

KAMILA SAŁASIŃSKA^{*)}, JOANNA RYSZKOWSKA

Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Materiałowej

ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

Stabilność wymiarowa, właściwości fizyczne, mechaniczne i cieplne kompozytów polietylenu dużej gęstości z łupinami orzecha ziemnego

Streszczenie — Z odpadowej folii polietylenowej PE-HD i drobno zmielonych łupin orzecha ziemnego wytworzono trzy kompozyty o różnym udziale napełniacza (6, 17 lub 32 % mas.). Proces przetwórczy prowadzono bez użycia środków pomocniczych, za pomocą urządzeń powszechnie stosowanych w przetwórstwie polimerów. Otrzymane materiały charakteryzują się małą gęstością, akceptowalnie małą zdolnością do absorbowania wilgoci i dobrymi właściwościami mechanicznymi, a po okresie użytkowania mogą stanowić cenne paliwo.

Słowa kluczowe: kompozyty polimer–napełniacz naturalny, odpady opakowaniowe, łupiny orzecha ziemnego, recykling.

DIMENSIONAL STABILITY, PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE WITH PEANUT HULLS COMPOSITES

Summary — Three composites with different filler content (6, 17 or 32 wt. %) were prepared from waste PE-HD polyethylene film and finely-ground peanut hulls. The processing was carried out without the use of additives, using equipment commonly used in polymer processing. The obtained materials are characterized by a low density, acceptably low moisture absorption capacity and good mechanical properties; also, after the life time, they can serve as a valuable fuel.

Keywords: polymer-natural fibre composites, packaging waste, peanut hulls, recycling.

WPROWADZENIE

Wzrost liczebności populacji ludzkiej i konsumpcyjny charakter życia współczesnego człowieka przyczyniły się do zwiększenia zapotrzebowania na wyroby drewniane. Rosnącemu popytowi nie zawsze niestety towarzyszy dostępność surowca, w istotnym stopniu wpływająca na cenę produktu, dlatego też towary wykonane, np. z litego drewna coraz częściej są postrzegane jako produkty ekskluzywne. Od kilkudziesięciu lat są podejmowane działania mające na celu zastąpienie drewna materiałem o podobnych właściwościach i wyglądzie. Dość powszechnym substytutem tego deficytowego materiału są różnego rodzaju płyty drewnopochodne, wykonane z odpadów drzewnych, a w ostatnich latach również kompozyty na bazie polimerów termoplastycznych i biomasy drzewnej (WPC — *Wood Polymer Composites*). W 2010 roku światowa produkcja WPC wyniosła 1,5 mln ton (Ameryka Północna ok. 1 mln ton, Chiny 0,2 mln ton, Europa 0,17 mln ton, Japonia 0,1 mln ton) i według prognoz, w 2015 roku ma wzrosnąć do 5 mln ton [1]. Pomimo wprowadzania na rynek nowych grup wyrobów częściowo zastępujących drewno, nadal pozostaje ono stosun-

kowo drogim surowcem, a mająca miejsce przed kilku laty eskalacja cen drewna, warunkowana zmianami politycznymi i gospodarczymi u głównych eksporterów (np. Rosji), objęła swym zasięgiem również odpady drzewne. Skutkiem tego są próby zastępowania biomasy drzewnej włóknami lignocelulozowymi, pozyskiwanymi z niejadalnych części roślin, co stanowi interesującą alternatywę, zwłaszcza w przypadku krajów o małym zalesieniu. Przykłady wykorzystania włókien roślinnych jako napełniaczy termoplastów w kompozytach NFC (*Natural Fibre Composites*) opisano w literaturze [2–4]. Kompozyty polimer–napełniacz naturalny, poza pożądaną estetyką i akceptowalną ceną, charakteryzują się wyjątkowym połączeniem właściwości, takich jak: mała masa wyrobu i znaczna odporność na oddziaływanie czynników środowiskowych (wilgoć, promieniowanie UV) — właściwych dla polimerowej osnowy oraz stosunkowo duża twardość i sztywność — uzyskanych dzięki napełniaczowi roślinnemu.

