



**Wydział Samochodów  
i Maszyn Roboczych**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

# ***Elektromobilność dla nauczycieli***

**Przedmiot:  
Baterie trakcyjne**

**Prowadzący:  
dr hab. inż. Leszek Niedzicki, prof. PW**



**Politechnika Warszawska**



**Ministerstwo  
Edukacji Narodowej**

Realizowane w ramach  
umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# O PROWADZĄCYM

- Obszar badań – komponenty do ogniw Li-ion i post-Li-ion, opracowywanie, synteza i optymalizacja elektrolitów, nowych soli litowych i cieczy jonowych.
- Niemal 20 lat doświadczenia, kilkanaście projektów R&D europejskich i na zlecenie firm, współpraca z producentami ogniw i komponentów do ogniw Li-ion.
- >10 patentów, 5 wdrożeń, w tym 1 międzynarodowe na wielką skalę (ton)
- 35+ publikacji, 1000+ cytowań, H-indeks = 18



**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# SPRAWY ORGANIZACYJNE

- Prowadzący:  
dr hab. inż. Leszek Niedzicki, prof. uczelni

- Kontakt:

Wydział Chemiczny, Gmach Starej Chemii  
Noakowskiego 3, p. 346 (opis „jak dotrzeć” na [www](#))

telefon: 22 234 7421

email: [leszek.niedzicki@pw.edu.pl](mailto:leszek.niedzicki@pw.edu.pl)

[www: lniedzicki.ch.pw.edu.pl](http://lniedzicki.ch.pw.edu.pl) (wykłady w pdf)

konsultacje: MS Teams  
+ aktualne dane na stronie [www](#)

# BIBLIOGRAFIA

Wykład jest samodzielny i samowystarczalny, ale poniższe pozycje polecam dla uzupełnienia wiedzy:

M. Winter, Chem. Rev. 104 (2004) 4245.

M.S. Whittingham, Chem. Rev. 104 (2004) 4271.

Designing Electrolytes for Lithium-Ion and Post-Lithium Batteries (Eds. W. Wieczorek, J. Płocharski), CRC Press, Taylor & Francis Group, Singapore, 2021.

M. Armand et al., J. Power Sources 479 (2020) 228708. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228708

C. Wölke et al., Adv. Mater. Interfaces (2022) 2101898. DOI: 10.1002/admi.202101898



# Wstęp – przegląd technologii, słowniczek

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# MIARY

|                 |                                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|
| Napięcie        | – w V (woltach)                                                    |
| Prąd            | – w A (amperach)                                                   |
| Moc             | – w W (watach)                                                     |
| Energia         | – w J (dżulach), w praktyce w Wh (=3600 J)                         |
| Gęstość energii | – w Wh/kg lub Wh/dm <sup>3</sup>                                   |
| Gęstość mocy    | – w W/kg lub W/dm <sup>3</sup>                                     |
| Gęstość prądu   | – w A/cm <sup>2</sup> , ew. dzieląc gęstość<br>mocy przez napięcie |
| Czas życia      | – w latach lub ilości cykli<br>ładowania-rozładowania              |

# PRZECHOWYWANIE ENERGII

Od największej do najmniejszej skali stosowania:

Elektrownie szczytowo-pompowe

Termiczne (stopiona sól lub oleje mineralne)

Paliwo do ogniw paliwowych (fuel cells)

Ogniwa galwaniczne (akumulatory)

Superkondensatory (EDLC, hybrydowe)

Ogniwa przepływowe (flow cells)

Bezwładniki (koła zamachowe – flywheels)

Sprężone powietrze (CAES) lub inne gazy

**OPRÓCZ CENY I SKALI KLUCZOWY JEST CZAS REAKCJI!**

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**

**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# OGNIWA GALWANICZNE

Wszelkie chemiczne źródła energii, w których w wyniku reakcji utleniania-redukcji dochodzi do przepływu elektronów przez zewnętrzny obwód.

W przeciwieństwie do ogniw paliwowych i przepływowych nie można im „dodać” pojemności i mają zamkniętą strukturę. Jest wiele typów ogniw galwanicznych, ale podstawowy podział jest na ładowalne (wtórne) i nieładowalne (pierwotne). Nieładowalne zwykle nie przekraczają kilku Wh. Zespoły ogniw ładowalnych do zastosowań energetycznych mają skalę do ok. 100 MWh.



# PRZECHOWYWANIE ENERGII

Przechowywanie energii za pomocą procesów chemicznych:

Superkondensatory – niska gęstość energii

Ogniwa jednorazowe – marnotrawstwo

**Ogniwa wielorazowe – wysoka gęstość energii  
i dojrzała technologia**

Ogniwa paliwowe –     potrzeba dostarczania paliwa,  
                                  (przyszłość w przypadku  
                                  zasilania wodorem wytwarzanym  
                                  z wyrównywania dostaw energii z OZE)

Ogniwa przepływowe – wciąż eksperymentalne



# AKUMULATORY, BATERIE, OGNIWA

**Ogniwo** – ogniwo galwaniczne (składa się z dwóch elektrod, elektrolitu, separatora, obudowy)

**Bateria** – bateria ogniw – kilka ogniw (ładowalnych lub nieładowalnych) złożonych w stos (szeregowe połączenie) o napięciu równym sumie napięć ogniw i pojemności jednego ogniwa. Potocznie (i nieprawidłowo) nazywane jest tak ogniwo pierwotne (pojedyncze, nieładowalne).



**Akumulator** – ogniwo wtórne (ładowalne) – akumulujące energię.

**Ogniwo pierwotne** – ogniwo nieładowalne

**Ogniwo wtórne** – ogniwo ładowalne



# MIARA ŁADOWANIA I ROZŁADOWANIA

Standardową dla branży (choć formalnie niezbyt naukową) miarą tempa ładowania jest C. C to taki prąd, że dane ogniwo (bez względu na jego pojemność) naładuje się (rozładuje) w ciągu jednej godziny.

Tak więc 1C oznacza, że prąd jest tak dobrany, żeby ładowanie trwało godzinę.

2C – pół godziny (prąd dwa razy większy, a więc dwa razy krótszy czas ładowania)

5C – 12 minut ( $1/5$  godziny)

C/2 – 2 godziny; C/3 – 3 godziny; C/20 – 20 godzin

1C oznacza, że zarówno 1 Ah jak i 100 Ah akumulator naładują się w godzinę, tylko dla pierwszego oznaczać to będzie 1 A a dla drugiego 100 A.

# TYPY AKUMULATORÓW TRAKCYJNYCH

Wśród różnych technologii bateryjnych opracowanych w ostatnich 160 latach, w ciągłym użyciu i nadające się do pojazdów elektrycznych są:

akumulatory kwasowo-ołowiowe

akumulatory niklowo-wodorkowe

akumulatory litowo-jonowe

# Ogniwa kwasowo-ołowiowe

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**

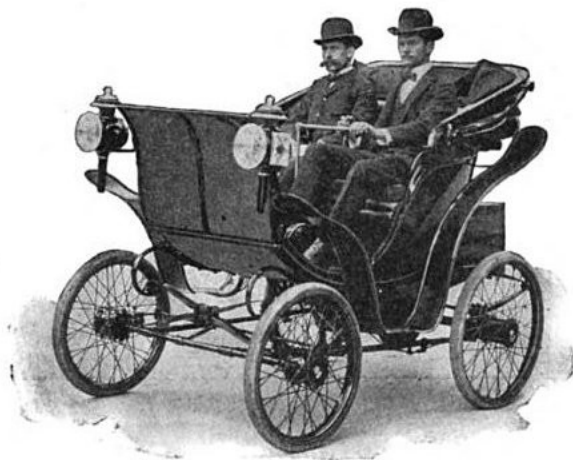


Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# AKUMULATORY KWASOWO-OŁOWIOWE

Opracowane przez Gastona Plantego, francuskiego fizyka, w 1859 roku. Do początków XX wieku nie istniało żadne inne przemysłowe rozwiązanie pozwalające na wielokrotne użycie ogniwa galwanicznego.



Riker Electric Vehicle Company, model Victoria,  
I miejsce w pierwszym wyścigu samochodowym w USA w 1896 roku



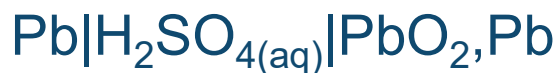
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

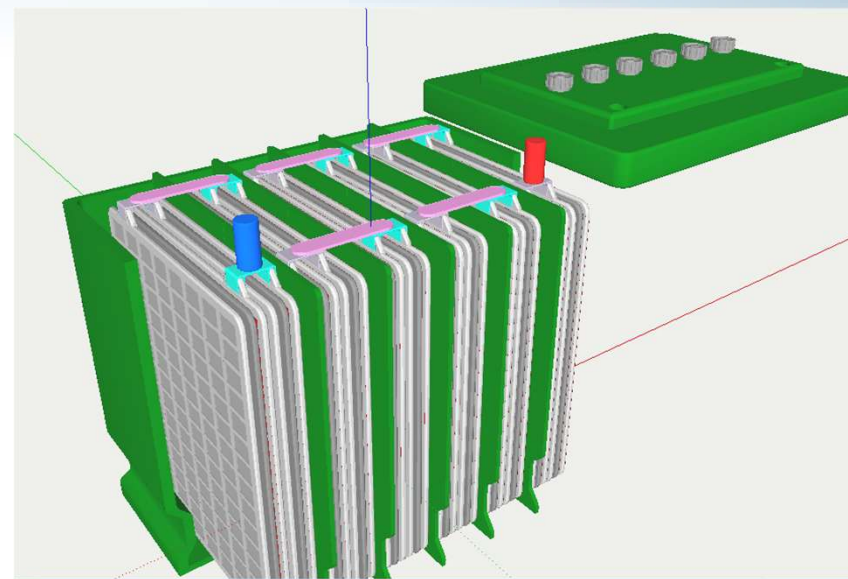
# AKUMULATORY KWASOWO-OŁOWIOWE



Reakcje na elektrodach:



Sumarycznie:



Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0 kvdp

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



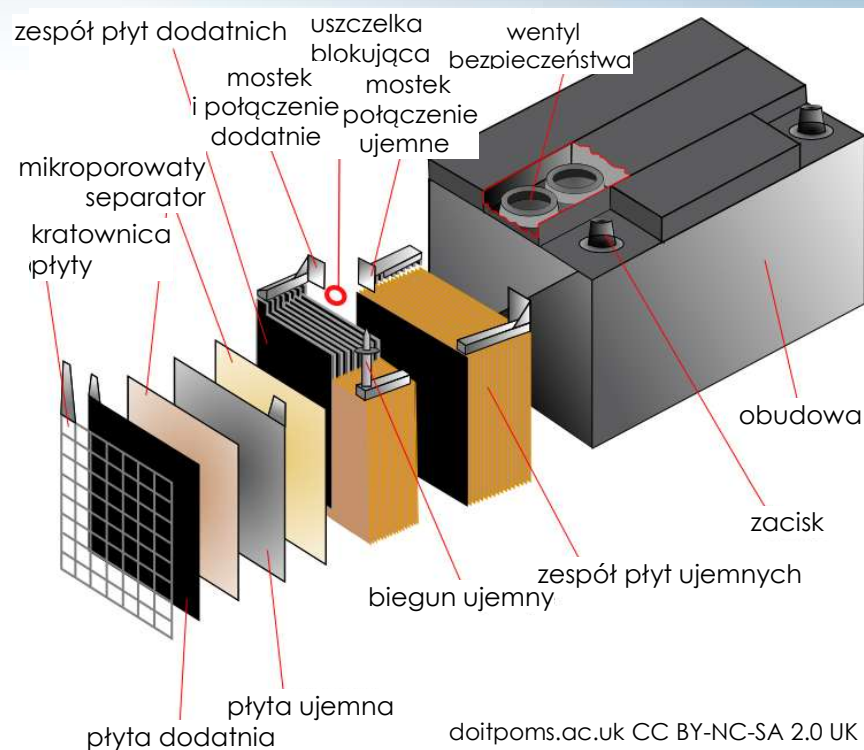
Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KWASOWO-OŁOWIOWE: BUDOWA

- płyta z tlenku ołowiu ( $\text{PbO}_2$ , nie  $\text{PbO}$  lub  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ )
- separator
- elektrolit ( $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{aq})}$ )
- płyta ołowiana

Obie płyty nie z czystych substancji tylko materiał w formie pasty z dodatkami naniesiony na kratę z ołowiu (zwykle ze stopu ołowiu z antymonem) i wysuszone



doitpoms.ac.uk CC BY-NC-SA 2.0 UK

# AKUMULATORY KWASOWO-OŁOWIOWE

Ze względu na budowę i używane napięcia tradycyjny akumulator wymaga regularnego serwisowania. W czasie działania zmniejsza się ilość wody (odparowuje, ulega elektrolizie do wodoru) jak i zużywa się kwas siarkowy na reakcje (tam, gdzie są one nieodwracalne; zawsze takie choćby w małej ilości będą miały miejsce) a także drobiny z płyt obsypują się (zwykle siarczany się obsypują).

W związku z tym wymagają dolewania wody i/lub wymiany kwasu siarkowego. Akumulator działa prawidłowo tylko dla wąskiego zakresu stężenia kwasu (zwykle podawane w formie jego gęstości ściśle zależnej od stężenia). Ze względu na zawory u góry i ciekłą zawartość nie wolno go przechylać ani odwracać.



# KWASOWO-OŁOWIOWE: WARIANTY

Akumulatory bezobsługowe (którym także nic się nie dzieje w przypadku przechylenia/odwrócenia):

**MF** – Maintenance-Free – bezobsługowy;

**VRLA** (SLA) – Valve-Regulated Lead-Acid (Sealed Lead-Acid) – z jednokierunkowymi zaworami bezpieczeństwa;

**AGM** – Absorbed Glass Mat – z separatorem z maty szklanej (z włókna szklanego);

**GEL** – z elektrolitem żelowym.



# KWASOWO-OŁOWIOWE: WARIANTY

Akumulatory bezobsługowe:

**MF** – z dużym zapasem elektrolitu, aby nie trzeba było go uzupełniać przez czas życia akumulatora;

**VRLA** – mocno uszczelniony i o obniżonym potencjale, by nie dopuścić do elektrolizy wody; dodatkowo używa się stopu ołów-wapń (zamiast ołów-antymon), zwiększający nadpotencjał tworzenia się wodoru;

**AGM** – podobnie jak VRLA, dodatkowo separator z włókna szklanego, niestety dużo droższy od pozostałych (za to jeszcze ciężiej o odparowanie lub tworzenie wodoru);

**GEL** – z elektrolitem żelowym (trudniej o odparowanie)

# KWASOWO-OŁOWIOWE: PRODUKCJA

FILM

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KWASOWO-OŁOWIOWE: MODYFIKACJE

Warianty uwzględniające modyfikacje elektrolitu, separatora, kratki i konstrukcji.

Modyfikacje elektrod:

- zmieniające porowatość (poprawiające nasiąkliwość, powierzchnię reakcji -> gęstość prądu, zmniejszają wpływ pasywacji);
- dodatki zmieniające nadpotencjały reakcji;
- zmiany struktury pasty i/lub stosowanie dodatków wpływających na energię aktywacji reakcji tlenku z siarczanem i ułatwiające odbudowę tlenku o prawidłowej strukturze (najczęstszy kłopot to zanikanie pojemności w wyniku pojawiania się nieaktywnych drobin/krystalitów).

# KWASOWO-OŁOWIOWE: WADY I ZALETY

## Zalety:

- dość wolne samorozładowanie;
- tanie;
- dobrze znoszą niepełne ładowania i rozładowania;
- dobrze znoszą rozładowania impulsowe (krótkie, ale duże C) (stąd są doskonałe do zapłonu silnika).

## Wady:

- typowy 200-300 cykli, VRLA/AGM więcej, max 800;
- zawierają bardzo toksyczny ołów i kwas siarkowy;
- źle znoszą głębokie rozładowanie (poniżej 2.1 V);
- niska gęstość energii (co wynika z dużej gęstości ołowiu i jego związków oraz niskiego napięcia pojedynczego ogniwa) 30 Wh/kg.

# KWASOWO-OŁOWIOWE: WARUNKI PRACY

- optymalna praca w temperaturze 20-25°C, przebywanie lub praca w temperaturze wyższej o 8-10°C skraca czas życia ogniwa dwukrotnie (na każde 8-10°C);
- cyklowanie w zakresie od 2,1 V (nawet 2,2 V) do 2,4 V. Nie wolno rozładowywać do napięcia poniżej 2,1 V – grozi uszkodzeniem. Ładowanie powyżej 2,4 V powoduje przyspieszenie produkcji wodoru;
- ładowanie i rozładowanie od C/10 do C/20, aczkolwiek impulsowo wytrzymuje do ok. 5C (zapłon zwykłego samochodu wymaga 100-200 A a akumulatory mają 30-60 Ah);
- muszą być przechowywane w stanie naładowanym.



Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0 High Contrast

# KWASOWO-OŁOWIOWE: WARUNKI PRACY

Stopień rozładowania/naładowania oprócz oczywiście napięcia można badać poprzez pomiar gęstości elektrolitu. Elektrolit bierze udział w reakcjach na elektrodach, zmienia się jego stężenie, a więc i jego gęstość (w wyniku zmiany zawartości cięższego kwasu siarkowego w lżejszej wodzie). Naładowany akumulator zawiera kwas siarkowy o stężeniu ok. 40%<sub>wag</sub>, co przelicza się na ok. 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Rozładowany akumulator zawiera kwas siarkowy o stężeniu ok. 15%, co przelicza się na ok. 1,1 g/cm<sup>3</sup>.



# KWASOWO-OŁOWIOWE: WARUNKI PRACY

Ze względu na łatwość i bezwzględny charakter pomiaru istnieją tabele i przyrządy do mierzenia gęstości kwasu siarkowego co pozwala na obliczenie jego stężenia. To umożliwia porównanie z wartością początkową (naładowanego akumulatora).

Naturalnie działa to jedynie w akumulatorach tradycyjnych, gdzie faktycznie znajduje się roztwór kwasu siarkowego w wodzie w formie płynnej i jest do nich dostęp (nie „bezobsługowych”, żelowych ani AGM).

# KWASOWO-OŁOWIOWE: WARUNKI PRACY

Typowe powody usterek prowadzących do uszkodzenia lub przynajmniej dużego spadku pojemności ogniwa to:

- zasiarczenie elektrod i/lub obsypanie siarczanu;
- samorozładowanie (mikroogniwa, reakcje spontaniczne);
- zwarcia wynikające z tworzenia dendrytów;
- rozwarstwienie elektrolitu – gęstość i skład (różne reakcje i ich tempo w zależności od wysokości na płycie);
- pękanie elektrod;
- korozja krutek;
- zbyt duża ilość gazu (pękanie płyt od ciśnienia, pęcherzyki tworzące mikropęknięcia, itd.);

# KWASOWO-OŁOWIOWE: ZASTOSOWANIA

- Akumulator w układach zapłonowych pojazdów spalinowych (a także do zasilania klimatyzacji, świateł, radia, itd.);
- Akumulator trakcyjny w wózkach widłowych, małych pojazdach typu wózek inwalidzki, wózek golfowy, rower elektryczny, skutery, itd.;
- UPSy, zasilanie awaryjne w budynkach, infrastrukturze krytycznej (energetyka, telekomunikacja, szpitale);
- Układy stabilizujące sieć elektroenergetyczną.



Wikimedia Commons CC BY-SA 2.0 V. Malik



# Ogniwa niklowo-kadmowe

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ZMIANA NAPIĘCIA W ZALEŻNOŚCI OD NAŁADOWANIA

Ogniwa (i baterie) posiadają swoje nominalne napięcie. To napięcie to zwykle średnia ważona (wg uzyskiwanego ładunku) wyciągnięta z minimalnego i maksymalnego użytecznego napięcia osiąganego przez ogniwo. Generalnie ogniwa gdy są w pełni naładowane posiadają wyższe (maksymalne) napięcie, a gdy są w pełni rozładowane, mają niższe (minimalne) napięcie. Wynika to z faktu, że różne materiały mają różny potencjał.

