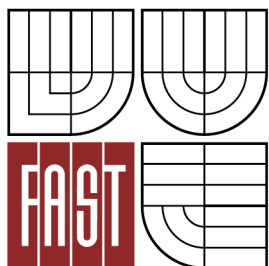




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

MOŽNOSTI ZLEPŠOVÁNÍ UŽITNÝCH VLASTNOSTÍ PÓROBETONU PRO NÍZKOENERGETICKÉ BUDOVOY

POSSIBILITIES OF CELLULAR CONCRETE UTILITY PROPERTIES IMPROVEMENT FOR LOW-
ENERGY BUILDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALENA NEUBAUEROVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL KULÍSEK, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Alena Neubauerová
Název	Možnosti zlepšování užitečných vlastností pórobetonu pro nízkoenergetické budovy
Vedoucí bakalářské práce	doc. Ing. Karel Kulísek, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Drochytka, R. : Lehké stavební látky, skriptum VUT FAST 1998

Drochytka, R. a kol. : PÓROBETON, VUTIUM 1999

ČSN 72 2072 -5 Popílek pro stavební účely – Část 5: Popílek pro výrobu pórobetonu, ČNI, 2000

ČSN P 72 2081-4 Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely – Část 4: Fluidní popel a fluidní popílek pro výrobu pórobetonu, ČNI, 2001

ČSN 73 1289 TERMINOLOGIE V OBORU PÓROBETONU, ČNI, 1993

ČSN 73 1350 Zkoušení pórobetonu, ÚNMZ, 2010

Příspěvky ze sborníků konferencí, Firemní literatura, Odborné články, časopisy

Zásady pro vypracování

Výroba pórobetonu a jeho užití ve stavebnictví má u nás padesátiletou tradici. Převážně je v současné době vyráběn pórobeton pískový i když tzv.šedý pórobeton je z důvodu možnosti zpracování klasických i fluidních popílků ekonomicky efektivnější i ekologicky šetrnější vůči životnímu prostředí.

Cílem bakalářské práce je analyzovat současný stav ve využívání vedlejších produktů z energetiky jako popílků a energosádrovců pro výrobu pórobetonu, posoudit vhodnost jejich vlastností z vybraných zdrojů pro tuto technologii výroby a možnosti jak vyššího rozšíření kapacit výroby popílkového pórobetonu tak opačně omezující faktory dalšího růstu výroby. Dalším cílem je vyhodnotit a srovnat fyzikální vlastnosti pískových a popílkových pórobetonů a posoudit jejich vhodnost pro aplikace v konstrukcích nízkoenergetických budov.

Teoretická část:

- Seznamte se s problematikou stávajících technologických systémů výroby pórobetonu u nás a ve světě.
- Zjistěte informace o vlastnostech surovin a pórobetonů a postupech jejich zkoušení.
- Seznamte se s problematikou nízkoenergetických domů z hlediska konstrukčních řešení a použitých materiálů.

Praktická část:

- Zpracujte poznatky o trendech výroby a užití pórobetonu v konstrukcích, o výhodách a nevýhodách technických a ekonomických.
- Posuďte stávající úroveň fyzikálních vlastností pórobetonu, zejména popílkového a porovnejte s požadavky na obvodové pláště nízkoenergetických budov.
- Navrhněte směry řešení pro zlepšení vlastností popílkového pórobetonu v energeticky úsporných konstrukcích budov.

Rozsah bakalářské práce cca 40 stran.

Předepsané přílohy

.....

doc. Ing. Karel Kulísek, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Pórobeton je moderní stavební materiál s výbornými tepelně – izolačními vlastnostmi s možností rychlé výstavby objektu. Při výrobě pórobetonu můžeme navíc využít i druhotných surovin, jako je elektrárenský popílek nebo energosádrovec a tím šetřit životní prostředí. V současnosti se snažíme o úsporu financí na vytápění domu, proto hledáme vhodné materiály, které by pokryly požadavky na nízkoenergetické bydlení.

Nízkoenergetické stavby budou v budoucnu ale také nedostačující. Už nyní je možností stavět pasivní a nulové domy, a proto je nutný pokrok ve zlepšování užitečných vlastností staviv, v našem případě pórobetonu.

Klíčová slova: pórobeton, nízkoenergetická stavba, vlastnosti pórobetonu, technologie výroby, popílek, energosádrovec

Abstract

Aerated concrete is a modern construction material with excellent thermal – insulation properties with possibility of a fast construction of the building. Moreover we can use secondary raw materials such as fly ash and gypsum during production of aerated concrete, so we save our environment. At present we are trying to save funds for heating the house, so we are looking for suitable materials to cover the requirements for low energy housing.

But low – energy buildings wouldn't be enough for the future. It's possible now to build passive houses and zero houses, that's why advances are necessary in improvement of utility properties of building materials, aerated concrete in our case.

Key words: aerated concrete, low – energy building, aerated concrete properties, production technology, fly ash, gypsum

Bibliografická citace VŠKP

NEUBAUEROVÁ, Alena. *Možnosti zlepšování užitečných vlastností pórobetonu pro nízkoenergetické budovy*. Brno, 2012. 47 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Karel Kulíšek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité, informační zdroje.

V Brně 21. 5. 2012

.....

podpis

Poděkování

Děkuji tímto svému vedoucímu doc. Ing. Karlovi Kulískovi, CSc. za odborné vedení a pomoc při vzniku této bakalářské práce.

V Brně 2012

Alena Neubauerová

Obsah

Abstrakt	3
Bibliografická citace VŠKP	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Úvod	8
Cíl práce	9
1 Energetická náročnost budov	10
1.1 Obecné pojmy	10
1.2 Budovy s nízkou energetickou náročností	11
1.2.1 Požadavky na nízkoenergetickou stavbu	11
1.2.2 Tvorba nízkoenergetických budov	12
1.2.3 Konstrukční řešení	12
1.2.4 Nízkoenergetické budovy – definice	13
1.2.5 Konstrukční a materiálové řešení nízkoenergetických staveb.....	14
2 Pórobeton	15
2.1 Technologie výroby pórobetonu	15
2.2 Suroviny pro výrobu pórobetonu	16
2.2.1 Základní suroviny	16
2.2.2 Dříve používané suroviny.....	21
2.3 Hydrotermální reakce.....	21
2.3.1 Technologie autoklávování – postup.....	22
2.4 Přehled technologií na území ČR, SR a v zahraničí	22
2.4.1 Technologie UNIPOL.....	22
2.4.2 Technologie CALSILOX.....	23
2.4.3 Technologie SIPOREX.....	23
2.4.4 Technologie HEBEL	23
2.4.5 Technologie YTONG	23
2.5 Vlastnosti pórobetonu	24
2.5.1 Výčet vlastností	25
2.5.2 Zkoušení pórobetonů	28
2.6 Malty pro zdění a povrchové úpravy pórobetonu	31
2.6.1 Zdicí malta	31

2.6.2 Omítková malta	31
3 Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě pórobetonu	32
3.1 Elektrařenský popílek.....	32
3.1.1 Popílkový pórobeton.....	33
3.2 Energosádrovec	36
3.2.1 Požadavky na kvalitu energosádrovce do pórobetonu.....	37
3.2.2 Zkoušky ekologické vhodnosti	37
4 Použití pórobetonových tvárnic pro nízkoenergetické stavby	38
4.1 Srovnání produktů od českých výrobců	38
4.1.3 Zdivo tloušťky 375 mm	38
4.1.2 Zdivo tloušťky 425, 450 mm	38
4.1.1 Zdivo tloušťky 500 mm	39
4.2 Použití zdiva z tvárnic Ytong (pískový pórobeton)	39
4.2.1 Řešení pro energeticky úsporný dům	39
4.2.2 Řešení pro nízkoenergetický dům	39
4.2.3 Řešení pro pasivní dům	39
4.3 Použití zdiva z tvárnic Porfix (popílkový pórobeton).....	40
4.4 Návrh řešení pro popílkový pórobeton	42
Závěr	43
Seznam použité literatury	45
Seznam obrázků.....	47
Seznam tabulek	47

Úvod

Pórobeton se řadí mezi lehké pórovité stavební látky vytvrzené autoklávováním. Je nejvýznamnějším druhem přímo lehčeného betonu - póry v jemnozrnné maltě. Pórobeton je ekologicky čistý materiál, vyrábí se z přírodních surovin (křemičitý písek, elektrárenský popílek, cement, vápno, voda) a z přísad (sádrovec, anhydrit a hliníkový prášek). Základním komponentem určujícím druh pórobetonu je křemičitá složka. Pískový (bílý) pórobeton, je – li plnivem jemný křemičitý písek nebo v menší míře popílkový (šedý), je – li jako plnivo zvolen popílek.

Materiál disponuje nízkou objemovou hmotností s relativně vysokou konstrukční pevností. Nízkou objemovou hmotnost zajišťuje pórovitost materiálu, mechanickou pevnost tvoří velmi pevná krystalická struktura mezipórových stěn. Stavivo umožňuje rychlé a přesné zdění na 1 – 3 mm tenké maltové lože. Konstrukce z pórobetonu již splňují ve většině případů tepelně – technické požadavky současných norem bez dodatečného zateplování. Nabízí mimořádnou stabilitu, odolnost, snadnou manipulaci a zpracování, je nehořlavý a zajišťuje příjemné vnitřní klima. V mnohém již dohnal svého největšího konkurenta – pálenou cihlu. Na rozdíl od cihelných bloků se ale lehce přičezává a má mnohem nižší hmotnost. Pórobeton je na celém světě uznávaný jako ekologický stavební materiál šetřící životní prostředí.

Tepelná ochrana budov je jednou ze zásadních podmínek současného stavebnictví. Současný trend je založen na snižování energetických nároků na budovu, ze kterých je nejvýznamnější omezení množství energie na vytápění objektu. Z tohoto důvodu je nutné, aby se budoucí výstavba realizovala v souladu s požadavky pro jednotlivé konstrukce, přes které dochází k velkým únikům tepla z budovy. To řeší koncept nízkoenergetického bydlení. Má ve srovnání s běžnou novostavbou zhruba poloviční až třetinovou spotřebu tepla na vytápění. Existují také domy pasivní nebo nulové, kde je spotřeba ještě nižší, ty však vyžadují náročnější postup výstavby. Nízkoenergetické domy jsou tedy kompromisem mezi domy pasivními a mezi „běžnou“ výstavbou. Navíc podle požadavků EU bude dnešní model stavění do roku 2020 nahrazen koncepcí výstavby pouze pasivních a nulových domů, je tedy třeba zlepšovat vlastnosti staviv už nyní.

Souhrnně jsou přednostmi pórobetonu rychlá výstavba, je vyřešen kompletní sortiment pro celou stavbu a ve spojení s nízkoenergetickým bydlením splňuje dle normy ČSN 73 0540 požadavky na tepelně – izolační vlastnosti.

Cíl práce

Cílem bakalářské práce je ve formě studijní části ucelení informací o pórobetonu a o nízkooenergetickém standardu bydlení. Je zde shrnut postup výroby a typy technologických systémů, zejména v ČR a SR. Dále obsahuje informace o surovinách, požadavcích na ně a postupy zkoušení pórobetonu dle norem. Řeší se problematika nízkooenergetických domů a tepelně – technické nároky.

Součástí je analýza ve využívání vedlejších energetických produktů pro výrobu pórobetonu, tj. elektrárenský popílek a energosádrovec. Vhodnost použití a náhrada křemičitého písku popílkem a jeho vlastnosti. Další kapitolou jsou fyzikální vlastnosti pórobetonů, výhody a nevýhody se zaměřením na zabudovanou vlhkost. Možnost zvětšování objemu výroby popílkového pórobetonu z důvodu využití druhotné suroviny. Směry řešení pro zlepšení vlastností popílkového pórobetonu v energeticky úsporných konstrukcích.

