

# POLIMERY

CZASOPISMO POŚWIĘCONE CHEMII, TECHNOLOGII I PRZETWÓRSTWU POLIMERÓW

## Włókna roślinne jako zamienniki włókien mineralnych w kompozytach termoplastów – wizja Forda czy Al Gore’a?

Jacek Kijęński<sup>1), \*)</sup>, Marta Kijęńska<sup>2)</sup>, Osazuwa Osawaru<sup>3)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.467](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.467)

**Streszczenie:** Artykuł stanowi wieloaspektową analizę celowości i możliwości zastępowania kompozytów tworzyw termoplastycznych z napełniaczami mineralnymi kompozytami zawierającymi włókna roślinne. Analizę przeprowadzono w odniesieniu do kompozytów polipropylenu, szeroko stosowanych i dobrze scharakteryzowanych pod względem właściwości użytkowych. Wykazano, że entuzjastyczne oczekiwania związane z możliwością wykorzystania termoplastów napełnionych włóknami roślinnymi z szeroko dostępnego odnawialnego surowca, jako tanich materiałów o atrakcyjnych właściwościach, nie są w pełni uzasadnione. Realnym rozwiązaniem jest natomiast otrzymywanie takich kompozytów do niezbyt wyrafinowanych zastosowań z odpadowych poliolefin i odnawialnego materiału włóknistego, pochodzącego z odpadów przemysłu rolnego i leśnego.

**Słowa kluczowe:** włókna roślinne, napełniacze mineralne, kompozyty, recykling.

### Plant fibers as alternatives to mineral fillers in thermoplastic composites – Ford’s vision or Al Gore’s?

**Abstract:** An extensive analysis of the possibilities and goal in the application of composites as an alternative to thermoplastic polymer composites filled with minerals has been presented. The analysis was made taking into special consideration the mechanical properties and applicability of polypropylene composites, which are widely used and well characterized. It was shown that the enthusiasm and expectations linked with the vision of the application of thermoplastics filled with plant fibers from widely available renewable sources as cheap materials with attractive properties has not been fully justified. The realistic solution would be maintaining the production of these new materials derived from waste polyolefins and renewable fiber materials from agriculture and forestry industries for low-end applications.

**Keywords:** plant fibers, mineral fillers, composites, recycling.

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Filia w Płocku, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock.

<sup>2)</sup> Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Krucza 5/11d, 00-548 Warszawa.

<sup>3)</sup> Instytut Chemii Przemysłowej im. prof. Ignacego Mościckiego, ul. Rydygiera 8, 01-793 Warszawa.

\*) Autor do korespondencji; e-mail: [jacek.kijenski@ichp.pl](mailto:jacek.kijenski@ichp.pl)

W ponad stuletniej historii rozwoju kompozytów polimerowych nastąpiło przejście od układów zawierających proste napełniacze nieorganiczne i węgiel (sadzę amorficzną lub grafit) [1] – dodawanych ze względów ekonomicznych w celu zmniejszenia udziału tworzywa polimerowego w wyrobie, a jednocześnie poprawy odporności termicznej i zwiększenia przestrzennej sztywności gotowego produktu – po układy wykazujące zupełnie nowe właściwości fizyczne i mechaniczne, w których osnowa polimerowa jest często jedynie matrycą zapewniającą efektywne wykorzystanie właściwości napełniacza w całej objętości kompozytu. W ciągu tych stu lat zdecydowanie rozszerzył się również obszar zastosowań kompozytów, od przemysłu przedmiotów powszechnego użytku do przemysłu samochodowego, a następnie lotniczego, okrętowego, elektronicznego, po aeronautykę itp. Zgodnie z oczekiwaniami *Hi-Tech*, współczesne projektowanie materiałów kompozytowych powinno prowadzić do poprawy charakterystyki właściwości mechanicznych układu, możliwie maksymalnego zmniejszenia gęstości struktur o przewidywanych właściwościach mechanicznych i poznania zachowania się tych struktur na różnych etapach życia produktów użytkowych je zawierających. Wśród materiałów, przynajmniej częściowo wykazujących polepszone właściwości, można wymienić tworzywa termoplastyczne napełnione włóknami węglowymi lub szklanymi, lub też nieorganicznymi napełniaczami o budowie warstwowej. W ciągu wielu lat wprowadzano w życie nowoczesne rodzaje kompozytów z termoplastyczną osnową, nie uwzględniając aspektów związanych z zakończeniem cyklu życia wykonanych z nich dóbr użytkowych, w tym m.in. faktu, że okres przydatności praktycznej napełniaczy zwykle przekraczał trwałość wyrobu wykonanego z kompozytu z ich udziałem.

