

Význam vrstvenej štruktúry pri aplikácii recyklovaných automobilových plastov do drevotrieskových dosiek

Iveta ČABALOVÁ^a, Jozef KRILEK^b, Anna DARABOŠOVÁ^a, Vladimír MANCEL^b

^aKatedra chémie a chemických technológií, Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen;
e-mail: cabalova@tuzvo.sk

^bKatedra environmentálnej a lesníckej techniky, Fakulta techniky, Študentská 26, 96001 Zvolen

Súhrn

Práca sa zaoberá analýzou správania sa drevotrieskových dosiek s obsahom recyklovaných plastov z automobilového priemyslu v závislosti od ich konštrukčného usporiadania. Porovnávané sú jedno- a trojvrstvové dosky z hľadiska ich mechanickej pevnosti a fyzikálnych vlastností súvisiacich s pôsobením vlhkosti. Výsledky poukazujú na rozdielne rozloženie napätí v materiáli a na význam vrstvenej štruktúry pri optimalizácii vlastností drevo-plastových kompozitov. Práca prispieva k rozšíreniu poznatkov o využití sekundárnych surovín pri výrobe aglomerovaných materiálov.

Kľúčové slová: drevotrieskové dosky, vrstvená štruktúra, recyklované plasty, mechanické vlastnosti, fyzikálne vlastnosti.

Úvod

Pri výrobe drevných kompozitov je potrebné brať do úvahy, že drevo má viacero nevýhod, ako je zlá rozmerová stabilita, napučiavanie pri absorpcii vlhkosti a ľahké napadnutie hubami a hmyzom, čo obmedzuje jeho široké uplatnenie¹. Drevné vlákna môžu byť v kompozitoch čiastočne nahradené syntetickými plnidlami, aby sa dosiahlo zlepšenie niektorých vlastností kompozitov. Kompozity s obsahom plastov majú vyššiu odolnosť voči poveternostným vplyvom a biologickú odolnosť². Polyetylentereftalát (PET), polypropylén (PP)³, polyetylén (PE)⁴, kyselina polymliečna (PLA)⁵, polyvinylchlorid (PVC) a polyuretán (PU)⁶ sa bežne používajú ako polymérne plnidlo pri výrobe drevo-plastových kompozitov. Takéto doskové materiály sa potom môžu využívať v rôznych odvetviach priemyslu, napríklad pri výstavbe budov⁷. Keďže drevo je anizotropný materiál, rozhranie medzi plastom a drevom môže byť vystavené značnému namáhaniu, ktoré môže viesť k jeho zlyhaniu, čo spôsobí, že kompozit stratí svoju mechanickej integritu⁸.

Cieľom tejto práce je posúdiť možnosti materiálového zhodnotenia plastových odpadov z automobilového priemyslu prostredníctvom ich aplikácie do jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek (DTD) a porovnať vplyv vrstvenej štruktúry na mechanické a fyzikálne vlastnosti týchto kompozitných materiálov.

Práca prináša nové poznatky v oblasti vývoja drevo-plastových kompozitov na báze drevotrieskových dosiek, predovšetkým:

- Systematické porovnanie jedno- a trojvrstvej štruktúry drevotrieskových dosiek obsahujúcich odpadové plasty z automobilového priemyslu, čo je v dostupnej literatúre zatiaľ málo spracovaná problematika.
- Experimentálne overenie vplyvu plastovej zložky na mechanické (pevnosť v ťahu a ohybová pevnosť) a fyzikálne vlastnosti (nasiakavosť, hrúbkové napučiavanie) dosiek v závislosti od ich konštrukčného usporiadania.
- Rozšírenie poznatkov o kompatibilite drevnej a plastovej zložky v klasických drevotrieskových doskách bez nutnosti zásadných zmien výrobného procesu.

- Identifikáciu výhod a limitov vrstvenej štruktúry pri aplikácii sekundárnych plastových surovín, čo môže slúžiť ako podklad pre optimalizáciu zloženia dosiek.
- Príspevok k materiálovému zhodnoteniu automobilových plastových odpadov, čím práca reaguje na aktuálne environmentálne a legislatívne požiadavky obehového hospodárstva.

Jedno- a trojvrstvé drevotriekové dosky s obsahom recyklovaných automobilových plastov možno použiť vo viacerých oblastiach, ako v nábytkárskom (nábytok, police, pričom je možná povrchová úprava materiálu), či stavebnom (obkladové, výplňové dosky v suchých a mierne vlhkých interiéroch, nenosné konštrukčné prvky) priemysle, alebo ako technické či obalové materiály.

Experimentálna časť

Materiál

- Plastový materiál: lakované, nelakované nárazníky, a palivové nádrže boli dodané spoločnosťou ALUEX s.r.o. vo Zvolene na Slovensku. Čo sa týka druhu materiálu, lakované aj nelakované nárazníky boli vyrobené z polypropylénu (PP), a palivové nádrže z polyetylénu s vysokou hustotou (HDPE). Tieto odpadové plasty boli narezané na menšie kúsky, vyčistené a následne zomleté pomocou zariadenia na drvenie plastov (DP 11 – 240/350, Profing, Slovensko, odsávač prachových častíc ABS 1080, Holzmann Maschinen, Rakúsko) na Technickej univerzite vo Zvolene. Častice sa preosiali pomocou analytického sita AS 200 digit cA (Retsch, Nemecko), aby bola dosiahnutá frakcia od 1 mm do 4 mm.

- Drevné častice, pripravené z čerstvej smrekovej guľatiny, boli v experimente spracované v spoločnosti Kronospan s.r.o, Zvolen, SR.

- Jednovrstvové DTD: Boli použité rozmery častíc bežne používaných pre stredovú vrstvu od 0,25 mm do 4,0 mm.
- Trojvrstvové DTD: Drevné častice použité v jadrovej vrstve mali veľkosť od 0,25 mm do 4,0 mm, zatiaľ čo častice použité v povrchovej vrstve boli jemnejšie, od 0,25 mm do 1,0 mm.

Všetky drevné častice boli pred použitím vo výrobnom procese vysušené na dosiahnutie obsahu vlhkosti 4 %.

- Ako pojivo sa použila močovinoformaldehydová (UF) živica (Kronores CB 1100 F), ktorá obsahuje 67,1 hm.% pevných látok a má viskozitu 460 mPa.s a čas gélovania 55 sekúnd s pH 8,6. Na uľahčenie procesu vytvrdzovania sa ako tvrdidlo použil dusičnan amónny (NH_4NO_3 , 47 %) spolu s 30 hm.% parafínovou emulziou na zlepšenie odolnosti voči vode a trvanlivosti konečného produktu.

Je nutné poznamenať, že UF lepidlo je charakteristické tým, že má nízku odolnosť voči pôsobeniu vody a vlhkosti. Pri kontakte s vodou dochádza k hydrolytickému rozkladu metylénových a éterových väzieb vytvorených počas vytvrdzovania živice. Následkom je oslabenie adhézných spojov medzi drevnými časticami⁹. Z toho dôvodu sú takéto dosky určené prevažne do suchého prostredia.

