

# Inovatívne tvarové tepelnoizolačné prvky vyrobené z recyklovanej polyuretánovej peny

Miloš MATÚŠ, Ľubomír ŠOOŠ, Jozef BÁBICS, Richard ŠUPÍK

Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Ústav výrobného inžinierstva a kvality produkcie, Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

e-mail: [milos.matus@stuba.sk](mailto:milos.matus@stuba.sk), [lubomir.sooos@stuba.sk](mailto:lubomir.sooos@stuba.sk), [jozef.babics@stuba.sk](mailto:jozef.babics@stuba.sk), [richard.supik@stuba.sk](mailto:richard.supik@stuba.sk)

## Abstrakt

Efektívne spracovanie odpadových polyuretánových pien je kľúčové pre ochranu životného prostredia, šetrenie prírodných zdrojov, ekonomickú efektívnosť aj splnenie legislatívnych požiadaviek. Je to dôležitý krok smerom k udržateľnejšiemu a obehovému hospodárstvu. Článok sa zaoberá vývojom efektívnej technológie recyklácie odpadovej polyuretánovej peny suchým lisovaním pod tlakom bez spojiva. Cieľom experimentálneho výskumu je optimalizovať lisovacu silu, teplotu a čas ohrevu pri výrobe tvarovaných izolačných prvkov so zaručenými mechanickými a tepelnoizolačnými vlastnosťami. Tento výskum poskytuje predpoklad pre návrh výrobných strojov na spracovanie veľkého množstva polyuretánového odpadu na tvarované izolačné diely. Dosiahnuté výsledky potvrdili úspešnú výrobu tvarovaných izolačných prvkov zo 100 % recyklovanej polyuretánovej peny bez spojiva. Výskum preukázal zaručené tepelnoizolačné vlastnosti týchto tvarových dielov, čo im dáva základ pre široké uplatnenie v automobilovom, energetickom a stavebnom priemysle. Súčasťou výskumu a vyvinutej výrobnéj technológie je aj aplikácia špecifických povlakov, ktoré ďalej zvyšujú úžitkové vlastnosti a rozširujú možnosti aplikácie takýchto tvarových dielov.

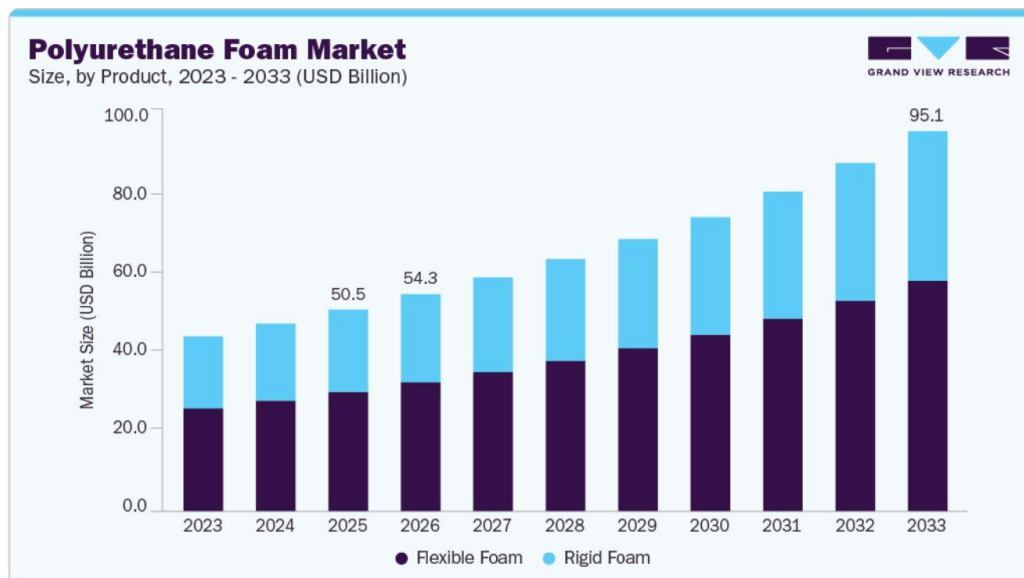
**Kľúčové slová:** polyuretán, PUR pena, recyklácia, izolácia, tvarové prvky

## Úvod

Polyuretánové (PUR) peny sa vďaka svojim výnimočným vlastnostiam, ako je nízka hustota, vysoké mechanické vlastnosti, nízka tepelná vodivosť či vysoká schopnosť pohlcovať zvuk, vo veľkej miere využívajú v rôznych oblastiach priemyslu a produktov. Ide o porézne, ľahké materiály s vynikajúcimi úžitkovými vlastnosťami. Na základe týchto vlastností nachádzajú PUR peny najvyšší podiel uplatnenia v matracoch a nábytku (31%), následne v automobiloch a iných dopravných prostriedkoch (cca 24%), v obalových materiáloch, stavebníctve, elektronike, obuvi a inde. Ich rozsiahle využitie predovšetkým v nábytku a automobiloch je teda primárnym faktorom, ktorý poháňa dopyt na trhu. Zvyšujúci sa dopyt stavebného segmentu po polyuretánovej pene pramení z jej kľúčovej úlohy pri zvyšovaní energetickej účinnosti, zlepšovaní vnútorného komfortu a prispievaní k trvalo udržateľným stavebným postupom. S vývojom stavebných noriem, sprísňovaním predpisov a intenzívnejším zameraním na energeticky efektívne a ekologické budovy sa očakáva, že ich využitie ako spoľahlivého izolačného materiálu bude v stavebníctve naďalej výrazne rásť.