Zarówno tworzywa termoplastyczne, jak i w większości składniki zawierających je kompozytów o najszerszych zastosowaniach praktycznych są pochodzenia petrochemicznego. Wieloletnia propaganda nieuchronnego wyczerpywania się źródeł ropy naftowej (szczyt wydobywania miał nastąpić w okresie ok. 30 lat w warunkach ciągle rosnącego zużycia; obecne opanowanie technologii wydobywania ropy, technologii łupkowania i technologii przerobu ciężkich odmian ropy pozwala znacznie ten szczyt wydobywania odsunąć w czasie), trudniejszy technologicznie i ekonomicznie w stosunku do przerobu ropy przerób gazu ziemnego do petrochemicznych chemikaliów bazowych, „brudne” aspekty chemicznego przetwarzania ostatecznego mineralnego źródła surowcowego – węgla, narastający globalny deficyt energii, wreszcie szeroko pojęte uwarunkowania ekologiczne spowodowały radykalne zmiany w sposobie myślenia o rozwoju przemysłu tworzyw polimerowych. Zastąpienie, przynajmniej częściowe, pierwotnych tworzyw polimerowych materiałami pochodzącymi z recyklingu i zmniejszenie zużycia energii na wszystkich etapach życia materiału polimerowego stało się równie

ważne, jak jego właściwości użytkowe czy łatwość przetworstwa.

Wśród czynników ekologicznych warunkujących działalność wytwórczą zgodną ze zrównoważonym rozwojem (*zagospodarowanie ograniczonych zasobów Ziemi w taki sposób, by zapewnić potrzeby przyszłych pokoleń przy zachowaniu niezmiennego stanu środowiska naturalnego*) niezwykle ważny jest efekt cieplarniany, powodujący globalne ocieplenie, którego głównego sprawcę – zgodnie z powszechnym, choć nieuzasadnionym przekonaniem – stanowi ditlenek węgla pochodzący z przemysłowych i komunalnych działań człowieka. Światowy protokół, europejskie dyrektywy i szereg aktów prawnych niższego rzędu, niezależnie od zasadności ich podstawy, obligują do istotnych ograniczeń emisji CO<sub>2</sub> w procesach produkcji przemysłowej i wytwarzania energii. Ten oczywisty hamulec efektywnego użytkowania mineralnych źródeł surowcowych (węgla, pozostałości z przerobu ropy naftowej), a także pozornie nieprzerabialnych odpadów oraz pozyskiwania przyjaznych środowisku nośników energii (wodór) ukierunkowuje produkcję chemiczną na zastosowanie odnawialnych źródeł surowcowych pochodzenia roślinnego. Wskazany, słuszny skądinąd, kierunek rozwoju ma się opierać na założeniu zerowego netto bilansu atmosferycznego obiegu węgla (założenie nieprawdziwe – bilans ten w rzeczywistości nigdy nie jest równoważony, paliwa, nawozy i środki ochrony roślin, a także procesy suszenia i obróbki produktu roślinnego stanowią całkiem istotne źródło emisji CO<sub>2</sub>). Wykorzystanie szeroko rozumianej biomasy jako źródła surowcowego wiąże się z kolejnym, bardzo ważnym aspektem ochrony środowiska – lawinowo rosnącym nagromadzeniem odpadów tworzyw polimerowych na legalnych i nielegalnych składowiskach oraz „w naturze”. Według naszej prognozy [2] w ciągu kilku lat tylko w Polsce depozyt odpadów tworzyw polimerowych przekroczy 40 mln t (przy założeniu rocznego zasilania strumieniem odpadów ok. 2 mln t – składowane w jednym miejscu pokryłoby powierzchnię 1 km<sup>2</sup> warstwą o grubości 4 m). Według danych *European Composites Industry Association* (EuCIA) [3] w 2015 roku na terenie UE całkowity roczny przyrost objętości odpadów kompozytów napełnionych włóknem szklanym sięgnie 300 tys. t. Uważa się, że tworzywa pochodzenia naturalnego, a także „zielone napełniacze”, takie jak mączka drzewna i inne włókna roślinne znacznie zwiększą biodegradowalność składowanej masy odpadów. Włókna naturalne, w porównaniu z włóknami syntetycznymi, charakteryzują się dostępnością, niskim kosztem, małą gęstością, odnawialnością, korzystnymi właściwościami mechanicznymi, dużą odpornością chemiczną. Odnawialność włókien roślinnych i recyklowalność tworzyw termoplastycznych sprawia, że otrzymane z ich udziałem kompozyty są materiałami w wysokim stopniu przyjaznymi dla środowiska.

