

Tomáš DVORSKÝ¹, Martin ŠŤASTNÝ², Petra ŠILAROVÁ³

NOVÉ PLNIVO DO LEHKÝCH BETONŮ

NEW FILLER FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky experimentálního výzkumu zabývajícího se problematikou využití recyklované tvrdé polyuretanové pěny po ukončení životního cyklu o objemové hmotnosti 30 - 35 kg.m⁻³ jako nového plniva do lehkých betonů. Cílem bylo navrhnout optimální recepturu, s optimálním poměrem jednotlivých složek betonové směsi. U navržených experimentálních záměsích, byly sledovány následující vlastnosti: konzistence čerstvého betonu, objemová hmotnost čerstvého betonu, objemová hmotnost ztvrdlého betonu, krychelná a hranolová pevnost v tlaku.

Klíčová slova

Polyuretanová pěna, recyklace, lehký beton, mechanické vlastnosti.

Abstract

The article presents the results of an experimental research dealing with the utilisation of recycled rigid polyurethane foam after the end of its life cycle, with the bulk density of 30-35 kg.m⁻³, used as new filler for lightweight concrete. The objective of the research was to design an optimal recipe, with an optimal ratio of the individual components of the concrete mixture. The following properties of the prepared experimental mixtures were monitored: consistency of the concrete mixture, the bulk density of fresh concrete mixture, bulk density of hardened concrete, cube and prism compressive strength.

Keywords

Polyurethane foam, recycling, lightweight concrete, mechanical properties.

1 ÚVOD

Stavebnictví je výrobním odvětvím, které zpracovává značné množství surovin. S rostoucími nároky společnosti na stavební výrobu rostou i nároky na spotřebu stavebního materiálu. S tímto souvisí problematika dostupnosti těchto surovin a v konečném důsledku vede k nevratnému vyčerpání jejich zásob.

¹ Ing. Tomáš Dvorský, Institut environmentálního inženýrství a Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, Hornicko-geologická fakulta, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 70833 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 323 546, e-mail: tomas.dvorsky@vsb.cz.

² Ing. Martin Šťastný, Institut environmentálního inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 70833 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 241, e-mail: martin.stastny@vsb.cz.

³ Ing. Petra Šílarová, Institut environmentálního inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 70833 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 241, e-mail: petra.silarova@vsb.cz.

Jednou z možných cest získání vhodných materiálů pro stavební výrobu, je využití druhotných surovin. V dnešní době se již v hojné míře využívají odpadní materiály z metalurgického, elektrárenského a báňského průmyslu [1, 2, 3, 4]. V poslední době se využívají i plastové odpady například tepelně modifikovaný recyklovaný EPS [5]. Další z plastových odpadů, jehož objem se neustále zvyšuje, je tvrdá polyuretanová pěna. Již existují výsledky experimentálního výzkumu zabývající se problematikou zpracování drčené tvrdé PUR pěny jako plniva do stavebních směsí, přesněji do segmentu malt [6, 7, 8, 9, 10, 11]. Tvrdá polyuretanová pěna ve struktuře malty a betonu vylepšuje především hmotnostní a tepelně izolační vlastnosti, ale na úkor snížení pevnostních charakteristik.

Výsledkem aplikovaného výzkumu, který navázal na výsledky experimentálního výzkumu, zabývajícího se problematikou využití recyklované polyuretanové pěny, jako jediného plniva v tepelně izolační maltě je zateplení vnějších i vnitřních stěn referenčního domu, který byl postaven před rokem 1940 [12, 13].

2 MATERIÁLY

2.1 Tvrdá polyuretanová pěna

Tvrdou polyuretanovou pěnou rozumíme makromolekulární materiál, který po termickém vytvrzení už není možné dále tepelně zpracovávat. Dochází ke vzniku tzv. zesíťovaných polymerů, které vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť, kde vlivem teploty a tlaku se polyuretanová hmota napěňuje vzniklým oxidem uhličitým (CO_2) a vytváří tak uzavřenou mikroskopickou porézní strukturu.

