

## Synthesis and applications of ionic liquids: studies at the Łukasiewicz – Industrial Chemistry Institute

# Synteza i zastosowanie cieczy jonowych: badania prowadzone w Łukasiewicz – Instytucie Chemii Przemysłowej



DOI: 10.15199/62.2026.5.4

A review, with 41 refs., of new multifunctional ionic liquids (ILs) with quaternary ammonium cations (biocidal activity) and non-toxic organic anions. The ILs were synthesized and used as catalysts in organic syntheses as well as solvents for recovering valuable metals from electronic waste by extr. Studies on ILs conducted at the Institute since 2005 was also presented.

**Keywords:** ionic liquids, biological activity, electronic waste, circular economy, extraction

Przegląd, obejmujący 41 pozycji piśmiennictwa, dotyczący nowych wielofunkcyjnych cieczy jonowych (ILs) z czwartorzędowymi kationami amoniowymi (aktywność biobójcza) i nietoksycznymi anionami organicznymi. ILs zostały zsyntetyzowane i wykorzystane jako katalizatory w syntezach organicznych, a także jako rozpuszczalniki do odzyskiwania cennych metali z odpadów elektronicznych metodą ekstrakcji. Przedstawiono również badania nad ILs prowadzone w Instytucie od 2005 r.

**Słowa kluczowe:** ciecze jonowe, aktywność biobójcza, złom elektroniczny, gospodarka obiegu zamkniętego, ekstrakcja

Ciecze jonowe to związki chemiczne zbudowane z kationu organicznego i anionu, który może być organiczny lub nieorganiczny. Liczba możliwych kombinacji różnych kationów i anionów szacowana jest na poziomie  $10^{18}$ . Są to związki stabilne chemicznie, elektrochemicznie i termicznie. Mogą rozpuszczać zarówno związki organiczne, jak i nieorganiczne. Wykorzystuje się je jako dodatki lub rozpuszczalniki w różnych technologiach, jak również jako katalizatory wielu reakcji, w tym w asymetrycznej syntezie organicznej. Niektóre z nich wykazują aktywność biologiczną wobec mikroorganizmów.

### Lata 2005–2016

Historia cieczy jonowych w Instytucie jest ściśle związana z Zakładem Lekkiej Syntezy Organicznej. W 2005 r. kierownikiem tego Zakładu został prof. dr hab. Jacek

Cybulski (fot. 1), który do działalności Instytutu wprowadził tematykę cieczy jonowych<sup>1)</sup> jako nowy obszar badawczy.

Pierwsze badania dotyczyły aktywnych biologicznie amoniowych cieczy jonowych<sup>1)</sup>. Były to mleczany, sacharyniany, acesulfamiany, migdalany i proliniany amoniowe o bardzo dobrych właściwościach biobójczych. Związki te posiadają kation, który zawiera czwartorzędowy



Photo 1. Prof. Jacek Cybulski, Ph.D. (Photo: A.W.)

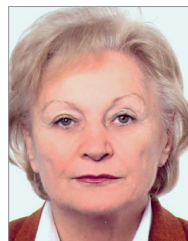
Fot. 1. Prof. dr hab. Jacek Cybulski (Foto: A.W.)



Dr inż. Anna WIŚNIEWSKA (ORCID: 0000-0001-7431-203X) ukończyła studia w specjalności chemia i technologia organiczna na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej. W 2015 r. uzyskała stopień doktora nauk chemicznych na tej samej uczelni. Jest współautorem 13 patentów i zgłoszeń patentowych. Specjalność – synteza cieczy jonowych o działaniu przeciwdrobnoustrojowym, badania zależności pomiędzy strukturą a aktywnością biologiczną cieczy jonowych, a także zastosowanie cieczy jonowych w procesach oczyszczania np. strumieni petrochemicznych, wydzielania związków aktywnych, np. kwercetyny, jako katalizatorów w syntezie organicznej, ekstrakcji jonów metali z np. elektroodpadów.

#### \* Adres do korespondencji:

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego, ul. Rydygiera 8, 01-793 Warszawa, e-mail: anna.wisniewska@ichp.lukasiewicz.gov.pl



Prof. dr hab. inż. Urszula DOMAŃSKA-ŻELAZNA (ORCID: 0000-0001-5034-5873) prowadzi badania w dziedzinie chemii fizycznej. Jest wybitnym w skali światowej znawcą termodynamiki cieczy jonowych. Jej działalność naukowa obejmuje zarówno badania podstawowe, jak i aplikacyjne, w tym badania równowag fazowych i właściwości fizykochemicznych cieczy molekularnych, cieczy jonowych (nowe syntezy, badania możliwości ich zastosowań w ekstrakcji, związki modelowe). Zajmowała się również badaniami fizykochemicznymi polimerów hiperzgałęzionych (proponując zastosowań w ekstrakcji), substancji zapachowych (dodatki do żywności) i kosmetyków oraz leków. Jej osiągnięcia naukowe obejmują głównie zagadnienia termodynamiki roztworów. Na podkreślenie zasługuje również jej wkład w rozwój modeli matematycznych, opartych na eksperymentalnych badaniach podstawowych i opisujących różnego rodzaju zjawiska fizykochemiczne, w tym ekstrakcję i rozdzielanie.

