

Dr inż. Ewa Sylwia Kamińska

Instytut Transportu Samochodowego, Zakład Badań Ekonomicznych

ORCID: 0000-0002-4547-8775

e-mail: ewa.kaminska@its.waw.pl

Mgr Piotr Pawlak

Instytut Transportu Samochodowego

ORCID: 0000-0001-7713-9770

e-mail: piotr.pawlak@its.waw.pl

# Analiza ekobilansowa recyklingu zużytych litowo-jonowych akumulatorów samochodowych w technologii Retriev<sup>1</sup>

*The ecobalance analysis of the Retriev recycling technology of used car Lithium-Ion batteries*

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane technologie recyklingu akumulatorów litowo-jonowych (Lithium-Ion batteries – LIBs), zwanych dalej akumulatorami Li-Ion, wykorzystywanych jako źródło zasilania w samochodach hybrydowych i elektrycznych. Zagospodarowanie zużytych akumulatorów Li-Ion, zgodne z zasadami ochrony środowiska, umożliwia odzysk szeregu materiałów i związków, w tym litu, kobaltu i innych. W artykule przedstawiono również wyniki analizy ekobilansowej procesu recyklingu hydrometalurgicznego zużytych akumulatorów Li-Ion. Analizę przeprowadzono metodą IMPACT2002+. Wyniki podano w punktach środowiskowych, których wartość dodatnia oznacza szkodę środowiskową, wynik ujemny zaś korzyść środowiskową. Przedstawiono rezultaty analizy w kategoriach charakterystycznych dla metody IMPACT2002+. Są to: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu, zmiany klimatu oraz zużycie zasobów. Celem artykułu jest oszacowanie potencjalnych obciążeń środowiska charakterystycznych dla technologii recyklingu akumulatorów litowo-jonowych na podstawie wymagań ekologicznej oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment).

## Słowa kluczowe:

recykling, akumulatory litowo-jonowe, pojazdy hybrydowe i elektryczne

## Abstract

The article presents selected technologies for recycling Lithium-Ion batteries (LIBs), later referred to as Li-Ion, used as a power source in hybrid and electric cars. Utilization of the disused Li-Ion, in accordance with the environmental protection principles, allows to recover a number of materials and compounds, including lithium, cobalt and others. The paper also presents the results of an eco-balance analysis of the hydrometallurgical recycling process of the disused Lithium-Ion batteries. The analysis was carried out using the IMPACT2002+ method. The results are given in environmental points, whose positive value means environmental damage, the negative result is an environmental benefit. The results of the analysis are given for the categories specific for the IMPACT2002+ method. These are: human health, ecosystem quality, climate change and resource consumption. The aim of the article is to estimate the potential environmental burdens characteristic for the Lithium-Ion battery recycling technology using the requirements of the ecological Life Cycle Assessment.

## Keywords:

recycling, Lithium-Ion batteries, hybrid and electric vehicles

JEL: R

## Wstęp

Ogniwa litowo-jonowe należą obecnie do najpowszechniej stosowanych baterii wtórnych (akumulatorów) (Bakierska i Chojnacka, 2016). Są wykorzystywane między innymi jako źródło zasilania w samochodach elektrycznych. Typowy akumulator Li-Ion zawiera wagowo około 7% kobaltu oraz litu (w formie węgla), 4% niklu, 5% manganu, 10% miedzi, 15% glinu, 16% grafitu oraz 36%, innych materiałów (Boyden, 2014). Wzrost zapotrzebowania na energię dla samochodów hybrydowych i elektrycznych skutkuje zwiększeniem zużycia baterii oraz wzrostem zapotrzebowania na lit, który jest surowcem niezbędnym do ich produkcji. Wraz z grafitem został uznany za pierwiastek krytyczny dla gospodarki państw europejskich (Stefanowicz, 2014). Szacuje się, że baterie Li-Ion stanowią około 37% światowego rynku akumulatorów.

W 2005 r. liczba pojazdów elektrycznych wynosiła kilkaset egzemplarzy. Natomiast w 2016 r. na rynku było to już ponad 2 mln samochodów zasilanych bateriami (BEV) oraz pojazdów hybrydowych (PHEV — pojazdy hybrydowe z możliwością doładowania) (Molenda, 2018).

Do wyprodukowania samochodowego akumulatora Li-Ion wykorzystywanych jest ponad 50 kg LCE (Lithium Carbonate Equivalent). W związku z tym, szacuje się, że wzrost popytu na pojazdy zasilane tego typu akumulatorami o 1% może w konsekwencji doprowadzić do wzrostu zapotrzebowania na lit o ponad 50 tys. t LCE co roku (Jaworowska, 2017). W tabeli 1 zestawiono liczbę samochodów elektrycznych w Polsce w pierwszym półroczu 2019 r.

Żelazo, mangan, lit oraz nikiel są surowcami dostępnymi, ale niektóre metale wykorzystywane przy produkcji baterii Li-Ion, przede wszystkim kobalt i grafit, nie są wydobywane na ogromną skalę. Mate-

riały te wydobywa się jedynie w kilku krajach, których polityka handlowa może ograniczyć ich dostępność, a w efekcie wpłynąć niekorzystnie na ich ceny (Mayyas, Steward i Mann, 2018). Dlatego też istotne jest prowadzenie procesów umożliwiających ich odzysk z surowców wtórnych.

Wiele podmiotów gospodarczych prowadzi działalność w zakresie recyklingu akumulatorów litowo-jonowych, jednak firmy te ograniczają dostęp do informacji na temat prowadzonych procesów recyklingu. Z tego powodu jedynie w nielicznych opracowaniach LCA sporządzono kompleksowe oceny recyklingu zużytych akumulatorów litowo-jonowych oraz zamieszczono przykłady analiz ekobilansowych różnych możliwości ich przetwarzania.

Procesy pirometalurgiczne recyklingu baterii należą do procesów w wyższym stopniu uzależnionych od zużycia energii, z tego powodu mogą powodować wyższe emisje gazów cieplarnianych. Z kolei procesy recyklingu hydrometalurgicznego, w których przede wszystkim wykorzystywane są rozpuszczalniki, mogą wpływać niekorzystnie na środowisko w innych kategoriach środowiskowych (np. eutrofizacji) (Dyrekcja Generalna ds. Polityki Wewnętrznej, 2018).