Pro experimentální výzkum byla použita drčená polyuretanová pěna s označením 968-B81 o zrnitosti 4/8 mm a objemové hmotnosti 30 - 35 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, produkovaná firmou D&Daxner Technology s. r. o.



Obr. 1: BigBag s nadrcenou PUR pěnou



Obr. 2: Vzorek PUR pěny, zrnitost 4/8 mm

2.2 Cement

Jako hlavní pojivo v betonových směsích pro jednotlivé experimentální záměsi byly použity dva typy cementu. Jednalo se o: CEM I 42,5R a CEM II/S-V 32,5 R dodávané firmou Cement Hranice, a. s. Vlastnosti obou druhů cementů odpovídají normě ČSN EN 197-1.

2.3 Jemně mletý vápěnc

Pro experimentální betonové záměsi byl použit jemně mletý vápěnc, který sloužil jako přísada za účelem snížení vodního součinitele w (viz norma ČSN EN 206-1) a rovněž i za účelem snížení celkových nákladů na výrobu suché směsi pro výrobu betonu, kde jím byla nahrazována část složky cementu (viz tabulka 1). Jemně mletý vápěnc označením VMV 15/V vyrobený firmou Kotouč Štramberk, spol. s. r. o., byl vyráběn v kulovém mlýně semletím přírodního vápence na požadované parametry, a jehož chemické a fyzikální vlastnosti odpovídající normě ČSN 72 1217 a ČSN 72 1220.

2.4 Záměsová voda

Jako záměsová voda byla u všech experimentálních záměsí použita voda pitná.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZÁMĚSI PRO VÝROBU BETONU

Při návrhu složení jednotlivých experimentálních záměsí byla snaha o postupné nalezení optimálního poměru jednotlivých složek v závislosti na jejich hmotnostním množství s následným ověřením mechanických vlastností betonu. Základní složení zkušebních směsí tvořil hmotnostní poměr drcené polyuretanové pěny, cementu (CEM I 42,5R, CEM II/S-V 32,5 R) a jemně mletého vápence VMV 15/V. Byly tak získány experimentální záměsi D1 – D15, jejichž objemová hmotnost v suchém stavu se pohybovala od 240 kg.m⁻³ do 584 kg.m⁻³. Cílem byl takový návrh záměsí pro výrobu betonu na bázi polyuretanu, která by měla optimální pevnostní vlastnosti. Složení jednotlivých experimentálních záměsí popisuje tabulka 1.

Tab. 1: Hmotnostní zastoupení složek v jednotlivých experimentálních záměsích.

Označení záměsí	Měrná jednotka	PUR	Cement		Vápěnc VMV 15/V	Voda
			CEM I 42,5R	CEM II/S-V 32,5 R		
D1	kg na 1 m ³	40	272	-	272	187
D2	kg na 1 m ³	40	-	272	272	187
D3	kg na 1 m ³	40	272	-	272	350
D4	kg na 1 m ³	40	-	272	272	350
D5	kg na 1 m ³	40	-	544	-	350
D6	kg na 1 m ³	40	-	392	-	259
D7	kg na 1 m ³	40	-	196	196	259
D8	kg na 1 m ³	40	196	-	196	259
D9	kg na 1 m ³	40	-	200	-	144
D10	kg na 1 m ³	40	-	200	68	185
D11	kg na 1 m ³	40	-	260	68	221
D12	kg na 1 m ³	40	-	260	132	259
D13	kg na 1 m ³	40	260	-	132	259
D14	kg na 1 m ³	40	228	-	164	259
D15	kg na 1 m ³	40	-	228	164	259

Při přípravě betonové směsi na bázi polyuretanu je nutné si uvědomit, že jde o výrobu lehkého betonu o nízké objemové hmotnosti, kde jednotlivé komponenty se velmi výrazně liší svými měrnými hmotnostmi. Aby v tomto případě bylo možno získat homogenní směs, je třeba dosáhnout toho, aby zrna polyuretanu byla obalena dostatečnou vrstvou cementu, případně směsí cementu a vápence, která sníží nasákavost zrna polyuretanu vodou a tím i množství záměsové vody.