Wyzwaniem dla naukowców i producentów wyrobów wykonanych z NFC jest trudna do osiągnięcia powtarzalność cech materiału, ze względu na niejednorodność włókien i związane z tym różnice właściwości surowca warunkowane, m.in.: zawartością wody, stopniem zesterzenia, odmianą i miejscem występowania rośliny, a

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: ksalasinska@meil.pw.edu.pl

także sposobem pozyskiwania włókien. Nasiąkanie wykorzystanych w NFC włókien może powodować pęcznienie kompozytów oraz przyczynić się do miejscowych zmian jego właściwości. W przypadku produktów z NFC, poddawanych nieustannemu działaniu wody, jest konieczne zastosowanie dodatkowych środków chroniących je przed niszczącym działaniem grzybów, podnosi to jednak ich cenę i ogranicza prowadzony po okresie użytkowania proces unieszkodliwiania [5–7].

Jednym ze źródeł pozyskiwania włókien roślinnych są odpady z przemysłu rolno-spożywczego, z których otrzymuje się niedrogi i w pełni wartościowy surowiec. Przykładem tego rodzaju odpadu są, stanowiące na ogół 25 % masy owocu, łupiny orzechów ziemnych (nazywanych też orzechami arachidowymi lub fistaszkami), wykorzystywane w przemyśle spożywczym i cukierniczym, farmaceutycznym oraz kosmetycznym [8]. Na podstawie pomiarów własnych ustalono, iż masa łupiny fistaszki stanowi zazwyczaj 25 % masy całego owocu. Większość łupin jest kompostowana, a proces degradacji trwa ok. 2 lat [8]. Obecnie w wielu krajach łupiny orzecha ziemnego są zbierane i rozdrabniane. Są to procesy mniej kosztowne niż w przypadku drewna, dlatego też materiały te są rozważane jako napełniacze polimerów [8, 9].

Celem pracy było wytworzenie tanich kompozytów o zmniejszonej zdolności do pochłaniania wody oraz właściwościach użytkowych, umożliwiających ich zastosowanie w przemyśle meblarskim, budowlanym oraz na elementy architektury ogrodowej. Otrzymano kompozyty na osnowie polietylenu dużej gęstości (PE-HD), pozyskanego z selektywnej zbiórki odpadów opakowaniowych, w charakterze wzmocnienia użyto drobno zmielonych łupin orzecha ziemnego.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

– Biała folia PE-HD o wysokiej przezroczystości, zakupiona od polskiego producenta toreb polimerowych



Rys. 1. Zdjęcie mączki z łupin orzecha ziemnego
Fig. 1. Picture of the flour from peanut hulls

– firmy MARINK Pack System s.j. – stanowiąca substytut odpadowych materiałów opakowaniowych. Wyznaczony masowy wskaźnik szybkości płynięcia $MFR_{190\text{ }^{\circ}\text{C}/2,16\text{ kg}}$ wynosił 0,88 g/10 min.

– Łupiny orzecha ziemnego (*Arachis hypogaea*) zakupione latem 2009 r. w sieci Auchan. Przygotowanie napełniacza obejmowało rozłupanie orzecha, usunięcie owocu oraz zmielenie łupin do postaci mączki (rys. 1) za pomocą młynka KSW3306 firmy Clatronic.

Wytwarzanie kompozytów i przygotowanie próbek do badań

Wstępne mieszanie substratów przeprowadzono przy użyciu mieszarki Farrel Bridge firmy David Bridge and Co. Całe torby foliowe i rozdrobnione łupiny wprowadzono do komory mieszarki. Panująca w urządzeniu temperatura, maksymalnie ok. 140 °C, była generowana jedynie przez siły tarcia występujące w komorze mieszalnika. Uzyskaną mieszaninę w celu jej ujednorodnienia walcowano na walcach typu LWII firmy Veb Erste Maschinenfabrik, w temp. 120 °C. Powstałe mieszaniny kompozytowe w postaci plastrów rozdrabniano przy użyciu granuladora Rapid 150-21 firmy Rapid Granulier-Systeme GmbH & Co. KG, a z otrzymanego przemiatu za pomocą wtryskarki BOY 22A firmy DR BOY wytwarzano próbki w kształcie wiosełek typu 1A zgodnie z normą EN ISO 527-2 (rys. 2). Proces wtryskiwania poszczególnych kompozytów prowadzono w temperaturze stref