V roku 2022 dosiahol objem PUR peny na trhu 15,5 mil. ton, pričom zaznamenal za obdobie 2019-2022 rast o 6,9 %. Veľkosť globálneho trhu s PUR penou v roku 2025 bola 50,47 miliardy USD a do roku 2033 by mala dosiahnuť 95,15 miliardy USD, pričom sa odhaduje medziročná miera rastu až 8,3 % (obr. 1). Očakáva sa, že trh bude poháňať rast spotrebičov a infraštruktúry chladiarenského reťazca. Hnacím motorom trhu s polyuretánovou penou je tiež rastúci dopyt z ďalších priemyselných odvetví, predovšetkým automobilového priemyslu, stavebníctva a nábytku. V roku 2025 predstavoval segment mäkkých pien až 59,12% na trhu. [1]

Z týchto obrovských objemov ročnej produkcie PUR peny prichádza obrovská environmentálna výzva na vývoj nových technológií materiálového zhodnocovania PUR peny v podobe súčasných a budúcich odpadov.



Obr. 1 Trend vývoja globálneho trhu s PUR penou [1]

Polyuretánové (PUR) peny tvoria približne 33 % celkovej produkcie polyuretánov a nachádzajú široké uplatnenie v automobilovom priemysle (sedadlá), pri výrobe matracov, nábytku a v stavebníctve. Keďže sa používajú ako priemyselný aj spotrebný materiál, vzniká problém ich ukladania a recyklácie odpadu. Odpad vzniká aj pri výrobe, kde môže predstavovať až 10 % produkcie. PUR sa využívajú ako peny, elastoméry, laky, lepidlá či vlákna, pričom najväčší dopyt je po penách.

Peny sa delia na tvrdé a mäkké. Tvrdé ( $10\text{--}600 \text{ kg.m}^{-3}$ ) sa používajú najmä ako izolačné a konštrukčné materiály v stavebníctve, strojárstve či spotrebičoch. Mäkké ( $15\text{--}70 \text{ kg.m}^{-3}$ ) sa vyrábajú v blokoch a slúžia na matrace, čalúnenie, obaly alebo tesnenia. Špecifickým typom je integrálna mäkká pena (molitan) s vyššou hustotou na povrchu a nižšou v jadre. Všetky aplikácie PUR pien predstavujú potenciálny zdroj odpadu, pričom spôsob spracovania závisí od toho, či ide o tvrdú alebo flexibilnú penu. [2]

## Výskum efektívnej technológie suchého formovania recyklovanej PUR peny pod tlakom

Vývoju efektívnej technológie zhodnocovania PUR pien predchádza rozsiahla odborná analýza technologických možností a recyklačných postupov, posúdenie vhodnosti jednotlivých spracovateľských prístupov berúc do úvahy predpokladané množstvá, stav odpadovej PUR peny (najmä mäkkej) a ekonomiku zvozu tohto odpadu do miesta spracovania. Recyklácia čistej polyuretánovej peny je v praxi rozšírená a technologicky pomerne dobre zvládnuteľná. Výrazným problémom je recyklácia polyuretánovej peny, ktorá má povrchovú vrstvu neoddeliteľnú (časti nábytku, čalúnenie automobilov, a.i.). Tento problém je v súčasnosti neriešený. Zároveň pre podmienky a ročné množstvá odpadovej PUR peny na Slovensku je potrebné a efektívne navrhnuť a optimalizovať technológiu, ktorá by umožňovala materiálovú recykláciu oboch uvedených typov odpadov.

Realizovaný experimentálny výskum sa zameriava na mechanickú recykláciu odpadových PUR pien a vývoj efektívnej technológie pre jej spracovanie a produkciu predovšetkým tvarových tepelnoizolačných prvkov. Cieľom je navrhnuť komplexnú, efektívnu a optimalizovanú technológiu vrátane zariadenia na materiálové zhodnotenie odpadových PUR pien zo starých vozidiel, ktorá umožní:

- spracovanie čistej polyuretánovej peny,
- spracovanie polyuretánovej peny s neoddeliteľnou povrchovou vrstvou,
- spracovanie týchto dvoch typov odpadu spoločne,
- produkcia plošných aj tvarových recyklovaných produktov,
- produkcia tepelnoizolačných prvkov suchou metódou,
- bude ekonomicky efektívna technológia pre lokálne spracovanie menšieho množstva odpadu.

