

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební

Studentská vědecká a odborná činnost
Akademický rok 2011/2012

Optimalizace technologie výroby **popílkového pórobetonu**

Jméno a příjmení studenta,

ročník, obor:

Vedoucí práce:

Katedra / Ústav:

Vít Bednárik, 4. ročník, M

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.

Technologie stavebních hmot a dílců

Obsah

Abstrakt	3
Abstract	3
Úvod	4
Cíl práce	4
Metodika práce	4
1 Současný stav výroby pórobetonu v ČR a ve světě	6
1.1 Technologie výroby pórobetonu	7
1.1.1 Technologie výroby – obecně	7
1.1.2 Současné technologie v ČR	7
1.2 Suroviny pro výrobu pórobetonů	8
1.2.1 Pálené vápno	8
1.2.2 Cement	9
1.2.3 Křemičitý písek	10
1.2.4 Popílky	10
1.2.5 Hliníkový prášek	11
1.2.6 Pomocné suroviny	12
1.2.7 Voda	12
1.3 Vlastnosti výsledného materiálu	12
2 Optimalizace technologie výroby popílkového pórobetonu	13
2.1 Zdroje sledovaných popílků	13
2.2 Parametry sledovaných popílků	14
2.2.1 Granulometrie	14
2.2.2 Sypná hmotnost	14
2.2.3 Ztráta žíháním	16
2.3 Program pro mísení popílků do popílkového pórobetonu	16
Diskuze výsledků	20
Závěr	20
Literatura	21

Abstrakt

V tepelných elektrárnách spalujících uhlí se vytvářejí během spalování jemně rozemletého uhlí tuhé minerální látky. Jedná se především o popílky, tj. nespalitelnou minerální část uhlí. Svým charakterem umožňují využití v různých stavebních materiálech. Autoklávovaný pórobeton je pak jedním z mála způsobů, jak využít i popílky z fluidního způsobu spalování. Práce se zabývá optimalizací složení surovinové směsi pro výrobu pórobetonu s maximálním využitím létavých popílků.

Abstract

In coal-fired plants are created during combustion of finely milled coal solid minerals. The considered materials are ashes, i.e. the non-combustible mineral portion of coal. Its character allows use in various building materials. Autoclave aerated concrete is then one of the few ways to use the ashes from fluidized bed combustion. The work deals with the optimization of the composition of the raw material mixture for the production of aerated concrete with maximum use of filter fly ash.

Úvod

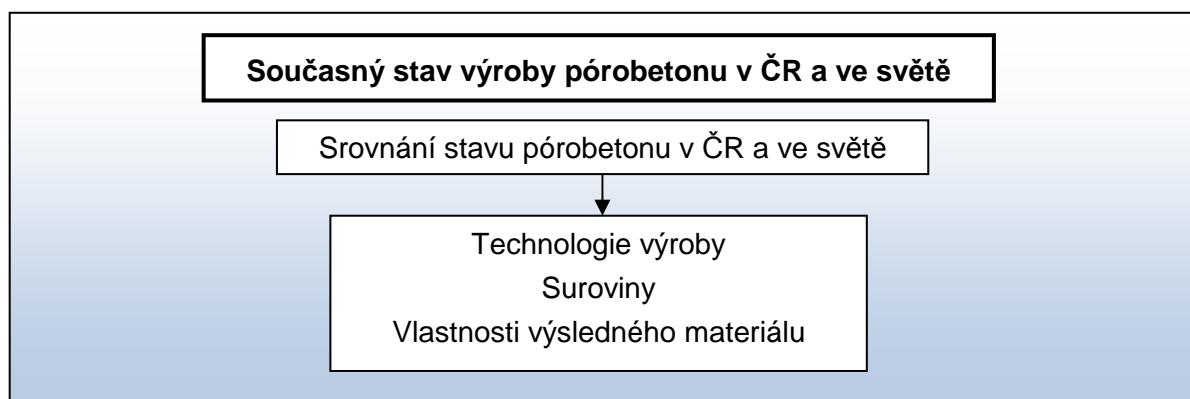
V posledních letech se neustále zvyšují požadavky na stavební materiály, což souvisí zejména s rostoucími nároky na pohodu bydlení, na ochranu životního prostředí a snížení energetické náročnosti budov. Materiálem, relativně mladým a splňujícím kritéria na nízkoenergetickou výstavbu, je autoklávovaný pórobeton. Tento materiál je na trhu stavebních výrobků oblíbený zejména pro své výborné tepelně izolační vlastnosti, doplněné příznivým poměrem mezi objemovou hmotností a mechanickými pevnostmi.

Cíl práce

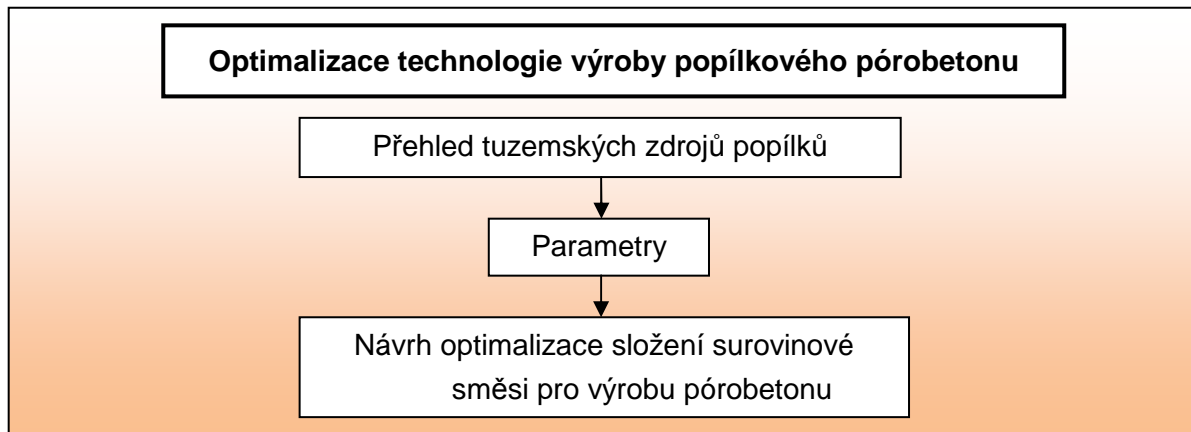
Cílem této práce je zhodnocení parametrů elektrárenských popílků, získávaných z uhelných elektráren jako vedlejší energetické produkty, což mi poslouží k následné optimalizaci složení surovinové směsi pro výrobu pórobetonu. Pro splnění tohoto cíle pracuji na vytvoření programu v aplikaci Microsoft Excel, který pracuje se zadanými parametry popílků a je přizpůsobený na změny požadavků chemických i fyzikálních vlastností, daných normou popř. interními požadavky výrobce pórobetonu. Snahou bude maximální využití fluidních popílků.

Metodika práce

V teoretické části této práce zpracuji rešerši o současném stavu výroby pórobetonu v ČR a ve světě. V současnosti se pro výrobu autoklávovaných pórobetonů využívá několik typů výrobních technologií, které se od sebe v jednotlivých krocích odlišují. Pro účel této práce zmíním pouze technologie výroby používané v ČR. Společným znakem všech technologií jsou použité suroviny. Jedná se o vápno, cement, písek či popílek a hliníkový prášek, zajišťující nakypření směsi. U jednotlivých surovin uvedu důvody jejich používání v autoklávovaných pórobetonech, doplněné požadavky na jejich fyzikálně - chemické složení. Vyšší pozornost bude věnována popílkům, zastupujících v pórobetonu funkci křemičité látky. Nejen tedy technologie výroby, ale i použité suroviny nám rozhodují o vlastnostech výsledného materiálu.



