

Kompozyty polimerowe zawierające włókna roślinne - czynniki wpływające na wytrzymałość mechaniczną

The natural fiber reinforced polymer composites - factors affecting the mechanical performance

Justyna Miedzianowska*, Marcin Masłowski, Krzysztof Strzelec

Instytut Technologii Polimerów i Barwników, Politechnika Łódzka

Abstrakt

W ostatnich latach znaczne zainteresowanie badawcze i aplikacyjne wzbudzają kompozyty polimerowe zawierające tani i odnawialny napełniacz naturalny. Podstawowe miejsce wśród naturalnych materiałów wzmacniających oraz wypełniających stosowanych do otrzymywania kompozycji polimerowych stanowią włókna roślinne. Zwrócenie uwagi na naturalne napełniacze, jako dodatki do materiałów kompozytowych związane jest z obecną tendencją wielu gałęzi przemysłu do recyklingu tworzyw, obniżania kosztów wytwórczych oraz produkcji materiałów przyjaznych i bezpiecznych dla środowiska. Prace badawcze nad rozwojem biokompozytów koncentrują się głównie na polepszeniu ich właściwości mechanicznych w celu rozszerzenia możliwości i zastosowań tej grupy materiałów. Niniejszy przegląd ten ma na celu przedstawienie analizy czynników wpływających na wytrzymałość mechaniczną kompozytów wzmacnianych włóknami naturalnymi, a także szczegółów osiągnięć z nimi związanych.

Abstract

In recent years, significant interest in research and application has been generated by polymer composites containing a cheap and renewable natural filler. The basic place among natural reinforcing and filling materials used to obtain polymer compositions are plant fibers. Interest in natural fillers as additives to composite materials is related to the current tendency of many industries to recycle plastics, reduce manufacturing costs and produce environmentally friendly and safe materials. Much effort has gone into increasing their mechanical properties in order to expand the possibilities and use of this group of materials. This review aims to present the analysis of factors affecting the mechanical performance of natural fiber reinforced composites and the details of their achievements.

Słowa kluczowe: biokompozyty, włókna naturalne, polimery, napełniacze;

Keywords: biocomposites, natural fibers, polymers, fillers;

1. Wstęp

Kompozyty są połączeniem dwóch lub więcej odrębnych, nierozpuszczających się w sobie faz, z których każda odpowiada innemu podstawowemu materiałowi. W kompozycie jeden ze składników jest wiążącym i nazywany jest matrycą, a pozostałe materiały (często o lepszych właściwościach wytrzymałościowych lub większej twardości) spełniają rolę wzmacniającą lub wypełniającą [1]. Obserwowane w ostatnich latach znaczące zintensyfikowanie prac badawczych, dotyczących wytwarzania nowych materiałów, koncentruje się na

* autor korespondencyjny: Justyna Miedzianowska: justyna.miedzianowska@edu.p.lodz.pl

biokompozytach i biokompozycjach polimerowych. Ze względu na dużą dostępność, niską cenę i odnawialny charakter włókien naturalnych, od kilku dekad stanowią one jeden z najbardziej popularnych komponentów do wytwarzania przyjaznych środowisku materiałów polimerowych [2].

Podczas projektowania takich kompozytów, niezwykle istotnymi zagadnieniami są:

- dobór ośrodka polimerowego,
- dobór włókna naturalnego,
- oddziaływania faz na granicy polimer-włókno,
- dyspersja włókien w polimerze,
- proces przetwórczy,
- orientacja włókien w ośrodku polimerowym.