Metodika

Výroba jednovrstvových drevotriekových dosiek s obsahom plastov

Jednovrstvové drevené dosky s prídavkom drveného plastu (v objeme 10, 15 a 20 %) s rozmermi 360 mm × 280 mm × 15 mm (šírka × dĺžka × hrúbka) boli pripravené v laboratóriách Technickej univerzity vo Zvolene.

Drevotriekové dosky boli pripravené bežnou technológiou, t. j. najprv studeným predlisovaním drevotriekových rohoží pod tlakom 1 MPa, po ktorom nasledovalo lisovanie za tepla pod tlakom pomocou laboratórneho lisu CBJ 100–11, TOS (Rakovník, bývalé Československo). Drevné častice, plastové častice a adhézna zmes boli zmiešané v laboratórnom aplikačnom bubne. Výroba dosiek zahŕňala špecifické pomery materiálov (tabuľka 1):

Tabuľka 1: Zloženie jednovrstvovej drevotrieskovej dosky. Obsah každej zložky je uvedený pre jeden panel.

Objemová hmotnosť plastových častíc (%)	Drevné častice (g)	Lepidlo (g)	Parafínová emulzia (g)	Tvrdidlo (g)	Plastové častice (g)
10	950,4	122,7	22	7,8	105,6
15	897,6	122,7	22	7,8	158,4
20	844,8	122,7	22	7,8	211,2

Zmes bola umiestnená do hydraulického predlisu na približne 2 minúty. Po fáze predlisovania nasledovala fáza lisovania za tepla pod hydraulickým tlakom 30 MPa, 15 MPa a 7,5 MPa v rôznych časových intervaloch. Celkový čas lisovania bol približne 6 minút pri teplote 230 °C. Táto teplota lisovania bola použitá na základe našich predchádzajúcich skúseností a snažili sme sa priblížiť k podmienkam lisovania v praxi. Bolo vyrobených 6 dosiek z každého druhu, pričom bola vytvorená aj referenčná DTD bez obsahu plastového plnidla (Tab. 3)¹⁰.

Výroba trojvrstvových drevotrieskových dosiek s obsahom plastov

Trojvrstvové drevené dosky s prídavkom drveného plastu (v objeme 10 %) s rozmermi 360 mm × 280 mm × 18 mm (šírka × dĺžka × hrúbka) boli pripravené v laboratóriách Technickej univerzity vo Zvolene. Výrobný proces sa riadil štandardnou technológiou výroby DTD. Prvým krokom bola príprava drevotrieskových rohoží, ktoré boli najprv lisované za studena pri tlaku 1 MPa. Následne boli rohože lisované za tepla pomocou laboratórneho lisu CBJ 100–11 (TOS Rakovník, Československo). Povrchové vrstvy dosiek boli vytvorené zmiešaním drevených častíc s lepidlom, zatiaľ čo jadrová vrstva bola zložená z kombinácie drevených častíc, drvených plastových častíc a lepidla. Tieto materiály boli dôkladne premiešané, aby sa zabezpečilo rovnomerné rozloženie plastov v jadre.

Výroba dosiek zahŕňala špecifické pomery materiálov: 396 g zmesi povrchovej vrstvy bolo umiestnených do formy, po ktorej nasledovalo 1110 g zmesi jadrovej vrstvy. Posledným krokom bolo umiestnenie ďalších 396 g materiálu povrchovej vrstvy navrch. Zloženie trojvrstvovej drevotrieskovej dosky je popísané v tabuľke 2:

Tabuľka 2: Zloženie trojvrstvovej drevotrieskovej dosky. Obsah každej zložky je uvedený pre jeden panel.

Vrstva	Drevné častice (g)	Lepidlo (g)	Parafínová emulzia (g)	Tvrdidlo (g)	Plastový granulát (g)
Povrch	670	103,9	14,5	4,4	0
Jadro	888,3	99,1	16,3	8,4	98,7

Pozn.: obsah každej zložky je uvedený pre jeden panel

Táto zostava formy bola potom predlisovaná za studena počas 2 minút, po čom nasledovalo lisovanie za tepla pri rôznych úrovniach tlaku: 20 MPa, 10 MPa a 5 MPa, v rôznych intervaloch, počas celkového času lisovania 5 minút pri teplote 230 °C¹¹. Výsledné trojvrstvové drevotrieskové dosky boli vyrobené s tromi rôznymi typmi plastových plnidiel, lakovaných nárazníkov, nenalakovaných nárazníkov a palivových nádrží. Hustota DTD bola približne 700 kg/m³. Každý typ plnidla bol pridaný v množstve 10 %. Okrem toho bola vyrobená aj trojvrstvová drevotriesková doska bez plastového plnidla, ktorá slúži ako referenčná doska na porovnanie. Označenia všetkých vzoriek sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 3: Označenie vzoriek kompozitov

1 - DTD	Jednovrstvová drevotriesková doska bez pridaného plnidla
3 - DTD	Trojvrstvová drevotriesková doska bez pridaného plnidla
1 - DTD - 10 - LN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 10 %-ným obsahom lakovaných nárazníkov
1 - DTD - 15 - LN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 15 %-ným obsahom lakovaných nárazníkov
1 - DTD - 20 - LN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 20 %-ným obsahom lakovaných nárazníkov
3 - DTD - 10 - LN	Trojvrstvová drevotriesková doska s 10 %-ným obsahom lakovaných nárazníkov
1 - DTD - 10 - NN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 10 %-ným obsahom nelakovaných nárazníkov
1 - DTD - 15 - NN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 15 %-ným obsahom nelakovaných nárazníkov
1 - DTD - 20 - NN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 20 %-ným obsahom nelakovaných nárazníkov
3 - DTD - 10 - NN	Trojvrstvová drevotriesková doska s 10 %-ným obsahom nelakovaných nárazníkov
1 - DTD - 10 - PN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 10 %-ným obsahom palivových nádrží
1 - DTD - 15 - PN	Jedno-vrstvová drevotriesková doska s 15 %-ným obsahom palivových nádrží
1 - DTD - 20 - PN	Jednovrstvová drevotriesková doska s 20 %-ným obsahom palivových nádrží
3 - DTD - 10 - PN	Trojvrstvová drevotriesková doska s 10 %-ným obsahom palivových nádrží

Výrobu jednovrstvových DTD s rôznym objemovým percentom (10, 15 a 20 %) spomínaných plastov možno považovať za prvý krok k optimalizácii výroby trojvrstvových DTD. Viaceré výsledky výskumu jednovrstvových DTD poukázali na to, že najoptimálnejší percentuálny podiel polymérnych častíc v DTD je 10 %^{12,13}. Z toho dôvodu boli v ďalšom výskume vyrobené trojvrstvové DTD iba s 10 %-ným podielom plastov.

Pre testovanie jednotlivých vlastností boli z DTD vyhotovené telieska v súlade s uvedenými normami v počte kusov 10 pre každý typ skúšky.

