

dr inż. Ewa Sudol^{1)*}

ORCID: 0000-0003-2902-0497

dr inż. Ewelina Kozikowska¹⁾

ORCID: 0000-0001-7323-3663

inż. Maria Goron¹⁾

ORCID: 0000-0002-1826-6689

Odporność profili budowlanych z kompozytów polimerowych zbrojonych łuskami zbóż na grzyby domowe

Resistance of construction profiles made of polymer composites reinforced with cereal husks to the fungi

DOI: 10.15199/33.2022.09.08

Streszczenie. Analizowano odporność profili z kompozytów PVC z napełniaczem z pulweryzowanych łusek owsa, prosa i ryżu na działanie na grzybów domowych. Wyroby z łuskami owsa i ryżu wykazały porównywalną podatność na działanie *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* oraz *Coriolus versicolor*, ale mniejszą niż kompozyt z łuskami prosa. *Coniophora puteana* wykazał największy stopień rozwoju grzybni i zmienił morfologię powierzchni profili. Ekspozycja na działanie grzybów w środowisku mokrym skutkowała zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości, największym w przypadku kompozytu zbrojonego łuskami prosa. Kluczowy był wpływ samego środowiska mokrego. Mikroorganizmy nieznacznie zmieniły właściwości przy zginaniu.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe; łuski; owies; proso; grzyby domowe; mikrostruktura; właściwości przy zginaniu.

Abstract. The resistance to fungi of oat, millet and rice husks reinforced PVC composite profiles was analysed. Products with oat and rice husks showed comparable susceptibility to *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* and *Coriolus versicolor*, lower than the composite with millet husks. *Coniophora puteana* showed the highest degree of mycelium growth, changing the morphology of the profile surface. Exposure to fungi in a wet condition caused a decrease in flexural strength and modulus of elasticity, the greatest in the case of millet husks reinforced composite. The influence of the wet conditions itself was crucial. The microorganisms slightly changed the bending properties.

Keywords: polymer composites; husks; oat; millet; fungi; microstructure; bending properties.

Kompozyty polimerowe z napełniaczem z cząstek roślinnych (NFPC) stosowane są w budownictwie od wielu lat, przede wszystkim do produkcji profili elewacyjnych, podłóg zewnętrznych, stolarki okiennej i drzwiowej oraz pomostów i elementów małej architektury [1]. Dominują NFPC z matrycą z polimerów termoplastycznych, z wypełnieniem z włókien drzewnych lub z pulweryzowanych łusek, łądy i liści roślin uprawnych [2]. W budownictwie najbardziej popularne są wyroby z matrycą z PVC i napełniaczem z mączki drzewnej lub łusek ryżu [3], ale podejmowane są również próby stosowania kompozytów z napełniaczami z łusek innych zbóż. Biorąc pod uwagę, że włókna roślinne to struktury lignocelulozowe, których skład chemiczny różni się w zależności od gatunku rośliny,

zmiana napełniacza może skutkować zmianą właściwości kompozytu [2, 4]. Przydatność profili wytworzonych z użyciem nowego napełniacza w budownictwie musi być oceniona zgodnie z zasadami dotyczącymi wyrobów budowlanych, wg kryterium użyteczności. Odnoszą się one do zbioru cech kluczowych do danego zastosowania [5], przez pryzmat wpływu wyrobu na spełnienie przez obiekt budowlany siedmiu wymagań podstawowych wskazanych w rozporządzeniu nr 305/2011 [6].

Właściwości użytkowe wyrobów z kompozytów polimerowych zależą przede wszystkim od oddziaływań na granicy faz – osnowy i napełniacza [2, 3]. Hydrofilowy charakter włókien roślinnych sprawia, że pod wpływem wody łatwo ulegają one pęcznieniu, co prowadzi do pęknięć w hydrofobowej matrycy polimerowej [3, 7]. Pogorszeniu ulega współpraca między włóknami a polimerem, obniżając zdolność przenoszenia naprężeń na granicy faz, cze-

mu towarzyszy spadek parametrów mechanicznych [8].

W artykule omówiono problem degradacji profili pod wpływem działania grzybów w środowisku mokrym, w którym następuje ich rozwój. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że NFPC są podatne przede wszystkim na podstawczaki klasy *Basidiomycetes* [7, 8], zaliczane we współczesnej taksonomii do podtypu *Agaricomycotina* [9]. Osnowę polimerową cechuje znikoma podatność na procesy biorozkładu [10, 11]. Odporność kompozytu na działanie grzybów zależy od napełniacza – jego rodzaju i ilości oraz wielkości i stopnia zdyspergowania cząstek [12, 13]. Kompozyty zbrojone włóknami o małej nasiąkliwości są mniej wrażliwe na grzyby domowe niż te, w których zastosowano włókna bardzo nasiąkliwe [14]. Ustalono, że włókna w NFPC osiagają do 70% wilgotności, co, przy odpowiedniej temperaturze i pH, stanowi optymalne warunki do rozwoju mikroorganizmów [15].