W związku z brakiem usystematyzowania podejścia do analiz ekobilansowych w zakresie recyklingu akumulatorów litowo-jonowych w badaniach z tego obszaru pojawia się wiele niespójności. Dlatego w pracy Nordelöfa i in. (2019) podjęto próbę uporządkowania i przeglądu procedur modelowania etapu recyklingu akumulatorów litowo-jonowych, przede wszystkim metodami LCA.

W artykule Yu, Chena i Huanga (2014) wykorzystano metodę LCA do porównania wpływu na środowisko recyklingu zużytych akumulatorów litowo-jonowych oraz niklowo-wodorkowych. Badania przeprowadzono metodą Ekowskażnika 99. W wyniku otrzymanych analiz stwierdzono, że należy zachęcać do stosowania akumulatorów o wyższej gęstości energii. Akumulatory o dużej gęstości energii i długiej żywotności mają niewielkie obciążenia środowiskowe. Aby zmniejszyć wpływ wybranych akumulatorów na środowisko, liczba cykli ładowania-rozładowania podczas ich użytkowania, powinna wynosić co najmniej 200 (dla obydwu typów baterii). Ponadto zauważono duży strumień baterii różnego typu w odpadach komunalnych.

W wielu opracowaniach porównywany jest również wpływ wykorzystywanych materiałów zastosowanych w anodzie lub katodzie akumulatora na poziom potencjalnego oddziaływania na środowisko. Cusenza i in. (2019) przeprowadzili analizę ekobilansową litowo-jonowego akumulatora trakcyjnego, stosowanego w hybrydowych pojazdach elektrycznych typu plug-in. Przedmiotem badań były materiały kompozytowe tworzące katody. W granicach systemu analizy znalazły się procesy produkcji baterii, eksploatacji i recyklingu, w tym odzysk różnych frakcji materiałowych. Wyniki badań wskazały, że recykling baterii

Tabela 1

Park samochodów elektrycznych w Polsce  
— stan na koniec czerwca 2019 r.

Marka	Liczba [szt.]
BMW	1059
Nissan	1021
Tesla	445
Fiat	200
Renault	196
Volkswagen	125
Smart	89
Peugeot	64
Mitsubishi	59
Jaguar	53
Suma	3645

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Janas, 2019.

stanowi mniej niż 11% wszystkich ocenianych przez autorów kategorii wpływu, poza ekotoksycznością wód słodkich (60% wpływu na cykl życia). Odzysk materiałów (np. siarczanów kobaltu i niklu) i innych frakcji metali (np. aluminium i stali) jest szczególnie istotny w przypadku takich kategorii oddziaływania jak eutrofizacja mórz, toksyczność dla ludzi i zużycie zasobów abiotycznych.

W pracy Sun i in. (2020) dokonano oceny i ilościowego oszacowania wpływu akumulatorów litowo-jonowych na środowisko w całym cyklu życia pasażerskich pojazdów elektrycznych w sześciu kategoriach wpływu. Określono poziom: zapotrzebowania na energię pierwotną (PED), współczynnik ocieplenia globalnego (GWP), potencjał zakwaszenia (AP), potencjał tworzenia utleniaczy fotochemicznych (POCP), potencjał eutrofizacji (EP) i potencjał toksyczności dla ludzi (HTP). W efekcie przeprowadzonych analiz wynioskowano, że recykling ma znaczny wpływ przede wszystkim na dwie analizowane kategorie: potencjał tworzenia utleniaczy fotochemicznych oraz potencjał toksyczności dla ludzi.

Z kolei Engel (2016) przedstawił analizę LCA recyklingu akumulatorów litowo-jonowych przeprowadzoną z wykorzystaniem metody RECiPe dla punktów środkowych. Przebadał możliwość porównania różnych procesów recyklingu akumulatorów litowo-jonowych i oszacował poziom oddziaływania na środowisko procesów recyklingu w trzech kategoriach wpływu, tj.: potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), potencjału toksyczności dla ludzi (HTP) i potencjału ekotoksyczności lądowej (TETP). Uzyskane wyniki wskazują, że główna część oddziaływania procesów recyklingu na środowisko jest związana ze składowaniem odpadów materiałowych, a także ze spalaniem tworzyw sztucznych i wytwarzaniem energii elektrycznej potrzebnej do procesów energochłonnych (np. obróbki wytapiania). Najkorzystniejsze dla środowiska są procesy odzysku zarówno tworzyw sztucznych, jak i litu.

Celem niniejszego artykułu jest oszacowanie potencjalnych obciążeń środowiska charakterystycz-

nych dla technologii recyklingu akumulatorów litowo-jonowych na podstawie wymagań ekologicznej oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment), którą zdefiniowano jako „zebranie i ocenę wejść, wyjść oraz potencjalnych wpływów środowiskowych systemu wyrobu w okresie jego cyklu życia” (norma ISO PN-EN 14 044).

## Recykling akumulatorów litowo-jonowych

Recykling akumulatorów Li-Ion ma na celu przede wszystkim odzysk pierwiastków występujących w aktywnych materiałach elektrodowych akumulatorów, tj. litu, kobaltu, grafitu, niklu i manganu. Według raportu Szwedzkiej Agencji Energii, ponad 70% wszystkich poddawanych procesom recyklingu baterii Li-Ion jest przetwarzanych w Chinach oraz Korei Południowej<sup>2</sup>. W szwedzkim Instytucie Środowiska przeanalizowano wpływ baterii Li-Ion na środowisko. Stwierdzono, że „wyprodukowanie 1 kWh pojemności akumulatora generuje od 150 do 200 kg CO<sub>2</sub>, który jest emitowany do atmosfery przez zakład produkcyjny (...), a zależność pojemności baterii od emisji CO<sub>2</sub> jest liniowa, rośnie wprost proporcjonalnie. Nie jest tak, że w większym akumulatorze emisja CO<sub>2</sub> na 1 kWh jest mniejsza”<sup>3</sup>.