Stanovenie hustoty

Hustota jednotlivých vzoriek bola stanovená gravimetrickou metódou v súlade s normou STN EN 323¹⁴. Z každého typu drevotrieskovej dosky bolo analyzovaných šesť skúšobných telies s nominálnymi rozmermi 50 × 50 × 18 mm (šírka × dĺžka × hrúbka) a priemernej vlhkosti skúšobných telies ≈ 6%. Skutočné rozmery vzoriek boli stanovené pomocou digitálneho posuvného meradla s cieľom presného určenia ich objemu. Hmotnosť každej vzorky bola následne zistená vážením na laboratórnych váhach s primeranou presnosťou. Hustota (ρ) bola vypočítaná ako podiel hmotnosti vzorky (m) a jej objemu (V) podľa vzťahu:

$$\rho = m / V$$

kde ρ je hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), m je hmotnosť vzorky (g) a V je objem vzorky (cm^3).

Výsledná hodnota hustoty pre každý typ materiálu bola stanovená ako aritmetický priemer zo šiestich meraní.

Stanovenie mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti vzoriek sa hodnotili stanovením ich pevnosti v ťahu a v ohybe. Testovanie sa uskutočnilo pomocou univerzálneho testovacieho stroja Shimadzu AG-IC 20/50 KN STD (Star Teknik Elektronik Cihazlar Sanayi, Ticaret, Turecko).

Pevnosť v ťahu sa stanovila podľa normy EN 319¹⁵ na ôsmich vzorkách. Vzorky boli spojené s blokmi pomocou vhodného lepidla a vystavené zvyšujúcemu sa zaťaženiu, až kým nedošlo k porušeniu kolmo na rovinu materiálu. Maximálne zaťaženie sa dosiahlo do 60 sekúnd a pevnosť sa vypočítala na základe maximálnej sily pôsobiacej na povrch vzorky, pričom ako vstupné parametre sa použila priemerná plocha prierezu a hrúbka dosky.

Ohybová pevnosť sa merala podľa normy EN 310¹⁶, pričom šesť vzoriek bolo umiestnených na dvoch podperách a vystavených centrálnemu zaťaženiu. Ohybová pevnosť sa vypočítala ako pomer ohybového momentu pri medznom zaťažení k modulu prierezu, pričom vstupné parametre zahŕňali priemernú šírku v bode zaťaženia a hrúbku.

Stanovenie fyzikálnych vlastností

Na stanovenie nasiakavosti vody a napučievania po 24 hodinách od ponorenia sa použila norma EN 317¹⁷. Merania sa vykonali na ôsmich vzorkách z každého typu DTD. Vzorky boli ponorené najmenej 25 mm pod hladinu vody do vodného kúpeľa (Nüve BM 402) naplneného čistou vodou udržiavanou na teplote 20 °C, pričom sa zabezpečilo, že zostanú oddelené od seba navzájom a od stien nádoby. Voda sa po každom teste vymenila. Po 24 hodinách sa vzorky vybrali a zmerala sa ich hrúbka a hmotnosť. Napučevanie sa zaznamenalo ako zmena hrúbky, zatiaľ čo nasiakavosť sa určila na základe zmeny hmotnosti, pričom sa ako referenčné hodnoty použili počiatočná hrúbka a hmotnosť.

Výsledky a diskusia

V tejto práci sa vykonávala analýza vplyvu zloženia jedno- a trojvrstvových DTD s obsahom odpadových plastov z automobilov na ich mechanické a fyzikálne vlastnosti.

Hustota drevotrieskových dosiek s obsahom automobilových plastov

Tabuľka 4 ukazuje, že hustota jednovrstvových drevotrieskových dosiek (1-DTD) sa pohybuje v úzkom intervale 0,816 – 0,825 g·cm⁻³, pričom referenčná doska bez prídavku granulátu dosiahla hodnotu 0,818 g·cm⁻³. Prídavok recyklovaného plastového plnidla v rozsahu 10 – 20 % nemal výrazný vplyv na hustotu, keďže zaznamenané rozdiely medzi jednotlivými typmi plastu (LN, NN, PN) boli minimálne. Mierne vyššie hodnoty hustoty boli pozorované pri 15 % a 20 % podiele typu NN (0,824 a 0,825 g·cm⁻³), čo môže súvisieť s rozdielnou objemovou hmotnosťou alebo štruktúrou použitého plastu. Naopak, trojvrstvé dosky (3-DTD) vykazovali výrazne nižšie hodnoty hustoty v porovnaní s jednovrstvovými doskami, pričom referenčná hodnota dosiahla 0,72 g·cm⁻³. Pri trojvrstvových doskách s 10 % obsahom granulátu hustota mierne kolísala v závislosti od typu plastu (0,701 – 0,72 g·cm⁻³), čo naznačuje, že konštrukčná skladba dosky má významnejší vplyv na výslednú hustotu než samotný typ recyklovaného plnidla. Hustota pritom predstavuje jeden z kľúčových faktorov ovplyvňujúcich pevnostné vlastnosti drevoplastových kompozitov¹⁸.

Tabuľka 4: Priemerná hustota vzoriek drevotrieskových dosiek s obsahom plastov z vyradených automobilov

Materiál	Podiel granulátu (%)	Priemerná hustota ± smerodajná odchýlka (g·cm ⁻³)
1-DTD	0	0,818 ± 0,009
1-DTD - LN	10	0,820 ± 0,011
1-DTD - LN	15	0,816 ± 0,010
1-DTD - LN	20	0,822 ± 0,009
1-DTD - NN	10	0,818 ± 0,009
1-DTD - NN	15	0,824 ± 0,006
1-DTD - NN	20	0,825 ± 0,009
1-DTD - PN	10	0,818 ± 0,012
1-DTD - PN	15	0,822 ± 0,010
1-DTD - PN	20	0,819 ± 0,009
3-DTD	0	0,720 ± 0,030
3-DTD-10-LN	10	0,701 ± 0,020
3-DTD-10-NN	10	0,712 ± 0,030
3-DTD-10-PN	10	0,720 ± 0,030

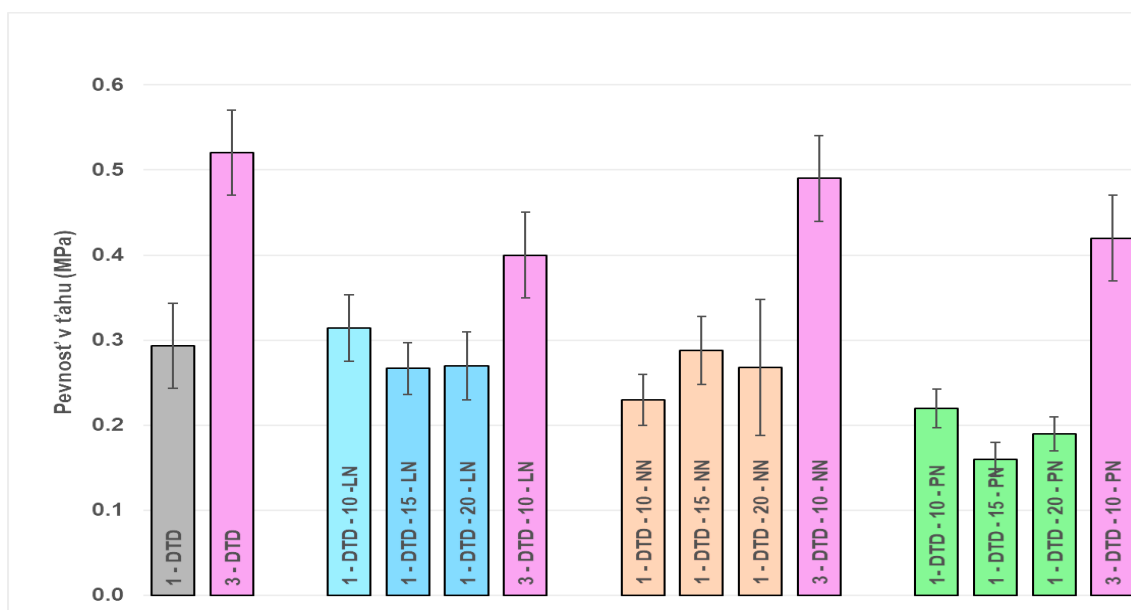
Pri lisovaných drevných materiáloch sa v dôsledku zhutnenia štruktúry bežne dosahuje zvýšenie hustoty o 5 až 40 %¹⁹ (Deppe, Ernst, 2000). K výslednej hustote sledovaných kompozitov prispieva aj

