

JUSTYNA MICHNA*, SILVIA IRUSTA**, AGNIESZKA KYZIOŁ*
(UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI*, UNIVERSITY OF ZARAGOZA**,
NETWORKING RESEARCH CENTER ON BIOENGINEERING, BIOMATERIALS AND NANOMEDICINE**)

OTRZYMYWANIE WŁÓKIEN ALGINIANOWYCH I CHITOZANOWYCH METODĄ ELEKTROPRZĘDZENIA

STRESZCZENIE

Elektroprzędzenie (ang. *electrospinning*) jest prostą i efektywną techniką pozwalającą na produkcję włókien polimerowych. W metodzie elektroprzędzenia siły elektrostatyczne są używane do produkcji włókien lub sfer o różnej morfologii i rozmiarach w skali mikro- i nanometrów. Obecnie ponad 100 polimerów, naturalnych i syntetycznych, zostało z powodzeniem wytworzonych w procesie elektroprzędzenia. Na proces elektroprzędzenia wpływa wiele parametrów, między innymi lepkość roztworu, średnia masa cząsteczkowa polimeru, przyłożone napięcie, prędkość przepływu.

Elektroprzędzenie biopolimerów, alginianu i chitozanu jest wyzwaniem. Te dwa naturalne polimery charakteryzują się niską toksycznością, biodegradowalnością i właściwościami antybakteryjnymi, co jest szeroko wykorzystywane i pożądane w aplikacjach biomedycznych. W prezentowanej pracy omówiono wpływ warunków elektroprzędzenia na proces otrzymywania włókien alginianowych domieszkowanych poli(tlenkiem etylenu) i włókien chitozanowych otrzymywanych z roztworu kwasu trifluoroctowego i dichlorometanu.

SŁOWA KLUCZOWE

elektroprzędzenie, włókna, alginian, chitozan

INFORMACJE O AUTORKACH

Justyna Michna
Zakład Chemii Nieorganicznej, Wydział Chemii
Uniwersytet Jagielloński
e-mail: justyna_michna@interia.pl

Agnieszka Kyzioł
Zakład Chemii Nieorganicznej, Wydział Chemii
Uniwersytet Jagielloński
e-mail: kyzioł@chemia.uj.edu.pl

Silvia Irusta
Department of Chemical Engineering and Nanoscience, Institute of Aragon (INA)
University of Zaragoza
Networking Research Center on Bioengineering, Biomaterials and Nanomedicine,
CIBERBBN, 50018 Zaragoza, Spain
e-mail: sirusta@unizar.es

WSTĘP

Elektroprzędzenie jest procesem, w którym siły elektrostatyczne używane są do produkcji włókien i nanowłókien. Termin elektroprzędzenie wywodzi się ze słów „elektrostatyczne przędzenie”. Po raz pierwszy użycie techniki elektroprzędzenia odnotowano w 1934 roku, kiedy to Anton Formhals wydał serię patentów opisującą eksperymentalny proces otrzymywania włókien polimerowych przy użyciu prądu elektrycznego. Obecnie elektroprzędzenie wzbudza szerokie zainteresowanie w nanotechnologii, będąc techniką prostą w użyciu, niewymagającą wysokich nakładów pieniężnych oraz umożliwiającą efektywne otrzymywanie struktur włóknistych lub włókien o średnicach rzędu mikro- lub nanometrów. Obecnie około 100 różnych polimerów, zarówno syntetycznych, jak i naturalnych, zostało z powodzeniem poddanych procesowi elektroprzędzenia. Materiały uzyskane metodą elektroprzędzenia charakteryzują się niezwykle wysokim stosunkiem powierzchni na jednostkę masy, wysoką porowatością, doskonałymi właściwościami mechanicznymi oraz elastycznością¹. Kolejnym ważnym aspektem jest możliwość modyfikacji włókien, na przykład tworzenie struktur typu *core-shell*², czy funkcjonalizacji powierzchni włókien, na przykład immobilizacja enzymów³. Wszystkie te cechy sprawiają, że nanowłókna uzyskane techniką elektroprzędzenia posiadają szerokie biomedyczne

¹ Z. M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, *A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites*, “Composites Science and Technology” 2003, No. 63, s. 2223–2253.

² M. Pakravan, M. C. Heuzey, A. Ajji, *Core-shell Structured PEO-Chitosan Nanofibers by Coaxial Electrospinning*, “Biomacromolecules” 2012, s. 412–421.