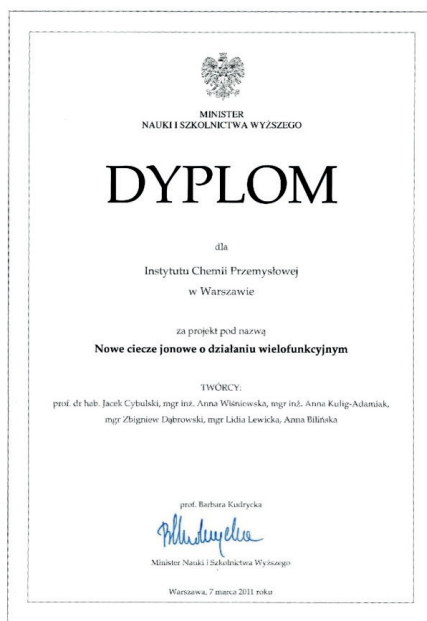


Photo 2. Diplomas and medals received (Photo: Ł-ICHP)

Fot. 2. Otrzymane dyplomy i medale (Foto: Ł-ICHP)



Dr Zbigniew DĄBROWSKI (ORCID: 0000-0002-2422-5015) w roku 1996 ukończył studia na Uniwersytecie Warszawskim Filia w Białymstoku (obecnie Uniwersytet w Białymstoku). W 2013 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych o specjalności technologia chemiczna w Instytucie Chemii Przemysłowej im. Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie (obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie), gdzie pracuje od 1998 r., obecnie w Grupie Badawczej Technologii Chemicznej (Sekcja Syntezy Organicznej i Procesów Rozdzielenia). Jest współautorem 9 patentów i zgłoszeń patentowych, jak również współautorem publikacji dotyczących cieczy jonowych i rozpuszczalników eutektycznych DES, a także ekstrakcji nadkrytycznej. Specjalność – wydzielenie i oczyszczanie cykloolipeptydów z odpadów z Inu zwyczajnego metodą chromatografii kolumnowej, zastosowanie chiralnych cieczy jonowych jako katalizatorów reakcji stereoselektywnych, a także zastosowanie cieczy jonowych w procesach oczyszczania np. strumieni petrochemicznych, wydzielenie związków aktywnych, np. kwercetyna z roślin metodą ekstrakcyjną, ekstrakcja jonów metali z np. elektroodpadów, oznaczanie związków organicznych metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC).

atom azotu z podstawnikami alifatycznymi i aromatycznymi, gwarantujący właściwości biobójcze oraz nietoksyczny, farmaceutycznie akceptowalny anion organiczny. Ciecze jonowe „słodkie” (z anionem sacharynianowym i acesulfamianowym) ze względu na dobry smak i właściwości bakteriobójcze oraz grzybobójcze mogą być wykorzystane jako aktywny składnik suplementów diety i parafarmaceutyków<sup>2)</sup>, takich jak płyny do higieny jamy ustnej i pasty do zębów. Mleczany i migdalary amoniowe są nowoczesnymi substancjami o wysokiej aktywności biologicznej<sup>1, 3-8)</sup>. Aktywność biologiczna tych związków w stosunku do wielu mikroorganizmów jest od kilku do kilkudziesięciu razy wyższa niż substancji aktywnych powszechnie stosowanych w preparatach znajdujących

Table. Awards for the Institute's inventions in the field of ionic liquids (Photo 2)

Tabela. Wyróżnienia wynalazków Instytutu z zakresu cieczy jonowych (fot. 2)

Lp.	Autorzy wynalazku	Nazwa wynalazku	Instytucja	Termin	Wyróżnienie
1	J. Cybulski A. Wiśniewska A. Kulig-Adamiak Z. Dąbrowski L. Lewicka J. Kamiński	New ionic liquids of multi-functional action	38 <sup>th</sup> International Exhibition of Inventions, Genewa, Szwajcaria	20–25.04.2010 r.	srebrny medal
2	J. Cybulski A. Wiśniewska A. Kulig-Adamiak A. Bilińska Z. Dąbrowski J. Kamiński L. Lewicka	Nowe ciecze jonowe o działaniu wielofunkcyjnym	IV Międzynarodowa Warszawska Wystawa Innowacji IWIS, Warszawa 2010	20–22.10.2010 r.	srebrny medal
3	A. Wiśniewska A. Kulig-Adamiak J. Cybulski	New ionic liquids with biocidal activity	Koreańska Międzynarodowa Wystawa „Women Inventors” KIWIE-2011, Seul, Korea	4–7.05.2011 r.	złoty medal
4	J. Cybulski A. Wiśniewska A. Kulig-Adamiak Z. Dąbrowski L. Lewicka A. Bilińska	Nowe ciecze jonowe o działaniu wielofunkcyjnym	Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego	7.03.2011 r.	dypłom uznania
5	A. Wiśniewska A. Kulig-Adamiak J. Cybulski	New ionic liquids with biocidal activity	Taipei International Invention Show & Technomart INST 2011, Tajwan	29.09.–2.10.2011 r.	brązowy medal oraz medal i dyplom Stowarzyszenia Wynalazców z Korei