Odzysk i powtórne wykorzystanie elementów pochodzących ze zużytych akumulatorów Li-Ion, wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym (*circular economy*). Jest ona realizowana z wykorzystaniem działań powodujących zwiększenie trwałości produktów oraz wielokrotne i maksymalne wykorzystywanie zasobów (Komisja Europejska, 2015).

W tabeli 2 wymieniono główne procesy recyklingu zużytych akumulatorów Li-Ion. Najefektywniejszymi procesami recyklingu akumulatorów Li-Ion są procesy hydrometalurgiczne stanowiące około 57% wszystkich rodzajów procesów recyklingu tego rodzaju akumulatorów. Wykorzystuje się w nich proces chemicz-

Tabela 2

Zestawienie procesów recyklingu akumulatorów Li-Ion

Proces recyklingu	Stosowana metoda	Państwo
Umicore	Pirometalurgiczna	Belgia
Batrec-Sumitomo	Pirometalurgiczna	Chiny
Vacuum destillation	Pirometalurgiczna	Niemcy
Recupyl	Hydrometalurgiczna	Francja
Sony-Sumitomo	Hydrometalurgiczna	Japonia
AEA	—	Stany Zjednoczone
Retriev (dawniej Toxco)	Hydrometalurgiczna	Stany Zjednoczone
Valibat	Hydrometalurgiczna	Francja

Źródło: Wójcik, Pawłowska i Stachowicz, 2017.

nego strącania metali (Zeng, Li i Singh, 2014). Do tej grupy należy proces Retriev (dawniej Toxco Inc.), w efekcie którego odzyskiwane są węglan litu oraz CO<sub>2</sub>.

W państwach europejskich proces hydrometalurgiczny stosowany jest w przedsiębiorstwie Recupyl. Surowcem wykorzystywanym w tym procesie jest masa elektrodowa, będąca efektem przetwarzania mechanicznego (kruszenie) zużytych akumulatorów Li-Ion (Potempa i in., 2017).

## Obciążenie środowiska związane z hydrometalurgicznym procesem recyklingu akumulatorów Li-Ion (proces Retriev)

### Założenia badawcze

Zamiarem autorów było przeprowadzenie analizy ekobilansowej oraz oszacowanie wpływu na środowisko technologii recyklingu zużytych akumulatorów litowo-jonowych z wykorzystaniem dostępnej literatury. Granice analizy przedstawiono na rysunku 1. Jej przedmiotem jest proces recyklingu zużytych samochodowych akumulatorów litowo-jonowych (fazy: rozdrabniania, kruszenia, przesiewania oraz filtrowania) aż do etapu odzysku surowców wtórnych (frakcji tworzywa sztucznych i frakcji metali nieżelaznych).

Obecnie w Polsce w zakresie analiz ekobilansowych obowiązują dwie normy: PN-EN ISO 14040:2009 „Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura” oraz PN-EN ISO 14044:2009 „Zarządzanie środowiskowe. Ocena cy-

klu życia. Wymagania i wytyczne”. Do przeprowadzenia analizy ekobilansowej technologii recyklingu zastosowano metodę oceny cyklu życia produktu LCA (Life Cycle Assessment). Umożliwia ona zidentyfikowanie potencjalnych oddziaływań środowiskowych analizowanej technologii (Kamińska, Merkiż i Kamiński, 2013).

Analizę Life Cycle Assessment opracowywano na podstawie informacji o przepływach materiałowych i energetycznych w granicach określonego systemu (proces recyklingu Retriev) oraz w odniesieniu do przyjętej jednostki (907,4 kg zużytych akumulatorów litowo-jonowych). Według normy ISO jednostka funkcjonalna jest ilościowym efektem systemu wyrobu, stosowanym jako jednostka odniesienia w badaniu cyklu życia (norma PN-EN ISO 14040). Zgodnie z wymaganiami norm analiza LCA powinna składać się z czterech etapów: określenia celu i zakresu analiz, analizy zbiorów wejść i wyjść, oceny wpływu cyklu życia oraz interpretacji wyników (norma PN-EN ISO 14040).

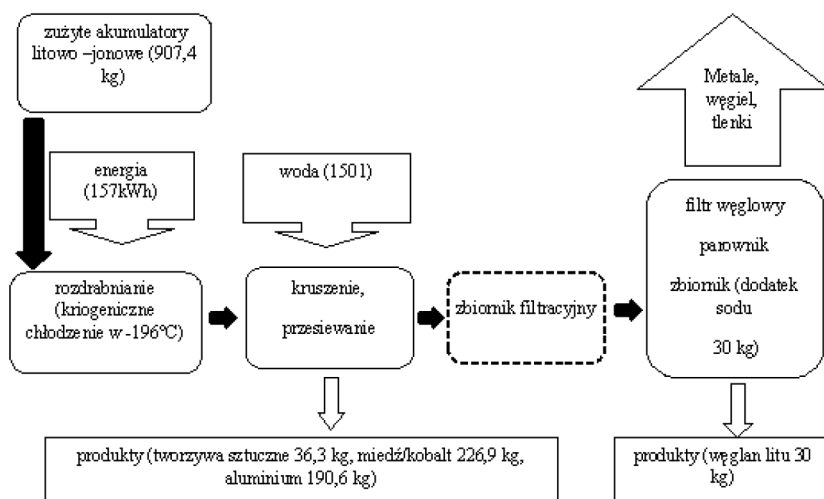
Cel i zakres analizy powinny określać możliwości wykorzystania jej wyników, powód jej przeprowadzenia, poziom szczegółowości oraz grupę potencjalnych odbiorców.

Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI) jest związana z procedurą zbierania potrzebnych danych, a także z określeniem procedury obliczeniowej, umożliwiającej ilościową ocenę danych wejściowych oraz wyjściowych procesu będącego przedmiotem analizy.