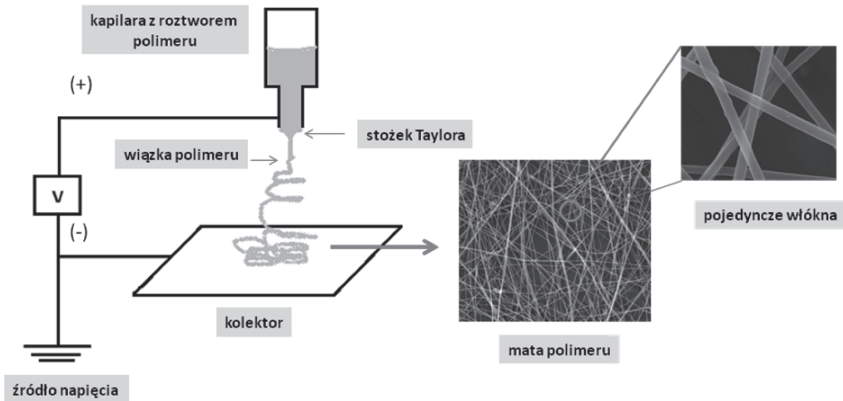
³ Z. G. Wang, L. S. Wan, Z. M. Liu, X. J. Huang, Z. K. Xu, *Enzyme Immobilization on Electrospun Polymer Nanofibers: An Overview*, “Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic” 2009, No. 56, s. 189–195.

zastosowanie między innymi jako opatrunki medyczne, rusztowania w inżynierii tkankowej czy systemy kontrolowanego dostarczania leków⁴. W niniejszej pracy technikę elektroprzędzenia przedstawiono na przykładzie otrzymywania włókien alginianowych i chitozanowych.

BUDOWA URZĄDZENIA DO ELEKTROPRZĘDZENIA NANOWŁÓKIEN I OPIS PROCESU

Urządzenie do elektroprzędzenia nanowłókien złożone jest z trzech elementów: źródła wysokiego napięcia, kapilary (strzykawki) zakończonej pipetą lub igłą o małych średnicach oraz kolektora (Ryc. 1)⁵.

Ryc. 1. Schemat zestawu do otrzymywania nanowłókien metodą elektroprzędzenia



Źródło: opracowanie własne.

⁴ K. Y. Lee, L. Jeong, Y. O. Kang, S. J. Lee, W. H. Park, *Electrospinning of Polysaccharides for Regenerative Medicine*, "Advanced Drug Delivery Reviews" 2009, No. 61, s. 1020–1032.

⁵ D. G. Yu, L. M. Zhu, K. White, C. Branford-White, *Electrospun Nanofiber-based Drug Delivery Systems*, "Health" 2009, No. 2, s. 67–75.

W technice elektroprzędzenia silne pole elektryczne przykładane jest do ciekłego polimeru, w wyniku czego następuje rozkład ładunków elektrycznych na powierzchni kropli polimeru wychodzącej z pipety lub igły. Jedna elektroda, o dodatnim potencjale, podpięta jest do kapilary z roztworem polimeru, druga, o ujemnym potencjale, do kolektora. Kiedy wzrasta napięcie elektryczne, znajdująca się u wyjścia igły kapilary półkolistą powierzchnią polimeru ulega wydłużeniu i tworzy charakterystyczny stożkowy kształt zwany stożkiem Taylora. Dalszy wzrost napięcia elektrycznego, aż do krytycznej wartości, powoduje, że siły kulombowskie, odpowiadające za odpychanie się przeciwstawnych ładunków, przewyżniają siły napięcia powierzchniowego kropli polimeru. Rozładowana wiązka roztworu polimeru zostaje wyrzucona z końcówki kapilary w kierunku kolektora. W międzyczasie rozpuszczalnik ulega odparowaniu, a na kolektorze zbierane są włókna⁶.

WARUNKI ELEKTROPRZĘDZENIA

Zmienne układu, które warunkują otrzymanie włókien polimerowych, możemy podzielić na trzy grupy: właściwości roztworu, parametry układu oraz warunki zewnętrzne.

1. WŁAŚCIWOŚCI ROZTWORU

Najważniejszą rolę w formowaniu włókien pełni stężenie polimeru w próbce. Odpowiednio operując stężeniem, możemy otrzymać różnorakie struktury polimerów, takie jak na przykład cząstki, sfery czy włókna. Przeważnie zwiększając stężenie polimeru w próbce, zwiększamy wielkość otrzymanych włókien. Zmiana stężenia polimeru wpływa na lepkość roztworu definiowaną jako splątanie łańcuchów cząsteczek polimeru. W rozcieńczonym roztworze odległości między łańcuchami są duże, dlatego nie dochodzi do oddziaływań pomiędzy pojedynczymi łańcuchami. Roztwory o dużej lepkości mogą powodować zapychanie igły i trudności z wyrzutem wiązki polimeru. W związku z tym, że stężenie i lepkość związane są ze średnią masą cząsteczkową polimeru, to ona w głównej mierze wpływa na wzrost stężenia roztworu i jego lepkości. Napięcie powierzchniowe oraz przewodnictwo elektryczne roztworu również wpływają na jakość powstałych włókien. Aby wiązka polimeru została wyrzucona z igły urządzenia do elektroprzędzenia nanowłókien, ładunki zakumulowane na powierzchni kropli roztworu muszą

⁶ Ibidem; M. Zamani, M. P. Prabhakaran, S. Ramakrishna, *Advances in Drug Delivery Via Electrospun and Electrosprayed Nanomaterials*, "International Journal of Nanomedicine" 2013.

przewyciężyć siły jego napięcia powierzchniowego. Napięcie powierzchniowe większości rozpuszczalników organicznych jest niskie, natomiast w przypadku wody jest ono wysokie. Z tego powodu elektroprzędzenie z wodnych roztworów jest trudne do wykonania. Pomocne w tym przypadku może okazać się użycie substancji powierzchniowo czynnych, tak zwanych surfaktantów.