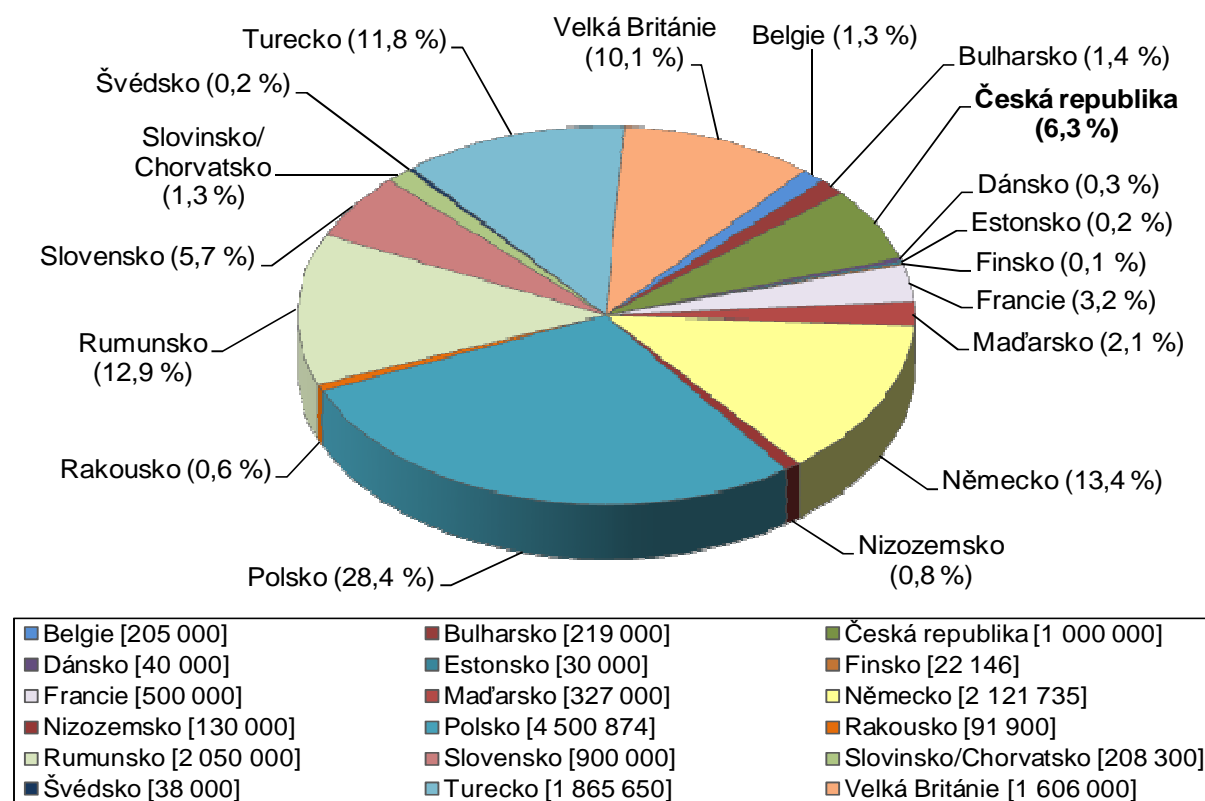
V experimentální části této práce se budu věnovat návrhu optimalizace složení surovinové směsi pro výrobu pórobetonu. V úvodu uvedu přehled sledovaných zdrojů popílků, zastoupeny budou popílků ze spalování černého i hnědého uhlí, získávané z klasického i fluidního způsobu spalování. Jednotlivé popílků porovnam z hlediska granulometrie, sypných hmotností a ztráty žíháním. Dále představím práci s programem, vytvářeným v aplikaci Microsoft Excel. Tento program by měl sloužit k nalezení vhodného poměru dávkování jednotlivých popílků do autoklávovaných popílkových pórobetonů. Jako základní budou přitom brány popílků z fluidního způsobu spalování uhlí, doplněné klasickými popílků.



1 Současný stav výroby pórobetonu v ČR a ve světě

V současné době najdeme v České republice celkem 6 provozoven na výrobu pórobetonových výrobků. Největší zastoupení na českém trhu má společnost Xella CZ s.r.o. se svými výrobky značky YTONG – pískové pórobetony, vyráběnými ve 3 provozovnách: Hrušovany u Brna, Chlumčany a Horní Počaply. Roční objem stavebního materiálu YTONG v ČR dosahuje téměř 1 mil. m³. Společnost H+H Česká republika s.r.o. se sídlem v Mostě-Kopistech produkuje výrobky z popílkového pórobetonu nazvané jako H+H CLASSIC. Po výměně výrobní linky vyrábí od roku 2007 také pórobetony na bázi písku, s označením H+H EXCLUSIVE. Další společnosti na českém trhu produkují výrobky z popílkového pórobetonu a jsou to: PÓROBETON Ostrava a.s. se sídlem v Ostravě-Třebovicích, PORFIX CZ a.s. se sídlem v Trutnově-Poříčí. [1]

V roce 1988 byla založena Evropská asociace pórobetonu (EAACA) na podporu zájmů výrobců autoklávovaného pórobetonu, ve které figuruje i Česká republika. V současné době sdružuje více než 100 výrobních závodů v 18 zemích Evropy. Celkový objem výroby pórobetonu v členských státech EAACA činil v roce 2009 15,9 mil. m³, celosvětově to bylo cca. 40 mil. m³. Podíl jednotlivých států EAACA na produkci pórobetonu uvádím na Obr. 1.



Obr. 1: Produkce pórobetonu v zemích EAACA za rok 2009 (v m³) [2]

Z Obr. 1 je patrné, že největším výrobcem pórobetonu v Evropě je v současné době Polsko, jehož objem výroby pórobetonu byl v roce 2010 4,3 mil. m³, což je téměř 30 % celkové evropské produkce a 10 % produkce světové. [2]

1.1 Technologie výroby pórobetonu

V této kapitole uvádím základní princip výroby pórobetonu, definuji podmínky pro autoklávování a shrnuji současně používané technologie výroby, s kterými se lze setkat na území ČR a ve světě.

1.1.1 Technologie výroby – obecně

Při výrobě pórobetonu se postupuje tak, že křemičité látky se podle druhu technologie samostatně nebo i společně velmi jemně melou, mísí a homogenizují s páleným vápnem, nebo i s cementem a event. s dalšími přísadami. Potom se surovinová směs rozmísí obyčejně ve speciálních míchačkách s vodou, přerostovým kalem a plynotvornou látkou na tekutou kaši. Ta se potom vylije do forem, v nichž proběhne nejprve vlastní nakypření – kynutí a potom zatuhnutí. Zde hovoříme o *zrání hmoty*. Povrch směsi ve formách se potom zarovná seříznutím přerostu a je-li to potřeba, zatuhlá hmota se rozřeže na potřebné tvary, načež se autoklávuje. Autoklávování je podle druhu technologie prováděno buď přímo ve formách, lamelách anebo dnes moderně na rošttech, podložkách či bočnicích. Po ukončení procesu autoklávování jsou výrobky vyvezeny z autoklávu a ponechány několik hodin k proschnutí. V poslední fázi se pórobetonové výrobky zabalí, čímž jsou připraveny k expedici zákazníkům. [1]

1.1.2 Současné technologie v ČR

Technologií na výrobu pórobetonu je v současné době více, avšak v ČR se používají pouze technologie SOLBET a CALSILOX. Závody s technologií UNIPOL, SIPOREX, HEBEL a YTONG v ČR nenalezneme. Výrobní závody s uvedenými technologiemi jsou dnes postaveny po celém světě. [1]

Technologie SOLBET

V posledním desetiletí bylo postaveno 15 nových výrobních linek na řezání pórobetonových bloků pro výroby v Polsku, Slovensku, Rusku, Rumunsku a ČR (výrobní závody v Ostravě - Třebovicích a Trutnově - Poříčí). Výrobní linky postupně nahrazují závody s technologií UNIPOL. K míchání směsi se používá stacionární míchačka. Kráječka je dvoudílná se stahováním bočnic formy. Pórobetonový blok se před řezáním překlopí na podélnou stranu, řezání tedy probíhá nastojato, což umožňuje tvarově přesné výroky s přesností $\pm 1,0 - 1,5$ mm. [3]

Technologie CALSILOX

V 70. letech 20. století byly v ČR postaveny licenční závody holandské technologie CALSILOX. Základní suroviny u této technologie jsou cement, vápno a písek nebo popílek. Pokud je písek dovážen ve vlhkém stavu, je potřeba ho vysušit. Následně se provede společné suché mletí vápna, písku a cementu. Z pomocných surovin je možné přidat sádku, hliník a anhydrit. Takto připravená směs putuje do stabilní míchačky, ve které je přerostová voda. Dále přidáváme teplou vodu a jako poslední hliníkový prášek, zastávající funkci plynotvorné přísady. Po promíchání se vzniklá směs nalije do připravené formy pod míchačkou, následně tato forma putuje na zrací pole, kde cca. 3 hodiny tuhne. Po získání manipulační pevnosti se forma otevře a vyztužený blok se přenesne na rošt pomocí speciálního

jeřábu. Na roštu probíhá nejprve příčné krájení ocelovými dráty, poté následuje podélné krájení protlačením pórobetonového kvádrů přes ocelové dráty, čímž zároveň odstraníme kraje kvádrů. Na závěr se odstraní přerost, který se dále použije ve výrobě při procesu míchání. Rozkrájený pórobetonový blok se stohuje na roštech a putuje do autoklávu. V autoklávu proběhne hydrotermální reakce, pórobetonový blok zatvrdne a získá potřebnou pevnost. Po výjezdu z autoklávu se výrobky nechají odležet. Na závěr jsou ukládány na palety, baleny do fólií a připraveny k expedici. **Výrobní:** V současné době jsou technologií CALSILOX v ČR zhotovovány výrobky značky YTONG, vyrobené v provozovnách: Hrušovany u Brna, Chlumčany a Horní Počaply (dříve popílkový, dnes pískový pórobeton s mokřým mletím). [1] Tato technologie se od výrobců zařízení již jako systém nedodává. [3]

