

# Přehledová studie využití odpadních minerálních vláken ve stavebnictví

**Lenka VAVRUŠKOVÁ, René ČECHMÁNEK, Ivana CHROMKOVÁ**

Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., Hněvkovského 30/65, 617 00 Brno,  
e-mail: [vavruskova@vush.cz](mailto:vavruskova@vush.cz), [cechmanek@vush.cz](mailto:cechmanek@vush.cz), [chromkova@vush.cz](mailto:chromkova@vush.cz)

## Souhrn

Odpady z minerální vlny (skleněné a čedičové) představují významný problém v oblasti recyklace stavebních materiálů. Tyto odpady vznikají nejen při výrobním procesu jako odřezky a odprašky (této problematice jsme se v našem výzkumu již věnovali<sup>1</sup>). Velké objemy tohoto odpadu vznikají i při demolici a rekonstrukci zateplovacích systémů budov, optimální využití tohoto odpadu v současnosti intenzivně zkoumáme. Překážkou při recyklaci je znečištění minerální vlny ostatním stavebním materiálem. Minerální vlna je v současnosti jako odpad skládkována.

Evropská legislativa zavádí poplatky za skládkování stavebních odpadů, a tím motivuje k vývoji recyklačních technologií. Vzhledem k rostoucímu objemu odpadu z minerální vlny, který se odhaduje na 2,82 milionu tun do roku 2030, je nezbytné hledat udržitelné řešení pro její opětovné využívání. Klíčovými faktory pro efektivní recyklaci jsou správné třídění a separace jednotlivých složek materiálů, což zatím v ČR a na Slovensku není dostatečně vyvinuto.

Recyklace odpadu z minerální vlny může přispět k ochraně životního prostředí a snížení nákladů na skládkování, pokud budou zajištěny vhodné technologie pro jeho zpracování. Studium literatury byly zjištěny jako nejčastější směry použití odpadní minerální vlny – alternativní složka stavebních pojiiv a náhrada jemných a velmi jemných podílů kameniva (přísada pro vznik nových izolačních hmot). Zaměření naší další týmové práce je v oblastech vývoje betonových prvků, omítek a alkalicky aktivovaných hmot.

**Klíčová slova:** tepelná izolace budov, odpadní minerální vlna, čedičová a skelná vlákna, recyklace vláken, využití odpadního izolačního materiálu.

## Shrnutí současného stavu v oblasti minerální izolace

Odpady z minerální vlny (skleněné nebo čedičové) mohou vznikat již při její výrobě jako odřezky při jejím formátování nebo jako odprašky při jejím zpracování. Tyto odpady většinou nejsou znečištěné a jsou znovu využívány ve výrobě, nebo jsou kompaktovány na brikety, takže nezůstává žádný nevyužitý odpad. Jemné odprašky z filtrů mohou být podle různých studií použity například při výpalu slínku nebo při vytváření žáruvzdorných materiálů<sup>2</sup>.

Odpadní minerální vlna přímo z výrobního procesu je lépe zpracovatelná díky své vysoké čistotě, než vlna, která se stala stavebním odpadem. Důležitou roli u této odpadní minerální vlny hraje metoda předběžné úpravy, tj. rozmělnování vláken a dosažení homogenity<sup>3</sup>. Množství minerální vlny, která se používá v zateplovacích systémech staveb, tvoří asi 60 % z celkového trhu izolačních materiálů. Při renovaci nebo demolici staveb vzniká velké množství odpadních izolačních materiálů<sup>4</sup>.

Zateplování minerální vlnou se začalo intenzivně využívat od 70. a 80. let 20. století a odhaduje se, že doba životnosti zateplovacích systémů je minimálně 30 let. To znamená, že v blízké budoucnosti lze očekávat rozsáhlé rekonstrukce staveb, které byly zatepleny minerální vlnou. I když odpady z minerální vlny tvoří v České republice pouze malý podíl na celkovém objemu stavebních a demoličních odpadů, je nezbytné hledat efektivní způsoby jejich recyklace. S rostoucím počtem budov zateplených systémy, jejichž životnost se blíží ke konci, bude stále více potřeba řešit, jak s těmito odpady nakládat. Recyklace minerální vlny je důležitá nejen z hlediska ochrany životního prostředí, ale i vzhledem k rostoucí poptávce po technologiích pro opětovné využívání těchto materiálů.

Problémem recyklace odpadu z minerální vlny je složitost oddělení jednotlivých komponent kompozitního systému, který se běžně používá pro zateplení obvodových pláštů budov. Tento systém zahrnuje různé materiály, jako jsou stavební lepidla, mechanické spojovací prostředky, armovací sítě, základní nátěry, vrchní omítky a další, což činí recyklaci náročnou. V důsledku této složitosti je častější volba skládkování než recyklace, což není optimální z hlediska ekologického, ani ekonomického.

Dalším problémem je, že minerální vlna vznikající jako odpad při demolici nebo rekonstrukci staveb může být v některých zemích klasifikována jako nebezpečný odpad, zejména pokud byla vyrobena před rokem 1997. V té době byly při výrobě minerální vlny používány starší technologie, které mohly zahrnovat i azbest, což představuje vážné zdravotní riziko.

Klíčovým aspektem správného nakládání s odpady je třídění materiálů. Po vytrídění, zpracování, separaci a případně pulverizaci se může jednat o cennou surovinu do řady stavebních materiálů. Čím lépe jsou stavební a demoliční odpady tříděny, tím je recyklace efektivnější a kvalita recyklovaného materiálů vyšší. Tento systém třídění, sběru a zpracování odpadu z minerální vlny dosud nebyl nastaven v ČR ani na Slovensku. Minerální vlna je většinou skládkována současně s jiným stavebním odpadem. Vzhledem k tomu, že Evropská unie klade důraz na recyklaci stavebního a demoličního odpadu a zavádí poplatky za skládkování, se stále více zvyšuje motivace pro hledání a implementaci efektivních metod recyklace těchto materiálů. Také v České republice je skládkování minerální vlny zpoplatněno, což činí skládkování tohoto odpadu nákladnějším a podporuje rozvoj recyklačních technologií<sup>5</sup>.

Objem celosvětové produkce odpadu z minerální vlny je 2,54 milionů tun. Odhaduje se, že objem odpadní minerální vlny roste lineárně z 2,25 milionu tun v roce 2010 na 2,54 milionu tun v roce 2020. Očekává se, že v roce 2030 vzroste na 2,82 milionu tun<sup>3</sup>. Je třeba poznamenat, že přesný odhad objemu odpadu z minerální vlny je problematický kvůli roztříštěnosti dostupných údajů<sup>4</sup>.