1.1. Dobór ośrodka polimerowego

Ośrodek polimerowy jest ważną częścią materiału, wiążącą wszystkie składniki. Zapewnia barierę przed niekorzystnymi warunkami zewnętrznymi, chroni powierzchnię włókien przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz przenosi obciążenia pomiędzy komponentami. Determinuje również kształt kompozytów, wygląd ich powierzchni, ogólną wytrzymałość oraz przeznaczenie [3]. Wybór ośrodka polimerowego jest ograniczony przez temperaturę, w której następuje rozkład termiczny włókna. Większość naturalnych włókien stosowanych do wzmacniania kompozytów jest niestabilna termicznie powyżej 200°C [4], czasami możliwe jest ich przetwarzanie w wyższej temperaturze przez krótki okres czasu. Najbardziej powszechnymi polimerami, których przetwórstwo w tych warunkach jest możliwe są termoplasty: polietylen (PE), polipropylen (PP) [5], polistyren (PS) [6], poli(tereftalan etylenu) (PET) [7] i polichlorek winylu (PVC) [8]. Jako ośrodki polimerowe kompozytów zawierających włókna naturalne intensywnie badane i szeroko stosowane są również materiały termoutwardzalne, do których należą żywice epoksydowe [9], fenolowo-formaldehydowe i poliestrowe [10]. Znane są również elastomerowe kompozycje polimerowe, zawierające biododatki, gdzie jako matryce stosowano kauczuk naturalny [11], czy kauczuk butadienowo-styrenowy [12]. Obecnie społeczne obawy dotyczące środowiska, zmiany klimatu oraz ograniczone zasoby paliw kopalnych to ważne czynniki, które motywują naukowców do poszukiwania alternatywnych materiałów wytwarzanych bez udziału produktów pochodzących z przerobu ropy naftowej. Aktualne trendy w rozwoju biokompozytów skupiają się na materiałach wytworzonych z

biodegradowalnych poliestrów. Najbardziej popularne to poli(kwas mlekowy) (PLA), oraz polihydroksyalkaniany (PHA), które można wytwarzać z odnawialnych surowców. Badania dowodzą, że zastosowanie PLA, jako ośrodka polimerowego kompozytów z naturalnymi włóknami, pozwala na uzyskanie wyższej wytrzymałości mechanicznej oraz sztywności, niż przy użyciu polipropylenu [13].

Ze względów ekologicznych coraz częściej źródłem polimerów do wytwarzania biokompozytów, zamiast czystych surowców, są recyklaty. Recyklat to materiał polimerowy, stanowiący odpad powstający przy produkcji, lub tworzywo poużytkowe wytworzone na drodze recyklingu z butelek, reklamówek, plastikowych opakowań i tym podobnych. Niemniej jednak, materiał taki charakteryzuje się zazwyczaj gorszymi parametrami, w porównaniu z czystym surowcem, co wpływa na jakość otrzymywanego kompozytu. Ponadto występuje szereg trudności związanych z kontrolą właściwości fizyko-chemicznych recyklatu, który stanowi zazwyczaj złożoną kompozycję polimerów [14].

1.2. Dobór włókna naturalnego

Definicja włókien naturalnych zaproponowana przez Food and Agriculture Organization (FAO) na potrzeby Międzynarodowego Roku Włókien Naturalnych (IYNF 2009) opisuje je jako podłużne struktury produkowane przez rośliny i zwierzęta, które mogą być przędzone na filamenty, nici oraz liny [15]. Właściwości włókien naturalnych różnią się znacznie składem i strukturą chemiczną, które odnoszą się do typu włókna (Tabela 1).

Włókna roślinne ze względu na ich pochodzenie można podzielić na:

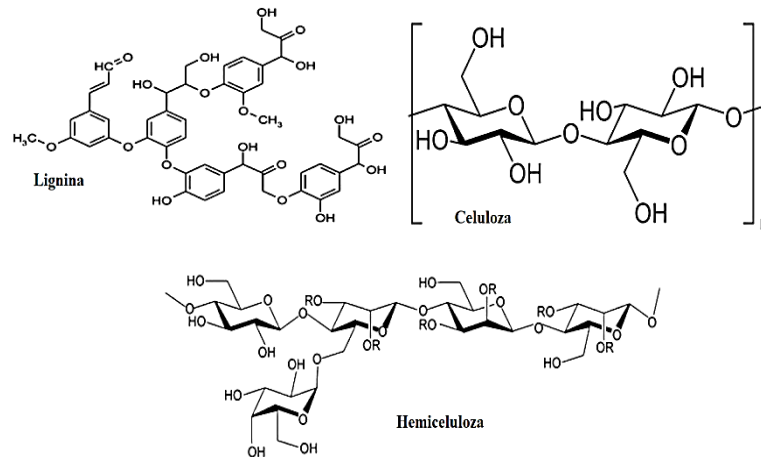
- włókna z nasion: bawełna, kapok,
- włókna z łodyg (łyka): juta, len, konopie, ketmia, kudzu, pokrzywa,
- włókna z liści: agawa, sizal, ananas,
- włókna z owoców: kokos, kapok, palma,
- włókna z drewna: drzewa iglaste i liściaste,
- włókna z traw i słomy: bambus, pszenica, ryż [16].

