

Mikrostruktura tripolifosforanu sodu otrzymanego metodą rozpyłowo-piecową

Marcin BANACH, Zygmunt KOWALSKI, Agnieszka MAKARA – Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2011, **65**, 10, 1077-1084

Wstęp

Skondensowane fosforany klasyfikowane są jako polimery nieorganiczne. Istnieją trzy rodzaje skondensowanych fosforanów: polifosforany, fosforany cykliczne i ultrafosforany. Polifosforany mają strukturę łańcuchową, a ultrafosforany strukturę sieci. Stopień polimeryzacji może przyjmować wartości od 2 do 106 [1 ÷ 3].

Jednym z najważniejszych wytwarzanych skondensowanych fosforanów sodu jest tripolifosforan sodu ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, TPFS). Od 1940 r. jest on masowo produkowany i stosowany jako komponent środków czystości. Przyczyną szerokiego stosowania TPFS w detergentach są jego bardzo korzystne właściwości: zdolność sekwestracji jonów wapnia i magnezu w twardej wodzie, zdolności buforujące, zdolność stabilizowania emulsji, zdolność deflokulacji i dyspersji [4, 5].

Tripolifosforan sodu (trifosforan(V) pentasodu, TPFS) występuje w trzech formach krystalicznych. Stabilną formą jest sól sześciowodna ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Pozostałe dwie formy polimorficzne są solami bezwodnymi określanymi jako Faza I (wysokotemperaturowa) i Faza II (niskotemperaturowa) [6 ÷ 8].

Faza I tworzy się w temperaturze powyżej 450°C. Faza II w temperaturach do ok. 400°C. Produkowany TPFS zawiera w praktyce obydwie fazy.

Anion tripolifosforanu sodu składa się z trzech skondensowanych tetraedrów fosforanowych. Wiązania P-O w anionie tworzą linię łańcuchową. Struktura anionu Fazy I w stosunku do Fazy II charakteryzuje się większą deformacją końcowych grup PO_4 i odwrotną symetrią wewnętrzną cząsteczki [8 ÷ 10].

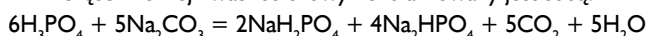
Zarówno Faza I jak i Faza II krystalizują w układzie jednoskośnym. Główna różnica w ich strukturze występuje w koordynacji jonów sodu [11 ÷ 13]. Dwa z trzech krystalograficznie niezależnych atomów sodu Fazy I, skoordynowane są przez zdeformowane oktaedry tlenu, przy czym jeden z nich usytuowany jest w środku inwersji. Trzeci atom sodu otoczony jest tylko czterema atomami tlenu.

W strukturze krystalograficznej Fazy II, trzy niezależne atomy sodu skoordynowane są oktaedrycznie przez atomy tlenu.

Faza I, w porównaniu do Fazy II, charakteryzuje się większą szybkością procesu hydratacji, wynikającą z deformacji jej struktury krystalicznej.

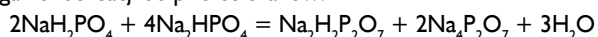
W przemyśle stosowane są metody jednostopniowe i dwustopniowe produkcji tripolifosforanu sodu. Bez względu na metodę produkcyjną, tripolifosforan sodu otrzymywany jest w wyniku trzech procesów chemicznych, a ciąg technologiczny składa się z części mokrej i suchej [14].

W części mokrej kwas fosforowy neutralizowany jest sodą:

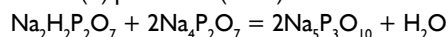


Stosunek molowy $\text{Na}_2\text{O}:\text{P}_2\text{O}_5$ (TM) dla procesu neutralizacji wynosi ok. 1,67. W wyniku tego procesu otrzymuje się mieszaninę ortofosforanów, w której na 1 mol fosforanu(V) sodu przypadają 2 mole fosforanu(V) disodu.

W części suchej instalacji produkcyjnej ma miejsce suszenie i kalcynacja fosforanów. W czasie suszenia mieszanina fosforanów(V) sodu ulega kondensacji do pirofosforanów:



Powstała mieszanina pirofosforanów sodu (diwodoropirofosforanu disodu i pirofosforanu tetrasodu) kondensuje w procesie kalcynacji tworząc trifosforan(V) pentasodu (TPFS):



Parametry procesu suszenia i kalcynacji wpływają na właściwości fizykochemiczne otrzymanego produktu. Temperatura kalcynacji jest parametrem decydującym o stosunku masowym Fazy I do Fazy II w produkcie finalnym [8, 9, 14].

