

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Materiálové využití druhotných surovin

Lenka Kaizlerová

© 2021 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lenka Kaizlerová

Zemědělská specializace
Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Materiálové využití druhotných surovin

Název anglicky

Material usage of secondary raw materials

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit aktuální poznatky o možnostech materiálového využití druhotných surovin. Na základě aktuálních trendů práce specifikuje určitou oblast druhotných materiálů a jejich možnosti využití v oblasti materiálového inženýrství. Tento proces bude definován i z pohledu technicko-ekonomického a vztahu k životnímu prostředí.

Metodika

- Současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- možnosti využití druhotných surovin,
- technicko-ekonomická analýza a environmentální dopad,
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

30 s.

Klíčová slova

Environmentální prostředí, materiály, recyklace

Doporučené zdroje informací

ASHBY, M. F., Hugh SHERCLIFF a David CEBON. Materials: engineering, science, processing and design. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-097773-7.

BURAGOHAJN, Manoj Kumar. Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2017]. ISBN 9781138035409.

COWIE, John McKenzie Grant a Valeria ARRIGHI. Polymers: chemistry and physics of modern materials. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007. ISBN 0-8493-9813-4.

Časopisy: Journal of composite materials, Journal of composites for construction, Journal of reinforced plastics and composites, Manufacturing Technology, Strojírenská technologie.

Materials and manufacturing processes. New York: Marcel Dekker, 1989-. ISSN 1042-6914.

PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. Strojírenské materiály. 2. přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1977. Řada strojírenské literatury.

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2019

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 13. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Materiálové využití druhotných surovin" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Jičíně dne 13. 5. 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu doc. Ing. Petru Valáškoví, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při vypracování mé bakalářské práce.

Materiálové využití druhotných surovin

Abstrakt

Využívání druhotných surovin jako materiálů pro výrobu je v současné době důležitým tématem, hlavně z hlediska ochrany životního prostředí v případě využívání recyklovaných plastových odpadů a ochrany přírodních zdrojů surovin v případě využívání recyklovaného dřeva. Tato práce se zabývá využitím druhotných plastů a dřeva pro výrobu dřevoplastových kompozitů neboli WPC (wood-plastic composite). Představuje možnosti využití recyklovaných materiálů pro jeho výrobu. Popisuje specifické vlastnosti druhotných materiálů a vliv těchto vlastností na výsledný produkt. Dále se věnuje možnostem výroby a využití dřevoplastových kompozitů. Zabývá se environmentálními dopady využívání těchto materiálů na životní prostředí. V poslední části analyzuje vliv druhotných materiálů jako suroviny pro výrobu na cenu a profitabilitu výsledného produktu.

Klíčová slova: dřevoplastový kompozit, materiály, recyklace, environmentální dopady, dřevo, polymery

Material usage of secondary raw materials

Abstract

The use of secondary raw materials as a production source is currently an important topic, especially in terms of environmental protection in case of using recycled plastic waste and the protection of natural resources of raw materials in case of using recycled wood. This work deals with the use of secondary plastics and wood for the production of wood-plastic composites (WPC). It presents the possibilities of using recycled materials for its production and describes the specific properties of secondary materials and the effect of these properties on the final product. This work also deals with the possibilities of production and use of wood-plastic composites. It deals with the environmental impacts of using these materials on the environment. The last part analyzes the influence of secondary materials as raw materials for production on the price and profitability of the final product.

Keywords: wood-plastic composite, materials, recycling, environmental impacts, wood, polymers

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce.....	2
3	Metodika.....	3
4	Základní pojmy z odpadového hospodářství.....	4
4.1	Odpadové hospodářství.....	4
4.2	Právní předpisy	4
4.3	Oběhové hospodářství.....	5
4.4	Význam druhotných surovin.....	6
4.5	Co je to materiálové využití druhotných surovin.....	7
5	Dřevoplastové kompozity	9
5.1	Co je to dřevoplastový kompozit.....	9
5.2	Materiály pro výrobu WPC.....	10
5.3	Komponenty matrice.....	11
5.3.1	Polymery.....	11
5.3.2	Recyklace plastů.....	11
5.3.3	Termosety	12
5.3.4	Termoplasty	12
5.3.5	Bioplasty.....	13
5.4	Plniva	13
5.4.1	Dřevo	13
5.4.2	Vliv druhu dřeva na vlastnosti WPC	14
5.4.3	Budoucnost – kaskádové využívání dřeva.....	14
5.4.4	Recyklované desky plošných spojů.....	15
5.5	Vlastnosti recyklovaných polymerů	15
5.5.1	Bod tání	15
5.5.2	Nemísitelnost.....	16
5.5.3	Reologie.....	16
5.5.4	Síťování	16
5.5.5	Krystalinita	17
5.5.6	Polarita.....	17
5.6	Vliv recyklovaných materiálů na vlastnosti WPC.....	18
5.7	Možnosti výroby WPC	19

5.7.1	Kompaundování	19
5.7.2	Extruze.....	19
5.7.3	Vstřikování	19
5.7.4	Mokrý proces pro výrobu desek	20
5.8	Vlastnosti a využití	20
5.9	Produkce WPC ve světě.....	21
5.10	Environmentální dopady	21
6	Analýza vlivu recyklovaných materiálů na profitabilitu produktu	24
6.1	Materiály použité pro analýzu	24
6.2	Cena	24
6.3	Vliv použitých materiálů na cenu produktu.....	26
7	Závěr.....	28
8	Seznam použitých zdrojů	29

1 Úvod

Práce se věnuje tématu materiálového využití druhotných surovin. Toto téma je v současné době velice aktuální jak v České republice, tak na území Evropské unie a na celém světě. Důvodem, proč je toto téma tak aktuální, je zejména omezené množství zdrojů primárních surovin. Ty byly ještě v nedávné době čerpány tak, jako by jejich zásoby byly nekonečné, což bohužel není pravdou.

Vyspělý svět proto hledá způsoby, jak zdroje těchto surovin uchovat co nejdéle a čerpat suroviny pro výrobu z jiných zdrojů. Dalším tématem, které s materiálovým využitím druhotných surovin úzce souvisí, je dopad výroby a spotřeby na životní prostředí.

Práce v úvodní obecnější části zasazuje problematiku využívání odpadů do širších souvislostí. Krátce se dotýká důležitých pojmů souvisejících s odpadovým hospodářstvím a materiálovým využitím druhotných surovin.

V další části se práce věnuje dvěma materiálům, a to plastům a dřevu. Nastiňuje možnosti jejich využití a zpracování jako druhotných surovin pro výrobu dřevoplastových kompozitů. Tyto relativně mladé materiály jsou vyráběny právě ze dřeva a plastů, jak napovídá jejich název. Zajímavé jsou právě díky širokým možnostem využití druhotných surovin pro jejich výrobu. To z nich dělá materiál, který má pro budoucnost velký potenciál.

2 Cíle práce

Cílem práce je shromáždit aktuální poznatky o možnostech materiálového využití druhotných surovin, konkrétně recyklovaných plastů a dřeva, pro výrobu dřevoplastových kompozitů. Na základě aktuálních poznatků ukázat, jaké má využití těchto materiálů vliv na výsledný produkt a jak ovlivňuje dopad tohoto produktu na životní prostředí. Dále má práce za cíl analyzovat vliv využití druhotných surovin na profitabilitu výsledného produktu, tedy dřevoplastového kompozitu.

3 Metodika

Práce byla zpracována metodou literární rešerše na základě poznatků z odborných knih, článků, časopisů a aktuálních studií, které se věnují problematice nakládání s odpady, využití a výroby primárních i druhotných materiálů a výrobě i využívání dřevoplastových kompozitů. Pomocí analýzy citlivosti zkoumá vliv využití druhotných materiálů na profitabilitu výsledného produktu.

4 Základní pojmy z odpadového hospodářství

„Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit.“ [6] Vznik odpadů doprovází každou výrobní i nevýrobní činnost dnešní společnosti. Otázka jejich odstraňování a předcházení jejich vzniku je z hlediska ochrany životního prostředí dnes naprosto zásadní. V budoucnu nejspíš společnost dospěje do bodu, kdy se odpad stane hlavním zdrojem surovin a přírodní zdroje budou ponechány jako rezerva pro budoucnost. Mezníkem byl vznik průmyslových odpadů, který s sebou přinesl vysoké znečištění. To mají na svědomí především těžké kovy a dehtové odpady. Znečištění povrchovým a podzemních vod bylo způsobeno z velké části masivním rozvojem výroby syntetických organických látek. Další kapitolou je znečištění ovzduší emisemi z průmyslu, dopravy a dalších zdrojů. Odpady vznikají především z výrobních procesů, při těžbě surovin a při spotřebě. Odpady budou vnikat i tehdy, pokud se vše bude recyklovat, protože materiálový cyklus vyžaduje dodání energie a konverze energie produkuje odpad. [10]

4.1 Odpadové hospodářství

Odpadové hospodářství zahrnuje všechny stupně výrobního a spotřebního cyklu. Velkou část odpadu tvoří materiály, které vznikají přímo ve výrobě a lze je vracet do výrobního procesu. Takové odpady se nazývají vedlejší materiály. [10]