się na rynku krajowym. Mogą być one również składnikami preparatów biocydowych oraz składnikami preparatów dezynfekująco-myjących w przemyśle chemii gospodarczej i w przemyśle farmaceutycznym. Na podkreślenie zasługuje fakt, że ciecze jonowe są substancjami proekologicznymi,

nielotnymi i niezanieczyszczającymi atmosfery. Technologia ich otrzymywania jest prosta i energooszczędna.

Zespół Instytutu współpracował z prof. dr. hab. Juliuszem Pernakiem z Politechniki Poznańskiej. Wynalazki dokonane w trakcie prowadzonych badań<sup>2, 6, 9–12</sup>) były wielokrotnie wyróżniane w konkursach i na międzynarodowych wystawach (tabela). Jeden z uzyskanych patentów<sup>11</sup>) został skomercjalizowany w 2018 r. na mocy umowy z firmą Madonis sp. z o.o. z Wieruszowa. W 2020 r. w firmie Feniks Chemia sp. z o.o. z Zambrowa został wdrożony pomysł na innowa-



Photo 3. Set of apparatus for the production of didecyldimethylammonium lactates on a large laboratory scale (Photo: Ł-ICHP)

Fot. 3. Zestaw aparatury do otrzymywania mleczanów didocyldimetyloamoniowych w skali wielkolaboratoryjnej (Foto: Ł-ICHP)



Photo 4. Prof. Juliusz Pernak, Prof. Jacek Cybulski, Anna Kulig-Adamiak and Anna Wiśniewska (7<sup>th</sup> Symposium “Quaternary ammonium salts and their application areas in the economy”, Poznań 2010) (Photo: A.W.)

Fot. 4. Prof. Juliusz Pernak i prof. Jacek Cybulski oraz Anna Kulig-Adamiak i Anna Wiśniewska (VII Symposium „Czwartorzędowe sole amoniowe i obszary ich zastosowania w gospodarce”, Poznań 2010) (Foto: A.W.)



Photo 5. Prof. Jacek Cybulski (left) and Prof. Juliusz Pernak on the sidelines of the 7<sup>th</sup> Symposium "Quaternary ammonium salts and their applications in the economy", Poznań 2010 (Photo: A.W.)

Fot. 5. Prof. Jacek Cybulski (z lewej) i prof. Juliusz Pernak w kularach VII Sympozjum „Czwartorzędowe sole amoniowe i obszary ich zastosowania w gospodarce”, Poznań 2010 (Foto: A.W.)

cyjną substancję aktywną o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych do zastosowań w chemii gospodarczej. Prace były publikowane w renomowanych czasopismach<sup>7, 8, 13</sup>.

Technologia otrzymywania amoniowych cieczy jonowych nie jest zbyt złożona. Zestaw aparatury do syntezy cieczy jonowych w skali wielkolaboratoryjnej składał się z reaktora szklanego o pojemności 6 L z dolnym zaworem spustowym (fot. 3). Reaktor zaopatrzony był w wysokosprawne, szybkoobrotowe mieszadło mechaniczne, termometr oraz chłodnicę zwrotną, którą można było zamienić na zestaw do destylacji. Ponadto wyposażony był w płaszcz

grzewczo-chłodzący umożliwiający podgrzewanie i chłodzenie zawartości reaktora. Wyposażenie uzupełniające stanowił termostat oraz pompa membranowa próżniowa.

Współpraca naukowa Zespołów prof. Juliusza Pernaka i prof. Jacka Cybulskiego była bardzo owocna, a wyniki prezentowano na wielu konferencjach, takich jak VII Sympozjum „Czwartorzędowe sole amoniowe i obszary ich zastosowania w gospodarce” w Poznaniu w 2010 r. (fot. 4 i 5).

Badania nad cieczami jonowymi, prowadzone w dużym Zespole w Warszawie (fot. 6), były przedmiotem 2 prac doktorskich zrealizowanych w Instytucie. To prace dr Anny Wiśniewskiej<sup>14</sup> (fot. 7) i dr. Zbigniewa Dąbrowskiego<sup>15</sup> (fot. 8). Doktor A. Wiśniewska badała zależność między strukturą amoniowych cieczy jonowych a ich aktywnością biologiczną i działaniem przeciwdrobnoustrojowym. Doktor



Photo 7. In the research laboratory; from the left: Lidia Lewicka, Anna Kulig-Adamiak, and Anna Wiśniewska (Photo: A.W.)