Trzeci z wymienionych etapów analizy LCA — ocena wpływu cyklu życia (LCIA) — obejmuje trzy podetapy obowiązkowe: wybór kategorii wpływu, wskaźników kategorii i modeli charakteryzowania, przypisanie wyników LCI do poszczególnych kategorii wpływu (klasyfikacja), obliczenie wartości wskaź-

Rysunek 1

Proces recyklingu hydrometalurgicznego akumulatorów litowo-jonowych Retriev



Źródło: opracowanie własne na podstawie: Sonoc, Jeswiet i Soo, 2015.

nika kategorii (charakteryzowanie) oraz cztery podetapy opcjonalne. Należą do nich: normalizowanie, grupowanie, ważenie, analiza jakości danych (norma PN-EN ISO 14044).

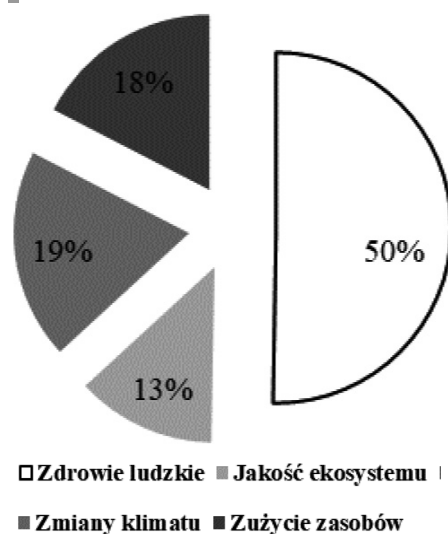
Celem ostatniego etapu LCA jest, oprócz analizy wyników, sformułowanie wniosków, wyjaśnienie barier oraz przygotowanie informacji będących efektem ustaleń poprzednich faz LCA (Górzyński, 2007).

Jak już wspomniano, na potrzeby analizy przyjęto, że procesowi recyklingu poddawane jest 907,4 kg zużytych akumulatorów Li-Ion. Proces hydrometalurgiczny wymaga wykorzystania 198 MJ energii elektrycznej do chłodzenia oraz 565 MJ do mechanicznego kruszenia baterii. Ponadto w procesie potrzebna jest woda (150 l) oraz dodawany do niej związek neutralizujący w postaci sody (30 kg). Produktami procesu są następujące frakcje: tworzywa sztuczne (36,3 kg), metale nieżelazne Cu/Co (226,9 kg), Al (190,6 kg). W procesie recyklingu otrzymywane są: mieszanina tlenków metali oraz węgla (453,7 kg), a także węglan litu ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$  — 30 kg) (Gaines, 2014; Sonoc, Jeswiet i Soo, 2015).

W celu oszacowania potencjalnego wpływu technologii recyklingu zużytych baterii Li-Ion na środowisko wykorzystano oprogramowanie SimaPro 9.0, przeznaczone do przeprowadzania analiz ekobilansowych. Narzędzie to ma wbudowaną bazę siedemnastu metod wykorzystywanych do analiz. W pracy wykorzystano metodę IMPACT2002+, w której wyróżniono 14 kategorii oddziaływań na środowisko oraz 4 kategorie szkód. Są to: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu, zmiany klimatu oraz zużycie zasobów. Wyniki analizy podano w punktach środowiskowych

Rysunek 2

Wpływ procesu recyklingu zużytych baterii Li-Ion (Retriev) na kategorie szkód charakterystycznych dla metody IMPACT2002+ [%]



Źródło: opracowanie własne.

(Pt), których wartość dodania oznacza szkodę natomiast wartość ujemna pozytywny wpływ na środowisko. Punkt środowiskowy [Pt] oznacza stosunek całości obciążenia środowiska w Europie do liczby mieszkańców, pomnożony przez 1000. Oznacza to, że 1000 Pt odpowiada poziomowi rocznego obciążenia środowiska generowanego przez jednego mieszkańca Europy.

Prowadzenie działalności produkcyjnej zazwyczaj działa niekorzystnie na środowisko.

Zastosowanie metody LCA do szacowania wpływu na środowisko technologii recyklingu akumulatorów Li-Ion, dzięki której odzyskiwane są węglan litu oraz  $\text{CO}_2$ , umożliwia uzyskanie informacji pozwalających zmniejszyć niekorzystny wpływ analizowanych procesów na środowisko.

### Wyniki analizy potencjalnych obciążeń środowiska w wyniku zastosowania do recyklingu akumulatorów Li-Ion technologii Retriev oraz ich interpretacja