Hlavními prioritami odpadového hospodářství je předcházení vzniku odpadů a snižování jejich nebezpečných vlastností, opětovné použití výrobků s ukončenou životností. Kvalitní recyklace a využití odpadů, ať už materiálové, energetické, biologické. Optimalizace a nakládání s biologicky rozložitelnými komunálními odpady. Zásadní omezení skládkování a území ČR. [17]

4.2 Právní předpisy

Druhů odpadu a způsobů nakládání s nimi je opravdu mnoho. Odpadové hospodářství v ČR vymezuje především Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech a Zákon č. 545/2020 Sb. zákon, kterým se mění zákon č. 477/2001 Sb., o obalech a o změně některých zákonů (zákon o obalech), ve znění pozdějších předpisů. [10]

Nový zákon o odpadech vstoupil v platnost 23. 12. 2020. Obsahuje například zvyšování poplatků za skládkování odpadu ze současných 500 Kč za tunu na 1850 Kč za tunu v roce

2029. Také dochází k omezení typu odpadů, které lze na skládky přijímat. Klade důraz na třídění odpadu a obsahuje mechanismy na jeho podporu, například třídící slevu pro obce. Obce mají také zajistit, aby tříděný odpad do roku 2030 tvořil 65 % komunálního odpadu. V současné době se jedná o 38 %. Co se týče nakládání s nebezpečným odpadem, před jeho uložením na skládku bude muset jeho původce prokázat že využil všech možností, jak ho zbavit nebezpečných vlastností a nabídnout k dalšímu využití. Také se zvyšuje důraz na opětovné využití stavebního odpadu. [18]

Dalším důležitým zákonem v souvislosti s nakládáním s odpadem je Zákon č. 542/2020 Sb. o výrobcích s ukončenou životností, který vstoupil v platnost 23. 12. 2020 a nabyl účinnosti 1. 1. 2021.

Důležitým koncepčním materiálem odpadového hospodářství je Plán odpadového hospodářství ČR. Tento plán vydává ministerstvo životního prostředí. Aktuální verze byla vydána v roce 2014. jedná se o plán odpadového hospodářství pro období 2015–2024. Tento plán odráží strategii České republiky v oblasti odpadového hospodářství na určitý časový úsek. [17]

Veškeré právní úpravy ČR musí respektovat právní předpis Evropské unie. Nejdůležitějším předpisem Evropské unie, co se týče nakládání s odpady, je směrnice 2008/98/es o odpadech a zrušení některých směrnic. [10] Tato směrnice stanoví právní rámec pro nakládání s odpady v EU. Zavádí hierarchii způsobů nakládání s odpady: přecházení jejich vzniku, opětovné použití, recyklace, využití pro jiné účely, například energetické, odstraňování. Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/851 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2008/98/ES o odpadech, je součástí balíčku opatření o oběhovém hospodářství. Stanovuje minimální provozní požadavky na systémy rozšířené odpovědnosti výrobce, posiluje pravidla pro předcházení vzniku odpadů. Dále stanovuje nové cíle recyklace komunálního odpadu. [22]

4.3 Oběhové hospodářství

„Oběhové hospodářství je způsob výroby a spotřeby, který díky sdílení, pronajímání, opětovnému používání, opravování, repasování nebo recyklaci zhodnocuje již existující výrobky, suroviny a materiály. Díky tomu se prodlužuje životní cyklus produktů a minimalizuje odpad.“ [19]

Oběhové hospodářství, jinak řečeno cirkulární ekonomika, je důležitý aktuální pojem, co se týče politiky druhotných surovin. Tento způsob výroby a spotřeby zhodnocuje již existující výrobky, suroviny a materiály. Prodlužuje životní cyklus produktů a minimalizuje odpad. Pokud již vypršela životnost výrobku a není ho možné dál používat, měly by se dále využít jeho suroviny a komponenty jako materiál, jako druhotná surovina. Tento směr se snaží posunout k šetrnějšímu a efektivnějšímu využívání zdrojů. Hlavním argumentem pro přechod k oběhovému hospodářství je fakt, že zdroje surovin mají své limity, přitom poptávka po nich stále roste. [19]

Opatření, jako je prevence vzniku odpadů, jejich opětovné využívání a ekodesign výrobků mohou firmám přinést značné úspory. Firmám v EU by mohl ušetřit 600 miliard eur, což je 8 % jejich ročního obrátu. Dalším přínosem je snížení emise skleníkových plynů, a to o 2–4 %. Otevírá se zde také prostor pro inovace a pro nová pracovní místa, kterých by dle odhadů evropské unie mohlo vzniknout až půl milionu. [19]

4.4 Význam druhotných surovin

Využívání druhotných surovin má v České republice dlouhou tradici. Pojem sběrné suroviny a nakládání s nimi bylo upraveno již ve vládním nařízení č. 88/1949 Sb., o sběru a odbytu sběrných surovin. Materiály, jako odpadová ocel, zlomková litina, odpadový papír, textilní odpady, skleněné střepy a další, se běžně opětovně využívaly. [15]

Využívání druhotných surovin šetří či přímo nahrazuje zdroje primárních surovin. Dalšími výhodami tohoto využívání je usnadnění technologických procesů, snížení energetické náročnosti výroby, snížení produkce skleníkových plynů a omezení dalších environmentálních dopadů. [15]

Společnost v posledních sto letech začala používat 34x více materiálů, 27x více minerálů, 12x více fosilních paliv nebo 3,6x více biomasy. Očekává se, že do roku 2050 se se spotřeba surovinových zdrojů více než zdvojnásobí. Každý obyvatel Evropy spotřebuje v průměru 20,6 tun zdrojů. Z výše uvedeného vyplývá, že je nutné omezovat nepříznivé dopady na životní prostředí a zajištění dostatečné kapacity zdrojů pro průmyslovou výrobu. [15]

Pokud se podíváme na jednotlivé komodity, které je možné recyklovat, najdeme čísla, která jednoznačně hovoří o prospěšnosti tohoto postupu. Jedna tuna recyklované oceli ušetří 1,1 tuny železné rudy, 630 kg uhlí a 55 kg vápence, emise CO₂ se sníží o 58 %. Recyklace zinku

spotřebuje o 76 % méně energie než jeho primární výroba, recykluje se přibližně 70 % výrobků ze zinku. Z nerezové oceli se recykluje 90 % výrobků. [15]

Plastů v dnešní době využíváme zhruba dvacetkrát více, než před padesáti lety. Plasty jsou vyráběny převážně z ropy, proto je jejich recyklace důležitá pro zachování tohoto primárního zdroje surovin. Plastových materiálů je velké množství různých typů a využívají se pro jejich zpracování různé recyklační technologie. Toto znesnadňuje oddělené shromažďování většího množství u jednotlivých typů plastového odpadu. Efektivní recyklace plastů vyžaduje separační a identifikační technologie na vysoké úrovni. V Evropě se recykluje cca 32 % plastového odpadu. [15]

Využití jedné tuny recyklovaného papíru ve výrobních procesech ušetří 31 stromů, 4000 kWh energie, 270 litrů ropy a 26 000 litrů vody. Recyklace pneumatik šetří energii, vede ke snížení emisí a hlavně snižuje množství spotřebovaného surového kaučuku, což přispívá k ochraně přírodních zdrojů. [15]

4.5 Co je to materiálové využití druhotných surovin

Pojem druhotná surovina má velké množství výkladů. V tuto chvíli nejdůležitější definici tohoto pojmu uvádí nový zákon o odpadech, který vešel v platnost 23. 12. 2020. [15] *„Druhotnou surovinou se rozumí materiály mající zejména charakter vedlejších produktů, nebo upravených odpadů, které přestaly být odpadem poté, co splnily podmínky a kritéria, pokud jsou stanovena, materiálů získaných z výrobků podléhajících zpětnému odběru, materiálů z dalších výrobků využitelných pro další zpracování, včetně nespotřebovaných vstupních surovin, materiálů předávaných k novému využití; druhotná surovina slouží jako vstup pro výrobu a nahrazuje primární surovinu“.* [6]

Materiálové využití druhotných surovin znamená náhradu prvotních surovin látkami, které splňují podmínky pro označení druhotná surovina, viz definice výše, nebo využití látkových vlastností druhotných surovin k původnímu účelu nebo jiným účelům, s výjimkou bezprostředního získání energie. [6] Pojem materiálové využití se z velké části překrývá s pojmem recyklace. Recyklaci lze definovat jako materiálové či energetické využití druhotných surovin, z praktického hlediska se však za recyklaci považuje především materiálové využití odpadů. Specifickým případem recyklace je regenerace, kdy se pomocí

zpracovatelských technik získává materiál s původními vlastnostmi, např. regenerace kyselin, olejů, rozpouštědel a podobně. [10]

5 Dřevoplastové kompozity

Kompozitní materiály ovlivňují prakticky všechny aspekty moderního života. Zásadní vliv nyní mají v oblasti leteckého a kosmického průmyslu, automobilového průmyslu, sportovního průmyslu, námořního sektoru, ve stavebním inženýrství a ve spoustě dalších oborů. Kompozity jsou materiály, které mají jedinečné vlastnosti.

Využívání kompozitních materiálů se datuje cca od roku 2000 před naším letopočtem, možná ještě o něco dříve. Již ve starém Egyptě a v Mezopotámii byly používány hliněné cihly vyztužené slámou. V Mongolsku a na dalších místech v Asii byly používány kompozitní luky. Další zmínky o kompozitech bychom našli ve starověkém Japonsku, kde byly používány k výrobě samurajských mečů.

