



Otrzymywanie i właściwości jonożeli opartych na imidazoliowych cieczach jonowych

Aneta Lewandowska | Politechnika Poznańska
<https://orcid.org/0000-0002-8181-0050>

Piotr Gajewski | Politechnika Poznańska
<https://orcid.org/0000-0002-0229-3922>

Agnieszka Marcinkowska | Politechnika Poznańska
<https://orcid.org/0000-0002-8299-5085>

Streszczenie

Słowa kluczowe:
żelowe elektrolity
polimerowe,
fotopolimeryzacja,
ciecze jonowe

Jonożele polimerowe to dwufazowe układy zbudowane ze stałej matrycy polimerowej oraz uwięzionej w niej cieczy jonowej (IL). Dzięki takiej budowie materiały jonożelowe znalazły zastosowanie wszędzie tam, gdzie konieczne stało się unieruchomienie cieczy jonowej z równoczesnym zachowaniem jej właściwości. Materiały, które charakteryzują się zarówno dobrymi właściwościami mechanicznymi, jak i wysokim przewodnictwem jonowym znalazły zastosowanie w kondensatorach elektrochemicznych. Jonożele można otrzymać metodą *in-situ*, polegającą na bezpośredniej polimeryzacji monomerów rozpuszczonych w cieczy jonowej. Jako prekursory matrycy polimerowej interesujące są układy tiol-en, ze względu na brak wrażliwości na tlen, niewielki skurcz polimeryzacyjny czy tworzenie homogenicznej sieci polimerowej. Celem pracy była synteza jonożeli mogących znaleźć zastosowanie w kondensatorach elektrochemicznych jako żelowe elektrolity polimerowe (GPE). Materiały te powinny charakteryzować się wysokim przewodnictwem jonowym ($> 1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) oraz być wytrzymałe mechanicznie, szczególnie podczas pracy czy składania kondensatora. W pracy otrzymano jonożele o przewodnictwie jonowym powyżej $1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, dlatego mogą zostać zastosowane jako żelowe elektrolity polimerowe w kondensatorach elektrochemicznych. Dodatkowo materiały te charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi, można je bowiem skręcać i zwiijać bez uszkodzenia struktury.

Preparation and properties of ionogels based on imidazolium ionic liquids (Summary)

Keywords:
polymer
electrolyte,
photopolymerization,
ionic liquids

Polymer ionogels are two-phase systems consisting of a solid polymer matrix and an ionic liquid trapped in it. Materials with good mechanical properties and high ionic conductivity have been used in electrochemical capacitors.

Ionogels can be obtained by *in-situ* polymerization of monomers dissolved in an ionic liquid. Thiol-ene systems are interesting as polymer matrix precursors due to their insensitivity to oxygen, low polymerization shrinkage, and homogeneous polymer network formation. In this work ionogels that can be used in electrochemical capacitors as gel polymer electrolytes were obtained. These materials should be characterized by high ionic conductivity ($> 1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) and mechanical resistance, especially during the operation or installation of electrochemical capacitors. In this study, ionogels with ionic conductivity above 1 mS cm^{-1} were obtained; therefore, they can be used as gel polymer electrolytes in electrochemical capacitors. Furthermore, these materials are characterized by good mechanical properties and can be twisted and rolled without suffering damage.

Wstęp

Jonożele polimerowe to nowoczesne hybrydowe materiały zbudowane z fazy stałej, tj. matrycy polimerowej, oraz uwięzionej w niej cieczy jonowej. Ciecz jonowa jest stabilizowana w utworzonej przez matrycę sieci polimerowej, co uniemożliwia jej wyciek (rys. 1) (Vioux i in. 2011). Taka budowa materiałów jonożelowych powoduje, że zachowane zostają charakterystyczne właściwości cieczy jonowej, m.in. wysokie przewodnictwo jonowe, niska prężność par, stabilność termiczna oraz elektrochemiczna (Néouze i in. 2006).



Rysunek 1. Budowa jonożelu

Źródło: (Lewandowska i in. 2021).