prítomnosť recyklovaného plastu z automobilového priemyslu, najmä HDPE a PP, ktorých hustota je relatívne vysoká ($0,954 - 0,96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, resp. $0,90 - 0,91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)²⁰. Vzhľadom na tieto hodnoty plastová zložka prirodzene ovplyvňuje objemovú hmotnosť výsledného materiálu a môže sa podieľať na zmene jeho mechanického správania.

Drevná múčka používaná v drevoplastových kompozitoch, kde plast tvorí maticu, môže dosahovať hustotu v širokom rozmedzí $0,4$ až $1,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ v závislosti od pôvodu a spôsobu spracovania²¹. Wang a Sun²² vyrobili kompozitné dosky z pšeničnej slamy a kukuričného pithu a preukázali, že pevnostné vlastnosti možno dosiahnuť aj pri relatívne nízkej hustote materiálu ($0,34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), pričom významnú úlohu zohráva aj optimalizovaná vlhkosť suroviny.

Pevnosť v ťahu drevotrieskových dosiek s obsahom automobilových plastov

Obrázok 1 znázorňuje vplyv obsahu a typu recyklovaného plastového plnidla na pevnosť v ťahu kolmo na rovinu jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek. Výsledky ukazujú, že prítomnosť plastového plnidla vo všeobecnosti ovplyvňuje súdržnosť štruktúry dosky, pričom tento efekt je výraznejší pri jednovrstvových doskách. So zvyšujúcim sa podielom plastov v jednovrstvových doskách dochádza k postupnému poklesu pevnosti v ťahu, čo možno pripísať zníženiu efektívneho kontaktu medzi drevnými časticami a obmedzenej adhézii medzi drevom a polymérnou fázou. V literatúre sa uvádza, že mechanické vlastnosti kompozitov je možné významne zlepšiť použitím kompatibilizátorov, napríklad maleátovaného polyetylénu, ktorý zvyšuje pevnosť v ťahu v dôsledku lepšej medzifázovej adhézie medzi drevnou a polymérnou zložkou, hoci modul pružnosti sa výrazne nemení²³.



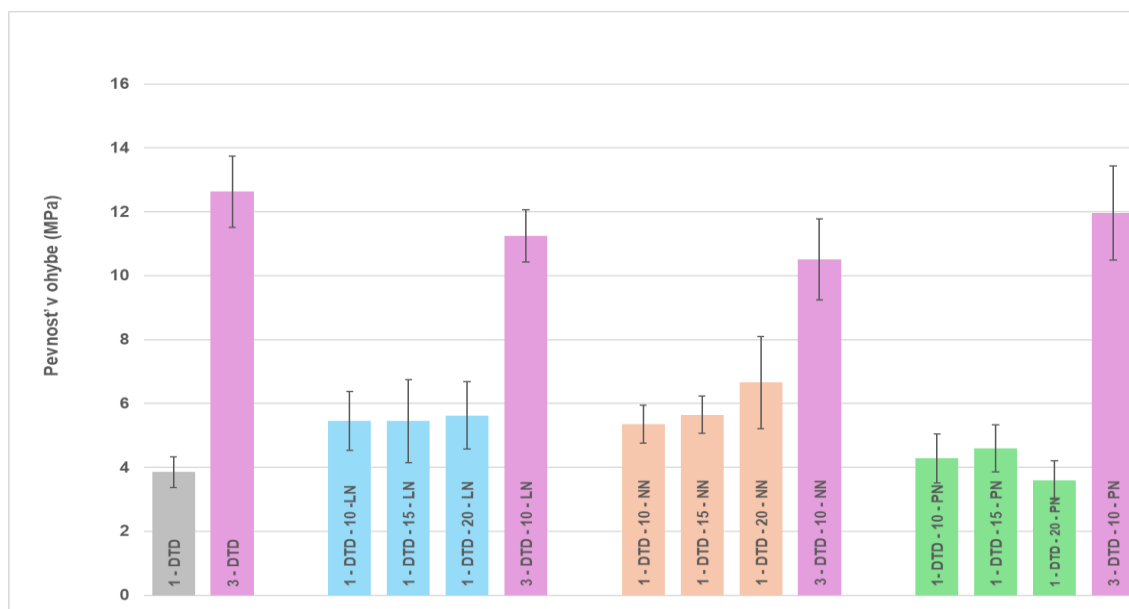
Obrázok 1: Pevnosť v ťahu jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek s obsahom plastového plnidla; 10, 15 a 20 – percentuálny podiel plastového plnidla; LN- lakované nárazníky, NN- nelakované nárazníky, PN- palivové nádrže. Hodnoty sú uvedené ako priemer \pm smerodajná odchýlka.

Tento poznatok naznačuje, že pokles pevnosti pozorovaný v našej práci môže súvisieť s absenciou kompatibilizačných prísad, čo obmedzuje efektívny prenos napätia medzi jednotlivými fázami kompozitu. Výraznejší pokles bol pozorovaný pri vyšších podieloch plastového plnidla. Typ plastu má taktiež významný vplyv, pričom dosky s obsahom palivových nádrží (HDPE) vykazujú spravidla nižšie hodnoty pevnosti v porovnaní s doskami obsahujúcimi polypropylénové nárazníky. Lakované nárazníky môžu negatívne ovplyvniť adhéziu v dôsledku prítomnosti zvyškov povrchových úprav, ktoré pôsobia ako separačná vrstva. Naopak, nelakované nárazníky vykazujú mierne priaznivejší vplyv na pevnosť v ťahu. Trojvrstvové dosky s 10 % obsahom plastu dosahujú vyššie hodnoty pevnosti v porovnaní