Vývoj moderních kompozitů je úzce spjatý s vývojem surovin pro výrobu a vývojem výrobních procesů. Skleněné textilní vlákno bylo poprvé vyrobeno v roce 1930, stejně jako nenasycená polyesterová pryskyřice. Lodě z plastů vyztužených skelnými vlákny byly poprvé stavěny ve 40. letech 20. století. V 50. letech došlo k masivnímu rozšíření v používání tohoto materiálu, polymeru vyztuženého skelnými vlákny, k výrobě trupů lodí, automobilových karoserií, elektrických komponentů. Plast vyztužený skelnými vlákny byl prvním masivně využívaným kompozitním materiálem. Další vývoj těchto materiálů zaznamenal používání kompozitů s uhlíkovými, bórovými a aramidovými vlákny. Od 30. let 20. století jsou dostupné epoxidové pryskyřice, což společně s těmito vysoce výkonnými vlákny umožnilo velký rozmach kompozitů. Po rychlém výboji v posledních čtyřiceti letech nyní vysoce výkonné kompozitní materiály dosahují vrcholu. [4]

Kompozit je materiál složený ze dvou nebo více složek. Kompozity jsou vyráběny vkládáním vláken nebo jiných částic do spojitě matrice. Dle typu matrice lze rozlišovat kompozity s polymerní matricí, kompozity s kovovou matricí a kompozity s keramickou matricí. Tyto materiály mají vysokou pevnost vzhledem ke hmotnosti a velkou tuhost. Kompozity s keramickou a kovovou matricí mají také značnou odolnost proti vysoké teplotě. [1, 4]

5.1 Co je to dřevoplastový kompozit

Dřevoplastový kompozit je relativně novým typem kompozitu, jehož hlavními složkami jsou polymer a dřevo, případně jiný přírodní materiál. Pro označení tohoto kompozitu se používá zkratka WPC (z anglického wood-plastic composite). Dřevoplastový kompozit bude nadále

v práci označován touto zkratkou. WPC obsahují dřevo ve formě dřevěných částic nebo dřevěné mouky a polymerní matrici. Tyto kompozity mají velmi široké využití, zvláště se osvědčily v prostředí s vysokou vlhkostí nebo v přímém kontaktu s vodou. Jejich využití je nejčastější ve stavebnictví a v automobilovém průmyslu. Mohou být použity ve vnitřních i venkovních prostorech. Najdeme je mezi konstrukčními materiály, vyrábí se z nich venkovní terasy, ploty, lavičky, dveře a okenní rámy, části automobilů, vybavení do domácnosti a spoustu dalších věcí. [23, 25]

Jsou tři hlavní důvody, proč jsou WPC zajímavým materiálem a stojí za to o jejich použití přemýšlet. Jedním z nich je dosažení lepších vlastností materiálu ve srovnání s jinými běžně používanými materiály v daném odvětví. Dalším je nižší cena a posledním, ale neméně důležitým je snížení dopadu na životní prostředí. Co se týče dopadu na životní prostředí, zásadní je používání materiálů z obnovitelných zdrojů. Čím vyšší je podíl neobnovitelných materiálů, tím vyšší je environmentální zátěž. Důležité z hlediska vlivu na životní prostředí je také druhotné využití materiálu, ať už se jedná o dřevo, nebo polymer. Lepší vlastnosti materiálu lze dobře demonstrovat na venkovních palubkách. Palubky z WPC budou mít oproti palubkám dřevěným delší životnost a zároveň budou méně náročné na údržbu. Nižší ceny materiálu lze dosáhnout právě využíváním druhotných materiálů, jako jsou odpadní dřevěné piliny z dřevovýroby, vysloužilé dřevěné výrobky nebo recyklované plasty. [23]

WPC kompozity mají stále nezanedbatelný vliv na životní prostředí hlavně kvůli jejich výrobě a zpracování. Důležité je pokusit se snížit energetickou náročnost jejich výroby a snížit spotřebu vody, která je k výrobě nezbytná. [23]

5.2 Materiály pro výrobu WPC

WPC jsou kompozitní materiály, které se skládají ze dvou hlavních a odlišných částí. Matrice je fáze, která drží odlišné komponenty pohromadě. Matrici ve WPC obvykle tvoří termoplasty, v některých případech také termosety. Další částí je dřevěná složka, která má v kompozitu funkci výztuže. Dřevěná složka může mít libovolný tvar a velikost. Někdy mohou být přidány také aditiva, která mohou upravovat vlastnosti kompozitu. [23]

5.3 Komponenty matrice

Matrice je část kompozitu, která drží výztuž nebo výplň pohromadě a dává materiálu tvar. Přenáší zatížení mezi výztuží a poskytuje vyztužujícímu materiálu mechanickou a chemickou ochranu. Povrchová úprava a vzhled kompozitu závisí převážně na materiálu matrice. [4]

5.3.1 Polymery

Polymer je přírodní nebo syntetická sloučenina. Většinou má vysokou molekulovou hmotnost, skládá se z mnoha opakujících se menších stavebních jednotek. Ty mohou být propojené v lineární, rozvětvené nebo síťované formě. Lineární polymery jsou složeny z monomerů, které tvoří lineární řetězce bez rozvětvení. Tato forma je nejjednodušší, ale také má nejslabší mechanické vlastnosti, jako pevnost a tuhost. Větvené polymery mají dvourozměrnou lineární strukturu s větvemi připojenými k hlavním lineárním řetězcům. V polymeru se síťovou strukturou jsou sousední lineární řetězce spojeny kovalentními vazbami ve vysoce komplexní 3D formě. Tyto materiály jsou tvrdé a vysoce nepoddajné. [4, 5]

Polymery jsou chemické látky, které mají širokou škálu vlastností. Pokud jsou ve formě výrobku, jsou prakticky vždy v tuhém stavu. Při zpracování ale prochází stádiem kapalným, které jim dovoluje udělit budoucímu výrobku tvar. Lze je rozdělit na elastomery neboli kaučuky a plasty. Plasty se dále dělí na termoplasty a termosety podle toho, zda je lze při zvýšené teplotě opakovaně zpracovat, nebo ne. Termoplasty tvoří ze všech plastů největší podíl, více než 80 %. Jsou měkké a při zvýšené teplotě a tlaku jsou mechanicky tvarovatelné. Největší uplatnění z této skupiny má polyethylen, polypropylen, polyvinylchlorid, homopolymery a kopolymery styrenu a polyethylenreftalát. [7]

5.3.2 Recyklace plastů

Odpady z výroby mají často vlastnosti, díky kterým je lze zařadit přímo do skupiny vedlejších produktů a není nutné je před použitím nějak upravovat. Naproti tomu plastové odpady z komunálního odpadu úpravu potřebují. Obsahují často větší procento příměsí, než papír nebo sklo. Úprava těchto odpadů spočívá v odstranění nežádoucích příměsí a dotřídění. Zpracování probíhá na dotřídňovacích linkách. [16]

Materiál se třídí nejčastěji na poloautomatických linkách s ručním dotříděním. Odstraňují se pevné nečistoty, oddělují se barevné plasty od čirých, materiál se třídí do plastových frakcí

dle typu výrobku. [8] Dotřídňovací linky většinou slouží jak pro dotřídění plastových odpadů, tak pro jejich další úpravu. Většina takových dotřídňovacích linek je víceúčelová, slouží k úpravě papíru, plastů, případně nápojových kartonů. Poměrně malé procento linek zpracovává pouze plasty. [16]

5.3.3 Termosety

Termosety jsou polymery, které vznikají chemickou reakcí v určitém prostředí. Výsledkem je materiál v trvale pevném a netavitelném stavu. Jejich molekulární struktura je vysoce komplexní a trojrozměrná. Proces zesíťování je nevratný a změknutí těchto polymerů zahříváním není možné. Často jsou využívány jako lepidla na dřevo, kdy kapalný polymer proniká do mikrostruktury dřeva a poté se vytvrdí. Jedním z prvních WPC kompozitů vyráběných z termosetů byl kompozit z fenol-formaldehydu a dřeva, který nese značku Bakelit, vyrobila ho firma Rolls Royce v roce 1916. Vyráběly se z něho řadicí páky. Nejběžnější termosety používané k výrobě kompozitů jsou formaldehyd, fenol-formaldehyd, epoxid a polyamidy. [23]

5.3.4 Termoplasty

Termoplastový polymer změkne při zahřívání nad teplotu tání. Lze ho tvarovat a při ochlazení opět ztuhne. Cyklus zahřívání, tvarování a tuhnutí lze opakovat. Pro výrobu WPC se nejčastěji používají vysokohustotní polyethylen, polypropylen a polyvinylchlorid. HDPE má zdaleka největší podíl na výrobě WPC, více než 80 %. Tento druh polymerů je pro výrobu WPC vhodný ze dvou důvodů. Jedním je snadná zpracovatelnost při nižších teplotách, vzhledem k tepelné stabilitě dřeva. Druhým je snadná obrobitelnost pomocí nástrojů, které se běžně používají při práci se dřevem. [5, 23]