Metody otrzymywania jonożeli polimerowych

Jedną z metod syntezy jonożeli polimerowych jest metoda bezpośredniej polimeryzacji monomerów lub sieciowania polimeru w obecności cieczy jonowej (Fouassier 1995; Zgrzeba i in. 2015). W innej metodzie otrzymywania materiałów jonożelowych używany jest rozpuszczalnik. Polega ona na rozpuszczeniu polimeru oraz cieczy jonowej w lotnym rozpuszczalniku, po czym następuje jego odparowanie. Wadą tej metody jest otrzymanie jonożeli o słabych właściwościach mechanicznych, a w celu ich poprawy jonożele poddaje się dodatkowo sieciowaniu (Bideau i in. 2011; Singh i in. 2014). Jonożele można również otrzymać w wyniku impregnacji, spęczenia usieciowanego polimeru lub mikroporowatych membran polimerowych cieczą jonową (Kim i Matic 2010; Kubisa 2004).

Jonożele polimerowe można otrzymać *in-situ* w reakcji inicjowanej fotochemicznie. Jako prekursorzy matrycy szczególnie interesujące są układy tiol-en. Polimeryzacja takich układów posiada zalety typowej polimeryzacji met(akrylanów) charakteryzującej się dużą szybkością reakcji, brakiem konieczności użycia rozpuszczalnika, a dodatkowo w wyniku reakcji otrzymywane są optycznie przejrzyste polimery o dobrych właściwościach mechanicznych (Wutticharoenwong i Soucek 2008). Wybór układów tiol-en podyktowany jest występowaniem dodatkowych zalet w stosunku do polimeryzacji (met)akrylanów, takich jak: zredukowany lub całkowity brak inhibicji tlenowej, reakcja może zachodzić bez użycia inicjatora, a otrzymana sieć polimerowa jest homogeniczna (Cramer i in. 2003; Northrop i Coffey 2012).

Zastosowanie jonożeli

Unieruchomienie cieczy jonowej w stałej matrycy polimerowej spowodowało, że jonożele znalazły zastosowanie w dziedzinach, w których wymagane jest zastosowanie ILs w formie stałej (rys. 2). Materiały jonożelowe stosowane są w przemyśle farmaceutycznym jako systemy dostarczania leków. Mogą stanowić nośniki substancji czynnej, np. Ibuprofenu, ze względu na łatwość kształtowania odpowiedniej formy leku oraz uwalniania substancji czynnej zarówno przez wewnętrzną, jak i zewnętrzną powierzchnię jonożelu (Viau i in. 2010). Dzięki immobilizacji cieczy jonowej w matrycy materiały te mogą być stosowane jako elementy urządzeń elektrochromowych, zmieniających barwę pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego (Andrzejewska i in. 2017). Ze względu na wysokie przewodnictwo jonowe ($>1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) jonożele stosowane są w elektrochemii, szczególnie w kondensatorach podwójnej warstwy elektrycznej. Używane są one jako żelowe elektrolity polimerowe, pełniąc funkcję zarówno elektrolitu, jak i separatora oddzielającego elektrody (Schneuwly i Gallay 2000; Lewandowska i in. 2021).



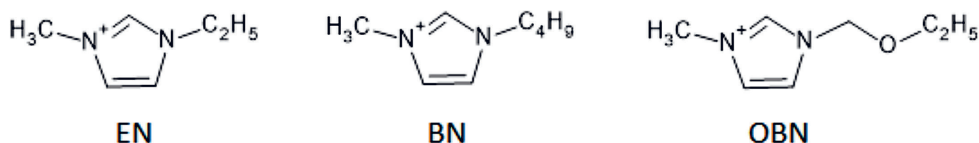
Rysunek 2. Zastosowania jonożeli

Źródło: (Bideau i in. 2011; Singh i in. 2014).