W pracy przedstawiono wyniki badań otrzymywania tripolifosforanu sodu, jego właściwości fizykochemiczne i wpływ temperatury na morfologię produktów kalcynacji.

Część eksperymentalna

Surowcem stosowanym w badaniach była mieszanina fosforanów sodu uzyskana w wyniku suszenia rozpyłowego roztworu fosforanów na instalacji przemysłowej TPFS.

W celu otrzymania tripolifosforanu sodu, mieszkankę fosforanów sodu kalcynowano w piecu komorowym przez 60 minut w temperaturach 350-550°C.

Identyfikację składu fazowego stosowanego surowca oraz produktów określono metodą rentgenograficzną z zastosowaniem dyfraktometru Philips X'Pert z grafitowym monochromatorem PW W 1752/00.

Do analizy termicznej fosforanów sodu zastosowano termoanalyzer SDT 2960 Simultaneous DTA-DTG TA. Pomiar prowadzono w atmosferze powietrza w zakresie temperatur 20-800°C, stosując szybkość grzania 20°C/min.

Zdjęcia ziaren wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego Nikon Eclipse LV100. Materiał badawczy scharakteryzowano również za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego Hitachi S-4700, co pozwoliło na określenie jego morfologii. Do analizy próbki były napyłane Pd/Pt za pomocą napyłarki Cressington 208 HR, firmy Cressington Scientific Instruments Ltd.

Metody adsorpcyjne, oparte na wyznaczaniu izoterm adsorpcji/desorpcji gazów, wykorzystano do określenia powierzchni właściwej badanych materiałów, objętości porów oraz dystrybucji ich wielkości. Pomiaru adsorpcji/desorpcji azotu dokonano za pomocą aparatu ASAP 2405 firmy Micromeritics.

Pomiary gęstości właściwej wykonano za pomocą piknometru helowego AccuPyc 1330 produkcji amerykańskiej firmy Micromeritics. Oznaczenie gęstości nasypowej wykonano zgodnie z normą PN-80/C-04532 [15]. Gęstość piknometryczną granulowanego materiału wyznaczono za pomocą piknometru szklanego. Jako cieczy o znanej gęstości, niereagującej z analizowanymi próbkami, użyto nafty. Znając odpowiednie gęstości materiału porowatego, określono jego porowatość całkowitą i porowatość otwartą.

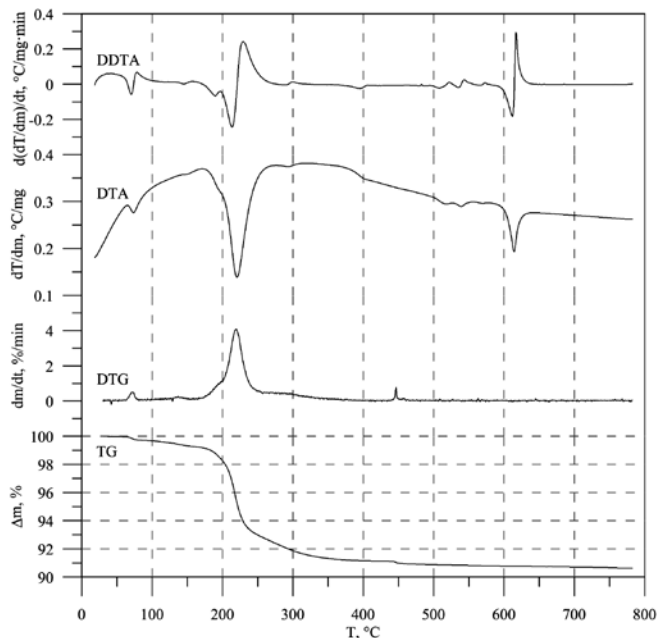
Omówienie wyników

Na podstawie wyników analizy rentgenograficznej określono, że podstawową fazą krystaliczną stosowanego surowca jest sól podwójna ortofosforanu monosodu i disodu ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{HPO}_4$). Fazami towarzyszącymi soli podwójnej są ortofosforan disodu

(Na_2HPO_4), dwuwodny ortofosforan sodu ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pirofosforan sodu ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) oraz ortofosforan monosodu (NaH_2PO_4).