## Minerální vlna, její výroba a vlastnosti

Termín „vlna“ je obecný název pro vláknité materiály, které vznikají zvlákněním nebo tažením roztavených minerálů. Hlavními složkami jsou  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$ , zatímco ostatní oxidy jsou považovány za nečistoty<sup>6</sup>. Chemické složení vlny závisí na použitých surovinách a u minerální vlny a skleněné vlny se obvykle mírně liší. Minerální vlna je uměle vyráběné anorganické vlákno nejčastěji z čedičové horniny. Skleněná vlna se vyrábí z křemene, sody a vápence, ale výhodně lze použít i recyklované sklo.

Odpady z výrobního procesu minerální vlny (ořezy z formátování atd.) lze znovu použít do procesu výroby. Vyrobená vlna má vlákna do desek pojená nejčastěji fenolformaldehydovou pryskyřicí, která může tvořit až 10 % hmot. konečného výrobku. Jako maziva se obvykle používají minerální nebo silikonové oleje v množství do 1 % hmot. konečného produktu. Vrstva minerální vlny může být také laminována například hliníkovou fólií, netkanými rohožemi ze skleněných vláken nebo kraftovým papírem.

Nejdůležitější vlastností minerální vlny je její tepelná vodivost (0,035 – 0,045 W/(m·K)). Pokud v konstrukci nedošlo k jejímu vystavení povětrnosti, i po cca 40 – 50 letech zůstává tepelná vodivost cca 0,04 W/(m·K). Jak minerální vlna i skelná vlna jsou klasifikovány jako nehořlavé (minerální vlna třída A1 nebo A2; skelná vlna třída A2). Recyklovaná minerální vlna může obsahovat různé nečistoty (součásti minerální vlny z výroby: pojiva, maziva, kraftový papír nebo hliníkové vrstvy; ze stavebního užití: armovací tkaniny, fólie, těsnicí pásy, spojovací prvky, případně biologická kontaminace – plísně a bakterie).

K zajištění vhodnosti odpadu z minerální vlny pro různá řešení opětovného použití je však zapotřebí více výzkumu. Některé systémy kategorizace nebezpečných látek klasifikují odpad z minerální vlny jako potenciálně karcinogenní látku, pokud je index rozpustné složky vyšší než 18 % a průměr vláken je < 6  $\mu\text{m}$ . Nebezpečí zdravotních rizik způsobených vlákny minerální vlny je velmi nízké nebo žádné, a proto by měly být klasifikační systémy vyhodnoceny tak, aby zbytečně nebrzdily recyklační potenciál odpadu z minerální vlny. Skutečná rizika pro zdraví by však neměla být opomíjena<sup>4</sup>.

## Využitelnost odpadní minerální vlny

S ohledem na vysoký obsah chemicky inertních sloučenin, jako je oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ) a oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), které zlepšují vlastnosti požární odolnosti, se odpadní minerální vlna používá hlavně jako plnivo v kompozitních materiálech<sup>1,3</sup>.

V další nalezené studii se autoři Yliniemi a kolektiv<sup>7</sup> věnují zkoumání, jak různé mechanismy drcení ovlivňují fyzikální vlastnosti minerální vlny, včetně vzhledu, objemové hmotnosti a délky a šířky vláken. Výsledky studie ukazují, že metody založené na kompresi (vibrační kotoučový mlýn a hydraulický lis) zcela narušují vláknitost minerální vlny, zatímco metody založené na vysokých řezných rychlostech ovlivňují objemovou hmotnost a délku vláken jen mírně. Kromě toho tato studie identifikuje rychlou metodu, kterou lze novým způsobem použít k analýze velkého počtu vláken minerální vlny.

Odpad z minerální vlny tvoří hmotnostně jen malý zlomek celkového stavebního a demoličního odpadu, přesto vyžaduje velké přepravní a skládkovací kapacity kvůli své nízké objemové hmotnosti. Pro zvýšení jeho využitelnosti je nezbytné porozumět fyzikálním a chemickým vlastnostem tohoto odpadu, abychom ho mohli využít, např. jako vláknovou výztuž v kompozitech nebo jako doplňkový cementový materiál. V další práci se Yliniemi s kolektivem<sup>8</sup> věnoval chemické a fyzikální charakterizaci 15 vzorků skleněné a 12 vzorků kamenné vlny různého stáří odebraných z různých míst po celé Evropě. Současně provedl i rozsáhlou rešerši odborné literatury a uvádí tak chemické složení dalších 61 vzorků skleněné a kamenné vlny.

Vzorky skelné vaty vykazují malé rozdíly ve svém chemickém složení a výsledky složení jsou podobné běžnému sodno-vápenato-křemičitému sklu (4 – 11 % hmot.  $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Kamenná vlna má složení podobné čedičovému sklu, ale s různým obsahem vápníku, hořčíku a železa (5 – 13 % hmot.). Potenciálně toxické prvky (Cr, Ba, Ni, Cu a Pb) jsou přítomny v minerální i skelné vlně v nízkých koncentracích (<0,2 %). Oba typy vlny obsahují organickou pryskyřici (skelná vlna 8 % hmot.; minerální vlna 3 % hmot.), která se může po zahřátí nebo kontaktu s alkalickým roztokem rozložit na menší molekulární částice a amoniak. Odpady z minerální vlny mají relativně podobné rozložení délky a šířky, navzdory stáří a typu minerální vlny. Celkově mají oba typy odpadů z minerální vlny homogenní chemické a fyzikální vlastnosti ve srovnání s mnoha jinými minerálními odpady, díky čemuž je jejich využití jako druhotné suroviny slibné. Přesto je třeba brát v potaz vysoké procento respirabilních vláken (kolem 50 %), zejména při zpracování starých odpadů z minerální vlny, které mohou mít nízkou biologickou rozpustnost, a proto mohou být karcinogenní. Rozlišení mezi nebezpečnými a zdravotně nezávadnými vlákny minerální vlny na základě jejich chemického složení je náročné a nebezpečné vlastnosti minerální vlny by měly být stanoveny testy biologické rozpustnosti in vivo.

## Alternativní složka pojiv

Minerální vlna má, díky svému vysokému obsahu amorfního  $\text{SiO}_2$  (až 70 %) a  $\text{CaO}$  (až 20 %), potenciál být aktivní pucolánovou složkou. Protože pucolánová reakce probíhá na povrchu částic oxidu křemičitého, je měrný povrch nejdůležitějším faktorem pro průběh pucolánové aktivity<sup>2</sup>.

