

Włókna bambusowe jako napełniacz kompozytów polimerowych

Bamboo fibre as a filler for polymers composites

Anna Słubik*, Dorota Wieczorek

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Przemysłu Skórzanego

Abstrakt

Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami cieszą się szczególnym zainteresowaniem wśród naukowców ze względu na ich doskonałe właściwości mechaniczne i konstrukcyjne. W artykule dokonano szczegółowego przeglądu dostępnej literatury na temat wykorzystania włókien bambusowych w technologii przetwórstwa polimerów. Wyniki badań z przytoczonych artykułów ilustrują wpływ ilości, modyfikacji włókien bambusowych na właściwości użytkowe kompozytów na bazie termoplastów, duroplastów oraz elastomerów.

Abstract

Fiber-reinforced polymer composites are of particular interest to scientists due to their excellent mechanical and design properties. The article presents a detailed review of the available literature on the use of bamboo fibers in polymer processing technology. The results of the research from the cited articles illustrate the effect of the amount and modification of bamboo fibers on the functional properties of the manufactured composites based on thermoplastics, thermosets and elastomers

Słowa kluczowe: kompozyt polimerowy, osnowa, napełniacze, włókna bambusowe

Keywords: polymer composite, matrix, fillers, bamboo fibers

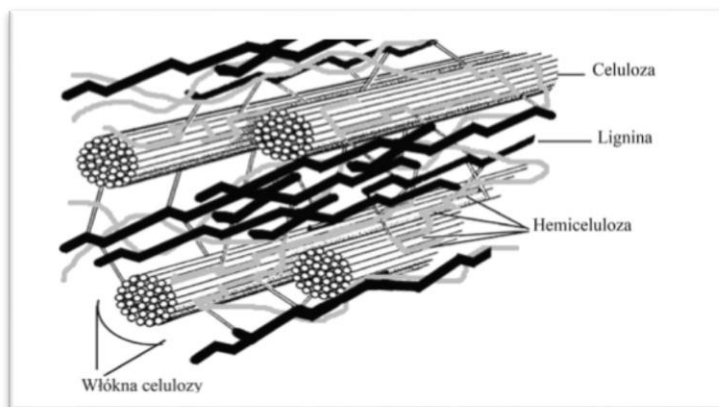
1. Włókna roślinne jako napełniacz kompozytów polimerowych

Kompozyty polimerowe to materiały, w skład których wchodzi osnowa oraz napełniacz. Matrycę kompozytu mogą tworzyć polimery termoplastyczne, duroplasty oraz elastomery. Osnowa stanowi fazę ciągłą, dzięki czemu umożliwia zdyspergowanie wszystkich składników w kompozycji oraz nadanie kształtu

*autor korespondencyjny: dr inż. Anna Słubik: a.slubik@ips.lodz.pl

gotowym produktem. Rodzaj zastosowanej osnowy determinuje również większość fizyko-chemicznych właściwości materiału. Natomiast w celu poprawy wybranych właściwości przetwórczych i użytkowych gotowych produktów do kompozycji wprowadza się napełniacze. W technologii polimerów powszechnie stosowanymi napełniaczami są między innymi: krzemionka, kreda, kaolin, sadza oraz włókna syntetyczne. Presja ekologiczna oraz konieczność poszukiwania biodegradowalnych i odnawialnych surowców spowodowała, że coraz częściej jako dodatkowe składniki kompozytu stosuje się włókna naturalne. Niska gęstość nasypowa, biodegradowalność, duża dostępność, zdolność do tłumienia fal akustycznych oraz łatwość recyklingu sprawia, że włókna roślinne stanowią dobrą alternatywę do tradycyjnie wykorzystywanych włókien syntetycznych [1-4]. Do wzmocnienia kompozytu stosuje się włókna roślinne z konopi, juty, lnu, szałwy, kokosu, agawy, bambusa, bawełny, palmy, pszenicy czy ryżu. Takie włókna otrzymuje się z liści, łodyg lub nasion wybranej rośliny [5]. Znane są również metody pozyskiwania włókien z odpadów przemysłu rolno-spożywczego [6, 7].