2. PARAMETRY UKŁADU

W procesie wytwarzania nanowłókien kolejnym parametrem jest wielkość pola elektrycznego wywołującego formowanie strumienia polimeru między końcem igły a kolektorem. Z kolei szybkość przepływu roztworu ze strzykawki do igły decyduje o morfologii otrzymanyh włókien. Ogólnie, im niższa szybkość przepływu, tym lepiej, ponieważ dzięki temu polimer otrzymuje odpowiedni czas do zajścia procesu polaryzacji ładunków. Należy również zwrócić uwagę na dystans między końcówką igły a kolektorem. To, czy wiązka polimeru zostanie uformowana prawidłowo i czy rozpuszczalnik zdąży ulec odparowaniu, uwarunkowane jest właśnie dystansem igła – kolektor.

3. WARUNKI ZEWNĘTRZNE

Warunki zewnętrzne wpływające na morfologię i wielkości włókien to na przykład wilgotność. Niska wilgotność może powodować szybsze parowanie rozpuszczalnika, natomiast wysoka wilgotność wpływa na neutralizację ładunków rozłożonych na powierzchni polimeru, co obniża zdolności wiązki polimeru do rozciągania⁷.

ALGINIAN I CHITIZAN

W pracy poddawano elektroprzędzeniu dwa biopolimery: alginian i chitozan. Alginian jest anionowym polisacharydem zbudowanym z reszt kwasu β -D-mannurowego (bloki M) i α -L-guluronowego (bloki G) połączonych wiązaniem β -(1 \rightarrow 4)-glikozydowym. Otrzymywany jest ze ścian komórkowych brązowych alg. Jest związkiem bardzo dobrze rozpuszczalnym w wodzie⁸.

⁷ Z. Li, C. Wang, *One-Dimensional Nanostructures*, Springer Briefs in Materials, Chapter 2, 2013; *Solution Properties*, [online] <http://electrospintech.com/solution.html#VhPrqka9FC5> [dostęp: 23 X 2015].

⁸ A. Watthanaphanit, P. Supaphol, T. Furuike, S. Tokura, H. Tamura, R. Rujiravanit, *Novel Chitosan-Spotted Alginate Fibers from Wet-Spinning of Alginate Solutions Containing Emulsified Chitosan-Citrate Complex and their Characterization*, "Biomacromolecules" 2009, No. 10, s. 320–327.

Natomiast chitozan to kationowy polisacharyd, pochodna chityny, zbudowany z powtarzających się jednostek β -D-glukozaminy i N-acetylo-D-glukozaaminy połączonych wiązaniem β -(1 \rightarrow 4)-glikozydowym. Właściwości fizykochemiczne roztworów obu polimerów zależą od ich średnich mas cząsteczkowych oraz, w przypadku chitozanu, od stopnia deacetylacji. Zarówno alginian, jak i chitozan charakteryzuje niska toksyczność, brak immunogenności, pożądane właściwości antybakteryjne i antygrzybicze⁹.

Elektroprzędzenie alginianu i chitozanu jest wyzwaniem. W przypadku alginianu elektroprzędzenie z roztworów wodnych jest bardzo trudne do wykonania. Jest to spowodowane wysokim napięciem powierzchniowym i wysokim przewodnictwem elektrycznym wodnego roztworu alginianu, a także sztywnością łańcuchów alginianowych wynikającą z obecności bloków G w jego strukturze¹⁰. Z kolei chitozan jako polikation w wodnym roztworze kwasu przyczynia się do wzrostu napięcia powierzchniowego roztworu, co utrudnia prawidłowy proces elektroprzędzenia lub prowadzi do powstawania włókien domieszkowanych sferami¹¹.

ELEKTROPRZĘDZENIE ALGINANU

Celem prowadzonych badań był dobór odpowiednich warunków elektroprzędzenia włókien alginianowych, które można by było poddawać dalszej funkcjonalizacji. W związku z tym, w celu obniżenia napięcia powierzchniowego wodnego roztworu alginianu zastosowano dodatek poli(tlenku etylenu), który tworząc wiązania wodorowe z alginianem, powoduje obniżenie napięcia między jego łańcuchami, wzmagając ich splątanie¹². PEO przyczynia się również do wzrostu lepkości roztworu oraz przewodnictwa elektrycznego¹³. Podjęto

⁹ K. Y. Lee, L. Jeong, Y. O. Kang, S. J. Lee, W. H. Park, op. cit.