Během procesu výroby minerální vlny se tvoří odpadní materiály, jako je vláknitý odpad a prach. Na jedné straně lze odpad z vláken minerální vlny recyklovat a vrátit do výrobní linky, ale prach z filtrů se obvykle pouze skládá. Na druhé straně lze odpad z minerální vlny použít jako vhodnou náhradu hrubého a jemného kameniva, čímž se ušetří náklady na přírodní kamenivo a minimalizuje se dopad likvidace na životní prostředí. Někteří výzkumníci<sup>5,11,12</sup> také poznamenávají, že složení odpadu z vláken minerální vlny je podobné jako u jiných pucolánových materiálů, jako je popílek, mletá granulovaná vysokopecní struska a mikrosilika.

Tým autorů Kubiliute, Kaminskas a Kazlauskaitė<sup>5</sup> se ve své studii zaměřil na možnost využití prachu ze vzduchových filtrů během výroby minerální vlny jako mikroplniva do portlandského cementu. Výsledky ukázaly, že přísada odpadního prachu zvyšuje počáteční hydrataci cementu. Při použití 5, 10 a 15 % hmot. prachového aditiva byla pevnost vzorků v tlaku po 28 a 90 dnech hydratace větší než u vzorku čistého portlandského cementu. Bylo zjištěno, že odpady z minerální vlny mohou v závislosti na velikosti částic působit buď jako cementový materiál, nebo jako inertní plnivo v kompozitech na bázi

cementu. Kromě toho bylo zjištěno, že 10 – 40 % hmot. odpadní přísady z minerálních vláken snižuje pórovitost a mění mikrostrukturu kompozitů na bázi cementu, což snižuje migraci chloridových a jiných iontů.

Studie autorů Cheng, Ling a Chuang<sup>9</sup> zkoumala vlastnosti kompozitů na bázi cementu s přidavkem různých odpadů z minerální vlny (distribuce částic v rozmezí 17 – 250  $\mu\text{m}$ , z nichž 30 % je menší než 150  $\mu\text{m}$ ). Přídavek 10 % odpadu z minerální vlny do kompozitů na bázi cementu (w/c 0,55 a 0,65) způsobil v porovnání s kontrolními vzorky:

- zvýšení pevnosti v tlaku o 19 % a 18 %,
- zvýšení pevnosti v tahu při štípání o 33 % a 26 %,
- snížení odolnosti proti oděru o 4 % a 5 %,
- snížení absorpce o 33 % a 28 %,
- zvýšení odporu o 251 % a 253 %,
- snížení celkového průchodu náboje o 73 % a 70 %.

Odpad z minerální vlny lze použít jako částečnou náhradu jemného kameniva a doplňkový pojivový materiál v závislosti na velikosti jeho částic (u částic menších než 75  $\mu\text{m}$  pucolánová reakce). Hrubší částice minerální vlny mají potenciál zachytit/minimalizovat vznik smršťovacích trhlin a inhibují vnitřní šíření trhlin.

Cílem výzkumu týmu M. G. Mediros<sup>10</sup> bylo zjistit pucolánový potenciál odpadní minerální vlny Rockwool, která je převážně vyráběná z čediče. Největší inovací této práce byla analýza možnosti a efektu nahrazení portlandského cementu odpadem minerálních vláken Rockwool. Výsledky provedených testů ukazují, že odpad Rockwool je klasifikován jako třída II A, tj. neinertní (ne nebezpečný), lze ho charakterizovat jako amorfni pevnou látku. Pozorování pasty hydroxidu vápenatého s mletými minerálními vlákny v SEM (28 dnů stáří) a výsledky Chapelleova testu neumožnily prokázat pucolánovou reakci mezi odpadem Rockwool a hydroxidem vápenatým. Zdá se však, že pucolánová reakce začíná později, což ukazují další pozorování v SEM a provedená termogravimetrická analýza ve vzorcích po 90 dnech.

Další studie<sup>11</sup> byla zaměřena na hodnocení vlastností kompozitů na bázi cementu s použitím různých obsahů odpadní minerální vlny (10 %, 20 %, 30 % a 40 % hmot. cementu) jako částečné náhrady portlandského cementu v maltách. Výsledky testů ukazují, že kompozity obsahující odpady z minerální vlny mohou zlepšit mechanické vlastnosti a snížit propustnost.

Studie provedená týmem Wei-Ting Lin<sup>12</sup> se zaměřuje na zkoumání vlastností kompozitních materiálů na bázi cementu, do kterých byl přidán různý podíl recyklované minerální vlny, a porovnává je s kompozity obsahujícími popílek a mletou granulovanou vysokopecní strusku (GGBS). Recyklovaná minerální vlna byla rozdrčena na částice menší než 75  $\mu\text{m}$  a na základě chemického složení a distribuce velikosti částic vykazuje podobné vlastnosti jako jiné pucolánové materiály, jako jsou popílek a GGBS. To znamená, že recyklovanou minerální vlnu lze využít jako doplňkový cementový materiál, který má podobný účinek na zpevnění směsi. Experimentální výsledky ukázaly, že částečné nahrazení cementu recyklovanou minerální vlnou přináší zlepšení v několika klíčových aspektech, jednak významně zvyšuje pevnost v tlaku a současně pozitivně ovlivňuje strukturu pórů v cementové matici. Tento efekt se projevuje zejména při použití náhradní dávky mezi 10 % až 30 % cementu. Studie naznačuje, že recyklovaná minerální vlna je účinnou přísadou, která může zlepšit mechanické vlastnosti betonových kompozitů. V tomto kontextu by mohla být recyklovaná minerální vlna zajímavou alternativou k tradičním přísadám, jako je popílek nebo GGBS.

## Alternativní surovina – malta

Kolektiv Jana Trejbal<sup>4</sup> pracoval na vývoji omítkové malty s využitím odpadních minerálních vláken. Odpad v podobě prachových částic zachycených na dvojitým filtru recyklační linky byl v omítkové směsi použit jako mikroplnivo. Cílem bylo použít co nejvíce recyklovaného materiálu při zachování mechanických vlastností referenční malty (standardní směs bez přísad). Bylo navrženo šest směsí lišících se od sebe množstvím použitého recyklovaného odpadu od 0 do 1,0 % hmot. z celé směsi. Použití mikrovláken potvrdilo očekávané funkce v maltové směsi:

- náhrada jemné frakce přírodního kameniva (prachové částice),
- náhodně rozptýlená a orientovaná mikrovýztuž (krátká vlákna),
- shluky vláken jako izolační kamenivo.

K. Kalinowska-Wichrowska s kolektivem<sup>13</sup> prezentuje výsledky výzkumu, který potvrzuje možnost opětovného využití odpadních stavebních materiálů jako náhrady přírodního kameniva. Pro výzkum byly použity jemné frakce recyklovaného betonu, odpadních izolačních materiálů (kamenná vlna a sklolaminát) a recyklovaný písek. Vlastnosti zkoumaných receptur byly porovnávány na základě výsledků pevnosti v tlaku, pevnosti v ohybu, nasákavosti, povrchové tvrdosti (Shore D) a studia mikrostruktury (SEM). Výsledky ukazují, že všechny popisované materiály by mohly být přijatelným řešením pro redukci používání přírodních zdrojů.