Rys. 2. Próbki wytworzonych kompozytów PE-HD zawierających: a) 6 % mas., b) 17 % mas., c) 32 % mas. mączki z łupin orzecha ziemnego

Fig. 2. Picture of the samples of composite containing: a) 6 wt. %, b) 17 wt. %, c) 32 wt.% of peanut hulls flour

cyindra, odpowiednio, 170/170/175/170/165, 160/165/170/165/155 i 165/170/175/170/160 °C (ciśnienie wtrysku/docisku wynosiło, odpowiednio, 80/80, 72,2/85,5, 85/95 MPa). Sporządzono trzy serie próbek kompozytów o zawartości 20 %, 40 % lub 60 % obj. napełniacza oraz próbki z materiału odniesienia, tj. z polimerowej osnowy. Oznaczenie próbek i skład przygotowanych mieszanin kompozytowych zestawiono w tabeli 1.

T a b e l a 1. Skład wytworzonych mieszanin kompozytowych i ich wybrane właściwości^{a)}

T a b l e 1. Composition and selected properties of the prepared composites

Oznaczenia próbek	Zawartość napełniacza % mas.	MFR g/10 min	Gęstość g/cm ³
PE-HD	—	0,88 (0,2)	0,94 (0,000)
OZ6	6	0,84 (0,2)	0,96 (0,001)
OZ17	17	0,55 (0,2)	0,99 (0,001)
OZ32	32	0,46 (0,2)	1,03 (0,01)

^{a)} W nawiasach umieszczono wartości odchylenia standardowego.

Metody badań

— Rozkład wielkości ziaren napełniacza określano zgodnie z normą EN 933-10 (2009) w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów, stosując przesiewanie w strumieniu powietrza. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem zestawu 10 sit o wymiarach oczek w zakresie 2–0,032 mm.

— Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (*MFR*) wyznaczano za pomocą plastometru obciążnikowego MP 600 firmy Tinius Olsen, wg procedury A opisanej w normie PN-EN ISO 1133:2002. Przed załadowaniem kompozytów do cylindra plastometru, próbki w kształcie wiósełek rozdrabniano do postaci cząstek o średnicy ≤5 mm. Pomiar prowadzono przy obciążeniu 2,16 kg, w temp. 190 °C.

— Gęstość kompozytów ustalano wykorzystując wagę RADWAG 180/W, wyposażoną w zestaw do oznaczania gęstości ciał stałych. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 1183-1:2006.

— Obrazy mikrostruktury przekrojów poprzecznych, wyciętych z przewężeń próbek wiósełkowych i napylnych złotem z palladem, wykonano przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego TM 3000 firmy Hitachi. Podczas obserwacji, prowadzonych w warunkach napięcia przyspieszającego 15 kV, zastosowano powiększenie stukrotne.

— Właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu badano za pomocą urządzenia Zwick Z005, wg norm EN ISO 527-1:1998 i EN ISO 527-2:1998. Pomiary wykonywano wykorzystując ekstensometr, założona długość odcinka pomiarowego wynosiła 50 mm, prędkość rozciągania 10 mm/min.

— Spęcznianie na długości, szerokości i grubości oceniano na podstawie różnicy wymiarów próbek, absorpcję po moczeniu w wodzie — na podstawie zmiany masy kompozytów umieszczonych w wodzie o temperaturze pokojowej w zadanym czasie. Zmiany wymiarów oraz masy oceniano po upływie 1, 2, 4, 7, 17 i 28 dni. Badanie wykonano zgodnie z metodyką opisaną w EN 317:1999.