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej; Zakład Inżynierii Materiałów Budowlanych

^{*} Adres do korespondencji: e.sudol@itb.pl

Pokarmem dla grzybów jest zarówno lignina, jak i celuloza. Grzyby rozkładu białego, np. *Coriolus versicolor*, atakują przede wszystkim ligninę, natomiast grzyby rozkładu brunatnego, np. *Coniophora puteana* – celulozę [16]. Właściwa dyspersja włókien w matrycy jest sprzymierzeńcem biodporności. Sprzyja dobrej przyczepności międzyfazowej, redukując puste przestrzenie [1, 7], które działają jak kanały podczas ruchu grzybów przez materiał, ułatwiające transport enzymów [17]. Odporność NFPC na mikroorganizmy obniża się wraz ze wzrostem ilości napelnacza [18]. W dotychczasowych badaniach nad biodegradacją NFPC notowano zróżnicowaną podatność na działanie poszczególnych szczepów grzybów domowych [14, 15, 19]. Najbardziej intensywny wzrost obserwowano w przypadku *Trametes versicolor* i *Coniophora puteana*, przy jednoczesnym ubytku masy nieprzekraczającym 5% i bez istotnej zmiany modułu sprężystości przy zginaniu [8]. Znane są jednak przypadki zmniejszenia wytrzymałości na zginanie do 30%, modułu sprężystości do 40% [20–23] oraz udarowości do 16% [20].

Celem opisywanych w artykule badań było ustalenie podatności profili budowlanych, wytworzonych z kompozytu z osnową PVC i napelniczem z pulweryzowanych łusek owsa i prosa, na działanie grzybów domowych, co dotychczas nie było przedmiotem analiz. Porównawczo prowadzono badania standardowego kompozytu z łuskami ryżu. Wszystkie rozwiązania poddano ekspozycji na działanie *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* oraz *Coriolus versicolor*. Oceniono wzrost grzybni, morfologię powierzchni kompozytu oraz jego wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości przy zginaniu.

Metoda badań

Badania przeprowadzono na próbkach profili komorowych przeznaczonych do wykonywania podłóg zewnętrznych, wytworzonych metodą ekstruzji w warunkach przemysłowych z kompozytu z osnową PVC z dodatkiem CaCO_3 (50 phr – 50 cz. na 100 cz. wag. mieszanki) i napelniczem opcjonalnie z pulweryzowanych łusek owsa (30 phr), prosa (30 phr) lub ryżu

(60 phr). Powierzchnie profili poddano obróbce mechanicznej przez szcztokowanie, stosowanej standardowo w przypadku wyrobów dla budownictwa. Nie wykonywano ryflowań.

Z centralnej części komór wycięto po 5 serii próbek o wymiarach 80 x 10 x 5 mm, z których każda liczyła 10 szt. Pierwszą serię próbek sezonowano w warunkach laboratoryjnych (temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$, wilgotność względna $50 \pm 5\%$). Stanowiły one próbki odniesienia.

Drugą serię poddano wymywaniu, wg EN 84 [24], polegającemu na zanurzeniu próbek przez okres 14 dni w wodzie, którą dziewięciokrotnie wymieniało. W kolbach Kollega przygotowano pożywkę składającą się z 40 g ekstraktu siodu, 35 g agaru i 1000 ml wody. Pożywkę poddano sterylizacji w autoklawie w temperaturze 121°C , pod ciśnieniem 1 atm. Próbki umieszczono w kolbach, na pożywkę i przeniesiono na 4 miesiące do komory hodowlanej (temperatura $22 \pm 1^\circ\text{C}$, wilgotność względna $70 \pm 5\%$). Próbki te służyły ustaleniu wpływu środowiska mokrego na badany materiał.

Próbki trzech pozostałych serii poddano, po wymywaniu, ekspozycji na działanie grzybów. Pożywkę szczepiono strzępkami *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries) BAM Ebw. 15, *Gloeophyllum trabeum* (Persoon ex Fries) BAM Ebw. 109 oraz *Coriolus versicolor* (Linnaeus). Kolby inkubowano aż do całkowitego pokrycia przez grzybnie. Próbki kompozytów umieszczono na grzybni, tak aby powierzchnia użytkowa profilu pozostawała z nią w bezpośrednim kontakcie i przeniesiono do komory hodowlanej (temperatura $22 \pm 1^\circ\text{C}$, wilgotność względna $70 \pm 5\%$) na 4 miesiące. Aktywność grzybów zweryfikowano wg EN ENV 12038 [25], uzyskując ubytek masy znacznie większy niż 20%.