Experimentálny výskum ukázal, že práve technológia suchého formovania PUR peny pod tlakom je vysoko efektívna, spĺňajúca kladené požiadavky a vyhovujúca daným obmedzeniam, a zároveň umožňujúca materiálovú recykláciu pre opätovné použitie PUR v rôznych priemyselných oblastiach. Technológia je založená na formovaní recyklovaného materiálu (frakčne upravenej PUR peny) do tvaru budúceho tvarového prvku. Forma sa plní takým množstvom recyklátu, aby bola dosiahnutá požadovaná výsledná hustota prvku. Následne je takto zaformovaný materiál vystavený ohrevu s fázou výdrže. Práve jednoduchosť technológie si vyžaduje veľmi podrobný výskum a optimalizáciu jednotlivých parametrov (frakčné zloženie vložiek, ich hustota pri formovaní, lisovací tlak, teplota ohrevu, doba výdrže ohrevu a ďalšie) pre dosiahnutie požadovanej a zaručenej kvality tvarových prvkov (pevnosť, hustota, tepelný odpor atď.).

Technológia umožňuje preukázateľne recyklovať čisté PUR peny ako aj PUR peny s neoddeliteľnou povrchovou vrstvou. Umožňuje vo svojej podstate produkciu plošných izolačných produktov ako aj tvarových prvkov bez pridávania spojiva príp. ďalších chemických aditív. Lisované produkty obsahujú 100% recyklovaného materiálu. Produkty nájdu široké uplatnenie vďaka svojej variabilite tvarov, a zaručených mechanických a tepelnoizolačných vlastností.

Realizované experimenty zahŕňajú výskum vplyvu a optimalizáciu lisovacej teploty, lisovacieho tlaku a doby výdrže ohrevu na kvalitatívne parametre výsledného produktu definované predovšetkým hustotou. Cieľom je definovať špecifické technologické parametre recyklačného procesu a ich vhodné kombinácie umožňujúce úspešnú a efektívnu produkciu tvarových produktov, predovšetkým ako tepelnoizolačné prvky. Ale možnosti uplatnenia recyklátov z odpadovej PUR peny vyrobené touto

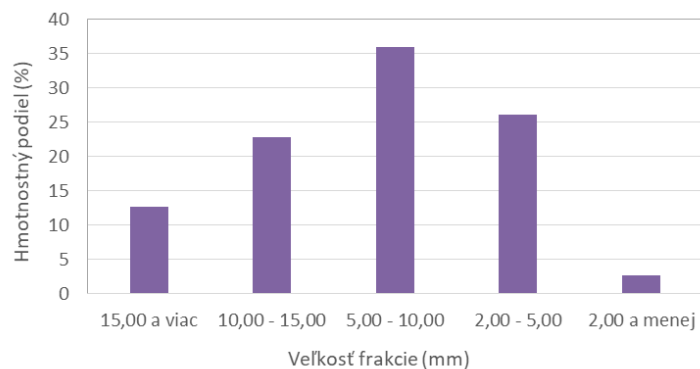
technológiou sú široké (napr. tepelná a zvuková izolácia v stavebníctve, kročajová akustická izolácia pod parkety a laminátové podlahy, podložky pod koberce, akustická výplň v bielej technike, akustická a tepelná výplň pre dverné a okenné systémy, akustická výplň v odsávacích a vetracích systémoch, tepelná izolácia potrubných systémov, a iné).

## Použitý materiál

Pre realizáciu experimentov bola použitá zmes technologického odpadu z prvovýroby PUR pien, aby sa eliminoval vplyv stupňa degradácie UV žiarením pri dlhodobom skládkovaní polyuretánových penách. Frakčné zloženie použitého materiálu bolo upravené drvením do formy vločiek o veľkosti 2,0 – 15,0 mm (obr. 2). Pre vytvorenie homogénneho výsledného prvku so zaručenými mechanickými vlastnosťami v celom objeme je potrebné zabezpečiť rovnomerné zastúpenie väčšej aj menšej frakcie, ako uvádza obrázok 3. Dôvodom je mechanizmus kohézie jednotlivých vločiek v procese formovania vplyvom teploty, kedy dochádza pri teplote mäknutia polyuretánu k natavovaniu hrán jednotlivých vločiek a pôsobením tlaku môže nastať vzájomné prepojenie častíc.



Obr. 2 Materiál - vločky PUR peny



Obr. 3 Frakčné zloženie spracovávaných vločiek PUR peny

## Metódy experimentálneho výskumu

Cieľom experimentov je definovať optimálne rozsahy technologických parametrov suchého formovania pod tlakom a súčasne stanoviť okrajové hodnoty intervalov týchto parametrov pri ich vzájomných kombináciách. Vyhodnocovanie experimentov sa vykonáva vzhľadom ku skúmanému kvalitatívnemu parametru (hustota, pevnosť, tepelný odpor atď.). Interval lisovacích teplôt má uvažované kritické hranice vychádzajúce z teplôt stavovej premeny polyuretánu. Rozsah lisovacieho tlaku vychádza z požiadavky na rozsah výslednej hustoty prvkov. Uvedené intervaly premenných technologických parametrov boli zvolené na základe analýzy vlastností formovaného materiálu a analýzy výsledkov publikovaných vedeckých prác.

Aplikovanými premennými parametrami technologického procesu sú:

- Lisovací tlak (2.0 kPa, 4.0 kPa, 6.0 kPa, 8.0 kPa),
- Teplota ohrevu (200°C, 225°C, 250°C),
- Dĺžka ohrevu (10 min., 15 min., 20 min., 25 min., 30 min.).