Diplomová práce Bc. Čermáka<sup>14</sup> se věnuje možnosti využít minerální vlákna v cementových maltách a stěrkových a lepicích hmotách. Minerální vlákna v cementové maltě mohou snižovat objemovou hmotnost a součinitel tepelné vodivosti, vliv mají i na pevnostní charakteristiky. Minerální vlákna v cementové maltě výrazně snižují součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  a zlepšují její izolační schopnost. Příklad minerálních vláken do průmyslově vyráběné lepicí a stěrkové hmoty působil při nanášení vady povrchu stěrky. Využití vláken je možné, ale není zcela bez problémů.

C. P. Ramírez s kolektivem<sup>15</sup> se věnovala výzkumu trvanlivosti cementových malt s přidavkem odpadní izolační vlny. Příspěvek o výsledcích experimentů podrobně popisuje výrobu vzorků cementové malty obsahující různé typy vláken z izolačního odpadu (různé druhy: odpad ze skelných vláken, odpad z minerální vlny a směsný odpad). Na vzorcích malt byla testována mrazuvzdornost, krystalizace solí, propustnost vodní páry, obsah uzavřeného vzduchu a doba zpracovatelnosti. Studované malty vykazují dobré vlastnosti při zmrazování, což zaručuje jejich použití ve venkovním prostředí. Malty prokázaly nižší odolnost vůči krystalizaci solí v důsledku zvýšení jejich porézních struktur. V důsledku kapilárního působení jsou tyto malty náchylnější k transportu kapalin ve svém pórovém prostředí (roztok vody, solí).

Cílem práce týmu P. O. Awoyera<sup>16</sup> bylo zhodnotit použití minerální vlny a rýžové slámy ke zlepšení tepelně izolačních vlastností malt z portlandského cementu. Vzorky cemento-pískové malty (40x40x160 mm) byly vyrobeny s přidavky minerální vlny a rýžové slámy od 0 do 50 % hmot. Porovnávány byly referenční směsi (bez přidavku) s modifikovanými recepturami. Sledované vlastnosti – nasákavost, pevnost v ohybu a tlaku, tepelná vodivost a mikrostruktura pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Výsledky pro malty s minerální vlnou a vlákny rýžové slámy vykazovaly významný pokles tepelné vodivosti malty, tj. zlepšení její izolační schopnosti. Pevnost v tlaku u většiny modifikovaných vzorků klesla, ale byl zaznamenán nárůst pevnosti v ohybu. Provedené zkoušky prokázaly možnost použití vybraných vláken pro izolační malty z portlandského cementu.

### **Alternativní surovina – malty s požární odolností**

Cílem výzkumu provedeného týmem C. P. Ramírezové<sup>17</sup> bylo analyzovat požární odolnost cementových malt s minerální vlnou z recyklace stavebních a demoličních odpadů. Týmem byl navržen experimentální plán pro analýzu termomechanického chování před a po testování malt s různými typy recyklovaných vláken. Vzorky malt s recyklátem byly vystaveny přímému ohni dosahujícímu maximální teploty 700 °C. Hodnoty pevnosti v tlaku všech malt vystavených vysoké teplotě klesají, i když zůstávají na optimálních hodnotách pro použití podle normových požadavků. Výsledky ukazují, že povrchová tvrdost všech malt se po požáru prakticky nemění, zatímco malty s přidavky vláken dosáhly výrazně lepších pevností v ohybu po požární zkoušce ve srovnání s referenční maltou. Cementové malty se zbytky minerální vlny jsou nehořlavé a neuvolňují dusivé plyny a výpary v případě požáru. Při teplotách do 700 °C si zachovávají pevnosti a mají velmi nízkou tepelnou vodivost, takže by dokázaly ochránit další prvky hořlavých materiálů a zabránit tak šíření požáru. Přidání odpadních vláken může být, z hlediska mechanicko-tepelného chování po požáru, udržitelnou alternativou k běžně používaným komerčně používaným vláknům.

Kolektiv A. Bala<sup>18</sup> se věnoval posouzení vlivu vyztužení skelnou vatou a žáruvzdorného povlaku na chování samozhutitelné malty (SCM) při běžných a zvýšených teplotách (200, 400, 600, a 800 °C).

16 receptur SCM malty bylo navrženo s 25 % popílku a s použitím přídatku (0; 0,5; 1 a 1,5 %) a měnícím se efektivním poměrem vody k cementu (w/c: 0,43; 0,49; 0,55 a 0,70). Na čerstvých maltách byla měřena reologie pomocí rozlité kužele, „V – nálevky“ a reometru BT2. Dále byla vyrobena zkušební tělesa (krychle 100x100x100 mm a trámce 75x75x300 mm) a jejich další vlastnosti byly zjišťovány po 28 dnech zrání. Část zkušebních těles byla povrchově ošetřena tepelně odolným nátěrem. Jde o nátěr dodávaný v práškové podobě (fa UGAM Technology, Vadodara, Gujrat, Indie) a podle EDX analýzy obsahuje tyto hlavní složky: oxidy prvků Al, Si a Ti. Aplikace tepelně odolného povlaku byla významnou ochranou vzorků SCM až do maximální teploty ohřevu 800 °C, kdy došlo k nepatrnému poklesu mechanických vlastností, zejména pevnosti. Vzorky malt bez povrchového ošetření nátěrem měly naopak, vlivem působení vysokých teplot, velké ztráty mechanických vlastností (asi 45 až 65 % pevnosti). Termogravimetrická (TG) analýza prášku SCM odhalila tepelnou stabilitu směsi SCM až do 1000 °C, kdy k významné ztrátě hmotnosti došlo zahřátím na teplotu 400 °C (ztráta 0,3 %) a 800 °C (7,5 %).

### Alternativní surovina – lehký beton

Perspektivním směrem rozvoje efektivních recyklačních technologií může být opětovné použití odpadů z minerální vlny v kompozitech na bázi cementu. Řada výzkumů prokazuje postupné nahrazování přírodního kameniva v betonech různými druhy odpadu. Mletý odpad z minerální vlny s distribucí velikosti částic v rozmezí od 17 do 250 µm lze použít jako náhradu jemného a ultra jemného kameniva se zlepšením hlavních vlastností výrobku<sup>2</sup>.