s jednovrstvovými doskami s rovnakým podielom plnidla. Tento jav možno vysvetliť priaznivejším rozložením napätí vďaka jemnejším časticiam v povrchových vrstvách, koncentráciou plastového plnidla v jadre dosky a v neposlednom rade rozdielnou hustotou DTD. Vrstvená štruktúra tak znižuje negatívny vplyv plastovej zložky na túto pevnosť. Výsledky potvrdzujú, že konštrukčné usporiadanie dosky zohráva kľúčovú úlohu pri zachovaní jej mechanickej integrity. Z hľadiska aplikácií sú trojvrstvové dosky s nižším obsahom plastového plnidla mechanickejšou stabilnejším riešením. Podobné zistenia uvádzajú aj Gozdecki et al.²⁴, ktorí skúmali využitie recyklovaných drevných častíc získaných z frézovania trojvrstvových drevotrieskových dosiek pri výrobe drevo-plastových kompozitov na báze polypropylénu. Zistili, že napriek odlišnej morfológii častíc (kratšia dĺžka a nižší pomer dĺžky k hrúbke) nevykazovali výsledné kompozity štatisticky významné rozdiely v mechanických ani fyzikálnych vlastnostiach v porovnaní s kompozitmi vyrobenými z priemyselných drevných častíc alebo drevej múčky. Tieto výsledky naznačujú, že samotná prítomnosť recyklovanej zložky nemusí nevyhnutne viesť k zhoršeniu mechanickej integrity kompozitu, pokiaľ je zabezpečená dostatočná homogenita systému. Zároveň však autori poukazujú na potrebu ďalšieho výskumu zameraného na objasnenie úlohy močovinoformaldehydovej živice prítomnej v recyklovaných časticiach, ktorá môže ovplyvňovať medzifázové interakcie medzi drevnou a polymérou zložkou²⁴.

Pevnosť v ohybe drevotrieskových dosiek s obsahom automobilových plastov

Obrázok 2 zobrazuje závislosť ohybovej pevnosti jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek od typu a množstva plastového plnidla. Vo všeobecnosti je možné pozorovať, že jednovrstvové dosky vykazujú s rastúcim obsahom plastu nárast ohybovej pevnosti. Najvýraznejší pokles pevnosti je zaznamenaný pri 20 % obsahu palivových nádrží. Dosky s obsahom palivových nádrží vykazujú nižšiu ohybovú pevnosť v porovnaní s doskami s nárazníkmi, čo môže súvisieť s vyššou pružnosťou HDPE a nižším modulom elasticity. Lakované nárazníky majú mierne nepriaznivejší vplyv na ohybovú pevnosť než nelakované, pravdepodobne v dôsledku zhoršenej väzby medzi časticami. Trojvrstvové dosky s 10% obsahom plastu však vykazujú porovnateľné alebo len mierne nižšie hodnoty ohybovej pevnosti v porovnaní s referenčnými doskami bez plastu.



Obrázok 2: Pevnosť v ohybe jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek s obsahom plastového plnidla; 10, 15 a 20 – percentuálny podiel plastového plnidla; LN- lakované nárazníky, NN- nelakované nárazníky, PN- palivové nádrže. Hodnoty sú uvedené ako priemer ± smerodajná odchýlka.

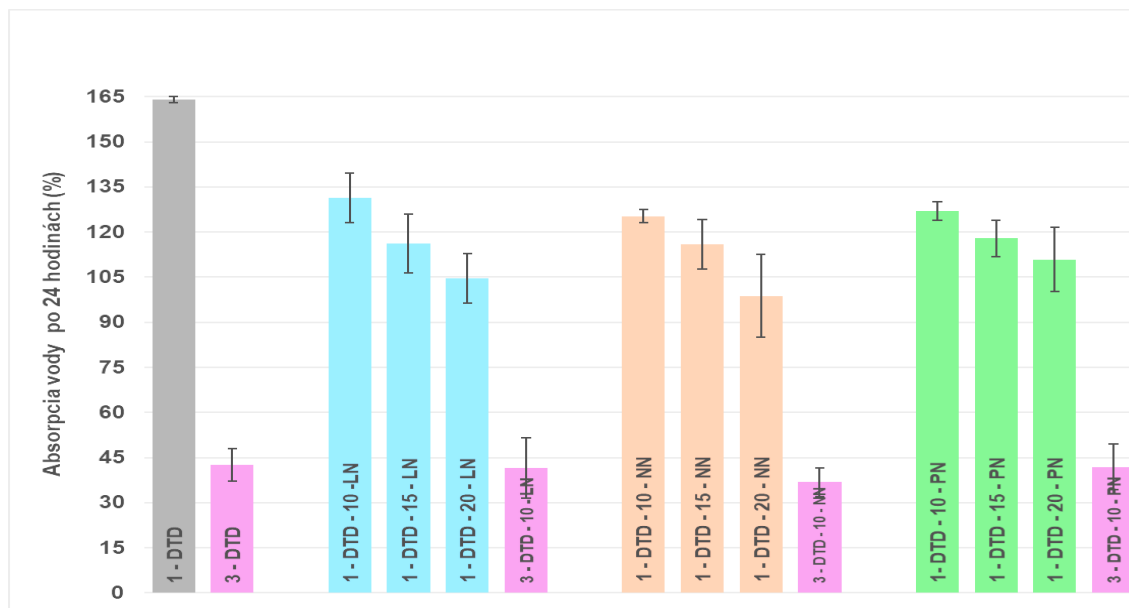
Tento jav poukazuje na pozitívny vplyv vrstvenej štruktúry, kde povrchové vrstvy z jemných drevných častíc efektívne prenášajú ohybové napätia. Plastové plnidlo umiestnené v jadre má v tomto prípade menší negatívny vplyv na celkovú pevnosť. Výsledky potvrdzujú, že optimalizácia konštrukčného

usporiadania dosky je kľúčová pre zachovanie ohybových vlastností. Mechanizmus zmien ohybovej pevnosti možno vysvetliť aj na základe poznatkov z výskumu drevo-plastových kompozitov, kde sa preukázalo, že existuje optimálny pomer medzi výstužnou drevnou zložkou a polyméromou maticou. Al-Magdasi et al.²⁵ uvádzajú, že zvýšenie obsahu drevných vlákien z 20 % na 30 % v drevoplastových kompozitoch viedlo k nárastu ohybovej pevnosti z 44,88 MPa na 59,06 MPa v dôsledku efektívneho prenosu napätia a priaznivej medzifázovej interakcie medzi plastovou maticou a výstužou.

Naopak, ďalšie zvýšenie podielu vlákien na 40 % spôsobilo pokles pevnosti, keďže vyššia koncentrácia výstuže znemožnila dostatočné obalenie vlákien polymérom a viedla k zhoršenej adhézii medzi jednotlivými fázami²⁶. Tento princíp je aplikovateľný aj na skúmané drevotrieskové dosky s plastovým plnidlom, kde zmena pomeru drevej a plastovej zložky ovplyvňuje schopnosť matrice efektívne prenášať napätie. Výsledky naznačujú, že existuje optimálny podiel plastového plnidla, pri ktorom dochádza k zachovaniu alebo miernemu zlepšeniu ohybovej pevnosti, zatiaľ čo jeho nadmerné množstvo môže viesť k oslabeniu medzifázovej súdržnosti. Z praktického hľadiska sú trojvrstvé dosky vhodnejšie pre aplikácie, kde je ohybová pevnosť rozhodujúcim parametrom.