W doborze włókien do wytwarzania kompozytów pochodzenie włókna odgrywa istotną rolę ze względu na jego skład chemiczny. Każde włókno roślinne zbudowane jest z trzech podstawowych komponentów: celulozy, hemicelulozy i ligniny. Dodatkowo, włókna lignocelulozowe zawierają również niewielkie ilości pektyn, wosków i substancji rozpuszczalnych w wodzie. Informacje o składzie chemicznym (Tabela 1) włókien naturalnych są ważne, ponieważ determinują ich właściwości, a tym samym ich zastosowania.

Tabela 1. Skład chemiczny wybranych włókien naturalnych [17]

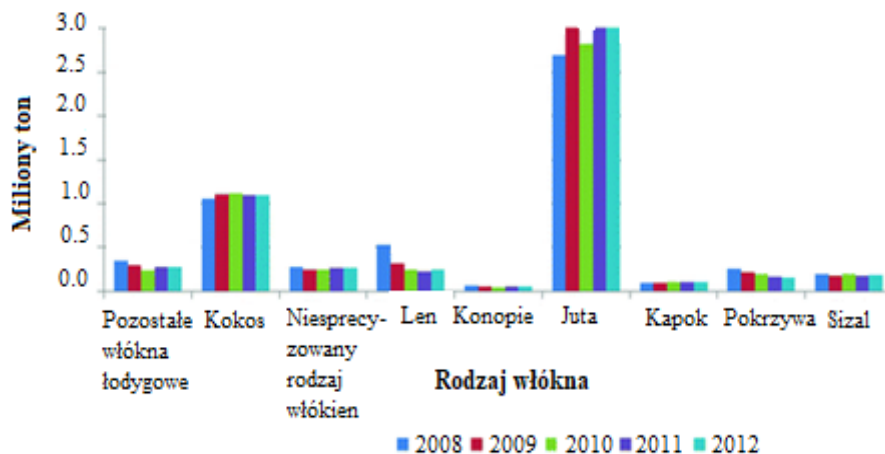
Typ	Włókno	Celuloza [%]	Hemiceluloza [%]	Lignina [%]
Włókna z traw i słomy	Trzcina	44	31	22
	Pszenica	33-38	26-32	17-19
	Ryż	28-36	23-28	14
Drewno	Drzewa liściste	31-64	25-40	14-34
	Drzewa iglaste	30-60	20-30	21-37
Włókna z owoców	Kokos	36-43	0.5-1	41-45
	Kapok	35	22	21.5
	Palma	47	19	24
Włókna łądługowe	Juta	61-71	13-20	13
	Len	75	10	3
	Konopie	75	15	3
	Ketmia	31-57	21-23	15-19
	Kudzu	33	11	14
	Pokrzywa	61-73	7	8
	Włókna z liści	Banan	63-64	13-24
	Sizal	26	38	26
	Ananas	70-82	18	9
Włókna z nasion	Bawełna	82-92	6	0
	Kapok	64	13	23

Celuloza jest głównym składnikiem strukturalnym włókien naturalnych, składa się z jednostek D-glukopiranozy, połączonych ze sobą wiązaniami 1,4-β-D-glikozydowymi. Obecne w strukturze grupy hydroksylowe (OH) zdolne do oddziaływań wodorowych, a także siły van der Waalsa powodują, że wykazuje ona obszary krystaliczne. Celuloza jest także odporna na utlenianie, środki alkaliczne oraz hydrolizę. Hemiceluloza pod względem budowy posiada bardziej rozbudowaną strukturę od celulozy, złożona jest z różnych jednostek cukrów, ma hydrofilowy charakter, jest niekrystaliczna i pełni rolę matrycy dla mikrofibryli celulozowych. Hemicelulozy rozpuszczają się w alkaliach i ulegają hydrolizie kwasowej. Lignina to hydrofobowy, nierozpuszczalny w wodzie oraz niekrystaliczny polimer, który wypełnia miejsce między hemicelulozą i celulozą [18]. Rys. 1 przedstawia struktury chemiczne cząstek celulozy, hemicelulozy i ligniny.