Każde włókno roślinne zbudowane jest z celulozy, hemicelulozy i ligniny (Rys. 1.). Dodatkowo, włókna mogą zawierać niewielkie ilości pektyn, wosków i substancji rozpuszczalnych w wodzie.



Rys 1. Struktura włókna roślinnego [8]

Wyjściowy skład chemiczny włókna jest istotny, ponieważ może wpływać na końcowe właściwości kompozytów, a tym samym na możliwość ich celowych zastosowań. Dla przykładu, włókna pochodzące z łyka mają większą wytrzymałość na rozciąganie (700 MPa) w porównaniu do włókien nasiennych (100-500 MPa). Dodatkowym czynnikiem, który wpływa również na jakość włókien naturalnych jest sposób ich ekstrakcji z wyjściowego materiału [9].

Właściwości kompozytów polimerowych zawierających włókna pochodzące z zasobów naturalnych zależą od interakcji między hydrofilowymi włóknami, a hydrofobową matrycą polimerową. Różnica w polarności tych materiałów przyczynia się do słabej kompatybilności pomiędzy nimi, co skutkuje wytworzeniem kompozytów o niezadowalających właściwościach użytkowych. Dlatego też, przed wprowadzeniem substancji pochodzącej z zasobów naturalnych do matrycy polimerowej konieczne jest przeprowadzenie jej modyfikacji fizycznej i/lub chemicznej. Modyfikacja chemiczna polega na impregnacji włókien polimerem kompatybilnym do osnowy, acetylacji, merceryzacji czy silanizacji, natomiast modyfikacja fizyczna na obróbce termicznej lub plazmowej włókna. Modyfikacja skutkuje poprawą nie tylko adhezji, ale również prowadzi do ograniczenia chłonności wody, zwiększenia stabilności wymiarową wyrobu oraz zwiększenia jego odporności na oddziaływanie czynników środowiskowych [10, 11]. Warto zaznaczyć, że dodatek włókien pozwala też kształtować właściwości polimerów w kierunku produktów bardziej przyjaznych środowisku. Zastąpienie pewnej ilości syntetycznych materiałów przez tańsze włókno, dodatkowo wpływa na ograniczenie kosztów produkcji takich kompozytów [12].

W ostatnich dwudziestu latach szczególnie intensywny rozwój zastosowań elementów z materiałów kompozytowych obserwuje się w między innymi do budowy środków transportu, jako konstrukcji systemów generowania odnawialnej energii i do budowy systemów monitorowania zakłóceń elektromagnetycznych na

potrzeby wojska czy lotnictwa oraz jako materiały do tworzenia kamizelek kuloodpornych. Do takich zastosowań najczęściej wykorzystywane są kompozyty na bazie polipropylenu, polichlorku winylu, polietylenu wzmocnione między innymi włóknem kenaf, mączką drzewną, włóknem węglowym, łuską ryżową oraz sizalem [13-17].

2. Charakterystyka włókna bambusowego

Bambus to jedna z bardziej znanych i szeroko rozpowszechnionych roślin w tropikalnych, subtropikalnych i umiarkowanych ekosystemach leśnych, należąca do podrodziny *Bambusoideae* z rodziny traw *Gramineae* (*Poaceae*). Na świecie istnieje ponad 1000 gatunków bambusa, które ze względu na formy pokrojowe dzieli się na grupy drzewiaste i karłowate. Gatunki karłowe dorastają od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów, natomiast formy drzewiaste osiągają wysokość powyżej 30 m. Dzięki łatwości w uprawie, ekologiczności i ekonomiczności, bambus znalazł szerokie zastosowanie w niemal każdym sektorze gospodarki. Stosuje się go jako materiał do budowy dachów, ogrodzeń, jako pojemniki na wodę oraz składniki kosmetyków i żywności. Otrzymuje się z niego również włókna bambusowe wykorzystywane w przemyśle włókienniczym oraz przetwórstwie tworzyw sztucznych [18].

