

Kompozyty, biokompozyty i nanokompozyty polimerowe. Otrzymywanie, skład, właściwości i kierunki zastosowań

Joanna BARTON, Arkadiusz NIEMCZYK, Krystyna CZAJA, Łukasz KORACH*, Beata SACHER-MAJEWSKA – Katedra Technologii Chemicznej i Chemii Polimerów, Wydział Chemii, Uniwersytet Opolski, Opole

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2014, 68, 4, 280–287

Kompozyty polimerowe

Wiele dobrze zdefiniowanych struktur, takich jak metale, ceramika czy polimery, nie może zaspokoić wszystkich zapotrzebowań technologicznych. Z tego też powodu poszukuje się nowych materiałów o innych, a przede wszystkim lepszych właściwościach [1]. Takie zadanie spełniają m.in. materiały kompozytowe, które są definiowane, jako materiały składające się z co najmniej dwóch faz, gdzie w wyniku zachodzącego efektu synergicznego dochodzi do powstania materiału o właściwościach innych niż właściwości poszczególnych składników [2].

Materiał kompozytowy składa się najczęściej z dwóch składników, tj. osnowy oraz napelnacza zwanego też zbrojeniem lub szerszej fazą rozproszoną, a czasami stosuje się dodatkowe składniki, w tym głównie kompatybilizator. Osnowa, nazywana również fazą ciągłą, scala fragmenty napelnacza, umożliwia nadanie wyrobom odpowiedniego kształtu oraz determinuje większość fizycznych oraz chemicznych właściwości materiału. Zadaniem fazy rozproszonej jest dodatkowe poprawienie wybranych właściwości materiału. Natomiast kompatybilizator jest dodawany w celu zwiększenia oddziaływania pomiędzy osnową a napelniczą co ma istotny wpływ na spójność i jednorodność materiału, a w konsekwencji jego właściwości przetwórcze i wytrzymałościowe.

Ze względu na rodzaj osnowy możemy wyróżnić materiały kompozytowe na osnowie metalicznej, ceramicznej, bądź polimerowej. Ten ostatni rodzaj materiałów kompozytowych dominuje nad pozostałymi pod względem zastosowania w technice. Osnowę w polimerowych materiałach kompozytowych mogą stanowić polimery duroplastyczne lub termoplastyczne. Duroplasty stosowane jako osnowa kompozytów polimerowych, to m.in. żywice epoksydowe, poliestry lub silikony. Typowe termoplasty stosowane jako osnowy polimerowe, to polietylen, polipropylen, poli(chlorek winylu), polistyren czy też poliwęglany [3].

Ze względu na rodzaj fazy rozproszonej, materiały kompozytowe możemy podzielić na:

- kompozyty zbrojone cząstkami; fazę rozproszoną stanowią cząstki o sztywności i twardości większej od osnowy; obciążenia zewnętrzne są przenoszone zarówno przez osnowę jak i napelniczą, a wzmocnienie efektywne jest zwykle obserwowane, gdy zawartość napelnacza jest większa niż 20%
- kompozyty zbrojone dyspersyjnie; wzmocnienie następuje na poziomie mikroskopowym; obciążenia zewnętrzne są przenoszone przez osnowę, a wzmocnienie jest efektywne, gdy napelnienie nie przekracza 15%
- kompozyty zbrojone włóknami; napelniczą stanowią włókna (szklane, grafitowe, węglowe lub organiczne) o różnym stopniu uporządkowania struktury oraz różnych parametrach
- kompozyty strukturalne; złożone z ciągłych struktur składników konstrukcyjnych (np. sklejka, pręty, itp.) [4].

Spośród wielu możliwych rodzajów polimerowych materiałów kompozytowych, najważniejsze to nanokompozyty oraz biokompozyty, które w ostatnich latach cieszą się ogromnym zainteresowaniem ze względu na swoje unikatowe właściwości [5].