Rys. 1. Struktura chemiczna ligniny, celulozy i hemicelulozy [17].

W doborze włókien ważne są również warunki wzrostu, czas zbiorów, metoda pozyskiwania i przechowywanie. Ręcznie wyodrębnione włókna lniane mają wytrzymałość o 20% wyższą niż wydobyte mechanicznie [19]. Należy też pamiętać, że uprawy rolne są bardzo zależne od warunków pogodowych i wrażliwe na zagrożenia szkodnikami. Tylko najlepszej jakości włókna, dobrze wysuszone i zdrowe zapewniają największą wytrzymałość mechaniczną.



Rys. 2. Światowa produkcja włókien roślinny z wyłączeniem bawełny w latach 2008-2012 [15].

Położenie geograficzne, związane z dostępnością włókien, odgrywa główną rolę w ich zastosowaniu jako biododatku do kompozytów polimerowych [20]. W Europie do produkcji biokompozytów wykorzystuje się głównie len oraz słomę zbożową, podczas gdy w Azji badania nad kompozytami zawierającymi włókna naturalne koncentrują się na konopiach, bawełnie, jucie, sizalu, czy łuskach ryżu. Powszechność stosowania określonego typu włókien jest również wynikiem światowej produkcji roślin włóknistych. Z danych wynika, że globalnie

najwięcej uprawia się juty, konopi i lnu i to one mają swój największy udział w produkcji kompozytów wzmocnionych włóknami naturalnymi (Rys. 2).

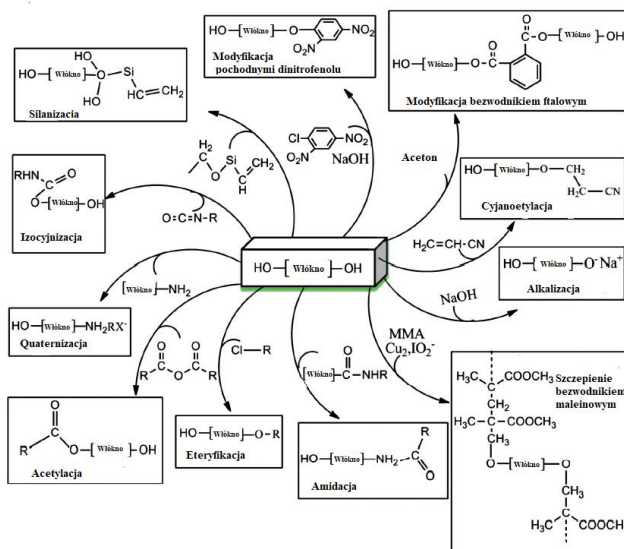
2. Oddziaływania faz na granicy polimer - włókno

Oddziaływania na granicy włókno-ośrodek polimerowy odgrywa istotną rolę w określaniu właściwości mechanicznych kompozytów. Naprężenia są przenoszone między matrycą i napełniaczem, a więc silne połączenie międzyfazowe zapewnia otrzymanie optymalnego wzmocnienia. W przypadku kompozytów zawierających napełniacze roślinne występuje zwykle ograniczona interakcja między hydrofilowymi włóknami i polimerami, które są zwykle hydrofobowe. Prowadzi to do słabej adhezji między nimi. Istotnym parametrem wpływającym na występowanie oddziaływań międzyfazowych jest zwilżalność powierzchni włókna przez polimer. Niewystarczające zwilżanie napełniacza skutkuje powstawaniem defektów, które mogą prowadzić do koncentracji naprężeń propagujących zniszczenie materiału. Kompatybilność składników kompozytu poprawia się poprzez modyfikację polimeru, lub części napełniacza, albo przez zastosowanie dodatkowych substancji.