Celem niniejszej pracy jest krytyczna analiza obecnych możliwości zastąpienia kompozytów termopla-

stycznych napełnionych włóknami mineralnymi ich odpowiednikami zawierającymi włókna roślinne. Analiza odnosi się do kompozytów polipropylenu (PP), szeroko stosowanych i najlepiej scharakteryzowanych kompozytów termoplastów napełnionych włóknami. Porównano PP napełniony włóknem szklanym i PP z włóknami konopi, wyróżniającymi się wśród włókien roślinnych korzystnymi właściwościami mechanicznymi.

## WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN ROŚLINNYCH

### Gęstość

Gęstość użytkowa, której miarą jest masa materiału, jest czynnikiem decydującym o prawie wszystkich składowych charakterystyki współczesnego materiału – kosztach, nakładach energetycznych na wszystkich etapach cyklu życia, wytwarzania i przetwórstwa, wreszcie szeroko rozumianym wpływie na środowisko. Znaczenie gęstości użytkowej doskonale oddaje opinia wygłoszona jeszcze w latach 40. przez Henry'ego Forda, legendę przemysłu samochodowego [4]: wszystko, co możemy zrobić dla samochodu, to uczynić go lżejszym. Zastąpienie włókien szklanych włóknami roślinnymi pozwala znacznie zmniejszyć masę elementów wykonanych z zawierających je kompozytów: gęstość kompozytów PP z włóknami lnu lub konopi wynosi ok. 0,90–0,96 g/cm<sup>3</sup> [5], tj. o ok. 56 % mniej niż gęstość kompozytów PP z włóknami szklanymi o zbliżonych właściwościach mechanicznych [6]. W wypadku wyrobów z kompozytów napełnionych miskantem chińskim (palety transportowe) redukcja masy wynosi ponad 20 % [7].

### Właściwości mechaniczne

Ze względu na niejednorodny charakter napełniacza roślinnego, jego hydrofobowość, małą zwilżalność i niewielką adhezję do osnowy polimerowej (co powoduje agregację napełniacza w toku przetwórstwa), a także stosunkowo małą odporność termiczną, istotny wpływ na właściwości kompozytów termoplastów napełnianych włóknami roślinnymi ma dobór metody przetwórstwa (wtrysk, wytłaczanie, *film-stacking* itd.) oraz rodzaju i ilości zastosowanego kompatybilizatora. Wytrzymałość na rozciąganie i zginanie kompozytów PP z włóknami naturalnymi w dużym stopniu zależy od wartości kompresji podczas wtrysku [5]. Kompozyty PP z włóknami naturalnymi wykazują odporność na rozciąganie sięgającą w najlepszym wypadku 80 % odporności typowej dla PP napełnianego włóknem szklanym [8]. Wynika to ze zdecydowanie odmiennych właściwości włókien napełniaczy. Wytrzymałość na rozciąganie włókien szklanych typu E (*electrical*) wynosi 2000–3500 MPa, a moduł Younga – 70 GPa [9], w wypadku włókien konopi (pasma) wytrzymałość na rozciąganie nie przekracza 800 MPa, natomiast moduł Younga wynosi 25–30 GPa [8]. Kompozyty

PP napełnione włóknami konopi wykazują nie więcej niż 50 % odporności na rozciąganie i ok. 57 % modułu Younga, wartości odpowiadających kompozytom PP z włóknami szklanymi [8]. Właściwości te można poprawić w wyniku zwiększenia ilości napełniacza naturalnego. Kompozyty PP napełnione włóknami naturalnymi charakteryzują się znacznie mniejszą udarnością niż ich odpowiedniki z udziałem włókien szklanych. Na przykład udarność PP napełnionego włóknami lnianymi nie przekracza 7 kJ/m<sup>2</sup> [10], a w wypadku PP napełnionego włóknem szklanym wartość ta wynosi 40 kJ/m<sup>2</sup> [5]. Odporność na propagację pęknięć w kompozycie w istotny sposób zależy od wytrzymałości na rozciąganie włókien, ich grubości i stosunku średnicy do długości oraz adhezji włókna do matrycy [11].

### Właściwości użytkowe

Kompozyty termoplastów z włóknami naturalnymi wykazują istotnie większą zdolność do absorpcji uderzenia i lepszą dźwiękochłonność niż odpowiedniki napełnione włóknem szklanym. Kompozyty termoplastyczne zawierające włókna szklane w czasie zderzenia mogą się rozpadać na ostre drzazgi, stanowiące dodatkowe zagrożenie dla pasażerów pojazdów.