V závěru jsou shrnuta konkrétní řešení systému obvodového zdiva z pískových a popílkových tvárnic pro nízkooenergetické stavby a srovnání produktů na českém trhu. Podařilo se na základě výsledků zjistit, jaká skladba zdiva je vhodná pro nízkooenergetické budovy. Byl zhodnocen vliv typu vytápění na hodnoty roční spotřeby tepla, která je podmínkou pro stavby v nízkooenergetickém standardu.

Posledním řešením je návrh na skladbu obvodového pláště z popílkového pórobetonu, který se inspiroval pórobetonem pískovým.

1 Energetická náročnost budov

1.1 Obecné pojmy

Tepelný odpor R [m^2K/W]: vyjadřuje tepelně izolační schopnost stavební konstrukce, hodnotí se podle něj tepelně technické vlastnosti. Udává schopnost konstrukce klást odpor průchodu tepla, je dán poměrem tloušťky materiálové vrstvy a jejího součinitele tepelné vodivosti. Je – li konstrukce složena z více různorodých vrstev, její výsledný tepelný odpor vzniká součtem odporů jednotlivých vrstev.

Součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]: určuje celkovou výměnu tepla mezi prostory oddělenými od sebe určitou konstrukcí, čím je menší, tím lepší jsou tepelně izolační vlastnosti. Jedná se o převrácenou hodnotu tepelného odporu.

Součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK]: je schopnost látek vést teplo. Představuje množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby při jednotkové délce byl jednotkový teplotní spád; teplo se šíří pouze v jednom směru. Závisí na objemové hmotnosti, pórovitosti, vlhkosti, směru tepelného toku, chemickém složení a teplotě.

Difuze vodní páry: odděluje – li konstrukce dvě prostředí, mezi kterými je rozdíl částečných tlaků vodní páry, dochází k difuzi z prostředí, kde je částečný tlak vodní páry vyšší; vlhkost v materiálech ve spojení: chemická vazba, fyzikální vazba, mechanická vazba. Schopnost materiálu propouštět vodní páry difuzí lze vyjádřit pomocí ekvivalentní difuzní tloušťky a difuzního odporu. [11] [14] [15] [16]

Vlhkost: materiály se prakticky v suchém stavu nevyskytují, jejich vlhkost je vždy nenulová, vyjadřuje se ve formě nasákavosti a vzlínivosti. Dělí se na výrobní, skladovací a trvalou vlhkost. [11]

1.2 Budovy s nízkou energetickou náročností

Při snižování environmentálního zatížení by mělo být dosaženo souladu s obecnými požadavky na udržitelný rozvoj. Do něj lze zařadit kvalitní vnitřní prostředí a nízkou produkci škodlivin všeho druhu, ale také otázky sociální a ekonomické. Můžeme z toho odvodit snadno srozumitelný závěr, že je vhodné navrhnout taková řešení budov, aby bylo požadavku nízké energetické náročnosti dosahováno efektivně, tedy zejména s nízkou investiční náročností a s malou zátěží pro životní prostředí. Výsledné energetické vlastnosti budovy lze zpravidla nejlépe ovlivnit při vytváření celkové koncepce v přípravné fázi projektu, zejména koordinací nosné funkce, vytápění a osvětlení budovy. Taková koncepce by měla být charakterizována mj. vyvážeností objemového a konstrukčně technologického řešení všech prostorů a konstrukcí, při nejnižší energetické náročnosti budovy. Takto pojednává o problematice zatížení životního prostředí ČSN 73 0540 – 2/ 2011.

V průběhu let se postupně, ale stále ještě vlastně nedostatečně, zpřísnují požadavky na energetickou náročnost provozu budov. Zpravidla se omezují pouze na potřebu tepla na vytápění, i když nízkoenergetická řešení budov si kladou vyšší cíle. [1]

1.2.1 Požadavky na nízkoenergetickou stavbu

- Volba pozemku – orientace a osazení budovy na pozemku s ohledem na přímé sluneční záření, případně zastínění zelení a okolní zástavbou.
- Klimatická oblast (jiné požadavky např. v horských oblastech).
- Tvarové řešení budovy – tvarová kompaktnost a malá členitost stavby (zmenšení podílu ochlazovaných ploch konstrukcí vůči objemu vnitřní vytápěné zóny).
- Orientace ke světovým stranám, obytné místnosti s velkou plochou prosklení na jižní stranu (solární zisky), co nejméně otvorů na stranu severní.
- Ochrana budovy proti větru, uvnitř nucené větrání s rekuperací tepla s možností chlazení a vlhčení vzduchu.
- Eliminace tepelných mostů a vysoká tepelně izolační schopnost (spotřeba tepla na vytápění za rok max. 50 kWh/m²).
- Vzduchotěsnost objektu (je bohužel v rozporu s požadavkem na hygienicky nezbytnou výměnu vzduchu). [13] [33]

1.2.2 Tvorba nízkoenergetických budov

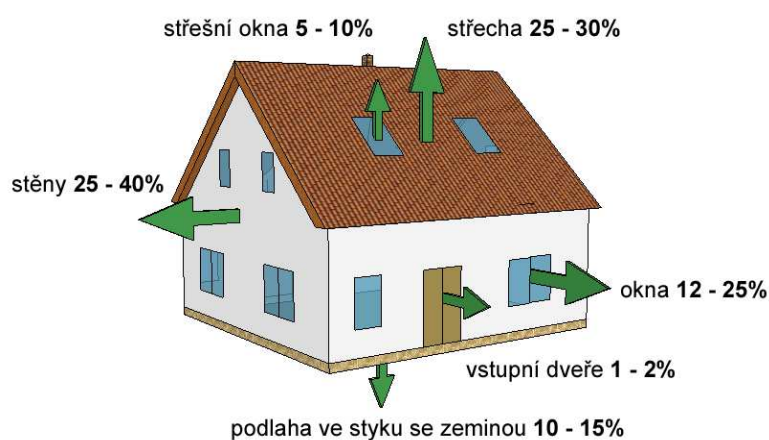
Obecně má být postupně dosaženo stavu, kdy budou všechny novostavby realizovány jako budovy s nulovou energetickou náročností („nulové budovy“) nebo takové úrovni blízké. Efektivní cestu ke splnění takových cílů představují stavební řešení s velmi redukovanou potřebou tepla na vytápění a dalších energetických potřeb (chlazení, příprava teplé vody, elektrická energie potřebná pro provoz technického zařízení budovy a pro užívání budovy a další elektrické spotřebiče). K dalším krokům patří použití systémů produkujících energii z obnovitelných zdrojů v budově nebo jejím okolí. [12]

Zásady výstavby a konstrukce objektu s nízkou energetickou náročností

Při navrhování energeticky úsporné budovy je nutné vyvážení všech složek, které ovlivňují energetickou bilanci budovy. Nízkou energetickou náročností by měl objekt disponovat po celou dobu své životnosti. K dosažení úspor energie je nutné se zaměřit již při vytváření projektu.

1.2.3 Konstrukční řešení

Tepelný výkon (ztráta) budovy je dán tepelnou ztrátou prostupem tepla a tepelnou ztrátou větráním. Tepelná ztráta prostupem je dána tepelnými vlastnostmi obalových konstrukcí, které ohraničují vnitřní a vnější prostředí budovy. Jedná se o obvodové stěny, podlahu, střechu a výplně otvorů.



Obr. č. 1.1 Tepelné ztráty prostupem jednotlivými obalovými konstrukcemi

Jednotlivé konstrukce budovy charakterizuje součinitel prostupu tepla U [W/m^2K]. Jeho vývoj je od šedesátých let uplatňován národní technickou normou ČSN 73 0540. Tato norma se od svého prvního vydání dočkala několika aktualizování, jejichž podstatou bylo vždy zejména zpřísnění požadavků na součinitel prostupu tepla. U některých konstrukcí se jednalo až o několikanásobek mezi hodnotou na počátku vydání normy a hodnotou v současnosti. Od roku 2002 pak norma navíc doporučuje v případě návrhu nízkoenergetických budov (resp. budov cíleně využívající sluneční energii, rekuperaci tepla, nebo elektrickou energii na vytápění) dosáhnout ještě nižších hodnot součinitele prostupu tepla, než jsou hodnoty doporučené. [12] [13]

Tab. č. 1.1 Požadované / doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla U [W/m^2K] za jednotlivá období pro nové a renovované budovy v České republice dle normy ČSN 73 0540 - Tepelná ochrana budov

Konstrukce	Před rokem 1964	ČSN 73 0540							Pasivní dům
		1964	1979	1994	2002	2005	2007	2011	
Obvodová stěna	1,45	1,38	0,89	0,46	0,30/0,20*	0,30/0,20*	0,30/0,20*	0,30/0,20	0,18 - 0,12
				0,33	0,38/0,25*	0,38/0,25*	0,38/0,25*	0,30/0,25	
Střecha	1,25	0,93	0,5	0,32	0,24/0,16*	0,24/0,16	0,24/0,16	0,24/0,16	0,15 - 0,10
				0,22	0,30/0,30*				
Okno	-	3,7	2,28	2,9	1,80/1,20	1,70/1,20	1,70/1,20	1,50/1,20	0,8 - 0,6
Podlaha	2,1	1,09	1,09	0,32/ 0,22	0,60/0,40	0,60/0,40	0,45/0,30	0,45/0,30	0,22 - 0,15

Pozn.: Všechny hodnoty platí pro venkovní teplotu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vnitřní průměrnou teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hodnoty: Požadované/ Doporučené

*) Pro lehké konstrukce; **) Pro těžké konstrukce

1.2.4 Nízkoenergetické budovy – definice

Nízkoenergetické budovy jsou charakterizovány nízkou spotřebou tepla na vytápění. Té je dosahováno zejména optimalizovaným stavebním řešením obálky budovy. Za nízkoenergetickou budovu se podle normy ČSN 73 0540 považují budovy, jejichž průměrný součinitel prostupu tepla nepřekračuje doporučenou hodnotu podle tabulky a současně měrná spotřeba tepla na vytápění stanovená v souladu s ČSN EN ISO 13790, TNI 73 0329 a TNI 73 0330, nepřekračuje 50 kWh/m^2 za rok. [12] [24]

Tab. č. 1.2 Základní rozdělení budov podle potřeby tepla na vytápění

Kategorie	Spotřeba tepla na vytápění [kWh/m ² .rok]
Starší budovy	často dvojnásobek hodnot (pro obvyklé novostavby) a více
Obvyklá novostavba	80 - 140 v závislosti na faktoru tvaru A/V
Nízkoenergetický dům	≤ 50
Pasivní dům	≤ 15
Nulový dům	≤ 5

Pozn.: A/V – Ochlazovaná plocha budovy / Objem budovy

1.2.5 Konstrukční a materiálové řešení nízkoenergetických staveb

1.2.5.1 Těžké konstrukce

Těžké (masivní) konstrukce mají podstatně vyšší podíl na trhu s novostavbami. Nízkoenergetické domy lze postavit v podstatě ze všech materiálů: pálené cihelné tvárnice, vápenopískové cihly, beton, pórobeton a použití sendvičových konstrukcí a ztraceného bednění. U těchto zděných konstrukcí je výhodou akumulace tepla a akustický útlum. Principem je tedy volba materiálu s co největší objemovou hmotností a pevností a poté dodatečné zateplení materiálem s velkou tepelně – izolační schopností.