W dużym uproszczeniu można powiedzieć, że elektrody w miarę „napełniania się” lub „opróżniania się” zmieniają swój skład.

# ZMIANA NAPIĘCIA W ZALEŻNOŚCI OD NAŁADOWANIA

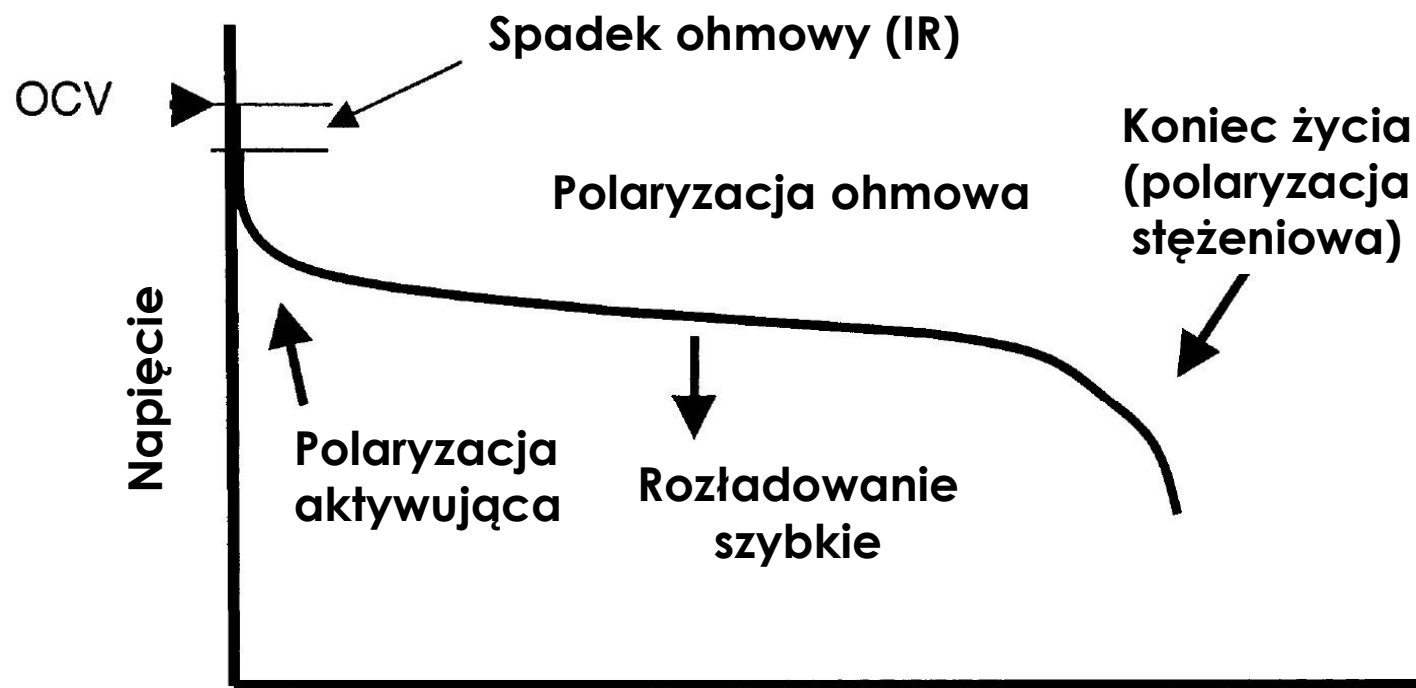
W związku z tym w różny sposób napięcie ogniwa zmienia się wraz z postępowaniem ładowania. Z punktu widzenia pomiaru stopnia naładowania (*ang.* SOC – State of Charge) ogniwa/baterii dobrze by było, gdyby ta zmiana była liniowa, tak jednak nie jest. Dodatkowo wraz ze starzeniem się ogniwa maksymalne i minimalne napięcie zmieniają się.

To dlatego w telefonach i laptopach często źle jest oceniany stopień naładowania akumulatora.

Ważniejsze jest jednak to, że napięcie ogniwa nie spada liniowo, ale charakterystyczną krzywą ładowania-rozładowania.

# KRZYWA ŁADOWANIA-ROZŁADOWANIA

Rev. 104 (2004) 4245

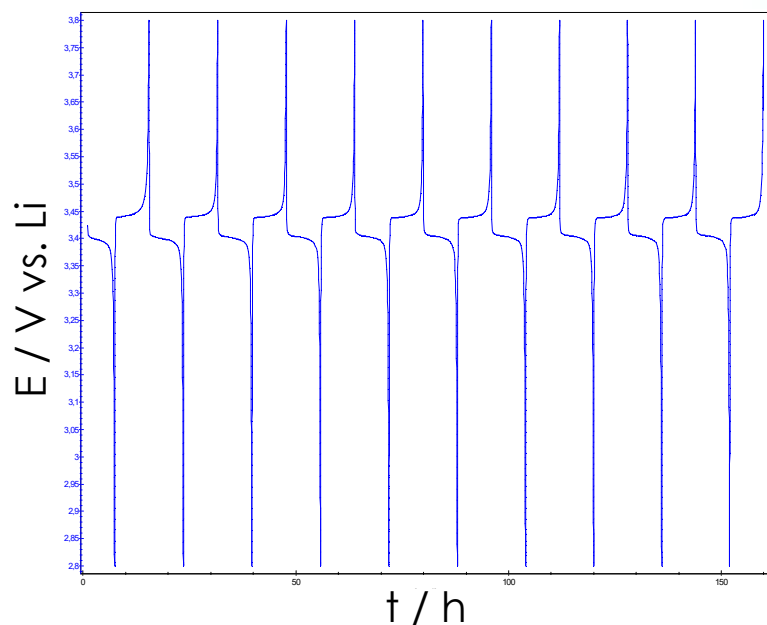


Poziom rozładowania

M. Winter, R.J. Brodd, Chem. Rev. 104 (2004) 4245

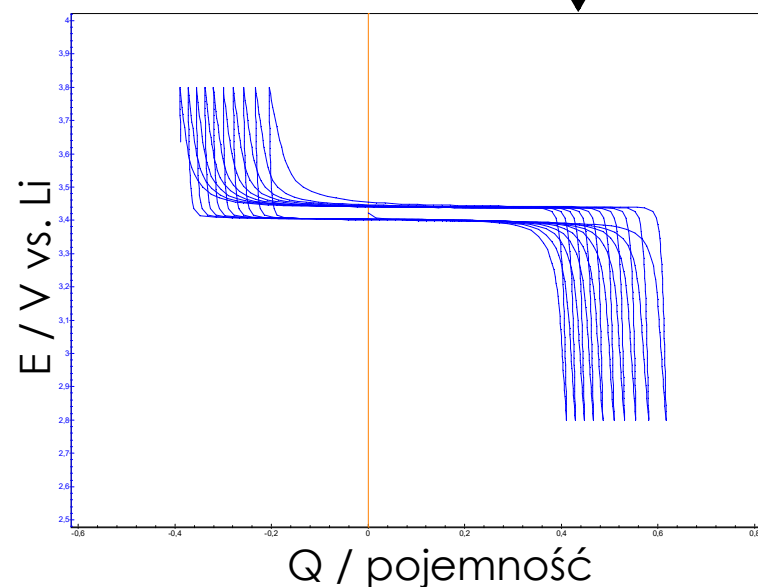


# KRZYWA ŁADOWANIA-ROZŁADOWANIA



← rozładowanie ze stałym natężeniem prądu

spadek pojemności i ładunku wprowadzanego do ogniwa wraz z kolejnymi cyklami



Rzeczywiste wykresy  
z punktów pomiarowych

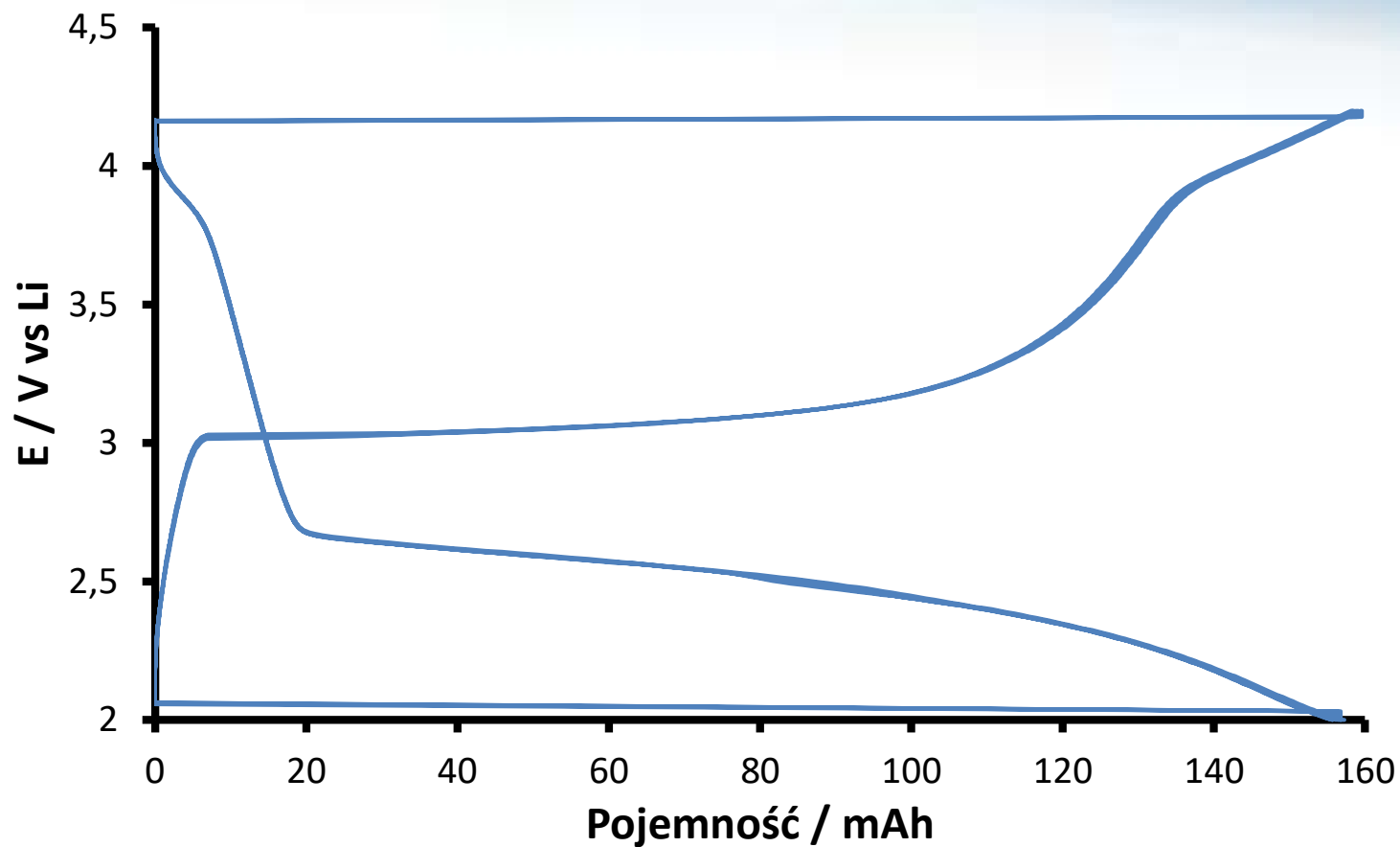
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KRZYWA ŁADOWANIA-ROZŁADOWANIA



**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



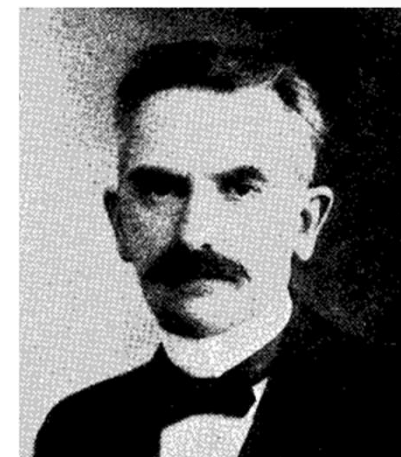
Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# EFEKT PAMIĘCI I FORMATOWANIE

Jeśli ogniwo zostanie rozładowane tylko do pewnego stopnia (ale daleko od pełnego rozładowania) a następnie naładowane do pełna, to niektóre typy ogniw nie naładują się w pełni i tracą pojemność. Taki efekt nazywamy **efektem pamięci**. We współczesnych ogniwach litowo-jonowych nie występuje poza wadliwymi ogniwami. Efekt pamięci i podobne usterki powodujące tymczasowy spadek pojemności mogą być usuwalne (lub też nie) poprzez **formatowanie**. Formatowanie to powolne rozładowywanie do końca i bardzo wolne ładowanie do pełna – C/20 lub mniej (wolniej).

# AKUMULATORY NIKLOWO-KADMOWE

Pierwsze alkaliczne ogniwo ładowalne to właśnie akumulator niklowo-kadmowy. Zostało opracowane przez szwedzkiego wynalazcę Waldemara Jungnera w 1899 roku. Jungner stworzył również akumulatory niklowo-żelazowe i srebrowo-kadmowe. Firma produkująca ogniwa niklowo-kadmowe założona przez Jungnera została wykupiona przez konkurencję dopiero w 1991 roku. Nadal jednak istnieje.



# AKUMULATORY NIKLOWO-KADMOWE

$\text{Cd} \mid \text{KOH}_{(\text{aq})} \text{ 30\% } \mid \text{NiOOH}$

Reakcje na elektrodach (w prawo rozładowanie):



Reakcja sumaryczna:



# NIKLOWO-KADMOWE: BUDOWA SPIRALNA



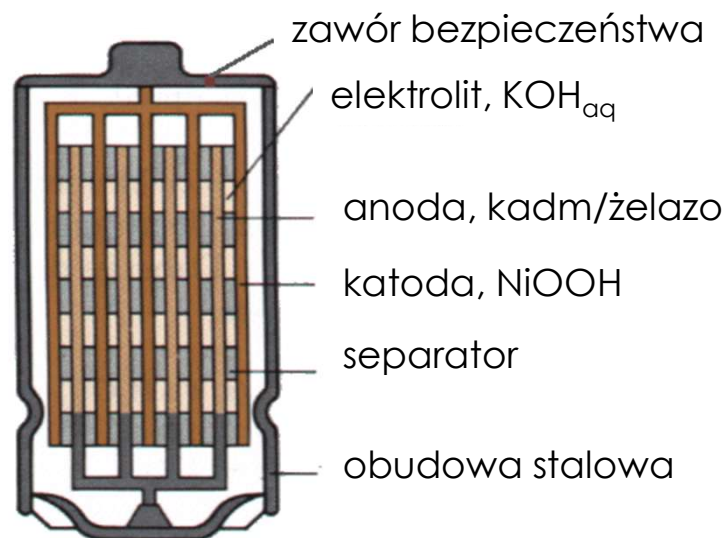
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# NIKLOWO-KADMOWE: PRODUKCJA

Elektroda dodatnia to tlenowodorotlenek niklu. Natomiast elektroda ujemna to mieszanina kadmu, żelaza (20%) i grafitu (niekiedy stosuje się dodatki niklu). Elektrolitem jest  $6 \text{ mol dm}^{-3} \text{ KOH}_{\text{aq}}$ .





# NIKLOWO-KADMOWE: PRODUKCJA

Większość współczesnych ogniw bazuje na tej technologii, gdyż zapewniona jest mniejsza oporność właściwa ogniwa, co zwiększa możliwą gęstość energii i gęstość prądu. Obie elektrody mogą być oparte na porowatej masie niklowej. Jest ona prasowaną i spiekaną masą karbonylku niklu ( $\text{Ni}(\text{CO})_5$ ) z ew. dodatkiem węglanu amonu ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ), które w wysokiej temperaturze rozkładają się do niklu i produktów gazowych tworzących w zamknięciu pory – spiek niklowy.

Porowatość takiego spieku dochodzi do 85%. Spiek wypełnia się kadmem lub  $\text{NiOOH}$  za pomocą rozkładu elektrochemicznego lub termicznego odpowiednich roztworów którymi nasącza się nikiel porowaty.

# NIKLOWO-KADMOWE: PRODUKCJA

Alternatywą dla produkcji spieku jest wytwarzanie elektrod pastowanych. Piankę niklową stanowiącą podstawę dla mas aktywnych wytwarza się osadzając nikiel na włókninie polimerowej (PE, PP), a następnie pirolitycznie polimer jest usuwany (resztki grafitu po pirolizie stanowią element pianki zwiększający przewodnictwo). Piankę następnie wypełnia się pastą elektrodową z kadmem lub  $\text{NiOOH}$ .

# NIKLOWO-KADMOWE: BUDOWA KIESZENIOWA

Płyty to kieszonki naprzemianległe z perforowanej stali niklowanej, niestety materiał elektrodowy ma wtedy niską porowatość.

Te ogniwa ze względu na liczne wady są rzadko używane. Jedyną większą zaletą jest niski koszt produkcji.



# NIKLOWO-KADMOWE: WADY I ZALETY

## Zalety:

- Bezobsługowe (zaleta w stosunku do Pb-acid);
- Szczelne i lżejsze (w stosunku do Pb-acid);
- Skalowalne – ogniwa do parudziesięciu Ah;
- Możliwość działania impulsowego z wysokim natężeniem prądu, wytrzymałość na wysokie natężenie przy ciągłym ładowaniu i rozładowaniu – do 10C (spadek pojemności w danym cyklu, ale nie ma trwałych uszkodzeń);

# NIKLOWO-KADMOWE: WADY I ZALETY

Zalety – c.d.:

- Brak istotnych zmian napięcia w czasie rozładowania (choć z punktu widzenia kontroli/zarządzania ogniwami to wada);

- Wytrzymałość na przeładowania;

Wolne samorozładowanie  
(w stosunku do NiMH/Pb-acid);

- Dobrze znosi niskie temperatury (do  $-30^{\circ}\text{C}$  bez problemów).



# NIKLOWO-KADMOWE: WADY I ZALETY

## Wady:

- Drogi w produkcji (kilkukrotnie droższy od Pb-acid);
- Ciężki (w stosunku do Li-ion);
- Niskie napięcie ogniwa – mniejsza gęstość energii;
- Wolny spadek napięcia w czasie rozładowania (ale to zaleta z punktu widzenia urządzeń zasilanych);
- Zawiera toksyczny kadm (problemy ze zdrowiem pracowników fabryk, obsługi oraz kłopoty z recyklingiem; Obecnie zakazane w wielu krajach do większości wysokotonażowych zastosowań);
- Źle znoszą niepełne rozładowania i ładowania.

# NIKLOWO-KADMOWE: WARUNKI PRACY

- OCV to 1,3 V;
- Wolna zmiana napięcia w zależności od stopnia naładowania, większa zmiana tylko w wąskim zakresie blisko pełnego naładowania. Skutkuje to trudnością w określeniu stopnia naładowania (brak zmian stężenia jak w Pb-acid);
- Lekkie i nie do przewidzenia zmiany potencjału wraz z cyklami (utrudnia określanie stopnia naładowania);
- Wydajność cyklu ładowanie-rozładowanie 50-70% (przy ładowaniu straty na wytwarzanie tlenu, wodoru i  $\text{Ni}^{4+}$ , redukujący się spontanicznie do  $\text{Ni}^{3+}$ );
- Brak zmian stężenia elektrolitu, ponieważ mimo brania udziału w reakcji KOH odtwarza się (a więc i brak zmian przewodnictwa).