Výzkum použití vláken minerální vlny v oblasti vývoje lehkého betonu (LWC) je vzácný. Cílem studie provedené týmem Y. Z Shyong<sup>19</sup> bylo zkoumat fyzikální a mechanické vlastnosti LWC s použitím vláken minerální vlny (0 – 15 %) a s různým poměrem záměsové vody (w/c: 0,4; 0,5 a 0,6). Navrženo bylo 21 směsí a sledovány byly tyto vlastnosti: hustota, pórovitost, nasákavost, pevnost v tlaku, pevnost ve smyku a v ohybu. Výsledky ukázaly, že při dávce 15 % minerální vlny došlo ke značnému snížení objemové hmotnosti LWC (až 73% snížení). Objemové hmotnosti vzorků pro obsah vláken od 2,5 do 10 % jsou 800 až 2000 kg/m<sup>3</sup>, což lze klasifikovat jako LWC. Pouze určitá receptura splnila požadavky použití LWC jako nosné vnitřní stěny. Klíčovou roli v přidávání minerální vlny do LWC hraje velikost a distribuce vláken v objemu hmoty a je takto následně ovlivněna morfologie, velikost pórů, a tedy schopnost zvukové a tepelné izolace.

### Alternativní surovina – keramika

Experimentální studie provedená Korpajevem s kolektivem<sup>20</sup> zkoumala použití mletého odpadu z kamenné vlny (SWW) na vlastnosti pálených hliněných cihel. Pro stanovení maximálních směšovací poměrů byly vzorky cihel připraveny ze směsí jílu/SWW v poměrech 95/5, 90/10, 87,5/12,5 a 82,5/17,5 hmot. Po výpalu (850, 950 a 1050 °C) byly stanoveny fyzikální, tepelné a mechanické vlastnosti cihel. Výsledky prokázaly, dle procentuálního podílu SWW vneseného do výrobní suroviny, že může dojít ke snížení objemové hmotnosti pálených cihel až o 13 %. Vypálené cihly (výpal 1050 °C) s přídatkem 10 % SWW dosáhly zvýšení tepelné izolace až o 20,75 %, pozitivní vliv měl přídatek i na trvanlivost (zejména mrazuvzdornost). Podle zjištění lze použít při výrobě cihel jako maximální míru náhrady jílu 17,5 % SWW. Jde tak recyklovat velké množství odpadu a zároveň vyrobit cihly s požadovanými vlastnostmi.

Chen s kolegy<sup>21</sup> provedl studii, která zkoumala opětovné použití minerální vlny a recyklovaného skla při výrobě keramických pěn. Při spékání minerální vlny a odpadního skla bylo jako pěnídla použito SiC. Cílem výzkumu bylo porozumět vlivu složení a podmínek slinování na vlastnosti a mikrostrukturu keramické pěny. Optimální skladba keramické pěny byla tvořena 40 % hmot. odpadní minerální vlny, dále podíly odpadního skla a odpadního křemičitého písku a 2 % hmot. SiC, spékáných při 1170 °C (rychlost ohřevu 20 °C/min, 20 min výdrž při max. teplotě). Vyrobene keramické pěny měly objemovou hmotnost 0,71 g/cm<sup>3</sup> a rovnoměrné rozložení velikosti pórů. Výzkum ukazuje, že z odpadní minerální vlny lze vytvořit keramické pěny vhodné pro tepelnou izolaci. Ačkoliv autoři v textu mluví o vzniku keramické pěny, na základě chemického složení lze konstatovat, že se jedná o materiál v ČR označovaný jako pěnové sklo.

Recyklaci skelné vaty jako tavidla při výrobě keramiky na bázi jílu a odpadu se věnoval tým A. Adedirana<sup>22</sup>. Jako prekurzory byly vybrány komerční kaolinový jíl a dva průmyslové odpady, konkrétně křemičitý živcový písek a měděná struska. Bylo připraveno šest receptur (3 vzorky s/bez skelné vaty) a vzorky byly vypalovány při 750, 850 a 950 °C. Vzorky byly charakterizovány pomocí rentgenové difrakce (XRD), skenovací elektronové mikroskopie (SEM) se stanovením prvků (EDS), diferenční skenovací kalorimetrie (TG/DSC), absorpce vody, zdánlivé hustoty a zkoušek pevnosti v tlaku a ohybu. Výsledky ukázaly, že začleněním 10 % hmot. skelné vlny do směsi vznikla keramika s lepšími fyzikálními, mechanickými a mikrostrukturními vlastnostmi. Vzorky s křemenným pískem a skelnou vatou po výpalu (950 °C) dosáhly hodnot pevnosti v tlaku až 117 MPa a nasákavosti 2 %. U keramiky na bázi strusky a kaolinu byl však tavicí efekt skelné vlny méně významný, to pravděpodobně kvůli rozdílům v jejich chemickém složení, mineralogii a distribuci částic. Schopnost tavení skleněné vlny může snížit teplotu slinování a následně snížit náklady na výrobu keramiky.

Příspěvek R. Stonyse a kolektivu<sup>2</sup> se zabýval odpadem z výroby minerální vlny (kupolový prach CD, amorfní SiO<sub>2</sub>, průměr částic prachu je podobný jako u mikrosiliky 30 až 150 nm) a jeho opětovným použitím při výrobě žárobetonů s hlinitanovým cementem. Filtrační sedimenty z výroby minerální vlny mají velmi malé rozměry, a proto nejsou snadno recyklovatelné. Ultra jemný odpadní prach nahradil v recepturách mikrosiliky, která je jedním z nejrozšířenějších ultrajemných aditiv do žárovzdorných betonů. Mikrosilika zvyšuje hustotu a zlepšuje vlastnosti žárobetonu díky své pucolánové aktivitě a malé velikosti částic. Pro návrh žárobetonu bylo ve směsích použito 1, 2 a 3 % odpadního prachu. Na vzorcích žárobetonu byly stanoveny vlastnosti po vytvrzení, vysušení (105 °C) a výpalu (800 a 1000 °C). Sledovány byly vlastnosti: objemová hmotnost, rychlost průchodu ultrazvukové vlny, pevnost v tlaku bez tepelné zátěže a odolnost proti tepelnému šoku. Z výsledků fyzikálních a mechanických vlastností plyne, že jako optimální teplota výpalu je 800 °C s dávkováním CD do 2 %. Přínosem výzkumu je zjištění, že metoda zpracování CD navržená v této práci, je vhodná jak z ekologického, tak technologického i ekonomického hlediska.