Materiały

Synteza przewodzących jonożeli polimerowych

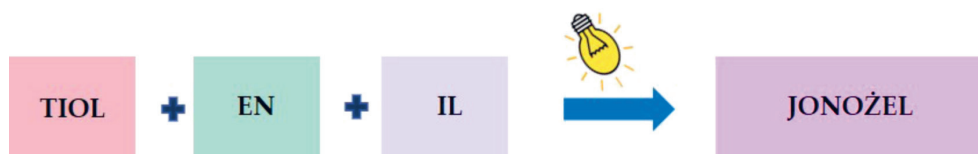
Jako prekursory matrycy zastosowano trójfunkcyjny tiol: tris(3-merkaptopropionian) trimetylopropanu (TMPTP) oraz trójfunkcyjny en: 1,3,5-trialliloksy-1,3,5-triazyno-2,4,6(1H,3H,5H)-trion (TTT). Użyto bis(trifluorometylosulfonylo)imidki imidazoliowych cieczy jonowych opartych na kationach: 1-etylo-3-metyloimidazoliowym (EN), 1-butylo-3-metyloimidazoliowym (BN), 1-etoksymetylo-3-metyloimidazoliowym (OBN) (rys. 3).



Rysunek 3. Budowa kationu badanych cieczy jonowych

Źródło: Opracowanie własne.

Stosunek reaktywnych grup funkcyjnych SH:C=C wynosił 1:1. Ciecze jonowe zastosowano w ilości 70% mas. w przeliczeniu na masę całego układu. Fotoinicjatorem reakcji był 2,2-dimetoksy-2-fenylacetofenon (DMPA) zastosowany w ilości 0,2% mas. kompozycji fotoutwardzalnej. Jonożele otrzymano *in-situ* metodą fotopolimeryzacji monomerów rozpuszczonych w cieczy jonowej (rys. 4).



Rysunek 4. Fotopolimeryzacja tiol-en w obecności cieczy jonowej

Źródło: Opracowanie własne.

Odziaływania wewnątrz- i międzycząsteczkowe

Badania odziaływań wewnątrz- i międzycząsteczkowych w kompozycji fotoutwardzalnej (tiol-en-ciecz jonowa) prowadzono metodą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR). Analizowano położenie pasm absorpcji pochodzących od pierścienia imidazoliowego w mieszaninach trójskładnikowych (tiol-en-ciecz jonowa) w stosunku do położenia pasm absorpcji wyjściowej cieczy jonowej C(2)-H oraz C(4,5)-H. Dodatkowo analizowano położenie pasma absorpcji reaktywnej grupy SH w mieszaninie trójskładnikowej.

Wytrzymałość mechaniczna

W celu scharakteryzowania wytrzymałości mechanicznej otrzymanych żelowych elektrolitów polimerowych przeprowadzono badanie odporności materiału na przebicie (analizator tekstury Brookfield CT3 Texture Analyzer). Próbki jonożeli o znanej grubości (grubościomierz zegarowy) poddano badaniu wytrzymałości na przebicie, w trakcie pomiaru rejestrowano obciążenie sondy pomiarowej do momentu przebicia badanej próbki. Na podstawie otrzymanych danych wyznaczono wartość maksymalnego obciążenia potrzebnego do przebicia próbki, F_{\max} , N.

Przewodnictwo jonowe

Zbadano przewodnictwo jonowe cieczy jonowych oraz otrzymanych jonożeli metodą elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (ESI) w zakresie częstotliwości 1 kHz – 1 MHz. Pomiaru wykonano w temperaturze pokojowej w dwuelektrodowym naczyniu elektrochemicznym. Przewodnictwo jonowe cieczy jonowych (σ_{IL}) obliczono na podstawie równania (1):

$$\sigma_{IL} = k / R_S \quad (1)$$

gdzie:

σ_{IL} – przewodnictwo jonowe IL, $S \cdot \text{cm}^{-1}$,

k – stała naczynka, cm^{-1} ,

R_S – opór objętościowy badanej IL, Ω .

Przewodnictwo jonowe otrzymanych jonożeli (σ) obliczono na podstawie równania (2):

$$\sigma = \sigma_S \cdot l / A \quad (2)$$

gdzie:

σ – przewodnictwo jonowe jonożelu, $S \cdot \text{cm}^{-1}$,

σ_S – przewodność objętościowa badanego jonożelu, S ,

l – grubość badanego jonożelu, cm ,

A – powierzchnia badanego jonożelu, cm^2 .