Nanokompozyty polimerowe

Nanokompozyty są to materiały kompozytowe, w których co najmniej jeden składnik ma wymiar w skali nanometrycznej (10^{-9} m). W przypadku polimerowych kompozytów, składnikiem tym najczęściej jest napelniczą nazywany wówczas nanonapelniczą. Nanonapelnicze można sklasyfikować ze względu na charakter chemiczny, rodzaj struktury fizycznej, jednak najczęściej są one klasyfikowane pod względem kształtu cząstek. Wyróżniamy nanonapelnicze 1D – liniowe (np. nanorurki węglowe), 2D – płytkowe (np. montmorylonit), bądź 3D – proszkowe (np. cząstki srebra) [6].

Atrakcyjność nanokompozytów wynika z faktu, iż osnowa polimerowa oraz nanonapelniczą oddziałują ze sobą już na poziomie cząsteczkowym. Dzięki temu nanonapelniczą, o wymiarach poniżej 100 nm, dodany w niewielkiej ilości do osnowy (zwykle kilka procent), może znacznie zmienić wybrane właściwości materiału kompozytowego. Otrzymywanie nanokompozytów można przeprowadzić tymi samymi metodami, jakie stosuje się zwykle w technologii typowych kompozytów, tj. metodami *in-situ*, rozpuszczalnikową lub najczęściej poprzez mieszanie w stanie stopionym osnowy polimerowej. Polimerowe nanokompozyty wykazują zwykle większą stabilność termiczną, mniejszą przepuszczalność gazów (większą barierowość) oraz poprawę właściwości mechanicznych, szczególnie odporności na ścieranie materiału w stosunku do bazowego polimeru stanowiącego osnowę [7, 8].

Jednym z pierwszych nanonapelniczy, który osiągnął sukces technologiczny był montmorylonit, który jest warstwowym glinokrzemianem z grupy smektyków [9]. Ten płytkowy nanonapelniczą zastosowano z Nylonem 6 i zaobserwowano wyraźną poprawę właściwości mechanicznych oraz termicznych otrzymanego nanokompozytu [10]. Od tego momentu rozpoczęto badania z innymi glinokrzemianami oraz substancjami o strukturze płytkowej, stosując szereg polimerów jako osnowy polimerowe [7, 11 ÷ 13]. Nanokompozyty z napelniczymi glinokrzemianowymi stosuje się obecnie do produkcji detali silników samochodów, w przemyśle lotniczym, kosmicznym itp. [9].

Drugą grupą nanonapelniczy są cząstki o budowie liniowej w postaci nanorurek lub nanowłókien. Najczęściej stosuje się obecnie nanorurki węglowe (CNTs), które są zbudowane z warstw grafenowych i posiadają dobre właściwości mechaniczne oraz elektryczne [14]. Dodatkowo właściwościami elektrycznymi nanokompozytu z nanorurkami węglowymi można „sterować” poprzez chemiczną modyfikację powierzchni nanorurek. Nanorurki węglowe były stosowane z takimi osnowami jak polietylen, poliwęglan, polistyren, poli(metakrylan metylu), polilaktyd, czy też poli(alkohol winylowy) [15 ÷ 17].

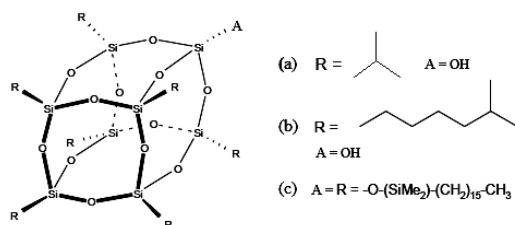
Wśród nanonapelniczy proszkowych, w których wszystkie wymiary mają poniżej 100 nm, ogromnym obecnie zainteresowaniem cieszą się poliedryczne silseskwioxany (POSS – *Polyhedral Oligomeric Silsesquioxanes*). Związki te są opisywane wzorem sumarycznym

Autor do korespondencji:
Dr Łukasz KORACH e-mail: lukasz.korach@uni.opole.pl

(RSiO_{1,5})_n, gdzie R może być atomem wodoru, grupą alkilową lub arylową, a n wynosi 6, 8, 10, 12 lub więcej [18]. Dodatkowo związki te mogą przyjmować różne struktury, takie jak struktura nieuporządkowanej sieci, struktura drabinkowa, struktura niecałkowicie zamkniętej klatki, czy też struktury klatkowe [19]. Możliwość doboru struktury oraz zastosowania niemal dowolnego podstawnika R pozwala „sterować” właściwościami POSS-ów, co zdecydowanie zwiększa atrakcyjność tych związków.