Duża popularność włókien bambusowych związana jest z bardzo szybkim wzrostem bambusa umożliwiającym pozyskanie odpowiedniego materiału w krótkim czasie. Największym producentem włókien bambusowych są Chiny, które posiadają jedne z najbardziej nowoczesnych i wydajnych technologii produkcji włókien bambusowych. Plantacje w Chinach w 2017 roku zajmowały, aż 4,43 miliony hektarów bambusa Moso oraz 1,58 milionów hektarów innych gatunków bambusa [19].

Włókna bambusowe pozyskuje się na kilka sposobów. Najprostszą metodą jest

ekstrakcja mechaniczna, w której do uzyskania włókien lub proszku z bambusa wykorzystuje się parę wodną pod odpowiednim ciśnieniem, prasy mechaniczne lub procesy mielenia. Metoda ta jest niskoenergetyczna, a otrzymane włókna charakteryzują się większą wytrzymałością niż po obróbce chemicznej. Podczas ekstrakcji mechanicznej uzyskuje się produkt o krótkich włóknach. Włókna bambusowe otrzymuje się również w procesie chemicznym. Hydroliza alkaliczna bądź kwasowa pozwala na delignifikację i na usunięcie obszarów amorficznych z surowego włókna bambusowego. Zastosowanie roztworów chemicznych wpływa nie tylko na składniki celulozowe włókien, ale również na składniki takie jak: hemiceluloza, lignina oraz pektyna. Prowadzenie procesu ekstrakcji w ciągu 72 godzin za pomocą 4 % wodorotlenku sodu (NaOH) umożliwia usunięcie 38–42 % polisacharydów i ligniny z włókien bambusa. Metoda zasadowa w porównaniu z metodą kwasową, w mniejszym stopniu wpływa na końcową jakość włókien bambusowych. Warto zaznaczyć, że w zależności od metody prowadzonej ekstrakcji otrzymuje się włókna o odmiennych właściwościach fizykochemicznych. Krótke włókna pozyskuje się metodą z wykorzystaniem pary wodnej lub metodami chemicznymi, natomiast dłuższe stosując proces prasowania walcem. Włókna charakteryzujące się średnią wytrzymałością na rozciąganie rzędu 400 MPa wytwarza się metodą prasowania walcem, natomiast włókna o znacznie lepszych właściwościach wytrzymałościowych (wytrzymałość na rozciąganie od 600 MPa nawet do 1000 MPa) łącząc ekstrakcję chemiczną ze ścisaniem [17, 20–22].

Skład chemiczny włókien bambusowych (Tabela 1) zmienia się w zależności od gatunku, miejsca hodowli rośliny oraz części rośliny, z której jest pozyskiwany. Uśrednione zawartości podstawowych składników wchodzących w skład bambusa, w zależności od gatunku zostały pokazane w tabeli 1. Większa ilość wiązek sitowonaczyniowej w roślinie przekładają się na wyższą zawartość otrzymanego ekstraktu

z bambusa. Ponadto zawartość ligniny nie jest powiązana z długością włókna bambusa, ale z jego średnicą. Większa zawartość ligniny występuje w roślinach o mniejszej średnicy włókna. Natomiast ilość halocelulozy oraz α -celulozy nie zależy od morfologii roślin [23]. Przeprowadzenie analizy chemicznej włókien bambusowych jest niezwykle ważne, gdyż otrzymane wyniki będą determinować kierunek zastosowań uzyskanych włókien roślinnych w wybranych procesach technologicznych.

Tab. 1. Skład chemiczny czterech gatunków bambusa [23].

Gatunek bambusa	Zawartość składnika [%]		
	Haloceluloza	α -celuloza	Lignina
<i>Gigantochloa brang</i>	79,78	51,58	24,84
<i>Gigantochloa levis</i>	84,52	33,80	26,50
<i>Gigantochloa scortechinii</i>	74,62	46,86	32,54
<i>Gigantochloa wrayi</i>	84,52	37,66	30,02

3. Włókna bambusowe jako napelniacz kompozytów polimerowych

W literaturze przedmiotu szczegółowo opisane są metody otrzymywania oraz właściwości wytworzonych kompozytów na bazie żywic syntetycznych, termoplastów oraz elastomerów z dodatkiem włókna bambusowego.

