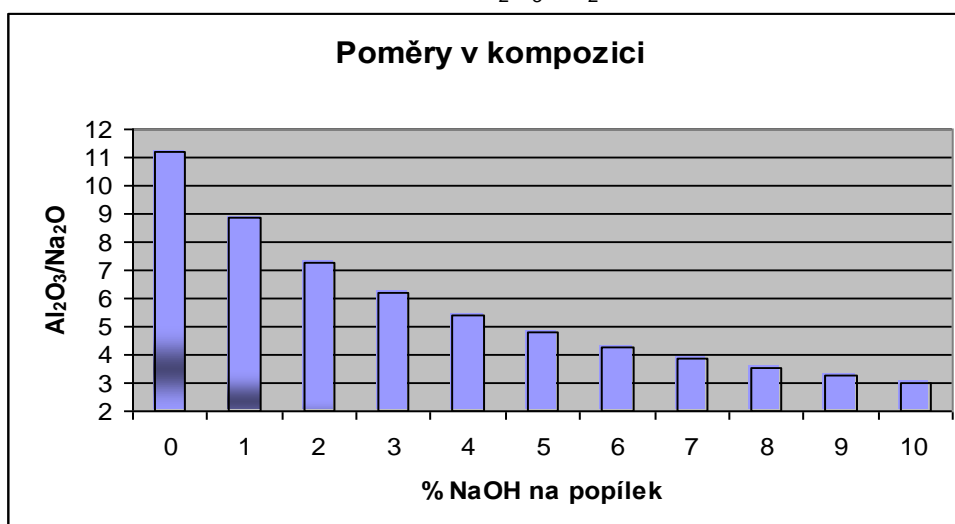
Obr. 3 –  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$