POSS-y są opisywane szeroko w literaturze, jako napełniacze w takich osnowach jak poliamid, polistyren, żywice epoksydowe, poliimid, poliwęglan, czy poli(chlorek winylu) [18, 20÷22]. Część publikacji jest poświęcona również nanokompozytom, w których osnowę stanowi polipropylen, bądź polietylen [23÷27]. Jednakże większość tych ostatnich publikacji jest skupiona głównie na procesie krystalizacji, bądź morfologii otrzymanych nanokompozytów, a niewiele charakteryzuje wpływ POSS-ów na właściwości mechaniczne lub termiczne. M. Joshi i inni [25] stwierdził, iż wpływ POSS-u jest ściśle związany z jego dyspersją w osnowie. Gdy jest on zdyspergowany na poziomie cząsteczkowym, to poprawia właściwości termiczne materiału oraz może zachowywać się jak typowy czynnik zarodkujący proces krystalizacji [25, 26].

Otrzymywanie i charakterystyka kompozytów poliolefinowych z udziałem POSS-ów jest także przedmiotem zainteresowań zespołu Katedry Technologii Chemicznej i Chemii Polimerów Wydziału Chemii Uniwersytetu Opolskiego. Prace te są wynikiem nawiązanej współpracy z zespołem prof. Bogdana Marciniaka z Zakładu Chemii Metaloorganicznej na Wydziale Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, specjalizującym się w syntezie związków krzemu w tym także POSS-ów. W dotychczasowych naszych badaniach stosowaliśmy związki o strukturze klatkowej T₈, różniące się między sobą podstawnikami R i ewentualnie dodatkowo wprowadzoną grupą hydroksylową (Rys. 1).



Rys. 1. Struktury związków (a) POSS1; (b) POSS2 oraz (c) POSS3

Nanokompozyty zawierające silseskwioxany w różnych udziałach procentowych (do 10% m/m) otrzymano metodą współwytłaczania stosując jako osnowę, polietylen dużej gęstości (PEHD) oraz polietylen małej gęstości (PELD).

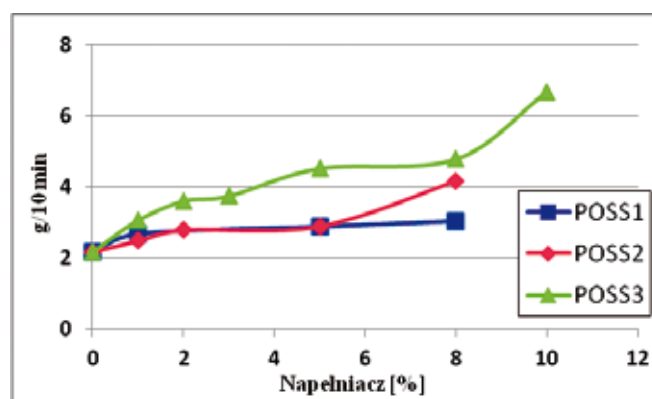
Przeprowadzone badania wykazały, iż temperatura topnienia stosowanego napełniacza ma ogromny wpływ na właściwości otrzymanego materiału kompozytowego. Dobra dyspersja otrzymanych kompozytów została potwierdzona przy zastosowaniu skaningowej mikroskopii elektronowej oraz metody dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego z udziałem przystawki EDS. Badania właściwości termicznych metodą różnicowej kalymetrii skaningowej wykazały, iż nanonapełniacz silseskwioxanowy działa jako czynnik zarodkujący krystalizację polimeru. W przypadku nanokompozytów na osnowie PELD, dodanie napełniaczy silseskwioxanowych w niewielkich ilościach, spowodowało wzrost parametru T₉₅ (temperatura, w której dochodzi do rozkładu 5% masy próbki) nawet o 20°C w stosunku do odpowiedniej wartości dla samej osnowy. Udział POSS-ów w kompozycie polietylenowym wpłynął też wyraźnie na właściwości mechaniczne materiału, głównie udarność i wytrzymałość na rozciąganie, a największe zmiany są obserwowane przy zastosowaniu zaledwie 1% m/m napełniacza (Tab. I).