### **Alternativní surovina – pěnové sklo**

Možnosti využití odpadní minerální vlny pro výrobu pěnového skla za nízké teploty (800 °C) se věnovala studie R. Ji a kolektivu<sup>23</sup>. Nově vyvinutá metoda výroby pěnového skla používala jako hlavní suroviny odpady z minerální vlny a odpadního skla z procesu výstavby a demolice. V navržené receptuře byly použity přísady s funkcí pěnidla, tavidla a stabilizátoru pěny (uhličitan vápenatý CaCO<sub>3</sub>, borax Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>•10H<sub>2</sub>O, fosforečnan trisodný dodekahydrát Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>•12H<sub>2</sub>O). Na vlastnostech pěnového skla (objemová hmotnost, mikrostruktura) byly zkoumány vlivy různého obsahu jednotlivých přísad a různé teploty slinování. Výsledky experimentu ukázaly, že optimální složení surovin se pohybovalo v rozmezí 40 % hmot. odpadní minerální vlny, 60 % hmot. odpadního skla, 20 % hmot. boraxu, 1–2 % hmot. uhličitanu vápenatého a 2 % hmot. fosforečnanu. Vzorek slinutý při 800 °C měl nejrovnoměrnější rozložení pěnové struktury a nízkou objemovou hmotnost 0,7 g/cm<sup>3</sup>.

### **Alternativní surovina – kompozit na bázi sádry**

Ve výzkumu A. Zaragoza-Benzal s kolektivem<sup>24</sup> byl představen nový sádrový kompozitní materiál, ve kterém byly tradiční suroviny částečně nahrazeny tepelně izolačním odpadem (polystyren EPS a minerální vlna) z renovace fasád. Výsledným návrhem je nový lehký sádrový kompozit s náhradou až 14,7 % hmot. původního materiálu s odpadem EPS a s přidáním minerální vlny jako výztuže (0,375 % hmot.). Podle výsledků má nový materiál o 20,3 % nižší objemovou hustotu než tradiční sádrový kompozit, tedy má i o 30,4 % nižší tepelnou vodivost. Tyto nové odlehčené sádrové kompozity lze použít v kombinaci s lehkými ocelovými rámy jako dokončovací desky ve stěnových systémech, a to při snížení celkového tepelného odporu stěny až o 10,6 % (tloušťka 25 mm). Mechanická odolnost nového materiálu překračuje referenční hodnoty stanovené současnými normami, snížení celkové i kapilární absorpce vody ve srovnání s tradiční sádrovou, což zvyšuje odolnost materiálu a jeho vynikající tepelné vlastnosti po celou dobu životnosti.

## Alternativní surovina – alkalicky aktivované hmoty

Pokusy vytvořit ekologičtější alternativu k portlandskému cementu nejsou nové. Odpadní kamenná vlna obsahuje vysoké množství oxidů ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ), které jsou vhodné jako prekurzory pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů<sup>2</sup>.

Článek týmu Łażniewska-Piekarczyk a Dominik Smyczek<sup>25</sup> pojednává o vlivu aditiv odpadních vláken minerální vlny na geopolymerní pojivo. Článek popisuje účinnou metodu rozměňování vlny na prášek a metodiku tvorby vzorků geopolymerů, označených G1 pro geopolymer na bázi skelné vaty a G2 pro geopolymer na bázi kamenné vlny. Sledovanými vlastnostmi byla pevnost v tlaku a ohybu a součinitel tepelné vodivosti geopolymeru s přidavkem minerálních vláken. Klíčovým prvkem článku je ověření, zda přidavek vláken minerální vlny pozitivně ovlivňuje vlastnosti geopolymeru. Získané výsledky dokazují, že přidání vláken výrazně zlepšuje pevnost v tahu za ohybu. Pro recepturu G1 je poměr pevnosti v tlaku k pevnosti v tahu za ohybu 18,7 %. U vzorků G2 však bylo dosaženo ještě lepšího poměru pevnosti v tlaku k hodnotám pevnosti v tahu za ohybu 26,3 %. Získaný průměrný koeficient tepelné vodivosti byl 1,053 W/(m·K) pro vzorky řady G1 a 0,953 W/(m·K) pro vzorky řady G2. Získané závěry ukazují korelaci mezi pórovitostí a pevností v tlaku a koeficientem tepelné vodivosti. Čím vyšší pórovitost, tím lepší tepelná izolace materiálu a horší pevnost v tlaku.

Článek H. Dai s kolektivem<sup>26</sup> představuje vývoj tepelně izolačního geopolymerního materiálu. Jde o porézní kompozit na bázi kaolinitu s alkalickou aktivací při pokojové teplotě a vyztužení vlákny z minerální vlny. Zkoumán byl účinek obsahu vláken minerální vlny a vlivu tepelného zpracování na komplexní vlastnosti porézního geopolymeru. Od přidavku vláken z minerální vlny se očekávalo zlepšení mechanických vlastností porézního geopolymeru, od tepelného zpracování pak vznik porézní struktury, tj. zlepšení tepelné izolace geopolymeru na bázi kaolinitu. Vzorek s obsahem 15 % hmot. minerální vlny vykazoval poréznost ~90 %, hustotu 0,118 g/cm<sup>3</sup>, tepelnou vodivost 0,057 W/(m·K) a maximální pevnost v tlaku 0,66 MPa. Tento nový tepelně izolační materiál má obrovský potenciál v oblasti úspory energie budov.

V příspěvku Luo a Yu<sup>27</sup> je zkoumán potenciál využití odpadu z minerální vlny jako prekurzoru a vláknové vyztuže v geopolymeru s popílkem třídy F. Použití těchto odpadů, zejména ve formě jemných částic (dvě různé předúpravy vláken), urychluje proces geopolymerizace, což vede ke zvýšené tvorbě gelu a zvýšené absorpci Al v gelu N-A-S-H. Vliv reaktivity a rozměrů odpadní vlny na hybridních geopolymerech byly systematicky studovány na základě reakční kinetiky a produktů, mikrostruktury, smrštění při sušení, mechanické pevnosti a studia tepelného chování (výpal při 800 °C).

Výzkum týmu Pavlín<sup>28</sup> nabídl nový pohled na využití odpadní minerální vlny (kamenná vlna, skelná vlna) a pomocných pojiv při vývoji alkalicky aktivovaných směsí pro 3D tisk. Zjištění potvrzují robustní mechanický výkon a tepelnou stabilitu těchto materiálů a staví je jako slibné kandidáty pro aplikace vyžadující odolnost při zvýšených teplotách. Díky přidání minerální vlny a pomocných pojiv vykazovaly alkalicky aktivované 3D tištěné produkty pevnost v tlaku přesahující 50 MPa po 28 dnech vytvrzování (při T<sub>0</sub>). 3D tištěné vzorky byly při rostoucí teplotě chemicky i mineralogicky stabilní do 700 °C. S rostoucí teplotou (nad 800 °C) se objevily nové mineralogické fáze a došlo ke snížení obsahu amorfních složek (z cca 86 % hmot. na 46 % hmot.).