1.2.5.2 Lehké konstrukce

Do této kategorie spadají dřevostavby. Dřevo se používá jen jako konstrukční prvek v množství potřebném na statickou funkci. Pasivní dřevostavby nejčastěji využívají prefabrikované panelové systémy. Konstrukce se skládá z dřevěných nosníků a fošen, ty vytvoří rošt, do kterého se umísťuje tepelná izolace. [33]

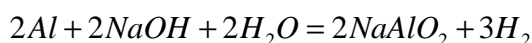
2 Pórobeton

2.1 Technologie výroby pórobetonu

Základní princip vytváření pórovité struktury

Při výrobě pórobetonu se postupuje tak, že se křemičité látky podle druhu technologie samostatně nebo i společně velmi jemně melou, mísí a homogenizují, s páleným vápnem nebo i s cementem a eventuálně 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 zatuhlé směsi se potom ve formách zarovná seříznutím přerostu a hmota se rozřeže na potřebné tvary, poté se autoklávuje. Autoklávování je podle druhu technologie prováděno buď přímo ve formách, lamelách nebo dnes na rostech, podložkách či bočnicích. Autoklávované výrobky mají již svoji konečnou pevnost a po vyschnutí je lze přímo použít na stavbě. V současnosti se pórobetony vyrábějí pro tzv. suché zdění. To představuje ve své podstatě lepení přesných tvárnic, resp. se využívá tmel bez celkového mokrého procesu. Toto velice urychluje zdění. [2]

Jako plynotvorná látka se použije prášek z některých kovů, nejčastěji hliníku. Z plynotvorných látek jsou nejjakostnější ty, které jsou nejjemnější nebo se v pórobetonové hmotě nejvíce rozptylují nebo rozpouštějí, takže potom vytvářejí četné rovnoměrné a relativně malé póry. U nás se nyní pro výrobu pórobetonu používá výlučně hliník, buď ve formě prášku, nebo pasty. Podle chemické reakce by mohl 1 g hliníku vyvinout při normálním tlaku a teplotě přibližně 1,25 l vodíku. Skutečné množství vodíku závisí především na čistotě hliníkového prášku a zvláště na teplotě, která se při zrání směsi zvětšuje. Průběh reakce silně závisí ještě na jemnosti hliníkového prášku, tvaru jeho zrn a pH prostředí. Běžná spotřeba Al prášku na 1 m³ pórobetonu činí 250 – 500 g/m³, což při použití téhož prášku kolísá především podle žádané objemové hmotnosti výrobků. [2]



Zvětšování přídavku hliníkového prášku pro pórobetonové záměsi zmenšuje objemovou hmotnost a pevnost výrobků. Největší nakypření způsobují zpravidla menší dávky hliníkového prášku, při větších přídavcích dochází totiž k unikání plynu z hmoty. Proto

objemovou hmotnost pórobetonu nemůžeme neomezeně regulovat měněním přídatku hliníkového prášku, ale obvykle jen při současné změně celého složení směsi.

Důležitou podmínkou správného a rovnoměrného nakypření směsi je vedle dodržení předchozích zásad též vhodná konzistence směsi. Je-li viskozita čerstvé směsi malá, vodík uniká, je-li opět směs příliš tuhá, je nakypřování zpomalené. Důležitý je tu též průběh tuhnutí. Při pomalém tuhnutí může směs sedat, při příliš rychlém může opět zatuhnout před ukončením vývinu vodíku a dochází potom k jejímu potrhání. Proto je zde nutné pečlivé sladění průběhu viskozity při tuhnutí a průběhu plynotvorné reakce.

2.2 Suroviny pro výrobu pórobetonu

2.2.1 Základní suroviny

- maltoviny – vápno, cement
- křemičité látky – křemičitý písek (ve výrobě je převažující složkou), popílek
- látky plynotvorné – Al prášek
- suroviny pomocné – sádrovec, anhydrit – usnadňující technologický proces výroby nebo zlepšující vlastnosti výrobků, látky regulující hašení vápna a průběh tuhnutí maltovin, látky intenzifikující plynotvorné reakce, zabraňující sedimentaci, stabilizující strukturu a zvyšující pevnost (přidávají se ve velmi malých dávkách)

2.2.1.1 Pálené vápno

Vápno je hlavní maltovinou pro výrobu pórobetonů typu silikátů, kde je převažující složkou. Musí to být čisté vzdušné vápno. Používá se nehašené, což umožňuje využít jeho hydratační teplo pro technologický proces a v neposlední míře snižuje sedimentaci směsi. [2]

Vápno pro výrobu pórobetonů má splňovat tyto požadavky:

- musí mít stejnorodé chemické a mineralogické složení a musí být vyráběno z jednoho druhu vápence (z jedné lokality),
- musí být měkce až středně pálené a nesmí obsahovat přepal,
- má být dostatečně vydatné a obsah nerozhasitelných součástí $\leq 12\%$,

- obsah celkového CaO musí být alespoň 90 % (ve vyžíhaném stavu), přičemž co nejvíce ho má být ve volném stavu,
- obsah MgO ≤ 3 %,
- obsah siřníkové síry $\leq 0,2$ %,
- ztráta žíháním se má pohybovat mezi 3 – 6 %, z toho obsah H₂O ≤ 3 % a obsah CO₂ ≤ 5 %,
- rychlost a teplota hašení musí být minimálně 60 °C a v mezích 4 -12 min.

U nás je jakost vápna pro výrobu pórobetonů předepsána technickou podmínkou ČSN EN 459 - 2 „Vápno pro výrobu pórobetonů“. Požadavky na vápno jsou velmi přísné. Zmetkovitost způsobují zvláště vápna obsahující přepal, který opožděně hasí za současného zvětšování objemu až po zatuhnutí směsi, např. během autoklávování, což vede ke trhlinkovatění až k úplnému rozpadu výrobku. K přepálení a opožděnému hašení jsou náchylná zvláště vápna obsahující oxid hořečnatý a proto také požadavek na maximální obsah MgO ve vápně musí být vždy dodržen. Vápno však nesmí obsahovat ani větší množství nedopalu, protože při zpracování působí jako zátěž zvětšující objemovou hmotnost pórobetonu.

Pokud se týká přítomnosti Ca(OH)₂ v páleném vápně, nedosahuje se při jeho větším obsahu potřebné konečné teploty před autoklávováním a hmota pomalu tuhne, což brzdí výrobu. Kromě toho mohou výrobky při použití takového vápna teplotním nárazem po zavedení do autoklávu popraskat.

Novější technologie používají vápna již jen předem jemně pomletá na max. zbytek 5% na síť 0,09 mm a na min. propad 70 % sítím 0,063 mm. Jemné mletí páleného vápna zvětšuje pevnosti vyráběného pórobetonu. Velmi jemným mletím se stává i tvrději pálené vápno reaktivnějším a objemově stálejším. [2]

2.2.1.2 Vápenný hydrát

Hydrát se nepoužívá jako maltovina pro výrobu autoklávovaných pórobetonů samostatně, nýbrž zpravidla jen jako přísada k cementu zvyšující alkalitu směsi a tím zvětšující účinek plynotvorných látek a současně jako přísada zmenšující nebezpečí sedimentace ostatních složek.

Vápenný hydrát musí vyhovovat požadavkům jako vápno. Ve vysušeném stavu musí obsahovat min. 67 % CaO + MgO, z toho MgO max. 7 %.

2.2.1.3 Cement

Pro autoklávované pórobetony se používají všechny druhy cementů na bázi portlandského slínku. Cement musí vyhovět požadavkům normy ČSN EN 197 – 1. Pro pórobetony se nejčastěji využívá cementů třídy CEM 32,5R a výše.

Průběh tuhnutí je u cementů pro výrobu pórobetonů důležitý též z toho důvodu, protože na něm závisí stabilizace pórovité struktury surové směsi. Začátek tuhnutí musí být v potřebných mezích zvláště u těch cementů, které jsou určeny pro výrobu pórobetonů ve vysokých formách. Průběh tuhnutí cementu musí tedy být vždy přizpůsoben použité technologii. Hydrotermální reakce probíhají daleko rychleji u jemněji mletých cementů, doporučuje se proto někdy kvůli dosažení větších pevností společně mletí cementu s pískem (např. u technologie Calsilox).

Ze speciálních požadavků je důležité, aby cementy určené pro výrobu autoklávovaného pórobetonu obsahovaly určité množství alkálií v rozpustné formě a to cca 0,8 – 1,0 % K₂O a 0,2 – 0,5 % Na₂O, které jsou nutné pro vznik dostatečné alkality pro dokonalý vývoj plynu z hliníkového prášku. Pokud cement neobsahuje dostatečné množství alkálií, musíme je uměle dodat do záměsi, obvykle ve formě roztoku hydroxidu sodného nebo jiných silně alkalicky reagujících látek. Obecně potom ještě platí, že složení cementu určeného pro výrobu pórobetonu musí být konstantní. [2]

2.2.1.4. Křemičitý písek

V ČR se používají písky váte a písky odpadající při plavení kaolinu. Jinak se mohou používat také různé křemičité písky říční, pískovcové a jiné.

Písek pro výrobu pórobetonů má splňovat tyto požadavky:

- musí být velmi čistý s obsahem SiO₂ ≥ 90%,
- obsah alkálií ve formě slíd a živců K₂O + Na₂O ≤ 1,5 % (z toho ve vodě rozpustného Na₂O ≤ 0,2 % a slíd ≤ 0,5 %) – při vyšším množství nastává sklon k výkvětům,
- obsah síry ve formě SO₃ ≤ 1 % (příměs pyritu a síranů),

- obsah organických látek (humusovitých látek) – při kolorimetrické zkoušce max. sytě žluté zbarvení,
- množství jílu $\leq 1,5 \%$ - dochází ke zpomalení zatuhávání směsí, snížení pevnosti pórobetonu a trhlinkovatění výrobků,
- jemnost písku – min. $200 \text{ m}^2/\text{kg}$ měrný povrch (čím je větší měrný povrch, tím je zintenzivněna hydrotermální reakce a písek zabraňuje sedimentaci). [2] [12]

2.2.1.5 Popílek

Produkty z tepelných elektráren jsou další křemičitou surovinou pro výrobu pórobetonu. Pro popílky je význačná vysoká chemická aktivita, která souvisí s jejich sklovitou fází bohatou na oxid křemičitý. Sklovina vznikla rychlým ochlazením v proudících kouřových plynech.

Pro výrobu pórobetonů je důležité, že SiO_2 v popílcích je daleko reaktivnější než u křemičitého písku, díky pucolánové aktivitě. Při hydrotermálních reakcích reaguje potom s hydroxidem vápenatým nejen SiO_2 , ale i mullit. Popílky při výrobě pórobetonu díky své pórovité struktuře a nízké měrné hmotnosti dávají za jinak stejných podmínek nižší objemovou hmotnost výrobků než při použití písku. [2]

Popílek pro výrobu pórobetonů má splňovat tyto požadavky:

- obsah $\text{SiO}_2 \geq 45 \%$,
- ztráta žíháním $\leq 7 \%$ (černouhelný popílek); $\leq 4 \%$ (hnědouhelný popílek nebo směs černouhelného a hnědouhelného),
- obsah $\text{SO}_3 \leq 2\%$,
- obsah $\text{Na}_2\text{O} \leq 1,5 \%$,
- množství $\text{MgO} \leq 2 \%$,
- množství $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 35 \%$,
- množství $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 18 \%$,
- obsah vlhkosti $\leq 0,5 \%$. [5]

2.2.1.6 Hliníkový prášek

Používá se jako plynotvorná přísada.

Al prášek pro výrobu pórobetonů má splňovat tyto požadavky:

- obsah aktivního hliníku ≥ 94 %,
- má být velmi jemný, protože jemnost urychluje vývoj plynu, měrný povrch 700 až 1200 m²/kg,
- vlhkost prášku $\leq 0,2$ %,
- prášek se má skládat z rovnoměrně velkých stříbrnošedých částic šupinového tvaru, vzniklých rozmačkáním při mletí, prášek nemá obsahovat slepené hrudky nebo zrna kulovitá.

Dříve bylo nutné zabránit při skladování a dopravě samovznícení hliníkového prášku a proto se při jeho velmi jemném mletí přidával minerální olej nebo jiné tuky. Odmašťování Al prášku probíhalo pomocí klišopryskiřičné emulze, mazlavého mýdla, louhu, sody apod., které povrchový film zmýdelnily a tím ho odstranily. Dnes se používají odmašťovadla se základem povrchově aktivních látek na bázi tenzidů nebo není třeba odmašťovat vůbec. [2]

2.2.1.7 Sádrovec a anhydrit

Používá se zejména jako přísada při výrobě silikátů – pórobetonu z popílků. Jeho účelem je zlepšování pevnosti výrobků a regulace tuhnutí směsi a to tím, že zpožďuje průběh hašení vápna a funguje jako elektrolyt při podpoře vzniku tixotropní struktury. K dosažení regulačního účinku se mele na jemnost srovnatelnou s jemností cementu. [2] [11]

2.2.1.8 Přerostový kal

Z důvodu bezodpadové technologie využíváme i tzv. přerosty z předchozí výroby. Jedním z často používaných způsobů zpracování přerostů je jejich vracení do výroby, obvykle po rozplavení na kal (cca 1,3 – 1,4 kg/l) a jejich přidávání do záměsi k ostatním surovinám.