Fot. 7. W laboratorium badawczym; od lewej: Lidia Lewicka, Anna Kulig-Adamiak i Anna Wiśniewska (Foto: A.W.)



Photo 6. Staff of the Department of Light Organic Synthesis; from the left: Dorota Kalisz, Mirosława Szpakiewicz, Zbigniew Dąbrowski, Magdalena Zięba, Anna Bilińska, Anna Wiśniewska, Lidia Lewicka, Jacek Cybulski, Anna Kulig-Adamiak, Bożenna Obukowicz, Barbara Kąkol, Jarosław Kamiński, Agnieszka Kuczyńska, October 17, 2011 (Photo: A.W.)

Fot. 6. Pracownicy Zakładu Lekkiej Syntezy Organicznej; od lewej: Dorota Kalisz, Mirosława Szpakiewicz, Zbigniew Dąbrowski, Magdalena Zięba, Anna Bilińska, Anna Wiśniewska, Lidia Lewicka, Jacek Cybulski, Anna Kulig-Adamiak, Bożenna Obukowicz, Barbara Kąkol, Jarosław Kamiński, Agnieszka Kuczyńska, 17.10.2011 r. (Foto: A.W.)

Z. Dąbrowski badał wpływ struktury chiralnych cieczy jonowych (imidazoliowych i amoniowych) na ich aktywność jako katalizatorów reakcji stereoselektywnych. Promotorem obu tych rozpraw doktorskich był prof. dr hab. Jacek Cybulski.

W Zakładzie odbywały się praktyki studenckie. Jedną z praktykantek była Anna Rękawek, studentka Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej. Była ona zainteresowana tematyką syntezy cieczy jonowych i w jej ramach zrealizowała pracę dyplomową pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Urszuli Domańskiej-Żelaznej. Pracę obroniła na macierzystym wydziale w 2007 r. (fot. 9).

## Lata 2017–2026

W 2017 r. kierownikiem grupy badawczej zajmującej się cieczami jonowymi



w Instytucie została prof. dr hab. inż. Urszula Domańska-Żelazna (fot. 10), która w latach 1968–2017 była nauczycielem akademickim w Katedrze Chemii Fizycznej na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej, gdzie specjalizowała się w termodynamice cieczy jonowych.

Na dorobek naukowy Pani Profesor składają się prace z zakresu cieczy jonowych<sup>16-27)</sup> oraz monografie i rozdziały w książkach<sup>28-31)</sup>, a także liczne wystąpienia konferencyjne oraz wykłady na zaproszenie. W latach 2018–2025 dokonała jako współtwórca 6 zgłoszeń patentowych w dziedzinie ekstrakcji z zastosowaniem cieczy jonowych<sup>32-37)</sup>. Wypromowała 23 doktorów oraz 53 magistrów i inżynierów. Uzyskała wiele wyróżnień, m.in.: Nagrodę Naukową PW za osiągnięcia naukowe (2014 r.), Nagrody Ministra I Stopnia za osiągnięcia naukowe (1995 i 2006 r.), Nagrodę Ministra II Stopnia za osiągnięcia naukowe (1989 r.), Medal prof. J. Zawidzkiego PTChem za osiągnięcia



Photo 10. Prof. Urszula Domańska-Żelazna, PhD, DSc, Eng.

Fot. 10. Prof. dr hab. inż. Urszula Domańska-Żelazna



## Synteza cieczy jonowych

Ciecze syntezowano w myśl reakcji (wymiana sól-sól):


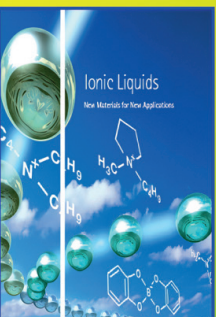
$$[\text{kat}^+]\text{X}^- + \text{M}^+ \text{Y}^- \Rightarrow [\text{kat}^+]\text{Y}^- + \text{M}^+ \text{X}^-$$

gdzie Y- NTf<sub>2</sub><sup>-</sup>, BF<sub>4</sub><sup>-</sup>, PF<sub>6</sub><sup>-</sup> X- Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup> M- K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>

1. Wymieszanie reagentów (stosunek równomolowy)
2. Ekstrakcja warstwy organicznej wodą, warstwy wodnej chlorkiem metylenu; odparowanie rozpuszczalnika w wyparce rotacyjnej.
3. Analiza określająca zawartość jonów chlorkowych (metoda Mohra), wody (metoda Karla Fischera)
4. Wykonano syntezę i analizę 8 cieczy jonowych




## SEMINARIUM DYPLOMOWE

**Anna Rękawek**  
Zakład Chemii Fizycznej Wydz. Chemicznego PW  
Specjalność: Materiały i Technologie Przyjazne Środowisku

praca wykonana pod kierunkiem:  
**prof. dr hab. Urszuli Domańskiej-Żelaznej**

Warszawa 2007

Photo 9. Slides from the diploma seminar of Anna Rękawek, M.Sc. Eng.