Pre exaktné hodnotenie kvalitatívnych ukazovateľov tvarových prvkov boli technológiou suchého formovania pod tlakom vytvorené vzorky tvaru kvádra s rozmermi pôdorysu 50x100 mm (obr. 4), pričom ich výška je závislá od nastavenia jednotlivých premenných parametrov experimentu (obr. 5). Výroba vzoriek prebiehala naplnením 25 gramov PUR vložiek do vopred predhriatej formy, jej uzavretím a zaťažením zvoleným lisovacím tlakom. Naplnená forma bola ohrievaná v muflovej peci pri teplote a po dobu ohrevu podľa plánu experimentu.

Optimalizácia skúmaných parametrov je vyhodnocovaná vzhľadom na kvalitatívne parametre vzoriek: hustota vzoriek, tvarová presnosť, stálosť, pevnosť v tlaku a tepelný odpor. Experimenty zahŕňajú 60 rôznych kombinácií technologických parametrov. Vzhľadom na korektné štatistické vyhodnotenie experimentu bolo vyrobených 10 vzoriek lisovaných tvarových prvkov pri každej kombinácii technologických parametrov (spolu 600 vzoriek).



Obr. 4 Skúšobné vzorky vyrobené pri rôznej kombinácii technologických parametrov

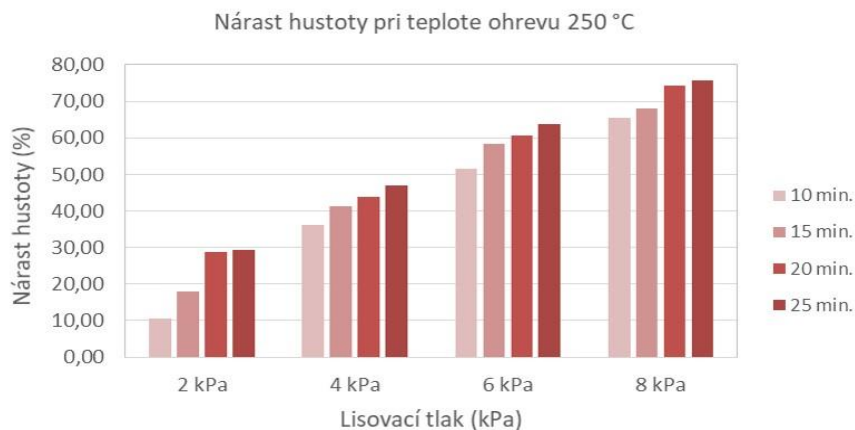


Obr. 5 Výška vzoriek (a hustota) je závislá od nastavenia jednotlivých technologických parametrov

### Výsledky experimentálneho výskumu hustoty

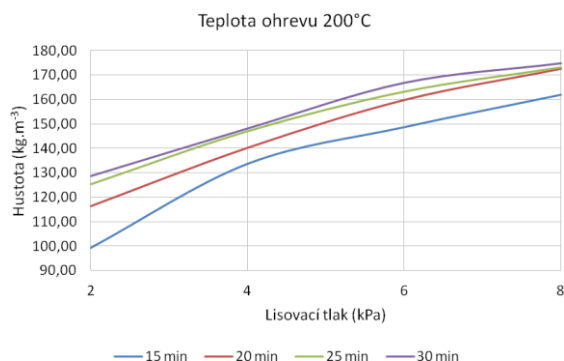
Hustota recyklovaných produktov z PUR peny technológiou formovania pod tlakom je závislá od lisovacieho tlaku, teploty ohrevu a dĺžky ohrevu. Výsledná hustota vzoriek predstavuje zásadný

fyzikálny parameter, ktorý technologické parametre nelineárnym spôsobom ovplyvňujú. Štúdiu výsledkov nárastu hustoty od zmeny jednotlivých parametrov je potrebné venovať značnú pozornosť. Komplexnejší obraz o náraste hustoty vplyvom nárastu lisovacieho tlaku ako aj nárastu doby ohrevu pri teplote 250°C uvádza obrázok 6. Z výsledkov vyplýva, že pri skúmaných intervaloch technologických parametrov má najväčší vplyv na nárast hustoty vzoriek veľkosť zaťažujúceho tlaku.

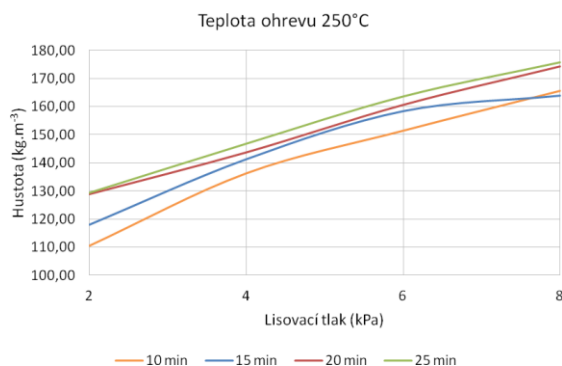


Obr. 6 Vplyv zmeny hustoty od lisovacieho tlaku a doby ohrevu pri teplote ohrevu 250°C

Na obrázku 7 a obrázku 8 možno pozorovať priebeh zmeny hustoty od zmeny lisovacieho tlaku a doby ohrevu materiálu pri rôznych teplotách ohrevu (200°C a 250°C). Z výsledkov vyplýva, že zmena hustoty v závislosti od dĺžky ohrevu je pri jednotlivých teplotách takmer lineárna.