3.1. Kompozyty na bazie żywic syntetycznych z włóknem bambusowym

Kompozyty na bazie żywic termoutwardzalnych tj. epoksydowych, poliestrowych, winylowych wzmocnione włóknem bambusowym z gatunku *Gigantochloa scortechinii* zostały przygotowane przez Chin i jego współpracowników (2020). Przed wprowadzeniem włókien w ilości 0–40% do matrycy polimerowej, zostały one poddane modyfikacji chemicznej (alkalizacja)

oraz fizycznej (mielenie). Dodatek włókien zwiększył sztywność oraz poprawił właściwości mechaniczne wytworzonych kompozytów. Dodatkowo warto zaznaczyć, że wytrzymałość na rozciąganie takich materiałów zwiększyła się wraz z większą ilością wprowadzonych włókien, co prawdopodobnie związane było z występowaniem dobrej kompatybilności pomiędzy włóknem bambusowym, a matrycą polimerową. Spośród badanych kompozycji największą wytrzymałość na rozciąganie i zginanie wykazywał kompozyt epoksydowy zawierający 40% włókien bambusowych [24]. Wpływ modyfikacji włókien bambusowych na właściwości kompozytów żywicy epoksydowej zbadano również w pracy autorstwa *Huang*. Takie kompozyty zostały wytworzone w procesie formowania tłoczonego. Po obróbce alkalicznej wytrzymałość włókna bambusowego była mniejsza niż w przypadku włókna niemodyfikowanego, natomiast dla kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknem bambusowym w przypadku parametrów wytrzymałościowych zaobserwowano odwrotną zależność. Modyfikacja włókna doprowadziła do zwiększonej kompatybilności pomiędzy włóknem a matrycą polimerową, co w konsekwencji przyczyniło się do otrzymania kompozytu epoksydowego charakteryzującego się lepszą wytrzymałością na rozciąganie w porównaniu do wytrzymałości kompozytu zawierającego niemodyfikowane włókna bambusowe. Wytrzymałość na rozciąganie wytworzonych materiałów uzależniona była od wielkości włókien bambusowych i zwiększała się wraz ze zmniejszeniem średnicy włókna bambusowego [25]. W kolejnej pracy sporządzono kompozyty o czterech stężeniach (10, 15, 20 i 25% wag.) żywicy fenolowo-formaldehydowej wzmocnione włóknem bambusowym. Na podstawie przeprowadzonych badań naukowcy stwierdzili, że wraz ze wzrostem stężenia żywicy wzrastała wodoodporność oraz wytrzymałość na rozciąganie, a maleje wytrzymałość na ściskanie zaprojektowanych kompozytów – co pokazano na rysunku 2.



Rys 2. Obrazowe wyniki testu wytrzymałości mechanicznej kompozytów wzmocnionych włóknem bambusowym w zależności od siły nacisku [26].

Dodatkowo w przypadku tego typu kompozytów, nie zaobserwowano znaczącej zmiany wodoodporności, gdy stężenie żywicy wzrosło z 20 do 25%, ale właściwości mechaniczne w tym przypadku uległy znacznemu pogorszeniu. Zatem optymalne stężenie żywicy w kompozytach powinno wynosić 20%. Wówczas takie kompozyty charakteryzują się najlepszymi właściwościami i mogą być z powodzeniem wykorzystywane w przemyśle budowlanym do produkcji np. materiałów na podłogę zewnętrzną [26].