Absorpcia vody a hrúbkové napučovanie drevotrieskových dosiek s obsahom automobilových plastov

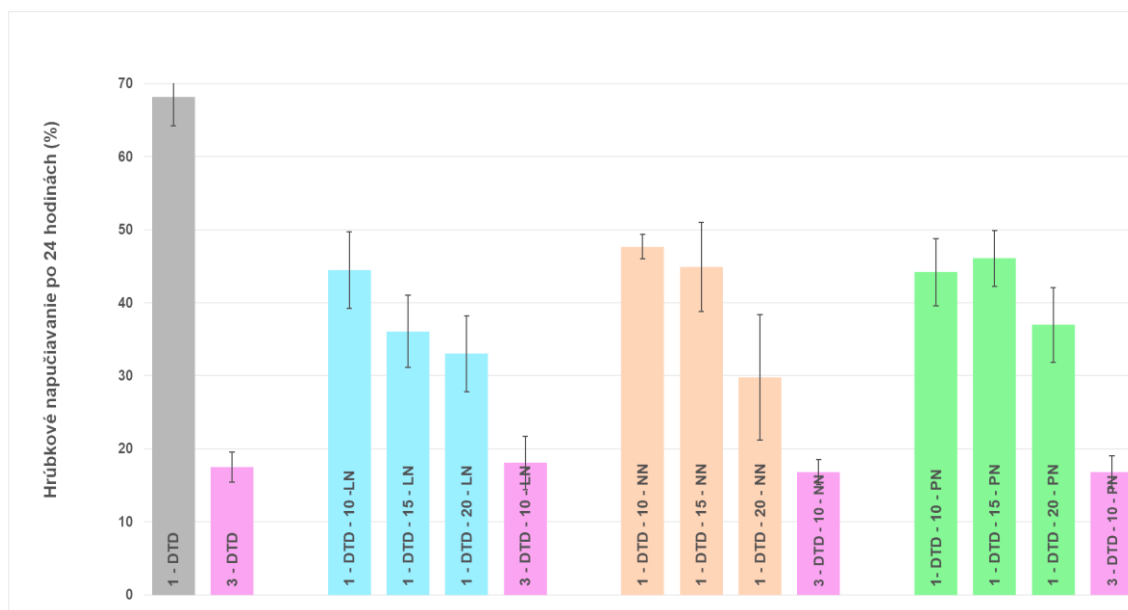
Obrázok 3 znázorňuje vplyv plastového plnidla na absorpciu vody po 24 hodinách u jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek. Z výsledkov je zrejmé, že prídavok plastov vedie vo všeobecnosti k zníženiu nasiakavosti v porovnaní s referenčnými doskami bez plastu. Tento efekt je spôsobený hydrofóbnym charakterom polymérnych materiálov, ktoré obmedzujú prenikanie vody do štruktúry dosky. V jednovrstvových doskách je pokles absorpcie vody výraznejší so zvyšujúcim sa obsahom plastového plnidla, pričom najnižšie hodnoty sú dosiahnuté pri 20 % obsahu plastu.



Obrázok 3: Absorpcia vody po 24 hodinách jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek s obsahom plastového plnidla; 10, 15 a 20 – percentuálny podiel plastového plnidla; LN- lakované nárazníky, NN- nelakované nárazníky, PN- palivové nádrže. Hodnoty sú uvedené ako priemer ± smerodajná odchýlka.

Typ plastu má významný vplyv, pričom dosky s obsahom palivových nádrží (HDPE) vykazujú najnižšiu nasiakavosť, čo súvisí s vysokou odolnosťou tohto polyméru voči vode. Polypropylénové nárazníky vykazujú mierne vyššiu absorpciu, avšak stále nižšiu než referenčné dosky. Lakované nárazníky môžu lokálne znižovať prienik vody, avšak ich nehomogénne rozloženie môže viesť k väčšej variabilite výsledkov. Trojvrstvé dosky dosahujú nižšiu absorpciu vody v porovnaní s jednovrstvovými

doskami s rovnakým podielom plastu. Tento jav možno vysvetliť hustejšími a jemnejšími povrchovými vrstvami, ktoré pôsobia ako bariéra proti prenikaniu vody. Kombinácia vrstvenej štruktúry a plastového plnidla sa tak javí ako účinný spôsob zlepšenia vlhkosťnej odolnosti DTD. Výsledky naznačujú, že takéto kompozitné dosky sú vhodnejšie pre použitie v prostrediach so zvýšenou vlhkosťou. Pri výrobe drevo-plastových kompozitov sa uvádza optimálne teplotné rozmedzie spracovania termoplastov približne 170 – 205 °C, čo zabezpečuje dostatočné premiešanie plastovej matrice s drevnými časticami²⁷. V tejto práci bola použitá teplota 230 °C, ktorá pravdepodobne umožnila čiastočné natavenie plastových častíc a ich redistribúciu v štruktúre dosky, čo mohlo prispieť k zníženiu nasiakavosti a hrúbkového napučievania.



Obrázok 4: Hrúbkové napučívanie po 24 hodinách jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek s obsahom plastového plnidla; 10, 15 a 20 – percentuálny podiel plastového plnidla; LN- lakované nárazníky, NN- nelakované nárazníky, PN- palivové nádrže. Hodnoty sú uvedené ako priemer ± smerodajná odchýlka.

Obrázok 4 znázorňuje vplyv typu plastového plnidla, jeho objemového podielu a konštrukčného usporiadania dosiek na hrúbkové napučívanie po 24-hodinovom ponorení do vody. Štatistické modely regresnej analýzy publikované v literatúre preukázali, že typ použitého termoplastu má štatisticky významný vplyv na hrúbkové napučívanie kompozitov ($p < 0,05$), pričom koeficient determinácie potvrdil silnú závislosť medzi druhom polyméru a rozmerovou stabilitou materiálu²⁸. Referenčné drevotrieskové dosky bez obsahu plastu vykazovali najvyššie hodnoty napučievania, čo potvrdzuje výraznú citlivosť klasických DTD na pôsobenie vlhkosti. Prídavok recyklovaných plastov v jedno-vrstvových doskách viedol k zreteľnému zníženiu hrúbkového napučievania, pričom tento efekt sa zvyšoval so stúpajúcim obsahom plastového plnidla z 10 % na 20 %. Plastové častice pôsobili v štruktúre dosky ako bariéra proti prenikaniu vody a obmedzovali rozmerové zmeny drevej zložky. V kompozitoch na báze PP a HDPE boli v literatúre zaznamenané veľmi nízke hodnoty hrúbkového napučievania, napr. 0,18 – 0,29 % pri HDPE kompozitoch so 40–60 % drevej múčky bez aditív²⁹ a približne 0,7 – 1,6 % pri kompresne lisovaných HDPE kompozitoch s vyšším podielom drevej zložky^{30,31}. Tieto výsledky potvrdzujú, že polymérna matrica výrazne obmedzuje prenikanie vody do kompozitnej štruktúry a zlepšuje jej rozmerovú stabilitu. Najnižšie hodnoty napučievania boli zaznamenané pri doskách s obsahom lakovaných nárazníkov (LN). Dosky s 10 a 15 % nelakovaných nárazníkov a palivových nádrží dosahovali porovnateľné hodnoty napučievania, pričom rozdiely medzi nimi neboli výrazné. Trojvrstvové drevotrieskové dosky s 10 % plastového plnidla vykazovali nižšie hrúbkové napučívanie v porovnaní s jednovrstvovými doskami s rovnakým obsahom plastu. Tento jav možno pripísať hustejším a kompaktnjším povrchovým vrstvám, ktoré znižujú prienik vody do jadra dosky. Vrstvená štruktúra zároveň prispieva k rovnomernejšiemu rozloženiu vnútorných