Bezpośrednio po ekspozycji oceniono wizualnie stopień wzrostu grzybni na próbkach. Do obserwacji SEM wybrano próbki, w przypadku których odnotowano stopień najwyższy. Oczyszczono je z grzybni przy użyciu wody pod ciśnieniem i suszono przez 7 dni w temperaturze $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Analizę mikrostruktury przeprowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Sigma 500 VP z zimną emisją po-

lową, który umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości przy niskim napięciu przyspieszającym. Badania prowadzono przy napięciu przyspieszającym wiązkę elektronów wzbudzających 10 KeV, z zastosowaniem detektora SE na próbkach napylanych warstwą złota. Zastosowano powiększenie 200x.

Próbki wszystkich serii poddano ponadto badaniu wytrzymałości na zginanie σ i modułu sprężystości przy zginaniu E . Badanie wykonano z użyciem maszyny wytrzymałościowej klasy 1, wg EN ISO 178 [26]. Zastosowano rozstaw podpór 64 mm. Próbki zginano stroną użytkową w kierunku podpór, aby działaniu naprężeń rozciągających poddać powierzchnię eksponowaną na działanie grzybów. Obciążenie przykładano z prędkością 2 mm/min, aż do zniszczenia. Podczas zginania rejestrowano krzywą obciążenie-ugięcie w zakresie linowo-sprężystym, w tym wartości siły i ugięcia odpowiadające odkształceniom $\varepsilon_1 = 0,0005$ i $\varepsilon_2 = 0,0025$. Na podstawie zarejestrowanych wartości sił przy ε_1 i ε_2 określono wartości naprężeń normalnych i obliczono moduł sprężystości przy zginaniu.

Wyniki badań uzyskane w przypadku próbek poddanych działaniu środowiska mokrego odniesiono do próbek w stanie wyjściowym w celu ustalenia wpływu tego środowiska na testowany materiał wg (1). Wynik wyrażono w %:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_m &= [(\sigma_m - \sigma_i)/\sigma_i] \cdot 100 \\ \Delta E_m &= [(E_m - E_i)/E_i] \cdot 100 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

σ_m, E_m – wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości w stanie mokrym [MPa];
 σ_i, E_i – wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości w stanie wyjściowym [MPa].

Wyniki badań próbek poddanych ekspozycji na działanie grzybów w środowisku mokrym odniesiono do rezultatów otrzymanych w przypadku próbek w stanie wyjściowym, co pozwoliło na ustalenie wpływu tej ekspozycji na testowane wyroby zgodnie z (2). Wynik wyrażono w %.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_d &= [(\sigma_d - \sigma_i)/\sigma_i] \cdot 100 \\ \Delta E_d &= [(E_d - E_i)/E_i] \cdot 100 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

σ_d, E_d – wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości po działaniu grzybów w środowisku mokrym [MPa];
 σ_i, E_i – wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości w stanie wyjściowym [MPa].

W celu ustalenia, zgodnie z wytycznymi [27], wpływu grzybów domowych na badany materiał obliczono, wg (3), różnicę między zmianą wywołaną ekspozycją na działanie grzybów w środowisku mokrym a powodowaną samym środowiskiem mokrym.

$$\Delta\sigma_f = \Delta\sigma_d - \Delta\sigma_m \quad \Delta E_f = \Delta E_d - \Delta E_m \quad (3)$$

gdzie:
 $\Delta\sigma_m, \Delta E_m$ – wg (1); $\Delta\sigma_d, \Delta E_d$ – wg (2).

Wyniki

W ramach oceny wizualnej ustalono zróżnicowany stopień rozwoju grzybni poszczególnych szczepów na danym kompozycie i zróżnicowaną podatność

testowanych kompozytów na dany szczep. Na próbkach kompozytu z łuskami owsa nie odnotowano wzrostu *Coriolus versicolor* ani *Gloeophyllum trabeum* (fotografie 1a, 1b). *Coniophora puteana* rozwinął się w stopniu średnim (fotografia 1c), podobnie jak *Coriolus versicolor* na próbkach kompozytu z łuskami prosa (fotografia 2a). Kompozyt z napelniaczem z łusek prosa wykazał niewielką podatność na rozwój *Gloeophyllum trabeum*, którego grzybnia rozwinęła się w stopniu nieznacznym (fotografia 2b), natomiast istotną na wpływ *Coniophora puteana*, którego grzybnia rozwinęła się dobrze (fotogra-

fia 2c). Na próbkach kompozytu z napelniaczem z łusek ryżu nie odnotowano wzrostu *Coriolus versicolor* ani *Gloeophyllum trabeum* (fotografie 3a i 3b), zaś *Coniophora puteana* rozwinął się w stopniu średnim (fotografia 3c). W ujęciu stopnia rozwoju grzybni można zatem stwierdzić, że *Coniophora puteana* wywarł największy wpływ na testowane wyroby, co koresponduje z wynikami prac dotyczących biodegradacji kompozytów z mączką drzewną [11, 28]. Kompozyt z łuskami owsa cechowała podobna odporność na grzyby domowe, jak kompozyt z łuskami ryżu. Wyrób z napelniaczem z łusek prosa wykazał