V další studii provedené kolektivem K. M. Klíma<sup>29</sup> byly zkoumány účinky odpadu z minerální vlny v alkalicky aktivovaném umělém kamenivu vyvíjeném pro vysokoteplotní aplikace. Byly zkoumány parametry aktivačního a vytvrzovacího procesu. Stanovení vlastností proběhlo při pokojové teplotě a při vysoké teplotě (1000 °C) na prostém kamenivu a po začlenění do geopolymerního kompozitu. Při optimálním režimu vytvrzování (za pokojové teploty) po dobu 3 dnů vzniklo umělé kamenivo s objemovou hmotností v rozmezí od 1960 do 2090 kg/m<sup>3</sup> a pevností v tlaku 7,0 až 7,9 MPa. Sodný aktivátor s vysokou viskozitou způsobil nepravidelnější tvar zrna s nižší hustotou částic a pevností v tlaku, oproti kamenivu aktivovanému draselným aktivátorem. Vysoká krystalinita byla pozorována v K-aktivovaných agregátech, což způsobilo lepší tepelnou stabilitu.

Studie C. H. Koh s kolektivem<sup>30</sup> zkoumala recyklaci kamenné vlny ze stavebního a demoličního odpadu pro výrobu lehkého alkalicky aktivovaného kameniva určeného pro izolaci podlahy. Kamenivo bylo vyrobeno alkalickou aktivací z různých podílů mleté a původní kamenné vlny. Výsledkem byla



objemová hmotnost v rozmezí 720 až 850 kg/m<sup>3</sup> a tepelná vodivost od 0,075 do 0,094 W/(m·K). Morfologie vlákna kamenné vlny v původním stavu ovlivnila reologii, dala vzniknout většímu počtu pórů i defektů, což vedlo ke snížení mechanické pevnosti. Hydrotermální simulace ukázaly, že sestava podlahy částečně vyplněná vyrobeným kamenivem vykazovala snížení obsahu vody a zvýšení povrchové teploty podlahy.

### **Alternativní surovina – lehké kamenivo**

A. B. López-García s kolektivem<sup>31</sup> zkoumali použití skleněné vlny (GW) a minerální vlny (SW) jako složky při výrobě lehkého kameniva (LWA). Oba odpady dle studie mohou být vhodnou surovinou (hustota 1,3 – 1,5 g/cm<sup>3</sup> a mechanická pevnost 2 – 6 MPa). Při použití GW se předpokládá výrazné snížení vypalovací teploty (700 °C) oproti běžně používaným teplotám (kolem 1200 °C) při výrobě těchto materiálů, což by znamenalo značné úspory energie. Technologické vlastnosti LWA získané ze skleněné vlny a minerální vlny vykazovaly vlastnosti analogické vlastnostem komerčního lehkého kameniva (hustota, pórovitost, nasákavost a mechanická pevnost). Tepelně izolační materiály a lehké kamenivo dlouhodobě patří mezi nejpoužívanější materiály ve stavebnictví, proto byl hodnocen metodou LCA i dopad na životní prostředí spojený s výrobou lehkého kameniva s SW a GW ve srovnání s tradičním procesem. Téměř u všech analyzovaných kategorií vlivu umělého kameniva vyrobeného z minerální vlny bylo pozorováno významné zlepšení parametrů životního prostředí.

### **Alternativní surovina – kompozitní zvuková izolace**

Hemmati s kolektivem<sup>32</sup> se zabýval složitou rovnováhou mezi pohlcováním zvuku, tepelnou izolací a nákladovou efektivitou dřevovláknité desky – minerální vlna – cementové desky (WRCB). Desky WRCB s obsahem dřevěných vláken, portlandského cementu, minerální vlny a chloridu vápenatého byly vyrobeny v různých tloušťkách (20 – 60 mm) a hustotách (400, 500 a 600 kg/m<sup>3</sup>). WRCB vykazovala průměrnou zvukovou absorpci (SAA) a efektivní tepelnou vodivost ( $K_{\text{eff}}$ ). Desky WRCB s tloušťkami od 30 do 50 mm a hustotami 400 – 500 kg/m<sup>3</sup> vykazovaly téměř ideální úroveň absorpce mezi 1000 a 2000 Hz, což vyhovuje současným architektonickým požadavkům. Využití metody „Response Surface Methodology“ umožnilo optimalizovat vlastnosti desky (tj. hustota 452,8 kg/m<sup>3</sup> a tloušťka 37,8 mm) s maximální SAA, při současné minimalizaci  $K_{\text{eff}}$  a nákladů. Výsledky ukázaly významný vliv tloušťky a hustoty na akustické a tepelné vlastnosti WRCB desky.

### **Alternativní surovina – tepelná izolace**

Článek M. Domonkos<sup>33</sup> se věnoval studiu tepelných a strukturálních vlastností izolace z recyklované minerální vlny získané ze stavebního a demoličního odpadu. Měřením tepelného toku byl na vzorcích stanoven základní parametr charakterizující tepelně izolační materiály – tepelná vodivost. Zkušební vzorky byly vyrobeny z mikromletého a nasekaného odpadního materiálu (objemová hmotnost 50 – 120 kg/m<sup>3</sup>). K testům byly připraveny 3 vzorky (nekontaminovaný referenční vzorek Supafil Loft 045; mikromletá a nasekaná odpadní minerální vlna). Vzorky vyrobené z recyklované izolace měly vyšší součinitel tepelné vodivosti než referenční vzorky, přesto vykazovaly přijatelné izolační vlastnosti, protože jejich součinitel tepelné vodivosti se pohyboval v rozmezí 0,040 – 0,055 W/(mK). Sekaná odpadní minerální vlna je vhodná jako výplňová izolace. Mikrofrézovaný materiál má širší využití, a to jako recyklovaná sypaná/foukaná i výplňová izolace.

## **Závěry**

Recyklace odpadů z minerální vlny, jako je skleněná a čedičová minerální vlna, je klíčovým tématem v oblasti udržitelnosti a ochrany životního prostředí. Minerální vlna je běžně používána pro své izolační schopnosti, ale jako odpad představuje technologickou výzvu. Provedená rešerše článků o recyklaci odpadů z minerální vlny nám umožnila získat přehled o různých oblastech jejího využití. Aktuální stav

poznání ukazuje, že po vhodném přečištění a úpravě mohou být minerální vlákna efektivně využívána jako náhrada drobného kameniva nebo jemnozrnných částic v betonech a maltách. Velmi jemně mletá minerální vlna může přispívat ke zlepšení vlastností těchto směsí díky své pucolánové aktivitě. Směr recyklace minerálních vláken v alkalicky aktivovaných materiálech může být efektivním krokem k ekologicky šetrným a vysoce výkonným stavebním materiálům. Další slibný směr využití minerální vlny je při výrobě pálených keramických cihel nebo jako součásti keramických pěn, resp. pěnového skla. Minerální vlna může nejen zlepšit mechanické a izolační vlastnosti produktů, ale také přispět k úsporám energie a snížení emisí CO<sub>2</sub> při výrobě stavebních materiálů.