Obr.3: Suchá záměs 0% záměsové vody,



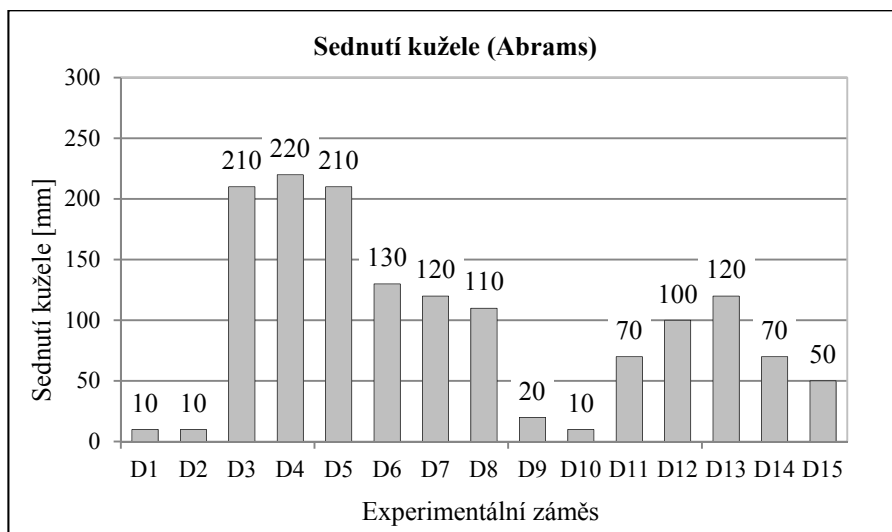
Obr.4: Mokrá záměs po aplikaci záměsové vody

4 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ VLASTNOSTI LEHKÉHO BETONU

V rámci experimentálního výzkumu byly na betonu ze záměsí D1 – D15 prováděny zkoušky pro stanovení mechanických vlastností betonu. Byla připravena zkušební tělesa (12 ks krychlí, 6 ks hranolů) z každé záměsi, na kterých byly měřeny hodnoty pevností v tlaku. Těsně po přípravě čerstvého betonu byla zjištěna jeho konzistence zkouškou sednutí kužele a objemová hmotnost.

4.1 Zkouška sednutí kužele

Velmi důležitou vlastností čerstvého betonu je jeho zpracovatelnost, což je souhrnný název pro ukládání, hutnění a dopravování. Nejběžnější zkouška je založena na určení sednutí kužele. Celá zkouška sednutí kužele čerstvého betonu se prováděla v souladu s normou ČSN EN 12350-2. Výsledné hodnoty zkoušky sednutí kužele se zařazením a určením konzistence jsou graficky zpracovány na obrázku 5.



Obr. 5: Graf zkoušky sednutí kužele

4.1 Stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Zkouška objemové hmotnosti čerstvé betonové směsi ČB byla provedena v souladu s normou ČSN EN 12350-6. Pro zkoušku ČB byly použity tři mělohmotné formy o hraně 150 mm ($V = 3,375 \text{ dm}^3$) a zjištěné hmotnosti m_1 . Plnění forem bylo provedeno ve dvou vrstvách čerstvým betonem, kde každá z vrstev byla hutněna po dobu 30 s na vibračním stolku typu VSB-40. Celková doba hutnění betonu tak činila 60 s. Úprava povrchu betonu do vodorovné polohy ve formách byla provedena pomocí hladítka a takto naplněná forma se zhutněným čerstvým betonem byla opět zvážena a zjištěna tak hmotnost m_2 .