Fot. 1. Próbki kompozytu zbrojonego łuskami owsa po ekspozycji na: a) *Coriolus versicolor*; b) *Gloeophyllum trabeum*; c) *Coniophora puteana*

Photo 1. Oat husks reinforced composite samples after exposure to: a) *Coriolus versicolor*; b) *Gloeophyllum trabeum*; c) *Coniophora puteana*



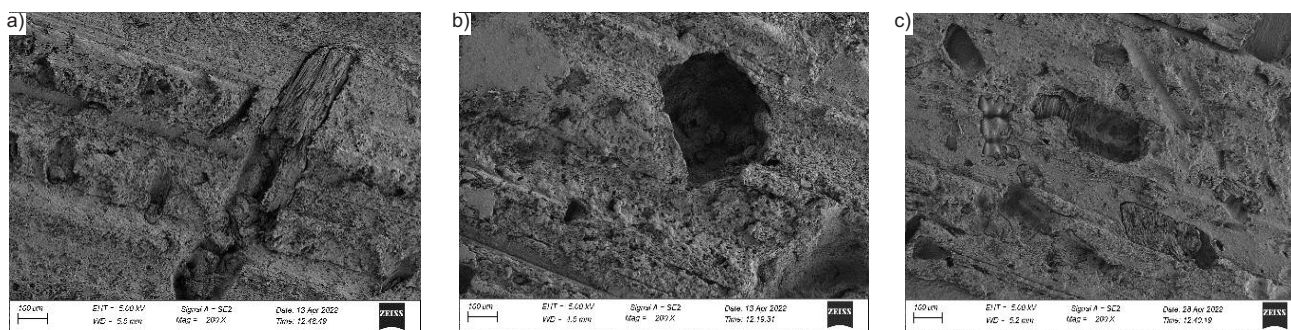
Fot. 2. Próbki kompozytu zbrojonego łuskami prosa po ekspozycji na: a) *Coriolus versicolor*; b) *Gloeophyllum trabeum*; c) *Coniophora puteana*

Photo 2. Millet husks reinforced composite samples after exposure to: a) *Coriolus versicolor*; b) *Gloeophyllum trabeum*; c) *Coniophora puteana*



Fot. 3. Próbki kompozytu zbrojonego łuskami ryżu po ekspozycji na: a) *Coriolus versicolor*; b) *Gloeophyllum trabeum*; c) *Coniophora puteana*

Photo 3. Rice husks reinforced composite samples after exposure to: a) *Coriolus versicolor*; b) *Gloeophyllum trabeum*; c) *Coniophora puteana*



Fot. 4. Mikrostruktura powierzchni kompozytu zbrojonego łuskami: a) owsa; b) prosa; c) ryżu po ekspozycji na *Coniophora puteana*, powiększenie 200x

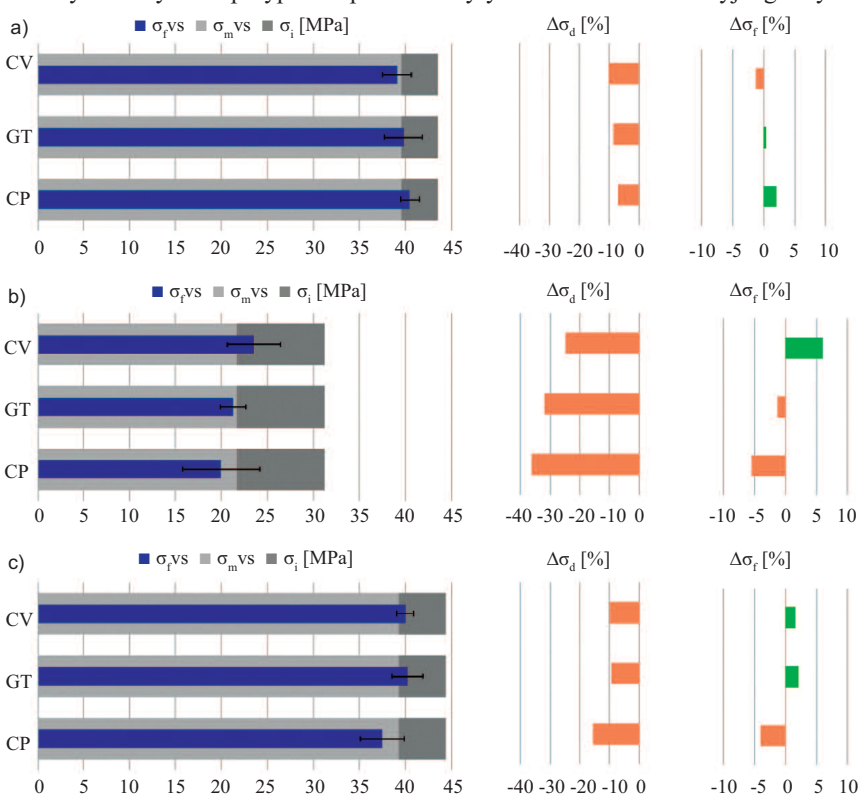
Photo 4. Surface microstructure: a) oat; b) millet; c) rice reinforced composite after exposure to *Coniophora puteana*, magnification 200x

większą podatność na zadane narażenia niż pozostałe badane rozwiązania.