Powierzchnia napełniacza może być modyfikowana różnymi metodami:

- chemicznymi, m.in. poprzez impregnację napełniacza środkiem kompatybilnym do osnowy, modyfikację środkami sprzęgającymi [21], acetylację [22], merceryzację [23], estryfikację [24]. Schemat typowych modyfikacji chemicznych pokazano na Rys. 3,
- poprzez modyfikację fizyczną, np. wyładowania koronowe, obróbkę termiczną lub plazmową [25],
- poprzez modyfikację biologiczną, obejmującą głównie obróbkę enzymatyczną [26].

Wykazano, że w zależności od zastosowanej modyfikacji obróbka może powodować zarówno zmiany chemiczne, jak i fizyczne w strukturze napełniacza, powodujące: zwiększoną polarność powierzchni (z powodu zwiększenia ilości grup karboksylowych i hydroksylowych na powierzchni), zmianę składu chemicznego, stopnia krystaliczności, chropowatości powierzchni włókna i innych własności fizyko – chemicznych.



Rys. 3. Schemat wybranych sposobów modyfikacji włókien naturalnych [18].

2.1. Dyspersja włókien w polimerze

Jednym z głównych czynników determinujących właściwości kompozytów polimerowych jest dystrybucja napełniacza w ośrodku. Dobra dyspersja włókien sprzyja występowaniu połączeń na granicy faz włókno-polimer. Zmniejsza tym samym objętość pustych przestrzeni wokół włókna, wpływając pozytywnie na charakterystykę wytrzymałościową materiału. Zarówno długie, jak i krótkie włókna, wykazują tendencję do aglomeracji i agregacji [27]. Zjawisko aglomeracji oraz agregacji powoduje niestabilność zdyspergowania składników w kompozycji, co przekłada się na powstawanie niejednorodnych struktur w kompozytach, będących miejscem koncentracji naprężeń. Uzyskanie homogenicznej i stabilnej dystrybucji cząstek składników w matrycy polimerowej stanowi przedmiot i cel wielu prowadzonych badań naukowych. Jednym z rozwiązań, które prowadzi do równomiernego rozprowadzenia cząstek w ośrodku elastomerowym, zapewniając jednorodność właściwości oraz maksymalne wykorzystanie potencjału fazy rozproszonej jest zastosowanie różnego typu dodatków. Jako substancje poprawiające stopień dyspersji napełniaczy w ośrodku polimerowym stosuje się między innymi kwas stearynowy, czy ciecz jonowe [28].

3. Proces przetwórczy

Metody przetwórstwa kompozytów polimerowych uzależnione są od rodzaju danego polimeru oraz postaci napełniacza (proszek, włókno, płatki). Warunkiem uzyskania zamierzonych właściwości biokompozytu polimerowego jest odpowiednie powiązanie ze sobą, za pomocą spoiwa, włókien w procesie produkcji. Jednym z najważniejszych etapów

przetwórstwa biokompozycji jest mieszanie, które odbywa się zwykle metodą wytłaczania lub wtrysku. Uzyskanie dobrego wymieszania sprzyja wzrostowi jednorodności kompozytu, co determinuje późniejsze właściwości fizyczne, chemiczne i użytkowe gotowego wyrobu. Istnieje szereg czynników, które warunkują skuteczność mieszania. Są to przede wszystkim, odpowiednia konstrukcja maszyn oraz warunki procesowe. Do tych czynników możemy zaliczyć temperaturę, ciśnienie i prędkość obrotową ślimaka lub tłoku maszyny. Możliwe jest wystąpienie degradacji włókien, jeżeli zastosowana temperatura jest zbyt wysoka, co ogranicza termoplasty, jako ośrodki polimerowe stosowane do produkcji biokompozytów. Duża prędkość ślimaka może powodować powstawanie pęcherzy powietrza w materiale, nadmierny wzrost temperatury spowodowany tarciem oraz uszkodzenia mechaniczne włókna. Natomiast niskie prędkości prowadzą do słabego mieszania i występowania niewystarczającego zwilżania włókien polimerem [29].