¹⁰ C. D. Saquing, C. Tang, B. Monian, C. A. Bonino, J. L. Manasco, E. Alsberg, S. A. Khan, *Alginate-Polyethylene Oxide Blend Nanofibers and the Role of the Carrier Polymer in Electrospinning*, "Industrial and Engineering Chemistry Research" 2013, No. 52, s. 8692–8704; C. A. Bonino, M. D. Krebs, C. D. Saquing, S. I. Jeong, K. L. Shearer, E. Alsberg, S. A. Khan, *Electrospinning Alginate-based Nanofibers: From Blends to Crosslinked Low Molecular Weight Alginate-only Systems*, "Carbohydrate Polymers" 2011, No. 85, s. 111–119.

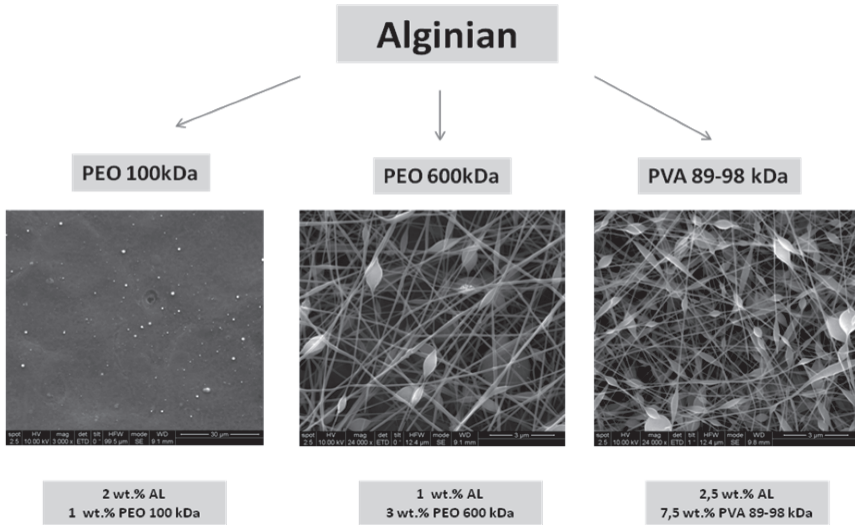
¹¹ K. Y. Lee, L. Jeong, Y. O. Kang, S. J. Lee, W. H. Park, op. cit.

¹² W. Shen, Y.-L. Hsieh, *Biocompatible Sodium Alginate Fibers by Aqueous Processing and Physical Crosslinking*, "Carbohydrate Polymers" 2014, No. 102, s. 893–900.

¹³ C. D. Saquing, C. Tang, B. Monian, C. A. Bonino, J. L. Manasco, E. Alsberg, S. A. Khan, *Alginate-Polyethylene Oxide Blend Nanofibers and the Role of the Carrier Polymer in Electrospinning*, "Industrial and Engineering Chemistry Research" 2013, No. 52, s. 8692–8704.

także próby domieszkowania poli(alkoholem winylowym) o średniej masie cząsteczkowej 89–98 kDa.

Ryc. 2. Zdjęcia SEM włókien alginianu (AL) domieszkowanych różnymi polimerami syntetycznymi: poli(tlenkiem etylenu) PEO oraz poli(alkoholem winylowym) PVA



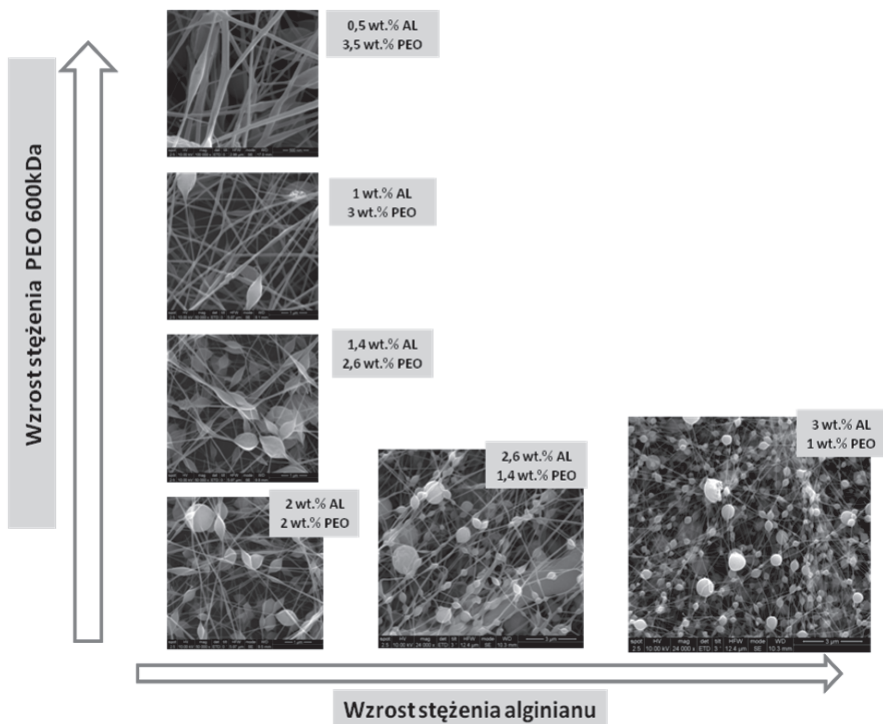
Źródło: opracowanie własne.