1.2 Suroviny pro výrobu pórobetonů

Důležitým faktorem pro vlastnosti vyráběných pórobetonů je vhodný výběr vstupních surovin. Pro výrobu pórobetonů se používají 4 základní suroviny, ke kterým se přidává voda. Jedná se o **maltoviny**, přesněji vápno a cement, které nám určují druh pórobetonu. Dále to jsou **křemičité látky**, jejichž jakost je velmi významná při autoklávování. V současnosti se z křemičitých látek používá převážně písek, to hovoříme o tzv. bílém pórobetonu, a méně často popílek, to mluvíme naopak o šedém pórobetonu. K nakypření směsi nám slouží **plynotvorné látky**, používané ve formě hliníkového prášku nebo hliníkové pasty. Jako poslední skupinou surovin pro výrobu pórobetonu jsou **suroviny pomocné**, které nám usnadňují technologický proces výroby, popř. zlepšují některé vlastnosti výrobků. Především se používají látky regulující hašení vápna případně průběh tuhnutí maltovin, látky zabraňující sedimentaci, stabilizující strukturu pórobetonu a další. [1]

1.2.1 Pálené vápno

Pálené vápno, chemickým vzorcem CaO, je hlavní maltovinou pro výrobu pórobetonů. Používá se čisté vápno, vzdušné, čerstvé a nehašené. Důvody pro jeho použití jsou následující:

- 1) vápno reaguje s hliníkovým práškem za tvorby vodíku, což je zřejmé z následujícího popisu chemické reakce nakypřování:



- 2) použití nehašeného vápna nám umožňuje využít jeho hydratační teplo pro technologický proces
- 3) z hydrotermálních reakcí vyplývá, že vápno vstupuje jako základní složka do reakce při autoklávování
- 4) vápno snižuje sedimentaci směsi

Kvalita vápna pro výrobu pórobetonů je určena technickou normou ČSN EN 459-1 Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Požadavky na vápno jsou velmi přísné. Je to z toho důvodu, že nedostatečná a kolísavá jakost vápna je jedna z největších potíží při výrobě autoklávovaných pórobetonů.

Vápno pro výrobu pórobetonů má splňovat následující požadavky:

- a) musí mít **stejnorodé chemické a mineralogické složení** a musí být vyráběno z jednoho druhu vápence
- b) musí být **měkce až středně tvrdě pálené**, nesmí obsahovat přepal, který by způsoboval trhlinkovitění a postupné rozpadávání výrobků
- c) má být dostatečně vydatné a jeho obsah nerozhasitelných součástí nemá být větší než 12 %
- d) **obsah celkového CaO** (alkalita páleného vápna) musí být **min. 90 %** (ve vyžíhaném stavu), co nejvíce ho má být ve volném aktivním stavu
- e) obsah oxidu hořečnatého (MgO) nesmí být větší než 3 %
- f) obsah siřičkové síry nesmí být větší než 0,2 %
- g) **ztráta žíháním se má pohybovat v rozmezí 3 - 6 %**, z toho obsah H₂O nesmí být větší než 3 % (tomu odpovídá obsah Ca(OH)₂ max. 12,3 %) a obsah CO₂ nesmí být větší než 5 % (tomu odpovídá obsah CaCO₃ max. 11,4 %)
- h) rychlost a teplota hašení musí být minimálně 60 °C a v mezích 4 - 12 min.

Vápenný hydrát se nepoužívá jako maltovina pro výrobu autoklávovaných pórobetonů samostatně, pouze jako *přísada k cementu zvyšující alkalitu směsi* a tím zvětšující účinek plynotvorných látek a současně jako přísada zmenšující nebezpečí sedimentace ostatních složek. [1]

1.2.2 Cement

Cement je hydraulické pojivo, pálené nad mez slinutí tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou v důsledku hydratačních reakcí a procesů tuhne a tvrdne a po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost jak na vzduchu, tak i ve vodě. Základní důvod používání cementu pro autoklávované pórobetony je získání manipulačních pevností, důležitých pro manipulaci s pórobetonovým blokem ve výrobních závodech. Cement musí vyhovět požadavkům normy ČSN EN 197-1 Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Podle této normy jsou cementy rozděleny do pěti skupin - portlandský cement, portlandský cement směsný, vysokopecní cement, pucolánový cement a směsný cement. Pro autoklávované pórobetony se používá výhradně *portlandský cement*, označovaný jako CEM I. Dalším kritériem pro výběr cementu do pórobetonu je třída normalizované pevnosti. V současnosti se u nás vyrábějí cementy tří pevnostních tříd - 32,5, 42,5 a 52,5. Číslo udává pevnost příslušného cementu v tlaku po 28 dnech hydratace vyjádřené v MPa. Má-li cement vyšší počáteční pevnosti, připojuje se ještě za označení třídy písmeno *R* (Rapid). Většinou do pórobetonů používáme cement s pevnostní třídou 42,5 R.

Příčinou neúspěchů některých cementů bývá účinek nedopalu ještě v kombinaci s nevhodnou hydraulickou přísadou. Nedopal je označení pro obsah volného vápna (CaO) v cementu a nesmí ho být nikdy více jak 2 %. Jemnost cementu není rozhodující, protože však hydrotermální reakce u jemnějších cementů probíhají daleko rychleji, doporučuje se někdy pro snazší dosažení větších pevností společné mletí cementu s pískem, jako se to provádí u technologie Calsilox. Z chemických požadavků na cementy používané pro výrobu autoklávovaných pórobetonů je důležitý obsah určitého množství alkálií v rozpustné formě, a to cca 0,8 až 1,0 % K₂O a 0,2 až 0,5 % Na₂O, které jsou nutné pro vznik dostatečné alkality

potřebné pro dokonalý vývoj plynu z hliníkového prášku. V neposlední řadě je nutné, aby složení cementu určeného pro výrobu pórobetonu bylo konstantní, jinak by přídavek různých regulujících látek ovlivnil snahu výrobců vyrábět pórobeton rovnoměrné jakosti. [1]

1.2.3 Křemičitý písek

Křemičitý písek zastává v pórobetonu funkci plniva a pro výrobu autoklávovaných pórobetonů může být různého původu. V ČR se používají převážně písky váte nebo písky odpadající při plavení kaolinu.

Křemičitý písek má pro použití do autoklávovaných pórobetonů splňovat 3 základní podmínky:

- 1) písek musí být čistý s obsahem SiO_2 větším než 90 %
- 2) obsah alkálií $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ve formě slídy a živců smí činit nejvýše 1,5 % (dle normy ČSN 73 1358-1 má být obsah ve vodě rozpustného Na_2O max. 0,2%, jinak obsah slídy nemá překročit 0,5 %) - při vyšších množstvích nastává sklon k výkvětům
- 3) maximální jílovitost písku se požaduje 3 %, již množství jílu větší než 1,5 % má za následek zpomalení zatuhávání směsí a snížení pevnosti pórobetonu

Podstatný význam má jemnost písku. Písek je třeba ve výrobě domílat, abychom zvětšili jeho specifický povrch (minimálně na $200 \text{ m}^2/\text{kg}$), čímž se zintenzivní hydrotermální reakce. Jemně mletý písek snižuje nebezpečí sedimentace surovinových kalů a ještě nezatuhlé pórobetonové směsi. [1]

1.2.4 Popílky

Dnešní doba zaznamenává zvýšené úsilí o recyklaci materiálů a důsledné využívání druhotných surovin za účelem snížení ekologické zátěže a dosažení ekonomických a energetických úspor. Hlavní pozornost je věnována velkoobjemově produkovaným odpadům, mezi které se řadí i popílky, jakožto produkt vznikající v tepelných elektrárnách při spalování uhlí. [4]

Druhou variantou křemičité látky do pórobetonu může být tedy popílek. Pro výrobu autoklávovaných pórobetonů je důležité, že SiO_2 v popílcích je daleko reaktivnější než u křemičitého písku. Popílky díky své pórovité struktuře a nízké měrné hmotnosti dávají při výrobě pórobetonu za jinak stejných podmínek nižší objemovou hmotnost výrobků než při použití písku. [1]

Úletový popílek z klasického způsobu spalování

Popílky z „klasického“ způsobu spalování uhlí při teplotách cca 1400 až 1600 °C se vyznačují obsahem hlavně β - křemene a mullitu ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$). Jedná se o jemnozrný prach, který se skládá převážně z roztavených skelných částic nepravidelného kulovitého tvaru s hladkým povrchem. Sklovitá fáze, jejíž množství činí zpravidla 50 %, ovlivňuje zásadním způsobem reaktivitu popílků s CaO nebo cementem jak za normální, tak zvýšené teploty (autoklávování).