3.1. Orientacja włókien w ośrodku polimerowym

Właściwości mechaniczne kompozytu polimerowego zależą nie tylko od właściwości jego składników (osnowy, wzmocnienia, połączenia), ale przede wszystkim od struktury tj. przestrzennego rozmieszczenia elementów wzmacniających. Odpowiednia, ściśle określona orientacja włókien powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie, zwiększenie sztywności, wyższą gęstość oraz zwiększenie gładkości powierzchni [30]. Wśród kompozytów zawierających włókna można wyróżnić następując rodzaje wzmocnienia struktury:

- Wzmocnienie włóknem krótkim rozłożonym chaotycznie. Włókna o rozmiarze kilku milimetrów są losowo rozmieszczone w ośrodku polimerowym. W takich materiałach przyrost wytrzymałości kompozytu w stosunku do właściwości czystego polimeru jest umiarkowany – najczęściej wynosi około od kilku do kilkunastu procent.
- Wzmocnienie jednokierunkowe włóknem długim. Kompozyty charakteryzują się dużą wytrzymałością i sztywnością w kierunku ułożenia włókien. Właściwości wytrzymałościowe w kierunku poprzecznym do włókien mogą być nawet nieco niższe od właściwości polimeru niewzmocnionego.
- Wzmocnienie wielowarstwowe, które stanowi typ struktury najczęściej stosowany w technice z zastosowaniem kompozytów tworzyw termoutwardzalnych (tzw. laminaty). Elementy płytowe i powłokowe tworzą często dziesiątki warstw, z których każda może posiadać inną strukturę oraz orientację wzmocnienia.

4. Podsumowanie

Rozwój kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami naturalnymi jest ostatnio gorącym tematem ze względu na rosnący poziom świadomości społeczeństwa na temat ochrony środowiska, szczególnie w zakresie zmniejszania zużycia paliw kopalnych. Biokompozyty stanowią doskonałą alternatywę dla w pełni syntetycznych materiałów, ponieważ charakteryzują się obniżonymi kosztami produkcji, zwiększoną bioderadowalnością, zawierają odnawialne surowce oraz często wykazują lepsze właściwości użytkowe. W pracy przedstawiono przegląd różnorodnych aspektów, mających wpływ na wytrzymałość mechaniczną kompozytów polimerowych wzmocnianych roślinnymi włóknami naturalnymi.

Literatura

- [1] Ku H., Wang H., Pattarachaiyakop N., Trada M.: *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*, Composites Part B Engineering, **42**, 2011, str. 856 – 873.
- [2] Faruk O., Bledzki A. K., Fink H. P., Sain M.: *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-201*, Progress in Polymer Science, **37**, 2012, str. 1552 – 1596.
- [3] Holbery J., Houston D.: *Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications*, Journal of Minerals, Metals and Materials Society, **58**, 2006, str. 80 – 86.
- [4] Asadieraghi M., Wan Daud W. M. A.: *Characterization of lignocellulosic biomass thermal degradation and physicochemical structure: Effects of demineralization by diverse acid solutions*, Energy Conversion and Management, **82**, 2014, str. 71 – 82.
- [5] Espert A., Vilaplana F., Karlsson S.: *Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties*, Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing, **35**, 2004, str. 1267 – 1276.
- [6] Singha A. S., Rana R. K.: *Natural fiber reinforced polystyrene composites: Effect of fiber loading, fiber dimensions and surface modification on mechanical properties*, Materials and Design, **41**, 2012, str. 289 – 297.
- [7] Huq T., Khan A., Noor N., Saha M., Khan R. A., Khan M. A., et al.: *Fabrication and characterization of jute fiber-reinforced PET composite: Effect of LLDPE incorporation*, Polymer-Plastics Technology Engineering, **49**, 2010, str. 407 – 413.
- [8] Xu Y., Wu Q., Lei Y., Yao F., Zhang Q.: *Natural fiber reinforced poly (vinyl chloride) composites: Effect of fiber type and impact modifier*, Journal of Polymers and the Environment, **16**, 2008, str. 250 – 257.
- [9] Mittal V., Saini R., Sinha S.: *Natural fiber-mediated epoxy composites - A review*, Composites Part B Engineering, **99**, 2016, str. 425 – 435.
- [10] Aziz S. H., Ansell M. P., Clarke S. J., Panteny S. R.: *Modified polyester resins for natural fibre composites*, Composites Science and Technology, **65**, 2005, str. 525 – 535.
- [11] Masłowski M., Miedzianowska J., Strzelec K.: *Natural rubber biocomposites containing corn, barley and wheat straw*, Polymer Testing, **63**, 2017, str. 84 – 91.
- [12] Haghghat M., Zadhoush A., Nouri Khorasani S.: *Physicomechanical properties of cellulose - filled styrene-butadiene rubber composites*, Journal of Applied Polymer Science, **96**, 2005, str. 2203–2211.
- [13] Faruk O., Bledzki A. K., Fink H-P., Sain M.: *Progress report on natural fiber reinforced composites*, Macromolecular Materials and Engineering, **299**, 2014, str. 9 – 26.