Wynik analizy termicznej wysuszonych rozpyłowo fosforanów sodu, pozwalający na określenie przemian fazowych zachodzących w trakcie procesu otrzymywania tripolifosforanu sodu, przedstawiono na Rysunku 1.

W temperaturze ok. 73°C oddawana jest woda zaadsorbowana i następuje rozkład $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.



Rys. 1. Wynik analizy termicznej fosforanów sodu

W trakcie suszenia rozpyłowego roztworu ortofosforanów sodu mogą powstawać związki o tak zdefektowanej strukturze, że podobne są do substancji bezpostaciowych. W miarę wzrostu temperatury w procesie kalcynacji (do ok. 130°C) ulegają one rekrystalizacji.

W zakresie temperatur $180\text{--}200^\circ\text{C}$ fosforan(V) monosodu ulega konwersji do diwodoropirofosforanu disodu ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$). W temperaturach $200\text{--}250^\circ\text{C}$ tworzy się $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$. W temperaturze ok. 200°C zaczyna się również tworzyć bezwodny $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$. Szybkość jego tworzenia się wzrasta przy dalszym ogrzewaniu i w temperaturze ok. 290°C osiąga maksymalną wartość. W temperaturach do 450°C struktura kondensatu przyjmuje postać Fazy II. W zakresie $450\text{--}550^\circ\text{C}$ następuje transformacja Fazy II do Fazy I.

Obserwowane, w zakresie $360\text{--}410^\circ\text{C}$, przemiany są związane z przemieszczaniem się atomów wskutek dyfuzji w fazie stałej, które prowadzą do syntezy nowych związków, dzięki przebudowie struktury materiału pierwotnego. W temperaturach powyżej 350°C zaczynają powstawać małowielkośćkowe metafosforany sodu (NaPO_3), które następnie przechodzą w formę wielkośćkową ($\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$). Efekt egzotermiczny w temperaturze ok. 480°C można powiązać z przemianą polimorficzną fazy niskotemperaturowej TPFS w fazę wysokotemperaturową.

Występujące na krzywej DTA trzy efekty endotermiczne w zakresie $500\text{--}590^\circ\text{C}$ charakterystyczne są dla warunków współistnienia ze sobą faz stałych i ciekłych. W takich warunkach faza stała ulega topnieniu w fazie ciekłej, co powoduje rozpad struktury krystalicznej. Całkowity rozkład termiczny współistniejących w produkcie faz krystalicznych następuje w temperaturze $600\text{--}630^\circ\text{C}$.

Badaniom poddano produkty otrzymane w wyniku kalcynacji fosforanów sodu w temperaturach $350\text{--}550^\circ\text{C}$ w czasie 60 minut. Wyniki analizy rentgenograficznej potwierdziły, że faza niskotempe-

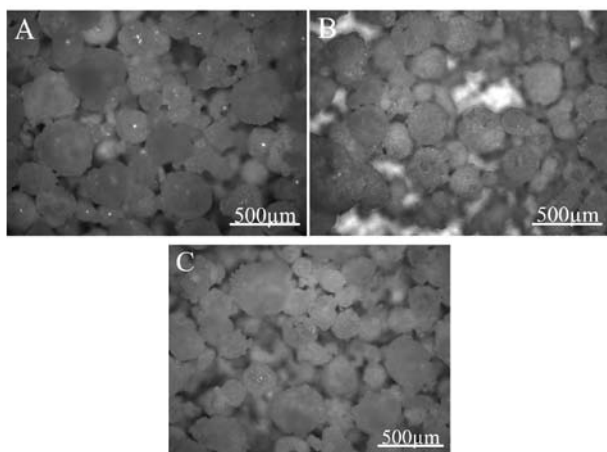
raturowa TPFS jest produktem kalcynacji prowadzonej w temperaturach $350\text{--}450^\circ\text{C}$. Przemiana fazowa Fazy II w Fazę I rozpoczyna się w temperaturze $450^\circ\text{C}\text{--}500^\circ\text{C}$. Produktem kalcynacji w 500°C jest mieszanina obydwu faz. Do temperatury 550°C następuje całkowita przemiana Fazy II w Fazę I.

W Tabelcy 1 zestawiono parametry tekstury cząstek surowca i otrzymanych produktów, określone na podstawie analizy izoterm sorpcji. W tabelcy 1 zamieszczono również wartości gęstości właściwej (d_w), gęstości nasypowej (d_n) i gęstości piknometrycznej (d_p). Na ich podstawie określono gęstość względną (d_{wz}) materiałów oraz ich porowatość całkowitą (P_c) i otwartą (P_o).