2.2.1.9 Voda

Měla by vyhovovat betonářské normě pro záměsovou vodu dle ČSN 73 2010 „Složení betonové směsi“. Nejlepší je využívání pitné vody, která má přibližně neutrální reakci a nízký obsah chloridů, které by jinak zvyšovaly nebezpečí koroze výztuže a forem. Voda se

zpravidla používá ohřátá na 35 - 59 °C. Při použití kondenzátů od autoklávování dochází k ředění s vodou pitnou a s výhodou se využije teplota vody z autoklávu. [2]

2.2.2 Dříve používané suroviny

Chlorid vápenatý

Přidával se někdy při výrobě narmovaných pórobetonů, kde sloužil jako urychlovač tvrdnutí. Zvyšoval počáteční pevnosti a také podporoval vznik tixotropní struktury. Jeho nevýhodou byla tvorba koroze u forem a zvětšení smršťování.

Klihoprskyřičná emulze

Díky své alkalické povaze sloužila jako odmašťovadlo hliníkového prášku. Také regulovala konzistenci a tuhnutí směsi. Skládala se z kalafuny, louhu sodného a kostního klihu.

Mazlavé mýdlo

Používalo se k odmaštění hliníkového prášku a rovněž jako stabilizátor. [2]

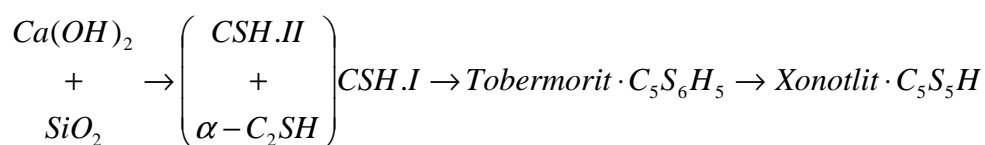
2.3 Hydrotermální reakce

Autoklávování je důležitou součástí výroby pórobetonu. Při reakci se vytváří pevnost hmoty, související se vznikem kalcium-hydro-silikátů, které zde vznikají tzv. hydrotermálními reakcemi. Křemičité suroviny používané v pórobetonech se stávají při autoklávování aktivní složkou. Hydrotermální reakce probíhající v autoklávu v prostředí nasycené vodní páry při teplotě 174 – 193 °C, což odpovídá tlaku 0,8 – 1,3 MPa (provozní tlak nejčastěji 1,2 MPa).

Průběh a výsledek hydrotermální reakce je závislý také na těchto podmínkách:

- chemický charakter výchozích látek, zejména reaktivně příslušného SiO_2 ,
- fyzikální struktura výchozích látek,
- specifický povrch výchozích látek,
- poměr CaO a SiO_2 ve výchozí surovinové směsi,
- množství záměsové vody,

- druh přimíšenin a přítomnost látek, které katalyzují nebo jinak ovlivňují reakci,
- doba trvání hydrotermální reakce.



Při hydrotermální reakci se tvoří nejprve kalcium-hydro-silikát CSH II a určité množství C_2SH , které vznikají přechodně na počátku autoklávování, kdy je zde vzhledem k omezenému reaktivnímu povrchu křemičitého materiálu nadbytek CaO. Tyto produkty s vyšším obsahem CaO se potom reakcí se zbylou dosud nezreagovanou křemičitou surovinou přemění poměrně rychle na CSH I s nižším obsahem CaO. Dalším autoklávováním po dobu 5 - 7 hodin začíná vznikat destičkovitý minerál tobermorit $C_5S_6H_5$, základní nositel pevnosti. Jako konečný produkt autoklávování vzniká (po době 20 – 72 hodin a při dostatku CaO) xonotlit C_5S_5H . [2]

2.3.1 Technologie autoklávování – postup

- vakuování – 0,5 hod
- vzestup tlaku a teploty – 1,5 až 3,0 hod
- výdrž (izotermie) – 6,0 až 10,0 hod
- pokles (přepouštění) – 1,5 až 3,0 hod [2]

2.4 Přehled technologií na území ČR, SR a v zahraničí

2.4.1 Technologie UNIPOL

Surovina: vápno, popílek, sádrovec (sádra), hliník

Technologie: pojízdná míchačka, formy stabilní, řezání a autoklávování ve formách

Výrobní: původní technologie Unipol se v ČR a SR již nevyskytuje; modernizované závody:

1. Unipol: Ostrava – Třebovice (popílek), Trutnov – Poříčí (technologie Porfix – popílek) – oba tyto systémy využívají stabilní míchačku, okruh pohyblivých forem a řezání na krájecím zařízení. Používají polský systém SOLBET.

2. Most – Kopisty (technologie H+H – převážně písek)

2.4.2 Technologie CALSILOX

Suroviny: cement, vápno, písek (popílek), sádra, hliník, anhydrit

Technologie: stabilní míchačka, oběh forem, krájení a seřezávání na roštích

Výrobny: Hrušovany u Brna, Chlumčany, Horní Počaply

2.4.3 Technologie SIPOREX

Suroviny: cement, vápno, písek, sádra, hliník

Technologie: pojízdná míchačka, formy z lamel a odnímatelných bočnic, krájení a seřezávání na lamelách, autoklávování ve formách

Výrobna: Šaštín – Stráže SR

2.4.4 Technologie HEBEL

Suroviny: cement, vápno, písek, anhydrit, hliník

Technologie: rozebíratelné formy, zrání ve formách, krájení na speciálním řezacím stroji, autoklávování na roštích

Výrobny: v ČR není

2.4.5 Technologie YTONG

Suroviny: cement, vápno, písek (popílek), hliníkový prášek

Technologie: stabilní míchačka, rozebíratelné formy, překlopení pórobetonového odlevu ve formě na podélnou bočnici o 90°, autoklávování, krájení a seřezávání na podélné bočnici

Výrobny: v ČR není [2]

Popílkový pórobeton je ekonomicky výhodnější, při jeho výrobě se využívá menší množství pojiva než u pórobetonu pískového.

2.5 Vlastnosti pórobetonu

Z pórobetonu jsou vyráběny lehké porézní tvárnice s hladkým povrchem. Materiál je tvořen přírodními surovinami – křemičitý písek, cement, vápenec, voda, popř. elektrárenský popílek. Vylehčení je provedeno pomocí hliníkového prášku. Pórobeton byl navržen jako tepelná izolace, až později (od roku 1960 na Slovensku) se z něj začaly vyrábět výrobky pro komplexní výstavbu domu, a to panely pro obvodové stěny a stropní dílce. Současný sortiment zahrnuje tvárnice pro obvodové a vnitřní nosné zdivo, příčkovky, překlady nosné i nenosné, střešní a stropní panely a schody. Tyto prvky jsou k dispozici pro zdění s tenkou vrstvou speciální malty. Výbornou vlastností je opracovatelnost materiálu, tvarovky se dají řezat pilou, mohou se brousit a frézovat.

Výhody pórobetonu pro jeho aplikaci ve stavbě

- Výborné tepelně izolační vlastnosti,
- absence mokrého procesu (použití lepidel místo klasické malty),
- vysoce přesný materiál (rychlé zdění),
- materiál je lehký (v porovnání s cihelným zdivem) – vhodné pro manipulaci a dopravu,
- nehořlavý a ekologický materiál,
- komplexní systém pro výstavbu celého domu,
- snadné opracování materiálu (klenby, šikminy, frézování prostupů a drážek pro instalace).

Nevýhody pórobetonu pro jeho aplikaci ve stavbě

- Horší tepelně akumulační vlastnosti,
- horší zvukově izolační vlastnosti,
- nižší pevnost (v porovnání s ostatními zdíciými prvky),
- nesmí se kombinovat s jiným materiálem (nutná dilatace),
- citlivý na vlhkost (nasákavost, objemové změny),
- velké množství vody obsažené v tvárnících z výroby,
- nutné dodržení technologických postupů (jinak možný vznik trhlin).

2.5.1 Výčet vlastností

2.5.1.1 Pevnost v tlaku

Je to nejdůležitější mechanická vlastnost pórobetonů. Závisí na pórovitosti, velikosti, rozprostření a pevnosti pórů. Pevnost je závislá na obsahu vlhkosti, na směru působení síly, ale také na tvaru a velikosti zkušebních těles. Pevnost klesá se vzrůstajícím množstvím vody nejprve rychle, potom pozvolněji. Pokles pevnosti pórobetonu při praktické vlhkosti oproti vlhkosti ve vysušeném stavu bývá 15 až 20 %. Pevnost se stanovuje dle ČSN EN 679. [2]

Tab. č. 2.1 Přehled zaručených pevností a objemových hmotností

Označení	Zaručená min. pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]	Zaručená max. objemová hmotnost [kg/m ³]
P2 - 400	2	2,5	400
P2 - 500	2	2,5	500
P3 - 550	3	3,5	550
P4 - 500	4	5	500
P4 - 600	4	5	600
P6 - 700	6	7,5	700

2.5.1.2 Vlhkost pórobetonu

Vlhkost materiálu je množství vody obsažené v pórovitém prostředí látky. Je to voda rozptýlená v tuhé látce. Vlhkost je vlastnost, která má výrazný vliv na všechny fyzikálně – mechanické vlastnosti a je také důležitým faktorem životnosti pórobetonu. Se vzrůstající vlhkostí se zvyšuje vlastní hmotnost pórobetonu, klesá pevnost a zhoršují se tepelně – izolační vlastnosti (stoupá součinitel tepelné vodivosti λ a měrná tepelná kapacita c). Vlhkost se stanovuje dle ČSN EN 1353. [2] [8]

a) Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti je schopnost materiálu vést teplo. Nárůst součinitele tepelné vodivosti s nárůstem vlhkosti látky se vysvětluje tím, že součinitel tepelné vodivosti vody, která je akumulovaná v pórech látky má hodnotu přibližně 0,58 W/mK, tedy asi 25krát vyšší než vzduch. Mnohdy bývá součinitel ale podstatně vyšší než vyplývá ze závislosti. V přítomnosti vody v pórech se zvyšují kontaktní plošky v pórech, což způsobuje výrazný

vliv na vzrůst součinitele tepelné vodivosti vlhké látky. Součinitel tepelné vodivosti se stanovuje dle ČSN 73 1353. [15]

b) Měrná tepelná kapacita

Množství tepelné energie, které se musí dodat látce při stálém tlaku s hmotností 1 kg, aby se její teplota zvýšila o 1 K. Při větší pórovitosti nastává větší schopnost látky sorbovat vodu, a proto úměrně roste i měrná tepelná kapacita. [9]

Druhy vlhkosti v konstrukci

- Atmosférická vlhkost – vniká do konstrukce při srážkách (děšť, sníh).
- Sorpční vlhkost – vniká do konstrukce díky sorpčním vlastnostem látky.
- Stavební (zabudovaná, technologická) vlhkost – je obsažena ve stavivu již z výroby, zabudovaná vlhkost putuje pomalu k povrchu a tam se odpařuje. Trvá několik let, než se přebytečná vlhkost vypaří. Bylo by tedy vhodné počkat až do ustálení vlhkosti a poté provést omítnutí. Nadměrná stavební vlhkost má často za následek tvorbu nežádoucích plísní a hub. [7]

Vzhledem ke způsobu výroby hydrotermálním procesem a balení do ochranné smršťovací folie jsou pórobetony z výrobních závodů expedovány s vysokým obsahem vlhkosti, cca 30 % hmotnostních. Po čase dochází k postupnému snižování vlhkosti na obsah cca 6 % hmotnostních u pískových pórobetonů a cca 9 % hmotnostních u popílkových pórobetonů (uvádí se v literatuře, reálně se hodnota pohybuje kolem 6 %). [2]