Dodatkowo obliczono przewodnictwo względne jonożeli (σ_{wzg}) na podstawie zależności (3):

$$\sigma_{wzg} = \sigma / \sigma_{IL} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

σ_{wzg} – przewodnictwo względne jonożelu, %,

σ – przewodnictwo jonowe jonożelu, $S \cdot \text{cm}^{-1}$,

σ_{IL} – przewodnictwo jonowe cieczy jonowej, $S \cdot \text{cm}^{-1}$.

Temperatury przemian fazowych

W celu określenia temperatur charakterystycznych przemian fazowych cieczy jonowych, matrycy polimerowej oraz jonożeli przeprowadzono analizę termiczną za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego DSC1 firmy Mettler Toledo. Pomiar prowadzono w zakresie temperatury: $-80^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}$, z prędkością grzania $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, w atmosferze argonu ($50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$). Z uzyskanych termogramów wyznaczono temperatury: zeszklenia (T_g), topnienia (T_m), krystalizacji (T_c) oraz zimnej krystalizacji (T_{cc}).

Morfologia materiałów jonożelowych

Morfologię jonożeli badano metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) EVO 40 Series firmy Carl Zeiss AG. Z jonożeli w pierwszej kolejności odmyto ciecz jonową w etanolu, po czym suszono w temperaturze 30°C przez 24 h, a następnie tak przygotowane próbki napyłano złotem.

Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych syntez otrzymano materiały jonożelowe z separacją faz. Rodzaj zastosowanej cieczy jonowej wpłynął na budowę matrycy polimerowej, a tym samym na właściwości mechaniczne oraz przewodzące uzyskanych jonożeli.

Oddziaływania wewnątrz- i międzycząsteczkowe

Na widmach mieszanin trójskładnikowych obserwowano zmiany położenia pasm absorpcji pochodzących od pierścienia imidazoliowego cieczy jonowej w stosunku do czystej IL (tab. 1). Maksima absorpcji pierścienia imidazoliowego przesuwają się w stronę niższych liczb falowych, co świadczy o tworzeniu oddziaływań pomiędzy kationem cieczy jonowej a monomerami. Najsilniejsze oddziaływania zaobserwowano dla cieczy jonowej OBN, która w podstawniku pierścienia imidazoliowego ma grupę eterową.

Tabela 1. Zmiany położenia pasm absorpcji $\Delta\nu$, cm^{-1} grup C(2)-H, C(4,5)-H pierścienia imidazoliowego oraz grupy SH tiolu

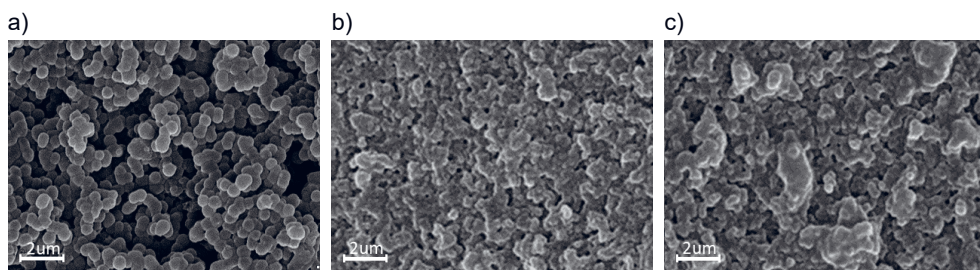
Mieszanina tiol-en-ciecz jonowa			
IL	C(2)-H ($\Delta\nu$, cm^{-1})	C(4,5)-H ($\Delta\nu$, cm^{-1})	SH ($\Delta\nu$, cm^{-1})
EN	-1,6	-1,2	8,5
BN	-1,8	-1,2	7,8
OBN	-2,1	-1,2	7,9

Źródło: Opracowanie własne.

Przesunięcie pasma absorpcji reaktywnej grupy SH w mieszaninie trójskładnikowej w stronę większych częstości w stosunku do czystego monomeru sugeruje natomiast niszczenie asocjacji grup SH ($\text{SH}\cdots\text{SH}$) występujących w czystym tiolu przez dodatkowe składniki kompozycji, tj. en oraz ciecz jonową.