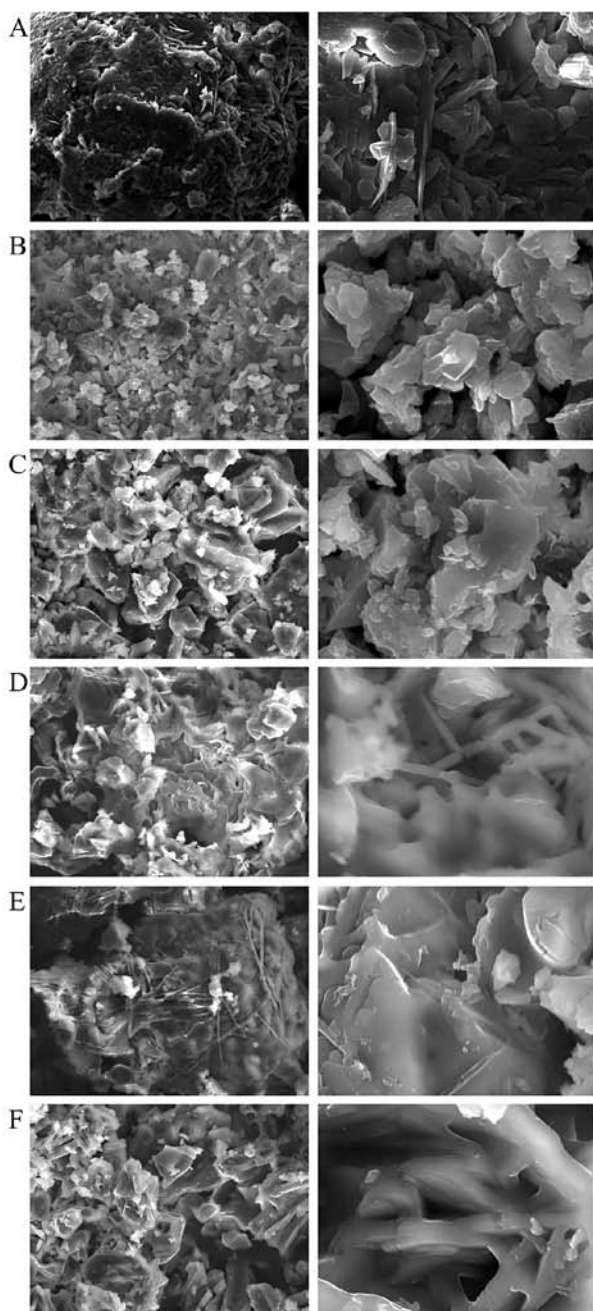
Tabela 1
Parametry mikrostruktury stosowanego surowca oraz produktów kalcynacji, wyznaczone na podstawie pomiarów densymetrycznych oraz pomiarów sorpcji azotu

Wielkość	Jednostka	Surowiec	Produkt				
			350	400	450	500	550
Temperatura kalcynacji (T)	$^\circ\text{C}$	-	350	400	450	500	550
Gęstość nasypowa (d_n)		0,4053	0,4073	0,4300	0,4083	0,4163	0,4327
Gęstość właściwa (d_w)	g/cm^3	2,4828	2,6307	2,6226	2,6135	2,6065	2,5975
Gęstość piknometryczna (d_p)		1,2961	1,6354	1,6582	1,6655	1,7066	1,7201
Gęstość względna (d_{wz})	%	16,32	15,48	16,40	15,62	15,97	16,66
Porowatość całkowita (P_c)	%	83,68	84,52	83,60	84,38	84,03	83,34
Porowatość otwarta (P_o)		68,73	75,09	74,07	75,48	75,61	74,84
Powierzchnia właściwa (S_{BET})	m^2/g	0,99	0,63	0,75	0,57	0,55	0,48
Zewnętrzna powierzchnia (S_e)		1,84	1,08	1,65	1,22	1,16	0,79
Powierzchnia mezoporów (S_{mezo})		1,17	0,76	0,99	0,75	0,68	0,55
Całkowita objętość porów (V_t)	cm^3/g	0,0022	0,0017	0,0017	0,0012	0,0011	0,0013
Objętość mezoporów (V_{mezo})		0,0021	0,0017	0,0016	0,0011	0,0011	0,0012
Średnia średnica porów (D_{sr})	nm	7,01	6,83	9,18	6,99	7,16	8,23
Średnica mezoporów (D_{mezo})		7,24	8,88	6,59	6,08	6,22	9,11