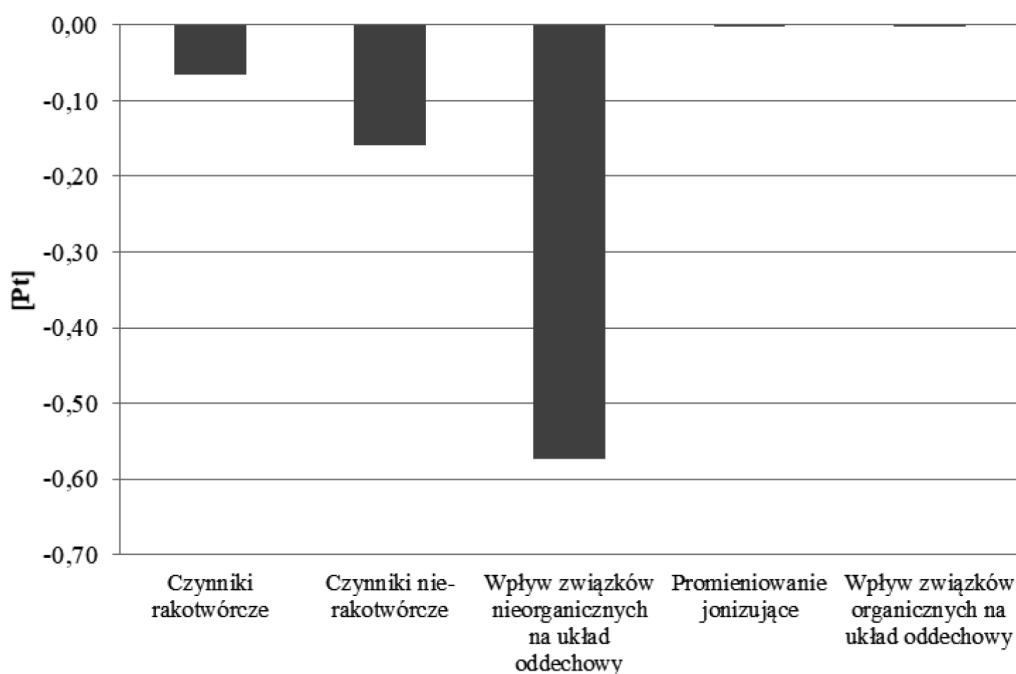
Technologia recyklingu zużytych akumulatorów Li-Ion (rysunek 2) generuje największe korzyści środowiskowe w kategoriach związanych ze zdrowiem ludzkim, których poziom sięga 50% wszystkich zidentyfikowanych korzyści środowiskowych (-0,78 Pt). Kategorie związane ze zmianami klimatu oraz zużyciem zasobów stanowią odpowiednio 18% i 19% wszystkich zidentyfikowanych korzyści środowiskowych (-0,27 Pt i -0,30 Pt). Na nieco niższym poziomie, tj. 13% (-0,20 Pt), kształtują się korzyści wynikające z zaoszczędzenia surowców pierwotnych.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki procesu recyklingu zużytych akumulatorów Li-Ion, przeprowadzonego w technologii Retriev, dla kategorii oddziaływań z obszaru zdrowia ludzkiego. Proces recyklingu przynosi korzyści w większości przeanalizowanych kategorii, mogących potencjalnie oddziaływać na jakość zdrowia organizmów żywych. Najwyższy poziom korzyści środowiskowych, kształtujący się na poziomie -0,57 Pt, jest efektem zmniejszenia emisji substancji nieorganicznych, powodujących choroby układu oddechowego. Istotne oddziaływanie na poziom sumarycznego wyniku w tej kategorii szkód środowiskowych ma obniżenie poziomu emisji substancji wpływających na rozwój chorób innych niż nowotworowe. Stanowi ono około 10% korzyści we wszystkich zidentyfikowanych kategoriach i wynosi -0,16 Pt. W przypadku procesu Retriev nie zidentyfikowano kategorii związanych z powstawaniem substancji powodujących zubożenie warstwy ozonowej. Ograniczenie emisji substancji mogących powodować choroby nowotworowe stanowi około 4,2% zidentyfikowanych korzyści środowiskowych i przyjmuje wartość -0,06 Pt.

W porównaniu z poziomem korzyści środowiskowych oszacowanych dla technologii recyklingu zuży-

Rysunek 3

Wpływ procesu recyklingu zużytych Li-Ion na kategorie związane z oddziaływaniem na zdrowie ludzkie [Pt]



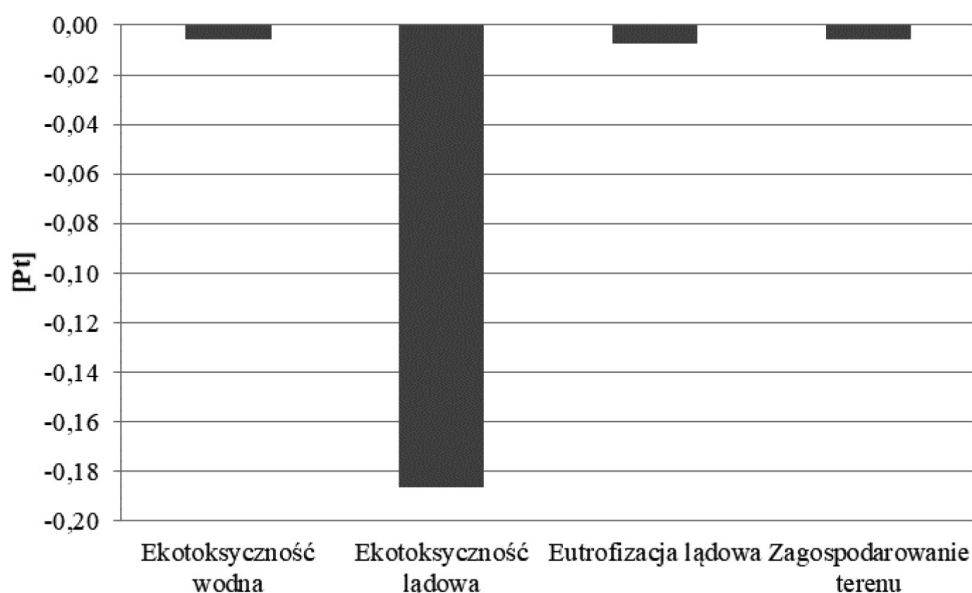
Źródło: opracowanie własne.

tych Li-Ion w kategoriach związanych ze zdrowiem ludzkim wyniki przedstawione na rysunku 4 wskazują, że w obszarze jakości ekosystemu uzyskano poziom korzyści środowiskowych na niewiele niższym poziomie. Proces recyklingu akumulatorów w tej grupie oddziaływań w żadnej kategorii nie wywiera ne-

gatywnego wpływu na środowisko, podobnie jak w kategoriach związanych ze zdrowiem ludzkim. Również w tej grupie oddziaływań korzyści środowiskowe są efektem zmniejszenia emisji substancji szkodliwych, które wynikają z wykorzystania surowców wtórnych w procesach produkcyjnych.