3.2. Kompozyty na bazie termoplastów z włóknem bambusowym

W badaniach prowadzonych przez *Daramola* i współpracowników (2019) kompozyty polietylenu wysokiej gęstości (HDPE) z dodatkiem włókna bambusowego zostały przygotowane za pomocą formowania tłoczonego. Do napełnienia HDPE zastosowano różne ilości włókien i zbadano ich wpływ na podstawowe właściwości otrzymanych kompozytów. W celu zwiększenia kompatybilności hydrofilowych włókien bambusowych z hydrofobową matrycą

polimerową, zmodyfikowano ich powierzchnię w procesie alkalizacji za pomocą wodorotlenku sodu. Włókna bambusowe w ilości od 2 do 4 cz. wag. zostały dobrze zdyspergowane w ośrodku polimerowym oraz ich obecność poprawiła właściwości mechaniczne otrzymanych kompozytów [27]. Włókna bambusowe oraz sproszkowaną łupinę z kokosa wprowadzono również do matrycy z polichlorku winylu (PVC) w celu poprawy wybranych właściwości kompozytu PVC. W przypadku takich materiałów, moduł sprężystości, wytrzymałość na zginanie, rozciąganie, ściskanie oraz twardość zależała od ilości zastosowanych włókien [28]. Włókna bambusowe także zostały zastosowane do wzmocnienia kompozytu na bazie polipropylenu (PP) i zbadano ich wpływ na właściwości mechaniczne otrzymanego produktu. W celu zwiększenia kompatybilności pomiędzy włóknem bambusowym a matrycą polipropylenową, przeprowadzono modyfikację polipropylenu za pomocą bezwodnika maleinowego. Do porównania sporządzono także niemodyfikowany kompozyt PP z dodatkiem włókna bambusowego. Modyfikacja PP poprawia właściwości mechaniczne kompozytu, takie jak wytrzymałość na rozciąganie i udarność. W porównaniu z dostępnymi na rynku płytami np. z masy drzewnej, zaprojektowany materiał był lżejszy, wodoodporny, tańszy oraz charakteryzował się wytrzymałością na rozciąganie ponad trzy razy większą niż produkt komercyjny [29, 30].

3.3. Kompozyty elastomerowe napełnione włóknem bambusowym

Włókna bambusowe znalazły również zastosowanie jako napełniacze materiałów elastomerowych. W pracy *Ismail* i jego współpracownicy (2002) zbadano wpływ środka kompatybilizującego (formaldehydu fenolowego i heksametylenotetraminy) w kompozytach kauczuku naturalnego napełnionego włóknem bambusowym. Dodatek środka kompatybilizującego poprawił adhezję pomiędzy włóknem bambusowym a naturalnym kauczukiem, co w konsekwencji

wpłynęło na poprawę właściwości mechanicznych oraz przetwórczych zaprojektowanych materiałów [31]. Dodatkowo takie parametry jak stopień spęcznienia, absorpcja wody wzrastają wraz ze wzrostem zawartości napelnacza w kompozytach, a zmniejszają się wraz z dodatkiem środka wiążącego [32]. Do modyfikacji włókien bambusowych można również zastosować silanowe środki wiążące np.: Si-69. Kompozyty kauczuku naturalnego wzmocnione zmodyfikowanymi włóknami wykazywały znacznie lepsze właściwości mechaniczne niż te, które zawierały niezmodyfikowane włókna [33].

4. Podsumowanie

Duże zainteresowanie włóknami roślinnymi związane jest z obecną tendencją wielu gałęzi przemysłu dążącą do zmniejszenia ilości zalegających odpadów z tworzyw sztucznych, obniżenia kosztów produkcji oraz uzyskania biodegradowalnych materiałów, przyjaznych i bezpiecznych dla środowiska. Znane są kompozyty na bazie termoplastów, duroplastów, elastomerów wzmocnione różnymi włóknami roślinnymi. Dostępne badania pokazują, że włókna roślinne uzyskane z bambusa mogą być z powodzeniem stosowane jako napelnacz różnych kompozytów polimerowych. Właściwości mechaniczne, termiczne oraz przetwórcze zaprojektowanych materiałów zależą od ilości wprowadzonych włókien oraz sposobu ich modyfikacji. Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknem bambusowym mogą być wykorzystywane do produkcji elementów wyposażenia wnętrz (meble, panele tarasowe, wszelkiego rodzaju pudełka do przechowywania), elementów motoryzacyjnych (siedzenia, maty podłogowe, deska rozdzielcza, panele drzwiowe) oraz w budownictwie i konstrukcjach (okna, drzwi, schody).