Na Rysunku 2 zamieszczono obrazy mikroskopowe cząstek stosowanego surowca oraz przykładowe obrazy produktów. Na Rysunku 3 zestawiono mikrofotografie SEM analizowanych próbek. Funkcję rozkładu objętości porów badanych materiałów, w zależności od liniowego wymiaru porów, przedstawiono na Rysunku 4.



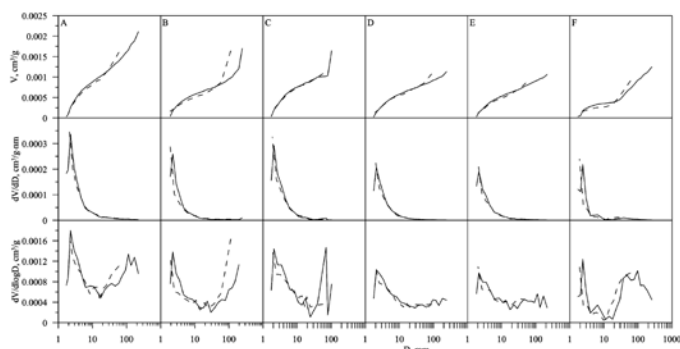
Rys. 2. Obrazy mikroskopowe cząstek fosforanów sodu po suszeniu rozpylowym (A) oraz tripolifosforanu sodu otrzymanego w 350°C (B) i 550°C (C)



Rys. 3. Mikrofotografie SEM: A – surowca, B-F – produktów kalcynacji otrzymanych w temperaturach 350, 400, 450, 500 i 550°C (powiększenie 1000 i 5000)

Duża porowatość całkowita fosforanów sodu ($P_c=83.68\%$), składająca się na ich niską wartość gęstości nasypowej, jest wynikiem charakterystycznej morfologii cząstek. Ziarna badanych fosforanów

sodu mają kulisty kształt i charakterystyczną strukturę „wydmuszki” o pofałdowanej powierzchni (Rys. 2). Analizując badany materiał w mikroobszarach, można stwierdzić, że nie jest on jednorodny (ziarna posiadają różne wielkości i kształty). Wyszuszone rozpylowo mieszanina ma formę polikrystalicznych agregatów. Zróżnicowane rozmiary oraz kształty posiadają również pory utworzone pomiędzy ziarnami.



Rys. 4. Rozkład objętości porów względem ich średnicy dla: A – surowca, B-F – produktów kalcynacji fosforanów sodu w temperaturach 350, 400, 450, 500 i 550°C (linia ciągła – adsorpcja, linia przerywana – desorpcja)

W trakcie procesu kalcynacji utrwalona zostaje struktura stosowanego surowca. Przedstawione zdjęcia mikroskopowe TPFs, obrazują sferyczną strukturę cząstek będącą wynikiem utrwalenia struktury „wydmuszek” cząstek fosforanów sodu po suszeniu rozpylowym (Rys. 2). Potwierdzeniem jest również wysoka porowatość całkowita i otwarta tego materiału (odpowiednio ok. 84% i 75%). Porowatość całkowita i otwarta surowca wynosi 84% i 70%.

W obrazie proszku otrzymanego w 350°C, w porównaniu z obrazem fosforanów sodu stosowanych jako surowiec (Rys. 3), zaobserwować można zmiany kształtu i wielkości ziaren. Ziarna ulegają częściowo zaokrągleniu i wzrastają ich rozmiary. Wzrasta również powierzchnia kontaktu pomiędzy nimi.

Skutkiem zmian mikrostruktury jest obniżenie powierzchni właściwej materiału z 0,99 m²/g dla fosforanów sodu do 0,63 m²/g dla tripolifosforanu sodu otrzymanego w 350°C (Tab. 1). Zmniejszeniu ulegają także objętości porów i ich rozmiary.

W temperaturze kalcynacji 400°C widoczne jest przejściowe rozluźnienie upakowania ziaren połączone z jednoczesnym wzrostem ich rozmiarów. Funkcje rozkładu porów (Rys. 4) wskazują na znaczny wzrost mezoporowatości materiału. Krzywa logarymiczna wskazuje również na wzrost zawartości makroporów. Zmiany te powodują wzrost rozwinięcia powierzchni właściwej materiału.