W wyniku elektroprzędzenia alginianu z PEO o średniej masie cząsteczkowej 100 kDa otrzymano jedynie pojedyncze cząstki polimerów (Ryc. 2), co spowodowane było prawdopodobnie zbyt niską średnią masą cząsteczkową PEO. Zwiększenie masy PEO do 600 kDa skutkowało otrzymaniem włókien domieszkowanych koralikami (Ryc. 2). Stwierdzono, że im dłuższe łańcuchy polimeru, tym większa zdolność polimeru do elektroprzędzenia z powodu większej elastyczności oraz łatwiejszego splątania łańcuchów¹⁴. Przeprowadzono próby doboru stosunku wagowego alginianu do PEO 600 kDa, tak aby wyeliminować powstawanie sfer wbudowanych w otrzymane włókna alginianowe. W przypadku próbek z więk-

¹⁴ W. Shen, Y.-L. Hsieh, op. cit.; H. Nie, A. He, W. Wu, J. Zheng, S. Xu, J. Li, C. C. Han, *Effect of Poly(ethylene Oxide) with Different Molecular Weights on the Electrospinnability of Sodium Alginate*, "Polymer" 2009, No. 50, 4926–4934.

szym stężeniem PEO 600 kDa parametry układu pozostawały niezmiennie: szybkość przepływu była równa 1 ml/h, odległość końcówka igły – kolektor wynosiła 15 cm, a przykładane ujemne napięcie wynosiło -3,0 kV. Zmieniano jedynie napięcie na dodatniej elektrodzie, wraz ze wzrostem stężenia PEO 600 kDa używano coraz niższego napięcia w celu ustabilizowania wiązki (od 10 kV do 6 kV). Stwierdzono, że im wyższa zawartość PEO 600 kDa w stosunku do alginianu w mieszaninie poddawanej elektroprzędzeniu, tym powstające włókna są w mniejszym stopniu domieszkowane sferami (Ryc. 3). Z kolei wraz ze wzrastającym stężeniem alginianu we włóknach, zmniejszając szybkość przepływu z 1 ml/h do 0,5 ml/h, z jednoczesnym podwyższaniem dodatniego napięcia z 10 kV do 11,5 kV (co zapewne spowodowane było wzrastającym napięciem powierzchniowym roztworu), otrzymywano włókna z koralikami.

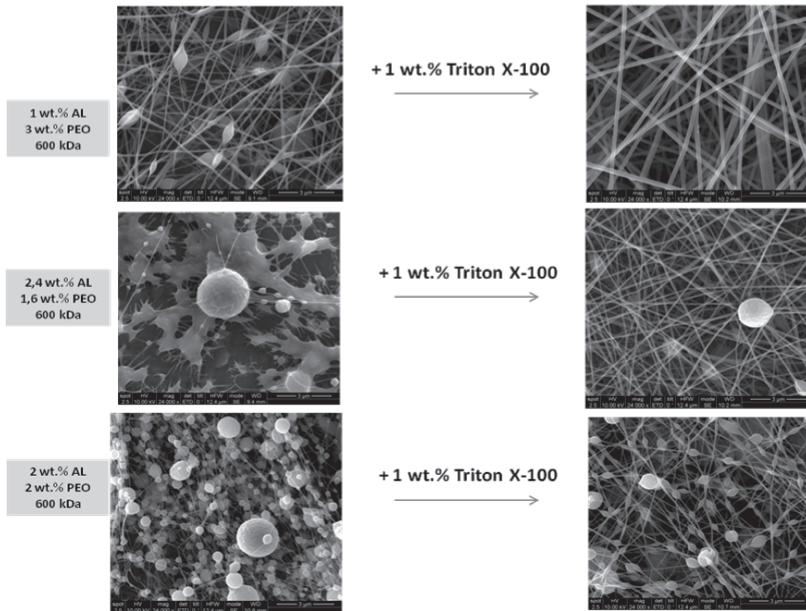
Ryc. 3. Zmiany morfologii włókien w wyniku zmian stężenia alginianu (AL) lub PEO 600 kDa



Źródło: opracowanie własne.