- [14] Lei Y., Wu Q., Yao F., Xu Y.: *Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites*, Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing, **38**, 2007, str. 1664 – 1674.
- [15] Zimniewska M., Wladyka-Przybylak M.: *Natural fibers for composite applications*, w: Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Springer – Verlag, Singapore 2016.
- [16] Zimniewska M, Wladyka-Przybylak M, Mankowski J.: *Cellulosic Bast Fibers, Their Structure and Properties Suitable for Composite Applications*, w: Cellulose Fibers: Bio and Nano-Polymer Composites, Springer Heidelberg Dordrecht London New York 2011.
- [17] Yıldızhan Ş., Çalık A., Özcanlı M., Serin H.: *Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications*, European Mechanical Science, **2**, 2018, str. 83 – 91.
- [18] Gurunathan T., Mohanty S., Nayak S. K.: *A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives*, Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing, **77**, 2015, str. 1 – 25.
- [19] Coroller G., Lefeuvre A., Le Duigou A., Bourmaud A., Ausias G., Gaudry T., et al.: *Effect of flax fibres individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite*, Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing, **51**, 2013, str. 62 – 70.
- [20] Sanjay M. R., Arpitha G. R., Naik L. L., Gopalakrishna K., Yogesha B.: *Applications of natural fibers and its composites: an overview*, Natural Resources, **7**, 2016, str. 108 – 114.
- [21] Saheb N., Jog J.: *Natural fiber polymer composites: a review*, Advances in Polymer Technology, **2329**, 2015, str. 351 – 363.
- [22] Rowell R. M.: *Acetylation of natural fibers to improve performance*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, **418**, 2004, str. 153 – 164.
- [23] Chalid M., Prabowo I.: *The effects of alkalization to the mechanical properties of the ijuk fiber reinforced PLA biocomposites*, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, **9**, 2015, str. 342 – 346.
- [24] Naik J. B., Mishra S.: *Esterification effect of maleic anhydride on surface and volume resistivity of natural fiber/polystyrene composites*, Polymer – Plastics Technology and Engineering, **46**, 2007, str. 537 – 540.
- [25] Mukhopadhyay S., Fangueiro R.: *Physical modification of natural fibers and thermoplastic films for composites - a review*, Journal of Thermoplastic Composite Materials, **22**, 2009, str. 135 – 162.
- [26] Yilmaz N. D.: *Effects of enzymatic treatments on the mechanical properties of corn husk fibers*, Journal of Textile Institute, **104**, 2013, str. 396 – 406.
- [27] Peltola H., Madsen B., Joffe R., Nättinen K.: *The influence of biocomposite processing and composition on natural fiber length, dispersion and orientation*, Journal of Material Sciences Engineering A, **1**, 2011, str. 190 – 198.
- [28] Arifur Rahman M., Parvin F., Hasan M., Hoque M. E.: *Introduction to manufacturing of natural fibre-reinforced polymer composites*, w: Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites, Springer, Cham 2015.
- [29] Ho M., Wang H., Lee J., Ho C., Lau K., Leng J., et al.: *Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites*, Composites Part B, **43**, 2012, str. 3549 – 3562.
- [30] Jeziorny A.: *Skrypty dla szkół wyższych. Nauka o włóknach*, Redakcja Wydawnictw Naukowych Politechniki Łódzkiej, Łódź 1980.