Dla mikrostruktury TPFs otrzymanego w temperaturach kalcynacji 450°C i 500°C charakterystyczne jest występowanie obłych oraz włóknistych ziaren. W temperaturach 450°C i 500°C w mikrostrukturze materiału następuje wzrost upakowania ziaren, wzrost ilości kontaktów pomiędzy nimi oraz ich rozmiarów. Zmniejszeniu ulega ilość i wielkość porów, a ziarna stopniowo tworzą lity szkielet materiału.

Struktura tripolifosforanu sodu otrzymanego w 550°C charakteryzuje się występowaniem monokrystalicznych ziaren o dobrze wykształconych płaskich ścianach powstałych przez zestalenie fazy ciekłej. W tej temperaturze kalcynacji, faza stała częściowo przechodzi w fazę ciekłą, która następnie krzepnie. Krzepnąca faza ciekła prowadzi do eliminacji porów o najmniejszych rozmiarach i obniżenia powierzchni właściwej. Jednocześnie proces ten prowadzi do utworzenia znacznej ilości makroporów.

Wnioski

Skład fazowy otrzymanych produktów zależy od temperatury kalcynacji. W temperaturach 350-450°C otrzymano Fazę II TPFs, w 500°C mieszaninę Fazy II i Fazy I, a w 550°C wyłącznie Fazę I.

Temperatura kalcynacji wpływa także na mikrostrukturę tripolifosforanu sodu. W zakresie temperatur 350-500°C ziarna ulegają zaokrą-

gleniu i wzrastają ich rozmiary. Po kalcynacji w 550°C ziarna posiadają postać włóknistą, następuje wzrost objętości porów i rozwinięcia swobodnych powierzchni. Zmiana morfologii jest wynikiem występowania w temperaturze powyżej 500°C fazy ciekłej. W wyniku obecności fazy ciekłej, występującej w postaci warstw rozdzielających stałe ziarna, następuje ich topnienie. Po przekroczeniu stężenia nasycenia, następuje ponowne wytrącenie fazy stałej z cieczy. Taki proces prowadzi do zmniejszenia objętości porów i większego upakowania ziaren.

Podczas kalcynacji fosforanów sodu, kontakty punktowe między ziarnami przekształcają się w kontakty fazowe o większym rozwinięciu powierzchni. W wyniku przenoszenia masy w porowatym zbiorze ziaren do pustych przestrzeni, następuje ich rozrost prowadzący do przekształcenie porowatego zbioru cząstek w lity polikryształ. Rezultatem przenoszenia masy jest również spadek rozwinięcia swobodnych powierzchni i przekształcenie ich części w granice ziaren. Wewnątrz obszarów o gęstym ułożeniu ziaren, pory o małych rozmiarach są eliminowane szybciej niż szerokie pory pomiędzy aglomeratami. Skutkuje to rozerwaniem kontaktów między ziarnami, wzrostem wymiarów i udziału objętościowego porów w obszarach między aglomeratami, a co za tym idzie, występowaniem niejednorodności mikrostruktury. Procesom przenoszenia masy towarzyszy szereg innych zjawisk, takich jak reakcje pomiędzy reagentami czy przemiany fazowe, które mogą powodować przejściowe zmiany mikrostruktury.

Literatura

- Hanna A.A., Sherief M.A., Morsi R.M.M.: Phosphorus Research Bulletin 2009, **23**, 90.
- Rashchi F., Finch J.A.: Minerals Engineering 2000, **13**, 1019.
- Kulaev L.S., Vagabov V.M., Kulakovskaya T.V.: The Biochemistry of Inorganic Polyphosphates. John Wiley & Sons 2004.
- Köhler J.: Journal of Business Chemistry 2006, **3**, 15.
- Yangxin Y., Jin Z., Bayly A.E.: Chinese Journal of Chemical Engineering 2008, **4**, 517.
- Kijkowska R., Kowalski Z., Pawłowska-Kozińska D., Wzorek Z.: Industrial & Engineering Chemistry Research 2004, **43**, 5221.
- Kijkowska R., Kowalski Z., Pawłowska-Kozińska D., Wzorek Z.: Crystal Research and Technology 2002, **10**, 1121.
- Van Wazer J.R.: *Phosphorus and Its Compounds*. Interscience Publishers INC, New York 1958.
- Toy A.D.E.: *The Chemistry of Phosphorus*. Pergamon International Library of Science, 3, Technology, Engineering and Social Studies 1973.
- Vasconcelos F., Cristol S., Paul J.F., Tricot G., Amoureux J.P., Montagne L., Mauri F., Delevoye L.: Inorganic Chemistry 2008, **16**, 7327.
- Corbridge D.E.C.: Acta Crystallographica 1960, **13**, 263.
- Davies D.R., Corbridge D.E.C.: Acta Crystallographica 1958, **11**, 315.
- Durif, Crystal Chemistry of Condensed Phosphates, Plenum Press, 1994.
- Kowalski Z., Kijkowska R., Pawłowska-Kozińska D., Wzorek Z.: Polish Journal of Chemical Technology 2002, **3**, 27.
- PN-80/C-04532. Oznaczanie gęstości nasypowej.