Praca została wykonana w ramach subwencji Ministerstwa Edukacji i Nauki pt. „Ekododatki do materiałów polimerowych i kompozytowych” (00/NOŚ/01/00/4/21).

Literatura

- [1] Trigui A., Karkri M., Pena L., Boudaya C., Candau Y, Bouffi S., Vilaseca F.: *Thermal and mechanical properties of maize fibres-high density polyethylene biocomposites*, Journal of Composite Materials **47** (11), 2013, str. 1387-1397.
- [2] Reddy J. P., Misra M., Mohanty A.: *Injection Moulded Biocomposites from Oat Hull and Polypropylene/Poly lactide Blend: Fabrication and Performance Evaluation*, Advances in Mechanical Engineering **1**, 2013, str. 1-8.
- [3] Ławińska K, Modrzewski R, Serweta W.: *Tannery Shavings and Mineral Additives as a Basis of New Composite Materials*. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, **5**(137), 2019, str. 2789-93.
- [4] Ławińska K, Serweta W, Modrzewski R.: *Qualitative Evaluation of the Possible Application of Collagen Fibres: Composite Materials with Mineral Fillers as Insoles for Healthy Footwear*. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe; **5**(131), 2018, str. 81-85.
- [5] Fuqua M. A., Huo S., Ulven C. A.: *Natural Fiber Reinforced Composites*, Polymer Reviews **52** (3), 2012, str. 259-320.
- [6] Ramamoorthy S. J., Skrifvars M., Persson A.: *A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers*, Polymer Reviews, **55**(1), 2015, str. 107–162.
- [7] Mamun A. A.: *The use of maize, oat, barley and rye fibres as reinforcements in composites*, [w:] *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*, O. Faruk, M. Sain (red.), Woodhead Publishing, 2015, str. 454–487.
- [8] Leja K., Lewandowicz G., Grajek W.: *Produkcja bioetanolu z surowców celulozowych*, Biotechnologia **4** (87), 2009, str. 88-101.
- [9] Faris M. Al-O., Salit M. S.: *2-Natural fiber composites*, [w:] *Material Selection for Natural Fiber Composites*, M. Al-O. Faris, M. S. Salit (red.), Woodhead Publishing, 2017, str. 23-48.
- [10] Barton J., Niemczyk A., Czaja K., Korach Ł.: *Kompozyty, biokompozyty i nanokompozyty polimerowe. Otrzymywanie, skład, właściwości i kierunki zastosowań*, Chemik **68**(4), 2014, str. 280-287.
- [11] Miedzianowska J., Masłowski M., Strzelec K.: *Kompozyty polimerowe zawierające włókna roślinne – czynniki wpływające na wytrzymałość mechaniczną*, Technologia i Jakość Wytrobów **63**, 2018, str. 45-54.
- [12] Kijęński J., Kijęńska M., Osawaru O.: *Włókna roślinne jako zamienniki włókien mineralnych w kompozytach termoplastów – wizja Forda czy Al Gore'a?*, Polimery **61** (7-8), 2016, str. 467-473.
- [13] Zampaloni M., Pourboghra F., Yankovich S. A., Rodgers B. N., Moore J., Drzal L. T., Mohanty A. K., Misra M.: *Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A*

discussion on manufacturing problems and solutions, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **38**(6), 2007, str. 1569-1580.

[14] Dunne R., Desai D., Sadiku R., *Material characterization of blended sisal-kenaf composites with an ABS matrix*, Applied Acoustics **125**, 2017, str. 184-193.

[15] Fang Y., Wang O., Guo C., Song Y., Cooper P. A.: *Effect of zinc borate and wood floor on thermal degradation and fire retardancy of Polyvinyl chloride (PVC) composites*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis **100**, 2013, str. 230-236.