Obr. 7 Zmena hustoty od lisovacieho tlaku a doby ohrevu pri teplote ohrevu 200°C



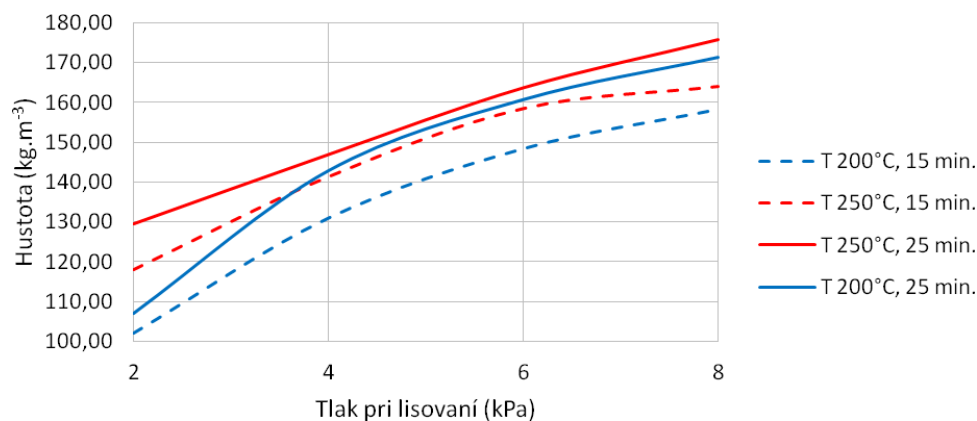
Obr. 8 Zmena hustoty od lisovacieho tlaku a doby ohrevu pri teplote ohrevu 250°C

Experimenty preukázali, že v skúmanom rozsahu teplôt má na súdržnosť a tvarovú stálosť vzorky zásadný vplyv doba ohrevu. Nakoľko formovaný materiál je tepelný izolant, požadovaná doba ohrevu umožňuje jeho objemové prehriatie a natavenie kontaktných miest medzi jednotlivými vložkami. Nevyhnutná doba ohrevu je závislá od teploty ohrevu. So zvyšujúcou sa teplotou sa minimálna potrebná doba na vytvorenie súdržnej a stabilnej vzorky skracuje.

Z realizovaných experimentov tiež vyplynuli časové limity dĺžky ohrevu materiálu. Pri teplotách 200°C a 225°C nie je možné vyrobiť súdržnú a tvarovo stálu vzorku pri dobe výdrže kratšej ako 15 minút. Nedochádza k dostatočnému prehriatiu materiálu a jeho nataveniu. Vzorky neboli dostatočne súdržné a vykazovali výraznú tvarovú nestabilitu po vybratí z formy. Naopak, formovanie pri teplote 250°C má svoj horný časový limit výdrže pri 25 minútach. Pri dlhšom ohreve došlo k degradácii

formovaného materiálu a spekaniu. Vzorky vyrobené v uvedených limitoch vykazovali dobrú tvarovú presnosť a stálosť, líšili sa svojou hustotou.

Z uvedených výsledkov je zrejmé, že pri praktických aplikáciách bude potrebné vykonať podrobnú energetickú analýzu, nakoľko teplota ako aj doba ohrevu výrazne ovplyvňujú ekonomiku a konkurencieschopnosť celej technológie. Z hľadiska produkcie recyklovaných prvkov je nevyhnutné pre spracovateľov zvážiť, či je pre dosiahnutie požadovanej hustoty prvkov ekonomicky výhodnejšie použiť vyššiu teplotu pri kratšej dobe ohrevu, alebo naopak. Tento fakt je uvedený na obrázku 9, ktorý porovnáva priebeh zmeny hustoty pri hraničných hodnotách teploty ohrevu a doby ohrevu pre rôzne formovacie tlaky. Z grafu je zrejmé, že pre dosiahnutie požadovanej hustoty prvkov je ekonomicky výhodnejšie použiť vyšší formovací tlak a zároveň vzhľadom na zaručenie tvarovej presnosti a stálosti vyššiu lisovaciu teplotu a kratšiu dobu výdrže.