Tablica I

Wybrane właściwości wytrzymałościowe kompozytów PELD/POSS

| Udział napełniacza, % m/m | Wytrzymałość na rozciąganie, MPa | | | | | Udarność wg Charpy'ego, kJ/m ² | | | | |
|---------------------------|----------------------------------|------|------|------|------|---|-------|------|------|------|
| | 0% | 1% | 3% | 5% | 8% | 0% | 1% | 3% | 5% | 8% |
| PELD/POSS1 | 20,3 | 21,7 | - | 19,3 | 18,3 | 92,2 | 101,4 | - | 97,8 | 93,8 |
| PELD/POSS2 | 20,3 | 22,5 | 21,4 | 20,4 | 18,8 | 92,2 | 99,2 | 96,3 | 98,8 | 96,0 |

Dodatek POSS-ów do osnowy polietylenowej poprawił także właściwości przetwórcze materiału, co przejawia się wzrostem wskaźnika szybkości płynięcia (MFR), nawet 3-krotnie (Rys. 2). Podobne działanie wykazują typowe smary wewnętrzne stosowane do polepszenia właściwości przetwórczych kompozytów.



Rys. 2. Wpływ składu kompozytów PELD/POSS na wartość wskaźnika szybkości płynięcia (MFR)

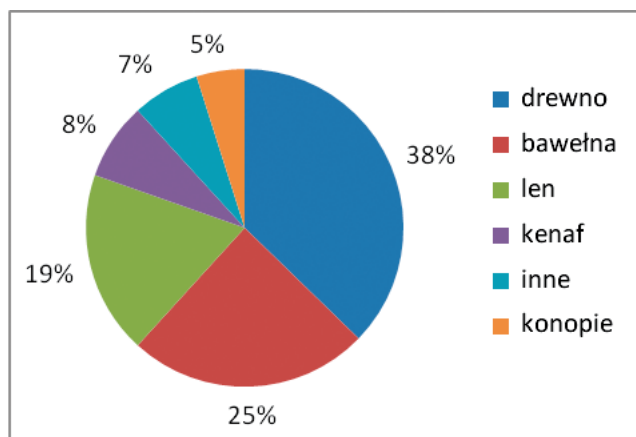
Biokompozyty

W ostatnich kilku dekadach zasadniczą rolę w zastępowaniu konwencjonalnych kompozytów polimerowych, w różnego typu aplikacjach, odgrywają kompozyty otrzymano z udziałem surowców odnawialnych. Kompozyt polimerowy, w którym chociaż jeden ze składników jest biopochodny lub biodegradowalny, określa się mianem biokompozytu.

Zasadnicze korzyści wynikające z zastosowania biokompozytów jako materiałów alternatywnych dla wyrobów „ropopochodnych”, to m.in. zapobieganie naruszenia równowagi popytu i podaży produktów wytwarzanych z nieodnawialnych surowców kopalnych [28], zrównoważona gospodarka odpadami, zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, biodegradowalność tworzyw lub ułatwiony proces recyklingu [29, 30].

Kompozyty polimerowe z udziałem surowców roślinnych znajdują zastosowanie w różnych sektorach gospodarki – szczególnie dotyczy to przemysłu samochodowego, gdzie całkowite zużycie różnego rodzaju surowców roślinnych w 2012 r. w Europie wyniosło 80 tys. t (Rys. 3) oraz budownictwa. Obserwuje się też dynamiczny wzrost globalnego rynku produkcji i sprzedaży biokompozytów. Wiąże się to nie tylko z rosnącym popytem ze strony branż, będących głównymi odbiorcami tych materiałów, lecz również ze względu na fakt, że dla opracowywanych i modyfikowanych, i przez to ulepszanych materiałów, stale poszerza się obszar ich zastosowań [29, 31, 32].

Intensywne badania dotyczą kompozytów z udziałem takich włókien naturalnych jak: kenaf, sisal, juta, len, konopie, mączka drzewna, ramię, bambus, włókna bawełniane czy kokosowe [29, 32, 34].