## RECYKLING KOMPOZYTÓW TERMOPLASTYCZNYCH

Zgodnie z polityką UE dotyczącą odpadów tworzyw polimerowych, składowanie odpadów kompozytów napełnionych włóknami syntetycznymi wkrótce stanie się niemożliwe (w Niemczech jest już zakazane). Naturalna w odniesieniu do tworzyw polimerowych alternatywa składowania – spalanie – ze względu na emisję CO<sub>2</sub> w UE również ograniczana, w wypadku kompozytów napełnionych włóknem szklanym jest niedogodna. Po spaleniu blisko 50 % masy materiału pozostaje w postaci trudnego do zagospodarowania popiołu, a w wypadku elementów o dużych gabarytach proces odzysku energetycznego musi być poprzedzony kosztownym rozdrabnianiem, ponadto istotny udział włókien szklanych w masie wsadu wymaga specjalnej konstrukcji kotłów. Termoplasty napełnione włóknem szklanym powszechnie są uważane za materiały nierecyklowalne. Obecnie jednak duże nadzieje wiąże się z recyklingiem mechanicznym kompozytów termoplastycznych z udziałem włókien szklanych. Po rozkruszeniu i zmieleniu mogą być stosowane jako napełniacze bądź dodatki poprawiające właściwości asfaltów i cementów. Najbardziej racjonalną metodą wykorzystania odpadów takich kompozytów wydaje się użycie ich jako alternatywnego paliwa w cementowniach. W piecu cementowym odpady kompozytów są przetwarzane – z osnowy uzyskuje się energię (33 % odzysku), a część mineralna staje się składnikiem klinkieru (67 % odzysku) [3]. Najtrudniejszym etapem procesu jest rozdrabnianie odpadów kompozy-

towych, a wcześniej ich transport, w szczególności dotyczy to odpadów wielkogabarytowych (np. skrzydeł wiatraków z elektrowni wiatrowych, statków i łodzi, itp.). Rozwiązaniem oczywistym jest stworzenie możliwości rozdrabniania takich odpadów w miejscu ich powstawania (składowania).

PP napełniony włóknami naturalnymi jest określany jako w pełni recyklowalny. Stabilność właściwości mechanicznych kompozytów na bazie pierwotnego PP wydaje się zadowalająca, nawet po kilku cyklach przerobu [12, 13]. W wyniku kolejnych cykli przetwórstwa następuje jednak degradacja (skrócenie) włókien napełniacza, a także nieznaczne zmniejszenie ich średnicy. Degradacja zachodzi głównie podczas procesów formowania, ale w niewielkim stopniu również w efekcie mechanicznego rozdrabniania. Ogrzewanie włókien roślinnych, nawet tylko przez kilka minut do temp. powyżej 200 °C, powoduje ich wyraźne skrócenie [14]. Ponadto rozdrobnienie włókien roślinnych (w odróżnieniu do włókien szklanych) prowadzi do istotnej dyspersji ich długości. Z kolei znaczne zmniejszenie współczynnika kształtu (*aspect ratio*) na kolejnych etapach recyklingu tworzywa wpływa na wyraźne pogorszenie jego właściwości mechanicznych. Zakres, w którym właściwości użytkowe i przetwórcze kompozytów napełnionych włóknami naturalnymi utrzymują się na poziomie przydatności technologicznej to 5–7 cykli przetwórstwa [12, 13, 15]. Liczba ta może być jednak zależna od zastosowanych warunków przetwórstwa (wielkość kanałów, liczba przewężek), o czym nie wspominają autorzy cytowanych prac.

Jednym z ważniejszych kierunków wtórnego przerobu tworzyw termoplastycznych jest wykorzystanie ich odpadów w charakterze osnowy kompozytów z napełniaczami pochodzenia odpadowego, w tym ze źródeł odnawialnych. Z marketingowego punktu widzenia, uwzględniającego aspekty ekologiczne, jest to rozwiązanie niezwykle atrakcyjne. Stosunkowo niedawno A. Bourmaud i współpr. [13] stwierdzili, że kompozyty recyklatu PP z włóknami naturalnymi wykazują odmienne (gorsze) właściwości niż kompozyty na bazie pierwotnego PP, szczególnie dotyczy to wytrzymałości na rozciąganie przy zerwaniu. Autorzy wyjaśniają odmienne właściwości kompozytu z udziałem recyklatu zawartością w nim odpadów PP z różnych źródeł i o różnej charakterystyce. Warto zwrócić uwagę, że skład wsadu odpadowych termoplastów praktycznie zawsze jest nieprzewidywalny, chyba że są to odpady bezpośrednio z produkcji, a decydują o tym metody, logistyka i przede wszystkim koszty segregacji.