WPC je možné vyrábět z nepoužitého, panenského plastu. To však může mít závažné environmentální dopady. Alternativou, která se ukazuje jako ekologicky a technicky lepší, je použití druhotných termoplastů. [11, 12]

Opětovné použití polymerních materiálů, které už jednou byly v oběhu, snižuje zatížení životního prostředí a spotřebu panenských plastů. Velká část jednoduchých polymerů je snadno recyklovatelná a jediné, co je potřeba, je dodání energie k výrobě. Využití recyklovaných plastů ve WPC přináší další možnosti pro jejich využití. V současné době se

stále hojně používají panenské termoplasty, nicméně první recyklované byly použity již v 90. letech 20. století a jejich používání stále roste, nejvýznamněji v posledních letech. [11, 12]

5.3.5 Bioplasty

Pro výrobu WPC lze také úspěšně využívat biopolymery. To jsou polymery, které je možné rozložit účinkem mikroorganismů na nízkomolekulární látky, především na vodu a oxid uhličitý (duch). Biopolymery jsou v současnosti nejslibnějším na poli polymerních materiálů tím nejslibnějším, pokud se jedná o řešení problémů s udržitelností souvisejících s plastovým odpadem. Mechanické vlastnosti kompozitů z biopolymerů mohou být ovlivňovány mnoha faktory prostředí, jako je teplota, vlhkost, radiace. [2]

5.4 Plniva

Materiály používané jako výztuž v kompozitech mají obvykle malý průměr. Jedná se primární nosný prvek v kompozitu. Dodávají materiálu tuhost a tepelnou stabilitu. Bez matrice, která je obklopuje, by však jako konstrukční materiál neměly prakticky žádný význam. [4] Nejběžnějším typem plniva ve WPC jsou dřevěná vlákna nebo dřevěná mouka. Jako plnivo může být použita celá řada dalších materiálů, jako jsou zbytky z cukrové třtiny, jutová vlákna, kokosové slupky a další lignocelulózový odpad. Dále je možné využívat i jiné typy odpadu, jako recyklovaný sádkarton, recyklovaný karton, spálený stavební odpad. Tyto odpady se používají jako plnivo většinou v kombinaci s dřevěnou složkou.

5.4.1 Dřevo

Dřevo není klasická druhotná surovina, která by mohla ve výrobě nahradit primární surovinu. Recyklované odpadní dřevo se většinou využívá jako materiál pro výrobu nových výrobků, případně jako palivo nebo biomasa pro výrobu tepla. Dřevo jako surovina vzniká při těžbě lesních a užitkových porostů. Je obnovitelnou surovinou, tvořeno je hlavně celulózou, ligninem a hemicelulózou. Každý druh dřeva má jiný podíl těchto složek a tím i jiné vlastnosti. Při primárním zpracování dřeva vznikají často materiály, které mají povahu vedlejších produktů vzniklých při výrobě. Dřevo je velmi snadno zpracovatelné a ve většině případů na něj není nahlíženo jako na odpad. Nakládání se dřevem mimo režim odpadů zpravidla nemá negativní dopady na životní prostředí. [16]

Dřevo bylo používáno jako plnidlo nebo zpevňující materiál v kompozitech již po několik tisíciletí. Použití přírodních plniv jako je dřevo v polymerech se pro výrobce polymerů

nabízelo. Oproti klasickým plnivům, což jsou nerostné suroviny a syntetické materiály, má dřevo některé výhody. Je to hlavně nižší cena, poměrně vysoká pevnost vzhledem k hmotnosti, nižší hustota. Je měkké a lze ho relativně snadno použít ve stávajících linkách na výrobu plastů. Může nahradit část použitého polymeru a je obnovitelným zdrojem. Dřevo použité pro výrobu WPC může být panenské nebo druhotné. Dřevo jako druhotný materiál může být odpad ze zpracování dřeva na pilách, odpadní dřevo ze staveb a demolic a další. Tyto materiály se potom melou nebo drtí do jejich finální podoby na dřevěné částice. Částice dřeva, které se používají pro výrobu WPC, jsou oproti nepoškozenému dřevu silně pozměněné a mají úplně jiné vlastnosti. Velikost částic je většinou menší, než 1 mm. [23]

5.4.2 Vliv druhu dřeva na vlastnosti WPC

Vlastnosti WPC jsou ovlivněné druhem použitého dřeva. To, jaký druh bude použitý pro výrobu WPC, je zpravidla dáno zeměpisnou polohou, dostupností a cenou. Použitý druh dřeva ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitu, jako jsou mechanické vlastnosti a chemickou kompatibilita. Druhy s tvrdým dřevem zlepšují tahové vlastnosti a teplotní deformaci. Optimální mechanické vlastnosti materiálu propůjčuje dřevěná mouka z borovice těžké (pinus ponderosa). Běžně užívanými druhy dřeva jsou borovice, javor a dub. Mikrostruktura dřeva je aspekt, který přímo závisí na volbě druhu dřeva. Ta ovlivňuje způsob, jakým může dřevo reagovat s polymerem a stupeň průniku polymeru do dřevěné struktury, což je podstatné pro vlastnosti kompozitu. To samozřejmě není jen otázkou volby druhu dřeva, ale také vlastností použitého polymeru. [23]

5.4.3 Budoucnost – kaskádové využívání dřeva

Recyklace dřeva v podobě jeho vícestupňového kaskádového využívání může napomoci vyřešit nedostatek dřeva v budoucnu. Dle některých odhadů může v roce 2030 chybět přes 300 milionů m³ dřeva. V některých zemích je tento systém recyklace již využíván, Česká republika k nim zatím nepatří. Ideální kaskáda, kterou by zároveň bylo možné realizovat, je čtyřstupňová. V prvním stupni kaskády je dřevo použité na výrobu konstrukcí z masivního dřeva, jako jsou nosníky, krovy či nábytek. Po tom, co tyto výrobky doslouží, přechází do druhého stupně kaskády. Z recyklovaného dřeva se vyrábějí dřevotřískové a OSB desky, dřevovláknité desky, WPC a další produkty. Po skončení životnosti těchto výrobků přichází na řadu třetí stupeň kaskády a to výroba chemických produktů, jako je papír a celulóza. Následné energetické využití těchto materiálů potom, co doslouží, je čtvrtým stupněm

kaskády. Popel vzniklý ve čtvrtém stupni kaskády lze navíc využít jako příměs do stavebních materiálů. [9]

5.4.4 Recyklované desky plošných spojů

Materiálem, který je z environmentálního hlediska zajímavý a může být použit jako plnivo v dřevoplastových kompozitech, jsou desky plošných spojů. Jedná se o vedlejší produkt z elektronického odpadu, který je sám o sobě velmi obtížně recyklovatelný. Skládá převážně ze skelných vláken a z termosetové pryskyřice. Ukazuje se, že při smíchání s dřevěnou moukou a použití této směsi jako plniva v kompozitech má tento materiál zlepšující vliv na výsledný produkt. Zejména umí zlepšit pevnost v tahu výsledného materiálu. Jeho použití tedy jednak poskytne smysluplné využití materiálu, které je z environmentálního hlediska problematický a obtížně recyklováný a také umožní částečně nahrazovat dřevěnou mouku, jejíž nabídka klesá z důvodu ochrany životního prostředí. [26]

5.5 Vlastnosti recyklovaných polymerů

Při využívání recyklovaných plastů pro výrobu WPC je třeba znát základní strukturu těchto materiálů a vlastnosti recyklovaných plastů. Potom je možné kontrolovat mechanické vlastnosti výsledných produktů. Plasty mohou být na konci svého životního cyklu recyklovány na nový polymerní materiál nebo produkt. Recyklované plasty, které mohou pocházet z různých zdrojů a podmínek, mají také rozdílné vlastnosti, v závislosti na jejich stupni degradace. Recyklované plasty z komunálního odpadu mohou obsahovat kontaminanty a barviva, které mají vliv na výsledný produkt. Degradace těchto materiálů může být termální, chemická, mechanická a biologická. Zpravidla je to kombinace výše uvedených, jedná se o komplexní proces. Ve většině případů jsou vlastnosti recyklovaných plastů odlišné od panenských plastů. Některé z těchto odlišností jsou pro výrobu WPC zásadní. [11]

5.5.1 Bod tání

Bod tání označuje takovou teplotu, při které dochází v materiálu k přechodu z pevné fáze do kapalně fáze. Při použití pro výrobu WPC je důležité, aby bod tání recyklovaných plastů byl nižší, než teplota degradace dřeva nebo jiných lignocelulózových plniv, což je 200 °C. Mezi panenskými a recyklovanými plasty nejsou v tomto ohledu velké rozdíly. Výjimkou jsou materiály s přidanými aditivami a nečistotami, které mohou bod tání snížit. Odlišná situace nastává, pokud se jedná o směs odpadních plastů s rozdílnou teplotou tání. Z bodu tání se

potom stává rozložení teplot. Nerovnoměrné tání způsobuje, že výsledný produkt nebude homogenní a ztratí dobré mechanické vlastnosti. [1, 11]