Rys. 3. Zużycie włókien naturalnych do produkcji kompozytów. Dane dotyczące przemysłu samochodowego w Europie, 2012 r. [33]

Włókna naturalne zbudowane są przede wszystkim ze związków organicznych, takich jak: celuloza, hemiceluloza i lignina. Zasadniczo wpływa to na trwałość termiczną tych surowców. W procesach wytwarzania, w których temperatura przekracza 200°C, dochodzi do termicznej degradacji surowców roślinnych, co wpływa na pogorszenie właściwości organoleptycznych i mechanicznych materiału [35]. Z tego powodu, na osnowę kompozytów otrzymywanych z udziałem surowców roślinnych, wykorzystuje się przede wszystkim polimery termoplastyczne (PE, PP, PVC, PS) przetwarzane w akceptowalnych temperaturach. Polimery te charakteryzują się ponadto takimi korzystnymi właściwościami, jak np. mała lepkość czy duża wartość masowego wskaźnika szybkości płynięcia [36].

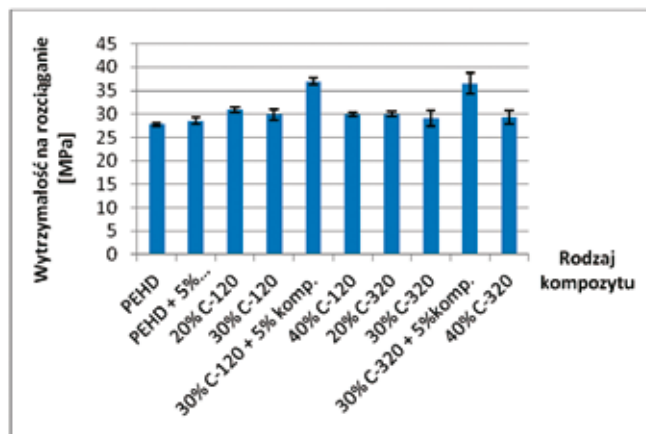
Właściwości kompozytów polimerowych, wytworzonych z udziałem surowców roślinnych, zależą przede wszystkim od oddziaływania na granicy faz: hydrofobowa osnowa i hydrofilowy napelniacz. Nie bez znaczenia pozostaje także odpowiedni dobór proporcji między osnową i stosowanym dodatkiem. Często konieczne staje się zastosowanie metod, bądź środków, poprawiających kompatybilność składników kompozycji [35]. Wśród najczęściej stosowanych metod wyróżnia się modyfikację chemiczną, np. impregnacja włókien polimerem kompatybilnym do osnowy [37], kopolimeryzacja szczepiona [38], acetylacja, merceryzacja [39÷41] albo modyfikację fizyczną, np. wyładowania koronowe, obróbka termiczna lub plazmowa [30]. Modyfikacje te, poza poprawą adhezji, mają na celu przede wszystkim ograniczenie chłonności wody, zwiększenie stabilności wymiarów wyrobu oraz zwiększenie jego odporności na oddziaływanie czynników środowiskowych [42].

W badaniach prowadzonych przez zespół Katedry Technologii Chemicznej i Chemii Polimerów Wydziału Chemii UO nad opracowywaniem nowego typu lub modyfikacją znanych biokompozytów, jako osnowę stosuje się przede wszystkim takie termoplastyczne tworzywa, jak: PE i PP. Badania mają na celu przede wszystkim opracowanie składu oraz charakterystykę parametrów mechanicznych, reologicznych, termicznych oraz analizę strukturalną otrzymywanych kompozytów z napelniaczami roślinnymi różnego pochodzenia. Dodatkowo prowadzone są badania, określające trwałość otrzymywanych materiałów, poddanych oddziaływaniu mikroorganizmów (biodegradacja) oraz czynników środowiska przyrodniczego, zarówno w warunkach poligonowych jak i symulowanych, zintensyfikowanych testach laboratoryjnych (badania w ksenoteście, wezerometrze).

Przeprowadzone badania kompozytów napelnionych mączkami drzewnymi różnego typu, oznaczanych symbolem WPC (*Wood Polymer Composites*), wskazują na różnice we właściwościach otrzymywanych materiałów. Wpływa na to m.in. rodzaj użytego napelniacza, źródło jego pochodzenia lub/i stopień rozdrobnienia.