# NIKLOWO-KADMOWE: WARUNKI PRACY

Efekt pamięci wynika z pojawiania się nierozpuszczalnych związków kadmu na anodzie (np.  $\text{CdOOH}^-$  lub  $\text{Cd}(\text{OH})_3$ ) lub (rzadziej) związków niklu na katodzie (np.  $\text{NiOOH}$  w innej, ciężiej rozpuszczalnej formie krystalicznej) które jako nierozpuszczalne zatykają pory elektrody uniemożliwiając dalsze działanie ogniwa w tym miejscu co skutkuje spadkiem pojemności ogniwa;

Nadmiar gazów powstających w czasie działania ogniwa usuwany jest przez wentyl bezpieczeństwa.

# NIKLOWO-KADMOWE: WARUNKI PRACY

Ogniwa z wentylem (zwykle) mają czas życia do 1000 cykli ładowania-rozładowania;

Ogniwa hermetyczne (bez wentyla) mają czas życia do 3000-5000 cykli;

Zakres pracy 1,4 V do 0,9 V  
(między 1,2 a 0,9 V poniżej 10% pojemności).



# NIKLOWO-KADMOWE: MODYFIKACJE

- Akumulatory Ni-Cd mogą zawierać zapas wody, co wydłuża czas życia;
- Akumulatory szczelne (bez wentyla) mogą mieć większą masę katody, więc na anodzie nie wytwarza się wodór pod koniec ładowania. Tlen na katodzie wciąż powstaje, ale rozpuszczony w wodzie powoduje utlenianie kadmu do wodorotlenku. Wadą jest mniejsza gęstość energii w ogniwie (niewykorzystywany nadmiar jednej z elektrod) i powolne rozładowywanie ogniwa przez reakcję kadmu z tlenem;
- Do katod w budowie kieszeniowej dodaje się kilka procent  $\text{Co(OH)}_2$  i  $\text{Ba(OH)}_2$  w celu zwiększenia pojemności i żywotności.

## NIKLOWO-KADMOWE: MODYFIKACJE

- Do ogniw działających w średnich temperaturach (od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $50^{\circ}\text{C}$ ) używa się elektrolitu ok. 6M KOH z 2% dodatkiem LiOH polepszającym stabilność mechaniczną elektrod;
- W ogniwach działających w obniżonej temperaturze (do  $-30^{\circ}\text{C}$ ) nie dodaje się LiOH ze względu na gorsze parametry przewodnictwa takiego elektrolitu w niskich temperaturach;
- W ogniwach przeznaczonych do zastosowań w wyższych temperaturach stosuje się KOH o wyższym stężeniu lub NaOH. Przy wyższych stężeniach KOH powoduje większe pęcznienie mas elektrodowych niż normalnie.

# ZAGROŻENIA DLA ŚRODOWISKA

Kadm jako zagrożenie:

Dla organizmów żywych ogólnie – blokuje sygnały nerwowe, zmienia wchłanianie mikroelementów, blokuje niektóre elementy komórki i/lub gospodarkę jonami metali alkalicznych w ramach komórki.

Dla człowieka – uszkadza nerki, wątrobę i jądra (akumulacja), powoduje osteoporozę, ma działanie teratogenne i kancerogenne. Wysoka toksyczność ( $LD_{50} < 40\text{mg/m}^3/\text{h}$  lub  $\sim 500\text{mg}$  w ramach spożycia);

# NIKLOWO-KADMOWE: ZASTOSOWANIA

- Zasilacze awaryjne, przełączniki w sieciach wysokiego napięcia, rozruchowe w lotnictwie/marynarce i w pojazdach z silnikiem diesla produkowanych w małej skali; rozruch turbin gazowych.
- W zastosowaniach gdy akumulator musi działać w przechyle i być szczelny.
- Ze względu na prawidłowe działanie w niskich temperaturach używany wciąż masowo w lotnictwie, przemyśle kosmicznym i wojskowym.
- Poprzednik ogniw litowo-jonowych w urządzeniach przenośnych; tam, gdzie wciąż stosowane, zamieniane na ogniwa niklowo-wodorkowe.



Sonda Viking

# Ogniwa niklowo-wodorkowe

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# AKUMULATORY NIKLOWO-WODORKOWE

W 1969 roku odkryto, że stop  $\text{LaNi}_5$  odwracalnie może absorbować w formie wodorku wodór powstający w czasie elektrolizy wody (prace w Batelle, Szwajcaria).

W 1978 roku udało się skonstruować pierwsze ogniwo z  $\text{LaNi}_5$  a także ze stopami niklu z innymi lantanowcami (niestety miały krótki czas życia w skali cykli).

Pod koniec lat 80. stworzono pierwsze ogniwa z bardziej skomplikowanymi składami – pojedyncze metale zastąpiono dopowanymi lub domieszkowanymi stopami. Umożliwiło to konstrukcję o długim czasie życia i tańszą produkcję. Na rynek ogniwa trafiły w 1989 roku.

# AKUMULATORY NIKLOWO-WODORKOWE



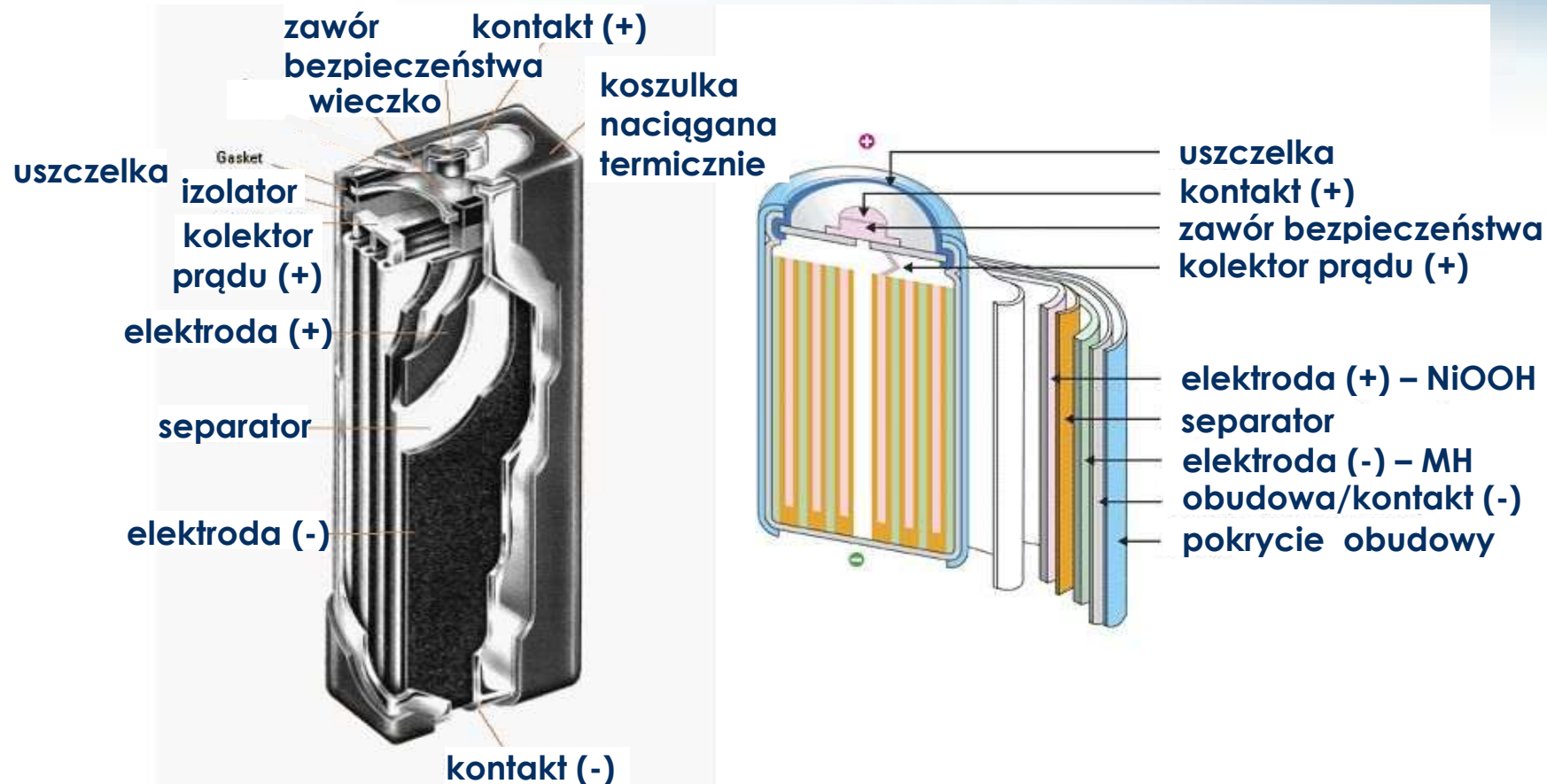
Reakcje na elektrodach (w prawo rozładowanie):



Reakcja sumaryczna:



# AKUMULATORY NIKLOWO-WODORKOWE



„Energy Storage - Technologies and Applications”, książka pod redakcją A.F. Zobaa, ISBN 978-953-51-0951-8 CC BY-SA 3.0

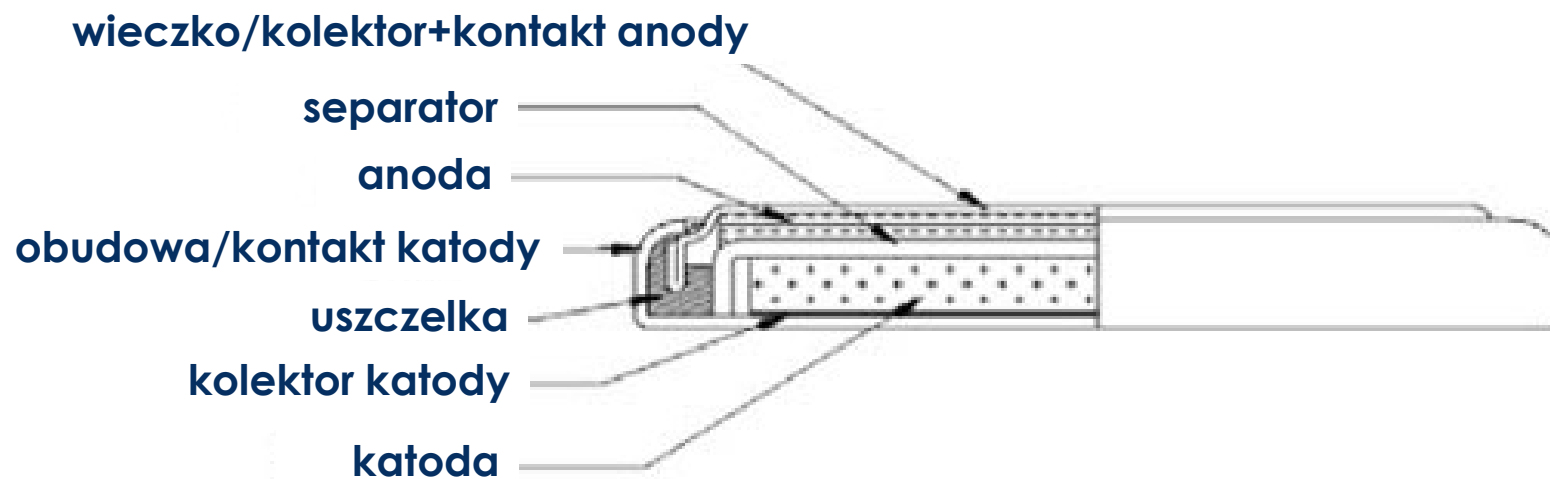
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# AKUMULATORY NIKLOWO-WODORKOWE



# NIKLOWO-WODORKOWE: BUDOWA

Anoda składa się ze stopu najczęściej dwóch (typów) metali o stechiometrii typu  $A_2B$ ,  $AB$ ,  $AB_2$  lub  $AB_5$ . Zwykle jeden może pochłaniać wodór egzotermicznie a drugi endotermicznie.

Metal A jest najczęściej lantanowcem lub innym metalem przejściowym, który jest w stanie stworzyć stabilny wodorek w wyniku reakcji elektrochemicznej z wodorem powstałym z elektrolizy wody. Jednocześnie musi łatwo go uwolnić w reakcji elektrochemicznej tak, aby powstałe jony wodorowe mogły połączyć się z jonami wodorotlenowymi. Jednocześnie metal musi absorbować w dużym stopniu wodór.

# NIKLOWO-WODORKOWE: BUDOWA

Metal B to metal (zwykle przejściowy), który jest odporny na korozję (zabezpiecza metal A przed warunkami w ogniwie, zwłaszcza wodorem i silną zasadą) oraz ma właściwości katalityczne (zmniejsza energię aktywacji procesu absorpcji).

Cały stop musi nie tylko mieć dużą pojemność względem wodoru, ale także chłonać wodór przy względnie niskim ciśnieniu, ale także nie zbyt niskim – taki stop tworzy zbyt stabilny wodorek niedający się łatwo rozłożyć. Nie może się także degradować wraz z kolejnymi cyklami absorpcji i desorpcji. Ważne jest też dobre katalizowanie reakcji uwalniania wodoru z wody w środowisku silnej zasady. Jednocześnie niezbędna jest dobra dyfuzja wodoru przez stop.

# NIKLOWO-WODORKOWE: BUDOWA

Katoda składa się z tlenowodorotlenku niklu;

Elektrolit to stężony (ok. 6 mol dm<sup>-3</sup>) roztwór wodny wodorotlenku potasu (najczęściej) – KOH.

Separator robiony jest z włóknin hydrofilowych, zwykle z poliolefin, takich jak polipropylen, który jest odporny na działanie stężonych zasad.

Elektrody nasąca się elektrolitem w maksymalnym stopniu, ale separatora nie, aby lepiej umożliwiać wymianę gazów i ich dyfuzję.

Obudowy produkuje się ze stali, które są odporne na działanie zasad.

# NIKLOWO-WODORKOWE: PRODUKCJA

Konstrukcje ogniw wykonuje się podobnie jak w przypadku ogniw niklowo-kadmowych, a więc wszystkie współcześnie wykorzystywane konstrukcje ogniw:

guzikowa (coin / button);

pryzmatyczna/prostopadłościenna (prismatic);

cylindryczna (cylindrical).



Wikimedia Commons  
CC BY-SA 3.0 lead holder

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# NIKLOWO-WODORKOWE: WADY I ZALETY

## Zalety:

- Ok. 1,5 raza większa gęstość energii od NiCd;
- Duża odporność na przeładowanie i głębokie rozładowanie; praktycznie nieograniczona poza zbyt szybkim (roz)ładowaniem;
- Dobre działanie i pojemność nawet przy szybkim rozładowaniu;
- Możliwość szybszego ciągłego rozładowania niż w NiCd;
- Ilość cykli do 1000;
- Materiały względnie obojętne dla środowiska;
- W stosunku do NiCd niemal brak efektu pamięci;
- Tańsze od ogniw Li-ion.

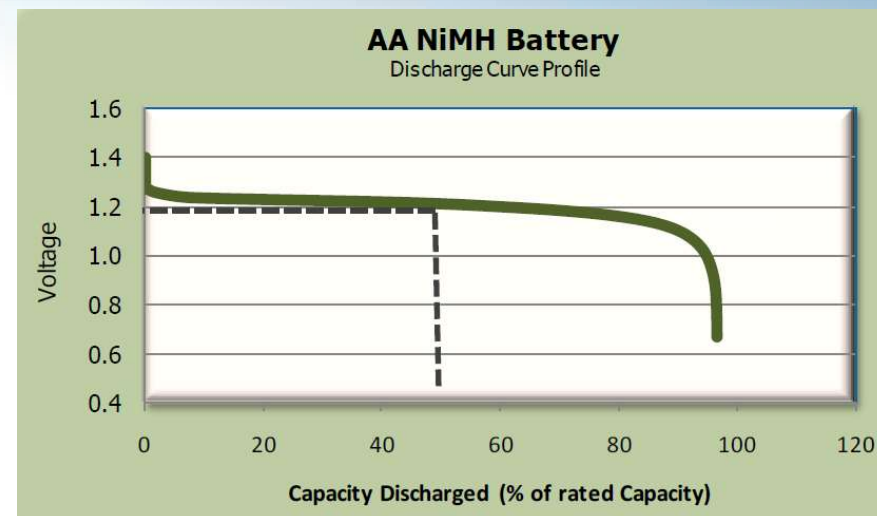
# NIKLOWO-WODORKOWE: WADY I ZALETY

## Wady:

- Złe działanie (niska pojemność) w niskich temperaturach; możliwa zawodność  $<-20^{\circ}\text{C}$ ;
- Szybkie samorozładowanie - 3 razy szybsze niż w NiCd;
- Niższa gęstość energii niż Li-ion.
- Droższe niż NiCd.

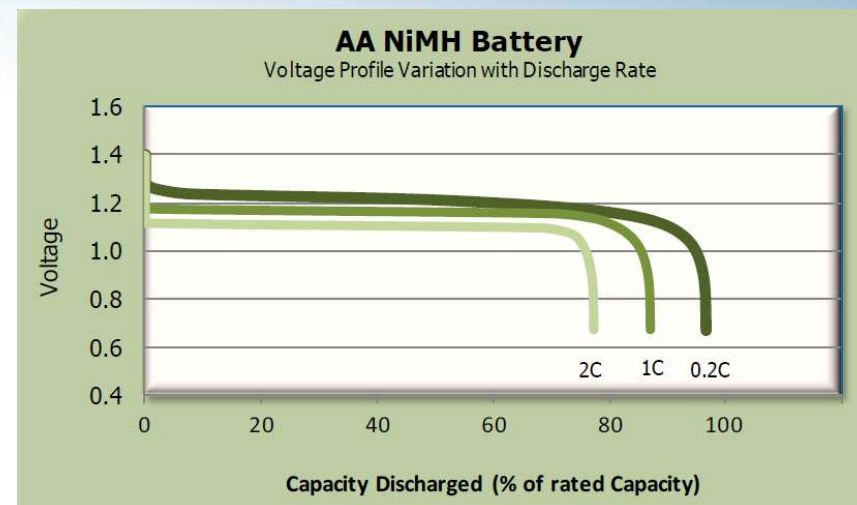
# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRACY

- OCV to ok. 1,2 V;
- Zakres działania to od 1,4 V (naładowany) do 0,9 V (rozładowany);
- Elektrolit nie bierze sumarycznego udziału w pracy ogniwa, a więc nie zmienia składu, utrzymuje wysokie przewodnictwo i nie zmienia warunków pracy; ogniwo dzięki temu nie wymaga uzupełniania/obsługi;



# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRACY

- Tempo ładowania optymalnie pomiędzy C/12 a C/3. Powyżej 1C może zmniejszyć żywotność ogniwa. Formatowanie powinno być ok. C/40.
- Rozładowanie dowolne poniżej 1C. Do 4C możliwe, ale z wyraźnie mniejszą pojemnością. Rozładowanie >4C nie służy żywotności ogniwa.



# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRACY

Przeładowanie powoduje uruchomienie cyklu tlenowego:



Sumarycznie nic nie powstaje, ale wytwarza się dużo ciepła, co zmniejsza żywotność ogniwa;

Pojemność anody jest większa niż katody, więc tlen rekombinuje z jonami  $\text{H}^+$  powstającymi w nadmiarze (do wody). Jednak gdy przeładowanie jest zbyt intensywne (duży prąd przekraczający możliwości produkcji tlenu na katodzie), wówczas może dojść rzeczywiście do produkcji wodoru i zwiększenia ciśnienia w ogniwie.