Próbki ekspozowane na działanie *Coniophora puteana* poddano analizie SEM w celu zbadania morfologii powierzchni. Na wszystkich badanych kompozytach obserwowano wyraźne podłużne, płytkie wgłębienia o dość regularnym przebiegu, będące efektem obróbki mechanicznej (fotografie 4a – 4c). Na próbce kompozytu z napełniaczem z łuski owsa odnotowano odsłonięty fragment cząstki roślinnej, dobrze zwilżony przez matrycę oraz wyraźny, podłużny krater w osnowie, wskazujący na ubytek jej pozostałej części (fotografia 4a). Analiza morfologii powierzchni kompozytu z łuskami prosa uwidoczniła degradację w postaci pustych przestrzeni w matrycy (fotografia 4b). Ich kształt wskazuje, że przed ekspozycją na działanie *Coniophora puteana* w miejscach tych osnowa otaczała cząstki napełniacza roślinnego [2]. Obraz mikroskopowy powierzchni kompozytu z łuską ryżową był zbliżony do uzyskanego dla kompozytu z łuską owsa, przy czym zaobserwowano większą liczbę mniejszych cząstek roślinnych, dobrze zdyspergowanych w osnowie (fotografia 4c), co przemawia na jego korzyść [3, 13]. W kompozycie tym niektóre cząstki uległy biodegradacji, czego wyrazem są małe kraterki o stosunkowo regularnym kształcie [11]. Zaobserwowano odsłonięte w procesie szrotowania cząstki łuski ryżowych, które po ekspozycji pozostały nadal dobrze otoczone osnową.

Analiza wyników badania właściwości mechanicznych wskazuje, że w stanie wyjściowym kompozyty z łuskami owsa, prosa i ryżu cechowała wytrzy-

małość na zginanie na poziomie odpowiednio 43; 31 i 44 MPa (rysunek 1), a moduł sprężystości przy zginaniu wyniósł 3780; 2860 i 3490 MPa (rysunek 2). Charakterystyki te zbliżone są do uzyskiwanych w przypadku profili



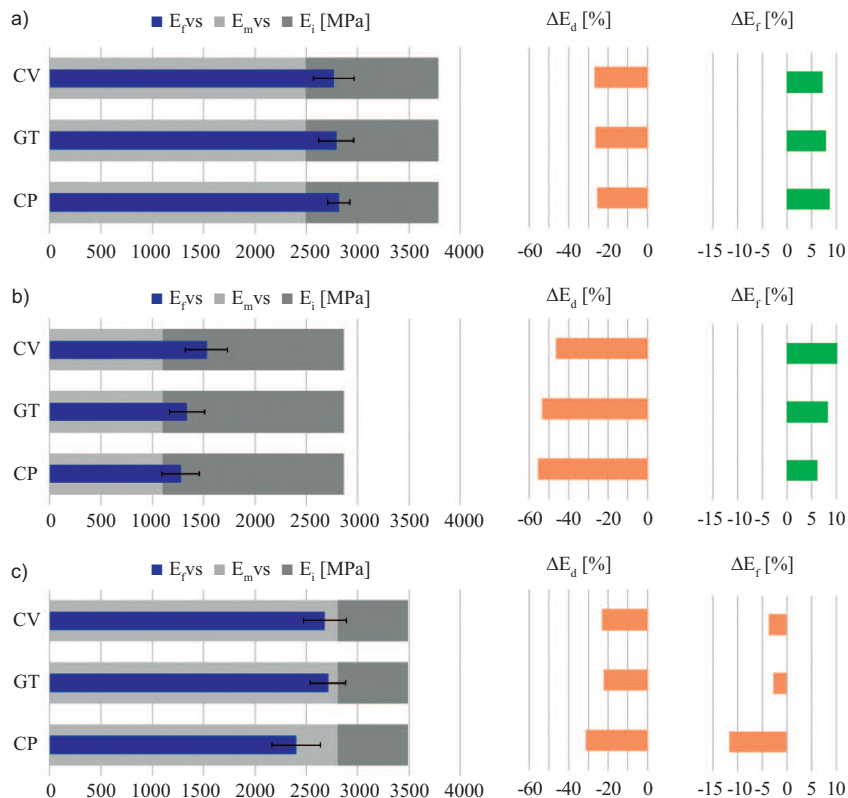
Rys. 1. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie kompozytów zbrojonych łuskami: a) owsa; b) prosa; c) ryżu po ekspozycji na działanie w środowisku mokrym grzybów (σ_f) szczepu *Coriolus versicolor* (CV), *Gloeophyllum trabeum* (GT) oraz *Coniophora puteana* (CP), na tle wytrzymałości na zginanie uzyskanej po działaniu środowiska mokrego (σ_m) oraz w stanie wyjściowym (σ_i). Przedstawiono także wielkość zmian wywołanych ekspozycją na działanie grzybów w środowisku mokrym ($\Delta\sigma_d$) oraz samych grzybów, po uwzględnieniu poprawki w tytule wpływu tego środowiska ($\Delta\sigma_f$). Słupki błędów obrazują odchylenie standardowe ($n = 10$)