## Poděkování

*Tento příspěvek byl zpracován na základě Institucionální podpory na rozvoj výzkumné organizace (Dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace) poskytnuté MPO ČR.*

## Literatura

1. Chromková I., Leber P., Bibora P., Junek J., Frank M.: Waste forum 3, 129 (2016).
2. Stonys R., Kuznetsov D., Krasnikovs A., Škamat J., Baltakys K., Antonovič V., Černašejus O.: J. Environ. Manage. 176, 149 (2016).
3. Yap Z. S., Khalid N. H. A., Haron Z., Mohamed A., Tahir M. M., Hasyim S., Saggaff A.: Materials 14(19), 5777 (2021).
4. Väntsi O., Kärki T.: J. Mater. Cycles Waste Manage., 16, 62 (2014).
5. Trejbal J., Zobal O., Domonkos M.: Acta Polytechnica CTU proceedings 34, str. 122, České vysoké učení technické Praha 2022.
6. Kubiliute R., Kaminskas R., Kazlauskaite A.: Cem. Concr. Compos. 88, 130 (2018).
7. Yliniemi J., Laitinen O., Kinnunen P., et al.: J Mater Cycles Waste Manag 20, 1248 (2018).
8. Yliniemi J., Ramaswamy R., Luukkonen T., Laitinen O., Nunes de Sousa A., Huuhtanen M., Ilikainen M.: Waste Management 131, 323 (2021).
9. Cheng A., Lin W-T., Huang R.: Mater. Des. 32, 636 (2011).
10. Medeiros M. G., Nadalet W. C., Rocha J. C., Cheriaf M., Gleise P. J. P., Borges de Castilhos Jr A.: J. Cleaner Prod. 293, (2021).
11. Lin W-T., Han T-Y., Huang C-C. et al: Adv, Sci, Lett, 8,489 (2012).
12. Lin W-T., Han T-Y., Wu YC., Cheng A., Huang R., Weng T. L.: Appl. Mech. Mater. 284, 113 (2013)
13. Kalinowska-Wichrowska K., et al.: Proceedings of 4<sup>o</sup> Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación (CITE 2019), str. 53, Madrid 2019.
14. Čermák J.: Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Brno 2015.
15. Piña Ramírez C., et al.: J. Build. Eng. 40, 102719 (2021).
16. Awovera P. O., Akinrinade, A. D., de Sousa Galdino G. A., Althoey F., Kirgiz M. S., Tayeh B. A.: J. Build. Eng. 53, 104568 (2022).
17. Ramírez C. P., Barriguete A. V., Somolinos R. S., del Río Merino M., Sánchez E. A.: Constr. Build. Mater. 265, 120349 (2020).
18. Bala A., Gupta S., Matsagar V.: Constr. Build. Mater. 393, 131876 (2023).
19. Shyong Y. Z., Khalid A., Hafizah N., Zaiton H.: J. Build. Eng. 59, 105128 (2022).
20. Korpayev S., Bayramov M., Durdyev S., Hamrayev H., Baymyradova D., Nurmuhammedov A.: J. Build. Eng. 63, 105340 (2023).
21. Chen Z., Wang H., Ji R., Liu L., Cheeseman Ch., Wang X.: Ceram. Int. 45, 15057 (2019).
22. Adediran A., Lemougna P. N., Yliniemi J., Tanskanen P., Kinnunen P., Roning J., Ilikainen M.: J. Cleaner Prod. 289, 125673 (2021).

23. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang X.: *Constr. Build. Mater.* 215, 623 (2019).
24. Zaragoza-Benzal A., Ferrandez D., Santos P., Atanes-Sanchez E.: *Constr. Build. Mater.* 449, 138464 (2024).
25. Łażniewska-Piekarczyk B., Smyczek D.: *Materials*, 17 (2), 483 (2024).
26. Dai H., Gao H., Yang P., Mo J., Zhang H., Lei S., Wang L.: *Appl. Clay Sci.* 246, 107176 (2023).
27. Luo Y., Yu Q.: *Cem. Concr. Compos.* 145, 105318 (2024).
28. Pavlín M., Horvat B., Korosek R. C., Capuder R., Korat L., Ducmanová V.: *Cem. Concr. Compos.* 147, 105445 (2024).
29. Klima K.M., Luo Y., Brouwers H. J. H.: *Constr. Build. Mater.* 401, 132937 (2023).
30. Koh C. H., Luo Y., Schollbach K., Gauvin F., Brouwers H. J. H.: *Developments in the Built Environment* 19, 100506 (2024).
31. López-García A., Uceda-Rodríguez B., León-Gutiérrez M.: *Constr. Build. Mater.* 345, 128294 (2022).
32. Hemmati N., Mirzaei R., Soltani P., Berardi U., Mozafari M. J. S., Edalat H., Rezaieyan E., Taban E.: *Constr. Build. Mater.* 445, 137935 (2024).
33. Domonkos M., Zobal O., Prošek Z., Trejbal J.: *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 34, str. 6, České vysoké učení technické Praha 2022.

## Review study on the use of waste mineral fibres in the construction industry

Lenka VAVRUŠKOVÁ, René ČECHMÁNEK, Ivana CHROMKOVÁ

Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., Hněvkovského 30/65, 617 00 Brno, Czech Republic

### Summary

*Mineral wool waste (glass and basalt) constitutes significant problem in the field of recycling of construction materials. This waste is created not only within production process as cuttings and dust (we have already dealt with this issue in our research), but also within demolition and reconstruction of thermal insulation system of buildings, the optimal use of this waste is currently under intensive research. A barrier for its recycling is contamination of mineral wool with other construction material and sizeable volume for storing to subsequent recycling. Mineral wool is currently dumped as a waste. European legislation implements charges for construction waste disposal, and therefore motivates to development of recycling technologies. Regarding to increasing volume of mineral wool waste, which is estimated 2.82 million tons up to 2030, it is necessary to find sustainable solution for its reuse. Key factors for effective recycling are proper sorting and separation of individual components, which is not sufficiently established in the Czech Republic and Slovakia so far. Recycling of mineral wool waste can contribute to environment protection and decreasing of disposal costs, if suitable technologies for its treatment are implemented. By studying the literature, the most frequent directions of use of waste mineral wool were identified as an alternative component of construction binders (an additive increasing strength characteristics) and replacement of fine and very fine aggregate fractions (an additive for the creation of new insulation materials). The scope of our next work is in the field of development of concrete elements, plasters and alkali-activated materials.*

**Keywords:** *Thermal insulation of buildings, waste mineral wool, basalt and glass fibres, fibre recycling, utilization of waste insulation material*