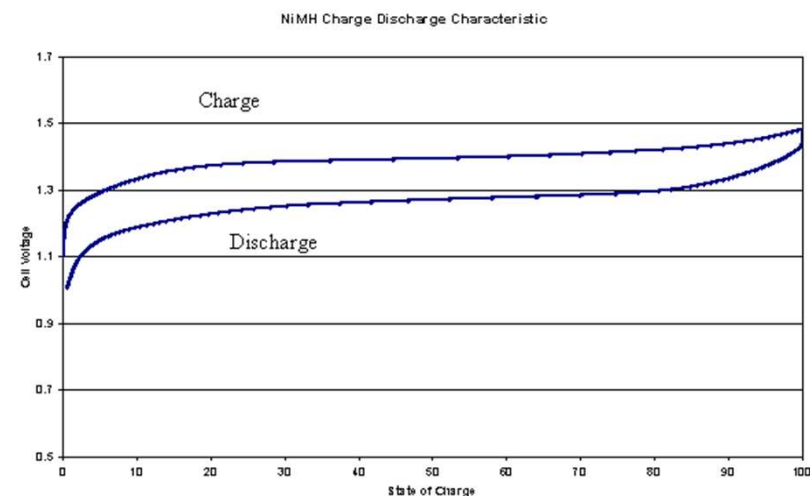


Figure 1. NiMH Charge Discharge Characteristic

© Cobasys, J.J.C. Kopera

# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRACY

Głębokie rozładowanie powoduje uruchomienie cyklu wodorowego:



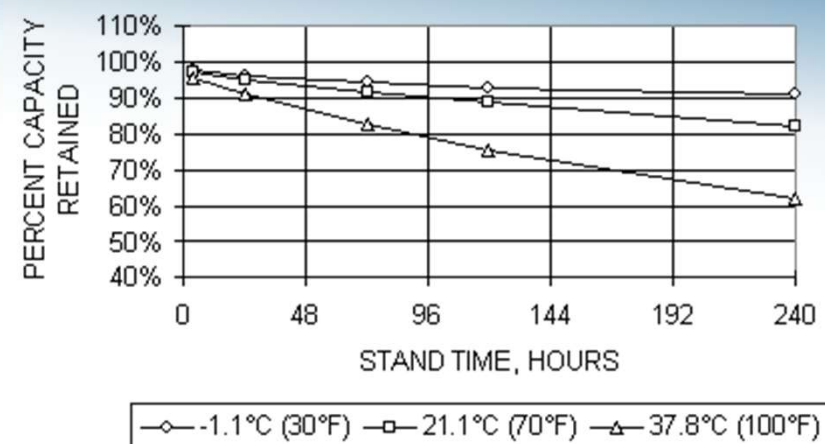
Tak jak przy cyklu tlenowym, zagrożeniem jest głównie produkcja ciepła.

Ponownie, zbyt duży prąd może powodować zakłócenie cyklu i produkcję gazu.

Zbytne rozładowanie może doprowadzić do odwrócenia polaryzacji ogniwa w przypadku kilku ogniw pracujących razem (w baterii). Wówczas jedno ogniwo pracuje odwrotnie (jest zbyt mała różnica potencjału i pozostałe ogniwa „przeważają”) rozładowując się nieodwracalnie do zera a bateria przestaje działać prawidłowo.

# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRACY

Samorozładowanie: ogniwa NiMH tracą pojemność samoczynnie, głównie w wyniku desorpcji wodoru z anody oraz działania cyklu tlenowego. Im większa temperatura, tym szybsze rozładowanie. Typowe rozładowanie w temperaturze pokojowej to 1-3% dziennie (względem nominalnej pojemności), ale w czasie pierwszego dnia zwykle jest to nawet do 5 razy tyle. Jednocześnie wzrost temperatury o 10°C powoduje przyspieszenie rozładowania o 1,5-2 razy.



# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRACY

Niepełne rozładowanie powoduje efekt pamięci, choć dużo mniejszy niż w przypadku ogniw NiCd. Najprawdopodobniej za efekt pamięci odpowiada tworzenie się złej struktury krystalicznej NiOOH ( $\gamma$  zamiast  $\beta$ ) na granicy nierozładowanej fazy i świeżo ładowanej. Skutków efektu pamięci można jednak się pozbyć przez formatowanie ogniwa.



# NIKLOWO-WODORKOWE: WARUNKI PRZECHOWYWANIA

Optymalne warunki przechowywania:

- Niskie temperatury (< temp. pokojowej);
- Niezwarte i nie w obwodzie;
- Naładowane;



# NIKLOWO-WODORKOWE: MODYFIKACJE

Składy stopu na anodę:

- $A_2B$     A: Mg lub Ti; np.  $Ti_2Ni$  (dawne prototypy)  
              B: Ni;
- $AB$         A: Zr, Ti;            np.  $ZrNi$  (dawne prototypy)  
              B: Ni, Fe, Cr, V;
- $AB_2$         A: Zr, Ti;            np.  $ZrNi_2$  (rzadziej używane)  
              B: Ni, V;            (30% wyższa pojemność niż  $AB_5$ , ale mniej stabilne)
- $AB_5$         A: La, Ce, Ti, Mischmetal; np.  $LaNi_5$             (najczęściej używane)  
              B: Ni, Co, Mn, Al;

# NIKLOWO-WODORKOWE: MODYFIKACJE

Modyfikacje dotyczą nie tylko doboru metali do stopu, ale także ich domieszkowania. Naturalnie domieszkowanym stopem jest Mischmetal ( $\text{Ce}_{0.48}\text{La}_{0.25}\text{Nd}_{0.17}\text{Pr}_{0.05} + 0.05$  innych lantanowców), czyli pozostałość po przeróbce monazytu, po usunięciu z niego toru, radu (których jest rudą). Do niklu w ramach stopów typu  $\text{AB}_2$  dodaje się żelazo, chrom, kobalt i/lub mangan.

Domieszki stosuje się w celu uzyskania lepszych parametrów stopu, zwłaszcza małej zmiany objętości w cyklu ładowanie-rozładowanie, lepszych właściwości katalitycznych i pochłaniania wodoru.

# NIKLOWO-WODORKOWE: MODYFIKACJE

Również elektrolit się modyfikuje. Przede wszystkim dodaje się LiOH w celu zwiększenia stabilności mechanicznej elektrod - zwłaszcza katody. Dodaje się także NaOH w celu polepszenia parametrów elektrolitu w wyższych temperaturach, choć użycie go skraca czas życia ogniwa;

Separatory modyfikuje się w celu zwiększenia ich zwilżalności (hydrofilowości). Uzyskuje się to poprzez sulfonowanie (dodatek grup sulfonowych na włóknach) lub dodatek kwasu akrylowego.

W ogniwach stosuje się stopy rekombinujące tlen i wodór z cyklu tlenowego i wodorowego.

# NIKLOWO-WODORKOWE: ZASTOSOWANIA

Elektronika użytkowa – tak samo jak ogniwa litowo-jonowe (które zastąpiły ogniwa NiMH) – telefony, aparaty fotograficzne, kamery, mp3; Kompatybilne z większością urządzeń ze względu na podobne napięcie ogniwa jak ogniwa alkaliczne i NiCd.

Samochody hybrydowe, ze szczególnym uwzględnieniem Toyoty Prius, która była pierwszym masowo produkowanym samochodem hybrydowym i wciąż posiada tytuł największej ilości wyprodukowanych egzemplarzy w historii (>3,5 miliona).



# Ogniwa Li-ion – ogólne informacje

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



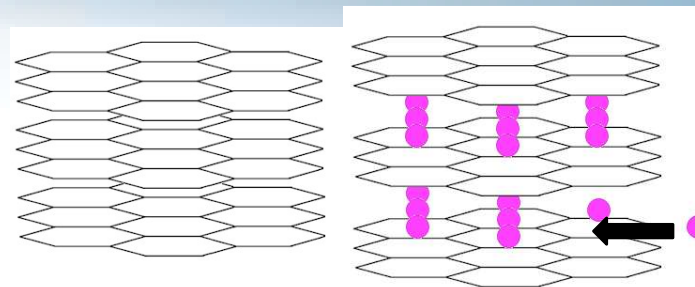
Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# MATERIAŁY INTERKALOWANE

Materiały interkalujące to substancje które są w stanie **odwracalnie** przyjąć jony

lub cząsteczki innych substancji pomiędzy warstwy swojej struktury krystalicznej. Normalnie warstwy takie trzymają się za pomocą sił Van der Waalsa. Aby jon lub cząsteczka były w stanie wniknąć pomiędzy warstwy muszą być odpowiedniej wielkości. Muszą też posiadać wystarczającą energię do pokonania sił Van der Waalsa w swoim otoczeniu (rozepchnąć warstwy). Energia ta może pochodzić np. z wymiany ładunku pomiędzy jonem a materiałem interkalującym.





# OGNIWA LITOWO-JONOWE

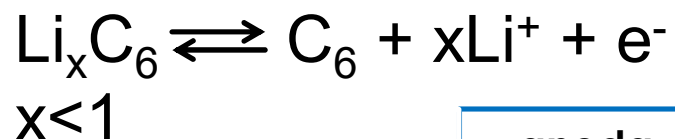
Pierwsze prace prowadzące do stworzenia ogniw litowo-jonowych to w latach 20. odkrycie materiałów interkalujących kationy metali alkalicznych (grafit). W latach 70. odkryto polimery przewodzące kationy litowe (PEO, prace Armanda). W latach 80. rozpoczęły się prace nad „rocking chair” (*pol.* fotel bujany) battery i kontynuowano prace nad grafitem oraz oodkryto tlenki i siarczki metali które potrafiły interkalować lit (prace Goodenougha).

Wśród wielu ośrodków i firm, które równolegle prowadziły te badania, pierwszą firmą, która wprowadziła na rynek ogniwa litowo-jonowe było Sony Corp.

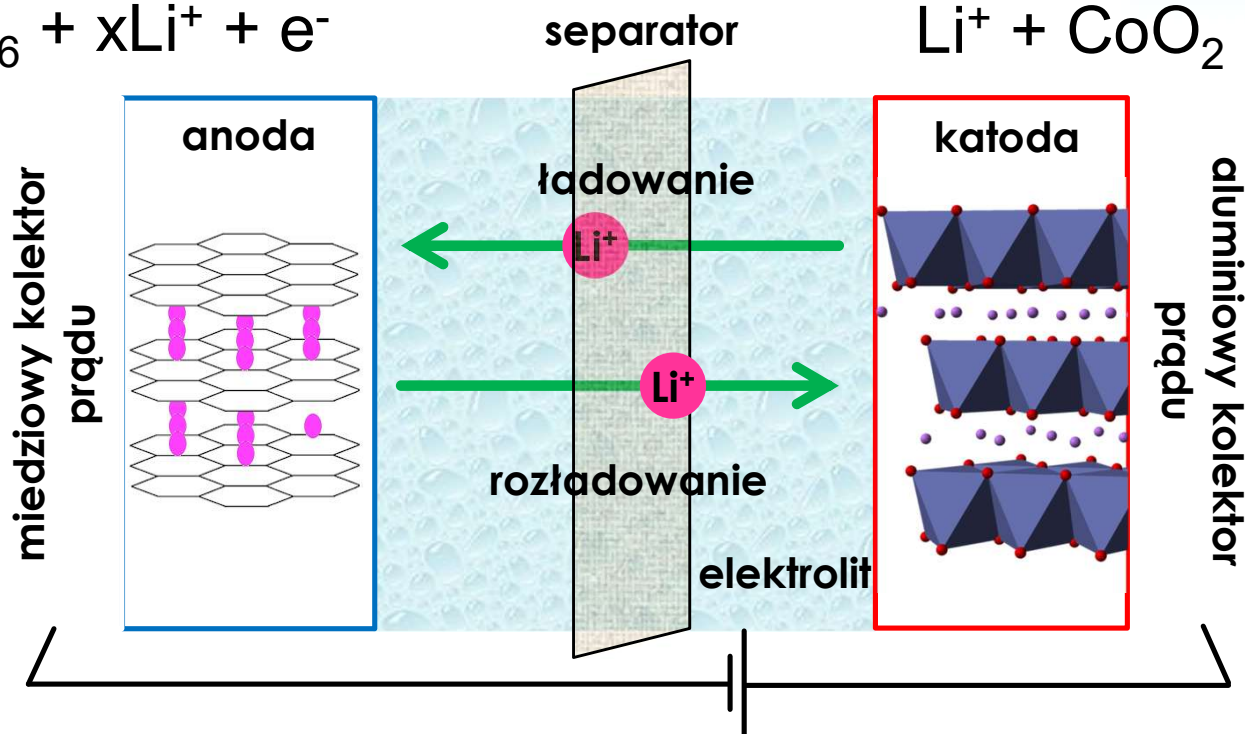


# OGNIWA LITOWO-JONOWE

## Zasada działania



np.:



$\text{Li}_x\text{C}_6$  | elektrolit | związek metalu przejściowego

ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# OGNIWA LITOWO-JONOWE

Zasada działania:

Rozładowanie: kation litu „wychodzi” ze struktury grafitu, co powoduje oddanie przez grafit ładunku do obwodu zewnętrznego. Kation litu płynie przez elektrolit w wyniku różnicy potencjałów między anodą i katodą. Kation wbudowuje się w strukturę katody, gdzie metal przejściowy zmienia swój stopień utlenienia w wyniku otrzymania elektronu z obwodu zewnętrznego. Kation litu umieszcza się w okolicy metalu przejściowego.

Ładowanie – odwrotna droga.

# OGNIWA LITOWO-JONOWE

Nazwa „bateria bujana” (*ang.* „Rocking chair” battery) pochodzi od tego, że kation litu nie zmienia swojego stopnia utlenienia, tylko przemieszcza się pomiędzy elektrodami. Nazwa „ogniwo litowo-jonowe” wynika z faktu, że lit istnieje cały czas w formie jonu w tym typie ogniwa.

Przykładowa reakcja sumaryczna:



# LITOWO-JONOWE: BUDOWA

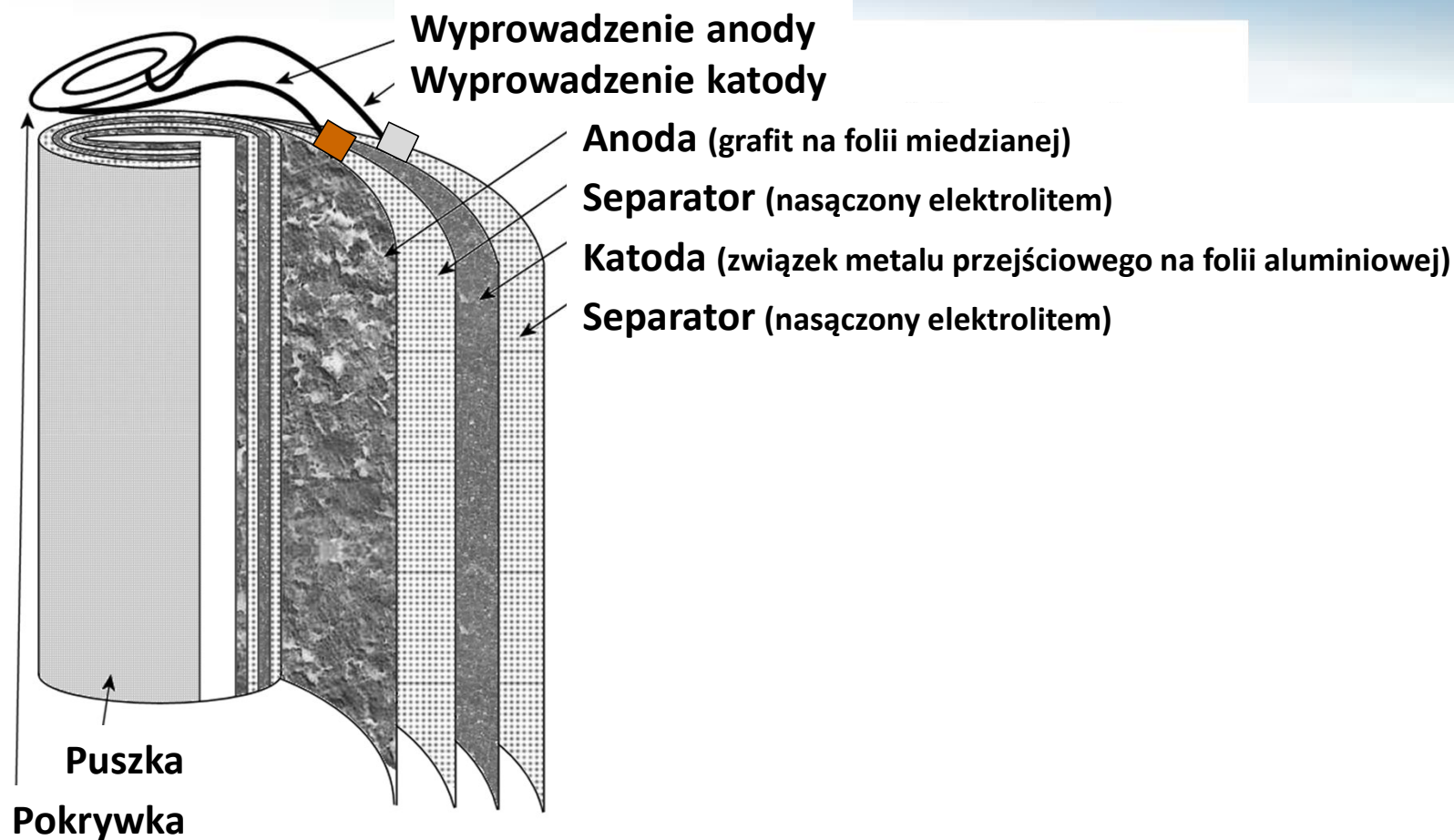
Najczęściej występują w następujących konstrukcjach:

- pryzmatycznej (prostokątnościenniej) – obudowa stalowa lub grubego sztywnego plastiku;
- kieszeniowej (pouch) – elastyczna folia laminowana lub preformowana elastyczna folia laminowana
- cylindrycznej (o różnej geometrii);
- guzikowej.

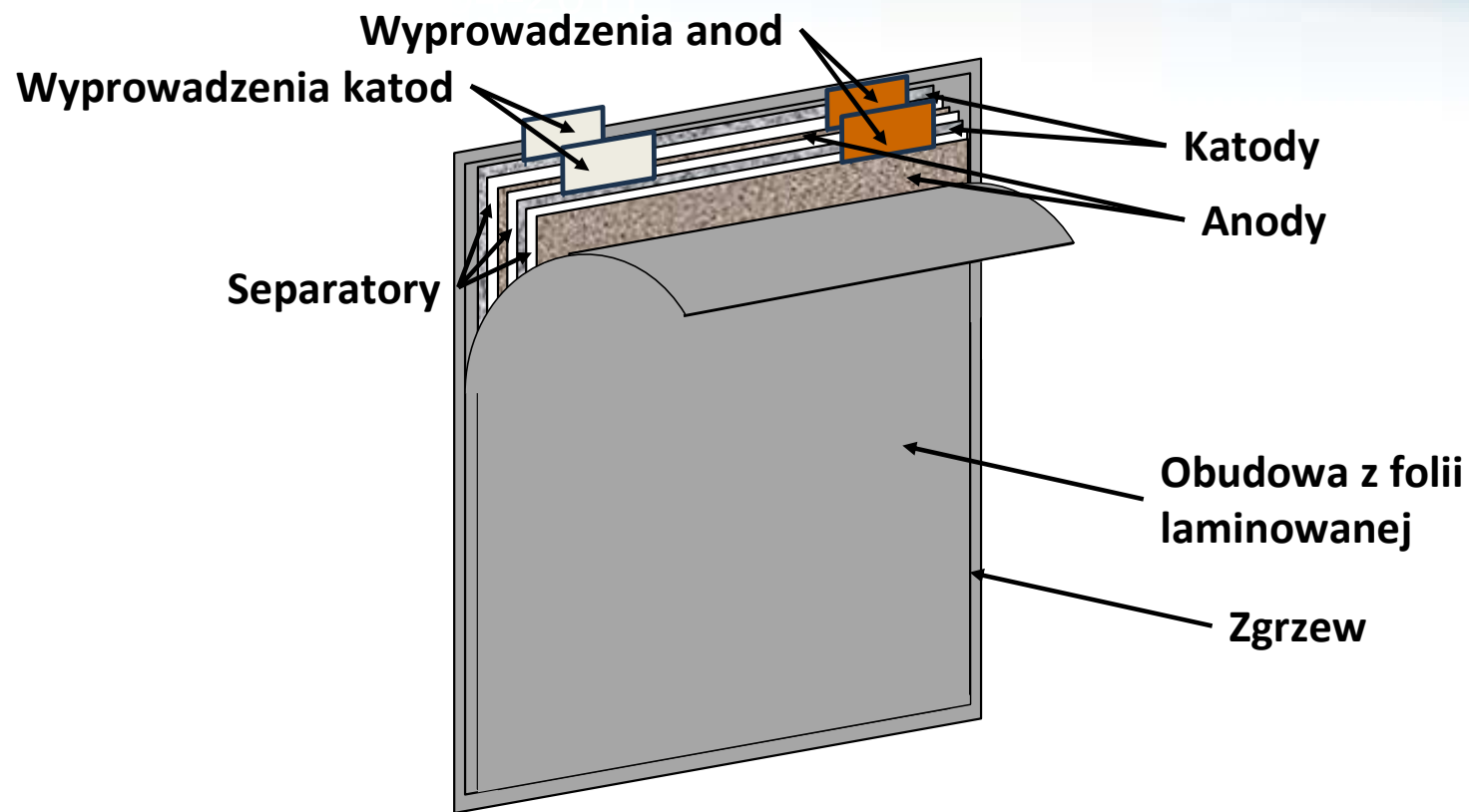
Możliwe modyfikacje konstrukcji:

- elastyczna (modyfikacja kieszeniowej);
- tarasowa (modyfikacja pryzmatycznej);
- sześciokątna (modyfikacja pryzmatycznej).