Przykładowe wyniki (Rys. 4) dowodzą, iż dla kompozytów zawierających mączkę drzewną Lignocel C-120 oraz Arbocel C-320, udział napelniacza w ilości do 40% nie wpływa na pogorszenie parametrów

wytrzymałościowych materiału. Co więcej zastosowanie kompatybilizatora w postaci wosku polietylenowego, wpływa na wzrost wytrzymałości na zrywanie tych kompozytów.



Rys. 4. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie dla PEHD i wybranych kompozytów WPC o różnym składzie

Podsumowanie

Opracowywanie nowego typu materiałów polimerowych i ich charakterystyka, pozwalają na poszerzenie palety zastosowań w różnych dziedzinach gospodarki. Szczególnie istotne wydaje się być ciągłe poszukiwanie nowych, konkurencyjnych napelniaczy, zarówno organicznych jak i nieorganicznych, prowadzenie różnego typu modyfikacji (sami napelniaczy), jak i wprowadzanych innych dodatków, opracowanie skutecznych technologii otrzymywania jednorodnych kompozytów o dobrych, a często nawet unikatowych, właściwościach użytkowych pożądanych dla określonego typu zastosowania. Na Wydziale Chemii Uniwersytetu Opolskiego od szeregu lat są prowadzone prace nad otrzymywaniem i charakterystyką kompozytów poliolefinowych z udziałem różnych (nano)napelniaczy, zarówno nieorganicznych jak i pochodzących z odnawialnych źródeł roślinnych. Ogólna charakterystyka tych prac została przedstawiona w niniejszej publikacji.

Joanna Barton i Arkadiusz Niemczyk są stypendystami projektu „Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukowe województwa opolskiego” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura:

- Kickelbick G.: *Hybrid Materials*. WILEY-VCH 2007.
- Work W.J., Horie K., Hess M., Stepto R.F.T.: *Definition of terms related to polymer blends, composites and multiphase polymeric materials*. Pure and Applied Chemistry 2004, **76**, 1985.
- U.S. Congress: *Office of Technology Assessment, Advanced Materials by Design*. U.S. Government Printing Office 1988.
- German J.: *Materiały kompozytowe w budownictwie*. Kalejdoskop Budowlany PWB 2000, **6**, 14–17.
- Nwabunma D., Kyu T.: *Polyolefin Composites*. Wiley-Interscience 2008.
- Królikowski W., Rostaniec Z.: *Nanokompozyty polimerowe*. Composites 2004, **4**, 3–16.
- Spasówka E., Rudnik E., Kijęński J.: *Biodegradowalne nanokompozyty polimerowe*. Polimery 2006, **51**, 617–626.
- Jurczyk M.: *Nanomateriały. Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2001, 7–9.
- Rabek J.F.: *Współczesna wiedza o polimerach*. Wydawnictwo Naukowe PWN 2008.
- Okada A., Kawasumi M., Usuki A., Kojima Y., Kurauchi T., Kamigaito O.: *Nylon 6-Clay Hybrid*. Materials Research Society 1989, **171**, 45–50.
- Nour M. A.: *Polymer/clay nanocomposites*. Polimery 2002, **47**, 326–331.
- Yariv S., Cross H.: *Organo-Clay Complexes and Intercalations*. Dekker 2001.
- Okamoto M.: *Polymer/Layered Silicate Nanocomposites*. RAPRA Technology 2003.