Rysunek 4

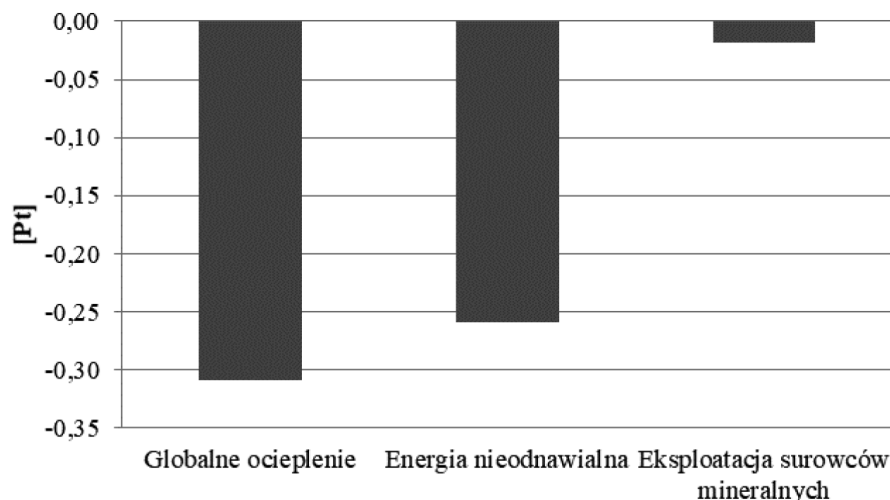
Wpływ procesu recyklingu zużytych Li-Ion na kategorie związane z oddziaływaniem na jakość ekosystemu [Pt]



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 5

Wpływ procesu recyklingu zużytych akumulatorów Li-Ion na kategorie związane ze zmianami klimatu oraz wyczerpywaniem się zasobów [Pt]



Źródło: opracowanie własne.

Korzyści zidentyfikowane w kategorii zagospodarowania terenu wynikają z ograniczenia eksploatacji środowiska w aspekcie braku pozyskiwania surowców pierwotnych oraz ze zmniejszenia powierzchni terenu przeznaczonego do zagospodarowania pod składowiska odpadów.

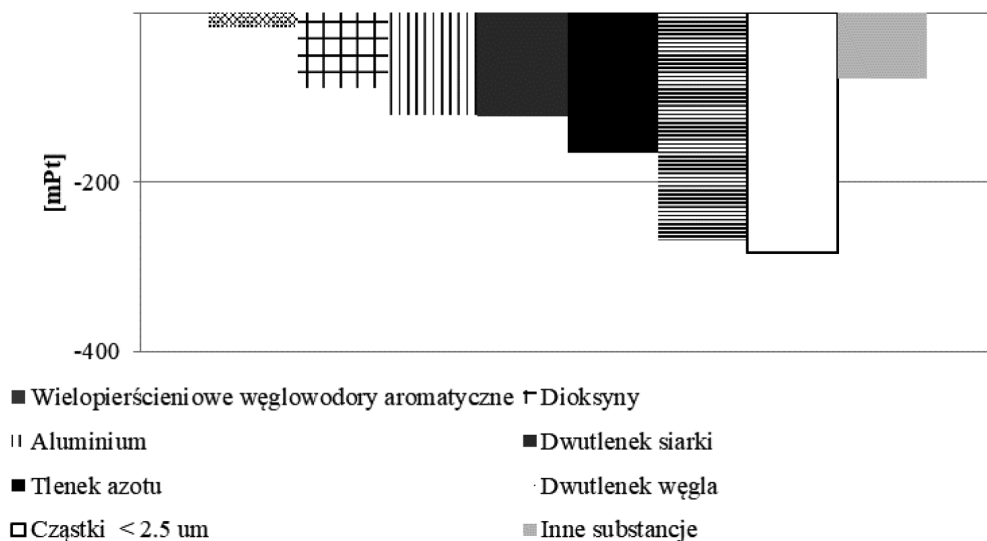
Z rezultatów przedstawionych na rysunku 5 wynika, że poddanie procesowi recyklingu 907,4 kg zużytych akumulatorów Li-Ion przynosi korzyści środowiskowe również w kategoriach związanych ze zmiana-

mi klimatu oraz wyczerpywaniem zasobów. W grupie oddziaływań dotyczących wyczerpywania zasobów naturalnych przeważają korzyści środowiskowe związane z ograniczeniem wykorzystania paliw kopalnych (-0,25 Pt) nad korzyściami z ograniczenia zapotrzebowania na wydobycie surowców mineralnych (-0,01 Pt).

Na podstawie wyników przedstawionych na rysunku 6 można wywnioskować, że ograniczenie poziomu emisji substancji do powietrza kształtuje się na najwyższym poziomie dla cząstek stałych i dwutlenku

Rysunek 6

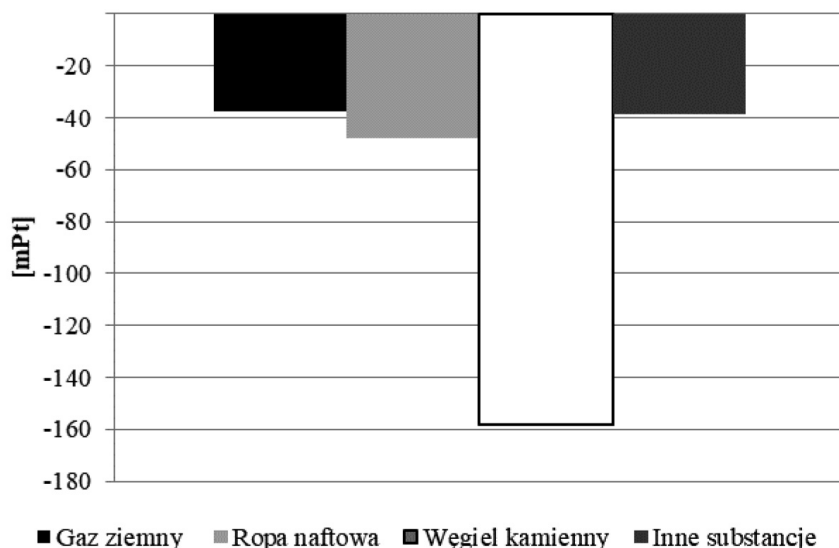
Wpływ procesu recyklingu zużytych akumulatorów Li-Ion (Retriev) na emisje do powietrza. Metoda IMPACT2002+ [mPt]



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 7

Wpływ procesu recyklingu zużytych akumulatorów Li-Ion (Retriev) na zużycie surowców naturalnych. Metoda IMPACT2002+ [mPt]



Źródło: opracowanie własne.

węgla (-283 mPt i -270 mPt), co stanowi odpowiednio 24,71% i 23,58% wszystkich zidentyfikowanych emisji. Należy podkreślić, że punkt odcięcia ustalono na poziomie 1%, co oznacza, że wszystkie zidentyfikowane oddziaływania, mające mniejszy niż jedno-procentowy udział w sumarycznym oddziaływaniu środowiskowym, nie zostały poddane analizie. Z kolei ograniczenie emisji tlenu azotu stanowi 14,49% wśród wszystkich emisji. Korzyść wynikająca ze zmniejszenia emisji dwutlenku siarki i aluminium kształtuje się na poziomie -122 mPt i -120 mPt, co stanowi około 10,5% wszystkich zidentyfikowanych korzyści środowiskowych w kategorii emisji do powietrza.