# LITOWO-JONOWE: BUDOWA CYLINDRYCZNA



# LITOWO-JONOWE: BUDOWA PRYZMATYCZNA



# LITOWO-JONOWE: WADY I ZALETY

Zalety względem innych technologii akumulatorów:

- Modyfikacje na każdą okazję;
- Najłżejsze (największa gęstość energii); Wysokie napięcie;
- Skalowalne (do parudziesięciu Ah);
- Wytrzymałość na niepełne ładowanie i rozładowanie (brak efektu pamięci);
- Niewielka zmiana napięcia w czasie rozładowania;
- Minimalne samorozładowanie;
- Dość dobrze znoszą szybkie ładowania/rozładowania (nawet 5C+), chociaż zwykle kosztem dużego spadku pojemności;
- Bezobsługowe; szczelne.

# LITOWO-JONOWE: WADY I ZALETY

Wady:

- Źle znoszą głębokie rozładowanie (przeładowanie nieco lepiej);
- Różnie znoszą impulsowe rozładowania;
- Źle znoszą niskie temperatury (poniżej 0/-20°C);
- Najdroższy w produkcji (najdroższe komponenty);
- Największe wymagania czystości komponentów, atmosfery produkcji i, co gorsza, zawartości wilgoci.

Na niskie temperatury i impulsowe rozładowania istnieją modyfikacje, które kosztem innych parametrów zlikwidują te wady.

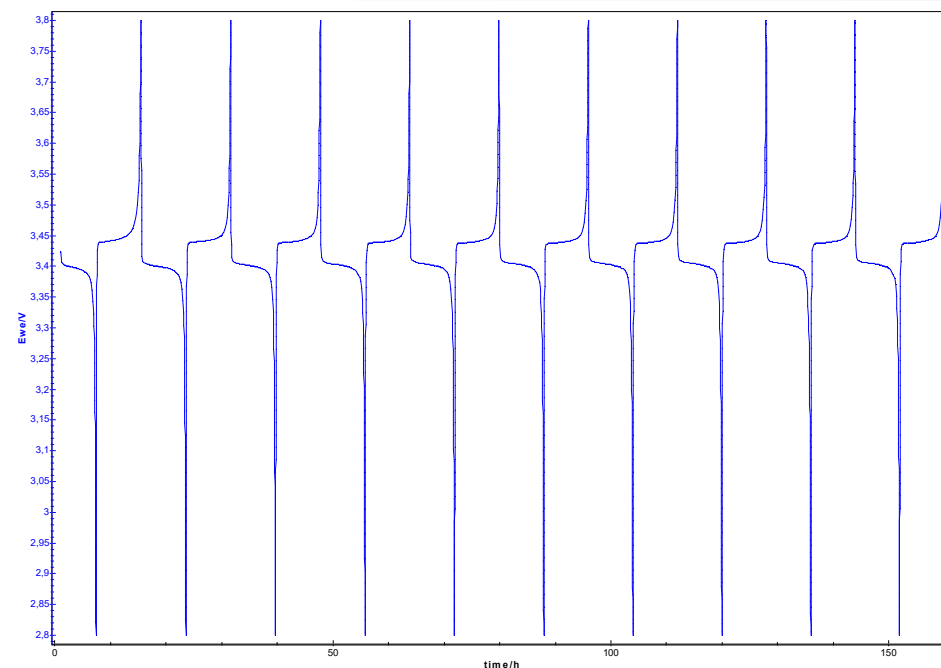


# LITOWO-JONOWE: WARUNKI PRACY

- OCV to zależnie od składu elektrod od ok. 3 do 4,2 V (i rośnie wraz z postępem);
- Duże zmiany napięcia przy początku/końcu ładowania i początku/końcu rozładowania, w trakcie działania zmiany wystarczająco duże, żeby móc określić poziom naładowania, chociaż tylko w przybliżeniu;
- Lekkie zmiany potencjału w czasie życia;
- Wydajność cyklu ok. 90%;
- Brak zmian stężenia elektrolitu pomijając pierwszy cykl ogniwa i początkowe pasywacje;

# LITOWO-JONOWE: WARUNKI PRACY

- Czas życia zależnie od składu ogniwa 800-4000 cykli ładowania-rozładowania;
- Zakres pracy, zależnie od składu ogniwa od 2,5 V do 4,5 V (albo i wyżej). Większość tradycyjnych (grafit/LiCoO<sub>2</sub>) od ok. 3,2 do 4,2 V.



# LITOWO-JONOWE: WARUNKI PRACY

## Przechowywanie:

- W osłoniętym od słońca i źródeł ciepła miejscu;
- W temperaturze nie niższej niż  $-10^{\circ}\text{C}$  i nie wyższej niż  $60^{\circ}\text{C}$ ;  
W praktyce, aby nie zmniejszał się czas życia ogniwa, powinno to być poniżej  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- Dla długotrwałego przechowywania stopień naładowania nie powinien przekraczać 80% i nie powinien być niższy niż 20%.

# LITOWO-JONOWE: ZASTOSOWANIA

- Wszystkie współcześnie (przynajmniej od ok. 2005 roku) produkowane urządzenia mobilne: laptopy, palmtopy, tablety, 2in1, telefony komórkowe;
- Elektryczne: samochody, motocykle, rowery, autobusy, hulajnogi, skutery, furgonetki, półciężarówki;
- E-ciągniki siodłowe, pierwsze lokomotywy, pociągi metra, trolejbusy, promy, statki;
- Zasilanie zapasowe/awaryjne budynków, domów (choć wciąż więcej kwasowo-ołowiowe), centra danych, UPSy, itd.;
- Przechowywanie energii na potrzeby niedoborów w sieci elektroenergetycznej (grid storage) i/lub wyrównywanie napięcia, częstotliwości, buforowanie farm wiatrowych, itd.

# Ogniwa Li-ion – anody

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ANODY DO OGNIW LI-ION

Wymagane cechy anody w ogniwie (lista życzeń):

- **Wysoka pojemność** (wysoka gęstość energii);
- **Kompatybilność z innymi elementami ogniwa;**
- Długi czas życia (w cyklach i czasie);
- **Niska cena** (prosta i tania produkcja, tanie materiały);
- Wysoka gęstość prądu;
- Niski potencjał;
- Mała degradacja wraz z cyklem, w tym mała pojemność tracona w pierwszym cyklu;
- Mała zmiana gęstości w czasie pracy;
- Zachowanie wysokiej pojemności wraz ze wzrostem szybkości cyklowania (rate capability);
- Bezpieczeństwo i przyjazność wobec środowiska;

# ANODY DO OGNIW LI-ION - LIT

Naturalną anodą do ogniw litowych powinien być metaliczny lit. Gęstość energii tej anody jest ogromna - ponad 3840 mAh g<sup>-1</sup>). Lit jest także przewodnikiem elektronowym (nie potrzeba stosować dodatków zwiększających przewodnictwo). Niestety metaliczny lit ma dwie podstawowe wady:

1. Jest bardzo reaktywny, tak że wiele materiałów nie jest z nim kompatybilnych i jest redukowanych.
2. W czasie ładowania tworzą się na powierzchni dendryty. Mogą one spowodować zwarcia, dodatkowo po odłamaniu się są trwałą stratą pojemności.

# ANODY DO OGNIW LI-ION - LIT

Ze względu na problemy (do dziś nie rozwiązane) z litem, metalicznego litu używa się obecnie tylko w ogniwach jednorazowych, gdzie nie ma potrzeby ładowania (a to ładowanie powoduje większość kłopotów). Problemy związane z reaktywnością litu częściowo przezwyciężono w skali laboratoryjnej...



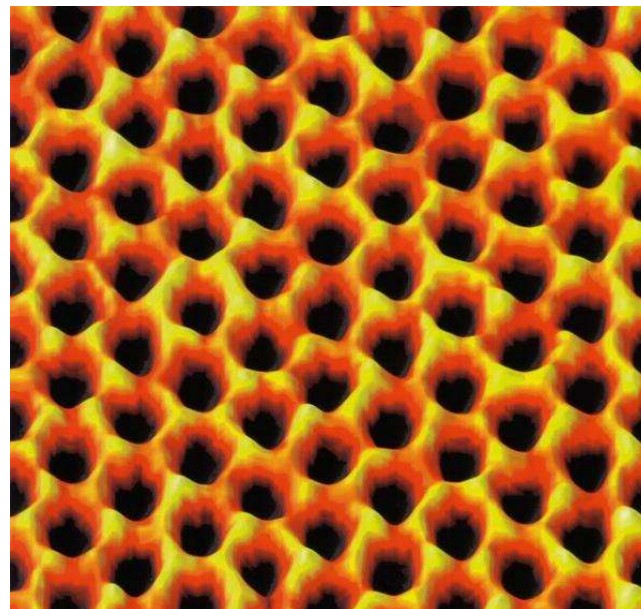
# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT

Podstawowym składnikiem anod do ogniw litowo-jonowych jest grafit. Był to pierwszy materiał zaproponowany do ogniw Li-ion, który prawidłowo zadziałał (interkalacja). Z zalet – jest względnie tani i względnie mało reaktywny z substancjami obecnymi w ogniwie. Jest też dobrym przewodnikiem elektronowym (nie są niezbędne dodatki zwiększające przewodnictwo). Względnie niewiele zmienia się też jego gęstość w wyniku naładowania (litem) – o ok. 10%. Niestety ma dość niską (względnie) teoretyczną pojemność – jedynie  $372 \text{ mAh g}^{-1}$  (dla  $\text{LiC}_6$ ).

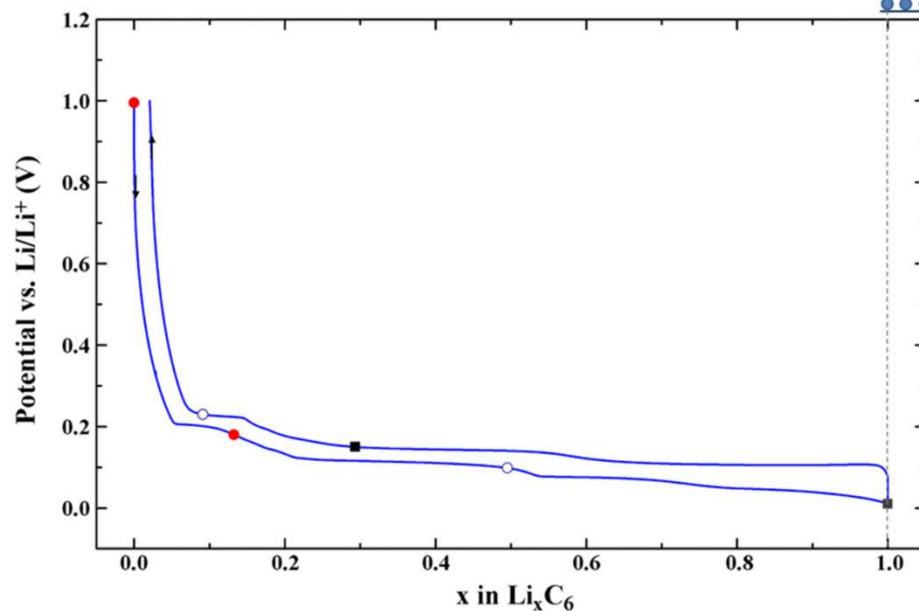
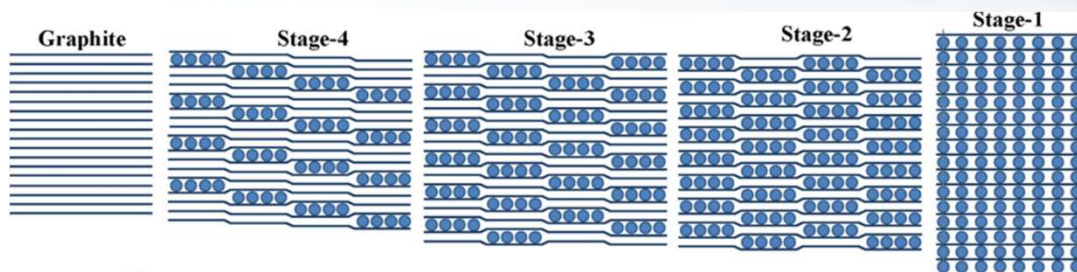
# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT

Grafit ładuje się stopniowo – przyjmując kationy litu etapami pozwalając na stopniowe odkształcanie się oryginalnej struktury.

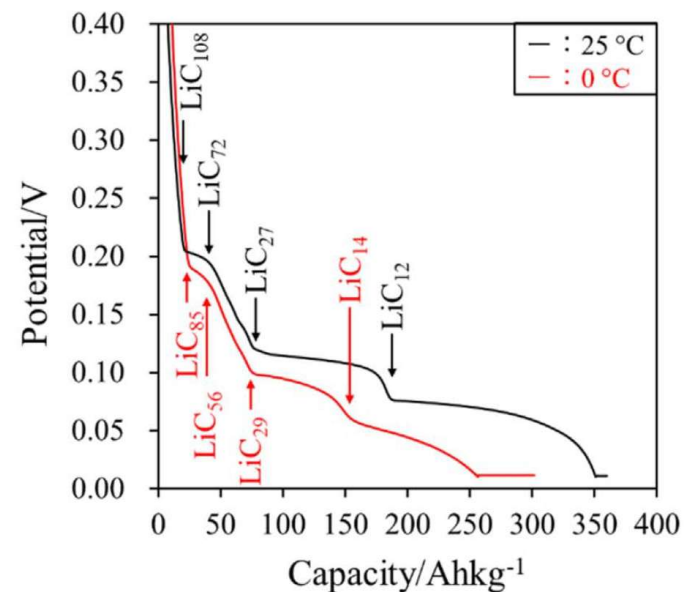
Wygląd warstwy grafitu  
pod AFM



# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT



R. Kostecki *et al.*, J. Power Sources 195 (2010) 3655.



H. Fujimoto *et al.*, J. Electrochem. Soc. 168 (2021) 090515.

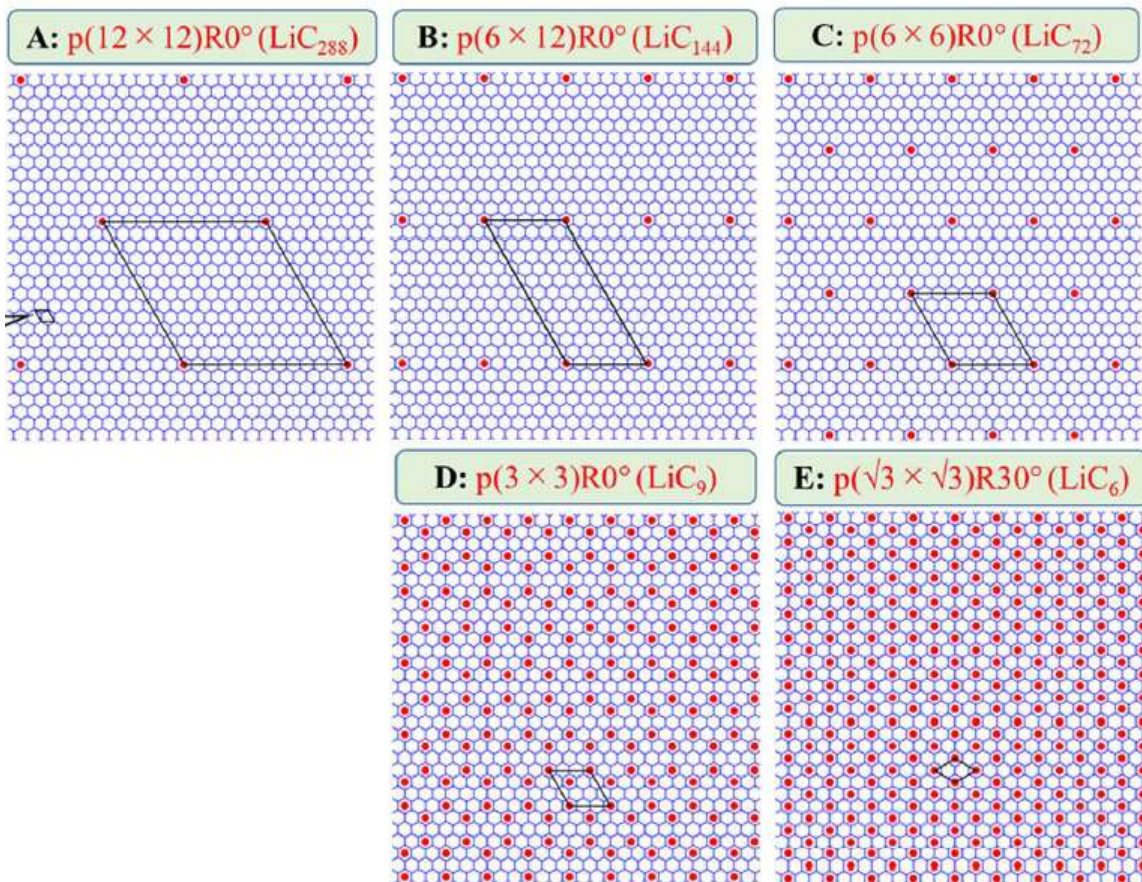
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT



H. Fujimoto *et al.*, J. Electrochem. Soc. 168 (2021) 090515.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT

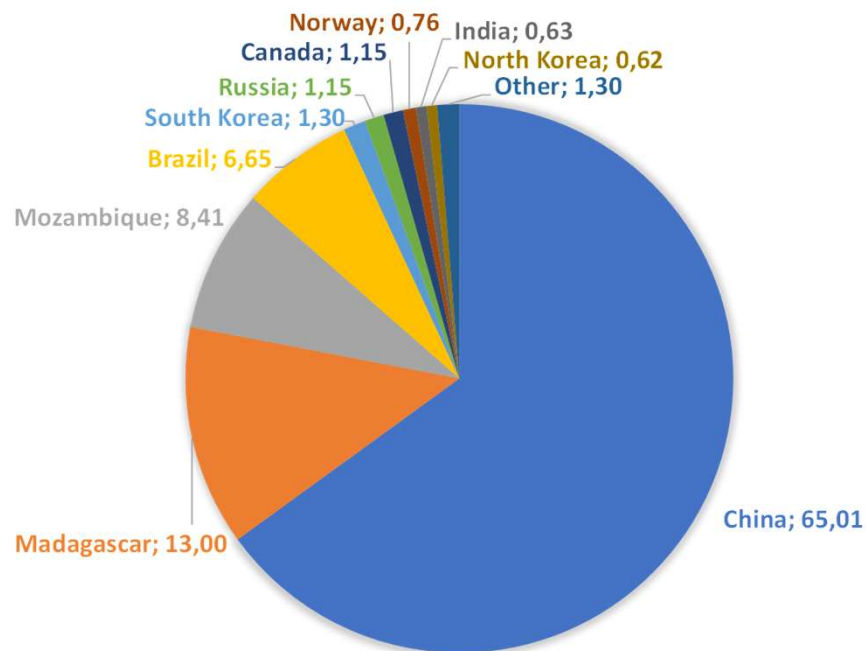
Właściwości grafitu wynikają z jego budowy. Jest ona krystaliczna i doskonale uporządkowana (pomijając brzegi warstw). Warstwy węgla są ułożone ściśle (0,335 nm), przez co dochodzi do zmian gęstości w wyniku interkalacji jonami litu. Grafit ma różne właściwości zależnie od płaszczyzny w której ma działać (anizotropowość).