Objemová hmotnost čerstvého betonu D_m byla vypočítána ze vztahu:

$$D_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

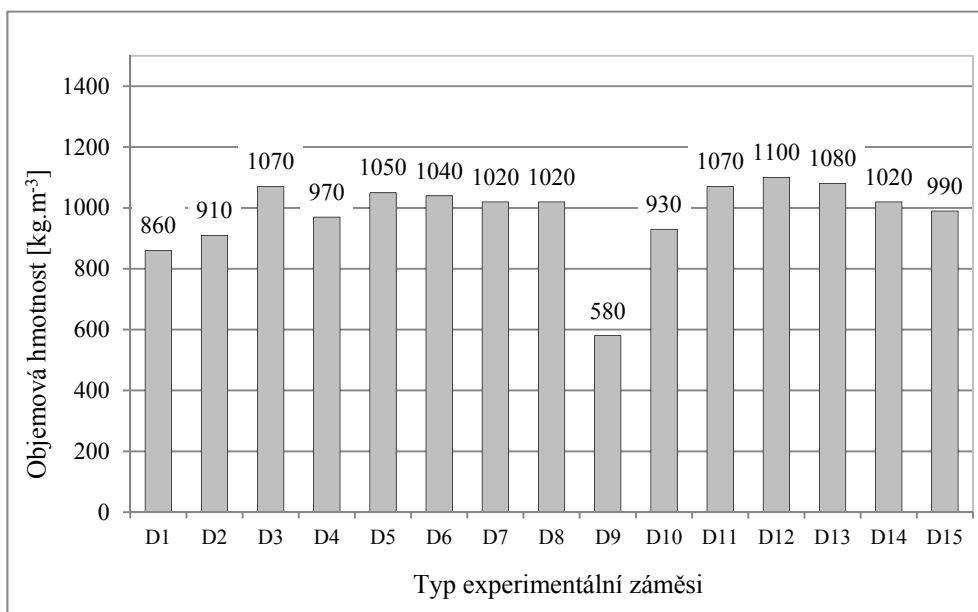
kde

D_m ... objemová hmotnost čerstvého betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

m_1 ... hmotnost prázdné formy [kg];

m_2 ... hmotnost naplněné formy [kg];

V ... objem formy [$= 0,003375 \text{ m}^3$]



Obr. 6: Graf stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Při srovnání s klasickým betonem, který je plněný převážně přírodním kamenivem a má objemovou hmotnost $\pm 2300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, je ze stanovené zkoušky zřejmé, že při použití drcené polyuretanové pěny dochází u všech záměsí D1 až D15 k výraznému snížení objemové hmotnosti. Ta se pohybovala v rozmezí hodnot 580 – 1100 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (viz obr. 6).

4.1 Stanovení krychlené a hranolové pevnosti betonu v tlaku

Pro stanovení krychlené a hranolové pevnosti betonu v tlaku bylo u každé z experimentálních záměsí D1 – D15 zhotoveno 12 ks zkušebních těles - krychlí ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$) a 6 ks zkušebních těles - hranolů ($100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$). Zkouška krychlené pevnosti betonu v tlaku byla prováděna v časových intervalech 2, 7, 14 a 28 dnů, zatímco stanovení hranolové pevnosti betonu v tlaku bylo

provedeno v časových intervalech 2 a 28 dnů v souladu s normou ČSN EN 12390-3 a ČSN EN 12390-7.

Výsledné krychelné (hranolové) pevnosti v tlaku f_c (f_p) byly pak získány, jako poměr odečtené síly na tlačném lisu při zlomu F [N] k tlačné ploše vzorku A_c [mm²].