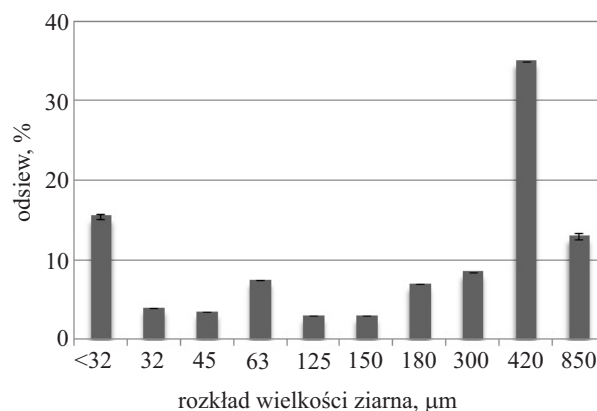
— Analizę termogravimetryczną wykonano za pomocą urządzenia TGA Q500 firmy TA-Instruments. Przeprowadzono po dwie analizy próbek w atmosferze tlenu i azotu, a podczas badań zastosowano przepływ gazów na poziomie 30 cm³/min w komorze i 70 cm³/min w piecu. Probki ogrzewano do temp. 600 °C, z szybkością grzania równą 10 °C/min.

— Ciepło spalania wytworzonych kompozytów oznaczano metodą tyglową w Szkole Głównej Służby Pożarnej w Warszawie. W przypadku każdego rodzaju materiału wykonano po dwie próby badawcze. W tym celu, w tyglach kwarcowych umieszczano po 1 g kompozytu rozdrobionego uprzednio do postaci przemiału o średnicy ziaren w zakresie 1–5 mm. Badanie przy użyciu bomby kalorymetrycznej polegało na całkowitym spalaniu próbki w atmosferze tlenu pod ciśnieniem i pomiarze przyrostu temperatury wody w naczyniu kalorymetrycznym. Metodykę badania opracowano na podstawie EN ISO 1716:2004.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Rozkład wymiarów ziaren użytego napełniacza roślinnego stanowi istotny parametr wpływający na właściwości mechaniczne otrzymywanych kompozytów, determinując wielkość powierzchni styku komponentów [4]. Na podstawie rozkładu wielkości ziarna zmielonych łupin orzecha ziemnego (rys. 3) obliczono, że ponad 63 % cząstek zastosowanego napełniacza ma wymiary mieszczące się w przedziale 180–850 μm.

Wskaźnik *MFR* tworzywa zależy, m.in. od temperatury materiału i ciśnienia uzyskanego podczas przetwor-



Rys. 3. Rozkład wielkości ziarna mączki wytworzonej z łupin orzecha ziemnego

Fig. 3. Particle size distribution of peanut hull flour

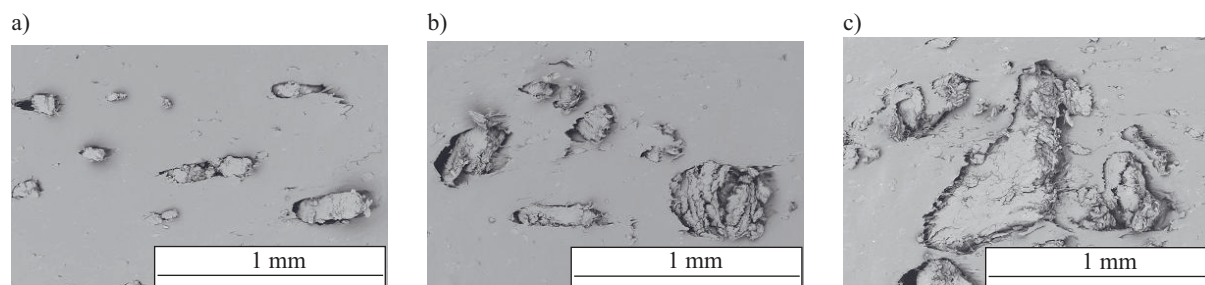
stwa, wielkości i rozkładu ciężaru cząsteczkowego polimeru oraz obecności dodatków modyfikujących [10]. Udział napełniacza utrudnia płynięcie materiału, efektem tego jest zmniejszenie wartości MFR kompozytów w porównaniu z MFR polimeru (tabela 1). Wzrost zawartości w kompozycie mączki z łupin orzecha ziemnego powoduje sukcesywny spadek wartości masowego wskaźnika szybkości płynięcia.