5.5.2 Nemísitelnost

V recyklovaných plastech je obvykle smícháno více druhů dohromady. Jejich dodatečné třídění zvyšuje jejich cenu, proto je žádoucí používat je smíchané dohromady. Lze tak, mimo snížení ceny, zlepšit i některé mechanické vlastnosti polymerů, například zlepšit nízkou rázovou pevnost polypropylenu. Většina polymerů ale není mísitelná mezi sebou. Potom může smíchání vést k oddělování fází při namáhání, což je příčinou chabých mechanických vlastností. Mísitelnost plastů lze zvýšit pomocí kompatibilizátorů, které zlepší mezifázovou adhezi mezi polymery a disperzi jedné složky do druhé. Kompatibilita polymerů závisí také na stupni jejich degradace. [11]

5.5.3 Reologie

Každá výroba z polymerních materiálů v sytkém stavu zahrnuje deformování materiálu pomocí působení sil. Z toho důvodu jsou důležité mechanické a reologické vlastnosti těchto materiálů a základní principy jejich reakcí na tyto síly. Při opakované výrobě extruzí a vstřikováním se tokové vlastnosti mění. Dochází ke snížení molekulové hmotnosti, které zapříčiňuje zvýšení indexu toku taveniny (MFI, melt flow index). Ten značí molekulovou hmotnost a délku řetězce v polymerech. Vyšší index znamená kratší řetězec a vyšší molekulovou hmotnost. Zvýšení molekulové hmotnosti znamená také zvýšení viskozity taveniny a rázové pevnosti, ale zároveň způsobuje nižší mez kluzu, nižší pevnost, tuhost a bod měknutí. Zvýšení indexu toku taveniny recyklovaných plastů zlepšuje impregnation of plastics on ligno-cellulose fillers. Termomechanickou degradaci při opětovném zpracování mohou zpomalit antioxidanty, které zabrání zhoršení výsledných vlastností recyklovaných plastů. Nedostatek antioxidantů v recyklovaných plastech, obzvláště těch opakovaně recyklovaných, může urychlit oxidaci WPC při vlivu teploty a UV záření. Přidání antioxidantu do recyklovaných plastů chrání plasty v průběhu zpracování a zároveň zlepšuje odolnost WPC proti vlivu slunečního záření, vzdušeného kyslíku, vody a dalších. [5, 11]

5.5.4 Síťování

Síťované polymery jsou makromolekulární látky, jejichž řetězce vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť. Lineární polymer je schopen reagovat se síťovacím činidlem a umožnit tak

vznik síťovaných polymerů. V první fázi tohoto procesu vzrůstá molekulová hmotnost polymeru, při jisté koncentraci příčných vazeb se potom začíná objevovat trojrozměrná struktura. Při vyšší koncentraci příčných vazeb polymer gelovatí a jeho vlastnosti se výrazně mění. U takových polymerů prudce klesá tvarovatelnost a přestávají být rozpustné v rozpouštědlech. Síťované polymery mají širokou škálu použití jako trubky a tvarovky na horkou vodu, obaly. Proto se síťované polymery také vyskytují v komunálním odpadu. Kromě toho se zesíťování může v polymerech objevit také během jejich životního cyklu. Plasty jsou často používány ve venkovním prostředí, kde jsou vystaveny UV záření, teple a vlhkosti, se u nich objevuje termo a foto oxidace během zvětrávání. Degradace termoplastů způsobená vnějšími vlivy a zvětráváním může vyvolávat různé stupně zesíťování, zvláště v PE. Zesíťování může změnit podstatu polymeru z termoplastu na termoset. Recyklace zesíťovaných polymerů nemůže probíhat jejich roztavením, protože je tavit nelze. Materiál, který je zesíťovaný vlivem zvětrávání pak nelze zpracovávat běžným způsobem. Při vyšším poměru takto degradovaného materiálu se značně ztěžuje výroba WPC a zároveň je výsledný kompozit negativně ovlivněný ve smyslu fyzických a mechanických vlastností. [7, 11]

5.5.5 Krystalinita

Čím vyšší je krystalinita materiálu, tím je materiál tužší, tvrdší a tepelně odolnější. S rostoucím stupněm krystalinity roste také modul pružnosti. Recyklované plasty mají zpravidla stupeň krystalinity nižší, než plasty panenské. To může souviset se zesíťováním plastů, ke kterému v recyklovaných materiálech dochází působením vnějších vlivů, jako je vlhkost, teplo a UV záření. Recyklovaný polyethylen a polypropylen obsahují kratší polymerní řetězce, které vznikají štěpením při procesu recyklace. To znamená změnu struktury u recyklovaných plastů. Oproti tomu recyklace PET lahví prováděná extruzí, peletizací a následně vstřikováním, má na krystalizaci a tím i mechanické vlastnosti pozitivní vliv, pokud je materiál vystaven tepelným cyklům. Recyklace expandovaného polystyrenu, zpracovaného extruzí a vstřikováním, s sebou nese výrazné zhoršení mechanických vlastností. [11]

5.5.6 Polarita

K výrobě WPC se často používají polyethylen a polypropylen. Tyto druhy plastů mají vysokou polaritu a nízké povrchové napětí plastů. To způsobuje, že jsou výrazně hydrofobní. Tyto povrchové vlastnosti je třeba u polymerů upravit tak, aby to neovlivnilo jejich celkové

vlastnosti. Je potřeba zvýšit smáčivost a hydrofilnost polymerů. Změna těchto vlastností způsobí zvýšení kompatibility a adheze mezi polymerem a plnivem, což je pro výrobu WPC žádoucí.

Výrobky z plastu jsou během své životnosti vystaveny UV záření za přítomnosti kyslíku nebo ozonu. Za těchto podmínek dochází k oxidaci polymeru, která výrazně zkracuje jeho životnost. Během oxidace polyolefinů, jako je polypropylen a polyethylen, je do materiálu vázáno nemalé množství chemicky vázaného kyslíku ve formě karbonylových a hydroxylových skupin. Tvorba polárních skupin v těchto recyklovaných plastech zlepšuje kompatibilitu mezi nepolárními plasty a polárními lignocelulóзовými materiály. Oxidované polyolefiny lze používat jako efektivní kompatibilizátor. [11]

5.6 Vliv recyklovaných materiálů na vlastnosti WPC

Fyzikální a mechanické vlastnosti WPC jsou závislé na obsahu dřevěné složky, druhu polymeru, aditivech jako je vazebné činidlo nebo kompatibilizér a na výrobních podmínkách. Kvalita a konzistence výrobků z recyklovaných plastů závisí také na stupni rozpadu plastového odpadu a na jeho klasifikaci. [3]

Tahové vlastnosti recyklovaných plastových materiálů, jako jsou PP a PE jsou horší, než tahové vlastnosti panenských plastů. Tyto vlastnosti ještě zhoršuje přidání dřevěné mouky. Toto zhoršení lze zvrátit použitím kompatibilizátoru při výrobě WPC, protože ten má na tahové vlastnosti WPC výrazně pozitivní vliv. Použití kompatibilizátoru vede ke zlepšení adheze mezi dřevěnou částí a polymerem. [3]

Míchání různých nekompatibilních typů polymerů v průběhu recyklačního procesu zapříčiňuje zhoršení vlastností polymeru a tím i horší vlastnosti výrobků z něj. [3]

Co se týče absorpce a difúze vody, mají WPC vyrobené z recyklovaných plastů horší vlastnosti, než WPC vyrobené z plastů panenských. Nejvyšší absorpce vody byla prokázána u WPC vyrobených ze směsi recyklovaného PP a recyklovaného HDPE. Absorpce a difúze vody ve WPC kompozitech může být snížena přidáním spojovacího činidla.

Rázová houževnatost WPC vyrobených z recyklovaných plastů je prakticky bez výjimek nižší ve srovnání s WPC vyrobenými z panenských materiálů. Rázovou houževnatost v těchto materiálech lze zlepšit aditivou, například etylenvinylacetátu (EVA). Přidání EVA do kompozitu ovšem může snížit pevnost v ohybu ve výsledném materiálu. Pozitivní vliv na

zvýšení rázové houževnatosti WPC má také nanojíl. Nanojíl má zlepšující vliv také na další mechanické vlastnosti WPC včetně absorpce vody. [11]

5.7 Možnosti výroby WPC

WPC začal produkovat plastikářský průmysl. V tomto průmyslu byly výplňové materiály používány již dříve. Když začalo být používání dřeva rentabilní, začalo se zpracovávat na již existujících výrobních linkách. Jiné kompozity na bázi dřeva jsou trámy nebo panely. WPC, které jsou zpracovávány roztavené, mohou být zpracovány do lineárních profilů pomocí procesu vytlačování nebo mohou být formovány do složitějších tvarů pomocí vstřikování. Při výrobě kompozitů z termoplastu musí být komponenty nejprve smíchány a potom teprve formovány. [23]

5.7.1 Kompaundování

Kompaundování neboli směšování znamená míchání polymeru a dřevěných komponentů dohromady. Je důležité, aby byly dřevěné částice rovnoměrně rozptýlené v roztaveném polymeru. Řádné promíchání je zásadní pro udržení dobrých mechanických vlastností materiálu. Správné rozptýlení a nasáknutí umožňuje rovnoměrný a účinnější přenos zatížení v celém kompozitu. Pokud není tato fáze provedena korektně, kompozit bude mít horší mechanické vlastnosti a nižší trvanlivost. Po smíchání může být materiál rovnou tvarován nebo může být nasekán na pelety pro pozdější použití. [23]