$$f_{c,p} = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

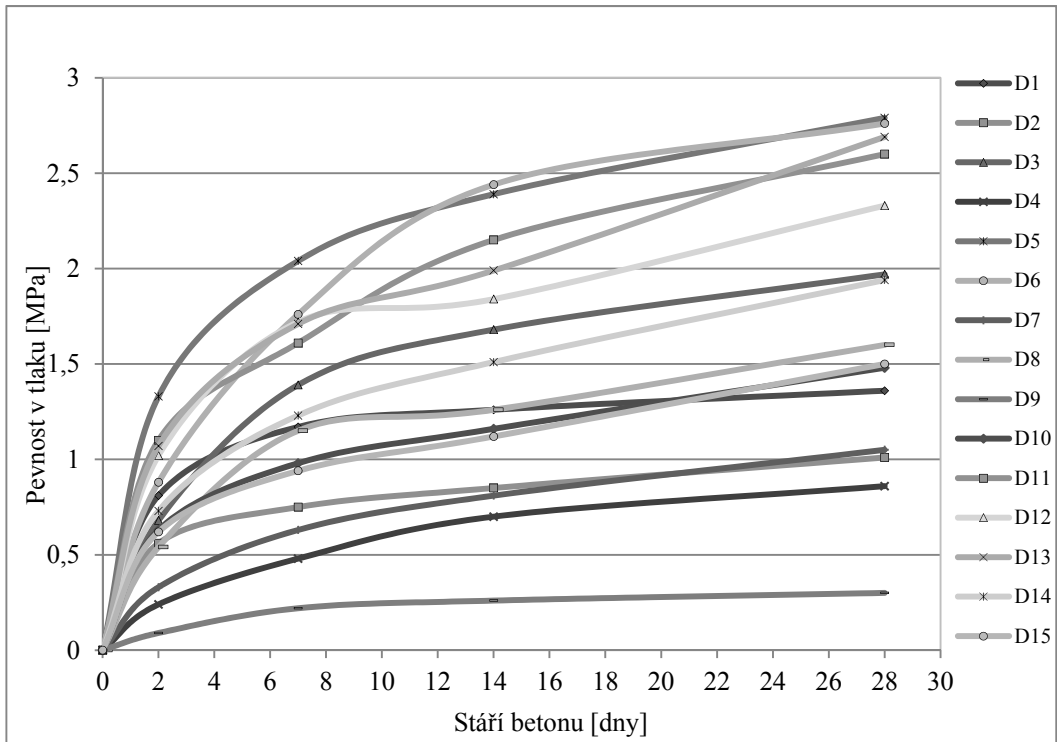
kde:

- $f_{c,p}$... pevnost v tlaku (krychelná, hranolová) [N.mm⁻² ≡ MPa];
 F ... maximální zatížení při porušení [N];
 A_c ... průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku (tlačná plocha) [mm²].

V tab. 2 jsou prezentovány výsledky krychelných a hranolových pevností po 28 dnech, společně s objemovými hmotnostmi lehkého betonu na bázi tvrdé polyuretanové pěny. Krychelné pevnosti se pohybovaly v rozmezí hodnot 0,30 – 2,79 MPa a hranolové pevnosti v rozmezí 0,33 – 3,40 MPa. Křivky nárůstu krychelných pevností jednotlivých experimentálních záměsí po 2, 7, 14, 21 a 28 dnech jsou uvedeny na obr. 7.

Tab. 2: Výsledky krychelné a hranolové pevnosti PUR betonu po 28 dnech stáří

Označení záměsí	Objemová hmotnost	Pevnost betonu po 28 dnech	
		Krychelná	Hranolová
	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]
D1	803	1,36	1,46
D2	817	1,01	1,12
D3	834	1,97	2,21
D4	725	0,86	0,89
D5	898	2,79	3,30
D6	859	2,76	3,40
D7	772	1,05	1,16
D8	819	1,60	1,92
D9	438	0,30	0,33
D10	785	1,48	1,30
D11	889	2,60	2,75
D12	911	2,33	2,45
D13	921	2,69	2,85
D14	846	1,94	2,05
D15	794	1,50	1,44