2.5.1.3 Nasákavost

Udává množství vody pohlcené vzorkem za stanovených podmínek v % hmotnosti vysušeného vzorku (poměr hmotnosti vody k hmotnosti suchého vzorku). Je to vlastně schopnost materiálu pojmout co nejvíce kapaliny. Působení vody závisí na pórovité struktuře. Pórobeton má vysokou nasákavost, opatření bloků omítkou nasákavost výrazně snižuje. [6]

2.5.1.4 Vysychavost

Je to rychlost, jakou odchází vlhkost do okolního prostředí. Vysychavost závisí na mnoha faktorech, např. druh pórobetonu, teplota, relativní vlhkost prostředí, poloha stavby,

počasí a roční období. Minimální interval udávaný výrobcí mezi zděním a omítáním je 6 – 8 týdnů při použití omítek od výrobců. Opakem vysychavosti je navlhavost. [2]

2.5.1.5 Objemové změny

Na pórobetonu můžeme běžně sledovat pouze změny pohydratační. Při vysokých relativních vlhkostech je smršťování způsobeno povrchovým napětím v kapilárních pórech z větší části vyplněných vodou. Když se však tato voda vypaří, nastane ve hmotě vlivem její elasticity reexpanze. Nejčastější objemové změny vlhkostní jsou spojeny s vysycháním a navlháním a jsou reverzibilní. Dochází k délkovému smrštění výrobků při vysychání z výrobní vlhkosti (cca 30 %) na vlhkost ustálenou (cca 6 %). Celkové smrštění ze stavu zcela nasyceného do stavu vysušeného jsou u pórobetonu pískového 0,15 – 0,20 mm/m a u popílkového 0,3 – 0,4 mm/m. Smršťování však neprobíhá lineárně, jeho prudký nárůst nastává při poklesu vlhkosti pod 6 % hmotnostních. Ukázalo se také, že smršťování pórobetonů závisí nejen na rozmezí vlhkosti, ale i na relativní vlhkosti vzduchu, teplotě zkušebních vzorků a době, po kterou vysychání probíhá. Na smršťování má také vliv volba použitých surovin.

Objemové teplotní změny jsou stanovovány součinitelem teplotní roztažnosti α , který je $7 - 8 \cdot 10^{-6}$. Objemové změny způsobené vystavením do chemicky agresivního prostředí jsou především od účinků CO_2 . [2]

2.5.1.6 Vzduchová neprůzvučnost

V objektu je třeba zajišťovat ochranu proti rušivým účinkům hluku z exteriéru. Stěny se posuzují podle vzduchové neprůzvučnosti (neprůzvučnost zdíva proti zvukům šířícím se vzduchem). Závisí na plošné hmotnosti, neprůzvučnosti oken a dveří a v množství vedlejších cest přes stěny sousedící. Po akustické stránce jsou pórobetony příliš lehké a tuhé na to, aby byly zvukově izolační. Pórobeton se vyznačuje vysokou pórovitostí (až 90 %). Stěny pórů jsou velmi tenké a dobře přenášejí zvukové vlny – pórobeton je špatný zvukově izolační materiál. Neprůzvučnost se pohybuje v hodnotách 40 – 50 dB.

Bylo prokázáno, že pokud použijeme hlinitanový cement na výrobu pórobetonu, zajišťuje tento cement velmi dobré akustické vlastnosti. Bohužel jsou vysoce hlinitanové cementy příliš drahé, proto se tento cement nepoužívá. [2] [6] [29]

2.5.1.7 Mrazuvzdornost

Je to schopnost materiálu odolávat mrazu. K poškození může dojít tehdy, když je pórobeton navlhlý a dochází – li k transportu vody pomocí kapilár (makropóry výrazně zkracují délku kapiláry). Podstatou poškození mrazem je zvětšení objemu vody o 9 % při přechodu kapaliny na tuhou látku (led). Voda v pórech zamrzá postupně, směs vody a ledu se protlačuje do jemnějších kapilár. Zamrzání postupuje od největších pórů k nejmenším. Zvětšování objemu při změně skupenství vyvolává tahová napětí a dochází k potrhání struktury. Dojde ke snížení soudržnosti s maltou, vzniku trhlin a ke zhoršení mechanických vlastností. [2] [6]

2.5.1.8 Požární odolnost

Je to doba, po kterou je konstrukce schopna odolávat teplotám vznikajícím při požáru, aniž by došlo k porušení její funkce, tj. ztrátě stability a únosnosti a k porušení celistvosti. Tato odolnost je závislá na hořlavosti materiálu, na tloušťce stěny a na povrchové úpravě. Pórobeton nepředstavuje žádné riziko šíření plamenů. Je to proto, že materiál je poměrně homogenní, na rozdíl od běžného betonu, kde dochází k expanzi kameniva. Pórobeton se řadí do třídy A – nehořlavé stavební látky. [6] [28]

2.5.1.9 Degradace – náchylnost k tvorbě primárních výkvětů

Je způsobená agresivními látkami transportovanými do stavebních hmot pomocí vlhkosti. Je to reakce rozpuštěných solí se stavebním materiálem. Rozpuštěné soli jsou vyplavovány na povrch a zde dochází k jejich krystalizaci a vznikají výkvěty. Pórobeton není vhodný do prostředí s kyselými výpary a špatně snáší působení agresivních látek. [6] [11]

2.5.2 Zkoušení pórobetonů

Stanovení součinitele tepelné vodivosti pórobetonu

Součinitel tepelné vodivosti se stanovuje v suchém stavu nebo v závislosti na vlhkosti v rozmezí daném účelem a druhem zkoušky. Stanovuje se metodou chráněné teplé desky nebo pomocí měřidla tepelného toku. Tepelná vodivost pórobetonů se deklaruje za vysušeného

stavu jako $\lambda_{10,\text{dry}}$ při objemové hmotnosti v suchém stavu. Podrobná pravidla pro stanovení návrhových hodnot tepelné vodivosti a tepelného odporu stanoví ČSN EN 1745. [17]

Stanovení odolnosti pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování

Tělesa ve tvaru krychle o hraně (100 ± 2) mm (dvě stejné sady, skládající se z hlavních zkušebních těles a porovnávacích zkušebních těles) se vyřezávají z výrobku, ponechají se ponořená ve vodě po dobu 48 hod a po vyjmutí se umístí po dobu 24 hod k vyrovnání do obalů zabraňujících vysychání. Hlavní tělesa se vystavují opakovanému zmrazování při teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu min. 8 hod, následuje rozmrazování v prostředí o relativní vlhkosti $> 95\%$ a při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu nejméně 8 hod. Porovnávací tělesa se skladují v podmínkách zabraňujících vysychání pórobetonu. Po stanoveném počtu cyklů se určí ztráta hmotnosti hlavních zkušebních těles. Objemová hmotnost v suchém stavu a obsah vlhkosti se určuje také na porovnávacích zkušebních tělesech. [18]

Stanovení pevnosti v tlaku pórobetonu

Pevnost v tlaku se určuje na zkušebních tělesech jako poměr mezi zatížením při porušení při osovém působení tlaku a příčné plochy zkušebního tělesa kolmé na směr zatěžování. Tělesa se musí umístit centricky do zkušebního lisu, zatížení musí působit osově a kolmo na směr narůstání hmoty. Zaznamená se největší zatížení na zkušební těleso. Po zatěžovací zkoušce se tělesa vysuší při $(105 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ do ustálené hmotnosti ke stanovení okamžité vlhkosti. [19]

Stanovení vlhkosti pórobetonu

Z dílců se odeberou zkušební tělesa (hranoly, krychle, nebo válce), přičemž je nutno dávat pozor na to, aby vlhkost zůstala až do prvního vážení nezměněna. Hmotnost těles se stanoví ve vlhkém stavu a po vysušení až do konstantní hmotnosti při $(105 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále se stanoví objem těles na základě změřených rozměrů. Vlhkost se spočítá na základě úbytku hmotnosti během sušení a to tak, že se vztáhnou na hmotnost vysušených zkušebních těles, popř. na jejich objem. [20]

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu pórobetonu

Pevnost v tahu za ohybu je stanovena při zatížení ohybovým momentem, vyvolaným dvěma stejně velkými břemeny, působícími ve třetinách rozpětí prostě podepřeného zkušebního tělesa. Zaznamená se největší dosažené zatížení a z něj se vypočítá pevnost v tahu za ohybu. Metoda zatížená dvěma břemeny se uvádí jako referenční metoda. [21]

Stanovení objemové hmotnosti v suchém stavu u pórobetonu

Zkušební tělesa se odebírají z dílců. Objemová hmotnost v suchém stavu se stanoví jako poměr mezi hmotností zkušebního tělesa po vysušení do konstantní hmotnosti při $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a jejich objemem. Objem jednotlivých těles se vypočítá z jejich rozměrů (přesnost 0,1 mm). Stanovení hmotnosti po ustálení hodnot, bezprostředně po vyjmutí ze sušárny se stanoví hmotnost v suchém stavu. [22]

Tab. č. 2.2 Fyzikálně – mechanické vlastnosti přesných pískových pórobetonových tvárníc

Vlastnost	Jednotka	Pevnostní třída tvárníc				
		P2 - 400	P2 - 500	P4 - 500	P4 - 600	P6 - 700
Zaručená min. pevnost v tlaku	Mpa	2	2	4	4	6
Výpočtová pevnost zdiva	MPa	0,5	0,6	1	1,1	1,3
Maximální objemová hmotnost (vlhkost 0 %)	kg/m ³	400	500	500	600	700
Meze průměrné objemové hmotnosti	kg/m ³	350-400	450-500	450-500	550-600	650-700
Objemová hmotnost zdiva na maltu s tenkými spárami (vlhkost 6 %)	kg/m ³	550	650	650	750	850
Součinitel tepelné vodivosti (vlhkost 0 %)	W/mK	0,10	0,12	0,12	0,15	0,18
Výpočtový součinitel tepelné vodivosti při praktické vlhkosti	W/mK	0,118	0,147	0,151	0,167	0,200
Vzlínavost	g.10 ⁻² .mm ⁻²			3,2		
Nasákavost	% hmot			71		
Součinitel difuze vodní páry	10 ⁻⁹ s	0,0244	0,019	0,021	0,014	0,0129
Faktor difuzního odporu	-	7,5	9,84	8,63	12,82	14,14
Průměrná sorpční vlhkost	%				2,34	
Průměrná hodnota měrné tepelné kapacity c	J/kgK				834	
Třídy hořlavosti	-			A1 - nehoř.		
Zdravotní nezávadnost: hmotnostní aktivita přírodních radionuklidů 226 Ra	Bq/kg	18	21	25	20	17

2.6 Malty pro zdění a povrchové úpravy pórobetonu

2.6.1 Zdící malta

Podle tepelné vodivosti se tepelně - izolační malty třídí:

- Tepelně - izolační $\lambda \leq 0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Vysoce tepelně - izolační $\lambda \leq 0,25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Mimořádně tepelně - izolační $\lambda \leq 0,14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Dobré tepelně izolační vlastnosti malt a omítek dosáhneme volbou kameniva s nízkou objemovou hmotností, např. expandovaný perlit nebo použitím organických plniv, např. granulí polystyrenu. Malty mají granulometrii 0/0,6 mm. [6]

2.6.2 Omítková malta

Zabudovaný pórobeton by neměl být vystaven přímému styku s prostředím, protože jeho otevřená pórovitost usnadňuje vnikání prachu, vlhkosti a chemických agresivních látek. Je tedy nutné opatřit tvarovek omítkou. Povrchové úpravy dělíme podle toho, zda je výrobek vyztužený nebo ne. Nejvhodnějším řešením na přesné tvárnice je nanášení lehkých minerálních suchých omítkových směsí (SOMS), které jsou svým složením a svými fyzikálními vlastnostmi dokonale sladěny s omítaným podkladem, tzn., že mají přibližně stejnou objemovou hmotnost, tepelnou vodivost a pevnost v tahu i tlaku. Od kvalitní omítkové směsi se požaduje příznivý faktor difuzního odporu, velmi dobrá přídržnost a výborná vodoodpudivost. [11]