Fig. 1. Bending strength test results of a) oats; b) millet; c) rice husks reinforced composite, after exposure to the fungi in wet conditions (σ_f): *Coriolus versicolor* (CV), *Gloeophyllum trabeum* (GT) and *Coniophoreana* (CP) against the results in wet conditions (σ_m) and in the initial state (σ_i). Changes caused by fungi and wet conditions ($\Delta\sigma_d$) and by the fungi after considering the wet conditions correction ($\Delta\sigma_f$) have been also presented. Error bars show standard deviation ($n = 10$)

bu z łuskami ryżu, to kompozyt z łuskami prosa uzyskał wyraźnie gorsze parametry. Może mieć na to wpływ kształt i stopień zwilżenia napelnacza [4]. Jak zaobserwowano w analizie SEM, cząstki owsa miały podłużny kształt (fotografia 4a), korzystny w kontekście właściwości mechanicznych [22]. Natomiast kształt kraterów w osnowie kompozytu z prosem wskazuje, że były one mniej smukłe (fotografia 4b).

Badane kompozyty wykazały zróżnicowaną podatność na działanie środowiska mokrego. Po 14 dniach wymywania w wodzie i 4 miesiącach ekspozycji na czystej pożywce w temperaturze $22 \pm 1^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej $70 \pm 5\%$ odnotowano spadek wytrzymałości na zginanie kompozytu z łuskami owsa, prosa i ryżu odpowiednio do 40; 22 i 39 MPa (rysunek 1), a modułu sprężystości do 2490; 1100 i 2810 MPa (rysunek 2). Tak istotne spadki mogą być pochodną odślonienia, w zastosowanym procesie szczotkowania, hydrofilowych włókien lignocelulozowych, co sprzyja ich pęcznieniu i powoduje osłabienie adhezji na granicy faz [1, 22]. Wpływ środowiska mokrego szczególnie wyraźnie zaznaczył się w przypadku kompozytu z łuskami prosa, gdzie odnotowano spadek wytrzymałości o 30%, a modułu sprężystości aż o 60%. Wskazuje to na większą podatność łusek prosa na działanie wody niż łusek owsa i ryżu [2], co koresponduje z wynikami badań absorpcji wody kompozytów, wynoszącej 2% w przypadku wyrobu z łuskami prosa, a z łuskami owsa i ryżu odpowiednio 0,5% i 1% [32].

Analiza wyników badań uzyskanych po 14 dniach wymywania w wodzie i 4 miesiącach ekspozycji na działanie grzybów w temperaturze $22 \pm 1^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej $70 \pm 5\%$ wskazuje, że wprowadzenie mikroorganizmów nie pogorszyło lub tylko nieznacznie zmniejszyło wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości w porównaniu z odnotowanymi po ekspozycji w środowisku mokrym. Podobne zachowanie obserwowano w innych pracach [28]. Zmniejszenie wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości, wyrażone odpowiednio jako $\Delta\sigma_f$ i ΔE_p , obliczone wg (3), z uwzględnieniem poprawki na środowisko mokre zgodnie z [27], nie przekroczyło 5%. Wy-



Rys. 2. Wyniki badań modułu sprężystości przy zginaniu kompozytów zbrojonych łuskami: a) owsa; b) prosa; c) ryżu po ekspozycji na działanie w środowisku mokrym grzybów (E_f): *Coriolus versicolor* (CV), *Gloeophyllum trabeum* (GT) oraz *Coniophora puteana* (CP), na tle wyników po działaniu środowiska mokrego (E_m) oraz w stanie wyjściowym (E_i). Przedstawiono także wielkość zmian wywołanych ekspozycją na działanie grzybów środowiska mokrego (ΔE_d) oraz grzybów, po uwzględnieniu poprawki z tytułu wpływu tego środowiska (ΔE_f). Słupki błędów obrazują odchylenie standardowe ($n = 10$)

Fig. 2. Modulus of elasticity test results of: a) oats; b) millet; c) rice husks reinforced composite, after exposure to the fungi in wet conditions (E_f): *Coriolus versicolor* (CV), *Gloeophyllum trabeum* (GT) and *Coniophoreana* (CP) against the results in wet conditions (E_m) and in the initial state (E_i). Changes caused by fungi and wet conditions (ΔE_d) and by the fungi after considering the wet conditions correction (ΔE_f) have been also presented. Error bars show standard deviation ($n = 10$)

jątek stanowi ΔE_f kompozytu z łuskami ryżu, gdzie odnotowano 12%. Ekspozycja na działanie *Coriolus versicolor* skutkowała zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości jedynie w przypadku kompozytu z łuskami owsa. Po działaniu *Gloeophyllum trabeum* zaobserwowano spadek wytrzymałości na zginanie w odniesieniu do kompozytu z łuskami prosa i modułu sprężystości kompozytu z łuskami ryżu. Natomiast po ekspozycji na działanie *Coniophora puteana* nastąpił spadek wytrzymałości na zginanie kompozytu z łuskami prosa i ryżu oraz modułu sprężystości kompozytu z łuskami ryżu.