Morfologia jonożeli

Istotnym parametrem wpływającym na właściwości mechaniczne oraz przewodnictwo jonowe jonożeli jest ich morfologia. W celu określenia wpływu zastosowanej cieczy jonowej na morfologię otrzymanych materiałów wykonano ich zdjęcia metodą SEM (rys. 5).



Rysunek 5. Obrazy SEM jonożeli zawierających 70% mas. cieczy jonowej a) EN; b) BN oraz c) OBN

Źródło: Opracowanie własne.

Na obrazach SEM jonożeli obserwujemy tworzenie mikrosfer, co wskazuje na przebieg reakcji zgodnie z mechanizmem polimeryzacji dyspersyjnej, która zachodzi mimo dużego stężenia monomerów w układzie. Taki przebieg procesu zwykle obserwuje się dla stężeń monomeru poniżej 5% mas. Tworzenie mikrosfer sugeruje, że ciecz jonowe mogą działać stabilizująco na koloidalne cząstki polimeru. W przypadku mniejszej stabilizacji przez IL cząstek polimeru system staje się niestabilny i dochodzi do koagulacji mikrosfer. Dla jonożelu z cieczą OBN obserwujemy mikrosfery odseparowane od siebie w mniejszym stopniu. Świadczy to o większej kompatybilności układów tiol-en z tą cieczą jonową, co może prowadzić do słabszej separacji faz oraz większej koagulacji polimeru. Połączenie oraz wielkość mikrosfer polimerowych może znacząco wpłynąć na właściwości mechaniczne otrzymanych jonożeli.

Wytrzymałość mechaniczna

W celu zbadania wytrzymałości mechanicznej jonożeli przeprowadzono test odporności na przebicie. Większą wytrzymałością mechaniczną charakteryzowały się jonożele zawierające ciecz jonową OBN. Maksymalna siła potrzebna do przebicia badanego materiału wynosiła: 0,98 N ($\pm 0,10$) dla cieczy EN, 1,65 N ($\pm 0,07$) dla BN oraz 1,89 N ($\pm 0,05$) dla OBN. Większa odporność na przebicie jonożelu z cieczą OBN może wynikać z większego stopnia połączenia powstających mikrosfer. Ciecz jonowa silniej oddziałuje z matrycą polimerową, co prowadzi do większej aglomeracji cząstek polimeru, a więc większej powierzchni łączenia mikrosfer, przyczyniając się do większej odporności na przebicie przy jednoczesnym zmniejszeniu elastyczności. Jonożel zawierający ciecz EN charakteryzował się najmniejszą wytrzymałością mechaniczną, co jest konsekwencją większego odseparowania od siebie mikrosfer powstających w wyniku polimeryzacji. Może to wynikać z mniejszej kompatybilności układu poli(tiol-en)-EN, a tym samym większej stabilizacji układu koloidalnego polimeru. Wszystkie otrzymane jonożele można zwiijać oraz rolować bez uszkodzenia struktury materiału.

Przewodnictwo jonowe

Otrzymane jonożele charakteryzowały się wysokim przewodnictwem jonowym (tab. 2), dzięki czemu mogą one zostać zastosowane jako żelowe elektrolity polimerowe w kondensatorach elektrochemicznych. Wartość przewodnictwa jonożeli uzależniona była od wartości przewodnictwa zastosowanej cieczy jonowej (EN = $9,1 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; BN = $3,9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$; OBN = $3,4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$). Przewodnictwo jonowe jest większe dla materiału zawierającego ciecz jonową EN, co wynika jednak z różnic w przewodnictwie cieczy jonowych. Natomiast przewodnictwo względne właściwie nie zależy od budowy cieczy jonowej, a jest związane z występowaniem separacji faz pomiędzy składnikami jonożelu.

Tabela. 2. Przewodnictwo jonowe (σ) oraz przewodnictwo względne (σ_{wzg}) dla jonożeli zawierających 70% mas. cieczy jonowych EN, BN oraz OBN

IL	σ , $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$	σ_{wzg} , %
EN	4,5	49
BN	2,0	50
OBN	1,6	48

Odchylenia standardowe wartości σ i σ_{wzg} są poniżej 2%.