Grafit posiada jednak także wady – dochodzi do jego eksfoliacji (odrywania warstw) w wyniku kontaktu z niektórymi rozpuszczalnikami, np. węglanem propylenu. Co więcej, gorzej działa przy szybkim cyklowaniu (powyżej 2C). Jest też go trudno modyfikować.

# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT

Grafit pochodzi z wydobycia w kopalniach (np. Chiny, Mozambik, Brazylia, itd.) i jego wydobycie wynosi ok. 1,3 mln ton rocznie;

Oprócz tego można tworzyć syntetyczny grafit, który obecnie ma już zbliżone parametry do naturalnego (kopanego). Jego cena jest stabilniejsza. Często używa się mieszanin do produkcji anod.



dane za 2022 rok, opracowanie własne na podstawie investingnews.com

# ANODY DO OGNIW LI-ION - GRAFIT

Zwiększone zapotrzebowanie na grafit powoduje gwałtowny wzrost cen – w latach 2008-2011 ok. 3-krotnie wzrosła cena, żeby spaść, a następnie ponownie wzrosnąć ponad 1,5-krotnie w latach 2017-2018. Od roku 2020 powoli rośnie i pod koniec 2022 roku była już ponad 50% wyższa.

Baterie stanowią już 25% zużycia grafitu. Pozostałe zastosowania to szczotki do silników elektrycznych, dodatki do stali i produkcja materiałów ognioodpornych, elementy motoryzacyjne i smary.

W ogniwie litowo-jonowym jest ponad 10 razy więcej grafitu niż litu.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – WĘGIEL

Inne struktury węglowe również mogą być materiałami anodowymi. W tym celu stosuje się tak zwane hard carbons i soft carbons a także nanostruktury - grafen w różnych odmianach, nanorurki, itd.

Materiały te produkuje się; nie występują one w naturze.



# ANODY DO OGNIW LI-ION – HARD CARBON

Hard carbon to materiał wytworzony poprzez zwęglanie prekursora w wyniku pirolizy (nie dochodzi do samoporządkowania się do grafitu).

Prekursor materiału to materiał początkowy, który przekształca się w docelowy materiał dopiero pod wpływem czynników zewnętrznych, ew. reakcji.

W przypadku materiałów węglowych jest to związek organiczny, który pod wpływem pirolizy zmienia się w formę węgla o strukturze przestrzennej i/lub o odpowiedniej gęstości i/lub składzie chemicznym (odpowiedni stosunek węgla do innych pierwiastków).

# ANODY DO OGNIW LI-ION – HARD CARBON

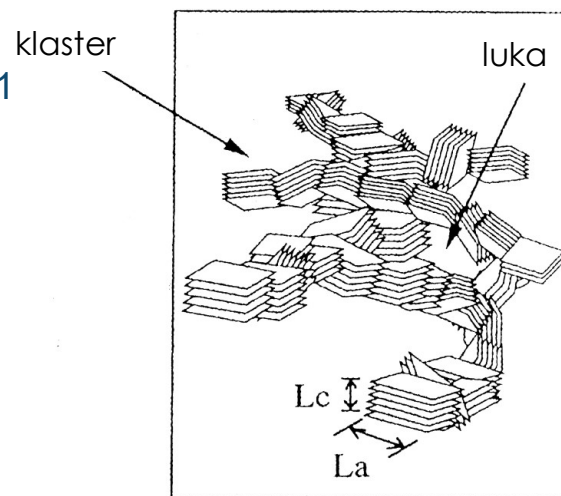
Hard carbon jest to materiał mocno nieuporządkowany, warstwy grafenowe (warstwy węgla o strukturze płaskiej, gdzie węgle tworzą sześciokąty). są losowo porozrzucone, brak jest uporządkowania dalekiego zasięgu, przez co materiał jest izotropowy (ma identyczne właściwości bez względu na kierunek). Hard carbon jest niekryształiczny – amorficzny. Duże przeciętne przerwy między warstwami (0,380 nm) skutkują pomijalnymi różnicami w gęstości materiału w czasie cyklowania.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – HARD CARBON

Zaletami hard carbon są potencjalnie wyższa gęstość energii od grafitu, brak zagrożenia eksfoliacją, lepsze zachowanie w obliczu szybkiego cyklowania, łatwość modyfikacji (użycia zarówno jako składnika kompozytów jak i modyfikacje domieszkowe).

Pojemność hard carbon dochodzi do  $500 \text{ mAh g}^{-1}$  (zależnie od prekursora i warunków pirolizy).

Wadą jest duża strata pojemności w pierwszym cyklu (10-20%).



I. Mochida, Carbon 39 (2001) 399.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – SOFT CARBON

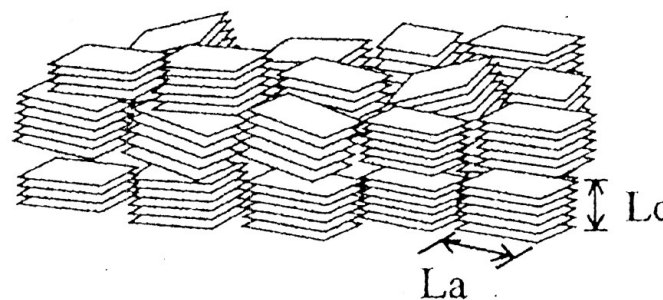
Soft carbon to materiał wytworzony poprzez zwęglanie prekursora organicznego, który w czasie podgrzewania najpierw się topi a dopiero potem dochodzi do pirolizy a tworzona struktura jest zbliżona do grafitu.

Przez to struktura jest uporządkowana i miejscami zbliżona do grafitu, chociaż odległości między warstwami grafenu są różne i przeciętnie nieco większe od tej w graficie (0,375 nm). Soft carbon jest częściowo krystaliczny i jest anizotropowy.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – SOFT CARBON

Zaletami soft carbon są niska cena, znacznie lepsze zachowanie (od grafitu) wobec szybkiego cyklowania (i zachowanie wysokiej pojemności).

Wadami są niska pojemność względem grafitu (poniżej 300 mAh g<sup>-1</sup>), możliwość eksfoliacji, gorsze właściwości mechaniczne i spora pojemność tracona przy pierwszym cyklu.



I. Mochida, Carbon 39 (2001) 399.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – WĘGIEL

Pojemności soft i hard carbon wynikają z dodatkowych miejsc, w których mogą przebywać kationy litu (oprócz interkalowanych między warstwami grafitu). Są to:

I: powierzchnie zewnętrzne,

II: pozycje interkalowane,

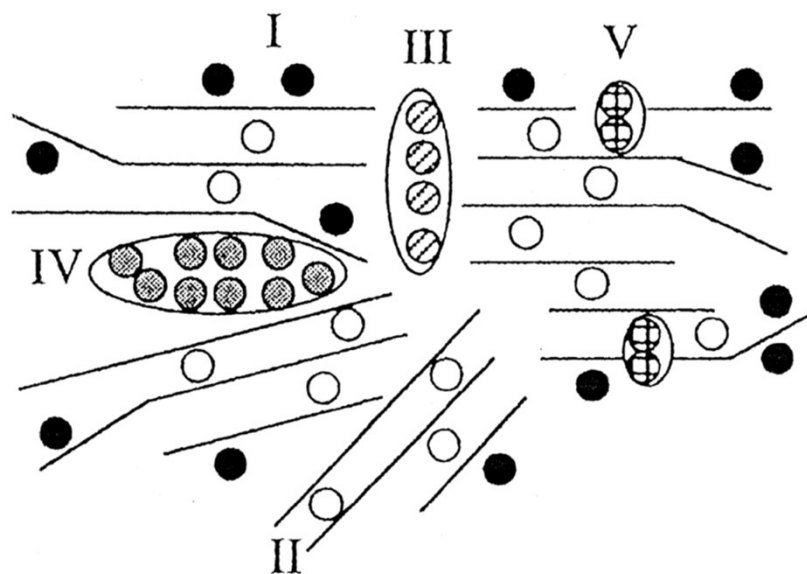
III: luki międzyklastrowe,

IV: luki w ramach klastrów,

V: defekty klastrów

I-V w hard carbon,

I-III w soft carbon



I. Mochida, Carbon 39 (2001) 399.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – WĘGIEL

Wspólnymi właściwościami hard carbon, soft carbon i grafitu jest tworzenie w miarę powtarzalnych i przepuszczalnych dla kationów litu SEI (warstw międzyfazowych, *ang.* Solid Electrolyte Interphase).





# ANODY DO OGNIW LI-ION – GRAFEN I NANOSTRUKTURY

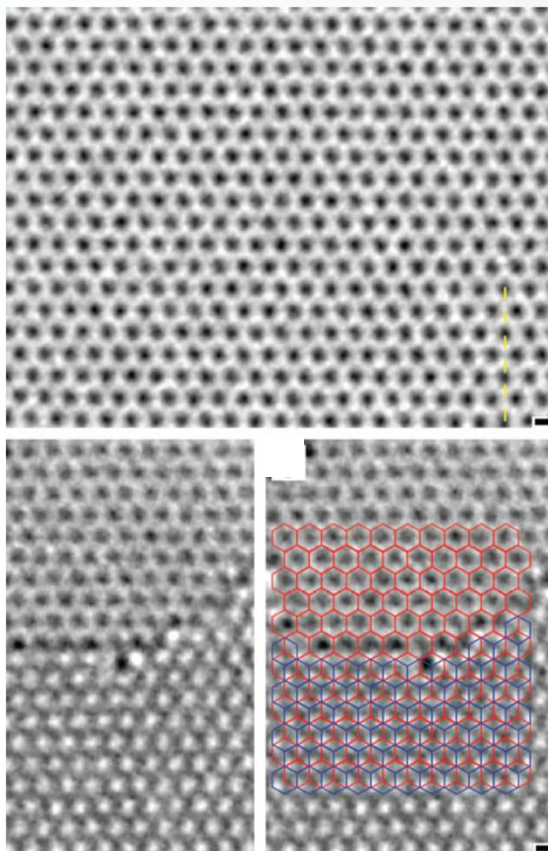
Inne formy węgla takie jak grafen (pojedyncze warstwy węglowe o strukturze grafitu) i nanorurki, nanowstążki i inne struktury nanometryczne (2D, 3D).

Zaletami są wysokie pojemności (grafen 960 mAh g<sup>-1</sup>, nanorurki 1100 mAh g<sup>-1</sup>, inne o zbliżonych pojemnościach), dobre zachowanie przy cyklowaniu (również szybkim), niewielkie spadki pojemności w pierwszym cyklu, duża żywotność.

Do podstawowych wad należą olbrzymia cena produkcji, brak technologii powiększania skali powyżej laboratoryjnej, niewystarczająca powtarzalność produkcji i wciąż nieco zbyt mała wiedza o tych materiałach.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – GRAFEN

Monowarstwa i przejście  
między pojedynczą  
i podwójną warstwą



A. Zettl, et al., Nano Lett. 8 (2008) 3582.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

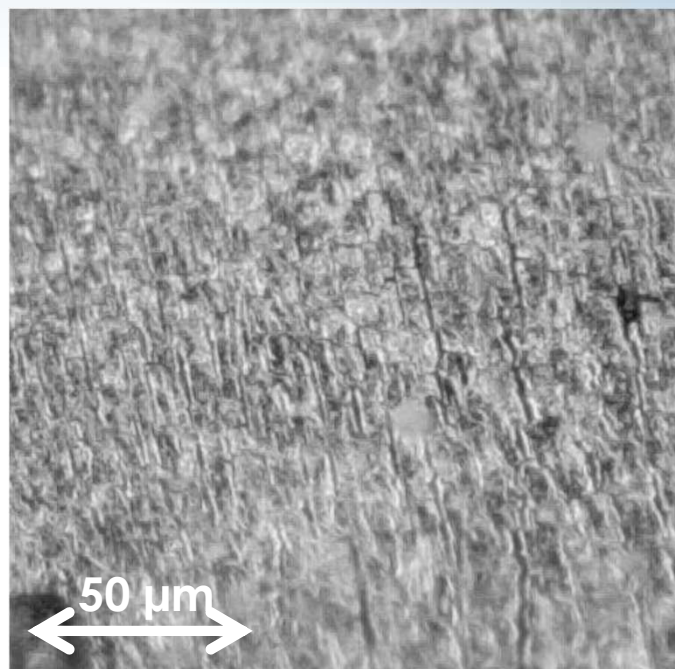
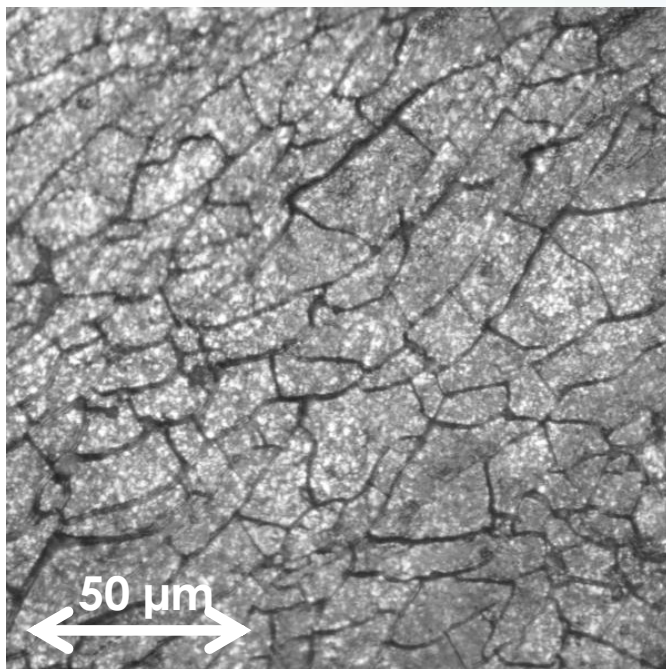
# ANODY DO OGNIW LI-ION – KRZEM

Teoretyczna pojemność ok. 4200 mAh g<sup>-1</sup>.

Krzem w czasie interkalacji litem zmienia swoją strukturę z krystalicznej na amorficzną (nieuporządkowaną). Powstający stop ma stechiometrię Li<sub>22</sub>Si<sub>5</sub> (Li<sub>4.4</sub>Si). Wiąże się to ze zmianą właściwości mechanicznych a także gwałtownym wzrostem objętości (spadek gęstości) – o ok. 300%.



# ANODY DO OGNIW LI-ION – KRZEM



J.B. Ratchford et al., ARL-TR-5818, 2011.

Tak duże zmiany objętości powodują naprężenia i pękanie materiału co powoduje szybki spadek jego pojemności ze względu na nieodwracalność procesów i utratę kontaktu elektrycznego z częścią materiału.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – KRZEM

Oprócz podstawowej ogromnej wady jaką jest pękanie i szybki spadek pojemności (nawet parę % na cykl), krzem także tworzy mało trwałą SIĘ w stosunku do typowych elektrolitów zawierających związki fluoru.

Olbrzymia pojemność wynika ze struktury stopu, w której atomy litu otaczają pojedyncze atomy krzemu w przestrzeni, a nie gromadzone są w ramach warstw, np. interkalowanych.



# ANODY DO OGNIW LI-ION – KRZEM

Niska cena krzemu i olbrzymia pojemność stanowią magnes dla badaczy anod do ogniw litowo-jonowych. Stąd mnogość modyfikacji i kompozytów zawierających krzem.

Popularnymi metodami obejścia problemów zmian objętości/gęstości w czasie cyklowania są:

- stosowanie nanocząstek krzemu, w których zmiany objętości są relatywnie nieduże (ze względu na małą ilość atomów krzemu);
- stosowanie kompozytów zawierających domeny krzemu, ale bazujące na innych materiałach, np. na węglu.

# ANODY DO OGNIW LI-ION – KRZEM

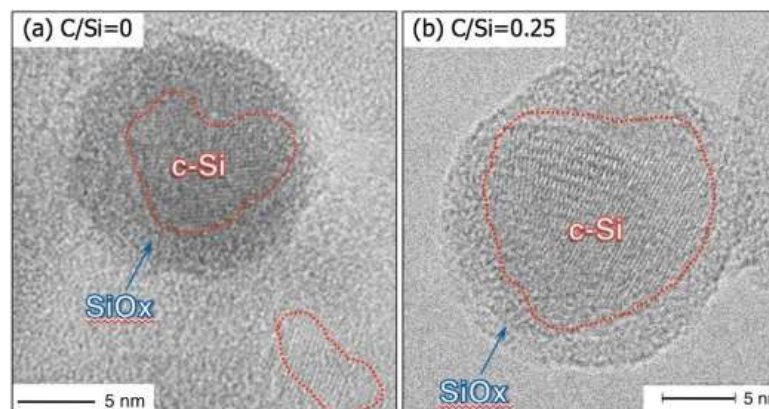
Tzw. nanokrzem (nanocząstki krzemu) ma pojemność nawet do 2000 mAh g<sup>-1</sup> i wprawdzie pojemność potrafi być stabilna wraz z cyklowaniem, ale w pierwszym cyklu traci się bezpowrotnie do 30% pojemności. Wynika to z dużej powierzchni anody (rozdrobnienie) i w związku z tym tworzenia SEI na dużej powierzchni (na co tracony jest materiał anody i elektrolit). Materiały te są również bardzo drogie (wysokie koszty produkcji).

Dużą zaletą jest jednak doskonałe znoszenie szybkiego cyklowania (powyżej 5C).



# ANODY DO OGNIW LI-ION – KRZEM

Kompozyty rzadko mają pojemność większą niż  $1500 \text{ mAh g}^{-1}$ , jednak charakteryzuje je stabilna pojemność, odporność na szybkie cyklowanie i dobre właściwości mechaniczne. Niestety zwykle również tracą dużo pojemności w pierwszym cyklu. Kompozyty bazują na otaczaniu nanocząstek krzemu bardziej elastyczną fazą buforową przejmującą naprężenia i pozwalającą cząstkom krzemu się rozszerzać i kurczyć do woli bez wpływu na właściwości mechaniczne całego materiału.



K. Homma, Sci. Technol. Adv. Mater. 15 (2014) 025006.

# ANODY DO OGNIW LI-ION - TYTANIAN

Wyjątkiem od materiałów węglowych, krzemowych i ich kompozytów jest tytanian litu –  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Jego główną zaletą jest długa żywotność (do 20 000 cykli z równomiernym spadkiem pojemności), dobre znoszenie rozładowań do 5C (nadal świetna żywotność) i bezproblemowa praca do 10C (z niewielkim spadkiem pojemności). Materiał jest także bezpieczny: dobre właściwości mechaniczne (brak zmian objętości w czasie cyklowania i elastyczność - trudno pęka pod wpływem zewnętrznej siły), odporność na przegrzanie, niepalność, prawidłowa praca na mrozie (do ok.  $-40^{\circ}\text{C}$ , niewielki spadek pojemności do  $-20^{\circ}\text{C}$ ) i brak samozapłonu od przegrzania.