14. Saito R., Dresselhaus G., Dresselhaus M. S.: *Physical properties of carbon nanotubes*. Imperial College Press 1998.
15. Pietrzak Ł., Jeszka J. K.: *Nanokompozyty polilaktyd/wielościennie nanorurki węglowe – otrzymywanie i właściwości elektryczne*. *Polimery* 2010, **55**, 524–528.
16. Potschke P., Fornes, T. D., Paul D. R.: *Rheological behavior of multiwalled carbon nanotube/polycarbonate composites*. *Polymer* 2002, **43**, 3247–3255.
17. Zhang Q., Lippits D. R., Rastogi S.: *Dispersion and Rheological Aspects of SWNTs in Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene*. *Macromolecules* 2006, **39**, 658–666.
18. Jeziórska R., Świerż-Motyśa B., Szadkowska A., Marciniak B., Maciejewski H., Dutkiewicz M., Leszczynska I.: *Effect of POSS on morphology, thermal and mechanical properties of polyamide 6*. *Polimery* 2011, **56**, 809–816.
19. Rościszewski P., Kaźmierczuk R., Soltysiak J.: *Syntezy silseskwioxanów z różnymi podstawnikami organicznymi*. *Polimery* 2006, **51**, 3–11.
20. Li L., Li X., Yang R.: *Mechanical, Thermal Properties, and Flame Retardancy of PC/Ultrathin Octaphenyl-POSS Composites*. *Journal of Applied Polymer Science* 2012, **124**, 3807–3814.
21. Milliman H. M.: *Reinforcement of melt-blend composites; Polymer-filler interactions, phase behavior, and structure-property relationships*. PhD thesis 2011.
22. Ye Y., Yen Y., Chen W., Cheng C., Chang F.: *A Simple Approach Toward Low-Dielectric Polyimide Nanocomposites: Blending the Polyimide Precursor with a Fluorinated Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane*. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry* 2008, **46**, 6296–6304.
23. Fina A., Tabuani D., Frache A., Camino G.: *Polypropylene-polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) nanocomposites*. *Polymer* 2005, **46**, 7855–7866.
24. Chen J., Yao B., Su W., Yang Y.: *Isotermal crystallization behavior of isotactic polypropylene blended with small loading of polyhedral oligomeric silsesquioxane*. *Polymer* 2007, **48**, 1756–1769.
25. Joshi M., Butola B. S.: *Isothermal Crystallization of HDPE/Octamethyl Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane Nanocomposites: Role of POSS as a Nanofiller*. *Journal of Applied Polymer Science* 2007, **105**, 978–985.
26. Joshi M., Butola B. S., Simon G., Kukaleva N.: *Rheological and Viscoelastic Behavior of HDPE/Octamethyl-POSS Nanocomposites*. *Macromolecules* 2006, **39**, 1839–1849.
27. Joshi M., Butola B. S.: *Studies on nonisothermal crystallization of HDPE/POSS nanocomposites*. *Polymer* 2004, **45**, 4953–4968.
28. Penczek S., Pretula J., Lewiński P.: *Polimery z odnawialnych surowców, polimery biodegradowalne*. *Polimery*, 2013, **58** (11–12) 833–958.
29. Nagarajan, V., Mohanty, A.K., Misra, M.: *Sustainable green composites: Value addition to agricultural residues and perennial grasses*. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 2013, **1** (3), 325–333.
30. Georgopoulos, S.Th., Tarantili, P.A., Avgerinos, E., Andreopoulos, A.G., Koukios, E.G.: *Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues*. *Polymer Degradation and Stability* 2005, **90** (2 SPEC. ISS.), 303–312.
31. Błędzki A.K., Jaszkievicz A., Urbaniak M., Stankowska-Walczak D.: *Bio-composites in the past and in the future*, *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2005, **96** (6 B), 15–22.
32. Faruk O., Błędzki A.K., Fink H.-P., Sain, M.: *Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites*. *Macromolecular Materials and Engineering* 2014, **299**, 9–26, DOI: 10.1002.
33. <http://bio-based.eu/news/biocomposites>, 20.01.2014.
34. Faruk O., Błędzki A.K., Fink H.P., Sain M.: *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010*. *Progress in Polymer Science* 2012, **37**, 1552–1596.
35. Nabi Saheb D., Jog J.P.: *Natural fibre polymer composites: a review*. *Advances in Polymer Technology* 1999, **18** (4), 351–363.
36. Praca zbiorowa pod redakcją Stanisława Kuciela.: *Kompozyty polimerowe na podstawie recyklatów z włóknami naturalnymi*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2010, 7–16.
37. Gatenholm P., Bertilsson H., Mathiasson A.: *The effect of chemical composition of interphase on dispersion of cellulose fibres in polymers. I. PVC-coated cellulose in polystyrene*. *Journal of Applied Polymer Science* 1993, **49** (2), 197–208.
38. Dale Ellis W., O'Dell J.L.: *Wood-polymer composites made with acrylic monomers, isocyanate and maleic anhydride*. *Journal of Applied Polymer Science* 1999, **73** (12), 2493–2505.
39. Mani P. Satyanarayan K.G.: *Effects of the surface treatments of lignocellulosic fibres on their debonding stress*. *Journal of Adhesion Science and Technology* 1990, **4** (1), 17–24.
40. Joseph K., Thomas S., Pavithran C.: *Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites*. *Polimery* 1996, **37** (23), 5139–49.
41. Razi PS., Portier R., Raman A.: *Studies on polymer-wood interface bonding: effect of coupling agents and surface modification*. *Journal of Composites Material* 1999, **33** (12), 1064–79.
42. Kaczmar, J.W., Pach, J., Kozłowski, R.: *Wykorzystanie włókien naturalnych jako napelnaczy kompozytów polimerowych*. *Polimery* 2006, **51** (10), 722–726.