Popílek sám o sobě není hydraulický, to je není schopen reagovat s vodou. Je-li však mísen s hydroxidem vápenatým - např. z cementu - reaguje a vytváří stejné produkty jako při reakci cementu s vodou. Tato reakce se liší dle typu a druhu popílku a je označována jako pucolanita. [5]

Popílek z klasického způsobu spalování uhlí má ve stavebnictví široké použití jako složka do maltovin, betonů, cementů, pórobetonů, cihlářských výrobků, pro inženýrské stavby a dále např. jako umělé spékané kamenivo, umělé kamenivo vyráběné za studena atd.

Úletový popílek z fluidního způsobu spalování

Mleté palivo s přísadou vápence příp. dolomitu se spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě cca 850 °C. V těchto zmodernizovaných provozech vznikají pevné odpady v podobě ložového popela a popílků z elektrofiltrů (odlučovačů). Výsledným produktem je pak směs popela z původního paliva, nezreagovaného odsiřovacího činidla (CaO s případnými zbytky CaCO₃), síranu vápenatého, produktů reakce popelovin s CaO a nespáleného paliva. Vzhledem k tomu, že teploty spalování jsou při fluidních procesech nižší než při klasickém spalování, je nezreagovaný CaO přítomen ve formě tzv. měkce páleného vápna a je tedy reaktivní. Pro fluidní popílků je charakteristický nízký obsah taveniny. V důsledku transportu kouřových plynů z prostoru ohniště dochází k separaci jednotlivých frakcí této směsi, jemné podíly jsou odnášeny spalinami ve formě úletu a hrubší zůstávají ve spalovacím prostoru. Rozeznáváme tedy popílků dvojího druhu: popílek z prostoru ohniště (ložový) a popílek získaný z úletu (cyklonový, filtrový). Vlastnosti obou těchto popílků se výrazně liší jak ve fyzikálních vlastnostech (granulometrie, měrný povrch, hustota, sypaná hmotnost), tak v chemickém a mineralogickém složení, i když pocházejí z téhož technologického procesu fluidního spalování. Přehled požadovaných vlastností uvádí norma ČSN P 72 2081-1 až 16 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely.

Popílek z fluidního způsobu spalování může být ve stavebnictví použit do konstrukčních výplní, ke stabilizaci podloží, do maltovin, cementů, pórobetonu, vibrovaných a vibrolisovaných výrobků, jako umělé kamenivo, k solidifikaci nebezpečných odpadů atd. [3]

1.2.5 Hliníkový prášek

Jako plynotvorná látka se při výrobě pórobetonu používá hliník buď ve formě prášku nebo pasty. Na 1 m³ pórobetonu se používá obvykle 0,25 až 0,5 kg hliníku. Zvětšování přídatku hliníkového prášku pro pórobetonové záměsi zmenšuje za jinak běžných podmínek objemovou hmotnost a pevnost výrobků. Princip nakypření pórobetonové směsi spočívá v uvolňování vodíku při reakci hliníku s alkalickým prostředím. Vznik vodíku je popsán rovnicí:



Mezi základní požadavky na použití hliníkového prášku jako plynotvornou přísadu patří obsah aktivního hliníku, který má být nejméně 94 % a nemá kolísat o více než 1 %. Pro urychlení vývoje plynu je rozhodující jemnost hliníku. Hliník musí být velmi jemný se specifickým povrchem 700 až 1200 m²/kg. Hliníkový prášek nesmí obsahovat spleené hrudky nebo kulovitá zrna, mající relativně malý reaktivní povrch, což by vedlo k nedokonalé reakci a nerovnoměrné struktuře pórobetonu.

Jemný hliníkový prášek se velmi snadno oxiduje. Proto, aby se při výrobě jakož i dopravě a skladování zabránilo samovznícení hliníkového prášku nebo i výbuchu, je při jeho velmi jemném mletí běžně přidáván minerální olej nebo jiné tuky těkavé do 200 °C. Obsah tuku nemá překročit 1,3 %, aby nenastávaly potíže při odmašťování

a pozdnímu vývinu plynu. V současnosti se výrobou hliníkových prášků a past zabývá firma ALBO SCHLENK s.r.o., Bojkovice a do výroben pórobetonu je dodáván hliníkový prášek se skoro nulovým obsahem tuku. [1]

1.2.6 Pomocné suroviny

Pomocné suroviny přidáváme v nepatrném množství za účelem usnadnění technologického procesu výroby a zlepšení některých vlastností výrobků.

V současnosti můžeme použít tyto:

- **energósádrovec** - používá se jako přísada zlepšující pevnost výrobků a regulující tuhnutí směsi, sádrovec jako elektrolyt podporuje vznik tixotropní struktury
- **sádra, anhydrit** - používá se k regulaci časového průběhu tuhnutí autoklávovaných plynobetonů, důležitá je jemnost mletí sádry, která nám ovlivňuje jakost pórobetonu
- **hydrxid sodný** - přídavek NaOH zvyšuje alkalitu záměsi potřebnou pro plné využití hliníkového prášku, zkracuje nám tuhnutí cementu
- **chlorid vápenatý** - přidává se k urychlení zatvrdnutí směsi
- **mazlavé mýdlo** - používá se k odmašťování hliníkového prášku
- **krystalizační zárodky** - doporučují se používat pro zvýšení pevnosti autoklávovaných pórobetonů a zkrácení doby autoklávování
- **přerostový kal** - jeho výhoda spočívá v tom, že už má v sobě některé minerály, které nám pomáhají narůstat strukturu pórobetonu [1]

1.2.7 Voda

Voda používaná při výrobě pórobetonů má vyhovovat betonářské normě pro záměsovou vodu. Nejlépe je používat vodu pitnou, která má přibližně neutrální reakci a nízký obsah chloridů, které by jinak zvyšovaly nebezpečí koroze u armovaných dílců. Voda se používá zpravidla ohřátá na 35 až 59 °C. Rozšířené je používání kondenzátů z autoklávu, doplněné pitnou vodou z vodovodního řádu. V praxi se může používat také povrchová voda z vodních toků, což vede ke snížení nákladů na pitnou vodu. [1]

1.3 Vlastnosti výsledného materiálu

Snaha výrobců pórobetonu je zejména taková, vyrobit materiál s co nejvyšší pevností v tlaku a zároveň s co nejnižší objemovou hmotností, která je zárukou dostatku vzduchových pórů, a tedy dobrých izolačních vlastností. Pro jakost a použitelnost pórobetonů v praxi jsou tedy rozhodující dvě hlavní veličiny: pevnost v tlaku (třída P2, P4, P6 udává **minimální pevnost v tlaku** v N.mm⁻²) a objemová hmotnost (konkrétně **maximální objemová hmotnost**, která nesmí být překročena - obvykle 300 až 700 kg.m⁻³). Například označení P2-400 znamená minimální pevnost v tlaku 2 N.mm⁻² (MPa) a maximální objemová hmotnost 400 kg.m⁻³. [6]