W efekcie procesu recyklingu akumulatorów Li-Ion powstaje szereg surowców, które mogą być produktami lub surowcami do produkcji nowych materiałów. Z tego powodu jest możliwe zaoszczędzenie surowców pierwotnych, co można wywnioskować na podstawie rysunku 7. Zidentyfikowano korzyści środowiskowe w aspekcie zmniejszenia wykorzystania węgla kamiennego (ponad 55%), ropy naftowej (48%) oraz gazu ziemnego i innych surowców (na poziomie około 38%).

## Przypisy/Notes

<sup>1</sup> Praca statutowa ITS (nr 06/19/ZBE/009), pt: „Wybrane elementy cyklu życia akumulatorów samochodowych w aspekcie wdrażania elektromobilności w Polsce” (Ewa Kamińska).

<sup>2</sup> Por. <https://leonardo-energy.pl/potencjal-recyklingu-baterii/> (27.10.2020)

<sup>3</sup> Tamże.

## Zakończenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy ekobilansowej zastosowania technologii recyklingu zużytych samochodowych akumulatorów litowo-jonowych Retriev dla przyjętej jednostki funkcjonalnej (907,4 kg zużytych akumulatorów poddanych procesowi recyklingu hydrometalurgicznego). Rezultaty analizy zostały podane w punktach środowiskowych, co umożliwia porównanie wyników w celu wskazania procesów i działań w stopniu większym lub mniejszym wpływających na środowisko.

Na podstawie przeprowadzonych badań obliczono, że sumaryczna wartość korzyści środowiskowych osiągniętych w procesie recyklingu 907,4 kg zużytych akumulatorów litowo-jonowych kształtuje się na poziomie -1,58 Pt. Nie zidentyfikowano negatywnego wpływu badanej technologii na środowisko, co może wynikać z zastosowania surowców wtórnych do produkcji nowych materiałów. Jest to tak zwana produkcja uniknięta. Do odzyskanych surowców należą: węgiel litu, aluminium oraz mieszanina miedzi i kobaltu.



## Bibliografia/References

- Bakierska, M., Chojnacka, A. (2016). Akumulatory litowe jako współczesne systemy magazynowania energii. *Wiadomości Chemiczne*, (68), 855–871.
- Boydén, A. (2014). *The environmental impacts of recycling portable lithium-ion batteries*. Australian National University, Department of Engineering.
- Cusenza, M. A., Bobba, S., Ardente, F., Cellura M., Di Persio F. (2019). Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Clean Production*, 215, 634–649.
- Dyrekcja Generalna ds. Polityki Wewnętrznej, Departament Tematyczny ds. Polityki Strukturalnej i Polityki Spójności (2018). Badanie dla Komisji Transportu i Turystyki — Samochody elektryczne o napędzie bateryjnym: rozwój rynku i emisje w całym cyklu życia. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL\\_STU\(2018\)617457\\_PL.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_STU(2018)617457_PL.pdf) (27.10.2020).
- Engel, J. (2016). *Development perspectives of Lithium-Ion recycling processes for electric vehicle batteries*. Open Access Master's Theses. Paper 905.
- Gaines, L. (2014). The Future of Automobile Battery Recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1, 2–7.
- Górzyński, J. (2007). *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- Janas, P. (2019). *Firmy ratują sprzedaż aut elektrycznych*. [https://www.samar.pl/\\_/3/3.a/104111/3.sc/11/Firmy-ratują-sprzedaż-aut-elektrycznych-.html?locale=pl](https://www.samar.pl/_/3/3.a/104111/3.sc/11/Firmy-ratują-sprzedaż-aut-elektrycznych-.html?locale=pl) (27.10.2020).
- Jaworowska, M. (2017). *Akumulatory Li-Ion — czy zabraknie materiałów do ich budowy?* <https://elektronikab2b.pl/biznes/33923-akumulatory-li-ion-czy-zabraknie-materialow-do-ich-budowy> (27.10.2020).
- Kamińska, E., Merkiś, J., Kamiński, T. (2013). Wykorzystanie metody LCA do szacowania poziomu obciążeń środowiska związanych z odzyskiem ołowiu z surowców wtórnych. *Chemik*, 67(10), 963–970.
- Komisja Europejska (2015). Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego komitetu ekonomiczno-społecznego i komitetu regionów. Zamknięcie obiegu — plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym COM/2015/0614 final. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0019.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF) (27.10.2020).
- Mayyas, A., Steward, D., Mann, M. (2018). The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>.
- Molenda, J. (2018). Akumulatory Li-ion i Na-ion strategią rozwoju polskiej gospodarki. *Biuletyn AGH*, (126–127), 4–11.
- Nordelöf, A., Poulikkiddou, S., Chordia, M., Bitencourt de Oliveira, Tivander, J., Arvidsson, R. (2019). Methodological approaches to end-of-life modeling in Life Cycle Assessments of Lithium-Ion batteries. *Batteries*, 5(3), 51. <https://doi.org/10.3390/batteries5030051>
- Polski Komitet Normalizacyjny (2009a). Norma PN-EN ISO 14040:2009. Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Zasady i struktura. Warszawa.
- Polski Komitet Normalizacyjny (2009b). Norma ISO PN-EN ISO 14044:2009. Zarządzanie środowiskowe. Ocena cyklu życia. Wymagania i wytyczne. Warszawa.
- Potempa, M., Lewandowski, D., Mikłasz, W., Gawliczek, M. (2017). Recykling akumulatorów Li-Ion. W: M. Bogacka, K., Pikoń (red.), *Współczesne problemy energetyki IV*, 63–72, Gliwice: Politechnika Śląska.
- Sonoc, A., Jeswiet, J., Soo, K. V. (2015). Opportunities to improve recycling of automotive lithium-ion batteries. *Procedia CIRP*, 29, 752–757.
- Stefanowicz, J. A. (2014). *Strategia surowcowa w strategiach zintegrowanych ŚSRK i KPZ 2030 — obszary funkcjonalne i złoza strategiczne. Materiały z XXVIII Konferencji z cyklu Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej*. Zakopane 12–15.10.2014, 63–79.
- Sun, X., Luo, X., Zhang, Z., Meng, F., Yang, J. (2020). Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123006>
- Wójcik, M., Pawłowska, B., Stachowicz F. (2017). Przegląd technologii recyklingu zużytych akumulatorów litowo-jonowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, 295(89), 107–120.
- Yu, Y., Chen, B., Huang, K. (2014). Environmental impact assessment and end-of-life treatment policy analysis for Li-Ion batteries and Ni-MH batteries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(3), 3105–3198.
- Zeng, X., Li, J., Singh, N. (2014). Recycling of spent lithium-ion battery: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, (44), 1129–1165.