Fot. 9. Slajdy z seminarium dyplomowego mgr inż. Anny Rękawek



Photo 11. Prof. U. Domańska-Żelazna receiving the Prof. J. Zawidzki Medal from Prof. B. Buszewski, president of PTChem, in 2014 (Photo: Archive of U.D.Ż.)

Fot. 11. Prof. U. Domańska-Żelazna odbiera z rąk prof. B. Buszewskiego, prezesa PTChem, Medal prof. J. Zawidzkiego w 2014 r. (Foto: Archiwum U.D.Ż.)

naukowe w dziedzinie termodynamiki cieczy jonowych (2014 r.) (fot. 11), Nagrodę Specjalną im. Wojciecha Świetosławskiego PTChem (2022 r.), Medal im. Jędrzeja Śniadeckiego (2023 r.) (fot. 12) oraz Nagrodę „Orły Wprost dla Nauki” w dziedzinie nauk chemicznych tygodnika *Wprost* (2023 r.) (fot. 13).

Działalność Pani Profesor w dziedzinie cieczy jonowych rozpoczęła się w 2003 r. i od tego czasu opublikowała ona setki prac obejmujących syntezę i badanie właściwości



Photo 12. Prof. U. Domańska-Żelazna with the Jędrzej Śniadecki Medal, PTChem, Toruń, 2023. (Photo: Archive of U.D.Ż.)

Fot. 12. Prof. U. Domańska-Żelazna z Medalem im. Jędrzeja Śniadeckiego, PTChem, Toruń 2023 r. (Foto: Archiwum U.D.Ż.)

**wprost** FUNDACJA TYGODNIKA WPROST

**NAGRODY ORŁY WPROST  
DLA NAUKI**

**Szanowna Pani Profesor  
Urszula Domańska-Żelazna**

W imieniu Katarzyny Gintrowskiej  
Prezes Fundacji Tygodnika „Wprost”  
oraz redakcji „WPROST”  
mamy przyjemność poinformować,  
że została Pani Profesor Laureatem  
Nagrody ORŁY WPROST DLA NAUKI

Uroczyste wręczenie nagród  
odbędzie się:  
**25 września 2023  
o godz. 12.30**

w Renaissance Warsaw Airport Hotel,  
ul. Żwirki i Wigury 111, Warszawa

Gratulujemy nagrody i będzie nam niezmiernie miło gościć  
Panią Profesor na naszej uroczystości!

Photo 13. The “Wprost Eagles for Science” Award in the field of chemical sciences of the weekly “Wprost” 2023 (Photo: Archive of U.D.Ż.)

Fot. 13. Nagroda „Orły Wprost dla Nauki” w dziedzinie nauk chemicznych tygodnika Wprost 2023 (Foto: Archiwum U.D.Ż.)

fizykochemicznych substancji czystych, równowagi fazowe ciecz-para, ciecz-ciecz, ciecz-ciało stałe i ciecz-ciało stałe pod wysokimi ciśnieniami. Badania obejmowały wyznaczenie współczynników aktywności w rozcieńczeniu nieskończenie wielkim, ekstrakcję związków siarki i azotu z mieszanin modelowych paliw, rozdzielanie węglowodorów alifatycznych od aromatycznych, rozdzielanie alken/alkan, oddzielanie etylobenzenu od styrenu, wydzielanie 2-fenylotanolu z fazy wodnej po reakcji biosyntezy i wydzielanie butanolu (biopaliwa z wodnej fazy fermentacyjnej). Przedmiotem badań były również kompleksy z cyklodekstrynami oraz wyznaczanie ciepła właściwego związków czystych i mieszanin. Myślą przewodnią prac Pani Profesor było szukanie możliwości zastosowania cieczy jonowych w technikach rozdziału ekstrakcyjnego w układach ciecz-ciecz i ciecz-ciało stałe. Dotychczas prowadzone prace stanowiły oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe w dziedzinie nauk podstawowych i zostały udokumentowane publikacjami naukowymi, mającymi istotny wpływ na stan wiedzy i kierunki dalszych badań technologicznych. Profesor U. Domańska-Żelazna zajmowała 1. miejsce wśród żyjących chemików polskich na liście cytowań Uniwersytetu Stanforda w 2022 r.