Zauważono także, że otrzymywane włókna posiadały w swej budowie liczne defekty. W związku z tym wprowadzono do mieszanin poddawanych procesowi przędzenia surfaktant Triton X-100 (Ryc. 4). Zadaniem surfaktantu było zmniejszenie napięcia powierzchniowego wodnego roztworu polimerów oraz poprawa zdolności roztworu do elektroprzędzenia¹⁵. Dodatek surfaktantu nie wymagał zmiany takich parametrów, jak szybkość przepływu (1 ml/h) i dystans igła – kolektor (15 cm), pozwolił natomiast na zmniejszenie wartości dodatniego napięcia do około 6 kV w przypadku każdej z próbek.

Ryc. 4. Zdjęcia SEM przedstawiające zmiany w strukturze włókien alginianu (AL) domieszkowanych PEO 600 kDa po dodatku surfaktantu



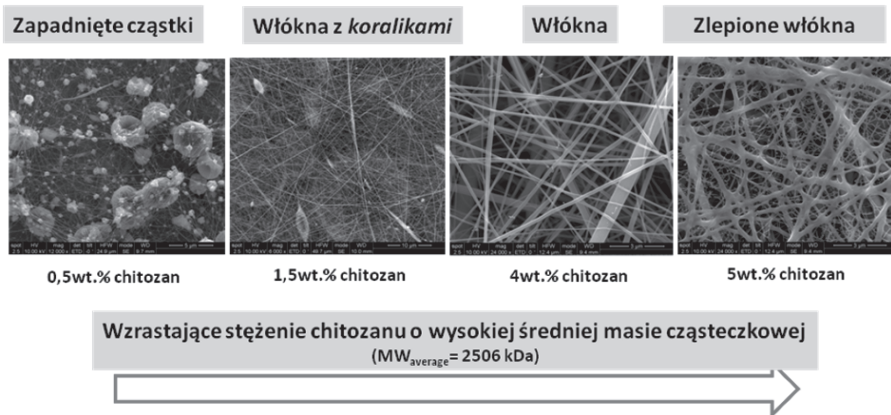
Źródło: opracowanie własne.

¹⁵ W. Shen, Y.-L. Hsieh, op. cit.

ELEKTROPRZĘDZENIE CHITOZANU

Elektroprzędzenie chitozanu o wysokiej średniej masie cząsteczkowej 2506 kDa przeprowadzono w roztworze kwasu trifluorooctowego i dichlorometanu zmieszanych w stosunku objętościowym 7:3¹⁶. Zaobserwowano wpływ stężenia chitozanu na morfologię otrzymanych włókien (Ryc. 5). Stopniowo zwiększając stężenie chitozanu, otrzymywano włókna o różnej morfologii. Przekraczając stężenie 4 wt.%, roztwór chitozanu był za lepki, co powodowało powstawanie zlepionych włókien. Stwierdzono, że odpowiedni dobór stężenia chitozanu oraz warunków elektroprzędzenia umożliwia otrzymanie włókien chitozanowych o różnej morfologii.

Ryc. 5. Zmiany morfologii chitozanu wraz ze zmianą stężenia roztworu



Źródło: opracowanie własne.

¹⁶ M. Z. Elsabee, H. F. Naguib, R. E. Morsi, *Chitosan Based Nanofibers, Review*, "Materials Science and Engineering C" 2012, No. 32, s. 1711–1726.

ELEKTROPRZĘDZENIE Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI RÓWNOCZESNEGO WSPÓŁOSIOWEGO ELEKTROFORMOWANIA

Metodą pozwalającą na otrzymanie dwuskładnikowych włókien o postaci rdzeń-powłoka jest technika równoczesnego współosiowego elektroformowania. Jest ona doskonałą metodą umożliwiającą połączenie dwóch polimerów oraz produkcję włókien o zwiększonej jakości i funkcjonalności. Technika równoczesnego współosiowego elektroformowania jest modyfikacją podstawowej techniki elektroprzędzenia, a istotną różnicą jest budowa igły kapilary, która składa się z dwóch części: wewnętrznej, przez którą wypływa roztwór rdzenia, i zewnętrznej, z roztworem powłoki. Roztwory pompowane są do igieł osobno, a ich połączenie następuje u wyjścia igły. Bardzo ważnym parametrem w procesie równoczesnego współosiowego elektroformowania jest dobór odpowiednich rozpuszczalników dla roztworów. Powinny one charakteryzować się dobrą mieszalnością oraz niskim napięciem powierzchniowym, aby doprowadzić do powstania stabilnego stożka Taylora. Ponadto nie powinny powodować wytrącenia któregoś z polimerów, kiedy ich roztwory spotkają się na końcu igły urządzenia do elektroprzędzenia nanowłókien¹⁷.

APLIKACJA WŁÓKIEN

Biomedyczne zastosowanie włókien otrzymanych metodą elektroprzędzenia jest szerokie, poniżej przedstawiono kilka przykładów.