Ogromne wątpliwości budzi również liczba cykli wtórnego przerobu, ograniczających przydatność recyklatu kompozytowego, podawana prawie we wszystkich pracach z tego obszaru. Stosowana w ocenie metoda badań polega na poddawaniu kolejnym etapom przetwórstwa rozdrobnionego materiału pochodzącego z etapu poprzedniego, po określeniu jedynie jego charakterystyki mechanicznej i reologicznej. Taka charakterystyka nie

uwzględnia zmian w materiale, zachodzących podczas starzenia (minimalny czas życia wyrobów wykonanych z kompozytów PP lub innych termoplastów z włóknami naturalnymi, uzasadniający ich przydatność ze względów ekologicznych, oceniany jest na trzy lata [7]), stopnia zużycia materiału, sposobu jego użytkowania (rodzajów stresów mechanicznych i fizycznych, w tym temperatury i środowiska użytkowania), a także zawartości i rodzaju zanieczyszczeń.

### ASPEKTY EKONOMICZNE STOSOWANIA KOMPOZYTÓW TERMOPLASTÓW Z WŁÓKNAMI NATURALNYMI

Sztandarowym argumentem uzasadniającym zastępowanie włókien szklanych włóknami naturalnymi jest ich niska cena. Rzeczywiście, koszt włókien szklanych E kształtuje się na poziomie 1,15 €/kg i jest zbliżony do ceny polipropylenu (ok. 1,4 €/kg), a koszt pasm włókien konopi wynosi ok. 0,4 €/kg [8] (oczywiście cena ta może wzrosnąć o kilkadziesiąt procent wraz ze zmniejszeniem zawartości słomy). Należy jednak pamiętać, że włókna konopne to produkt o znacznie niższej jakości użytkowej niż włókna szklane, a plany biznesowe oparte na tymczasowych relacjach cenowych są obciążone bardzo dużym ryzykiem. Ostatnio można to było zaobserwować na rynku amerykańskim, gdzie zainteresowanie producentów alkoholu etylowego przeznaczonego do celów paliwowych doprowadziło do radykalnego wzrostu cen kukurydzy, a pośrednio także soi. W wypadku znacznego wzrostu popytu na włókna łądogowe, związanego m.in. z szerokim zastosowaniem ich jako napełniaczy kompozytów termoplastów, rzeczywista cena takich włókien może istotnie różnić się od ceny przewidywanej.

### DOSTĘPNOŚĆ WŁÓKIEN ROŚLINNYCH

Przekonanie o powszechnej dostępności włókien roślinnych, zwłaszcza tych o najlepszych właściwościach użytkowych, z punktu widzenia wielkotonażowej produkcji chemicznej może być błędne. Jeszcze w 2007 roku, we wstępie do swojej niezwykle wartościowej pracy o zastosowaniu *Cannabis sativa* (konopie siewne) jako napełniacza w kompozytach termoplastycznych, P. Mutje i współpr. [8] stwierdzili, że jednym z aktualnych problemów UE jest redukcja nadmiaru produkcji żywnościowej, pozyskiwanej z tradycyjnych upraw i zastępowanie ich uprawami roślin przemysłowych, m.in. konopi, które będą stanowić źródło wartości dodanej w otrzymanych z ich udziałem produktach. Dziś sytuacja zmieniła się diametralnie. Dyrektywa Europejska przygotowana w związku z sytuacją na rynku biopaliw, nie tylko nie zezwoli na rozszerzenie areału przeznaczonego pod uprawy przemysłowe, kosztem areału przeznaczonego

na produkcję żywności, ale zakazuje również produkcji biopaliw (w konsekwencji innych chemikaliów i dodatków) z części roślin przydatnych do produkcji żywności. Nie analizując sensu tej dyrektywy, można stwierdzić, że dostępność roślin włóknistych, podobnie jak innych upraw przemysłowych, będzie zależeć od względów społecznych i politycznych (wizja głodu i niedożywienia na południowej półkuli Ziemi wobec lawinowo rosnącej liczby ludności w wielu rejonach świata), rzeczywistego wzrostu populacji ludzi, wydajności produkcji rolnej, zachowania rynku (np. niedawno obserwowano kurczenie się upraw i wzrost cen soi w USA w związku ze znacznym zwiększeniem produkcji kukurydzy przemysłowej), a nawet możliwości genetycznej modyfikacji upraw. Należy też pamiętać, że uprawy rolne są bardzo zależne od warunków pogodowych i wrażliwe na zagrożenia szkodnikami. Rośliny dostarczające włókien gorszej jakości niż jakość konopi można uprawiać na gruntach niższej kategorii z całkiem dobrą wydajnością. Miskant chiński na przykład jest produkowany z wydajnością 17–20 t/ha rocznie, z czego 70 % plonów można przetworzyć na włókna w wyniku prostego mielenia. Z drugiej strony trzeba mieć świadomość, że 1 paleta transportowa wyprodukowana z kompozytu na osnowie PP z udziałem miskantu chińskiego zawiera włókna pozyskane z uprawy o powierzchni 52 m<sup>2</sup> ziemi użytkowej [7]. W tym miejscu należy również przypomnieć o, wywołanej dyrektywami europejskimi i histerią związaną z ociepleniem klimatu, konkurencji między przemysłem i energetyką dotyczącej arealów upraw biomasy o przeznaczeniu technicznym.