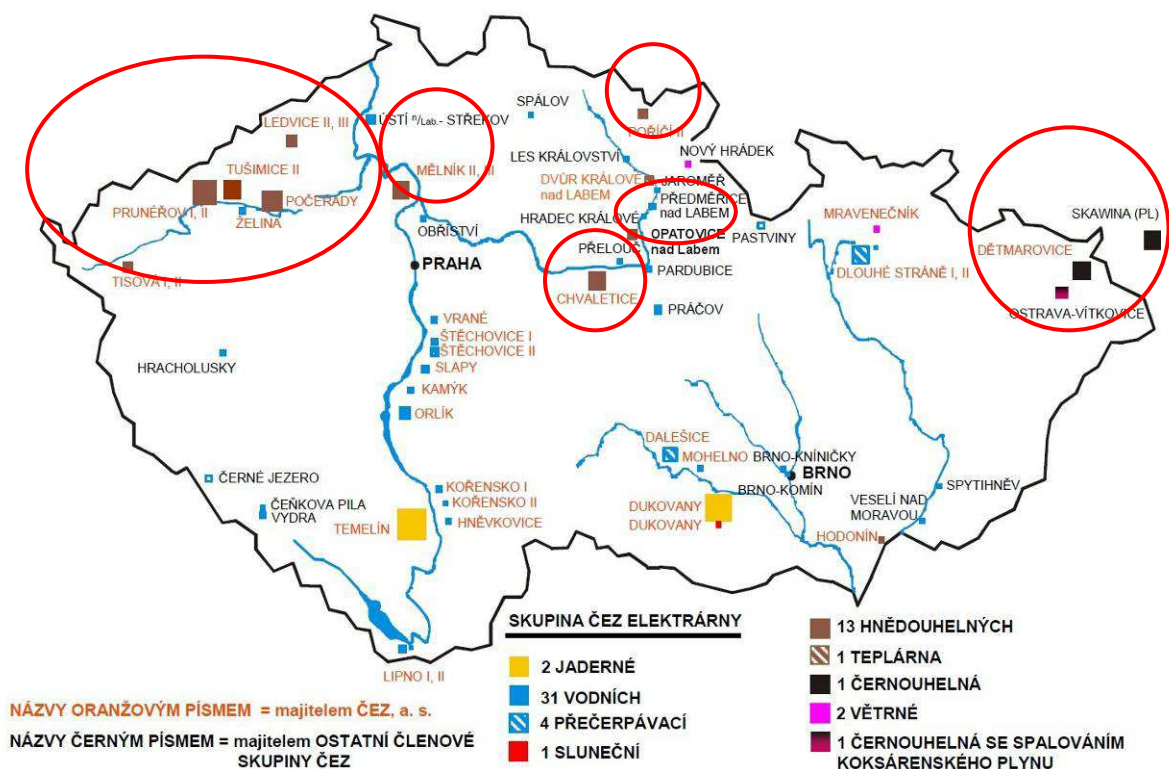
Mezi další požadavky na vlastnosti lehkých stavebních látek považujeme dále velkou tepelnou izolačnost související s nízkou objemovou hmotností, co nejnižší navlhavost a trvalý obsah vlhkosti, co největší objemovou stálost, maximální trvanlivost, tj. odolnost proti působení atmosférických, chemických, tepelných a biologických vlivů, maximální stálost a stejnoměrnou kvalitu výrobků. [1]

2 Optimalizace technologie výroby popílkového pórobetonu

Vzhledem k rostoucímu průmyslu, se každým rokem produkuje obrovské množství vedlejších energetických produktů, což vede ke stále vyšším požadavkům na jejich maximální využitelnost. Použití alternativní suroviny přináší pro celou společnost významný ekonomický a ekologický efekt. Pro pórobeton našly uplatnění zejména popílků z tepelných elektráren, používané jako náhrada křemičitého písku. Tyto, tzv. popílkové pórobetonu sice v západních státech Evropy ustupují do pozadí, nicméně v ČR převládá snaha u využívání této vhodné suroviny pro výrobu pórobetonu.

2.1 Zdroje sledovaných popílků

Pro posouzení vhodnosti popílků jako křemičité složky autoklávovaných pórobetonů jsem se rozhodl porovnat chemické a fyzikální vlastnosti popílků z tuzemských uhelných elektráren. Pro doplnění jsem uvedl popílek ze spalování černého uhlí v polské elektrárně Skawina. Jak je patrné z Obr. 2, snahou bylo porovnávat popílků z lokalit napříč celou republikou.

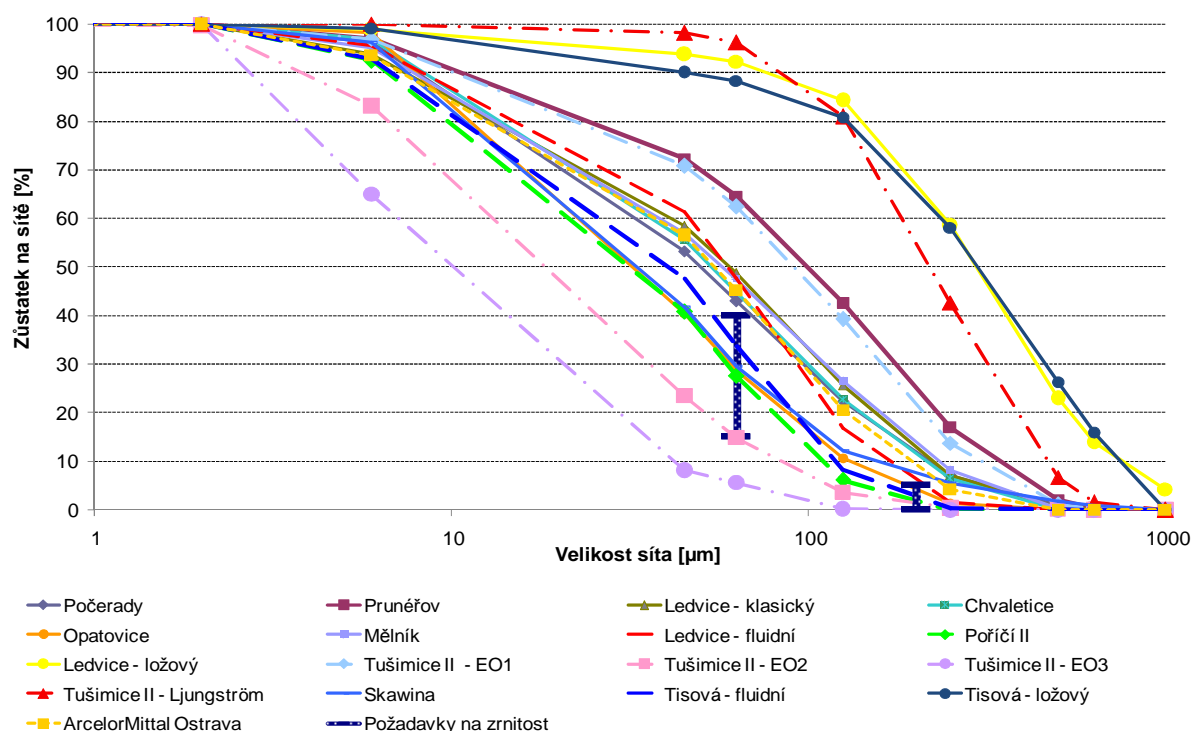


Obr. 2: Zdroje sledovaných popílků [7]

2.2 Parametry sledovaných popílků

2.2.1 Granulometrie

Na Obr. 3 zachycují granulometrii jednotlivých popílků, konkrétně zůstatek na jednotlivých sítích. Jemnost (granulometrie) hodnocených vzorků byla stanovena metodou měření velikosti částic laserem. Tato metoda je založena na interakci měřených částic s laserovým paprskem. Jak je z obrázku patrné, sledované popílký jsou ve většině případech hrubší, než předepisují požadavky společnosti PORFIX CZ a.s., pro kterou byly tyto parametry ověřovány. [10] Příliš hrubý popílek způsobuje prodloužení počátku tuhnutí odlevu a na hotovém výrobku se projeví ve zhoršení fyzikálně - chemických vlastností. Řešením, jak docílit požadovanou jemnost popílku, je mletí jeho většího množství.