napätí vznikajúcich pri zvlhčovaní materiálu. Výsledky potvrdzujú, že kombinácia vrstvenej štruktúry a prídavku recyklovaných plastov má pozitívny vplyv na rozmerovú stabilitu drevotrieskových dosiek. Z hľadiska praktického využitia predstavuje znížené hrúbkové napučíavanie významný faktor pre aplikácie v prostredí so zvýšenou vlhkosťou. Podľa štúdií zameraných na konvenčné drevotrieskové dosky sa predpokladá, že so zvyšujúcou sa hustotou môže dochádzať k zvýšeniu hrúbkového napučíavania v dôsledku vyššieho vnútorného napätového stavu materiálu³². V prípade drevo-plastových kompozitov však tento vzťah nemusí byť jednoznačný. V našej práci vykazovali jednovrstvové dosky vyššiu hustotu než trojvrstvové, napriek tomu dosahovali vyššie hodnoty hrúbkového napučíavania. Tento výsledok naznačuje, že samotná hustota nebola rozhodujúcim faktorom rozmerovej stability, ale významnú úlohu zohralo konštrukčné usporiadanie dosky a prítomnosť termoplastickej fázy, ktorá obmedzuje prenikanie vody do štruktúry materiálu a redukuje uvoľňovanie vnútorných napätových síl počas zvlhčovania³¹.

Záver

V tejto práci bol hodnotený vplyv recyklovaných plastov z automobilového priemyslu na mechanické a fyzikálne vlastnosti jedno- a trojvrstvových drevotrieskových dosiek. Výsledky poukázali na to, že konštrukčné usporiadanie dosiek a podiel plastového plnidla ovplyvňujú jednotlivé sledované vlastnosti rozdielnym spôsobom.

Pri pevnosti v ťahu kolmo na rovinu dosky (IB) sa pri jednovrstvových doskách pozoroval mierny pokles hodnôt so zvyšujúcim sa obsahom plastového plnidla. Jednovrstvové dosky pritom vo viacerých prípadoch nedosiahli požiadavky normy pre daný typ materiálu. Trojvrstvové dosky s 10 % obsahom plastu vykazovali porovnateľné hodnoty IB s referenčnými doskami, pričom rozdiely medzi jednotlivými typmi plastov neboli výrazné. Výsledky naznačujú, že vrstvená štruktúra čiastočne eliminuje negatívny vplyv plastového plnidla na vnútornú súdržnosť dosiek.

Pri ohybovej pevnosti (MOR) sa pri jednovrstvových doskách prejavil nárast hodnôt pri vyššom obsahu plastového plnidla, pričom pri niektorých variantoch dosahovalo zvýšenie približne 50 % oproti referenčnej doske. Napriek tomu časť jednovrstvových dosiek nedosiahla požiadavky normy. Trojvrstvové dosky vykazovali hodnoty ohybovej pevnosti porovnateľné s referenčnými doskami a vo väčšine prípadov spĺňali požiadavky pre daný typ dosiek. Rozdiely medzi jednotlivými typmi plastov však neboli výrazné.

Z fyzikálnych vlastností sa potvrdil priaznivý vplyv plastového plnidla na zníženie absorpcie vody a hrúbkového napučíavania. Tento efekt bol výraznejší pri jednovrstvových doskách s vyšším obsahom plastu. Trojvrstvové dosky vykazovali nižšie hodnoty absorpcie vody a hrúbkového napučíavania v porovnaní s referenčnými doskami, pričom rozdiely medzi jednotlivými typmi plastov boli relatívne malé. Pri hrúbkovom napučíavaní dosiahli trojvrstvové dosky hodnoty blízke požiadavkám pre dosky typu P3, čo naznačuje pozitívny vplyv kompaktnějších povrchových vrstiev na rozmerovú stabilitu materiálu.

Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že aplikácia recyklovaných plastov do drevotrieskových dosiek predstavuje perspektívny spôsob materiálového zhodnotenia automobilových plastových odpadov. Výsledky zároveň ukázali, že z pohľadu vyváženia mechanických a fyzikálnych vlastností sú vhodnejším riešením trojvrstvové drevotrieskové dosky s nižším podielom plastového plnidla, predovšetkým pri požiadavke na zachovanie mechanickej stability materiálu.

Z aplikačného hľadiska sa vyvinuté drevotrieskové dosky javia ako perspektívne najmä pre využitie v nábytkárskom priemysle (korpusový nábytok, police, deliace prvky), v stavebníctve (výplňové a obkladové dosky, nenosné konštrukčné prvky v suchých a mierne vlhkých interiéroch) a v oblasti technických a obalových materiálov. Významným prínosom je aj možnosť materiálového zhodnotenia plastových odpadov z automobilového priemyslu bez potreby zásadných zmien existujúceho výrobného procesu drevotrieskových dosiek, čo podporuje princípy obehového hospodárstva a udržateľného využívania sekundárnych surovín.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla v rámci projektov a finančnej podpory Agentúry na výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-22-0034, vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže SR VEGA 1/0027/24, v rámci projektu združenia univerzít, UNIVNET č. zmluvy 0201/0082/19 a jeho finančnej podpory, financované Ministerstvom školstva, výskumu, vývoja a mládeže SR a v rámci dotácie ESFRI z Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky SR na rok 2025, ktorá bola realizovaná prostredníctvom národných výskumných platforiem UNIVNET a SKEBA.

Autori ďakujú prof. Ing. Romanovi Réhovi, CSc. za odbornú pomoc pri lisovaní kompozitov.