Obr. 9 Porovnanie priebehu zmeny hustoty pri hraničných hodnotách teploty ohrevu a doby ohrevu pre rôzne formovacie tlaky

## Experimentálny výskum koeficientu tepelnej vodivosti

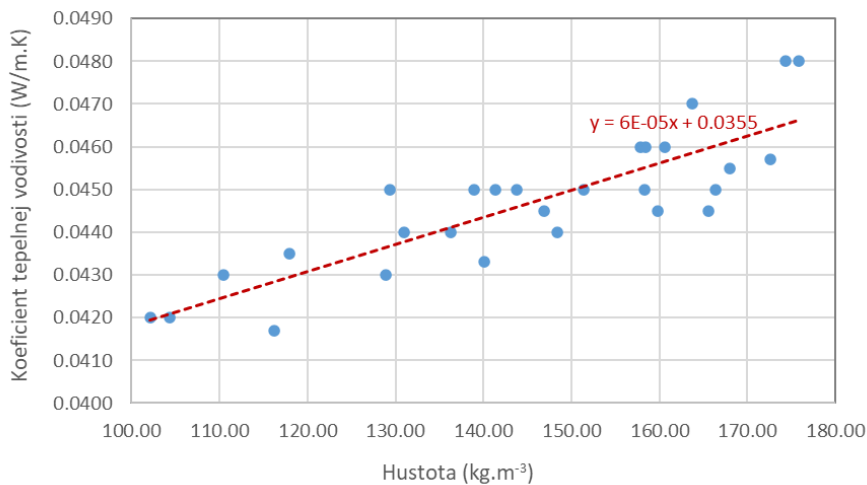
Polyuretánová pena má výborné tepelnoizolačné vlastnosti. Tieto je možné kvantifikovať prostredníctvom koeficientu tepelnej vodivosti. Čím je jeho hodnota nižšia, tým je materiál lepším tepelným izolantom. Realizovaný vývoj efektívnej technológie produkcie tvarových prvkov je založený na optimalizácii technologických parametrov vzhľadom na výslednú hustotu a pevnosť. No v prípade vývoja tepelnoizolačných prvkov je zásadným kvalitatívnym parametrom práve koeficient tepelnej vodivosti. Experimenty dokázali, že v prípade recyklácie PUR peny je možné jeho hodnotu riadiť práve zmenou hustoty prvkov. Preto je potrebné pri optimalizácii vyvíjanej technológie brať do úvahy aj výsledky meraní koeficienta tepelnej vodivosti.

Na meranie koeficientu tepelnej vodivosti bol použitý prístroj ISOMET 2114. Pracuje na princípe priameho merania vlastností prenosu tepla širokej škály izotropných materiálov. Pre meranie bola použitá ihlová sonda pre mäkké materiály. Prístroj aplikuje dynamickú metódu merania, ktorá umožňuje výrazne skrátiť čas merania v porovnaní s metódami merania v ustálenom stave, a to s dostatočnou presnosťou. Počas merania bola ihlová sonda vpichnutá do meranej vzorky. Pre zabezpečenie maximálnej presnosti meraní bola vzorka umiestnená v tepelne odizolovanom prostredí. Proces merania koeficientu tepelnej vodivosti prístrojom ISOMET 2114 je uvedený na obrázku 10. Vzhľadom na korektné štatistické vyhodnotenie experimentu bol koeficient meraný na každej vyrobenej vzorke.



Obr. 10 Meranie koeficientu tepelnej vodivosti prístrojom ISOMET 2114

Výsledky experimentálneho merania vplyvu hustoty na koeficient tepelnej vodivosti sú znázornené na obrázku 11. Z grafu je zrejماً lineárna zmena hodnoty koeficientu tepelnej vodivosti vzhľadom na zmenu hustoty vzoriek. Na meranom intervale hustôt s nárastom zo  $100 \text{ kg.m}^{-3}$  na  $175 \text{ kg.m}^{-3}$  narastá koeficient tepelnej vodivosti z hodnoty 0,42 na aproximovanú hodnotu 0,47. So zvyšujúcou hustotou sa redukuje pórovitosť materiálu a narastá tepelná vodivosť. Preto pri výrobe tepelnoizolačných prvkov je potrebné optimalizovať hodnoty premenných technologických parametrov na dosiahnutie minimálnej hustoty prvkov, avšak s dostatočnou pevnosťou. Experimenty dokázali lineárnu závislosť medzi hustotou a koeficientom tepelnej vodivosti, a teda umožnili nastavenie výrobného procesu s dosiahnutím zaručených tepelnoizolačných vlastností týchto recyklovaných prvkov.



Obr. 11 Vplyv zmeny hustoty na koeficient tepelnej vodivosti tepelnoizolačných prvkov

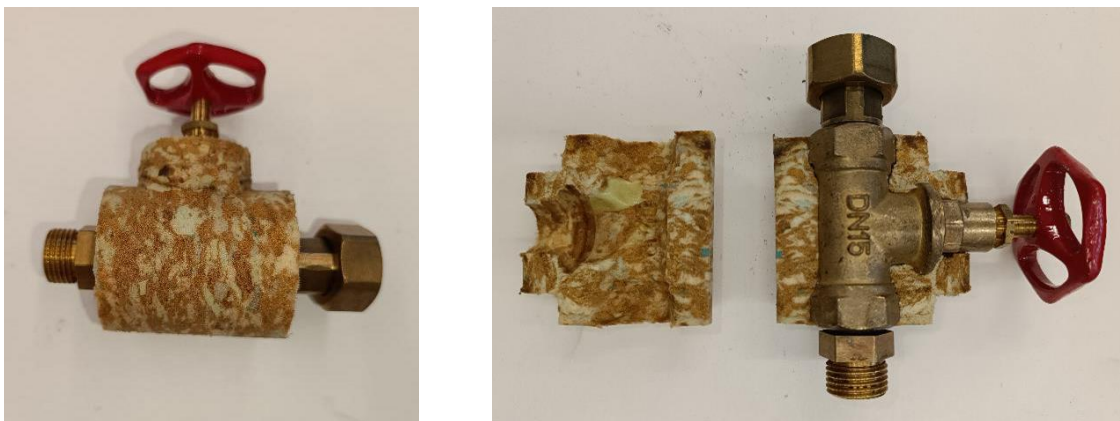
## Vývoj tvarových tepelnoizolačných dielov ako nových produktov z recyklovanej PUR peny