3 Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě pórobetonu

Důležitou oblastí je snaha o co nejefektivnější a nejšetrnější využívání surovinových zdrojů vzhledem k míře jejich neobnovitelnosti, nepřemístitelnosti a vzácnosti, z čehož vyplývá např. redukce přebytků stavebních hmot na staveništích, stavebních odpadů a podpora jejich recyklace. Je nutný tlak na využití značného množství různých velkoobjemových průmyslových odpadních surovin, které lze s jistým ekonomickým efektem využít ve stavebnictví. Produkce odpadních materiálů se dostává do popředí zájmů ze tří hlavních důvodů:

- environmentální – možnost úniku toxických látek, znečištění životního prostředí, nedostatek ploch k zakládání skládek,
- zdravotní – vliv na kvalitu života obyvatel žijících v blízkosti skládek či spaloven, v souvislosti s předchozím hlediskem možnost poškození lidského zdraví,
- ekonomický – ztráta zdrojů, které mohou být znovu využity, dodatečné náklady na skladování, spalování, řešení starých zátěží. [4]

Značný objem odpadů představuje odpad stavební. Stavebnictví zatěžuje životní prostředí při výrobě stavebních hmot (energetická náročnost výroby, těžba přírodních surovin), dopravní náročností (značná hmotnost staveb a tím i doprava materiálů), lokálně a krátkodobě vlastním stavenišťem (hlučnost, prašnost). V současnosti se stavebnictví snaží o to, aby využívalo stavební odpady jako náhradu přírodních surovin. [10]

3.1 Elektrárenský popílek

Elektrárenský popílek vzniká jako vedlejší energetický produkt při spalování uhlí v tepelných elektrárnách a teplárnách se zrnitostí 0 – 1 mm. Jsou to převážně kulovité sklovité částice, mající pucolánové vlastnosti. Jedná se o nespalitelné anorganické příměsi. Čím je uhlí méně kvalitní, tím více těchto nespalitelných součástí (popelovin) obsahuje, právě české hnědé uhlí, těžené na Mostecku a Sokolovsku, má obsah popelovin až 25 %. Uhlí bylo v dřívější době spalováno ve formě kusového uhlí a produktem byla škvára, kdežto v dnešní době je uhlí v mletém stavu a tak dochází ke vzniku popílků. V současnosti jsou již elektrárny opatřeny dokonalými elektrostatickými odlučovači, které zachytí až 99 % popílku. Dělí se na

klasický popílek a fluidní popílek. Vzniká tak velké množství druhotné suroviny, kterou je potřebné využít k alternativním účelům. V široké míře se využívá ve výrobě betonu, cementu, pórobetonů a popílkového stabilizátu.

Vysokoteplotní popílek

Popílek vznikající při „klasickém“ způsobu spalování paliva při teplotách cca 1400 až 1600 °C. Vyznačuje se obsahem β – křemene, mullitu a sklovitou fází, jejíž množství je vyšší než 50 % a zásadním způsobem ovlivňuje reaktivitu popílku s CaO. Popílek sám o sobě není hydraulický, tzn., není schopen reakce s vodou, je-li však smísen na Ca(OH)_2 začíná reagovat. Tento jev se nazývá pucolanita.

Fluidní popílek

Vzniká při technologii fluidního spalování. Mleté palivo se s přídavkem vápence spaluje v cirkulující vrstvě při teplotě cca 850 °C. Výsledným produktem je směs popela, nezreagovaného odsiřovacího činidla, síranu vápenatého a paliva. Kvůli nižší teplotě spalování je nezreagované CaO ve formě tzv. měkce páleného vápna a je tedy reaktivní. Fluidní popílků obsahují nízký obsah taveniny. [23]

Požadavky na kvalitu popílku do pórobetonu

- byly již uvedeny v kapitole č 2.2.1.5
- Radioaktivita Ra 226 < 300 Bq/kg [27]

3.1.1 Popílkový pórobeton

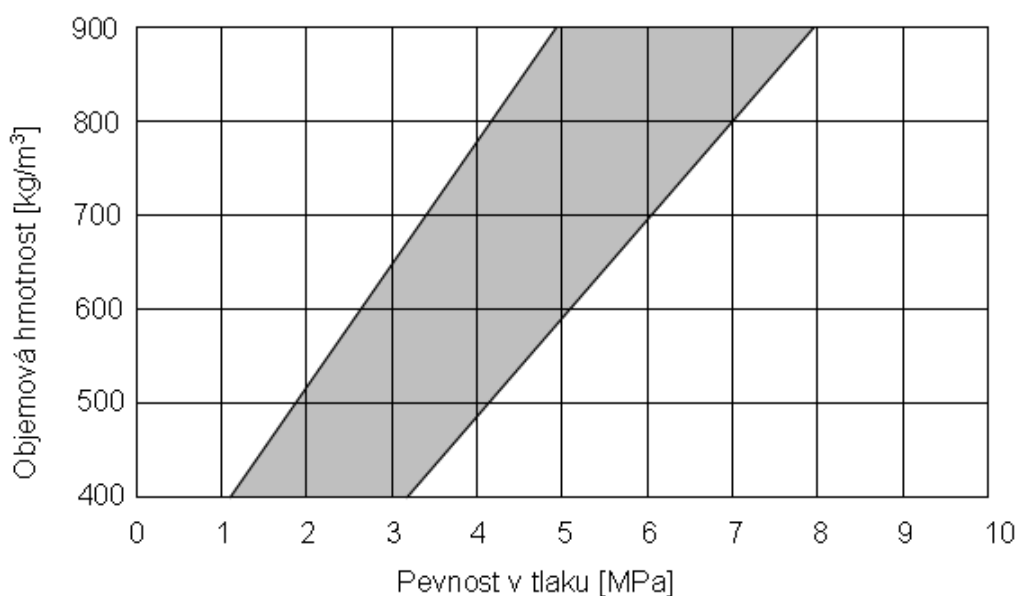
Popílkový pórobeton (šedý) se vyrábí z produktů vzniklých při procesu spalování uhlí, které tvoří až 70 % jeho objemu. Produkt je charakterizován velmi nízkou spotřebou přírodních surovin a energií a z toho vyplývá pozitivní efekt v oblasti ochrany životního prostředí a spotřeby fosilních paliv. [26]

3.1.1.1 Technické vlastnosti popílkové pórobetonu

Šedý autoklávovaný pórobeton je vyroben z křemičitých druhotných surovin, vznikajících z jílu, křemene, slídy a jiných příměsí uhlí při jeho spalování. Charakteristické šedé zbarvení způsobují oxidy železa a malý podíl nespáleného uhlí. O výběru plniva

rozhodují technické a ekonomické aspekty. Ekonomika je rozhodující pro používání úletového popílku z hlediska nižších výrobních nákladů i z hlediska ekologického. Použití popílku při suchém odstraňování (elektrofiltry) umožňuje situovat výrobu pórobetonu bezprostředně při zdroji popílku – tepelné elektrárny nebo teplárny. Výrobní náklady jsou při použití popílku jako plniva nižší než u písku. V případě, že jsou na výrobu pórobetonu použity popílky a jako pojivo vápno, vznikne úspora cca 10 % na pojivo. Z hlediska omezení nebo vyloučení mletí popílků se snižuje energetická náročnost výroby. Z pohledu producentů popílku je nezanedbatelná i úspora nákladů za uložení odpadu a ochrana životního prostředí. V současnosti existuje i z tohoto důvodu doporučení Americké asociace výrobců pórobetonu na náhradu písku až ze 75 % popílkem. [3]

Zvýšení objemové hmotnosti doprovází růst pevnosti. Naopak, čím je objemová hmotnost pórobetonu menší, tím větší je jeho schopnost tepelné izolace. Popílkový pórobeton se vyrábí v rozsahu tříd objemové hmotnosti 400 – 700 kg/m³, kde nízké objemové hmotnosti 400 – 500 kg/m³ umožňují konstrukci jednovrstvých vysoce tepelně izolačních obvodových stěn.



Obr. č. 3.1 Rozptyl pevností v tlaku pórobetonu v závislosti na objemové hmotnosti

Popílkové pórobetony mají při objemových hmotnostech vyšších o 40 – 50 kg/m³ stejné hodnoty tepelné vodivosti jako pískový pórobeton. Tento rozdíl je způsoben tím, že jemnou pórovitou strukturu šedého pórobetonu tvoří minerální struktura, která má nižší

tepelnou vodivost než krystaly křemene a živce stmelného pojivovou tobermoritickou fází, která tvoří základ bílého pórobetonu. Proto lze i ze šedého pórobetonu stavět nízkoenergetické budovy. [3]

3.1.1.2 Zdravotní nezávadnost popílkového pórobetonu

Všechny použité suroviny jsou v pórobetonových výrobcích pevně chemicky vázány a nemůže dojít k jejich únikům do vnitřního prostoru budov. Navíc pórobetonové výrobky nemají přímý kontakt s interiérem stavby, protože jsou opatřeny omítkami nebo obklady.

Na základě zhodnocení fyzikálně – chemických vlastností pórobetonových výrobků, vyhodnocení výsledků analýz arzenu ve vodním výluhu a v sušině, emanace radonu a objemové aktivity radia stejně jako i zhodnocení kritérií a koncentraci škodlivých látek, je možné konstatovat, že šedý pórobeton je považován za zdravotně neškodný a nepředstavuje riziko ohrožení zdraví ani životního prostředí.

3.1.1.3 Energetické faktory výroby a provozu

Žádaný a stále rostoucí standard pobytu v interiérech budov je v důsledku historického vývoje velmi náročný na spotřebu primárních zdrojů energie. Důležitým faktorem řešení problému jsou hlavně tepelně – izolační vlastnosti konstrukcí budov. Proto je z pohledu úspory energií samozřejmý zájem všech výrobců stavebních hmot na vývoji a realizaci materiálů s co nejvyššími tepelně – izolačními parametry.

Tab. č. 3.1.: Analýza spotřeby přírodních materiálů a energií při výrobě 1m³ pórobetonu

Spotřeba přírodních materiálů [kg/m ³]	Vložená energie životního cyklu [kWh/m ³]	Tvorba emisí CO ₂
250	285	199

Produkce šedého pórobetonu z popílků, z klasického spalování uhlí, spojuje ekonomickou efektivnost s pozitivními vlivy na životní prostředí, v souladu s koncepcí udržitelného rozvoje. Kritéria jsou nízké spotřeby přírodních surovin, vysoký podíl zhodnocování odpadů, nízké spotřeby vložené energie a vysoká míra recyklace produktu ve výrobním procesu.

Tab. č. 3.2: Energetická náročnost výroby pórobetonu

Typ zdícího materiálu	Objemová hmotnost v suchém stavu [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W/mK]	Energetická náročnost	
			Primární [MJ/m ³]	Elektrická [MWh/m ³]
Tvárnice	600	0,16	1708	0,475
Tvárnice	400	0,09	1240	0,345

3.1.1.4 Tepelná ochrana budov u pórobetonu

Analýzou spotřeby fosilních paliv a energií se zjistilo, že energie spotřebovaná v budovách na bydlení představuje třetinu její celkové spotřeby. Energetické nároky provozu budov jsou dány hlavně spotřebou tepla na vytápění, které je určené celkovou ztrátou objektu.