5.7.2 Extruze

Vytlačování neboli extruze je nepřetržitý všestranný proces, při kterém je tavenina vytlačována do volného prostoru. Pomocí tohoto procesu lze vyrábět geometricky jednoduché výrobky, jako jsou profily, trubky, tyče a desky. Největší část WPC je vyráběna právě pomocí extruze. To souvisí s nejčastějším využitím WPC, což jsou palubky, plotové prvky, obložení a další. Polymerní a dřevěné složky se dávkuje do vytlačovacího stroje a dopravují se vyhřívaným pásem pomocí šneku. Na konci extrudéru je vytlačovací hlava, přes kterou se materiál protlačuje a tvaruje se výrobek. [1, 20, 23]

5.7.3 Vstřikování

Při výrobě vstřikováním se roztavený polymer vstřikuje pod tlakem do formy. Tento způsob je velmi efektivní zejména pro zpracování termoplastů. Polymerní granule jsou přivedeny do šnekového lisu, kde se smíchají a zahřívají na takovou konzistenci, aby mohly být pomocí

vstřikovacího válce dopraveny do dutiny formy. Pro výrobu WPC je vstřikování používáno mnohem méně, než extruze, ale dovoluje výrobu rozmanitějších tvarů kompozitu pro různé produkty. [1, 20, 23]

5.7.4 Mokrý proces pro výrobu desek

Desky WPC se obvykle používají v automobilovém průmyslu, pro výrobu dveří a podobně. Vyrábí se buď vytlačováním, nebo jsou formovány pomocí mokrého procesu. Při mokřém výrobním procesu se vyrobí břečka z vody a dřeva a smíchá se s chemickými aditivami. Ta se poté za tepla lisuje do desek. Při výrobě může být použita plastová výztuž, aby desky lépe držely tvar. [23]

5.8 Vlastnosti a využití

WPC jsou vytvářeny tak, aby splňovaly co nejlépe potřeby zákazníků. WPC nachází svoje využití v mnoha oblastech využití, například jako venkovní terasy, oplocení a jiné. Využití WPC má své limity. Tím hlavním limitem je možnost využití pouze v těch oblastech, které nevyžadují vysokou mechanickou odolnost. Nižší mechanickou odolnost zapříčiňuje spojení hydrofilního termoplastu, například polypropylenu a hydrofobního dřeva. To vede k nekompatibilitě mezi polární dřevěnou složkou a nepolárním termoplastovým materiálem. Výsledkem je nízká adheze těchto materiálů, což vede k horším mechanickým vlastnostem. Ke zlepšení kvality těchto vazeb jsou do WPC přidávány vazebná činidla, které zvyšují pevnost a tuhost. [23]

WPC mají horší mechanické vlastnosti než masivní dřevo, ale jsou podstatně odolnější proti vlhkosti, plísním a změnám rozměru. [23]

Při použití pro konstrukční účely je WPC obvykle vyráběn extruzí. Materiál vzhledem připomíná dřevo a lze s ním zacházet pomocí nářadí, které se používá na zpracování dřeva. WPC jsou často používány k výstavbě. Jsou vhodné pro vnitřní i venkovní využití. Nejvýznamnější v tomto oboru a ve WPC průmyslu vůbec je výroba venkovních terasových systémů. Dále z nich lze vyrábět okna a dveře, podlahy, oplocení, římsy a lišty, zábradlí, zahradní lavičky a spoustu dalšího. [23]

V automobilovém průmyslu se z WPC vyrábí hlavně úložné prostory jako poličky, vnitřní obložení dveří, palubní desky. Důvodem pro využití WPC v automobilovém průmyslu je

snížení ceny komponent, snížení hmotnosti a také environmentální hledisko. WPC v automobilovém průmyslu nahrazují kovové nebo laminátové komponenty. [23]

WPC se využívají pro výrobu potřeb pro domácnost, hraček, nástrojů a dalších podobných výrobků. V tomto odvětví je použití WPC zatím spíše výjimečné, ale lze očekávat jeho vzestup. Dále se z WPC vyrábí nábytek, využívá ho více výrobců, například Ikea. [23]

5.9 Produkce WPC ve světě

Největšími světovými producenty WPC jsou Severní Amerika a Čína. Trh s WPC je rychle rostoucí, obzvláště v Číně roste bleskovým tempem. V roce 2015 vzrostly trhy v Evropě a Severní Americe o cca 10 %, zatímco v Číně nárůst tvořil 25 %. V Evropě se vyrobí cca 260 tisíc tun WPC za rok (údaj je z roku 2012). Toto množství zahrnuje všechny možné kategorie produktů od stavebních hmot až po vybavení domácnosti. Celých 67 % produkce v Evropě připadá na venkovní terasy a terasové systémy, 24 % na automobilový průmysl. [12, 23]

5.10 Environmentální dopady

Environmentální dopady produktů a jejich výroby jsou v posledních letech velmi diskutovaným tématem napříč mnoha obory. V této souvislosti se setkáváme s pojmem LCA, což je zkratkou pro life cycle assessment, česky hodnocení životního cyklu. To je nástroj k hodnocení dopadu produktu a procesu potřebném k jeho vytvoření na životní prostředí. LCA analýzy zkoumají vstupy a výstupy systému, který vytváří produkt za určité období. LCA typu cradle to grave (od kolébky do hrobu) zkoumá cestu výrobku od těžby materiálu k jeho výrobě, celý jeho užitečný život až po likvidaci. LCA typu cradle to gate začíná získáním surovin, ale končí ve chvíli, kdy produkt opouští výrobu. Nezahrnuje fázi užitečného života ani likvidaci. Pokud se zaměříme na recyklaci a opětovné využití materiálu, nejužitečnější je z tohoto ohledu LCA analýza typu cradle to cradle. Tato LCA počítá s opětovným využíváním materiálu ve víceúrovňových kaskádách, nejlépe s minimální transformací. [23]

Výrobní sektor WPC v posledních letech hodně vzrostl. Efektivní nakládání s odpady a jejich opětovné využití je tématem hlavně v Evropské unii. V roce 2010 bylo v Evropské unii vyprodukováno 2,5 bilionu tun odpadu, což je asi 6 tun odpadu na osobu. Je odhadováno, že cca 0,6 bilionu tun by mohlo být recyklováno nebo opětovně využito. Jedna z možností, jak zlepšit cirkulární ekonomiku, je používání odpadních materiálů na výrobu WPC. V Evropské

unii je většina odpadu ze stavebního a demoličního průmyslu (34,7 %). Následuje odpad z těžby a odpad z výroby. Druhotné využití odpadního materiálu je hned druhou volbou po prevenci jeho vzniku. [12]

Dřevo je zásadním materiálem při udržitelný ekonomický rozvoj. Má četné alternativy využití, ať už jako obnovitelný zdroj energie, nebo materiál pro výrobu. Z tohoto důvodu nemusí být už v roce 2030 dostatek dřeva z udržitelně obhospodařovaných lesů. Potenciálním řešením je kaskádovité využívání biomasy a efektivnější využívání vedlejších produktů v dřevozpracujícím průmyslu a výrobě. [24]

Největším distribučním kanálem pro WPC je trh s venkovními terasovými systémy. V Německu 80 % vyrobených terasových systémů splňuje specifikaci kvality a testování pro řízení výroby teras. WPC, ze kterých jsou tyto terasové systémy vyrobené, by mělo být vyrobeno ze dřeva s certifikátem FSC ze udržitelně obhospodařovaných lesů nebo z odpadního dřeva, které je zařazeno jako neošetřené přírodní dřevo. Měly by obsahovat více než 50 % dřeva. Plast by měl být získáván z primární produkce nebo průmyslového odpadu. [24]

WPC nahrazují výrobky z masivního dřeva nebo plastu. Co se týče srovnání environmentálních dopadů dřeva a WPC, WPC je na tom hůř, protože dřevo má environmentální dopady velmi nízké. Ve srovnání s plasty je ale rozhodně alternativou, která je více přátelská k životnímu prostředí. Při využití jako venkovní terasy má WPC lepší vliv na životní prostředí než dřevo z důvodu předpokládané delší životnosti a nižší potřebě údržby. Trvanlivost produktů z WPC může být zvyšována přidáváním aditiv, což je ale z hlediska vlivu na životní prostředí problematické. [24]

Pokud WPC doslouží a uvažovalo by se o recyklaci původních materiálů, bylo by třeba oddělit dřevěné částice od polymeru, což je složité. Recyklace WPC na původní materiály dřevo a plast, které lze dále využít, je v tuto chvíli z ekonomického hlediska nesmyslná. [24]

Použití recyklovaného WPC je ovšem možné. Recyklace samotného dřeva a samotného plastu již své využití má, například výroba dřevotřískových desek z recyklovaných palet nebo výroba textilních vláken z recyklovaných PET lahví. Trh pro efektivní využití recyklovaného WPC bohužel zatím chybí a k tomu, aby byl systém recyklace WPC efektivní, bude potřeba. [24]

Na environmentální dopady má vliv podíl dřevěné složky i podíl recyklovaného materiálu, ze kterého je WPC vyrobeno. Pokud je WPC vyrobeno z panenského materiálu, platí, že čím vyšší je podíl dřeva, tím nižší je dopad na životní prostředí. Pokud je použitý vysoký podíl dřeva jako druhotného materiálu, zpracování tohoto dřeva pro výrobu s sebou nese jistou environmentální zátěž. Využití druhotných plastů s sebou dodatečnou environmentální zátěž nenese. Přesto ve výsledku využívání druhotného dřeva dopad na životní prostředí snižuje. Použití recyklovaných plastů pro výrobu má velký potenciál a výrazně snižuje environmentální dopady. [24]

6 Analýza vlivu recyklovaných materiálů na profitabilitu produktu

Analýza je zaměřená na profitabilitu WPC, k jejichž výrobě byly použity recyklované materiály. Cílem této analýzy je zjistit, zda recyklované materiály vliv na cenu výsledného produktu a specifikovat tento vliv.