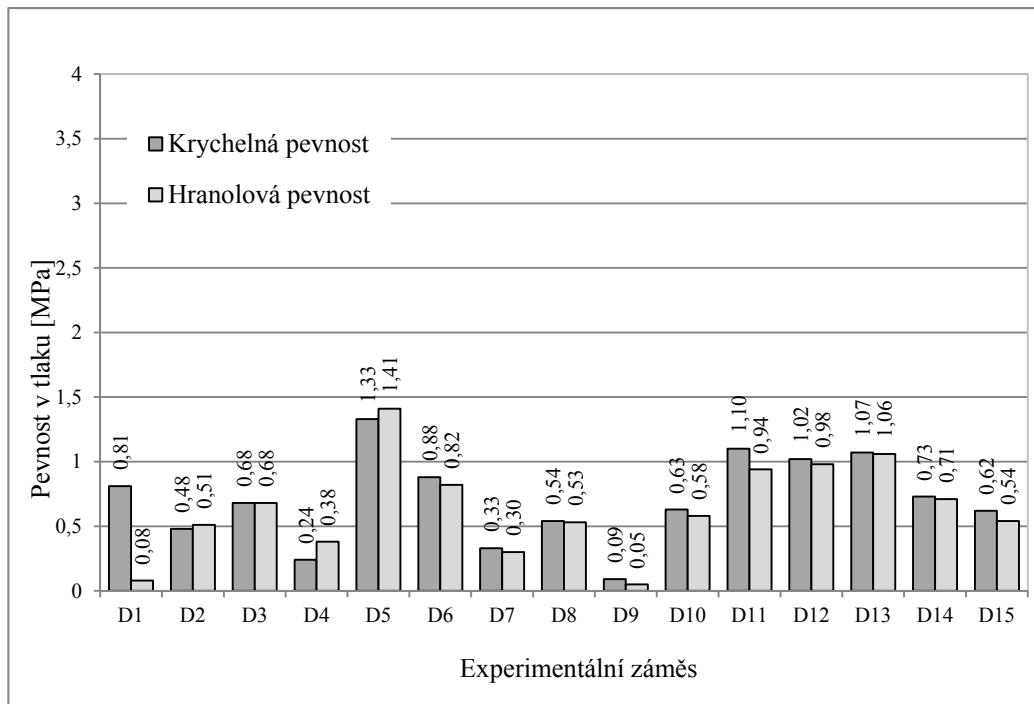


Obr. 7: Závislost krychlené pevnosti v tlaku na době zrání betonu

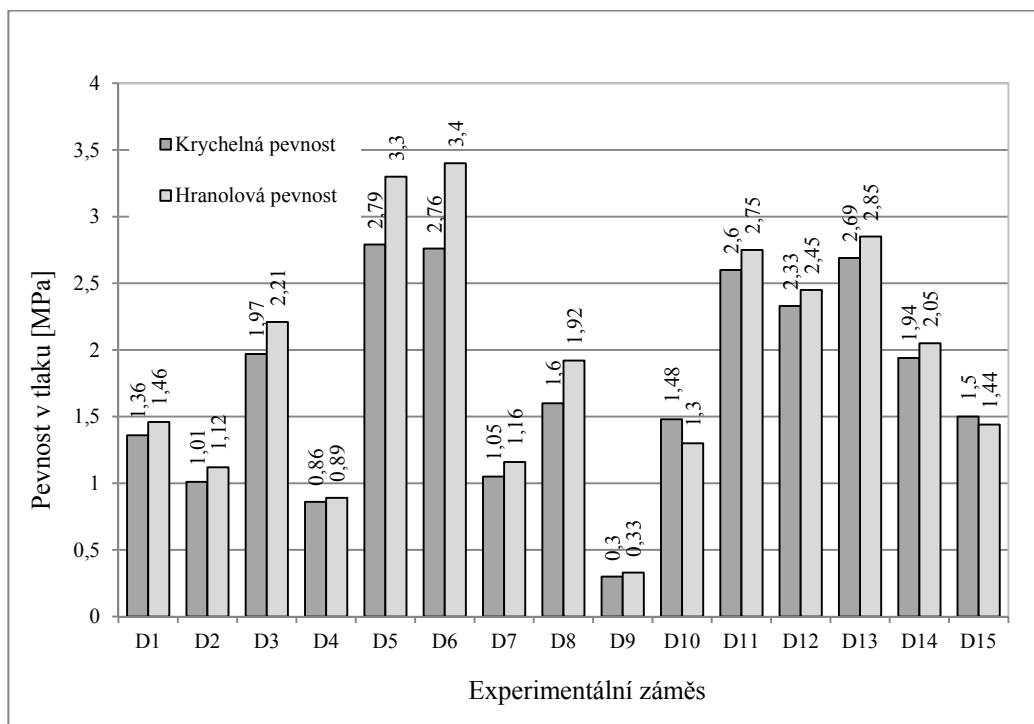
Z obr. 8 a 9, na kterých je srovnání krychlených a hranolových pevností ve stáří betonu 2 a 28 dnů je patrné, že u všech experimentálních záměsí byla pevnost po 2 dnech téměř srovnatelná, rozdíl se výrazněji projevil, až v koncové pevnosti (stáří 28 dnů), kdy u všech experimentálních záměsí, kromě záměsí D10 a D15, byla hranolová pevnost vždy vyšší, než krychlená. Tato skutečnost je dána tím, že při hutnění těchto lehkých betonů je cementový tmel vytlačován do stran, čili kolmo na směr hutnění, což způsobuje nárůst vrstvy cementového tmele v ose kolmé na směr hutnění. U žádné experimentální záměsí nebyla překročena hodnota pevnosti v tlaku 3,5 MPa. Zvýšení pevnosti je možné docílit několika způsoby:

1. přidáním kameniva;
2. úpravou poměru: cement - jemně mletý vápenec – voda;
3. vytvoření pórů v cementovém tmelu přidáním napěňovačů, čímž dojde k nárůstu obalové vrstvy kolem polyuretanového zrna pórovitou hmotou, jejíž pevnost je vždy větší než pevnost polyuretanového zrna, výsledná struktura směsi je tvořena dutinami vyplněnými polyuretanovou drtí, která je obalena vrstvou pórovitého cementového tmele.