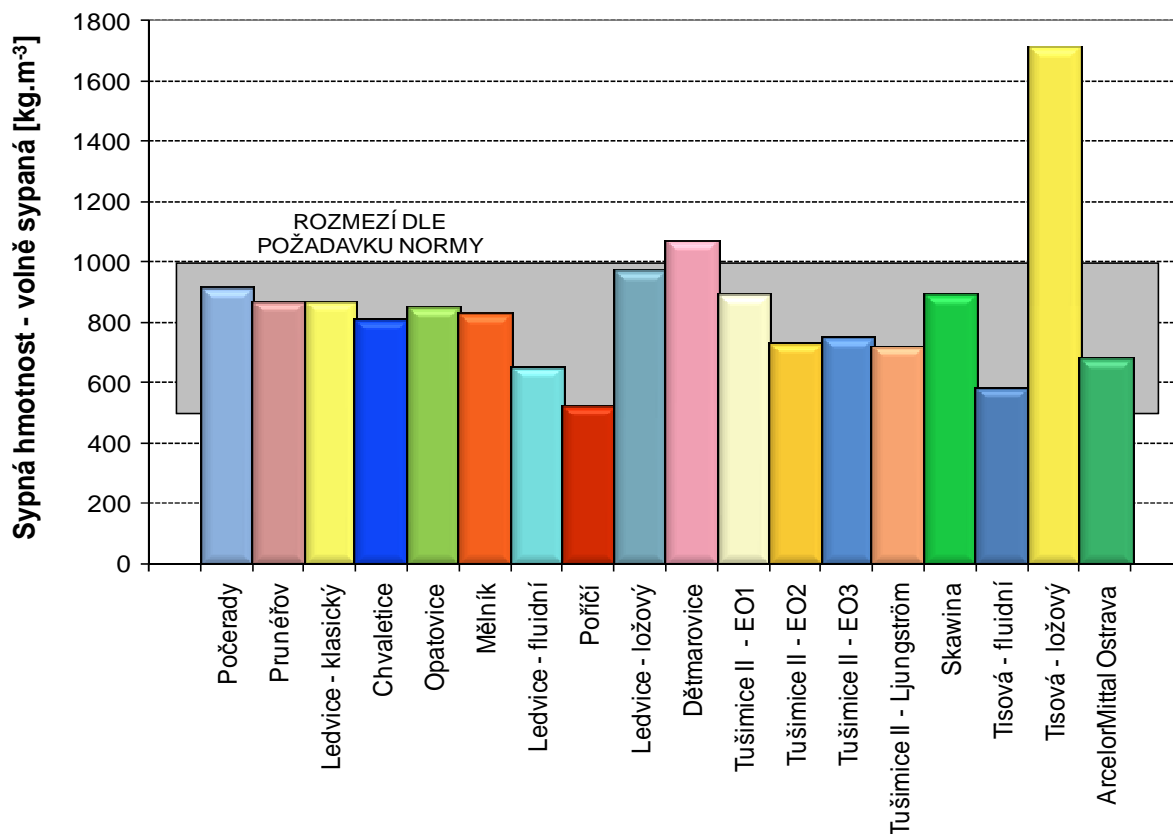


Obr. 3: Granulometrie sledovaných popílků

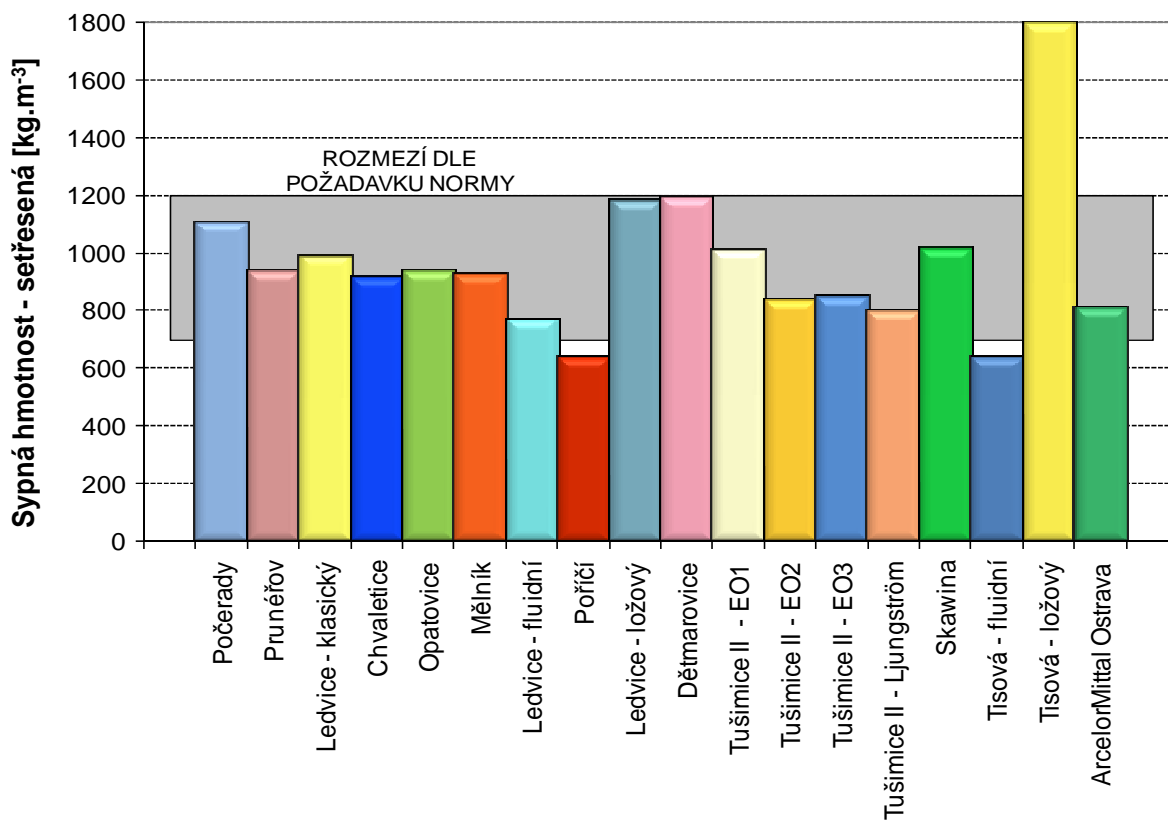
2.2.2 Sypná hmotnost

Další fyzikální zkouškou sledovanou u popílků je **stanovení sypné hmotnosti** ve stavu volně sypaném a setřeseném. Jejich výsledky jsou uvedeny na následujících obrázcích. Sypná hmotnost musí odpovídat požadavkům normy ČSN 72 2072-5 pro klasické popílký a ČSN P 72 2081-4 pro fluidní popílký. [8], [9]

Z výsledných hodnot sypných hmotností vyplývá, že fluidní popílký vykazují oproti klasickým popílkům nižší sypné hmotnosti. Jedná se o výsledek neuspořádané struktury zrn fluidních popílků. Z fluidních popílků neodpovídají požadavkům normy na minimální sypnou hmotnost setřesenou 700 kg.m^{-3} vzorky z elektráren Poříčí a Tisová. I když ložové a úletové popílký z elektrárny Tisová pocházejí z téhož technologického procesu fluidního spalování, je patrný rozdíl ve fyzikálních vlastnostech, chemickém a mineralogickém složení těchto popílků.



Obr. 4: Sypná hmotnost (volně sypaná) sledovaných popílků

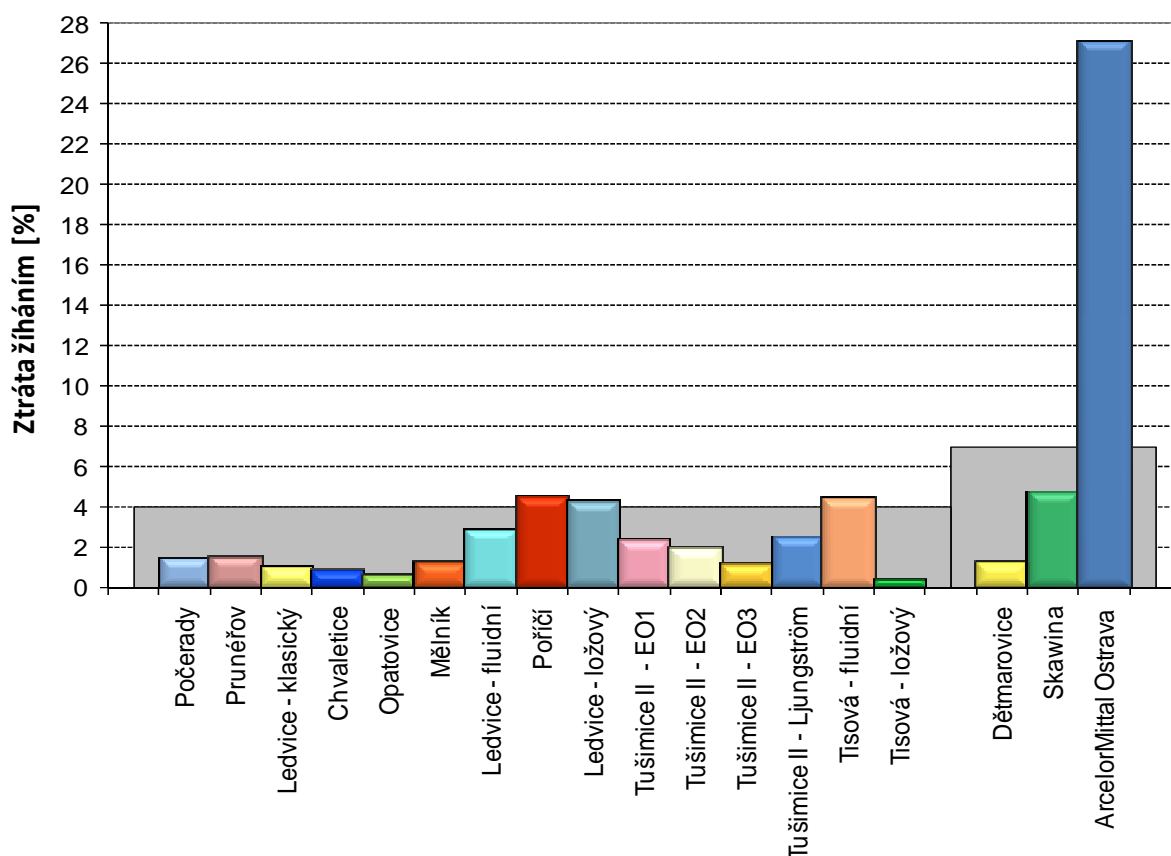


Obr. 5: Sypná hmotnost (setřesená) sledovaných popílků

2.2.3 Ztráta žíháním

Mezi důležité fyzikálně - chemické zkoušky patří **ztráta žíháním**. Příliš velký obsah neshořelého uhlíku v popílku způsobuje jeho zvýšenou nasákavost, což má za následek zvýšení množství vody na dosažení požadované konzistence odlevu. Tato voda je v dalších fázích technologického procesu nepotřebná. [10]

Normy ČSN 72 2072-5 a ČSN P 72 2081-4 stanovují maximální hodnotu ztrátu žíháním pro klasické i fluidní hnědouhelné popílků shodně 4 %. U klasických popílků získaných spalováním černého uhlí připouští norma maximální hodnotu ztráty žíháním 7 %. Z Obr. 6 je zřejmé, že popílek z teplárny ArcelorMittal Ostrava a.s. obsahuje příliš velký obsah neshořelého uhlíku, tím pádem je nevyhovující pro použití do autoklávovaných pórobetonů.