Obr. 4 –  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$



Obr. 5 –  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$



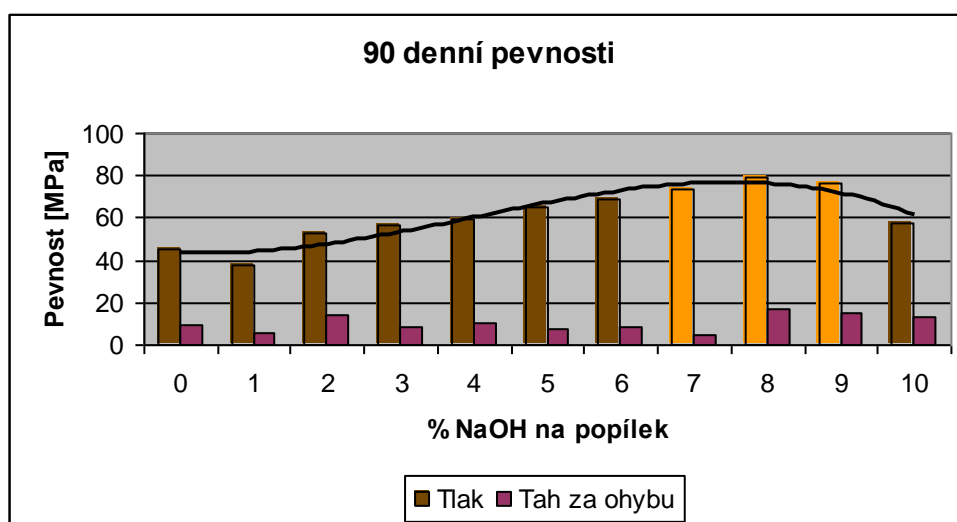
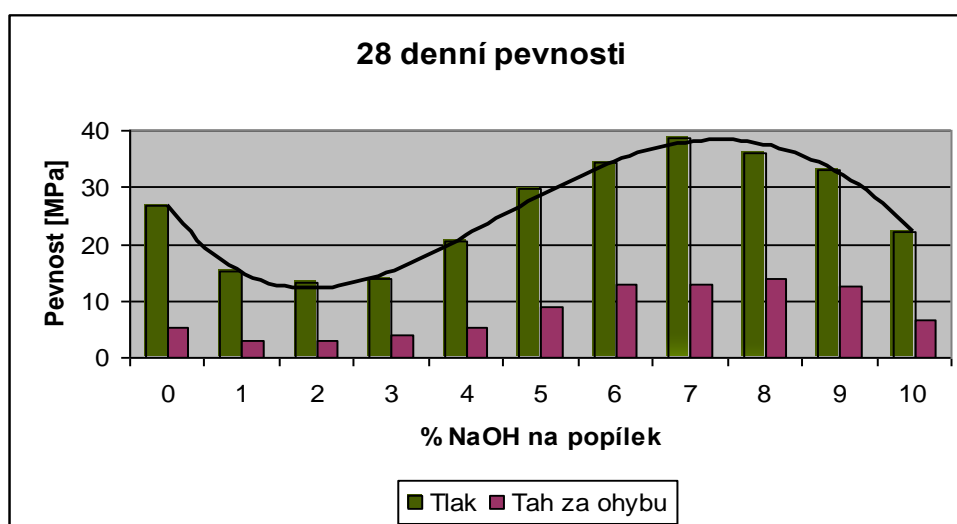
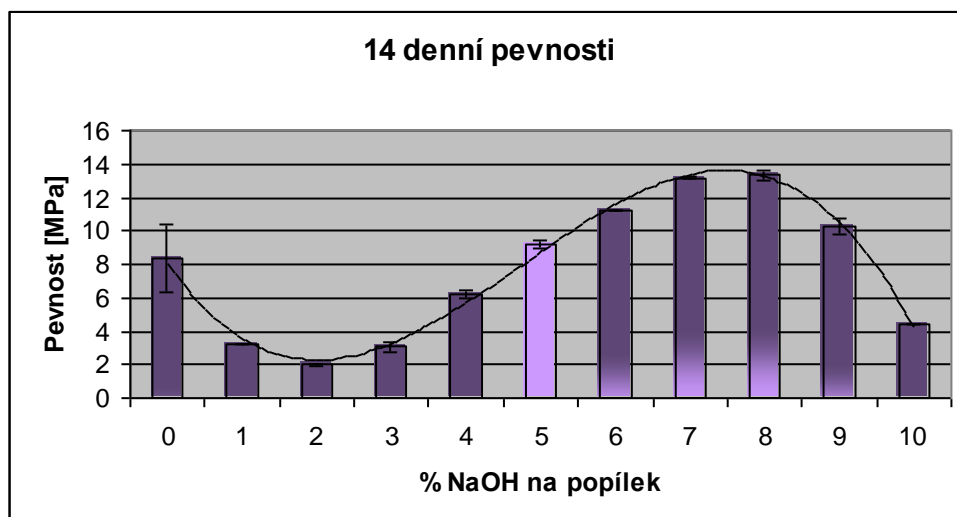
Je zřejmé, že tento poměr není lineární, jelikož množství NaOH bylo z technologických důvodů dávkování voleno jako lineárně narůstající vzhledem k množství popílku.

Výsledkem měření bylo vyhodnotit vliv množství  $\text{Na}_2\text{O}$  v kompozici vzhledem k pevnostem aktivovaného popílku. Vyhodnocení měla za úkol najít nejvhodnější dávku NaOH vzhledem k popílku a zároveň ověřit vliv  $\text{Na}_2\text{O}$  v poměru ku  $\text{SiO}_2$ . I v tomto případě je však nutné rozlišit dva případy. Buď se jedná o celkový poměr oxidů ve směsi nebo o poměr oxidů pouze v aktivátorech. **Vzhledem k různému složení popílků lze očekávat i různé výsledné ideální poměry pro různé popílků. Naopak poměr oxidů v aktivátorech by mohl pro všechny popílků zůstat relativně neměnný.**

**Pokud bychom očekávali u všech popílků stejný výsledný poměr oxidů, pak bude naopak nutné upravovat poměr aktivátorů navzájem. Tento problém vyžaduje další ověřovací pokusy na více druzích popílku.**

Měření bylo provedeno po 14, 28 a 90-ti dnech. Výsledky měření jsou shrnuty v následujících grafech.