Wprowadzenie napełniacza w postaci mączki do polietylenowej osnowy wpłynęło na niewielki wzrost gęstości badanych kompozytów NFC w porównaniu z gęstością PE-HD (w zakresie 2–10 %). Obliczono teoretyczną gęstość wytworzonych kompozytów, zakładając że gęstość łupin wynosi $1,45 \text{ g/cm}^3$ (tabela 1).

Gęstość kompozytów warunkowana jest również przez porowatość materiału, wynikającą z obecności porów występujących w napełniaczu, pustych przestrzeni między komponentami, mikropęknięć osnowy, czy pęcherzy powstającymi podczas wytwarzania NFC w wyniku parowania. Obrazy mikrostruktury oraz różnice między teoretyczną a doświadczalną gęstością kompozytów (rys. 4) potwierdzają występowanie porów, a ich

ciągnięcie (δ_M) o niespełna 9 % w porównaniu z wartością uzyskaną w przypadku PE-HD (tabela 2). Dobra dyspersja pozwala na właściwe przenoszenie naprężeń z napełniacza na osnowę, dzięki temu użyta mączka pełni w wytworzonych NFC rolę wzmocnienia. Podobne zależności, opisujące wzrost wytrzymałości na rozciąganie kompozytów z udziałem napełniaczy naturalnych, na poziomie do 20 % mas., przedstawiono w [3, 12]. Zawartość w kompozycie 32 % mas. napełniacza powoduje spadek wytrzymałości o 4 % w porównaniu z wytrzymałością PE-HD. Przyczyną takiego zjawiska prawdopodobnie jest, jak już wspomniano, niepełne zwilżenie cząstek napełniacza przez cząstki polimeru, widoczne na obrazach SEM w postaci pustych przestrzeni w miejscu styku komponentów.

Użyty napełniacz w postaci mączki z łupin orzecha ziemnego, w istotnym stopniu zwiększa sztywność (moduł Younga, E_t) kompozytów, która rośnie wraz ze wzrostem zawartości napełniacza (tabela 2). W przypadku kompozytów z największym udziałem mączki z łupin wzrost modułu Younga w porównaniu z E_t czystego PE-HD wyniósł 111 %.



Rys. 4. Zdjęcia SEM kompozytów: a) OZ6, b) OZ17, c) OZ32 (oznaczenia por. tabela 1)

Fig. 4. SEM images of composites: a) OZ6, b) OZ17, c) OZ32 (designations as in Table 1)

liczba rośnie wraz ze wzrostem udziału mączki z łupin. Wzrost ilości porów sprzyja penetracji wody do wnętrza próbek kompozytów. Na zdjęciach można zaobserwować występowanie cząstek o zróżnicowanej wielkości oraz aglomeratów tworzących się nawet w warunkach małej zawartości napełniacza.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne wytworzonych kompozytów^{*)}

Table 2. Mechanical properties of the prepared composites

Oznaczenia próbek	δ_M , MPa	E_t , GPa
PE-HD	21,75 (0,25)	0,93 (0,08)
OZ6	23,33 (0,49)	1,26 (0,08)
OZ17	23,65 (0,44)	1,32 (0,25)
OZ32	20,84 (0,33)	1,96 (0,08)

^{*)} W nawiasach umieszczono wartości odchylenia standardowego.

Wprowadzenie do osnowy PE-HD 17 % mas. mączki z łupin orzecha powoduje wzrost wytrzymałości na roz-

ciągnięcia. Wartość spęcznienia pozwala ocenić zdolność materiału, poddanego ciągłemu działaniu cieczy, do pobierania wody. Analiza wyników zestawionych w tabeli 3 dowodzi, iż na ilość zaabsorbowanej przez kompozyt wody zasadniczy wpływ wywiera zawartość łupin orzecha oraz czas ekspozycji.