Tematyka badawcza zespołu kierowanego przez prof. U. Domańską-Żelazną w Ł-ICHP stanowiła kontynuację jej wcześniejszej działalności w Politechnice Warszawskiej, wzbogaconą o nowe elementy w obszarze chemii gospodarczej i procesów petrochemicznych. Pod jej kierownictwem kontynuowano badania dotyczące równowag fazowych oraz przeprowadzono obszerną analizę możliwości odsiarczania strumieni petrochemicznych, zwłaszcza w takich przypadkach, gdy usunięcie związków siarki nie było możliwe za pomocą stosowanego powszechnie na skalę przemysłową procesu hydroodsiarczania (benzotiofen, dibenzotiofen i ich pochodne, a zwłaszcza 4,6-dimetylodibenzotiofen). W ramach tej tematyki prowadzono pomiary równowag ciecz-ciecz w układach trójskładnikowych, które umożliwiły określenie wpływu wielu czynników (struktura cieczy jonowej, czas ekstrakcji, temperatura, liczba cykli ekstrakcyjnych) na ich zdolności ekstrakcyjne z możliwością zawracania cieczy jonowych do ponownego użycia, głównie ze względu na ich wysoki koszt. Praca ta została częściowo opublikowana<sup>23)</sup> oraz uzyskała nagrodę PKN Orlen II Stopnia w 2022 r. (fot. 14).

Badano także możliwość ekstrakcji kwercetyny z czerwonej cebuli, możliwość ekstrakcji biobutanolu z fazy wodnej, możliwość odzysku i separacji odpadowych materiałów polimerowych, wykorzystując parametry rozpuszczalności Hildebranda i Scatcharda oraz możliwość odzysku cennych metali z elektrośmieci, w tym z różnego typu baterii, obwodów drukowanych PCB (*printed circuit boards*) i z paneli fotowoltaicznych. Tematy te stanowiły element głównych kierunków działalności badawczej i wdrożeniowej Ł-ICHP, obejmujących zrównoważony rozwój oraz gospodarkę obiegu zamkniętego, zgodnie z przyjętą w ramach UE<sup>38)</sup>



Photo 14. From the left: Dominika Kubica, Zbigniew Dąbrowski, Ewa Śmigiera, Anna Wiśniewska, Urszula Domańska-Żelazna, Paweł Bielski, Marek Plesnar and Zbigniew Laskowski in a commemorative photo on the occasion of presenting the PKN Orlen II Degree Award for the purification of petrochemical streams in 2022 (Photo Ł-ICHP)

Fot. 14. Od lewej: Dominika Kubica, Zbigniew Dąbrowski, Ewa Śmigiera, Anna Wiśniewska, Urszula Domańska-Żelazna, Paweł Bielski, Marek Plesnar i Zbigniew Laskowski na pamiątkowym zdjęciu z okazji wręczenia nagrody PKN Orlen II Stopnia za oczyszczanie strumieni petrochemicznych w 2022 r. (Foto Ł-ICHP)

i realizowaną w Polsce<sup>39)</sup> strategią zagospodarowania odpadów. Przyjmuje się, że każdego roku na świecie pojawia się ok. 70 mln t zużytych materiałów elektronicznych z różnych procesów technologicznych, zawierających takie cenne metale, jak: Co, Ni, Li, Cd, Cu, Ag, Au oraz Al. Intensywny rozwój techniki i technologii elektronicznych powoduje konieczność recyklingu metali z elektroodpadów. Do odzysku tych metali, poza metodami hydrometalurgicznymi i pirometalurgicznymi bezpośredniego wytopienia, stosuje się kalcynację i wytopienie oraz chlorowanie i wysalanie, które to procesy prowadzone są w wysokich temperaturach i są energochłonne. Można również zastosować wmywanie metali z odpadów elektronicznych za pomocą kwasów lub wodorotlenków. Ługi otrzymywane w procesach hydrometalurgicznych charakteryzują się złożonym składem i ich dalszy przerób jest trudny. Często proponowane metody elektrochemicznego odzysku metali poprzez zastosowanie elektrolizy z kontrolą potencjału nie znalazły powszechnego zastosowania. Dążeniem UE w dziedzinie zagospodarowania odpadów jest stworzenie racjonalnej gospodarki surowcowej opartej na recyklingu oraz odzysku materiałowym. Istotną grupę odpadów o dużym znaczeniu dla gospodarki stanowią metale<sup>40)</sup>.

W ostatnich latach ilość odpadów sprzętu elektrycznego i elektronicznego gwałtownie wzrosła. W latach 2009–2025 liczba zużytych komputerów, telefonów, telewizorów

i innych urządzeń elektronicznych wzrosła 2-krotnie, do 70 mln t/r<sup>16)</sup>. Największe zużycie odnotowuje się w USA i w Chinach. Wzrost ilości elektroodpadów, w tym płyt drukowanych, związany jest z ekonomicznym rozwojem poszczególnych krajów. Odpady z płyt drukowanych PCB stanowią 4–7% całej masy odpadów elektronicznych. Materiały PCB zawierają metale, polimery, ceramikę i inne substancje. Płyty drukowane PCB zawierają znaczne ilości (15–40% mas.) miedzi i żelaza oraz 7–8% mas. innych metali, zwłaszcza takich jak nikiel, cyna, cynk, srebro, pallad oraz złoto. Elektroodpady są niezwykle istotnym surowcem z punktu widzenia odzysku materiałowego zarówno pod względem ekonomicznym, jak i środowiskowym<sup>41)</sup>.