Nyguen et. al. wykazali, że kompozyty *core-shell* zbudowane z poli(kwasu mlekowego) PLA oraz chitozanu charakteryzują się wysoką aktywnością antibakteryjną przeciw bakteriom *E. coli*¹⁸. Z kolei Spasova et. al. pokazali wykorzystanie włókien złożonych z chitozanu/PEO w stosunku wagowym 1:1 jako układów do kontrolowanego dostarczania leków. Maty wykazywały aktywność cytotoksyczną wobec szczepów *E. coli*, *S. aureus* i *C. albicans*¹⁹. Również włókna alginianowe domieszkowane poli(alkoholem winylowym) znalazły zastosowanie jako systemy do kontrolowanego dostarczania ciprofloksacyny,

¹⁷ F. Elahi, W. Lu, G. Guoping, F. Khan, *Core-shell Fibers for Biomedical Applications – A Review*, “Journal of Bioengineering & Biomedical Sciences” 2013, No. 3, s. 121.

¹⁸ T.T. T. Nguyen, O. H. Chungb, J. S. Park, *Coaxial Electrospun Poly(lactic Acid)/Chitosan (Core/Shell) Composite Nanofibers and Their Antibacterial Activity*, “Carbohydrate Polymers” 2011, No. 86, s. 1799–1806.

¹⁹ A. Spasova, N. Manolova, D. Paneva, I. Rashkov, *Preparation of Chitosan-containing Nanofibers by Electrospinning of Chitosan/Poly(ethylene Oxide) Blend Solutions*, “e-Polymers” 2013, No. 4.

modelowego leku przeciwdrobnoustrojowego²⁰. Ma et al. donoszą, że włókna zbudowane z alginianu i PEO charakteryzują się niską toksycznością oraz umożliwiają swobodną proliferację komórek na powierzchni, co wskazuje na ich możliwe wykorzystanie jako rusztowania w inżynierii tkankowej²¹.

PODSUMOWANIE

Celem artykułu było zaprezentowanie metody elektroprzędzenia. Technika ta pozwala na otrzymanie mikro- lub nanowłókien o szerokim zastosowaniu aplikacyjnym. W pracy pokazano, jak dobór odpowiednich warunków elektroprzędzenia, takich jak: lepkość, szybkość przepływu, napięcie elektryczne oraz dystans między igłą a kolektorem, pozwala na otrzymanie gładkich włókien alginianowych bądź chitozanowych. Ponadto, zwrócono uwagę na fakt, że elektroprzędzenie nie ogranicza się jedynie do produkcji włókien. Odpowiednio dobierając warunki eksperymentu, można otrzymać różnorodne formy morfologiczne polimeru, między innymi pojedyncze sfery. Prostota użytkowania, szybkość wykonania, możliwość wykorzystania ponad kilkudziesięciu polimerów to jedne z wielu zalet przedstawionej techniki. Włókna otrzymane metodą elektroprzędzenia mogą służyć między innymi jako systemy kontrolowanego dostarczania leku, rusztowania w inżynierii tkankowej czy medyczne opatrunki o właściwościach antymikrobiologicznych.

This work was supported by Foundation for Polish Science within POMOST project "Alginate/chitosan core-shell beads with bioactive functionalities" (POMOST/2013-7/7).

²⁰ K. Kataria, A. Gupta, G. Rath, R. B. Mathur, S. R. Dhakate, *In Vivo Wound Healing Performance of Drug Loaded Electrospun Composite Nanofibers Transdermal Patch*, "International Journal of Pharmaceutics" 2014, No. 469, s. 102–110.

²¹ G. Ma, D. Fang, Y. Liu, X. Zhu, J. Nie, *Electrospun Sodium Alginate/Poly(ethylene Oxide) Core-Shell Nanofibers Scaffolds Potential for Tissue Engineering Applications*, "Carbohydrate Polymers" 2012, No. 87, s. 737–743.

PREPARATION OF ALGINATE AND CHITOSAN FIBERS BY ELECTROSPINNING METHOD

Electrospinning is a simple and efficient method of polymer fibers fabrication. In this method electrostatic forces are used to obtain fibers or particles with different morphology and size from micro- to nanometers. Nowadays more than 100 polymers, natural or synthetic ones, have been successfully electrospun into fibers. Electrospinning process is affected by various different parameters such as viscosity, polymer's average molecular mass, voltage, flow rate, etc.

Electrospinning of biopolymers, alginate and chitosan, is difficult. Both of these polymers are non-toxic, biodegradable and possess antibacterial properties, all these properties are desirable in biomedical applications. In the presented work an influence of parameters of electrospinning on process of obtaining of alginate and chitosan fibers was presented and discussed. Alginate fibers were obtained with poly(ethylene oxide), while chitosan fibers were prepared from trifluoroacetic acid and dichloromethane solution.