Największy przyrost masy, równy 1,4 %, odnotowano w przypadku próbki OZ32, po 28 dniach moczenia w wodzie, następstwem tego była, skorelowana z ilością pochłoniętej wody, zmiana wymiarów próbki. Nieznaczące zmiany odnotowano również w odniesieniu do próbki wykonanej z PE-HD. Podobne obserwacje dotyczące recyklatu PE-HD opisano w pracy [11], gdzie badano kompozyty z udziałem napełniacza drzewnego. Porównując chłonność wody wytworzonych kompozytów z danymi literaturowymi, stwierdzono, iż uzyskane wartości są zdecydowanie mniejsze. Na przykład, w pracy Araujo i wspóln. [3] podano, iż kompozyty polietylenowe napełnione 20 % mas. włókien roślinnych, po 24 h ekspozycji chłoną 0,3 % wody, tyle samo pochłonął po 24 h ekspozycji

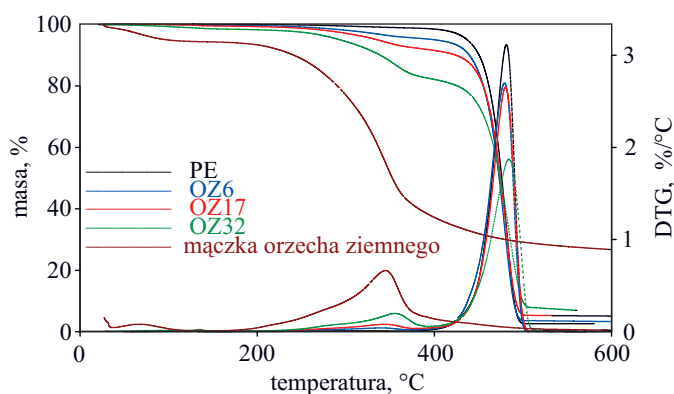
T a b e l a 3. Wyniki badań spęczniania i absorpcji wody wytworzonych kompozytów po 1 i 28 dniach moczenia^{*)}

T a b l e 3. Results of swelling and water absorption tests on the prepared composites after 1 and 28 days of immersion

Próbki	Absorpcja wody, %		Spęcznianie na długość, %		Spęcznianie na szerokość, %		Spęcznianie na grubość, %	
	1 dzień	28 dni	1 dzień	28 dni	1 dzień	28 dni	1 dzień	28 dni
PE-HD	0,0 (0,0)	0,0 (0,0)	0,0 (0,1)	0,2 (0,1)	0,0 (0,1)	0,4 (0,2)	0,1 (0,1)	1,4 (0,1)
OZ6	0,0 (0,0)	0,3 (0,0)	0,0 (0,0)	0,4 (0,1)	0,1 (0,0)	0,4 (0,1)	0,2 (0,2)	1,7 (0,0)
OZ17	0,1 (0,0)	0,4 (0,0)	0,0 (0,0)	0,4 (0,0)	0,0 (0,0)	0,5 (0,1)	0,2 (0,1)	2,5 (0,0)
OZ32	0,3 (0,0)	1,4 (0,1)	0,1 (0,1)	0,5 (0,1)	0,1 (0,1)	0,6 (0,1)	0,3 (0,3)	3,3 (0,3)

*) W nawiasach umieszczono wartości odchylenia standardowego.

zycji na wodę, kompozyt z PE-HD zawierający 32 % mas. mączki z łupin orzecha ziemnego. Autorzy [3] zaobserwowali, że po zastosowaniu środka zmniejszającego chłonność następuje ograniczenie absorpcji wody do poziomu 0,2 %, mimo to uzyskany wynik jest gorszy w porównaniu do kompozytu OZ17. Adhikary i współpr. [11] wykazali, że absorpcja wody przez próbkę WPC, wykonaną z recyklatu PE-HD i 30 % mas. mączki drzewnej, po 24 h równa była 0,98 %, podczas gdy absorpcja wody przez kompozyt OZ32 po 2 tygodniach moczenia wynosiła zaledwie 0,88 %.