## UWARUNKOWANIA EKOLOGICZNE

### Sekwestracja CO<sub>2</sub>

Każda produkcja roślinna wiąże się z fotosyntezą przyczyniającą się do eliminowania z obiegu atmosferycznego CO<sub>2</sub>, domniemanego sprawcy ocieplenia klimatu Ziemi. Procesowi fotosyntezy przypisuje się, z dużą przesadą, zerowy bilans węglowy, co stanowiło istotny argument za coraz mniej uzasadnioną produkcją biopaliw I-szej generacji (jak już wspomniano, wkrótce znacznie ograniczoną nakazem Dyrektywy Europejskiej). Ten zerowy bilans węglowy fotosyntezy to również jedna z podstaw proekologicznej wizji szerokiego stosowania kompozytów napełnionych włóknami naturalnymi. Pervaiz i Sain [5] oszacowali, że w wypadku kompozytu PP w 64 % mas. napełnionego włóknami konopi, 325 ton węgla pochodzącego z CO<sub>2</sub> będzie sekwestrowane w takim materiale w ciągu całego cyklu życia wyrobu z niego wykonanego. Ilość unieruchomionego w kompozycie węgla atmosferycznego dodatkowo można zwiększyć o 22 %, zwiększając stopień kompresji o 13 %, co pozwala utrzymać poziom właściwości użytkowych materiału. Autorzy [5] podają również, że przemysłowa uprawa konopi umożliwia wyeliminowa-

nie z obiegu atmosferycznego 0,67 t/h/rok węgla, co jest porównywalne z roczną wydajnością sekwestracji CO<sub>2</sub> przez drzewostany miejskie i dziko rosnącą puszcze w USA. Pominąwszy w ogóle sensowność przedsięwzięć gospodarczych, których głównym celem ma być ograniczenie atmosferycznego obiegu CO<sub>2</sub>, przedstawione argumenty nie przekonują, a porównanie efektywności pochłaniania CO<sub>2</sub> przez drzewa i rośliny łądługowe, ze względu na biochemiczną naturę procesu, budzi wątpliwości. Przewaga drzewostanu, szczególnie o szybkich przyrostach masy, jest w przedstawionym kontekście bezsporna. Akumulacja węgla przez drzewa ma charakter wieloletni, nie zajmują one arealów rolnego i praktycznie biorąc nie wymagają technicznych środków uprawy (źródeł istotnych emisji CO<sub>2</sub>). Ponieważ jednak włókna konopi, m.in. jako napełniacze kompozytów termoplastów, mogą odgrywać ważną rolę użytkową, powyższą dygresję należy traktować jako ilustrację względności analiz dotyczących wpływu działalności wytwórczej na środowisko.

### Oszczędność energii

Porównawcza analiza cykli życia kompozytów PP z włóknem szklanym (30 % mas.) i włóknami naturalnymi (65 % mas.), uwzględniająca konsumpcję nieodnawialnej energii [5], wykazała w wypadku kompozytu PP/włókno roślinne oszczędność 50 tys. MJ (co odpowiada redukcji emisji ok. 3 t CO<sub>2</sub> na 1 t kompozytu z włóknem szklanym). Oszczędność energii wynikająca z zastosowania włókien naturalnych w miejsce włókien szklanych wiąże się z wysoką energochłonnością produkcji tych ostatnich oraz mniejszą zawartością polipropylenu w materiale kompozytu z napełniaczem roślinnym.

Jak już wspomniano, wykorzystanie włókien naturalnych jako napełniaczy skutkuje ograniczeniem zużycia energii w całym okresie życia, „od kołyski do grobu” wyrobów wykonanych z takich materiałów kompozytowych. Ważną rolę odgrywa tu redukcja masy wyrobów, co jest szczególnie ważne w przemyśle samochodowym i transporcie (wzmiankowane wcześniej palety napełniane włóknami miskantu chińskiego [4]). Według szacunków *De Rosiers Automotive Consultants INC* [5] w typowym amerykańskim samochodzie o masie 1479 kg, 38 kg stanowią kompozyty napełnione włóknem szklanym. Zastąpienie ich materiałami napełnionymi włóknami naturalnymi odpowiada redukcji masy pojazdu o 0,54 %. Zgodnie z tym samym źródłem redukcja 10 % masy samochodu odpowiada zmniejszeniu zużycia paliwa o 7 %. Zatem przy założeniu zużycia paliwa 10 dm<sup>3</sup>/100 km daje to oszczędność 0,038 dm<sup>3</sup> benzyny na 100 km.