Popílkový, ale i pískový pórobeton jsou příkladem jedné z cest trvale udržitelného rozvoje. Rovnoměrně rozptýlené póry a dobrá difúze par zabezpečují vnitřní klima s vyrovnáváním teploty a vlhkosti. Zdící pórobetonové tvarovky mají také akumulaci vlastnosti. Uvedené parametry hovoří ve prospěch využívání tohoto ekologického materiálu ve výstavbě i rekonstrukcích a výsledky technických studií prokázaly vhodnost popílkového pórobetonu pro výstavbu nízkoenergetických budov. [3] [5]

3.2 Energosádrovec

V České republice jsou malé zásoby přírodního sádrovce, který je těžen pouze v Kobeřicích u Opavy. Vzhledem k nižší kvalitě a z ekonomického hlediska je od používání tohoto sádrovce upouštěno a v současné době je z velké části nahrazen tzv. odpadními sádrovci. Jedná se většinou o chemicky čisté suroviny s obsahem sádrovce a anhydritu nad 90 %, které jsou z hygienického i ekologického hlediska považovány za nezávadné. Nejvíce využívaným typem odpadních sádrovců je v současnosti jednoznačně energosádrovec, který vzniká při odsiřování spalin mokrou vápencovou vypírkou. Hlavní složkou je dihydrát síranu vápenatého. Rozdíl mezi energosádrovcem a přírodním sádrovcem spočívá ve fyzikálních vlastnostech – velikost zrna, tvorba typu krystalů a technicky důležitá sypaná hmotnost. Energosádrovec obsahuje nečistoty, jedná se hlavně o chloridy, fluoridy, rozpustné Mg a Na soli, siřičitan vápenatý a nezreagovaný CaSO₃ (vliv použitého paliva, vápence a dalších přísad). Stupeň bělosti sádrovce z hnědého uhlí se pohybuje v rozmezí 20 - 40 %. [4]

3.2.1 Požadavky na kvalitu energosádrovce do pórobetonu

- obsah $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > 90$ % hm.,
- vlhkost < 10 % hm.,
- obsah chloridů $< 0,1$ % hm.,
- obsah $\text{MgO} < 0,2$ % hm.,
- hodnota pH 5 – 8,
- radioaktivita Ra 226 < 300 Bq/kg. [27]

3.2.2 Zkoušky ekologické vhodnosti

Základním předpokladem při volbě odpadního materiálu pro výrobu stavebních hmot a výrobků je, že tyto materiály nebudou ohrožovat ani zhoršovat jednotlivé složky životního prostředí, tzn. podzemní i povrchové vody, horninové prostředí, faunu, flóru, půdu i ovzduší a veřejné zdraví. K ověření těchto faktorů slouží zkoušky ekologické vhodnosti, tj. testy a zkoušky, jejichž účelem je vyloučit možné negativní vlivy na životní prostředí. Výsledky ekologické vhodnosti se posuzují i z časového hlediska pomocí testů ekotoxicky na zkušebních tělesech. Zkoušky ekologické vhodnosti zahrnují stanovení: ekotoxicity, hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů, nebezpečných látek ve výluhu a nebezpečných látek v sušině. Pokud je podezření, že by se v odpadu mohly nacházet organické látky, provádí se též jejich stanovení, např. PAU (polycyklické aromatické uhlovodíky). [4]

4 Použití pórobetonových tvárnic pro nízkoenergetické stavby

4.1 Srovnání produktů od českých výrobců

Podle normy ČSN 73 0540 – 2/2011 je požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla u obvodového zdiva $U = 0,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, doporučená hodnota činí $U = 0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

4.1.1 Zdivo tloušťky 375 mm

Tab. č. 4.1 Porovnání U u pórobetonových tvárnic o tloušťce 375 mm.

Název	Pevnost [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Součinitel prostupu tepla U [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]
Ytong Theta P1,8 - 300	1,8	300	0,22
H+H Greenblock P2 - 350	2	350	0,22
Ytong Lambda P2 - 350	2	350	0,23
Porfix Plus P2 - 420	2	420	0,24
H+H Exclusive P2 - 400	2	400	0,25
Ytong P2 - 400	2	400	0,26
Porfix P2 - 480	2	480	0,27
Ytong P4 - 500	4	500	0,30
H+H Classic P2 - 500	2	500	0,32
Porfix P4 - 580	4	580	0,33
H+H Exclusive P4 - 500	4	500	0,34
H, HK, PDK P2 - 550	2	550	0,38

4.1.2 Zdivo tloušťky 425, 450 mm

Tab. č. 4.2 Porovnání U u pórobetonových tvárnic o tloušťce 425 a 450 mm.

Název	Pevnost [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Součinitel prostupu tepla U [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]
H+H Thermoblock P2 - 400 (s integrovanou tepelnou izolací)	2	400	0,12
Ytong Lambda P2 - 350	2	350	0,19

4.1.3 Zdivo tloušťky 500 mm

Tab. č. 4.3 Porovnání U u pórobetonových tvárnic o tloušťce 500 mm.

Název	Pevnost [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Součinitel prostupu tepla U [W/m ² K]
Ytong Theta P1,8 - 300	1,8	300	0,16
H+H Greenblock P2 - 350	2	350	0,16
Porfix Plus P2 - 420	2	420	0,18

Pozn.: všechny hodnoty jsou uvedeny pro samostatné zdivo bez omítek a v absolutně suchém stavu. Menší tloušťky zdiva nevyhovují požadavkům na nízkoenergetické stavby.

Nejoptimálnějším produktem je tvárnice s objemovou hmotností 350 až 400 kg/m³ a s pevností 2 MPa, což plně dostačuje pro běžné nízkoenergetické rodinné domy. Tím dosáhneme požadované tepelně izolační parametry potřebné pro nízkoenergetické stavby.

4.2 Použití zdiva z tvárnic Ytong (pískový pórobeton)

4.2.1 Řešení pro energeticky úsporný dům

Při použití obvodového zdiva Ytong Lambda tloušťky 375 mm se objekt obejde bez dalšího zateplení. Výsledná stavba má výborné tepelně - izolační vlastnosti a příjemné vnitřní klima. Podle energetického štítku splňuje parametry kategorie C1 až B.

4.2.2 Řešení pro nízkoenergetický dům

Použití nových tvárnic Ytong Theta tloušťky 500 mm. Tento systém splňuje parametry pro nízkoenergetickou stavbu bez zateplení. Roční spotřeba nízkoenergetického domu Ytong je v porovnání se stavbami v běžném standardu maximálně poloviční a podle energetického štítku se pohybuje na rozmezí kategorií A a B.

4.2.3 Řešení pro pasivní dům

Je to kombinace obvodového zdiva Ytong P2 - 400 tloušťky 300 mm a pórobetonových super - izolačních desek Ytong Multipor. Spojením těchto materiálů vzniká unikátní pevná vrstva, která funguje jako homogenní zděná stěna. Téměř nulová spotřeba energie řadí toto řešení na nejvyšší příčky energetického štítku budovy - třídu A. [30]

Tab. č. 4.4 Použití pórobetonových tvárníc Ytong pro nízkoenergetické budovy – úspora na vytápění

Tvárnice	Tloušťka [mm]	Tepelný odpor R [m ² K/W]	Součinitel prostupu tepla U [W/m ² K]	Úspora na vytápění [%]
Ytong Lambda	375	4,05	0,25	35
Ytong Theta	499	5,65	0,18	53
Ytong P2-400 + Ytong Multipor	500	7,44	0,13	65

4.3 Použití zdiva z tvárníc Porfix (popílkový pórobeton)

Slovenská pobočka firmy Porfix navrhla řešení pro výstavbu rodinného domu ve standardu nízkoenergetického bydlení. Byly testovány různé možnosti použití tvárníc ze sortimentu Porfix. Prověřovanou stavbou byl katalogový jednopodlažní bungalov s velkou ochlazovanou plochou (členitost půdorysu).

Tab. č. 4.5 Parametry konstrukcí obvodových stěn

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti (w = 5 %)	Šířka stěny	Energetická kategorie domu		
			B ¹	NED ²	PD ³
			75	50	15
			[kWh/(m ² .rok)]	[kWh/(m ² .rok)]	[kWh/(m ² .rok)]
			U = 0,26	U = 0,20	U = 0,15
			Tloušťka izolantu (λ = 0,04 W/m.K)		
[W/m.K]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
P2; 2,5 - 420	0,102	300	30	75	145
		375	-	45	115
		500	-	-	-
P 2,5; 3 - 520	0,122	300	50	95	160
		375	25	70	140
P 4;5 - 580	0,142	250	80	125	190
		300	60	105	175
		375	40	90	155

Energetický štítek – je grafickým vyjádřením stavebně energetických vlastností konstrukcí domu. Je členěn do sedmi kategorií A – G, za vyhovující jsou považovány budovy v kategoriích A až C. [24]

¹ Hodnocení budovy dle energetické náročnosti - dělení podle Energetického štítku.

² Nízkoenergetický dům.

³ Pasivní dům.

Tab. č. 4.6 Spotřeba tepla a náklady na vytápění modelového domu

Tloušťka obvodové stěny	Účinnost systému vytápění	Součinitel prostupu tepla oken	Dodaná energie	Náklady na vytápění	Emise CO ₂	Energetická třída budovy
	[%]	[W/m ² .K]	[kWh/(m ² .rok)]	[€/rok]	[kg/m ² .rok]	
375	88	1,4	77,90	501,1	17,52	B
375	88	1,0	72,87	471,2	16,39	B
375	94	1,4	72,43	468,5	14,56	B
375	94	1,0	67,80	441,2	13,67	B
500	94	1,0	61,33	402,8	12,33	B

Z tabulky je zřejmé, že i při nadstandardním zhotovení obvodového pláště nedosáhneme bez řešení alternativního vytápění parametry nízkoenergetického domu, tedy množství dodané energie menší než 50 kWh/(m².rok). Byly zjištěny vysoké ztráty tepla větráním, u stěny 500 mm se vyšplhaly na hodnotu 36,8 % spotřeby tepla.

Tab. č. 4.7 Výpočtové údaje – vytápění pomocí vzduchotechniky

Tloušťka obvodové stěny	Součinitel prostupu tepla oken	Dodaná energie	Náklady na vytápění	Emise CO ₂	Energetická třída budovy
	[W/m ² .K]	[kWh/(m ² .rok)]	[€/rok]	[kg/m ² .rok]	
375	1,4	55,88	405,9	13,52	B
375	1,0	51,55	380,3	12,46	B
500	1,0	45,54	342,0	11,43	NED

V další tabulce jsou uvedeny přepočty na variantu s použitím tepelného čerpadla. Toto řešení zabezpečí podmínky pro zařazení do energetické třídy A. Z pohledu faktorů globálního oteplování (což jsou v našem případě emise CO₂) je ale elektrický systém méně efektivní než vytápění zemním plynem.

Tab. č. 4.8 Výpočtové údaje – vytápění pomocí tepelného čerpadla

Tloušťka obvodové stěny	Součinitel prostupu tepla oken	Dodaná energie	Náklady na vytápění	Emise CO ₂	Energetická třída budovy
	[W/m ² .K]	[kWh/(m ² .rok)]	[€/rok]	[kg/m ² .rok]	
375	1,4	25,52	275,5	16,44	A
375	1,0	23,89	257,9	15,39	A
500	1,0	21,61	233,3	13,92	A

V poslední tabulce je porovnání nezateplené a zateplené stěny. Z výsledků výpočtů je patrné, že při investičně náročnějším zateplení deskami z minerální vlny tloušťky 80 mm bude dosaženo úrovně jednovrstvé stěny z Porfix Plus šířky 500 mm.

Tab. č. 4.9 Výpočtové údaje pro dům a porovnání s variantami zateplení

Skladba obvodové stěny	Součinitel prostupu tepla U	Dodané teplo Q	Tepelné ztráty konstrukcí		
			Obvodová stěna	Větrání	Ostatní
	[W/m ² .K]	[kWh/(m ² .rok)]	[%]	[%]	[%]
375 mm	0,243	67,80	35,4	34,23	30,37
500 mm	0,196	61,33	30,61	36,78	32,61
300 mm + zateplení 80 mm	0,194	61,14	30,38	36,9	32,72
300 mm + zateplení 125 mm	0,159	57,79	26,34	39,03	34,63

Tvarovky Porfix P2 a P3 šířky 375 mm jsou vhodné pro zdění budov energetické třídy B bez zateplení pláště. Tvarovky o šířce 500 mm splňují částečně požadavky pro nízkoenergetické domy, součinitel prostupu tepla je menší než 0,2 W/m²K. Při vhodném typu vytápění (rekuperace tepla, solární systém, tepelné čerpadlo) se u nezateplené stavby sníží teplo potřebné na vytápění pod 50 kWh/m².rok a zařadí se do kategorie nízkoenergetických domů. [34]

4.4 Návrh řešení pro popílkový pórobeton

U popílkového pórobetonu by se dalo s výhodou využít systému, jaký používá Ytong – tedy blok např. o tloušťce 300 mm plus minerální tepelně izolační desky Multipor o tloušťce např. 150 mm. Tím by vznikla stěna se šířkou 450 mm, která by mohla mít teoretický tepelný odpor $R = 6,3 \text{ m}^2\text{K/W}$ a součinitel prostupu tepla $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$, což vystačí i na požadavky pasivního domu dle ČSN 73 0540 – 2/2011.