U výše uvedených způsobů 1 a 2 dojde ovšem ke zvýšení objemové hmotnosti, pevnosti a zvýšení součinitele tepelné vodivosti λ .



Obr. 7: graf krychelné a hranolové pevnosti po 2 dnech



Obr. 8: graf krychelné a hranolové pevnosti po 28 dnech

3 ZÁVĚR

Experimentální výzkum prokázal, že tvrdou polyuretanovou pěnu po ukončení životního cyklu ve formě drti o velikosti zrna 4/8 mm a objemové hmotnosti $30 - 35 \text{ kg.m}^{-3}$, je možno využít jako plniva do lehkých betonů. Nový typ lehkých betonů je možné vyrábět a zpracovávat o různých objemových hmotnostech za předpokladu nízkých koncových pevností v tlaku.

Z navržených experimentálních záměsů D1 – D15, u kterých byla hledána optimální skladba receptury, bylo zkouškou sednutí kužele, stanovením krychelných a hranolových pevností v tlaku zjištěno, že experimentální záměs D11 vykazovala optimální hodnoty. Zkouškou sednutí kužele byla tato záměs definována, jako měkká (třída S2), tzn. dobře zpracovatelná. Objemová hmotnost čerstvého betonu D11 byla stanovena na 1070 kg.m^{-3} a koncové pevnosti v tlaku dosáhly hodnot $2,60 - 2,75 \text{ MPa}$.

Takovýto lehký beton by bylo možné využít v monolitických konstrukcích, nebo jako výplňový materiál např. ve vodorovných konstrukcích střeš, v podlahách, či stropních konstrukcích.