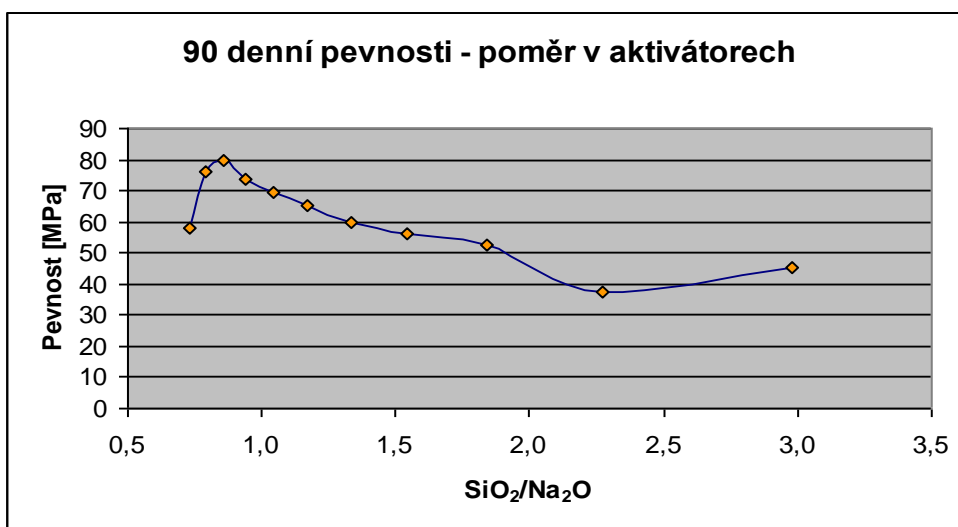
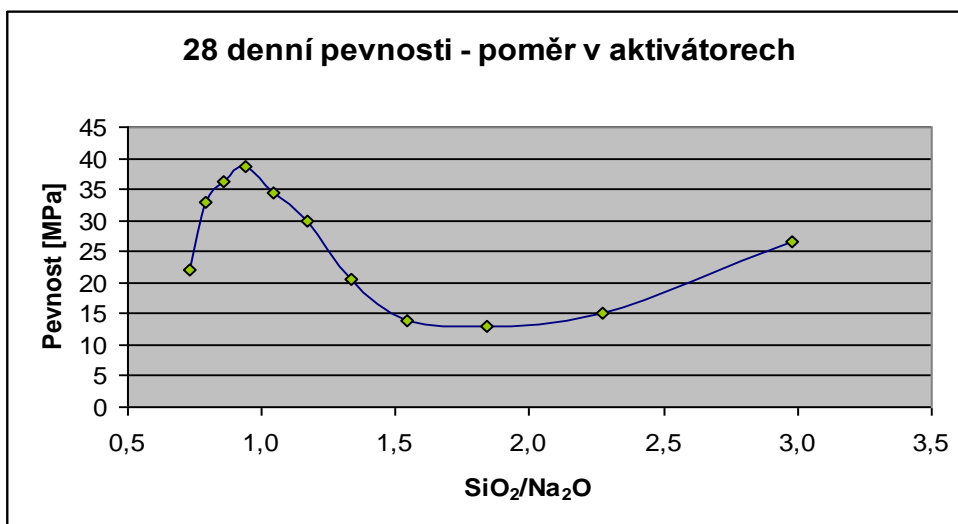
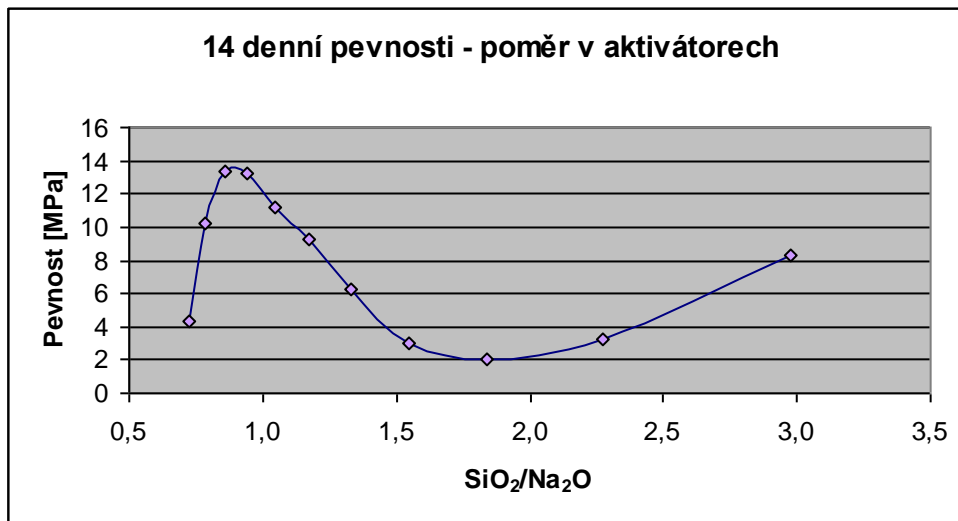
Obr. 6 - Pevnosti