Závěr

V rámci bakalářské práce byly shromážděny informace o současném stavu nízkoenergetického bydlení a komplexní informace o pórobetonu se zaměřením na využívání druhotných surovin pro výrobu pórobetonu. Energosádrovec je již využíván a téměř zcela nahradil použití klasického přírodního sádrovce. Je to tedy už úspěšně zvolený krok ve využití odpadní suroviny. Elektrárenské popílky jsou vhodnou surovinou, použitelnou pro výrobu pórobetonu. Lze jimi plně nahradit křemičitou složku - písek. Tři čeští výrobci používají popílek pro výrobu pórobetonu s tepelně - izolačními vlastnostmi mírně horšími nebo srovnatelnými s pískovým pórobetonem. Nejnižšího součinitele prostupu tepla je docíleno u tvárnic z pískového pórobetonu s objemovou hmotností 350 až 400 kg/m³ a pevností 2 MPa, což plně postačuje na výstavbu nízkoenergetického rodinného domu.

Největším problémem pórobetonu je vlhkost, ať už zabudovaná z výroby nebo pohlcovaná z okolního prostředí. Účinným řešením je nechat konstrukci zdiva vyschnout nejlépe několik let (tj. prakticky nemožné) a snažit se eliminovat další styk s vodou, tzn. oddělit od ostatních materiálů a použít kvalitní omítky přímo od výrobců. Při zvýšené vlhkosti pórobetonu totiž stoupá součinitel prostupu tepla a tím se snižují tepelně – izolační vlastnosti.

Při použití popílku jako křemičité složky se snižují výrobní náklady výrobců pórobetonu a u energetických producentů je nezanedbatelná úspora za uložení popílků na skládku. V současné době, kdy se využívá vysokoteplotní popílek při výrobě cementu a zejména betonu vzrostla poptávka po této druhotné surovině a tím se zvedla i finální cena za produkt. Popílkový pórobeton i při vyšší objemové hmotnosti dosahuje téměř stejných tepelně - izolačních vlastností jako pískový pórobeton. Díky tomu má lepší zvukovou izolačnost a schopnost akumulace tepla. Popílkový pórobeton je zdravotně nezávadný, neohrožuje zdraví ani životní prostředí, je u něj kontrolována hodnota hmotnostní radioaktivity.

V průběhu vývoje pískového pórobetonu se snižuje součinitel prostupu tepla a dostává se běžně pod požadovanou horní hranici $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Výrobci popílkového pórobetonu se svými tepelně izolačními vlastnostmi také přibližují pískovému pórobetonu.

Při rozboru variant použití obvodového zdiva z popílkového pórobetonu bylo zjištěno, že při výstavbě nízkoenergetických domů by mělo být použito zdivo třídy P2 nebo P2,5 - 420,

aby nemusela být použita tepelná izolace. Při menších tloušťkách tvárnic bude nutné zdivo dodatečně zateplit minerální izolací. Pokud by byl podmínkou pouze součinitel prostupu tepla (pro nízkoenergetické stavby $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$), byl by postačující klasický způsob vytápění objektu. Požadavky na tyto domy činí $50 \text{ kWh/m}^2\text{.rok}$ a tudíž je potřebné zvolit vhodný systém vytápění, jako je vzduchotechnika nebo tepelné čerpadlo, aby se této hodnoty dosáhlo. Z výsledků je patrné, že při použití tvárnic šířky 375 mm se zateplením deskami z minerální vlny o tloušťce 80 mm bude dosaženo úrovně jednovrstvé stěny z pórobetonu o tloušťce 500 mm. Jednovrstvé zdivo je ovšem méně finančně i technologicky náročné.

Návrhem pro popílkový pórobeton je inspirace systémem Ytong. Spojení pórobetonové tvarovky a desky Multipor s výbornými tepelně - izolačními vlastnostmi, která slouží jako tepelná izolace a přitom jsou oba prvky konstrukce ze stejného materiálu. U výrobců pískového i popílkového pórobetonu je trvalou prioritou snižování součinitele prostupu tepla a tak zvětšují tloušťku obvodové stěny. To ale není zcela vhodné – je kvůli tomu snížen vnitřní užitný prostor. Proto je vhodným řešením spojení dvou vrstev o menších tloušťkách, ale s lepšími izolačními vlastnostmi.

Možnosti zlepšování vlastností pórobetonu pro nízkoenergetické stavby:

- Pomocí výzkumu a realizace technologie výroby docílit díky snížení objemové hmotnosti a pevnosti pórobetonu nižšího součinitele prostupu tepla, srovnatelného s pískovým pórobetonem. Příkladem může být vhodný popílkový pórobeton s objemovou hmotností 420 kg/m^3 a pevnosti 2 popř. 2,5 MPa u jednovrstvé konstrukce.
- Vytvoření sendvičové konstrukce. Využití stejného systému, jaký používá Ytong. Spojení tvárnic a tepelně izolačních desek Multipor (extrémně lehčený pórobeton).

Seznam použité literatury

Tištěné publikace

- [1] TYWONIAK, J. *Nízkoenergetické domy – Principy a příklady*. 1. vyd. Praha: nakladatelství Grada Publishing, 2005. 193 s. ISBN 80-247-1101-X.
- [2] DROCHYTKA, R.; MATULOVÁ, P. *Lehké stavební látky*, 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2006. 203 s.
- [3] *Časopis Stavebnictví*. Č. 4. Brno: EXPO DATA spol. s. r. o. 2009. ISSN 1802-2030.
- [4] *Časopis Stavebnictví*. Č. 4. Brno: EXPO DATA spol. s. r. o. 2008. ISSN 1802-2030.
- [5] Norma: ČSN 72 2072 – 5 Popílek pro stavební účely – Část 5: Popílek pro výrobu pórobetonu. 2000.
- [6] ZAPLETALOVÁ, O. *Vliv vlhkosti na parametry zděných konstrukcí*. s. 4.
- [7] MIZEROVÁ, L. *Vlhkost a její odstranění*. s. 5.
- [8] ZEJDA, P. *Vlhkost stavebních hmot a její vliv na stavební konstrukce*. s. 4.
- [9] PODEŠVOVÁ, Z. *Vlhkost ve stavebních materiálech a konstrukcích*. s. 2.
- [10] KHESTE, F. *Využití alternativních materiálů ve stavebním průmyslu*. s. 4, 5, 8.
- [11] SVOBODA, L. a kolektiv. *Stavební hmoty*. 1. vyd. Praha: Jaga Media s. r. o., 2007. 488 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [12] Norma: ČSN 73 0540 - 2 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. 2011.
- [13] SMOLA, J. *Stavba a užívání nízkoenergetických a pasivních domů*. 1. vyd. Praha: nakladatelství Grada Publishing, 2011. 352 s. ISBN 978-80-247-2995-4.
- [14] ŠŤASTNÍK, S.; STEUER, R. *Fyzika stavebních látek – modul M02*. Brno: Vysoké učení technické, 2006. 125 s.
- [15] ŠŤASTNÍK, S. *Fyzikální vlastnosti stavebních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické, 2006. 98 s.
- [16] ZACH, J. *Speciální izolace*. Brno: Vysoké učení technické, 2006. 106 s.
- [17] Norma: ČSN 73 1353 Stanovení součinitele tepelné vodivosti pórobetonu. 2010.

- [18] Norma: ČSN EN 15 304 (ČSN 73 1367) Stanovení odolnosti autoklávovaného pórobetonu proti zmrazování a rozmrazování. 2010.
- [19] Norma ČSN EN 679 (ČSN 73 1352) Stanovení pevnosti v tlaku autoklávovaného pórobetonu. 2006.
- [20] Norma ČSN EN 1353 (ČSN 73 1354) Stanovení vlhkosti autoklávovaného pórobetonu. 1998.
- [21] Norma ČSN EN 1351 (ČSN 73 1352) Stanovení pevnosti v tahu za ohybu autoklávovaného pórobetonu. 1998.
- [22] Norma ČSN EN 678 (ČSN 73 1351) Stanovení objemové hmotnosti v suchém stavu autoklávovaného pórobetonu. 1995.
- [23] BYDŽOVSKÝ, J. *Vybrané statě z technologie stavebních hmot*. Brno: Vysoké učení technické, 2008. 228s.

Webové stránky

- [24] <<http://ekowatt.cz/>> [cit. 22. 1. 2012].
- [25] <<http://tzb-info.cz/>> [cit. 25. 1. 2012].
- [26] <<http://porobetonostrava.cz/>> [cit. 13. 3. 2012].
- [27] <<http://cez.cz/>> [cit. 22. 1. 2012].
- [28] NARAYANAM, N.; RAMAMURTHY, K. *Structure and propesties of aerated concrete: a review* 28. 8. 2000. [cit. 14. 2. 2012]. Dostupné z <<http://sciencedirect.com/>>.
- [29] LAUKAITIS, A.; FIKS, B. *Acoustical properties of aereted autoclaved concrete*. [cit. 14. 2. 2012]. Dostupné z <<http://sciencedirect.com/>>.
- [30] <<http://ytong.cz/>> [cit. 25. 2. 2012].
- [31] <<http://porfix.cz/>> [cit. 9. 4. 2012].
- [32] <<http://hpluh.cz/>> [cit. 9. 4. 2012].
- [33] <<http://pasivnidomy.cz/>> [cit. 25. 1. 2012].
- [34] <<http://porfix.sk.cz/>> [cit. 18. 5. 2012].

Seznam obrázků

Obr. č. 1.1 Tepelné ztráty prostupem jednotlivými obalovými konstrukcemi.

<http://hestia.energetika.cz/> [cit. 25. 1. 2012].

Obr. č. 3.1 Rozptyl pevností v tlaku pórobetonu v závislosti na objemové hmotnosti. [3]

Seznam tabulek

Tab. č. 1.1 Požadované/ doporučené hodnoty součinitele prostupu tepla U. [25]

Tab. č. 1.2 Základní rozdělení budov podle spotřeby tepla na vytápění. [24]

Tab. č. 2.1 Přehled zaručených pevností a objemových hmotností. [2]

Tab. č. 2.2 Hodnoty fyzikálně – mechanických vlastností přesných pískových pórobetonových tvárnic. [11]

Tab. č. 3.1 Analýza spotřeby přírodních materiálů a energií při výrobě 1m³ pórobetonu. [3]

Tab. č. 3.2 Energetická náročnost výroby pórobetonu. [3]

Tab. č. 4.1 Porovnání U u pórobetonových tvárnic tloušťka 375 mm. [26] [30] [31] [32]

Tab. č. 4.2 Porovnání U u pórobetonových tvárnic tloušťka 425 a 450 mm. [30] [32]

Tab. č. 4.3 Porovnání U u pórobetonových tvárnic tloušťka 500 mm. [30] [31] [32]

Tab. č. 4.4 Použití pórobetonových tvárnice Ytong pro nízkoenergetické budovy – úspora na vytápění. [30]

Tab. č. 4.5 Parametry konstrukcí obvodových stěn. [34]

Tab. č. 4.6 Spotřeba tepla a náklady na vytápění modelového domu. [34]

Tab. č. 4.7 Výpočtové údaje – vytápění pomocí vzduchotechniky. [34]

Tab. č. 4.8 Výpočtové údaje – vytápění pomocí tepelného čerpadla. [34]

Tab. č. 4.9 Výpočtové údaje pro dům a porovnání s variantami zateplení. [34]