Dr inż. Marcin BANACH ukończył studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej (2006). Jest adiunktem na tej uczelni. Specjalność – technologia chemiczna nieorganiczna.
e-mail: marcinbanach@chemia.pk.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Zygmunt KOWALSKI jest absolwentem Uniwersytetu Jagiellońskiego (1969). Kierownik Katedry Technologii Nieorganicznej i Biotechnologii Środowiska Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej. Specjalność: technologia związków nieorganicznych i inżynieria środowiska.

Mgr inż. Agnieszka MAKARA ukończyła studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej (2007). Jest doktorantką w Katedrze Technologii Nieorganicznej i Biotechnologii Środowiska tej uczelni. Specjalność: technologia chemiczna nieorganiczna.

Projekt OGLE - naukę na światowym poziomie

Grupa Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) pod kierownictwem naukowym prof. Andrzeja Udalskiego z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Warszawskiego odkrywa więcej najróżniejszych gwiazd zmiennych niż ktokolwiek wcześniej. Badanie tak dużych zbiorów gwiazd pozwala zauważyć istotne, nieznanne wcześniej właściwości tych obiektów. Projekt OGLE to masowy przegląd nieba rozpoczęty przez astronomów z Uniwersytetu Warszawskiego w 1992 r. Obserwacje prowadzono za pomocą amerykańskiego teleskopu o nazwie SWOPE w Obserwatorium Las Campanas w Chile. W 1996 roku, dzięki zaangażowaniu profesorów Andrzeja Udalskiego, Marcina Kubiaka, Michała Szymańskiego i Bohdana Paczyńskiego, w Las Campanas powstał Teleskop Warszawski. Dzięki temu możliwe jest badanie budowy wewnętrznej gwiazd, mierzenie dokładnie ich masy i rozmiaru, badanie ewolucji gwiazd, mierzenie odległości we wszechświecie, itd. Produktem ubocznym projektu OGLE są bardzo precyzyjne pomiary jasności setek milionów gwiazd, a wśród nich wielu gwiazd zmiennych. Grupa OGLE odkrywa więcej najróżniejszych gwiazd zmiennych niż ktokolwiek wcześniej. Badanie tak dużych zbiorów gwiazd pozwala zauważyć istotne, nieznanne wcześniej właściwości tych obiektów, których wyjaśnienie często staje się wyzwaniem dla teoretyków. We wciąż rosnących bazach danych uczeni wynajdują też zupełnie nowe, nieobserwowane wcześniej typy gwiazd. Przykład projektu OGLE pokazuje, że w Polsce też można robić naukę na światowym poziomie. Badania astronomiczne (z nielicznymi wyjątkami) nie mają obecnie znaczenia praktycznego, i przynajmniej w najbliższej przyszłości nie będą go miały. Dawniej astronomia spełniała istotną rolę praktyczną, na przykład przy ustalaniu kalendarza czy przy wyznaczaniu położeń i kierunków na Ziemi. Współcześnie głównym celem astronomii jest zaspokajanie ludzkiej ciekawości: jak wygląda świat, w którym żyjemy? Jak powstał i czym tak naprawdę jest wszechświat? Jak jest zbudowany? Czy prawa fizyki zmieniają się w czasie i przestrzeni? Jak działają gwiazdy? Czy istnieją planety wokół innych gwiazd i czy może na nich istnieć życie?

(<http://www.naukawpolsce.pap.pl/6.09.2011>)