Obr. 6: Ztráta žíháním sledovaných popílků

2.3 Program pro mísení popílků do popílkového pórobetonu

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření účinného nástroje pro optimalizaci technologie výroby popílkových pórobetonů. Jako podklad k vytvoření mi posloužily výsledky laboratorních měření prováděné ústavem THD VUT FAST, ze kterých jsem čerpal naměřené charakteristiky jednotlivých popílků. Dalším krokem mé práce bylo vytvoření programu v aplikaci Microsoft Excel, který pracuje se zadanými údaji. Jak je možno vidět z Obr. 7, v současné době disponuje program osmnácti druhy popílků. Jsou zde zastoupeny popílků hnědouhelná i černouhelné, získávané z klasického i fluidního spalování uhlí.

	Chemické složení [%]						Zbytek na síti [%]			Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]			
	zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná		setřesená	
	max	min	max	max	max	max	max	max	min	max	min	max	
	7	40	10	18	3,5	2	1,5	5	15 - 40	500 - 1000	700 - 1200		
Počerady	1,49	42,89	2,89	10,64	1,25	0,05	0,27	10,97	42,95	910	1110		
Pruněfov	1,55	39,46	3,66	29,29	1,54	0,09	0,41	24,74	64,48	870	940		
Ledvice - klasický	1,06	44,00	1,90	11,09	1,12	0,00	0,30	11,78	48,84	870	990		
Chvaletice	0,84	50,16	2,51	13,08	1,46	0,38	0,35	10,61	44,80	810	920		
Opatovice	0,64	46,40	2,10	12,35	1,11	0,00	0,34	3,23	28,73	850	940		
Mělník	1,21	53,71	2,08	6,00	1,28	0,27	0,28	13,14	47,54	830	930		
Ledvice - fluidní	2,89	43,97	9,10	8,91	1,42	1,25	0,36	4,25	47,65	650	770		
Poříčí	4,04	39,12	19,41	5,63	1,08	7,24	0,34	0,55	27,58	520	640		
Ledvice - ložový	4,32	33,16	28,75	6,12	1,14	6,65	0,20	67,71	92,31	970	1210		
Dětmarovice	1,26	43,95	5,30	13,59	2,52	0,00	0,590	1,88	30,22	1070	1190		
Tušimice II - EO1	2,39	50,00	3,42	14,50	1,72	0,26	0,29	25,95	64,43	910	1010		
Tušimice II - EO2	1,97	48,30	3,70	34,75	1,85	0,50	0,447	0,07	13,77	730	840		
Tušimice II - EO3	1,15	43,02	3,80	20,90	0,17	0,63	0,25	0,00	5,57	750	850		
Tušimice II - Ljungström	2,51	56,40	4,30	27,85	1,96	0,90	0,600	44,69	96,10	720	800		
Skawina	4,72	57,80	3,80	13,73	3,10	1,40	2,10	6,85	29,66	890	1020		
Tisová - fluidní	4,44	32,64	21,08	11,05	1,07	4,09	0,690	0,00	25,96	580	640		
Tisová - ložový	0,44	34,05	22,55	8,89	1,01	7,18	0,38	67,12	88,35	1710	1800		
Arcelormittal Ostrava	27,12	42,80	5,50	20,28	2,24	1,50	0,60	7,90	45,33	680	810		

Obr. 7: Souhrn sledovaných popílků a jejich parametrů

Program nabízí uživateli možnost spravovat požadavky na vlastnosti popílků. Může se držet jednak normy nebo využít výrobních zkušeností a pracovat s vlastními požadavky. Každá taková změna se ihned projeví na zbarvení příslušných buněk a uživatel vidí, které popílků nevyhovují určenému požadavku.

	Chemické složení [%]				
	zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO
	max	min	max	max	max
	7	40	10	18	3,5
Opatovice	0,64	38 39 40 41 42 43 44 45	2,10	12,35	1,11
Mělník	1,21		2,08	6,00	1,28
Ledvice - fluidní	2,89		9,10	8,91	1,42
Poříčí	4,04	39,12	19,41	5,63	1,08
Ledvice - ložový	4,32	33,16	28,75	6,12	1,14

Obr. 8: Manipulace s požadavky na chemické složení

V další fázi procesu si uživatel vybere ty popílků, se kterými má zájem dále pracovat. Pro účely optimalizace složení surovinové směsi jsem jako základní surovinu uvažoval zástupce z řad fluidních popílků, jehož maximální využití je jedním z hlavních principů optimalizace složení surovinové směsi. Jako korigující suroviny jsem vybral popílků z klasického způsobu spalování.

		Chemické složení [%]							Zbytek na síti [%]		Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	
		zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná	setřesená
Základní surovina	Fluidní popílek	4,48	39,12	19,41	5,63	1,08	7,05	0,34	0,55	27,58	520	640
Korigující suroviny	Klasický popílek 1	0,64	46,40	2,10	12,35	1,11	0,00	0,34	3,23	28,73	850	940
	Klasický popílek 2	0,84	50,16	2,51	13,08	1,46	0,07	0,35	10,61	44,80	810	920

Obr. 9: Výběr popílků pro mísení

Jednou z možností mísení popílků je použít dva popílky, v mém případě fluidní a klasický popílek. Pro hrubé stanovení optimální poměru mísení je dávkování popílků odstupňované po desítkách procent. Barevná odlišnost buněk na Obr. 10 nám pomáhá k vizuálnímu určení vhodného poměru mísení. Vyznačená oblast na obrázku ukazuje, že jako optimální poměr mísení dvou popílků je vhodné použít směs obsahující 1 – 30 % fluidních popílků.

Fluidní popílek	Klasický popílek 1	Chemické složení [%]							Zbytek na síti [%]		Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	
		zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná	setřesená
10%	90%	1,02	45,67	3,83	11,68	1,11	0,71	0,34	2,96	28,62	817	910
20%	80%	1,41	44,94	5,56	11,01	1,10	1,41	0,34	2,69	28,50	784	880
30%	70%	1,79	44,22	7,29	10,33	1,10	2,12	0,34	2,43	28,39	751	850
40%	60%	2,18	43,49	9,02	9,66	1,10	2,82	0,34	2,16	28,27	718	820
50%	50%	2,56	42,76	10,76	8,99	1,10	3,53	0,34	1,89	28,16	685	790
60%	40%	2,94	42,03	12,49	8,32	1,09	4,23	0,34	1,62	28,04	652	760
70%	30%	3,33	41,30	14,22	7,65	1,09	4,94	0,34	1,35	27,93	619	730
80%	20%	3,71	40,58	15,95	6,97	1,09	5,64	0,34	1,09	27,81	586	700
90%	10%	4,10	39,85	17,68	6,30	1,08	6,35	0,34	0,82	27,70	553	670

Obr. 10: Mísení dvou popílků – hrubý stanovení

Pokud bychom chtěli stanovit přesný poměr mísení nebo přesnou hranici, po kterou by použití fluidních popílků splňovalo potřebné požadavky, využijeme tabulku z Obr. 11.

Fluidní popílek	Klasický popílek 1	Chemické složení [%]							Zbytek na síti [%]		Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	
		zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná	setřesená
28%	72%	1,72	44,36	6,95	10,47	1,10	1,97	0,34	2,48	28,41	758	856

Obr. 11: Mísení dvou popílků – přesné stanovení

V případě mísení dvou popílků se ukázalo, že můžeme použít až 28 % fluidního popílku. Použití fluidního popílku ve vyšší dávce by vedlo k odchýlení některých hodnot od stanovených požadavků.