# ANODY DO OGNIW LI-ION - TYTANIAN

Wadą jest wysoki potencjał materiału (materiały oparte na krzemie i graficie mają blisko 0 V względem litu, a więc bez wpływu na napięcie ogniwa) – 1,5 V względem litu, co oznacza, że ogniwa mają napięcie ok. 2,5 V (1,5 raza mniejsza gęstość energii w ogniwie tylko z tego faktu).

Kolejną wadą jest niska pojemność materiału – ok. 175 mAh g<sup>-1</sup>, czyli ponad dwa razy mniejsza od grafitu.

# ANODY DO OGNIW LI-ION - TYTANIAN

Mimo dużych dwóch wad, zalety są nie do przecenienia. Długa żywotność i wysokie bezpieczeństwo zwróciło uwagę producentów samochodów elektrycznych, gdzie tytanian znalazł główne zastosowanie w ogniwach trakcyjnych.

# ANODY DO OGNIW LI-ION

- W praktyce w ogniwach dostępnych komercyjnie stosowany jest grafit (ok. 80% - po połowie kopalny i sztuczny) i tytanian – ok. 5% (do wybranych zastosowań), a także (z rosnącym udziałem) hard carbon – ok. 6% rynku.
- Zwiększa się liczba producentów, którzy dodają w małych ilościach (do 15%) krzem do grafitu (w praktyce to kompozyty krzem-węgiel), nie zawsze to upubliczniając, stąd trudno oszacować dokładny udział rynkowy takiego rozwiązania (w 2015 to ok. 2% rynku, ale wiadomo, że od tego czasu ten udział szybko rósł). W ostatnich 3 latach wzrastają średnie pojemności ogniw w masowej produkcji (co uznaje się za efekt użycia krzemu).

# ANODY DO OGNIW LI-ION

| Anoda                                                  | Mechanizm                          | E / V vs Li | d / g cm <sup>-3</sup> | gęstość<br>Q / mAh/g | max C | życie / cykle | bezpie<br>czeństwo |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------|----------------------|-------|---------------|--------------------|
| Grafit (naturalny / sztuczny)                          | interkalacja (warstwowa)           | ~0,1        | 1,9-2,3                | 372                  | 3     | 800           | średnie            |
| Hard carbon                                            | interkalacja (warstwowo-defektowa) | ~0,1        | 0,9-1,5                | 400-500              | 10    | 500-1000      | średnie            |
| Kompozyt Si/C                                          | stopowy / interkalacja             | 0,1-0,4     | 1,5                    | 560-2200 (5-50%)     | 3-10  | 500-1000+     | średnie            |
| Krzem                                                  | stopowy                            | 0,3-0,4     | 2,3                    | 4211                 | 1-5   | 200?          | średnie            |
| LTO (Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ) | warstwowa                          | 1,55        | 3,48                   | 175                  | 20    | 10000         | wysokie            |
| Lit                                                    | -                                  | 0           | 0,534                  | 3860                 | ?     | <100          | niskie             |

# Ogniwa Li-ion – katody

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# KATODY DO OGNIW LI-ION

Wymagane cechy katody w ogniwie (lista życzeń):

- **Wysoka pojemność** (wysoka gęstość energii);
- **Kompatybilność z innymi elementami ogniwa;**
- Długi czas życia (w cyklach i czasie);
- **Niska cena** (prosta i tania produkcja, tanie materiały, szeroko dostępne);
- Wysoka gęstość prądu;
- Wysoki potencjał;
- Mała degradacja wraz z cyklem, w tym mała pojemność tracona w pierwszym cyklu;
- Mała zmiana gęstości w czasie pracy;
- Zachowanie wysokiej pojemności wraz ze wzrostem szybkości cyklowania (rate capability);
- Bezpieczeństwo i przyjazność wobec środowiska;

# KATODY DO OGNIW LI-ION

Wymagane właściwości materiału katodowego:

- Zawiera jon/atom łatwy do utlenienia/redukcji (zwykle metal przejściowy);
- Reaguje z litem w sposób odwracalny (interkalacja, wejście jonów litu do struktury bez jej zmieniania);
- Reaguje z litem z wysoką energią swobodną: wysoka pojemność –  $\geq 1$  jon litu na jeden atom metalu, wysoki potencjał -  $> 4$  V;
- Reaguje z litem szybko zarówno w czasie wnikania i wychodzenia jonów litu z materiału;
- Dobrze przewodzi elektronowo (reakcja zachodzi wszędzie a nie tylko na styku materiału katodowego, dodatku zwiększającego przewodnictwo i elektrolitu; nie potrzebne są dodatki zwiększające przewodnictwo, co zwiększa gęstość energii);

# MATERIAŁY KATODOWE

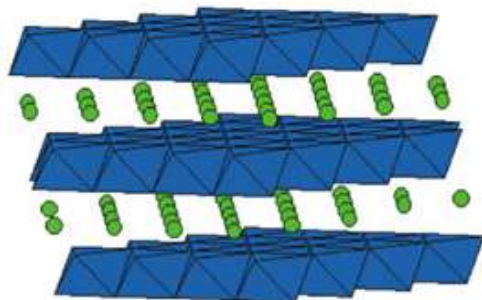
Parametry wpływające na właściwości katody:

- Forma krystalograficzna;
- Metoda wytwarzania (np. chemiczna, solwotermiczna, termiczna, elektrochemiczna, CVD, itd.);
- Wielkość ziaren;
- Zdefektowanie (jak bardzo struktura rzeczywista różni się od idealnej dla danej formy krystalograficznej);
- Temperatura działania (zakres).

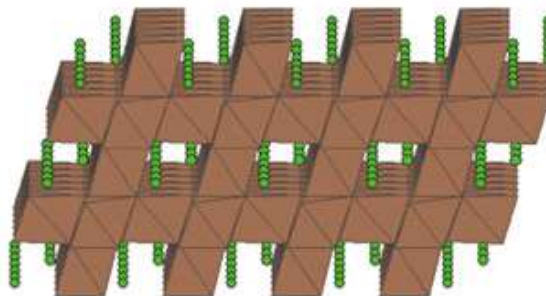
# MATERIAŁY KATODOWE

M. Thackeray, Nat. Mater. 1 (2002) 81.

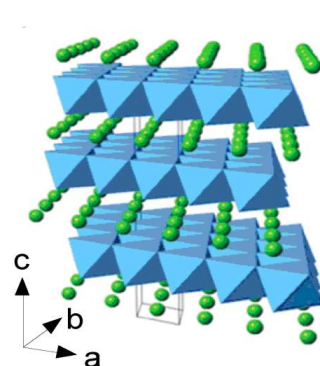
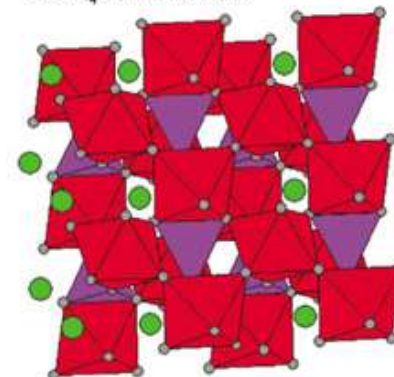
$\text{LiCoO}_2$  : layered structure



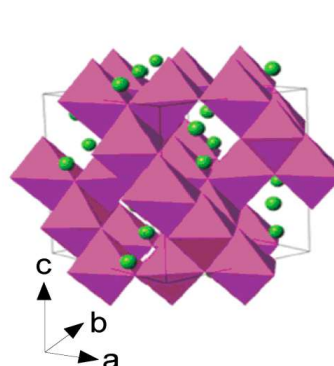
$\text{LiMn}_2\text{O}_4$  : spinel structure



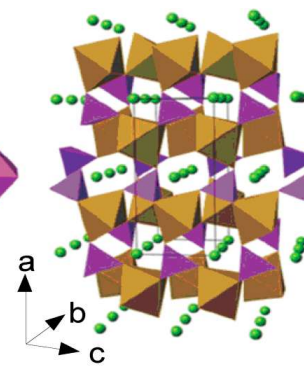
$\text{LiFePO}_4$  : olivine structure



layered  $\text{LiCoO}_2$   
2D



spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$   
3D



olivine  $\text{LiFePO}_4$   
1D

C.M. Julien, A. Mauger, K. Zaghib, H. Groult, Inorganics 2 (2014) 132.

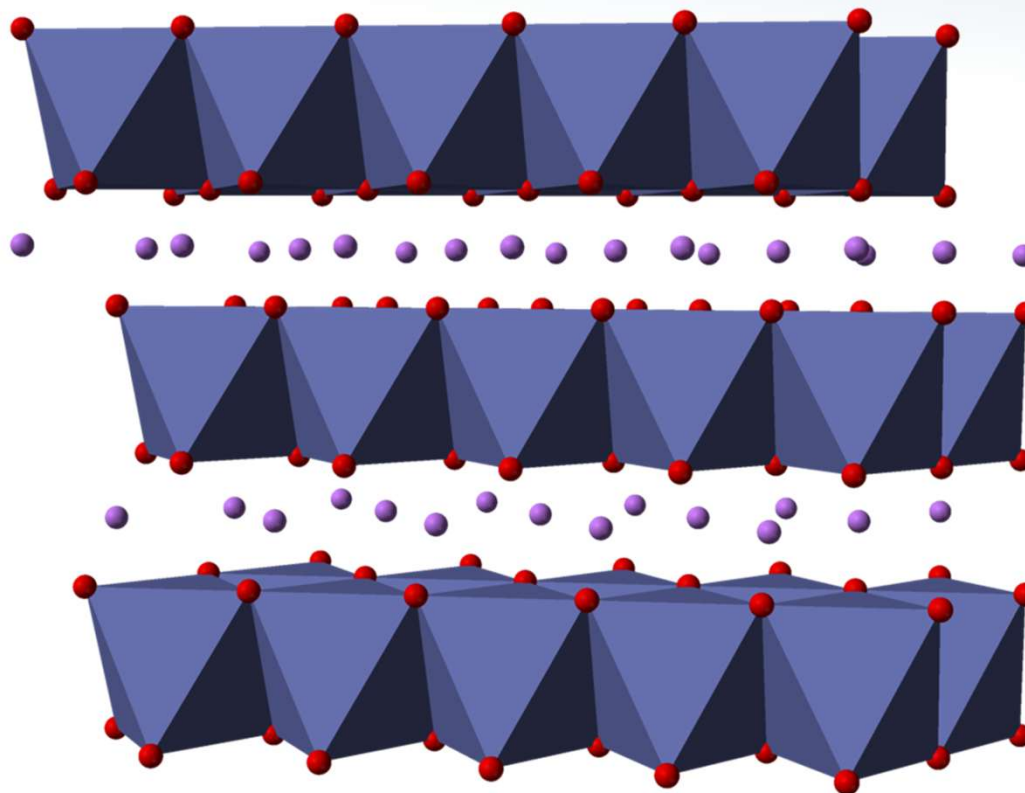
**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{COO}_2$



**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{COO}_2$

Struktura warstwowa  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ , interkalacja jak w graficie, lit nieco rozpycha warstwy  $\text{CoO}_2$ , kobalt redukuje się z 4+ do 3+. Lit obsadza pozycje oktaedryczne.

W praktyce nie da się użyć całej pojemności teoretycznej tlenku kobaltu, gdyż powyżej  $x=0,5$  zaczynają się zmiany fazowe powodujące zmiany gęstości, pękanie i trwały spadek pojemności. Stąd cyklowanie w praktyce oznacza użycie około połowy pojemności (np. 140-150 z 272 mAh/g).

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{CoO}_2$

- Stabilny przez ok. 800 cykli;
- Potencjał 3-4,2 V vs Li;
- Pojemność rzeczywista 150 mAh g<sup>-1</sup> (uwzględnia max x=0,5);
- Wolna dyfuzja litu w ziarnach, dość niskie przewodnictwo elektronowe, stąd dodaje się grafit w niedużych ilościach (kilka %) oraz stosuje się duże rozdrobnienie, co zmniejsza problem wolnej dyfuzji w głębi ziaren.
- Zmiana elektrolitu z  $\text{LiPF}_6$  na inny, nie tworzący HF (HF reaguje z  $\text{Co}^{4+}$ ), sprawia, że można ładować  $\text{CoO}_2$  głębiej – do 4,5 V i do 180 mAh g<sup>-1</sup>.



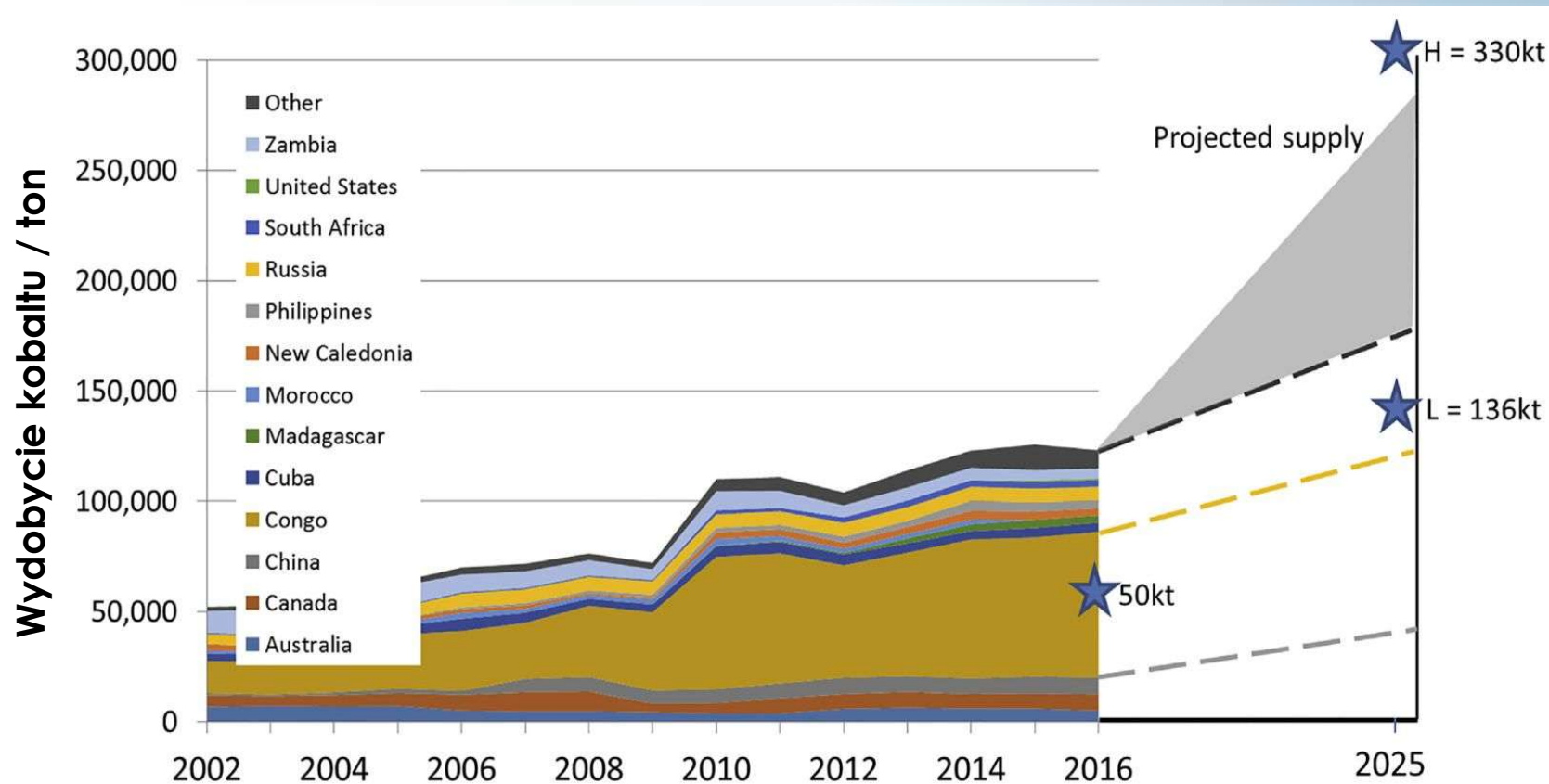
# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{CoO}_2$

$\text{CoO}_2$  jest umiarkowanie bezpiecznym materiałem i był pierwszym materiałem, którego użyto w komercyjnie dostępnych ogniwach litowo-jonowych. W związku z tym zdominował rynek na długie lata i jest wciąż jednym z częściej stosowanych. Niestety duża produkcja (wciąż rosnąca) uruchomiła olbrzymie zapotrzebowanie na kobalt. Kobaltu jest mało w skorupie ziemskiej, co w połączeniu z zapotrzebowaniem spowodowało duży wzrost cen i tak już drogiego kobaltu. W związku z tym rozpoczęły się poszukiwania nie tylko lepszych materiałów, ale i przede wszystkich tańszych.

# KATODY DO OGNIW LI-ION

Ceny kobaltu po gwałtownym wzroście produkcji ogniw Li-ion rosły błyskawicznie. Stąd zainteresowano się materiałami opartymi na niklu i manganie. W latach 2010-2015 ceny powoli zaczęły spadać z 40 do 30 \$/kg. Miejscami jednak dalej potrafią sięgać 100\$ a obecnie ceny wahają się w zakresie 50-60\$. W tym czasie ceny manganu spadły z 3 do 1,6 \$/kg. Ogromnym jednak problemem jest skumulowanie wydobycia w niestabilnym (wojny domowe) i korzystającym z pracy dzieci Kongo. Problem więc to brak zrównoważenia także w rozumieniu społecznym. Niemcy potrzebujący dużo kobaltu do swoich fabryk uczyniły z tego metodę nacisku na rząd Kongo aby oszedł od korzystania z pracy dzieci.

# KATODY DO OGNIW LI-ION



E. Olivetti, G. Ceder, G.G. Gaustad, X. Fu, Joule 1 (2017) 229.

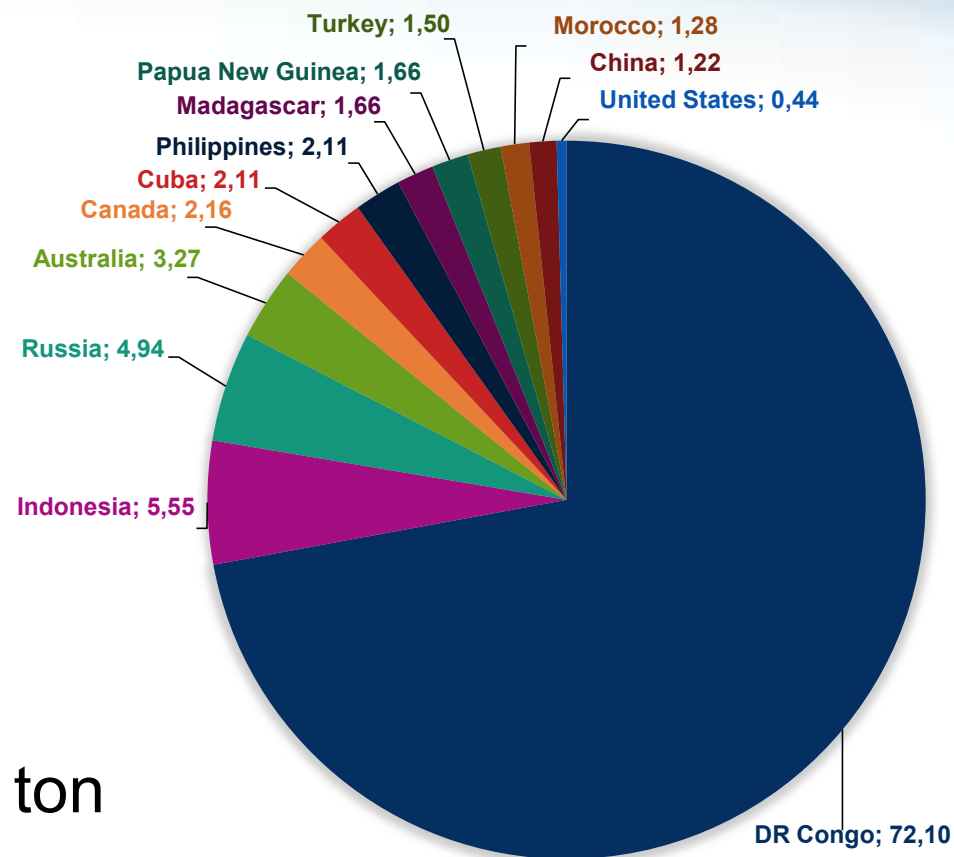
**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY DO OGNIW LI-ION



Całość: 180 000 ton

Produkcja kobaltu w 2022 roku. Opracowanie własne na podstawie investingnews.com

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY DO OGNIW LI-ION

Inne warstwowe tlenki niestety nie spełniły oczekiwań. Badania skupiały się na  $\text{NiO}_2$  ze względu na wysoki potencjał względem litu i  $\text{MnO}_2$  ze względu na niską cenę.