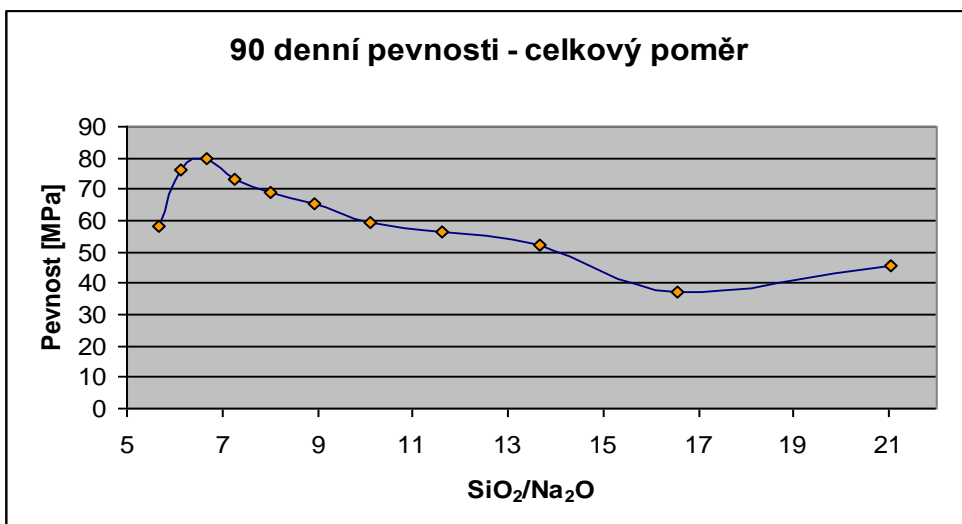
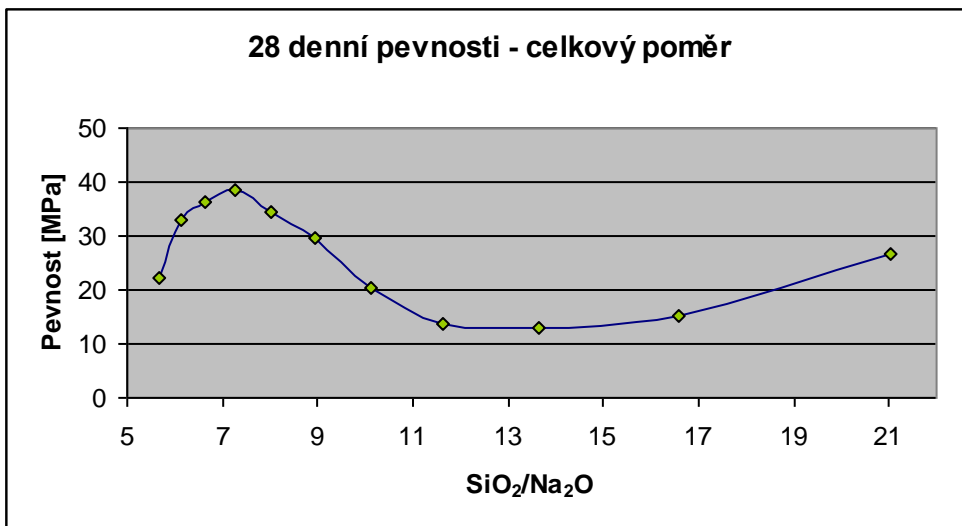
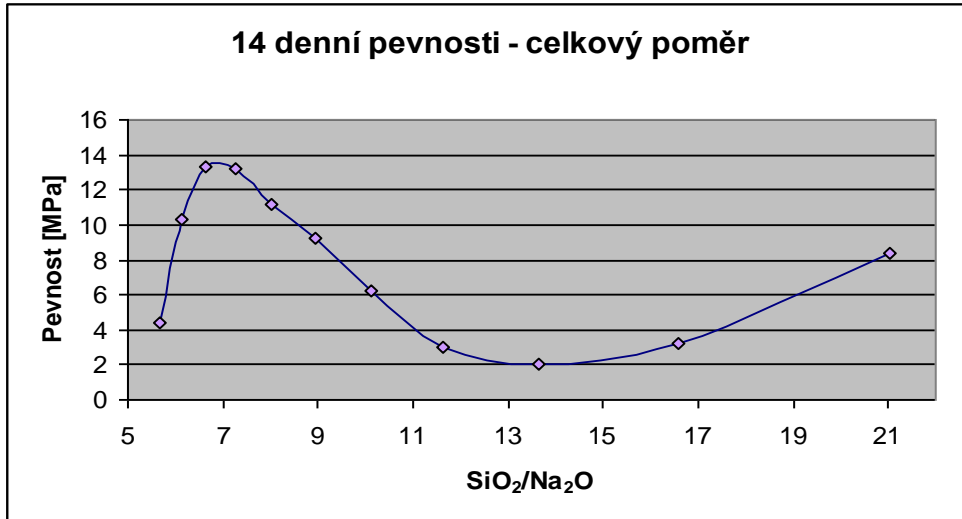
Je patrné, že z hlediska technologie dávkování je nejvhodnější poměr 1:0,75-0,8 (sušina vodního skla : hydroxid sodný). Zajímavá je skutečnost, že s klesajícím poměrem  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  nejprve pevnosti klesají (až do poměru 1:0,2 - sušina vodního skla : hydroxid sodný) a poté opět stoupají.