### Strony internetowe/Websites

<https://leonardo-energy.pl/potencjal-recyklingu-baterii/> (27.10.2020)

<http://knurow.solidarnoscgornicza.org.pl/2018/03/09/szukajacy-raport-samochody-elektryczne-nie-sa-ekologiczne/> (27.10.2020)

#### Dr inż. Ewa Sylwia Kamińska

Absolwentka Politechniki Lubelskiej. W latach 2007–2013 doktorantka zajmująca się recyklingiem i analizami ekobalansowymi akumulatorów kwasowo-olowiowych. W 2013 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (specjalność ekologia transportu). Ukończyła studia podyplomowe o profilu ekonomicznym na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie (2004). W latach 2009–2018 była współzałożycielem oraz sekretarzem Polskiego Stowarzyszenia Naukowego Recyklingu. Obecnie jest adiunktem w Pracowni Badań Ekonomicznych Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie. Specjalizuje się w zagadnieniach oceny cyklu życia (LCA) pojazdów wycofanych z eksploatacji, zużytych akumulatorów (kwasowo-olowiowych) Autorka wielu publikacji dotyczących technologii recyklingu oraz zarządzania środowiskowego.

#### Dr inż. Ewa Sylwia Kamińska

PhD, graduated from the Lublin University of Technology. From 2007 to 2013 she was a post-graduate student and dealt with issues of recycling of lead-acid rechargeable batteries and associated ecological balances. In 2013, she was awarded the degree of doctor of technical sciences in the discipline of machine construction and operation (specialty: transport ecology). In 2004 she also completed post-graduate studies in the field of economy at Maria Curie-Skłodowska University in Lublin (UMCS). She was co-founder and the secretary of the Polish Association of Scientific Recycling from 2006 to 2018. She has been employed at the Motor Transport Institute, currently at the team of Economic Research Department. She has been majored in application of the Life Cycle Assessment (LCA) tool to end-of-life vehicles and lead-acid rechargeable batteries. Her scientific output comprises a series of manuscripts dedicated to recycling technologies and environmental management.

**Mgr Piotr Pawlak**

Absolwent, a obecnie doktorant w Szkole Głównej Handlowej w Warszawie. Zawodowo związany z Instytutem Transportu Samochodowego w Warszawie. Obecnie asystent naukowy w Centrum Telematyki Transportu ITS. Uczestniczy w realizacji prac statutowych, jak również w realizacji innych prac krajowych oraz projektów międzynarodowych prowadzonych przez Instytut Transportu Samochodowego w zakresie badawczym tej gałęzi transportu. Podczas realizacji pracy naukowej bierze udział w konferencjach, seminariach, spotkaniach branżowych oraz projektowych. Autor wielu publikacji związanych z zagadnieniami ekonomiczno-organizacyjnymi transportu drogowego, jak również z zagadnieniami nowoczesnych technologii związanych z rozwojem tej gałęzi transportu.

**Mgr Piotr Pawlak**

MA, a graduate and currently a PhD student at the Warsaw School of Economics. Professionally a research assistant at the Motor Transport Institute in Transport Management and Telematics Centre. He participate in statutory works and in the implementation of other national works as well as international projects carried out by the Motor Transport Institute in the field of research on this branch of transport. During the implementation of scientific work, he takes part in conferences, seminars, industry and project meetings. Author of many publications related to economic and organizational issues of road transport, as well as to the issues of modern technologies related to the development of this branch of transport

**PWE poleca**

Michał Michorowski, Rafał Sieradzki, Bogumiła Szopa

**POLSKIE  
GOSPODARSTWA DOMOWE  
WOBEC WYZWAŃ  
GLOBALIZACYJNYCH**



Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne

W monografii zdecydowano się na pokazanie wpływu ogólnie korzystnej koniunktury gospodarczej w Polsce w powiązaniu z przekształceniami systemowymi na warunki życia statystycznego gospodarstwa domowego. Wyekspozowano te aspekty sytuacji gospodarstw, które w istotny sposób wiążą się z aktualnymi, istotnymi wyzwaniami, jakie niesie ze sobą współczesny świat, m.in. globalizację. Głównym kryterium wyboru tematów w książce były kwestie nieporuszane wcześniej, ogólnie dotyczące szeroko mikroekonomicznego, a mianowicie:

- ✦ bezpieczeństwo ekonomiczne gospodarstw domowych w kontekście programu „Rodzina 500+”,
- ✦ oszczędzanie i aktywa finansowe gospodarstw domowych,
- ✦ finansowe turbulencje i upadłość konsumencka,
- ✦ korzystanie z energii elektrycznej.

**Księgarnia internetowa: [www.pwe.com.pl](http://www.pwe.com.pl)**