Mgr Joanna BARTON jest absolwentką Wydziału Chemii Uniwersytetu Opolskiego (2011). Obecnie jest słuchaczem Środowiskowych Studiów Doktoranckich Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej i Wydziału Chemii Uniwersytetu Opolskiego. Specjalność – otrzymywanie i charakterystyka kompozytów z odnawialnymi napelniaczami roślinnymi, oraz badania procesów biodegradacji materiałów obejmujących ocenę właściwości fungistatycznych.
e-mail: jbarton@uni.opole.pl, tel. 77 452 7135

Mgr Arkadiusz NIEMCZYK jest absolwentem Wydziału Chemii Uniwersytetu Opolskiego (2013). Obecnie jest słuchaczem Środowiskowych Studiów Doktoranckich Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej i Wydziału Chemii Uniwersytetu Opolskiego. Zainteresowania naukowe – chemia i technologia polimerów, a w szczególności wytwarzanie oraz modyfikacja materiałów kompozytowych oraz nanokompozytów.
e-mail: aniemczyk@uni.opole.pl, tel. 77 452 7135.

Prof. dr hab. inż. Krystyna CZAJA w roku 1970 ukończyła studia na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Śląskiej. Stopnie naukowe uzyskała na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej: dr (1977) oraz dr hab. nauk chemicznych (1992). Tytuł naukowy profesora nauk chemicznych otrzymała w roku 2002. Pracuje na opolskiej uczelni od 1973 r., obecnie na stanowisku profesora zwyczajnego na Wydziale Chemii Uniwersytetu Opolskiego. Specjalność – chemia i technologia polimerów, głównie poliolefin w tym synteza katalizatorów metaloorganicznych i niskociśnieniowa (ko)polimeryzacja olefin z ich udziałem, fizyczna i chemiczna modyfikacja polimerów, kompozyty i nanokompozyty polimerowe, charakterystyka właściwości strukturalnych, molekularnych i użytkowych materiałów polimerowych, w szczególności badania procesów ich termo-, foto- i biodegradacji.
e-mail: krystyna.czaja@uni.opole.pl, 77 452 7140

* Dr Łukasz KORACH jest absolwentem Wydziału Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Opolskiego (1998). Stopień naukowy doktora nauk chemicznych uzyskał w roku 2005. Obecnie zatrudniony jest na Wydziale Chemii Uniwersytetu Opolskiego na stanowisku adiunkta. Zainteresowania naukowe – chemia i technologia polimerów.
e-mail: lukasz.korach@uni.opole.pl, tel. 77 452 7146

Mgr Beata SACHER-MAJEWSKA jest absolwentką Instytutu Chemii Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Opolu. Obecnie pracuje na Wydziale Chemii Uniwersytetu Opolskiego, pełniąc funkcję kierownika Pracowni Analizy Termicznej. Zainteresowania naukowe – chemia polimerów, w tym głównie ich charakterystyka termiczna, badanie rozkładu składu kopolimerów, badanie odporności materiałów na degradację termiczną w warunkach tlenowych i beztlenowych.
e-mail: beata.sacher@uni.opole.pl ; tel. 77 452 7148