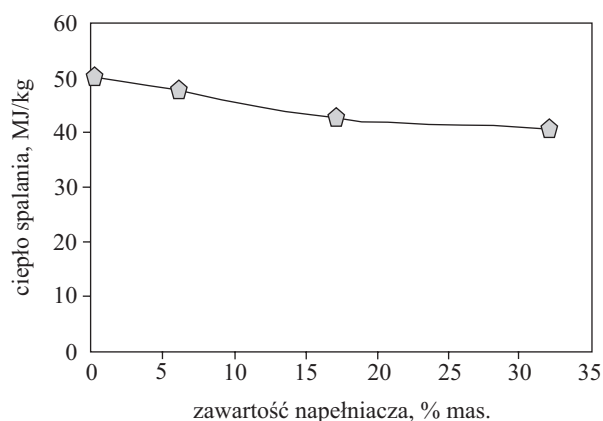


Rys. 5. Krzywe termogravimetryczne PE-HD, mączki orzecha ziemnego oraz ich kompozytów

Fig. 5. Thermogravimetric curves of PE-HD, flour of peanut hull and their composites

Przeprowadzono analizę termogravimetryczną próbek czystego PE-HD, mączki orzecha ziemnego oraz ich kompozytów (rys. 5). Wartości temperatury warunkujące bezpieczne użytkowanie materiału, określone na podstawie 5-proc. ubytku masy mieszczą się w przedziale 291–266 °C i maleją wraz ze wzrostem udziału napełniacza w kompozycie NFC. Zawartość wilgoci w mączce orzecha ziemnego, odczytana z krzywej ubytku masy (TG), wynosi 4,4 %, zaś w przypadku kompozytów OZ6, OZ17 i OZ32, odpowiednio, ok. 0,2; 0,5 oraz 1,1 %. Zawartość części nieorganicznych i pyłu w napełniaczu wynosiła 3,3 %, a udział części organicznych stanowił aż 92,3 %. Guler i współpr. [13] podali skład chemiczny łupi-

ny orzecha ziemnego, zgodnie z którym 68,8 % stanowi holoceluloza, 42,5 % α -celuloza (26,3 % hemiceluloza), lignina zaś 28,0 %, co potwierdza przebieg krzywej pochodnej ubytku masy (DTG) mączki z łupin. Na krzywej DTG napełniacza oraz próbki OZ32 zaobserwowano występowanie 4 pików, a na krzywych pozostałych kompozytów po 3 piki. Maksimum pierwszego pik, występujące przy ok. 135 °C (w przypadku mączki z łupin przy 70 °C) jest związane ze zjawiskiem parowania wody zamkniętej w cząstkach napełniacza. Kolejny pik, zlokalizowany ok. 288 °C i obecny jedynie na krzywej napełniacza i kompozytu OZ32, jest związany z rozkładem hemicelulozy [4, 14]. W pobliżu 350 °C pojawia się pik odpowiadający rozkładowi α -celulozy [4, 15], degradacja PE-HD, widoczna na krzywych polimeru i kompozytów, występuje natomiast w temp. ok. 480 °C. W obszarze pomiędzy 190 a 500 °C zachodzi rozkład ligniny, który w przypadku wytworzonych NFC przebiega równocześnie z rozkładem pozostałych części organicznych i nie ujawnia się na wykresie w postaci wyraźnego pik. Udowodniono, iż niewielka zawartość ligniny w napełniaczu wpływa korzystnie na stabilność termiczną tego rodzaju kompozytów [16], z kolei duży udział hemicelulozy sprzyja wchłanianiu znacznych ilości wody i inicjuje biodegradację materiału [4]. Wiadomo, że zawartość ligniny w łupinach orzecha ziemnego jest mniejsza niż w łupinach innych orzechów [13], mniejsza lub zbliżona do zawartości ligniny w drewnie, w zależności od jego rodzaju [4,



Rys. 6. Ciepło spalania wytworzonych kompozytów

Fig. 6. Heat of combustion of the prepared composites

13], ale większa niż w łusce ryżu i owsa [4]. Z kolei udział hemicelulozy jest większy w łupinie orzecha ziemnego niż w łusce owsa i ryżu [4], a także łupiny orzecha laskowego [13], na ogół mniejszy niż w drewnie oraz zdecydowanie mniejszy niż w łupinie migdała [13].