Należy podkreślić, że zmniejszenie wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości, odnotowane po ekspozycji na działanie grzybów w środowisku mo-

krym, wyrażone odpowiednio jako $\Delta\sigma_d$ i ΔE_d oraz obliczone wg (2) bez uwzględnienia poprawki na środowisko mokre, było znacznie wyższe. Uzyskano $\Delta\sigma_d$ od 7% do 10% w przypadku kompozytu z łuskami owsa, od 9% do 16% z łuskami ryżu oraz od 24% do 36% z zawartością łusek prosa. Natomiast wartość ΔE_d kompozytu z łuskami owsa wynosiła 26%, z łuskami ryżu od 22% do 31%, a prosa od 47% do 55%. Wyniki te są zbliżone do uzyskiwanych w przypadku innych NFPC [12, 19, 21]. Największe wartości $\Delta\sigma_d$ i ΔE_d odnotowano po ekspozycji na działanie *Coniophora puteana*, podobnie jak w [28], z wyjątkiem kompozytu z łuskami owsa. Koresponduje to z wynikami obserwacji stopnia rozwinięcia grzybnii (fotografie 1 – 3).

Wnioski

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że badane profile z kompozytu PVC z napełniaczem z pulweryzowanych łusek owsa cechowała odporność na działanie grzybów domowych porównywalna do odporności referencyjnego, standardowego kompozytu PVC z łuskami ryżu. W przypadku obu rozwiązań odnotowano podobny stopień wzrostu *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* i *Coriolus versicolor*. Morfologię powierzchni tych kompozytów, ocenioną po działaniu *Coniophora puteana*, który wykazał największy stopień rozwinienia grzybni, można również uznać za zbliżoną. Poddanie profili działaniu środowiska mokrego skutkowało zmniejszeniem wytrzymałości na zginanie kompozytu z łuskami owsa o 9%, a z łuskami ryżu o 12%. Moduł sprężystości przy zginaniu zmniejszył się natomiast odpowiednio o 34% i 20%. Wprowadzenie grzybów domowych nie powodowało dalszego, istotnego pogorszenia rozpatrywanych właściwości mechanicznych. Wskutek działania mikroorganizmów w środowisku mokrym zmniejszenie wytrzymałości na zginanie kompozytu z łuskami owsa wyniosło do 10%, a modułu sprężystości do 26%, natomiast w przypadku kompozytu z łuskami ryżu odpowiednio do 16 i 31%.

Profile z napełniaczem z łusek prosa wykazały większą podatność na działanie grzybów domowych niż zawierające łuski owsa i ryżu, m.in. znacznie większe rozwinienie grzybni, szczególnie *Coniophora puteana* i *Coriolus versicolor*. Analiza morfologii powierzchni po działaniu *Coniophora puteana* uwidoczniła puste przestrzenie w matrycy, w miejscach po zdegradowanym napełniaczu. Po działaniu grzybów w środowisku mokrym odnotowano zmniejszenie wytrzymałości na zginanie do 36%, a modułu sprężystości do 55%. Należy zaznaczyć, że kluczowy wpływ na takie wyniki miało działanie środowiska mokrego. Wprowadzenie grzybów nieznacznie zmieniło analizowane właściwości mechaniczne.

Planowana jest kontynuacja prac nad podatnością kompozytów z łuskami owsa i prosa na działanie grzybów domowych, z uwzględnieniem dłuższego okresu ekspozycji niż zastosowany w pracy.