Źródło: Opracowanie własne.

Temperatury przemian fazowych

W tabeli 3 przedstawiono temperatury charakterystycznych przemian fazowych dla czystych cieczy jonowych oraz otrzymanych jonożeli. Dla ILs z kationem 1-butylo-3-metyloimidazoliowym oraz 1-etoksymetylo-3-metyloimidazoliowym w warunkach przeprowadzonego pomiaru nie zaobserwowano temperatur topnienia czy krystalizacji, co świadczy o braku powstawania domen oraz agregacji cieczy jonowej.

Temperatura zeszklenia matrycy polimerowej wynosi 23°C . Natomiast dla otrzymanych jonożeli zaobserwowano spadek temperatury zeszklenia matrycy, co związane jest z plastyfikacją polimeru. Wynika to z częściowej kompatybilności cieczy jonowej pomimo występującej separacji faz, gdzie część cieczy jonowej pozostaje rozpuszczona w matrycy, działając jako plastyfikator. Separacja faz powoduje powstawanie domen cieczy jonowej w polimerze, które charakteryzują się podobnymi właściwościami do czystej cieczy jonowej. Dlatego dla jonożelu zawierającego ciecz jonową EN na termogramach DSC zaobserwowano pik topnienia odseparowanej fazy cieczy jonowej w zakresie temperatur odpowiadającym czystej cieczy.

Tabela. 3. Temperatry przemian fazowych cieczy jonowych oraz jonożeli

IL	$T_g^{a)}$, °C	$T_m^{b)}$, °C	$T_c^{c)}$, °C	$T_{cc}^{d)}$, °C
Ciecz jonowa				
EN	–	–11	–62	–
BN	–	–	–	–
OBN	–	–	–	–
Jonożel zawierający 70% mas. cieczy jonowej				
EN	15	–15	–	–29
BN	17	–	–	–
OBN	19	–	–	–

$T_g^{a)}$ – temperatura zeszklenia

$T_m^{b)}$ – temperatura topnienia

$T_c^{c)}$ – temperatura krystalizacji

$T_{cc}^{d)}$ – temperatura zimnej krystalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

Podsumowanie

W ramach pracy otrzymano jonożele o dobrych właściwościach mechanicznych oraz przewodzących, dzięki czemu można je z powodzeniem zastosować jako żelowe elektrolity polimerowe w kondensatorach elektrochemicznych. Budowa zastosowanej cieczy jonowej wpłynęła w istotny sposób na właściwości mechaniczne otrzymanych materiałów. Wydłużenie łańcucha w podstawniku kationu imidazoliowego cieczy jonowej z 2 do 4 grup metylenowych wpłynęło na zwiększenie stopnia połączenia mikrosfer tworzących matrycę polimerową, a w konsekwencji powodując zwiększenie wytrzymałości mechanicznej. Jonożele zawierające zarówno ciecz jonową BN, jak i OBN wykazują większą kompatybilność matrycy polimerowej z cieczą jonową, na co wskazuje połączenie powstających mikrosfer. Większy stopień połączenia mikrosfer wpływa na lepsze właściwości mechaniczne jonożeli z cieczą BN i OBN niż jonożeli z cieczą EN.

Praca realizowana w ramach projektu nr 2017/27/B/ST8/00762 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Bibliografia