V dalším způsobu stanovení optimálního poměru mísení jsem do programu zahrnul mísení tří popílků. Jako základní surovina je opět uvažován fluidní popílek, doplňován dvěma popílky klasickými. Postup určení vhodného poměru mísení je obdobný jako u mísení dvou popílků. Nejprve provedu vizuální zhodnocení a určím optimální procentuální podíl fluidního popílku ve směsi. Z Obr. 12 je patrné, že z hlediska splnění všech požadavků na popílky je vhodnější dávkovat fluidní popílek v dávce 20 % než v dávce 30 %. Jako další určím dávkování klasických popílků. Výsledný poměr mísení by tedy mohl být např. 20 % fluidního popílku a dávkování klasických popílků v poměru 70 % klasického popílku 1 a 30 % klasického popílku 2.

Fluidní popílek	Klasický popílek 1	Klasický popílek 2	Chemické složení [%]							Zbytek na síť [%]		Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	
			zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₂	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná	setřesená
20%	100%	0%	1,41	44,94	5,56	11,01	1,10	1,41	0,34	2,69	28,50	784	880
	90%	10%	1,42	45,24	5,59	11,06	1,13	1,42	0,34	3,28	29,79	781	878
	80%	20%	1,44	45,55	5,63	11,12	1,16	1,42	0,34	3,87	31,07	778	877
	70%	30%	1,46	45,85	5,66	11,18	1,19	1,43	0,34	4,47	32,36	774	875
	60%	40%	1,47	46,15	5,69	11,24	1,22	1,43	0,34	5,06	33,64	771	874
	50%	50%	1,49	46,45	5,73	11,30	1,24	1,44	0,34	5,65	34,93	768	872
	40%	60%	1,50	46,75	5,76	11,36	1,27	1,44	0,34	6,24	36,21	765	870
	30%	70%	1,52	47,05	5,79	11,41	1,30	1,45	0,35	6,83	37,50	762	869
	20%	80%	1,54	47,35	5,82	11,47	1,33	1,45	0,35	7,42	38,78	758	867
	10%	90%	1,55	47,65	5,86	11,53	1,36	1,46	0,35	8,01	40,07	755	866
	0%	100%	1,57	47,95	5,89	11,59	1,38	1,47	0,35	8,60	41,36	752	864

Fluidní popílek	Klasický popílek 1	Klasický popílek 2	Chemické složení [%]							Zbytek na síť [%]		Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	
			zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₂	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná	setřesená
30%	100%	0%	1,79	44,22	7,29	10,33	1,10	2,12	0,34	2,43	28,39	751	850
	90%	10%	1,81	44,48	7,32	10,39	1,13	2,12	0,34	2,94	29,51	748	849
	80%	20%	1,82	44,74	7,35	10,44	1,15	2,12	0,34	3,46	30,63	745	847
	70%	30%	1,83	45,01	7,38	10,49	1,17	2,13	0,34	3,98	31,76	743	846
	60%	40%	1,85	45,27	7,41	10,54	1,20	2,13	0,34	4,49	32,88	740	844
	50%	50%	1,86	45,53	7,44	10,59	1,22	2,14	0,34	5,01	34,01	737	843
	40%	60%	1,88	45,80	7,47	10,64	1,25	2,14	0,34	5,53	35,13	734	842
	30%	70%	1,89	46,06	7,49	10,69	1,27	2,15	0,34	6,04	36,26	731	840
	20%	80%	1,90	46,32	7,52	10,74	1,30	2,15	0,35	6,56	37,38	729	839
	10%	90%	1,92	46,58	7,55	10,79	1,32	2,16	0,35	7,08	38,51	726	837
	0%	100%	1,93	46,85	7,58	10,85	1,35	2,16	0,35	7,59	39,63	723	836

Obr. 12: Mísení tří popílků – hrubé stanovení

Přesné stanovení procentuálního zastoupení fluidních popílků můžeme dále upravovat v samostatné tabulce, jejíž podoba je vyobrazena na Obr. 13.

Fluidní popílek	Klasický popílek 1	Klasický popílek 2	Chemické složení [%]							Zbytek na síť [%]		Sypná hmotnost [kg.m ⁻³]	
			zž	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₂	Na ₂ O	200 μm	63 μm	volně sypaná	setřesená
28%	60%	40%	1,77	45,44	7,06	10,68	1,20	1,99	0,34	4,61	33,04	746	850

Obr. 13: Mísení tří popílků – přesné stanovení

Při hledání optimálního dávkování tří popílků jsem došel k závěru, že limitní hodnotou při mísení je použití fluidního popílku v množství 28 % z celkové náváčky popílku. Vyšší dávka by už znamenala změnu některé z vlastností a směs by nesplňovala dané požadavky v celé šíři.

Diskuze výsledků

Při sledování fyzikálně - chemických vlastností popílků se ukázalo, že ne všechny popílky splňují požadavky dané normami ČSN 72 2072-5 a ČSN P 72 2081-4, popř. požadavky výrobce popílkových pórobetonů. Největší problém byl s granulometrií, kdy byla převážná část popílků příliš hrubá a pro použití do pórobetonu je tedy nutná jejich úprava mletím. Samotný program nabízí vysokou variabilitu v zadávání a výběru námi zvolených popílků. Pro názornost práce s programem jsem vybral jako určující surovinu fluidní popílek, který byl doplněn jedním, popř. dvěma klasickými popílkem. Při mísení fluidního popílku s jedním klasickým se ukázalo, že požadovaných vlastností dosahují při použití nižší dávky fluidních popílků. Horní mezí bylo dávkování 28 % fluidních popílků. Další možností je příměs dalšího popílku jako možné korekce některých vlastností. V mém případě se příměs dalšího popílku do směsi příliš neprojevila, opět platilo to, co pro mísení dvou popílků. Pro optimální namixování jednotlivých popílků je vhodné použít nižší zastoupení fluidních popílků, optimálně v dávkování do 28 %.

Závěr

Byl vytvořen program, díky němuž je možno jednoduchými úkony zjistit optimální mísení až třech druhů popílků s ohledem na jejich maximální využití. Výsledky z tohoto programu jsou rychle použitelné přímo v technologii výroby autoklávovaného pórobetonu a jsou prakticky využitelné při řešení projektu MPO TIP FR-TI3/727 "Pokročilá technologie pórobetonu na bázi průmyslových odpadů pro energeticky úspornou výstavbu". V další fázi práce se zaměřím na ověření zjištěných závěrů v praxi, úpravou programu a metodiky dle zkušeností ze zkušebních odlevů. Důležitou součástí řešení bude i zohlednění variability vlastností dodávaných popílků a průběžná aktualizace vstupních parametrů.

Literatura

- [1] DROCHYTKA, Rostislav, Jaroslav VÝBORNÝ, Pavel KOŠATKA a Dimitrij PUME. Pórobeton. Brno: VUTIUM, 1999, 157 s. ISBN 80-214-1476-6.
- [2] *5th International AAC Conference: "Securing a sustainable future"* [online]. 2011, 22 s.[cit. 2012-01-28]. Dostupné z:
<http://www.aerconaac.com/TECHNCAL%20MANUAL%5Caacinternational.pdf>
- [3] DROCHYTKA, Rostislav, Karel KULÍSEK a Vít ČERNÝ. *Roční výzkumná zpráva o řešení projektu MPO TIP FR-T13/727: "Pokročilá technologie pórobetonu na bázi průmyslových odpadů pro energeticky úspornou výstavbu" v roce 2011.* Brno, 15.12.2011, 51 s. Zpráva číslo: 10 / 12 / 1731.
- [4] BRANDŠTETR, Jiří. Tuhé zbytky fluidního spalování uhlí jako efektivní pojivo. *ChemPoint: Vědci pro průmysl a praxi* [online]. 14. 04. 2011 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tuhe-zbytky-fluidniho-spalovani-uhli-jako-efektivni-pojivo>
- [5] BYDŽOVSKÝ, Jiří. *Vlastnosti a užití stavebních materiálů v Konstrukcích: Modul 01* [online]. Brno, 2007, 239 s. [cit. 2012-02-12].
- [6] VETENGL, Václav a Marek DUDÁK. Pórobeton – moderna, nebo tradice?. *IMateriály* [online]. 7. 9. 2009 [cit. 2012-01-29]. Dostupné z:
<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Porobeton-moderna-nebo-tradice.html>
- [7] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr.html> [cit. 2011-12-10].
- [8] ČSN 72 2072-5. *Popílek pro stavební účely - Část 5: Popílek pro výrobu pórobetonu.* Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [9] ČSN P 72 2081-4. *Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely - Část 4: Fluidní popel a fluidní popílek pro výrobu pórobetonu.* Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [10] SUCHÝ, Peter, Radek JANOVSÝ, Jiřina NAJMANOVÁ a Svetozár BALKOVIC. Použití fluidního popílku z elektrárny Ledvice. In: *X. odborná konference MALTOVINY 2011.* Brno, 2011, s. 95-102.