Jelikož je v současné době tento typ polyuretanových odpadů ukládán na skládky nebo spalován, jeví se využití těchto odpadů, jakožto nového plniva v segmentu lehkých betonů, jako jedno z možných řešení.

Další část experimentálního výzkumu se bude zabývat studiem struktury betonu na bázi polyuretanu, zkouškách mrazuvzdornosti a součinitele tepelné vodivosti.

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 podporovaného Operačním programem Výzkum a vývoj pro Inovace, financovaného ze strukturálních fondů EU a ze státního rozpočtu ČR. ED2.1.00/03.0082

LITERATURA

- [1] LEMBÁK, M., VÁCLAVÍK, V. K problematice využití odpadů z těžby černého uhlí pro stavební účely. In RECYKLING 2004 "Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin". Brno: VUT Brno, 2004, pp. 94 - 102. ISBN 80-214-2583-0.
- [2] VÁCLAVÍK, V., LEMBÁK, M., PLAČEK, V. Úprava jemně mleté strusky pro výrobu betonu a jeho fyzikálně mechanické vlastnosti. In Sborník Recyklace odpadů VIII. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, 329 - 335, ISBN 80-248-0560-X.
- [3] ŠTEVULOVÁ, N., VÁCLAVÍK, V., JUNÁK, J., GRUĽ, R., BAČÍKOVÁ, M. Utilization possibilities of selected waste kinds in building materials preparing. In: Proceedings of the SGEM 2008 : Modern management of mine producing, geology and environmental protection. Albena: STEF92 Technology Ltd, 2008, 193-200. ISBN 954918181-2.
- [4] SVARLA, J., SISOL M., BOTULA J., KOLESAROVA M., KRINICKA I., The potential use of fly ash with a high content of unburned carbon in geopolymers. Acta geodynamica et geomaterialia. 2011, vol. 7. No 2, 123-132. ISSN 1214-9705.
- [5] KAN, A. DEMIRBOGA, R. A novel material for lightweight concrete production. Cement and Concrete Composites. vol. 31, No. 7, 2009, 489-495.
- [6] GADEA, J. et al. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. Cement and Concrete Composites. vol. 32, No. 9, 2010, 672-677.
- [7] VÁCLAVÍK, V., DAXNER, J. Aplikace polyuretanových recyklátů v tepelně izolačních omítkových směsích. In: Sborník konference RECYCLING 2009. Brno: VUT v Brně 2009, 16 – 21. ISBN 978-80-214-3842.
- [8] VÁCLAVÍK, V., DAXNER, J. Plnivo na bázi polyuretanové pěny do izolačních malt a lehkých betonů. Stavebnictví. No. 9, 2010. 38-44. ISSN 1802-2030.

- [9] FRAJ, A. B., KISMI, M., MOUNANGA, P. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials.*, vol. 24, No. 6, 2010, 1069-1077. ISSN 0950-0618.
- [10] NABAJYOTI, S., DRITO, J.: Use of plastic waste as aggregate in cement Mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials.* 2012, vol. 34. September 2012, 385–401. ISSN 0950-061.
- [11] MOUNANGA, P., GBONGBON, W., POUILLAIN, P., TURCRY, P. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites.* 2008, vol. 30, No. 9, 806–814. ISSN 0958-9465.
- [12] VÁCLAVÍK, V., DAXNER, J. The application of the heat-insulating plaster on a polyurethane base a reference house. In: *Proceedings of the 13th Conference on Environment and Mineral Processing.* Ostrava: VSB-TU Ostrava, 2009, 245-249. ISBN 978-80-248-1995-2.
- [13] VÁCLAVÍK, V., DAXNER, J. Zateplení referenčního domu tepelně izolační omítkou na bázi polyuretanu. *Informace ČSSI OP Ostrava – Jevy, konání a díla.* 2009, vol. 15, No. 1, 2009, 37-41. ISSN 1213-4112.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc., Ústav chemie, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Doc. Ing. Jaroslav Výborný CSc., Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební, ČVUT v Praze.