- Andrzejewska E., Marcinkowska A., Zgrzeba A., 2017, *Ionogels – materials containing immobilized ionic liquids*, „Polimery”, nr 62.
- Bideau J.L., Viaub L., Vioux A., 2011, *Ionogels, ionic liquid based hybrid materials*, „Chemical Society Reviews”, Vol. 40.
- Cramer N.B., Reddy S.K., O'Brien A.K. i in., 2003, *Thiol – Ene Photopolymerization Mechanism and Rate Limiting Step Changes for Various Vinyl Functional Group Chemistries*, „Macromolecules”, Vol. 36.
- Fouassier J.P., 1995, *Photoinitiation, Photopolymerization, and Photocuring*, Monachium.
- Kim J.K., Matic A., 2010, *An imidazolium based ionic liquid electrolyte for lithium batteries*, „Journal of Power Sources”, Vol. 195, No. 22.
- Kubisa P., 2004, *Application of ionic liquids as solvents for polymerization processes*, „Progress in Polymer Science”, Vol. 29.
- Lewandowska A., Gajewski P., Szcześniak K., Sadej M., Patelski P., Marcinkowska A., 2021, *Modification of Thiol – Ene Ionogels with Octakis (Methacryloxypropyl) Silsesquioxane*, „Polymers”, Vol. 13.
- Lewandowska A., Marcinkowska A., Gajewski P., Patelski P., 2021, *Jonozele syntezowane metodą fotopolimeryzacji tiol/en/akrylan. Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce*, Poznań.
- Northrop B.H., Coffey RN, 2012, *Thiol – Ene Click Chemistry: Computational and Kinetic Analysis of the Influence of Alkene Functionality*, „Journal American Chemical Society”, Vol. 134, No. 33.
- Néouze M.A., Bideau J., Gaveau P.S. i in., 2006, *Ionogels, New Materials Arising from the Confinement of Ionic Liquids within Silica – Derived Networks*, „Chemistry of Materials”, Vol. 18.
- Schneuwly A., Gallay R., 2000, *Properties and application of supercapacitors from the state-of-the-art to future trends, proceeding PCIM Power Quality*, Nuremberg.
- Viau L., Tourne-Peteilh C., Devoisselle J.M., Vioux A., 2010, *Ionogels as drug delivery system: one-step sol-gel synthesis using imidazolium ibuprofenate ionic liquid*, „Chemical Communications”, Vol. 46.
- Vioux A., Le Bideau J., Viau L., 2011, *Ionogels, ionic liquid based hybrid materials*, „Chemical Society Reviews”, Vol. 40.
- Wutticharoenwong K., Soucek M.D., 2008, *Influence of the Thiol Structure on the Kinetics of Thiol – ene Photopolymerization with Time-Resolved Infrared Spectroscopy*, „Macromolecular Materials and Engineering”, Vol. 293.
- Zgrzeba A., Andrzejewska E., Marcinkowska A., 2015, *Ionic Liquid Containing – Ionogels by Thiol – Ene Photopolymerization, Kinetics and Solvent Effect*. RSC Adv. 5.

Biogramy

Aneta Lewandowska – doktorantka na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe: jonozele polimerowe, polimeryzacja inicjowana fotochemicznie, żelowe elektrolity polimerowe.

Piotr Gajewski – asystent na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej (Zakład Polimerów). Zainteresowania: polimeryzacja inicjowana fotochemicznie, jonozele i hydrozele polimerowe, żelowe elektrolity polimerowe oraz ich zastosowanie w elektrochemii, wykorzystanie metody HME w farmacji, elastyczne siłowniki polimerowe do zastosowań w miękkiej robotyce, zastosowanie metod statystycznych w badaniach naukowych.

Agnieszka Marcinkowska – adiunkt na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej (Zakład Polimerów). Zainteresowania: polimeryzacja inicjowana fotochemicznie, jonożele i hydrożele polimerowe, żelowe elektrolity polimerowe, materiały biomedyczne na bazie polimetakrylanów, wykorzystanie metody HME w farmacji, elastyczne siłowniki polimerowe do zastosowań w miękkiej robotyce.

Aneta Lewandowska – a PhD student at the Department of Polymers at the Poznan University of Technology. Research interests: polymer ionogels, photochemically initiated polymerization, gel polymer electrolytes.

Piotr Gajewski – an Assistant Professor at the Department of Polymers at the Poznan University of Technology. Interests: photochemically initiated polymerization, polymer ionogels and hydrogels, gel polymer electrolytes and their application in electrochemistry, the use of the HME method in pharmacy, flexible polymer actuators for applications in soft robotics, the use of statistical methods in scientific research.

Agnieszka Marcinkowska – an Assistant Professor at the Department of Polymers at the Poznan University of Technology. Interests: photochemically initiated polymerization, polymer ionogels and hydrogels, gel polymer electrolytes, biomedical materials based on polymethacrylates, the use of the HME method in pharmacy, flexible polymer actuators for applications in soft robotics.