[16] Zuhaira N., Aziz A., Mohamed R.: *Effects of Kenaf and Rice Husk on Thermal Properties of Kenaf/CaCO₃/HDPE and Rice Husk/CaCO₃/HDPE Hybrid Composites*, Advanced Materials Research **748**, 2013, str. 201–205.

[17] Mochane J. M., Mokhena T. C., Mokhothu T. H., Mtibe A., Sadiku E. R., Ray S. S., Ibrahim I. D., Daramola O. O.: *Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review*, eXPRESS Polymer Letters **13**(2), 2019, str. 159-198.

[18] Kamiński S., Lawrence A., Trujilo D. J. A.: *Structural use of bamboo: Part 1: Introduction to bamboo*, Structural Engineer **94**(8), 2016, str. 40-43.

[19] Liu W., Hui C., Wang F., Wang M. Liu G.: *Review of the Resources and Utilization of Bamboo in China*, [w:] *Bamboo - Current and Future Prospects*, Khalil A. (red.), IntechOpen, 2018.

[20] Zakikhani P., Zahari R., Sultan M. T. H., Majid D. L.: *Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites*, Materials & Design **63**, 2014, str. 820-828.

[21] Liu D., Song J., Anderson D. P., Chang P. R., Hua Y.: *Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties*, Cellulose **19**, 2012, str. 1449–1480.

[22] Subash S., Stanly J. R. B., Edwin R. D. J.: *A Review on Extraction of Bamboo Fibres and Its Properties*, International Journal of Advanced Chemical Science and Applications **5**(2), 2017, str. 22-27.

[23] Wahab R., Musafa M., Salam M., Sudin M., Samsi H., Rasat M.: *Chemical Composition of Four Cultivated Tropical Bamboo in Genus Gigantochloa*, Journal of Agricultural Science **5**(8), 2013, str. 66-75.

[24] Chin S. C., Tee K. F., Tong F. S., Ong H. R., Gimbin J.: *Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced composites*, Materials Today Communications **23**, 2020.

[25] Huang J-H., Young W-B.: *The mechanical, hygral, and interfacial strength of continuous bamboo fiber reinforced epoxy composites*, Composites Part B: Engineering **166**, 2019, str. 272-283.

[26] Rao F., Ji Y., Li N., Zhang Y., Chen Y., Yu W.: *Outdoor bamboo-fiber-reinforced composite: Influence of resin content on water resistance and mechanical properties*, Construction and Building Materials **261**, 2020.

- [27] Daramola O. O., Akinwekomi A. D., Adediran A. A., Akindote-White O., Sadiku E. R.: *Mechanical performance and water uptake behaviour of treated bamboo fibre-reinforced high-density polyethylene composites*. *Heliyon* **5**(7), 2019.
- [28] Adediran A. A., Akinwande A. A., Balogun O. A., Olasoju O. S., Olanrewaju S. A.: *Experimental evaluation of bamboo fiber/particulate coconut shell hybrid PVC composite*, *Scientific Reports* **11**, 2021.
- [29] Chen X., Guo O., Mi Y.: *Bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: A study of the mechanical properties*, *Journal of Applied Polymer Science* **69**(10), 1998, 1891-1899.
- [30] Wei Tan, Xiaolong Hao, Qi Fan, Lichao Sun, Junjie Xu, Qingwen Wang, Rongxian Ou.: *Bamboo particle reinforced polypropylene composites made from different fractions of bamboo culm: Fiber characterization and analysis of composite properties*, *Polymer Composites* **40**(12), 2019, 4619-4628.
- [31] Ismail H., Edyham M. R., Wirjosentono B.: *Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent*, *Polymer Testing* **21**(2), 2002, str. 139-144.
- [32] Ismail H., Edyham M. R., Wirjosentono B.: *Dynamic Properties and Swelling Behaviour of Bamboo Filled Natural Rubber Composites : The Effect of Bonding Agent*, *Iranian Polymer Journal* **10**(6), 2021, str. 377-383.
- [33] Ismail F., Shuhelmy S., Edyham M. R.: *The effects of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fibre filled natural rubber composites*, *European Polymer Journal* **38**(1), 2002, str. 39-47.