Wszystko staje się kiedyś odpadem, wobec tego, niezależnie od wniosków z wcześniejszej dyskusji, dotyczącej liczby możliwych do przeprowadzenia cykli mechanicznego recyklingu PP napełnionego włóknami naturalnymi, rzeczywista recyklowalność tego typu materiałów

jest określona przez możliwość ich spalania (zgazowania). Corbiere-Nicollier i współpr. [7] oszacowali, że zysk energetyczny ze spalania kompozytu PP napełnionego mискantem chińskim wynosi 21,5 MJ/kg ze spalania osnowy PP i 8,3 MJ/kg ze spalania napełniacza roślinnego. W wypadku kompozytu PP napełnionego niepalnym włóknem szklanym, energia zużyta na wytworzenie włókna szklanego redukuje efekt energetyczny ze spalania osnowy polimerowej o 1,7 MJ/kg. Oznacza to, że koszty wytworzenia elementu użytkowego z kompozytu napełnionego mискantem zwracają się w 25 %, a z kompozytu z włóknem szklanym tylko w 13 %.

### PODSUMOWANIE

Właściwości mechaniczne włókien naturalnych, takich jak: konopie, sizal, juta, len, mączka drzewna uzasadniają ich stosowanie w charakterze napełniaczy tworzyw termoplastycznych. Ich właściwe związanie z łańcuchami polimeru próbuje się osiągnąć w wyniku doboru rodzaju i ilości kompatybilizatora, a także obróbki fizycznej bądź chemicznej [10, 17–20]. Najbardziej zaawansowane technicznie zastosowania takiego napełniacza są możliwe przy użyciu wyselekcjonowanych włókien roślinnych, co bez wątpienia rzutuje na koszty procesowe. Oczywiście ogromne znaczenie mają metody i warunki przetwórstwa.

Obecne regulacje prawne, w tym Dyrektywa Europejska 53/2000 oraz naciski społeczne i polityczne, związane z ekologią cieplarnianego strachu, spowodują, że zakres wykorzystania włókien naturalnych w kompozytach termoplastycznych niewątpliwie znacznie wzrośnie, tym bardziej, że obecne na rynku kompozyty, np. poliolefin z napełniaczami pochodzenia naturalnego, są traktowane jako równie *zielone* jak kompozyty na bazie odnawialnej matrycy zawierającej odnawialny napełniacz. Jak wynika z analizy entuzjizm związany z niskim kosztem włókien naturalnych nie jest w pełni uzasadniony. Szeroka dostępność surowca najpewniej okaże się mrzonką, a jedynym realnym bogatym źródłem odnawialnego materiału włóknistego są i będą odpady z przemysłu rolnego i leśnego, determinujące jakość napełniacza i właściwości użytkowe kompozytów. Źródło to warto i należy wykorzystać [8, 9, 16, 18, 21–23].

Obecne w literaturze i dokumentach programowych liczne opracowania dotyczące efektów energetycznych i środowiskowych związanych z zastępowaniem włókien mineralnych napełniaczami naturalnymi należy raczej traktować światopoglądowo. W szeroko zakresowym bilansie technologicznym jedynym wiarygodnym parametrem jest poprawa funkcjonalności otrzymywanego materiału przy zachowaniu kosztów wytwarzania lub ich obniżeniu. Nadmierny entuzjizm dotyczący działań proekologicznych powinien studiować przykład bioestrów stosowanych jako biopaliwa. W praktyce okazało się, co zresztą było oczywiste jeszcze przed kampanią poprzedzającą ich szerokie wprowadzenie, że jako

materiały pędne nie dorównują one odpowiednikom pochodzenia mineralnego lub syntetycznego, a oszczędności energii i poprawa stanu środowiska naturalnego w dużej mierze stanowią pobożne życzenia.