Na základe dosiahnutých laboratórnych výsledkov experimentálneho výskumu technológie suchého formovania recyklovanej PUR peny pod tlakom a teplotou boli realizované pilotné skúšky výroby nových tvarových produktov s vynikajúcimi tepelnoizolačnými vlastnosťami vhodnými pre vysokoteplotné potrubia a armatúry. Na obrázku 12 je uvedený tvarový diel tepelnej izolácie potrubia (bez fólie / s hliníkovou fóliou) a na obrázku 13 je uvedený tvarový tepelnoizolačný prvok ventilu. Vyvinutá technológia nijako nelimituje produkciu tvarových prvkov. Práve naopak, umožňuje realizovať ľubovoľné tvary a rozmery. Zložitejšie tvarové prvky je možné vyrábať cyklicky.

Jednoduchšie (duté valcové prvky, platne, profilové prvky) je možné vyrábať kontinuálnym spôsobom. Oba prístupy sú aktuálne testované.



Obr. 12 Tvarový diel tepelnej izolácie potrubia (bez fólie / s hliníkovou fóliou)



Obr. 13 Tvarový tepelnoizolačný prvok ventilu

## Vývoj povlakovania tepelnoizolačných tvarových prvkov

Ako bolo už deklarované, prvky vyrobené z odpadovej PUR peny sú charakteristické výbornými tepelnoizolačnými vlastnosťami. Vzhľadom na vysokú kritickú teplotu mäknutia PUR peny si tieto izolačné vlastnosti udržiavajú až do teplôt presahujúcich 200°C. Tvarové prvky majú vysoký potenciál uplatnenia predovšetkým v tepelnej energetike ako izolácia teplovodných a parných potrubí, ventilov a ďalších armatúr. Avšak tieto tepelnoizolačné vlastnosti majú prvky zaručené iba v suchom stave. Aby sa predišlo nasiaknutiu vodou, boli v rámci výskumu vyvíjané rôzne povrchy izolačných prvkov uvedené na obrázku 14:

- bez povlakovania,
- plastová fólia (PE, LDPE, PVC, atď.),
- hliníková fólia.

Povrchy bez povlakovania sú určené pre suché prostredie. Plastové povlaky sú vyvíjané do vlhkého prostredia, alebo na prípadný kontakt s kvapalinou. Každý typ plastového povlaku je určený pre iný druh a teplotu prostredia. Povrch s hliníkovou fóliou je vyvíjaný na zvýšenie tepelnoizolačných vlastností týchto prvkov. V súčasnosti prebieha testovanie vlastností týchto povlakov ako aj vývoj kontinuálnej technológie nanášania týchto povlakov priamo počas výrobného procesu prvkov.



Obr. 14 Rôzne povrchy izolačných prvkov

## Záver

Príspevok sa venuje vývoju efektívnej technológii na materiálové zhodnotenie odpadovej polyuretánovej peny. Technológia umožňuje produkciu nových tvarových produktov zo 100% recyklovanej PUR peny. Výsledky experimentálneho výskumu preukázali vysokú efektivitu vyvinutej technológie formovania PUR peny pod tlakom za súčasného ohrevu. Skúmaný bol vplyv zásadných technologických parametrov (teplota ohrevu, lisovací tlak a doba ohrevu) na výslednú hustotu a pevnosť tvarových prvkov. Merania exaktne dokázali, že najväčší vplyv na nárast hustoty vzoriek má veľkosť lisovacieho tlaku. Doba ohrevu vplýva limitujúco na tvorbu súdržných väzieb a teda na samotnú pevnosť prvkov, a zároveň ovplyvňuje degradáciu materiálu individuálne v závislosti od použitej teploty ohrevu. Výsledky výskumu preukázali, že pre dosiahnutie požadovanej hustoty prvkov je ekonomicky výhodnejšie použiť vyšší formovací tlak a zároveň vzhľadom na zaručenie tvarovej presnosti a stálosti prvkov vyššiu lisovaciu teplotu a kratšiu dobu výdrže. Tieto výsledky majú v praxi zásadný význam pri nastavovaní optimálnej kombinácie parametrov technologického procesu recyklácie, a zároveň ponúkajú podklad pre ekonomickú optimalizáciu procesu.