Znane metody odzysku metali z materiałów elektronicznych i katalizatorów to metody hydrometalurgiczne, mechaniczne oraz elektrochemiczne. Zazwyczaj proces oparty jest na wstępnym prażeniu w wysokich temperaturach (700–1000°C), następnie ługowaniu odpadów za pomocą kwasów i mieszanin zawierających m.in. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuSO<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> i NaClO. W uzyskiwanych ługach znajdują się różne metale, które należy z nich wydzielić. Do tego celu mogą być stosowane metody elektrochemiczne, w których wydzielenie metali lub ich związków zachodzi w procesach katodowych lub anodowych. Zastosowanie elektrolizy z kontrolą potencjału w procesach wielkoskalowych jest jednak problematyczne.

Poszukuje się wciąż nowych, bardziej wydajnych metod recyklingu elektroodpadów. Po mechanicznym rozdrobnieniu i zazwyczaj sproszkowaniu materiał odpadowy poddawany jest rozdziałowi na frakcje metaliczną i organiczną metodami magnetycznymi, elektromagnetycznymi, elektrostatycznymi lub grawitacyjnymi. Odzysk metali prowadzony jest z zastosowaniem metod pirometalurgicznych lub hydrometalurgicznych z ługowaniem, a następnie ich chemicznym lub elektrochemicznym wydzielaniem. Po rozdrobnieniu często stosuje się prażenie w wysokich temperaturach, co pozwala na usunięcie frakcji organicznej poprzez jej spalenie. Prażenie zwiększa wydajność odzysku metali, szczególnie drobnych ziaren zamkniętych w polimerach, które przy zastosowaniu metod fizycznych mogą być kierowane do frakcji polimerowej. W metodach hydrometalurgicznych podstawowym procesem jest ługowanie mieszaniną stężonych kwasów HCl i HNO<sub>3</sub> (woda królewska), kwasem azotowym, siarkowym z dodatkami tiomocznika soli żelaza Fe(III) lub nadtlenu wodoru. Ługowanie za pomocą kwasów lub zasad powoduje równoczesne wymywanie różnych minerałów, co znacznie zmniejsza wydajność procesu. Ponadto, ze względu na wielostopniowe wymywanie, zużywa się ogromne ilości wody.

W związku z tym poszukuje się nowych metod i ekstraktów niewodnych, o większej selektywności i biokompatybilności w dziedzinie zwanej solwometalurgią. W tej grupie występują rozpuszczalniki organiczne, ciecze jonowe, rozpuszczalniki wysokoeutektyczne (DESy) i kwasy organofosforowe, takie jak Cyanex 272 i D2EHPA. Związki te mogą być użyte ponownie do procesu po oczyszczeniu.

## Podsumowanie

Prace naukowe Zespołu Cieczy Jonowych w Ł-ICH P obejmowały (i) określanie właściwości fizykochemicznych i termodynamicznych nowych substancji lub roztworów wykorzystywanych do: przemysłowej ekstrakcji, rozdziału substancji metodą krystalizacji, polepszania właściwości paliw silnikowych i strumieni petrochemicznych, polepszania składu kosmetyków i żywności oraz polepszania metod dostarczania leków do organizmu, (ii) określanie parametrów poszerzających stosowalność fenomenologicznych teorii opisujących właściwości i zachowanie substancji stałych lub ciekłych oraz umożliwiających przewidywanie nieznanymi charakterystyk związków organicznych, (iii) tworzenie banków danych termodynamicznych i fizykochemicznych w celu opracowania nowych metod przewidywania, np. gęstości lub lepkości nowych związków, oraz (iv) odzysk metali z elektrośmieci. Wszystkie te prace prowadzono z myślą o praktycznym ich wykorzystaniu w nowych procesach przemysłowych.