### LITERATURA

- [1] Bart J.C.J.: "Plastics Additives: Advanced Industrial Analysis", IOS Press, Amsterdam 2006, str. 55.
- [2] Rejewski P., Kijeński J.: *Polimery* **2010**, 55, 711.
- [3] Jacob A.: *Reinforced Plastics* **2011**, 55, 44.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617\(11\)70186-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617(11)70186-2)
- [4] Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T.: "Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites", CRC Press, Boca Raton 2005.
- [5] Pervaiz M., Sain M.: *Resources, Conservation and Recycling* **2003**, 39, 325.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00173-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00173-8)
- [6] Callister W.D.: "Materials Science and Engineering: An introduction", Vth edition, Wiley 2000.
- [7] Corbiere-Nicollier T., Gfeller-Laban B., Lundquist L. i in.: *Resources, Conservation and Recycling* **2001**, 33, 267. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00089-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00089-1)
- [8] Mutje P., Lopez A., Valleyoz M.E. i in.: *Composites: Part A* **2007**, 38, 369.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.03.009>
- [9] Błędzki A.K., Gassan J.: *Progress in Polymer Science* **1999**, 24, 221.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)
- [10] Błędzki A.K., Fink H., Specht K.: *Journal of Applied Polymer Science* **2004**, 93, 2150.  
<http://dx.doi.org/10.1002/app.20712>
- [11] Fu S.-Y., Lauke B.: *Journal of Materials Science* **1997**, 32, 1985. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018593931951>
- [12] Bourmaud A., Baley C.: *Polymer Degradation and Stability* **2007**, 92, 1034.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.02.018>
- [13] Bourmaud A., Le Duigou A., Baley C.: *Polymer Degradation and Stability* **2011**, 96, 1732.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.08.003>
- [14] Lillholt H., Lawther J.M.: "Comprehensive composite materials" (red. Kelly A., Zweben C.), Elsevier Science 2000, vol. 1, str. 303–325.
- [15] Bourmaud A., Baley C.: *Polymer Degradation and Stability* **2009**, 94, 297.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.12.010>
- [16] Kijeńska M., Kowalska E., Pałys B., Ryczkowski J.: *Polymer Degradation and Stability* **2010**, 95, 536.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.12.023>
- [17] Ayrlilmis N., Kaymakci A., Gülec T.: *Industrial Crops and Products* **2015**, 74, 279.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.024>
- [18] Gozdecki C., Wilczyński A., Kociszewski M., Zajchowski S.: *European Journal of Wood and Wood Products* **2015**, 73, 87.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00107-014-0852-2>
- [19] Pal K., Mukherjee M., Frackowiak S. i in.: *Journal of*

- Vinyl and Additive Technology* **2014**, 20, 24.  
<http://dx.doi.org/10.1002/vnl.21325>
- [20] Zhu J., Zhu H., Immonen K. i in.: *Industrial Crops and Products* **2015**, 67, 346.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.052>
- [21] Chang F.C., Kadla J.F., Lam F.: *European Journal of Wood and Wood Products* **2016**, 74, 23.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00107-015-0962-5>
- [22] Kociszewski M., Gozdecki C., Wilczyński A. i in.: *European Journal of Wood and Wood Products* **2012**, 70, 113.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00107-011-0531-5>
- [23] Kuciel S., Jakubowska P., Kuźniar P.: *Composites: Part B* **2014**, 64, 72.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.026>  
Otrzymano 20 XI 2015 r.

---

### W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- P. Chmielarz, A. Sobkowiak – Synteza poli(akrylanu butylu) metodą kontrolowanej elektrochemicznie polimerizacji rodnikowej z przeniesieniem atomu
- M. Pochwała, M. Biątek, A. Franczyk, K. Czaja, B. Marciniak – Synteza bimetalicznego silseskwioxanowego kompleksu tytanu(IV) i jego polimerycznego odpowiednika oraz ich właściwości katalityczne w polimerizacji olefin
- M.M. Mazurek-Budzynska, G. Rokicki, K. Paśnik – Wykorzystanie odpadowego poli(tereftalanu etylenu) w syntezie alkidowych żywic poliestrowych schnących na powietrzu i alifatyczno-aromatycznych poli(estro-węglanów) (*j. ang.*)
- A. Niemczyk, K. Dziubek, K. Czaja, R. Szatanik, M. Szotyga, M. Dutkiewicz, B. Marciniak – Nanokompozyty polipropylen/poliedryczne oligomeryczne silseskwioxany – badania objętości swobodnych, stopnia krystaliczności oraz masowego wskaźnika szybkości płynięcia (*j. ang.*)
- A. Bukowska, W. Bukowski, S. Kleczyńska, K. Dychtoń, M. Drajewicz – Hydroksyfunkcjonalizowane porowate cząstki polimerowe otrzymane z mieszaniny hydrofilowych i hydrofobowych monomerów (*j. ang.*)
- M. Kurańska, A. Prociak, S. Michałowski, U. Cabulis, M. Kirpluks – Mikroceluloza jako napełniacz naturalny pianek poliuretanowych wytwarzanych z udziałem biopoliolu z oleju rzepakowego (*j. ang.*)
- K. Sokołowska, A. Konieczna-Molenda, E. Witek – Hydroliza odpadów celulozowych katalizowana enzymami celulolitycznymi immobilizowanymi na nośniku polimerowym