6.1 Materiály použité pro analýzu

Analýza srovnává referenční kompozitní materiál, který je vyroben pouze z panenských materiálů, s kompozitními materiály, které obsahují různé složky recyklovaných materiálů. Materiály použité pro výrobu referenčního kompozitu jsou panenský HDPE, panenské dřevěné vlákno, spojovací činidlo a mazivo. Další kompozitní materiály obsahují dřevěné vlákno, panenský HDPE, recyklovaný HDPE, recyklovaný karton, recyklovaný sádrokarton a spálený stavební odpad, spojovací činidlo a mazivo. Procentuální zastoupení jednotlivých komponentů v těchto kompozitech ukazuje tabulka níže. Referenční kompozitní materiál nese označení MR, další kompozity nesou označení M1 až M4. [12]

Tab. 1 Procentuální zastoupení jednotlivých složek v kompozitech

Materiál	Panenský HDPE	Recyklovaný HDPE	Dřevěné vlákno	Recyklovaný karton	Recyklovaný sádrokarton	Spálený odpad ze staveb	Spojovací činidlo	Mazivo
RM	30%	—	64%	—	—	—	3%	3%
M1	30%	—	44%	—	—	20%	3%	3%
M2	30%	—	—	64%	—	—	3%	3%
M3	30%	—	24%	—	40%	—	3%	3%
M4	—	40%	54%	—	—	—	3%	3%

6.2 Cena

Tabulka níže uvádí ceny jednotlivých komponent. Ceny komponent jsou uvedeny v Českých korunách, cena je vždy za tunu materiálu. Nejdražší složkou těchto kompozitních materiálů jsou aditiva, tedy spojovací činidlo a mazivo. Na profitabilitu výsledných produktů však tyto složky nemají vliv, protože jejich procentuální zastoupení je ve všech materiálech stejné, jak je vidět v tabulce č. 1. Cena recyklovaného kartonu je cenou za energii, která je potřebná pro zpracování tohoto materiálu. Záporná cena u odpadu značí, že má odpad pro zpracovatele zápornou hodnotu, tedy při jeho odstranění by zpracovateli vznikly náklady. [12]

K cenám produktů je třeba poznamenat, že se jedná o průměrné ceny materiálu sloužící pro účely analýzy, které nezahrnují další náklady.

Tab. 2 Ceny jednotlivých komponent [12, 21]

Panenský HDPE	37 750 Kč/tuna
Recyklovaný HDPE	25 038 Kč/tuna
Dřevěné vlákno	2 568 Kč/tuna
Recyklovaný karton	2 054 Kč/tuna
Recyklovaný sádrokarton	-2 568 Kč/tuna
Spálený odpad ze staveb	-2 568 Kč/tuna
Spojovací činidlo	64 200 Kč/tuna
Mazivo	64 200 Kč/tuna

Celková cena jednotlivých kompozitů je výsledným součtem cen jednotlivých komponent, ze kterých jsou tyto kompozity vyrobené. Ceny jednotlivých komponent v těchto kompozitech jsou závislé na procentuálním zastoupení v kompozitech.

Příkladem výpočtu je cena referenčního materiálu C_{RM} :

$$C_{RM} = 0,3 \times C_{HDPE} + 0,64 \times C_{DV} + 0,03 \times C_{SC} + 0,03 \times C_M$$

Kde C_{HDPE} je cena panenského HDPE, C_{DV} je cena dřevěného vlákna, C_{SC} je cena spojovacího činidla a C_M je cena maziva. Poměrné zastoupení jednotlivých složek je převzato z tabulky č. 1. Celková cena kompozitu je v Českých korunách za jednu tunu. Celkové ceny jednotlivých kompozitních materiálů jsou uvedeny v tabulce č. 3. Tato tabulka také ukazuje cenu jednotlivých složek v daných materiálech.

Tab. 3 Výsledné ceny kompozitů [12, 21]

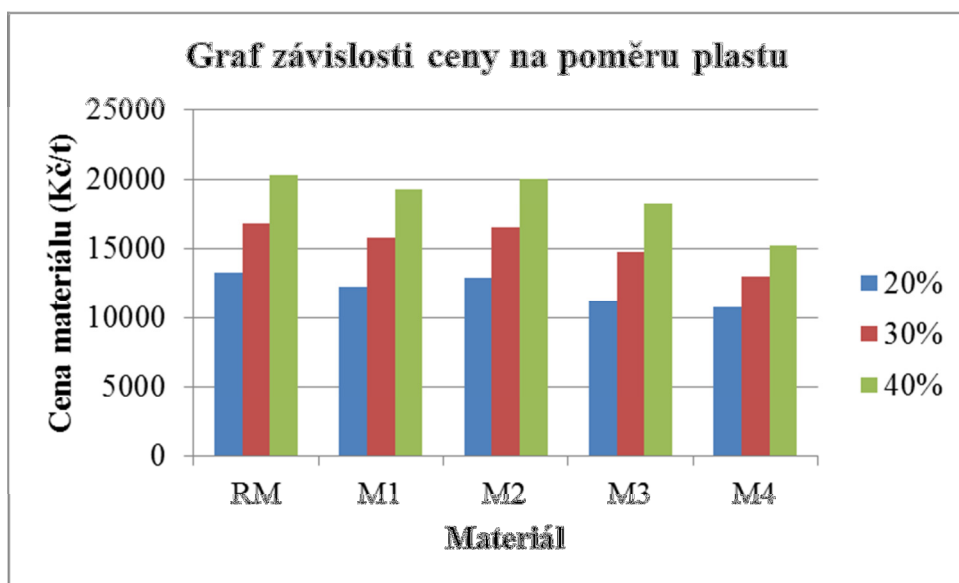
Materiál	Panenský HDPE	Recyklovaný HDPE	Dřevěné vlákno	Recyklovaný karton	Recyklovaný sádrokarton	Spálený odpad ze staveb	Spojovací činidlo	Mazivo	Celková cena
RM	11 325 Kč	—	1 644 Kč	—	—	—	1 926 Kč	1 926 Kč	16 821 Kč
M1	11 325 Kč	—	1 130 Kč	—	—	-514 Kč	1 926 Kč	1 926 Kč	15 793 Kč
M2	11 325 Kč	—	—	1 315 Kč	—	—	1 926 Kč	1 926 Kč	16 492 Kč
M3	11 325 Kč	—	616 Kč	—	-1 027 Kč	—	1 926 Kč	1 926 Kč	14 766 Kč
M4	—	10 015 Kč	1 387 Kč	—	—	—	1 926 Kč	1 926 Kč	15 245 Kč

Z tabulky č. 3 plyne, že nejdražší částí dřevoplastových kompozitů je jednoznačně plastová složka. Druhou nejdražší složkou je spojovací činidlo a mazivo, nicméně jejich zastoupení je ve všech kompozitech stejné a není to složka, skrze kterou by bylo možné kompozit zlevnit. Ostatní složky materiálu, ať už recyklované, nebo panenské, nemají na cenu kompozitu

zásadní vliv, protože oproti plastové složce je jejich cena nízká. Jejich vliv na profitabilitu produktu by stoupl pouze v případě, že by cena plastové složky výrazně klesla.

Vliv plastové složky na cenu a profitabilitu výsledného produktu se ukázal jako zásadní. Graf č. 1 ukazuje na další důležitý aspekt využití tohoto materiálu a to je jeho procentuální zastoupení v kompozitu. V grafu jsou zastoupeny všechny výše uvedené materiály. Mění se poměrné zastoupení plastu v těchto materiálech. Modrý sloupec ukazuje 20% zastoupení plastové složky, červený sloupec 30% zastoupení plastové složky a zelený sloupec ukazuje 40% zastoupení plastové složky. Z grafu je vidět, že u všech materiálů obsahujících panenský plast, tedy referenčního materiálu RM i materiálů M1, M2 a M3 cena v závislosti na zastoupení plastové složky narůstá poměrně strmě a velmi podobně u těchto materiálů. Jinak vypadá růst ceny u materiálu M4, který je jediným materiálem obsahujícím recyklovaný plast. Cena u materiálu M4 narůstá v závislosti na zastoupení plastové složky pomaleji. [12]

Graf č. 1 závislost ceny na poměru plastu



6.3 Vliv použitých materiálů na cenu produktu

Z této analýzy plynou dvě zásadní zjištění. Prvním zjištěním je, že pokud sledujeme profitabilitu produktu, použité plnivo nemá na cenu produktu zásadní vliv. Má sice v těchto produktech podstatné procentuální zastoupení, nicméně cena je poměrně nízká a mezi jednotlivými materiály se neliší tak výrazně, aby bylo možné tvrdit, že využití toho

konkrétního materiálu bude mít na cenu zásadní vliv. Toto je dobře vidět v tabulce č. 3, která ukazuje ceny jednotlivých komponent. Zdaleka největší položkou je cena plastu a další položky jsou oproti ní levné.