Literatura

- [1] Gurunathan T, Mohanty S, Nayak SK. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 2015. doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007.
- [2] Maraveas C. Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes. *Materials.* 2020. doi.org/10.3390/ma13020262.
- [3] Azman MA, Asyraf MRM, Khalina A, Petrū M, Ruzaidi CM, Sapuan SM, Wan Nik WB, Ishak MR, Ilyas RA, Suriani MJ. Natural Fiber Reinforced Composite Material for Product Design: A Short Review. *Polymers.* 2021. doi.org/10.3390/polym13121917.
- [4] Väisänen T, Das O, Tomppo LA. Review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. *J. Clean. Prod.* 2017. DOI.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.132.
- [5] Czarnecki L, Van Gemert D. Innovation in construction materials engineering versus sustainable development. *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* 2017; 65: 765 – 771.
- [6] Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council.
- [7] Schirp A, Wolcott MP. Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites. *Wood Fiber Sci.* 2005; 37: 643 – 652.
- [8] Morris PI, Cooper P. Recycled plastic/wood composite lumber attacked by fungi. *For. Prod. J.* 1998; 48: 86 – 88.
- [9] Kirk PM, Cannon PF, Minter DW, Stalpers JA. *Dictionary of the Fungi* (10th edn). Wallingford, UK, 2008.
- [10] Gautam R, Bassi AS, Yanful EK. A review of biodegradation of synthetic plastic and foams. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2007. https://doi.org/10.1007/s12010-007-9212-6.
- [11] Leja K, Lewandowicz G. Polymer biodegradation and biodegradable polymers – A review. *Pol. J. Environ. Stud.* 2010; 19: 255 – 266.
- [12] Yap SY, Sreekantan S, Hassan M, Sudesh K, Ong MT. Characterization and Biodegradability of Rice Husk-Filled Polymer Composites. *Polymers* 2021. doi.org/10.3390/polym13010104.
- [13] Rajak DK, Pagar DD, Menezes PL, Linul E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers.* 201. doi.org/10.3390/polym11101667.
- [14] Fabyi JS, McDonald AG, Morrell JJ, Freitag C. Effects of wood species on durability and chemical changes of fungal decayed wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2011. doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.009.
- [15] Catto AL, Rosseto ES, Reck MA, Rossini K, da Silveira RMB, Santana RMC. Growth of white rot fungi in composites produced from urban plastic waste and wood. In *Macromolecular Symposia* 2014. https://doi.org/10.1002/masy.201300216.
- [16] Camarero S, Martínez MJ, Martínez AT. Understanding lignin biodegradation for the improved utilization of plant biomass in modern biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* 2014. https://doi.org/10.1002/bbb.1467.
- [17] Catto AL, Montagna LS, Almeida SH, Silveira RM, Santana RM. Wood plastic composites weathering: Effects of compatibilization on biodegradation in soil and fungal decay. *International Biodegradation and Biodegradation* 2016. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.12.026.
- [18] Mankowski M, Morrell JJ. Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following exposure in a soil block test. *Wood and Fiber Science.* 2000. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/articles/fn106z43g.
- [19] Naumann A, Seefeldt H, Stephan I, Braun U, Noll M. Material resistance of flame retarded wood-plastic composites against fire and fungal decay. *Polym. Degrad. Stab.* 2012. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.03.031
- [20] Ashori A, Behzad HM, Tarmian A. Effects of chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites. *Composites.* 2013. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.11.022
- [21] Friedrich D, Luible A. Standard-compliant development of a design value for wood-plastic composite cladding: An application-oriented perspective. *Case Stud. Struct. Eng.* 2016, 5, 13–17. doi.org/10.1016/j.csse.2016.01.001.
- [22] Vercher J, Fombuena V, Diaz A, Soriano M. Influence of fibre and matrix characteristics on properties and durability of wood-plastic composites in outdoor applications. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2020, 33, 477 – 500. Doi.org/10.1177/0892705718807956.
- [23] Pratheep V, Priyanka E, Hare Prasad P. Characterization and Analysis of Natural Fibre-Rice Husk with Wood Plastic Composites. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 561, 012066.
- [24] EN 84. Wood Preservatives. Accelerated Ageing of Treated Wood Prior to Biological Testing. Leaching Procedure; European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 1997.
- [25] ENV 12038. Durability of Wood and Wood-Based Products. Wood-Based Panels. Method of Test for Determining the Resistance against Wood-Destroying Basidiomycetes; European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2002.
- [26] EN ISO 178. Plastics. Determination of Flexural Properties; European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2019.
- [27] EN 15534-1; Composites Made from Cellulose-Based Materials and Thermoplastics (Usually Called Wood-Polymer Composites (WPC) or Natural Fibre Composites (NFC)). Part 1: Test Methods for Characterisation of Compounds and Products. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2014.
- [28] Wiejak A, Francke B. Testing and Assessing Method for the Resistance of Wood-Plastic Composites to the Action of Destroying Fungi. *Materials.* 2021. doi.org/10.3390/ma14030697.
- [29] Sudoł E, Kozikowska E, Chońska E. The Utility of Recycled Rice Husk-Reinforced PVCComposite Profiles for Façade Cladding. *Materials.* 2022. doi.org/10.3390/ma15103418.
- [30] Ibach R, Gnatowski M, Sun G, Glaeser J, Leung M, Haight J. Laboratory and environmental decay of wood – plastic composite boards: Flexural properties. *Wood Mater. Sci. Eng.* 2018; 13: 81 – 96.
- [31] Prasad A, Rao K. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo. *Mater. Des.* 2011. doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.015.
- [32] Wasiak M. Wpływ czynników środowiskowych na użyteczność budowlaną wyrobów z kompozytów włókno-polimerowych (NFPCs), Instytut Techniki Budowlanej, Sprawozdanie roczne nr NZM-058/2021 zad. 1 (opracowanie niepublikowane).

Przyjęto do druku: 12.08.2022 r.