Vývoj tepelnoizolačných tvarových prvkov je založený na skúmaní vplyvu ich hustoty na koeficient tepelnej vodivosti. Výskum preukázal možnosť optimalizácie technologických parametrov výroby aj vzhľadom na tepelnoizolačné vlastnosti produktov. Príspevok prináša aj výsledky vývoja tvarových tepelnoizolačných dielov ako nových produktov z recyklovanej PUR peny. Pridaná hodnota vyvíjaných dielov spočíva v aplikácii špecifických povlakov za účelom zaručenia, prípadne zvýšenia úžitkových vlastností týchto dielov. Prezentovaný výskum preukázal, že vyvinutá technológia umožňuje úspešnú a efektívnu výrobu tvarových (nielen tepelnoizolačných) dielov zo 100% recyklovanej PUR peny. Vynikajúce akustické, tlmiace a tepelnoizolačné vlastnosti tohto materiálu implementovaného do formy tvarových prvkov ho predurčujú na široké spektrum uplatnenia v rôznych priemyselných aplikáciách, či už ako akustická alebo tepelná izolácia potrubných systémov, armatúr a vzduchotechniky.

## PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol za podpory projektu UNIVNET podporeného Ministerstvom školstva, výskumu, vývoja a mládeže SR na základe Zmluvy - Univerzitná a priemyselná výskumná a vzdelávacia platforma recyklačnej spoločnosti, a projektu VEGA 1/0181/24 „Výskum a návrh adaptívneho riadenia výrobných technológií na základe optimalizácie technologických parametrov produkcie tuhých biopalív“ financovaného Ministerstvom školstva, výskumu, vývoja a mládeže SR.

## Použitá literatúra

- [1] Global Leader in Market Reports & Statistics. Report: Polyurethane Foam Market (2026 - 2033). Online: [www.grandviewresearch.com](http://www.grandviewresearch.com) , cited 10.02.2026.
- [2] Liptáková, T., Alexy, P., Gondár, E., Khunová, V.: Polymérne konštrukčné materiály. 1. vyd. Žilina : EDIS, 2012. 190 s. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [3] G.T. Howard, Biodegradation of polyurethane: a review, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 49 (2002) 245–252.
- [4] E. Weigand, Properties and applications of recycled polyurethanes, in: J. Branderup, M. Bittner, G. Menges, W. Micheali (Eds.), *Recycling and Recovery of Plastics*, Hanser Publishers, Munich, Germany, 1996, section 7.10.
- [5] J. Scheirs, *Polymer Recycling*, John Wiley & Sons, Chichester, 1998, chapter 10.
- [6] K.C. Frisch, *Advances in Plastic Recycling vol. 1*, ISBN 1-56676-737-1-Technomic Publishing, 1999.
- [7] J. Troitsch, *International Plastics Flammability Handbook*, Hanser Publishers, Munich, 1990.
- [8] J. DeGaspari, *Mechanical Engineering Magazine (ASME)* June 1999.
- [9] Alliance for the Polyurethanes Industry. <<http://www.polyurethane.org/recycling>>.
- [10] *New Forecasts for Polypropylene, Polystyrene and Polyurethane*, Gobi International, May 20, 2002.
- [11] Huntsman Polyurethanes. <<http://polyurethanes.huntsman.com>>.
- [12] K. M. Zia, H. N. Bhatti, U. A. Bhatti; Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review; *Reactive & Functional Polymers* 67 (2007) 675– 692.
- [13] Stone, H., Villwock, R., Martel, B. “Recent technical advances in recycling of scrap polyurethane foam as finely ground powder in flexible foam” *Mobius Technologies*, presented at *Polyurethanes Conference 2000*, 7 p.
- [14] A.J. Hulme, T.C. Goodhead, *J. Mater. Proc. Technol.* 139 (2003) 322–326.
- [15] S. Held, D.A. Hicks, M. Hart, *Proceedings of R’99 Recovery Recycling Re-integration*, Geneva (Switzerland) February IV. (1999) 92–97.
- [16] <<http://www.warwick.ac.uk/atc/materials/recyclecentre/seminar/paper7>>.
- [17] J. Mleziva; *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*; Praha 2000; 537s.; ISBN 80-85920-72-7.
- [18] G. A. Campbell, W. C. Meluch; *Polyurethane Foam Recycling: Superheated Steam Hydrolysis*; *Environmental Science & Technology* vol.10, 2 (1976) 182-185.
- [19] M. Ionescu; *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethanes*; Shropshire, 2005, 557s.; ISBN 1-85957-491-2.
- [20] G. Behrendt, B. Naber; The chemical recycling of polyurethanes; *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*; 44, 1 (2009) 2-23.
- [21] ZHANG, Yanhong ; XIA, Zhengbin ; HUANG, Hong. Thermal degradation of polyurethane based on IPDI. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* 2009, 84, s. 89-94.
- [22] The plastic Portal [online]. 1995 [cit. 2011-03-17]. Co-combustion of building insulation foams with municipal solid waste - Summary Report.
- [23] A. Tohka, R. Zevenhoven, Processing wastes and wastederived fuels containing brominated flame retardants, *Helsinki Univ. Technol., Energy Engineering and Environmental Protection Publications, TKK-ENY-7* (2002), 62 p.
- [24] Zevenhoven, R.: *Treatment and disposal of polyurethane wastes: options for recovery and recycling.* Helsinki University of Technology, Espoo, June 2004, ISBN 951-22-7161-3.