Cena použitého plastu se v analýze ukazuje jako zásadní, pokud jde o profitabilitu produktu. V tabulce č. 3, která ukazuje ceny jednotlivých komponent a materiálů, toto ještě není tak patrné. Vidíme, že referenční materiál, který je vyroben pouze z panenských materiálů, je nejdražší, nicméně rozdíly mezi materiály v této tabulce nejsou tak výrazné, aby bylo možné udělat jednoznačný závěr. Nicméně již z této tabulky je jasně vidět, že pokud chceme snížit cenu kompozitu, je třeba se zaměřit na plastovou složku. Graf č. 1 ukazuje, jaký vliv má procentuální zastoupení plastové složky na cenu produktu. Materiál M4, který jako jediný obsahuje složku recyklovaného plastu, vykazuje nejnižší nárůst ceny produktu v závislosti na procentuálním zastoupení plastové složky. Tento rozdíl v nárůstu cen je natolik výrazný, že je možné tvrdit, že použití recyklovaného plastového materiálu má na profitabilitu produktu zásadní vliv.

7 Závěr

Práce shrnuje aktuální poznatky o materiálech na bázi dřeva a plastů, dřevoplastových kompozitů (WPC, wood-plastic composite). Obzvlášť klade důraz na možnosti využití druhotných materiálů pro jejich výrobu. Popisuje specifické vlastnosti recyklovaných materiálů a jejich vliv na kvalitu dřevoplastových kompozitů. Práce se zabývá vlivem těchto materiálů na životní prostředí a analyzuje, jakým způsobem ovlivňují druhotné suroviny profitabilitu výsledného produktu.

V práci se setkávají dvě hlediska, hledisko environmentální a hledisko ekonomické. Z hlediska environmentálních dopadů lze říci, že využívání druhotných materiálů pro výrobu dřevoplastových kompozitů je přínosem. Pokud se srovnávají dřevoplastové kompozity a čisté plasty, mají dřevoplastové kompozity menší environmentální dopad, i když jsou vyrobeny z panenských materiálů. To je dáno podílem dřeva. Čím větší je potom zastoupení druhotných plastů v materiálech pro výrobu, tím je environmentální dopad menší. Dřevo samo o sobě jako materiál má environmentální dopad minimální. Přesto je zde velmi podstatný argument pro využívání druhotného dřeva a alternativních odpadních materiálů jako plniv do kompozitů. Je jím možný nedostatek dřeva jako primární suroviny v následujících letech. Využití recyklovaného dřeva pro výrobu dřevoplastových kompozitů se tak přímo nabízí jako jedno z řešení, ideálně jako součást kaskádového využívání dřeva.

Z hlediska ekonomického z analýzy uvedené v této práci vyplývá, že využívání druhotných plastů má na profitabilitu výsledného produktu jednoznačně pozitivní vliv. V případě využívání druhotných plastů je tak ekonomické a environmentální hledisko ve shodě a recyklované plasty by se měly využívat pro výrobu dřevoplastových kompozitů v nejvyšší možné míře. Určitá omezení mohou přinášet zhoršené vlastnosti druhotných plastů, nicméně to je do určité míry řešitelné a možností využití takového materiálu je i tak celá řada. Situace ohledně dřeva je složitější. Analýza ukázala, že využití druhotných materiálů jako plniva v kompozitech nemá na profitabilitu produktu zásadní vliv. Myslím, že v tomto případě by měla zvítězit zodpovědnost k životnímu prostředí a druhotné dřevo by mělo být pro výrobu dřevoplastových kompozitů využíváno. Dřevoplastový kompozit je materiál, který se zdá být pro využití recyklovaného dřeva jako stvořený.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] ASHBY, M. F., Hugh SHERCLIFF a David CEBON. *Materials: engineering, science, processing and design*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-08-097773-7.
- [2] BALART, Rafael, MONTANES, Nestor, DOMINICI, Franco, BORONAT, Teodomiro and TORRES-GINER, Sergio. Environmentally friendly polymers and polymer composites. *Materials*. 2020. Vol. 13, no. 21p. 4892. DOI 10.3390/ma13214892.
- [3] BASALP, Dildare, TIHMINLIOGLU, Funda, SOFUOGLU, Sait C., INAL, Fikret and SOFUOGLU, Aysun. Utilization of Municipal Plastic and Wood Waste in Industrial Manufacturing of Wood Plastic Composites. *Waste and Biomass Valorization*. 2020. Vol. 11, no. 10p. 5419–5430. DOI 10.1007/s12649-020-00986-7.
- [4] BURAGOHAİN, Manoj Kumar. *Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing* London;New York;Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 978-1-138-03540-9.
- [5] COWIE, John McKenzie Grant a Valeria ARRIGHI. *Polymers: chemistry and physics of modern materials: chemistry and physics of modern materials*. 3rd. Boca Raton: Taylor & Francis, 2007. ISBN 978-1-4200-0987-3
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 541/2020 Sb. ze dne 23. 12. 2020 o odpadech*. In: Sběrka zákonů České republiky. 2020, částka 222/2020.
- [7] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [8] FIEDOR, Jiří. *Odpadové hospodářství I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2573-1.
- [9] HÝSEK, Štěpán, Petra HÝSKOVÁ a Rostislav HABÁN. *Materiálové využití recyklovaného dřeva v České republice*. Odpadové fórum: Waste management forum [online]. 2020, 21(1), 34 - 35 [cit. 2021-5-7]. ISSN 1212-7779. Dostupné z: <http://odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/eof-01-2020-pdf.pdf>
- [10] KURAŠ, Mečislav. *Odpady a jejich zpracování*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2014. ISBN 978-80-86832-80-7.
- [11] KAZEMI NAJAFI, Saeed. Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. *Waste Management*. 2013. Vol. 33, no. 9, p. 1898–1905. DOI 10.1016/j.wasman.2013.05.017.
- [12] KESKISAARI, Anna and KÄRKI, Timo. The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 134, p. 257–261. DOI 10.1016/j.resconrec.2018.03.023.
- [13] KIZLINK, Juraj. *Nakládání s odpady*. Vyd. 2., upr. Brno: Fakulta chemická VUT v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4413-3.

- [14] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Analýza současného stavu vybraných komodit druhotných surovin a jejich zdrojů včetně vize rozvoje daného odvětví: Podklad pro aktualizaci Politiky druhotných surovin České republiky* [online]. prosinec 2018 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/1/Analiza_Podkladovy-material-pro-PDS-CR_1.pdf
- [15] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Politika druhotných surovin ČR* [online]. červenec 2014 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/51372/60887/635844/priloha003.pdf>
- [16] Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Strategický analytický dokument pro oblast využívání druhotných surovin* [online]. In: . listopad 2011 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/45560/51384/586455/priloha001.pdf>
- [17] Ministerstvo životního prostředí. *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024* [online]. In: . listopad 2014 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/\\$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf)
- [18] Nový zákon o odpadech. *AVE.CZ* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.ave.cz/cs/o-spolecnosti/novinky/novy-zakon-o-odpadech>
- [19] Odbor průmyslové ekologie - 31200. Nový ekonomický směr Evropské unie Oběhové hospodářství (Circular Economy). *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 21. 11. 2018 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/novy-ekonomicky-smer-evropske-unie-obehove-hospodarstvi-circular-economy--241519/>
- [20] PLUHARĚ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály. 2., přeprac. vyd.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977. Řada strojírenské literatury.
- [21] POSPÍŠIL, Ladislav. *RECYKLACE TERMOPLASTŮ, TERMOSETŮ A PRYŽÍ: Ceny recyklátů versus prvotních plastů koncem roku 2016* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/recyklace-termoplast-termoset-a-pry-ceny-recyklt-verusu/>
- [22] Právní předpisy EU v oblasti nakládání s odpadem. *EUR - Lex: Přístup k právu Evropské unie* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:ev0010&from=EN>
- [23] SCHWARZKOPF, Matthew John and BURNARD, Michael David. Wood-Plastic Composites—Performance and Environmental Impacts. *Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*. 2016. P. 19–43. DOI 10.1007/978-981-10-0655-5_2.
- [24] SOMMERHUBER, Philipp F., WENKER, Jan L., RÜTER, Sebastian and KRAUSE, Andreas. Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 117, p. 235–248. DOI 10.1016/j.resconrec.2016.10.012.

[25] SPIRCHEZ, Cosmin and LUNGULEASA, Aurel. RESEARCH INTO THE PROPERTIES OF AN INNOVATIVE WOOD-PLASTIC COMPOSITE. *PRO Ligno*. 2017. Vol. 13, no 4, p. 283-289. ISSN 2069-7430.

[26] YANG, Shuangqiao, JIANG, Jun, DUAN, Wenfeng, BAI, Shibing and WANG, Qi. Production of sustainable wood-plastic composites from the nonmetals in waste printed circuit boards: Excellent physical performance achieved by solid-state shear milling. *Composites Science and Technology*. 2020. Vol. 200, p. 108411. DOI 10.1016/j.compscitech.2020.108411.