Wartości ciepła spalania wytworzonych NFC są mniejsze niż wartość wyznaczona w przypadku PE-HD (rys. 6), co jest korzystne z punktu widzenia dalszej aplikacji takich kompozytów. Ciepło spalania stanowi również istotny parametr z punktu widzenia możliwości unieszkodliwiania przyszłego odpadu na drodze spalania z odzyskiem energii. Wydajność cieplna wytworzonych kompozytów PE-HD z udziałem mączki z łupin orzecha ziemnego jest zbliżona do wydajności cieplnej paliw konwencjonalnych [15].

WNIOSKI

Z folii polietylenowej i mączki z łupin orzecha ziemnego wytworzono kompozyty o pożądanym cechach użytkowych. Stwierdzono, iż zastosowanie mieszalnika i walcarki zamiast wytłaczarki jednoślismakowej, istotnie zwiększa jednorodność mieszaniny kompozytowej. Użycie PE-HD w postaci folii umożliwiło zastosowanie w ciągu technologicznym mieszalnika, w którym temperatura potrzebna do uplastycznienia osnowy i wymieszania komponentów, była generowana jedynie dzięki siłom tarcia występującym w komorze.

Wytworzone materiały charakteryzują się dobrymi właściwościami fizyko-mechanicznymi. Zastosowanie mączki łupin zwiększa sztywność badanych kompozytów, a w przypadku kompozytów o zawartości napełniacza na poziomie do kilkunastu procent zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Niewielka gęstość NFC jest warunkowana, m.in. przez porowatość materiału, obserwowaną na obrazach SEM. Właściwości cieplne kompozytów pozwalają na ich użytkowanie w temperaturze otoczenia, a dzięki ograniczonej zdolności do absorbowania wody materiały otrzymane z udziałem do 20 % mas. napełniacza nadają się również do aplikacji zewnętrznych.

Wytworzone kompozyty PE-HD/mączka z łupin orzecha ziemnego pozostają przyjazne dla środowiska

i zdrowia człowieka, a po zakończeniu użytkowania, dzięki dużej wartości opałowej mogą zostać powtórnie wykorzystane jako paliwo.

Praca była finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr: N R15 0023 06 / 2009, pt. „Kompozyty polimerowe z biomasą”.

LITERATURA

1. www.plastech.pl, 07.03.2011.
2. Kuciel S., Rydarowski H.: „Biokompozyty z surowców odnawialnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012, str. 168.
3. Araujo J. R., Mano, B., Teixeira G. M., Spinace M. A. S.: *Compos. Sci. Technol.* 2010, **70**, 1637.
4. Błędzki A. K., Abdullah A. M., Volk J.: *Composites: Part A* 2010, **41**, 480.
5. Mucha M.: „Polimery a środowisko”, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002.
6. Błędzki A. K.: „Recykling materiałów polimerowych”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
7. Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowska K., Wojciechowski S.: „Kompozyty”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
8. Nishikawa Y., Nagase N., Fukushima K.: *J. Environ. Eng.* 2009, **4**, 124.
9. Whitehouse R.: „Biodegradable polymer composites and related methods” US 2007, 0259584 A1, 2007.
10. www.cabot-corp.com/wcm/download/en-us/mb/MFI.pdf, 16 January 2011.
11. Adhikary K. B., Pang S., Staiger M. P.: *Composites Part B* 2008, **39**, 807.
12. Lei Y., Wu Q., Yao F., Xu Y.: *Composites Part A* 2007, **38**, 1664.
13. Guler C., Copur Y., Tascioglu C.: *Bioresources Technol.* 2008, **99**, 2893.
14. Manfredi L. B., Rodriguez E. S., Władysław-Przybylak M., Vazquez A.: *Polym. Degrad. Stab.* 2006, **91**, 255.
15. www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=51&art=47, 01.12.2011.
16. Alemdar A., Sain M.: *Compos. Sci. Technol.* 2008, **68**, 557.

Otrzymano 8 VII 2012 r.