Toto vyjádření je značně relativní, proto je asi vhodnější prozkoumat pevnostní charakteristiky na základě poměrů oxidů. Ať už v celkové kompozici (obr. 7) nebo v jen v aktivátorech (obr.8)

Obr. 7 – Pevnosti



Obr. 8 – Pevnosti





#### 1.1.4 Závěr

Byl prokázán vliv množství  $\text{Na}_2\text{O}$  na výsledné pevnosti aktivovaného úletového popílku z elektrárny Opatovice. Při měřeních pevností byl jednoznačně ověřen poměr  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 7$ . Tento poměr je v čase konstantní a nijak výrazněji se nemění, což ukazuje na výborné vlastnosti popílkového pojiva. V technologické praxi tento poměr odpovídá dávkování 1:0,75 až 0,8 v poměru sušiny vodního skla ku hydroxidu sodnému. Byly též prokázány značné pevnosti této hmoty (14 MPa po 14 dnech, 40 MPa po 28 dnech a až 80 MPa po 90 dnech!!!), které narůstají zhruba do stého dne stárí. Ovšem tento předpoklad je ještě třeba dále ověřit na větších tělesech.

Zároveň se podařilo částečně najít nevhodnější poměr  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  pro samotný alkalický aktivátor. Tento by se měl být cca  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0,9$ .

Tyto výsledky jsou v tuto dobu prokazatelně platné jen pro úletový elektrárenský popílek z elektrárny Opatovice. Bude potřeba dalších pokusů, které prokážou nebo vyvrátí obecnou platnost některých zjištění a vztahů.

V každém případě aktivovaný popílek ukázal ne jen velice dobré pevnostní charakteristiky a předpoklady pro použití jako pojivo do betonu, ale i pro použití samotné popílkové hmoty.

*Celý tento výzkum je realizován v rámci grantu GAČR 103/05/2314 „Mechanické a inženýrské vlastnosti geopolymerních materiálů na bázi alkalicky aktivovaných popílků“ a výzkumného záměru MŠM 6046137302 „Příprava a výzkum funkčních materiálů a materiálových technologií s využitím mikro a nanoskopických metod“.*

*Na řešení tohoto úkolu v jednotlivých dalších fázích spolupracují: Josef Doležal<sup>2</sup>, Kamil Dvořáček<sup>3</sup>, Martin Lucuk<sup>2</sup>, Lenka Myšková<sup>4</sup>, Simona Pawlasová<sup>3</sup>, Tomáš Strnad<sup>2</sup>, Jaroslav Jeništa<sup>2</sup>, Gabriela Tlapáková<sup>2</sup>, Pavel Houser<sup>2</sup> Lubomír Kopecký<sup>2</sup>*

---

<sup>3</sup> České vysoké učení technické, fakulta stavební, katedra technologie staveb, Thákurova 7, 199 29 Praha 6, Česká republika kontakt [pavel.svoboda@fsv.cvut.cz](mailto:pavel.svoboda@fsv.cvut.cz)

<sup>4</sup> Vysoká škola chemicko technologická, ústav skla a keramiky, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republika kontakt , [Frantisek.Skvara@vscht.cz](mailto:Frantisek.Skvara@vscht.cz)