KEYWORDS

electrospinning, fibers, alginate, chitosan

BIBLIOGRAFIA

1. Huang Z. M., Zhang Y. Z., Kotaki M., Ramakrishna S., *A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites*, "Composites Science and Technology" 2003, No. 63, s. 2223–2253.
2. Pakravan M., Heuzey M. C., Aji A., *Core-shell Structured PEO-Chitosan Nanofibers by Coaxial Electrospinning*, "Biomacromolecules" 2012, s. 412–421.
3. Wang Z. G., Wan L. S., Liu Z. M., Huang X. J., Xu Z. K., *Enzyme Immobilization on Electrospun Polymer Nanofibers: An Overview*, "Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic" 2009, No. 56, s. 189–195.
4. Lee K. Y., Jeong L., Kang Y. O., Lee S. J., Park W. H., *Electrospinning of Polysaccharides for Regenerative Medicine*, "Advanced Drug Delivery Reviews" 2009, No. 61, s. 1020–1032.
5. Yu D. G., Zhu L. M., White K., Branford-White C., *Electrospun Nanofiber-based Drug Delivery Systems*, "Health" 2009, No. 2, s. 67–75.
6. Zamani M., Prabhakaran M. P., Ramakrishna S., *Advances in Drug Delivery Via Electrospun and Electrospayed Nanomaterials*, "International Journal of Nanomedicine" 2013.
7. Li Z., Wang C., *One-Dimensional Nanostructures*, Springer Briefs in Materials, Chapter 2, 2013.
8. *Solution Properties*, [online] <http://electrospintech.com/solution.html#.VhPrqka9FC5> [dostęp: 23 X 2015].
9. Watthanaphanit A., Supaphol P., Furuie T., Tokura S., Tamura H., Rujiravanit R., *Novel Chitosan-Spotted Alginate Fibers from Wet-Spinning of Alginate Solutions*

- Containing Emulsified Chitosan-Citrate Complex and their Characterization*, "Biomacromolecules" 2009, No. 10, s. 320–327.
10. Saquing C. D., Tang C., Monian B., Bonino C. A., Manasco J. L., Alsborg E., Khan S. A., *Alginate-Polyethylene Oxide Blend Nanofibers and the Role of the Carrier Polymer in Electrospinning*, "Industrial and Engineering Chemistry Research" 2013, No. 52, s. 8692–8704.
 11. Bonino C. A., Krebs M. D., Saquing C. D., Jeong S. I., Shearer K. L., Alsborg E., Khan S. A., *Electrospinning Alginate-based Nanofibers: From Blends to Crosslinked Low Molecular Weight Alginate-only Systems*, "Carbohydrate Polymers" 2011, No. 85, s. 111–119.
 12. Shen W., Hsieh Y.-L., *Biocompatible Sodium Alginate Fibers by Aqueous Processing and Physical Crosslinking*, "Carbohydrate Polymers" 2014, No. 102, s. 893–900.
 13. Saquing C. D., Tang C., Monian B., Bonino C. A., Manasco J. L., Alsborg E., Khan S. A., *Alginate-Polyethylene Oxide Blend Nanofibers and the Role of the Carrier Polymer in Electrospinning*, "Industrial and Engineering Chemistry Research" 2013, No. 52, s. 8692–8704.
 14. Nie H., He A., Wu W., Zheng J., Xu S., Li J., Han C. C., *Effect of Poly(ethylene Oxide) with Different Molecular Weights on the Electrospinnability of Sodium Alginate*, "Polymer" 2009, No. 50, 4926–4934.
 15. Elsabee M. Z., Naguib H. F., Morsi R. E., *Chitosan Based Nanofibers, Review*, "Materials Science and Engineering C" 2012, No. 32, s. 1711–1726.
 16. Elahi F., Lu W., Guoping G., Khan F., *Core-shell Fibers for Biomedical Applications – A Review*, "Journal of Bioengineering & Biomedical Sciences" 2013, No. 3, s. 121.
 17. Nguyen T.T. T., Chungb O. H., Park J. S., *Coaxial Electrospun Poly(lactic Acid)/Chitosan (Core/Shell) Composite Nanofibers and Their Antibacterial Activity*, "Carbohydrate Polymers" 2011, No. 86, s. 1799–1806.
 18. Spasova A., Manolova N., Paneva D., Rashkov I., *Preparation of Chitosan-containing Nanofibers by Electrospinning of Chitosan/Poly(ethylene Oxide) Blend Solutions*, "e-Polymers" 2013, No. 4.
 19. Kataria K., Gupta A., Rath G., Mathur R. B., Dhakate S. R., *In Vivo Wound Healing Performance of Drug Loaded Electrospun Composite Nanofibers Transdermal Patch*, "International Journal of Pharmaceutics" 2014, No. 469, s. 102–110.
 20. Ma G., Fang D., Liu Y., Zhu X., Nie J., *Electrospun Sodium Alginate/Poly(ethylene Oxide) Core-Shell Nanofibers Scaffolds Potential for Tissue Engineering Applications*, "Carbohydrate Polymers" 2012, No. 87, s. 737–743.