Otrzymano: 03-03-2026

Zrecenzowano: 27-04-2026

Zaakceptowano: 09-05-2026

Opublikowano: 25-05-2026

## LITERATURA

- [1] J. Cybulski, A. Wiśniewska, A. Kulig-Adamiak, L. Lewicka, A. Cieniacka-Rostonkiewicz, K. Kita, A. Fojutowski, J. Nawrot, K. Materna, J. Pernak, *Chem. Eur. J.* 2008, **14**, 9305.
- [2] *Pat. pol.* 211676 (2012).
- [3] *Pat. pol.* 207844 (2011).
- [4] *Pat. pol.* 208416 (2011).
- [5] *Pat. pol.* 208417 (2011).
- [6] *Pat. pol.* 208418 (2011).
- [7] J. Cybulski, A. Wiśniewska, T. Praczyk, A. Michalczyk, F. Walkiewicz, K. Materna, J. Pernak, *Tetrahedron Lett.* 2011, **52**, nr 12, 1325.
- [8] A. Wiśniewska, P.F.J. Lipiński, K. Woźniak, W.F. Sanjuan-Szklarz, A. Cieniacka-Rostonkiewicz, A. Michalczyk, Z. Dąbrowski, A. Kulig-Adamiak, J. Matalińska, A. Leś, J. Cybulski, *Acta Poloniae Pharm. Drug Res.* 2016, **73**, nr 3, 705.
- [9] *Pat. pol.* 209390 (2011).
- [10] *Pat. pol.* 213547 (2013).
- [11] *Pat. pol.* 214562 (2013).
- [12] *Pat. pol.* 227245 (2017).
- [13] Z. Dąbrowski, A. Wiśniewska, A. Kulig-Adamiak, J. Kamiński, *Polimery* 2012, **57**, nr 5, 375, <https://polimery.ichp.vot.pl/index.php/p/article/view/8372013>.
- [14] A. Wiśniewska, *Badania zależności struktura chemiczna – aktywność biologiczna grupy cieczy jonowych o działaniu przeciwdrobnoustrojowym*, Praca doktorska, Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska, 2015.
- [15] Z. Dąbrowski, *Chemia cieczy jonowych. Zastosowanie w syntezie organicznej*, Praca doktorska, Instytut Chemii Przemysłowej, Warszawa 2013.
- [16] U. Domańska, *Processes* 2019, **7**, nr 5, 277.
- [17] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, M. Więckowski, *J. Appl. Solution Chem. Modeling* 2018, **7**, 21.
- [18] U. Domańska, D. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, *Chrom. Sep. Tech. J.* 2018, **1**, nr 2, 116.
- [19] U. Domańska, M. Karpińska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, *Fluid Phase Equil.* 2019, **479**, 9.
- [20] U. Domańska, M. Wlazło, Z. Dąbrowski, A. Wiśniewska, *Fluid Phase Equil.* 2019, **485**, 23.
- [21] A. Łukomska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, U. Domańska, *J. Mol. Liq.* 2020, **307**, 112955.
- [22] A. Łukomska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, D. Kolasa, S. Luchcińska, U. Domańska, *J. Mol. Liq.* 2021, **343**, 117694.
- [23] P. Wiśniewski, K. Bożo, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, D. Kubica, J. Łuczak, U. Domańska, *Fluid Phase Equil.* 2022, **552**, 113296.
- [24] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, *Fluid Phase Equil.* 2022, **556**, 113397.
- [25] A. Łukomska, A. Wiśniewska, D. Dąbrowski, J. Lach, K. Wróbel, D. Kolasa, U. Domańska, *Molecules* 2022, **27**, 4984.
- [26] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, D. Kolasa, K. Wróbel, J. Lach, *Molecules* 2024, **29**, 3142.
- [27] U. Domańska, A. Wiśniewska, Z. Dąbrowski, *Separations* 2025, **12**, 167.
- [28] U. Domańska, J. Rolińska, *Solid-liquid equilibrium data collection*, t. 1, *Organic compounds. Monocarboxylic acids*, PWN, IChF PAN, Warszawa 1988.
- [29] A. Mączyński, U. Domańska, H. Szatyłowicz, *Solid-liquid equilibria (SLE)*, TRC Floppy Book, Thermodynamics Research Center, The Texas University, USA, 1997.
- [30] U. Domańska, [w:] *Development and applications in solubility* (red. T.M. Letcher), RSC Publishing, Thomas Graham House, Cambridge, UK, 2007, doi.org/10.1039/9781847557681-00094.
- [31] U. Domańska, [w:] *Ionic liquids in chemical analysis* (red. M. Koel), CRC Press, Taylor & Francis Group, Abingdon, UK, 2008.
- [32] *Pat. pol.* 27922 (2018).
- [33] *Pat. pol.* 242683(2023).
- [34] *Pat. pol.* 243206 (2023).
- [35] *Pat. pol.* 243042(2023).
- [36] *Pat. pol.* 243043 (2023).
- [37] *Zgł. pat. pol.* 444199 (2023).
- [38] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, *Dz.U. L* 312 z 22 listopada 2008 r.
- [39] Uchwała nr 96 Rady Ministrów z dnia 12 czerwca 2023 r. w sprawie Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2028, *M.P.* 2023, poz. 702.
- [40] S. Carrara i in., *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU. A foresight study*, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/386650>.
- [41] H.K. Amusaa, S. Anwera, A.K. Hamzat, I.A. Adeyemib, A. Giwaf, J.K. Alib, I.M. Al Nashef, E. Alhseinata, *Sustain. Chem. Environ.* 2026, **13**, 100307.