Literatúra

1. Terzi, E., Köse, C., Büyüksarı, Ü., Avcı, E., Ayrılmış, N., Kartal, S.N.: Evaluation of possible decay and termite resistance of particleboard containing waste tire rubber, *Int. Biodeter. Biodegr.*, 2009, 63(6), 806-809. DOI: 10.1016/j.ibiod.2009.01.010.
2. Xu, X., Tian, F., Li, X.: Regenerated waste tire powders as fillers for wood fiber composites. *BioRes.*, 2020, 15(2), 3029 – 3040.
3. Gill, Y.Q., Abid, U., Irfan, M.S., Saeed, F., Shakoar, A., Firdaus, A.: Fabrication, Characterization, and Machining of Polypropylene/Wood Flour Composites. *Arab. J. Sci. Eng.*, 2021, 47, 5973–5983.
4. Diouf, P.M., Thiandoume, C., Abdulrahman, S.T., Ndour, O., Jibin, K.P., Maria, H.J., Thomas, S., Tidjani, A.: Mechanical and rheological properties of recycled high-density polyethylene and ronier palm leaf fiber based biocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2022, 139, 51713.
5. Ilyas, R.A., Zuhri, M.Y.M., Aisyah, H.A., Asyraf, M.R.M., Hassan, S.A., Zainudin, E.S., Sapuan, S.M., Sharma, S., Bangar, S.P., Jumaidin, R., et al.: Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications. *Polymers*, 2022, 14, 202.
6. Mirowski, J., Oliwa, R., Oleksy, M., Tomaszewska, J., Ryszkowska, J., Budzik, G.: Poly(vinyl chloride) Composites with Raspberry Pomace Filler. *Polymers*, 2021, 13, 1079.
7. Xu, K., Du, G., Wang, S. Wood Plastic Composites: Their Properties and Applications. DOI: 10.5772/intechopen.98918, In: Engineered Wood Products for Construction, Gong, M. (Ed.), IntechOpen. 2022. DOI: 10.5772/intechopen.92960.
8. Mazzanti, V., Fortini, A., Malagutti, L., Ronconi, G., Mollica, F.: Tribological Behavior of a Rubber-Toughened Wood Polymer Composite. *Polymers*, 2021, 13(13), 2055. DOI: 10.3390/polym13132055.
9. Byung-Dae, P., Ho-Won, J.: Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea–formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios, *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2011, 31(6), 524 – 529.
10. Krilek, J., Čabalová, I., Réh, R., Melicherčík, J., Mancel, V.: Drevotriesková kompozitná doska na báze plastu a spôsob jej výroby: patent č. 289336. 2025a.
11. Krilek, J., Čabalová, I., Mancel, V., Réh, R.: Trojvrstvová drevotriesková doska s prídavkom plastu: úžitkový vzor č. 10248. 2025b.
12. Čabalová, I., Krilek, J., Bubeníková, T., Ružiak, I., Němec, M., Lee, S.H., Lubis, M.A.R., Darabošová, A., Mancel, V., Krišťák, L., Todaro, L., Lo Giudice, V.: Utilization of waste tire and rubber from automobiles in the manufacturing of particleboards and evaluation of its properties. *European journal of wood and wood products*, 2025, zv. 83, č. 2
13. Čabalová, I., Darabošová, A., Zachar, M., Krilek, J., Mancel, V., Osvaldová, M., Réh, R.: Požiarne vlastnosti nových drevných kompozitov obsahujúcich odpadové plasty z automobilov. *Waste forum*, 2024, s. 99 – 104. ISSN 1804-0195
14. STN EN 323, 1996: Dosky z dreva. Zisťovanie hustoty. Brastislava, Slovakia: Slovenský ústav technickej normalizácie.
15. EN 319/2005: Particleboards and Fibreboards. Determination of Tensile Strength Perpendicular to the Plane of the Board.

16. EN 310/2005: Wood-Based Panels. Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength.
17. EN 317/2005: Particleboards and Fibreboards. Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water.
18. Ashori, A.: Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technology*. 2008, roč. 99, č. 11, s. 4661 – 4667. ISSN 09608524. Dostupné na: doi:10.1016/j.biortech.2007.09.043
19. Deppe, H.-J. & Ernst, K.: Taschenbuch der Spanplattentechnik. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 552 s. , 2000.
20. Piringer, O. G. Baner, A. L.: Plastic Packaging Materials for Food: Barrier Function, Mass Transport, Quality Assurance, and Legislation. John Wiley & Sons. 2008, ISBN 978-3-527-61329-8.
21. Zweifel, H., Maier, R. D., Schiller, M.: *Plastics Additives Handbook*. Hanser. 2009, ISBN 978-3-446-40801-2.
22. Wang, D., Sun, X. S. Low density particleboard from wheat straw and corn pith. *Industrial Crops and Products*, 15(1), 43–50, 2002, doi:10.1016/S0926-6690(01)00094-2
23. Sutivisedsak, N., Cheng, H.N., Burks, C.S., Johnson, J.A., Siegel, J.P., Civerolo, E.L., Biswas, A.: Use of nutshells as fillers in polymer composites. *Journal of Polymers and the Environment* 20, 2012, 305 – 314.
24. Gozdecki, C., Wilczyński, A., Kociszewski, M., Zajchowski, S.: Properties of wood–plastic composites made of milled particleboard and polypropylene. *European Journal of Wood and Wood Products*. 73. 87 – 95, 2014, 10.1007/s00107-014-0852-2.
25. Al-Maqdasi, Z., Gong, G., Nyström, B., Joffe, R.: Wood fiber composites with added multi-functionality. In: 18th European Conference on Composite Materials (ECCM18), 24–28 June 2018, Athens, Greece
26. Idrus, M.A.M.M., Hamdan, S., Rahman, M.R., Islam, M.S.: Treated tropical wood sawdust-polypropylene polymer composite: mechanical and morphological study. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*. 2011.
27. Clemons, C.: Elastomer modified polypropylene-polyethylene blends as matrices for wood flour-plastic composites. *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.* 2010, 41, 1559 – 1569.
28. San, H.P., Nee, L.A., Meng, H.C.: Physical and bending properties of injection molded wood plastic composites boards. *J. Eng. Appl. Sci.* 2008, 3, 13 – 19.
29. Villablanca, C.M., Wilson, H.P., Hurtado, L.V.: Propiedades físicas y mecánicas de compuestos de polietileno reciclado y harinas de corteza y madera de *Pinus radiata* fabricados mediante moldeo por inyección. *Maderas Cienc. Y Tecnol.* 2012, 14, 13 – 28.
30. Adhikary, K.B., Pang, S., Staiger, M.P.: Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust. *Chem. Eng. J.* 2008, 142, 190 – 198.
31. Lopez, Y.M., Paes, J.B., Gustave, D., Gonçalves, F.G., Méndez, F.C., Nantet, A.C.T.: Production of wood-plastic composites using *Cedrela odorata* sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products—A sustainable approach for cleaner production in Cuba. *J. Clean. Prod.* 2020, 244, 118723.
32. Villablanca, C.M.: *Compuestos Lignocelulosico-Plástico Obtenidos a Partir de Harina de Madera o Corteza de Pinus radiata Y Polietileno Reciclado Fabricado Mediante Moldeo Por Inyección*. Ph.D. Thesis, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2011.

The Importance of the Layered Structure in the Application of Recycled Automotive Plastics into Particleboards

Iveta ČABALOVÁ, Jozef KRILEK, Anna DARABOŠOVÁ, Vladimír MANCEL

Faculty of Wood Sciences and Technology, Faculty of Technology, Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen, Slovak Republic

Summary

This paper deals with the analysis of the behavior of particleboards containing recycled plastics from the automotive industry depending on their structural arrangement. Single- and threelayer boards are compared in terms of their mechanical strength and physical properties related to the influence of moisture. The results point to a different distribution of stresses in the material and the importance of the layered structure in optimizing the properties of wood-plastic composites. The work contributes to the expansion of knowledge about the use of secondary raw materials in the production of agglomerated materials.

Keywords: *particleboard, layered structure, recycled plastics, mechanical properties, physical properties.*