$\text{NiO}_2$  okazał się być bardzo trudny w syntezie i niestabilny.

$\text{MnO}_2$  w czystej formie również jest niestabilny elektrochemicznie, gdyż stabilną formą dla  $\text{MnO}_2$  jest forma spinelowa  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (o strukturze innej niż warstwowa).

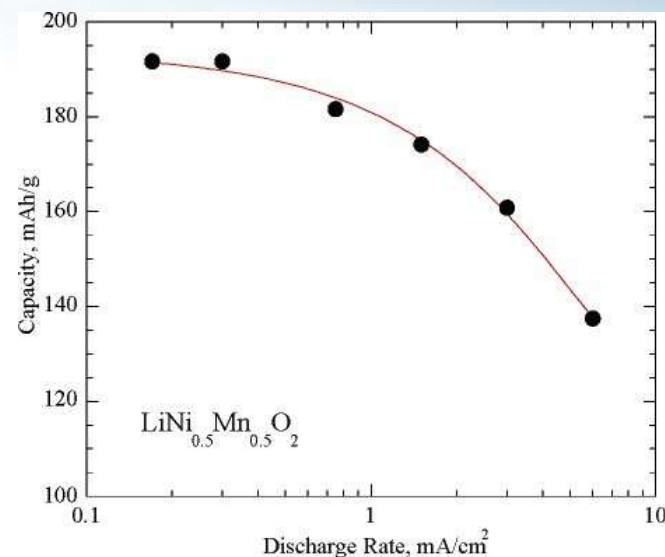
Stąd też rozpoczęły się badania nad tlenkami mieszanymi, w których obecność manganu zmniejszała cenę, niklu zwiększała potencjał a kobaltu wprowadzała stabilność.

# KATODY DO OGNIW LI-ION - NMO

Jednym z pierwszych pomysłów było stworzenie tlenku mieszanego nikiel-mangan o stechiometrii  $\text{Ni}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_2$  (NMO). Powstały też tlenki o innych stechiometriach o ogólnym wzorze  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ , ale stechiometria  $x = 0,5$  okazała się najbardziej optymalna. Cyklowanie w praktyce daje dobre wyniki (bez spadku pojemności) do ok. 4,7 V vs Li. Niestety obecność niklu pomiędzy warstwami tlenku powoduje spadek dyfuzji litu między warstwami, co zmniejsza pojemność i czas życia elektrody.

# KATODY DO OGNIW LI-ION - NMO

- Pojemność, zależnie od zakresu potencjałów cyklowania, jest w zakresie 140-160 mAh g<sup>-1</sup>;
- Dobrze znosi szybkie cyklowanie;
- Im szerszy zakres potencjału cyklowania, tym szybszy spadek pojemności;
- Modyfikacje powierzchni ziaren zmniejszają problem z cyklowaniem w wyższych napięciach (ale powodują wzrost ceny materiału).
- Teoretycznie dobry materiał, ale ogólna stabilność i czas życia w cyklach umiarkowane.



Y. Makimura, T. Ohzuku, J. Power Sources 119-121 (2003) 156.



# KATODY DO OGNIW LI-ION – NMC

W czasie prac nad NMO okazało się, że domieszki kobaltu znacząco poprawiają parametry materiału. Optymalnym materiałem o budowie warstwowej, był mieszany tlenek niklu-manganu-kobaltu o stechiometrii  $\text{Ni}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$ . Spełnia on założenia jakie przyświecały pomysłowi mieszanych tlenków i jest obecnie stosowany w ogniwach Li-ion. Zmiany gęstości są na poziomie 2% ( $\text{CoO}_2$  ma ok. 10%). Materiał jest nieco tańszy i można go cyklować do ok. 4,5 V vs Li.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – NMC

Nikiel w strukturze jest obecny między warstwami w znacznie mniejszym stopniu (2-3%) niż w przypadku NMO (ok. 10%), powodując lepsze przewodnictwo jonów litu w ziarnach i większą pojemność. W praktyce nikiel nie jest aktywny aż do ok. 4,5 V vs Li, ale podwyższa potencjał całego materiału względem litu.

Głównym składnikiem aktywnym jest kobalt, co widać w badaniach (mimo zwiększonej ilości manganu). Zwłaszcza na powierzchni to głównie kobalt odpowiada za „wpuszczanie” litu do środka ziarna.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – NMC

- Ze względu na małe zmiany gęstości materiał jest trwalszy niż inne tlenki mieszane;
- Pojemność sięga  $190 \text{ mAh g}^{-1}$  przy cyklowaniu do ok.  $4,5 \text{ V vs Li}$ ;  $160\text{-}170 \text{ mAh g}^{-1}$  do  $4,2 \text{ V vs Li}$ ;
- Średnie napięcie ogniwa to  $3,7 \text{ V vs Li}$ , niezależnie od stechiometrii;
- Mały spadek pojemności w czasie cyklowania;
- Dobrze znosi szybkie cyklowanie.
- Wyższy koszt materiałów wejściowych i produkcji (obecność kobaltu, metoda termiczna ok.  $900^\circ\text{C}$ , wysokie koszty energii).

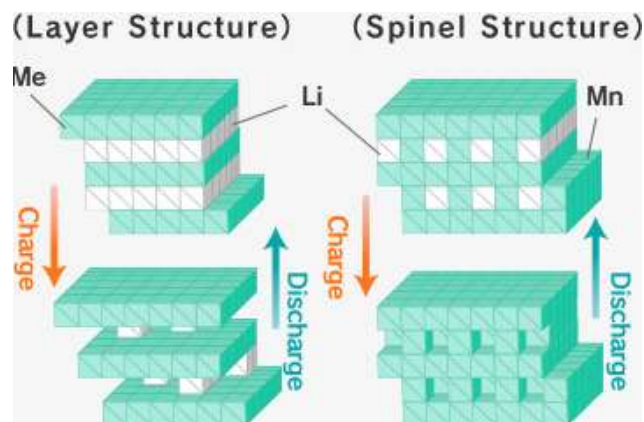
# KATODY DO OGNIW LI-ION – NMC

Obecnie dzięki rozwojowi technologii, poprawie procesu produkcji i ulepszeniom w zakresie struktury krystalicznej zwiększa się pojemność katody jednocześnie obniżając zawartość kobaltu (i manganu).

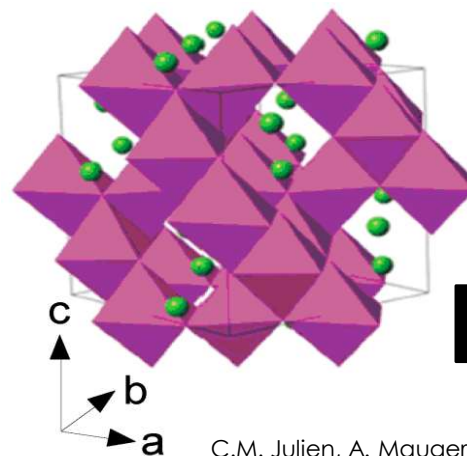
Od kilku lat produkuje się całą gamę coraz lepszych materiałów z serii NMC (oznacza się stosunek metali do siebie w składzie katody):  
532 (oznaczający  $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,3}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ ), 622, 811 i pracuje się nad 9:0,5:0,5.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{MnO}_2$ (SPINEL)

Materiały o budowie spinelu trzymają jony litu w swojej strukturze równomiernie – w trzech wymiarach są luki pozwalające na przechowywanie i poruszanie się jonów litu. Zwiększa to przewodnictwo litu w ziarnach. Spinelem jest też tytanian  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (materiał anodowy), który ma tak niski potencjał, że można go stosować jako anodę.



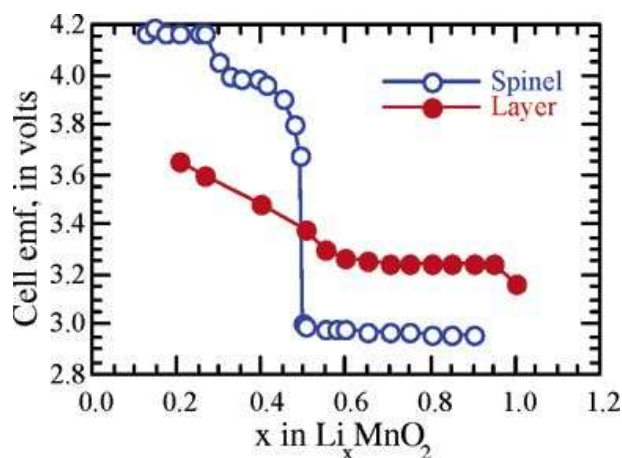
© Automotive Energy Supply Corporation



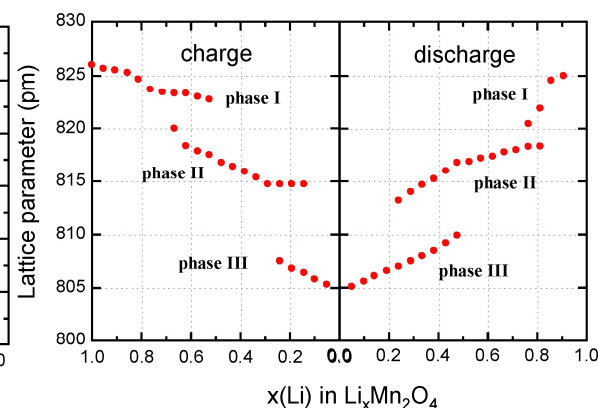
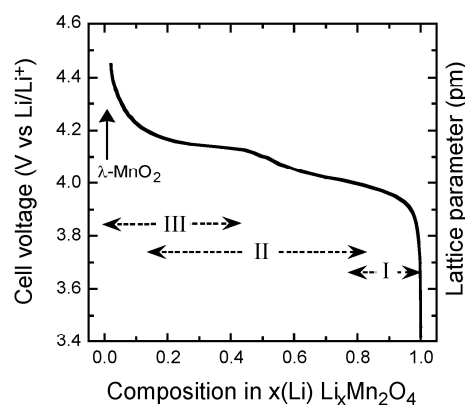
C.M. Julien, A. Mauger, K. Zaghib, H. Groult, Inorganics 2 (2014) 132.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{MnO}_2$ (SPINEL)

Materiały o budowie spinelu charakteryzują się też tym, że najczęściej mają co najmniej jedno przejście fazowe (zmianę struktury) w trakcie interkalacji litu, około stosunku 1 Li:2 Me.



M.S. Whittingham, Chem. Rev. 104 (2004) 4287.



C.M. Julien, A. Mauger, K. Zaghib, H. Groult, Inorganics 2 (2014) 132.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{MnO}_2$ (SPINEL)

Zalety spinelowego  $\text{MnO}_2$  to:

- Bezpieczeństwo – odporność na przeładowanie i przegrzanie (odwrotnie niż NMC i  $\text{CoO}_2$ );
- Względnie dobrze wytrzymuje szybkie cyklowania, chociaż powyżej 5C kosztem szybkiego spadku pojemności (w danym cyklu) wraz z szybkością;
- Niska cena – surowce ok. 5 razy tańsze niż NMC (niski koszt materiału, ale produkcji wyższy);
- Przyjazność środowisku (brak kobaltu i niklu).

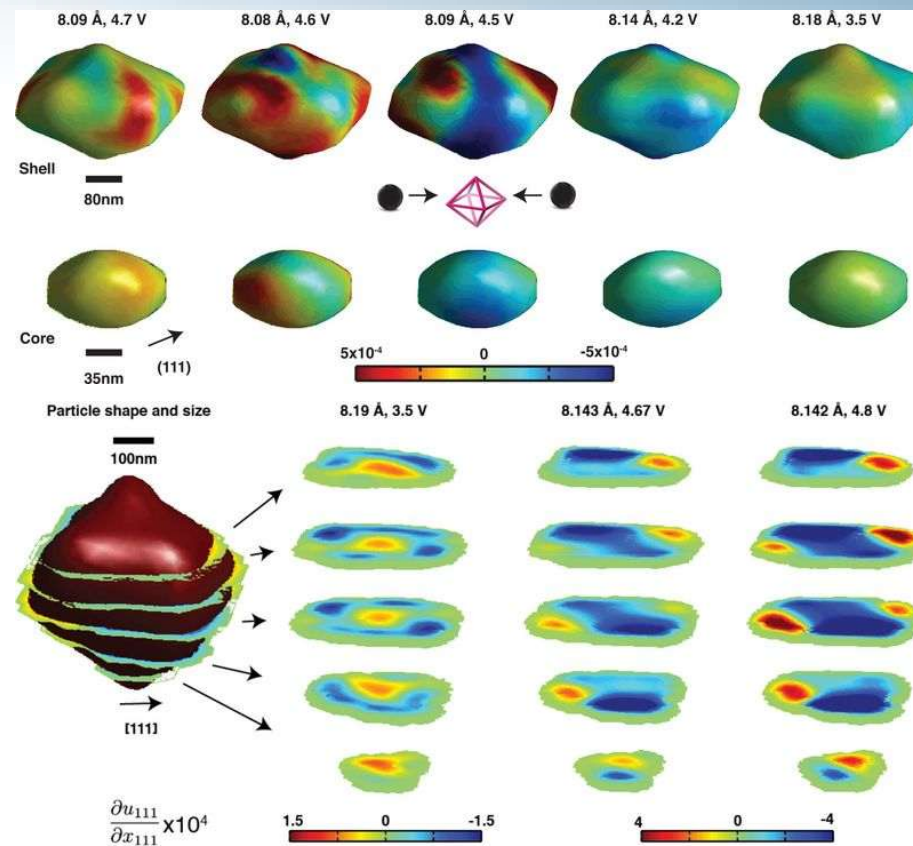
Wady:

- Wykorzystuje tylko jedną formę strukturalną, więc niska gęstość energii, pojemność ok. 110 mAh g<sup>-1</sup>.



# NAPRĘŻENIA W ZIARNACH MATERIAŁU AKTYWNEGO

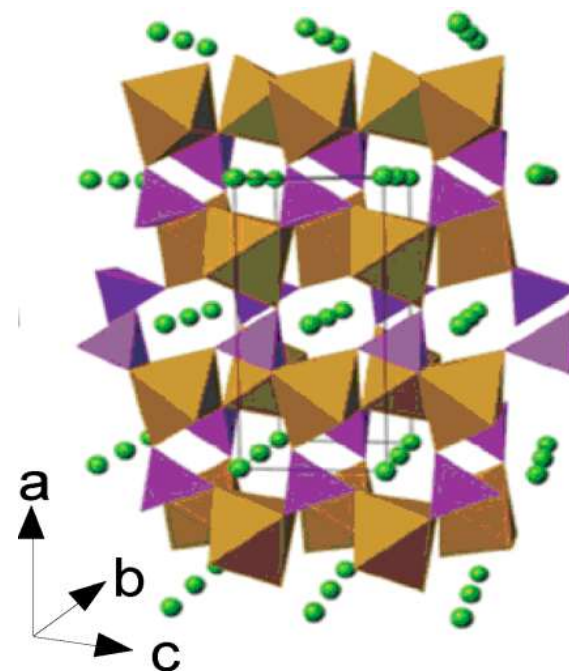
Jednym z powodów spadku pojemności w katodach są naprężenia w ziarnach w głębi i na powierzchni w czasie cyklowania, przez co dochodzi do pęknięć.



A. Ulvestad, A. Singer, H.-M. Cho, J.N. Clark, R. Harder, J. Maser, Y.S. Meng, O.G. Shpyrko, Nano Lett. 14 (2014) 5123.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{LiFePO}_4$

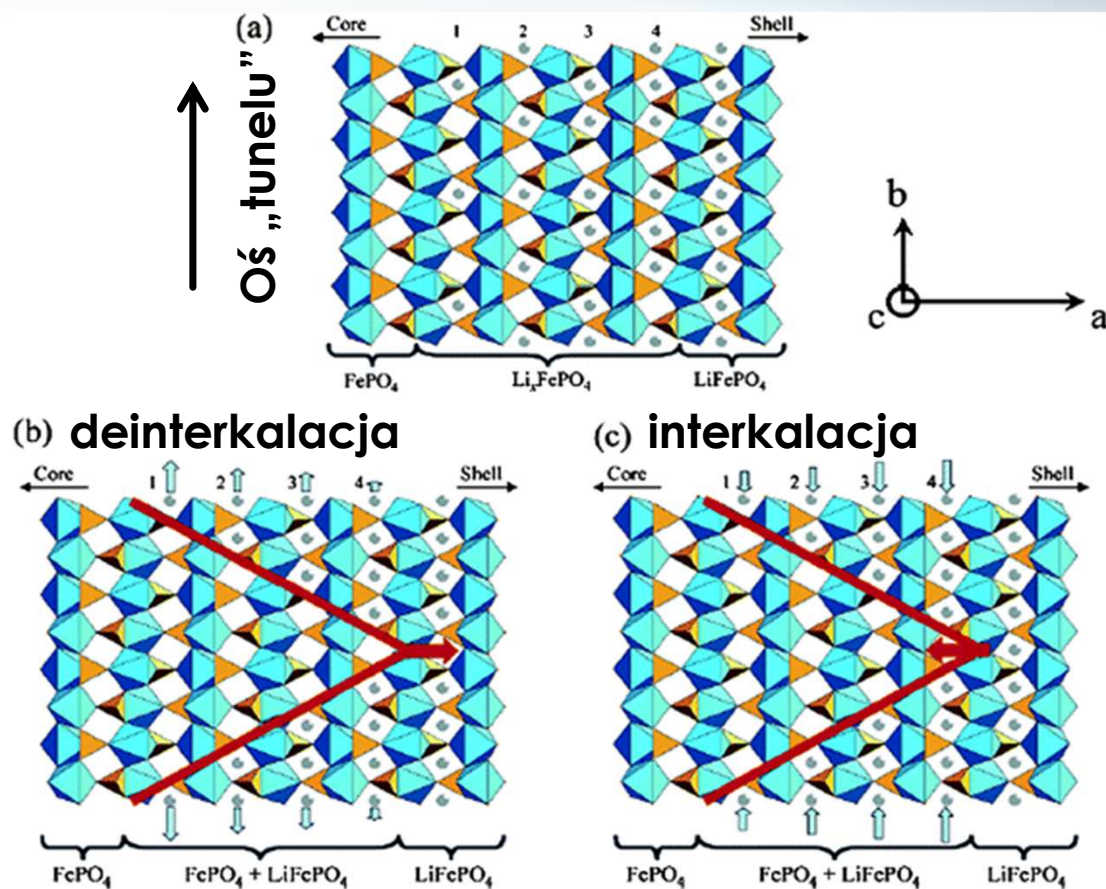
Materiały oparte o sole metali przejściowych i aniony kwasów nieorganicznych zwykle mają strukturę oliwinu i lit interkaluje się w lukach podłużnych (tunelach) w ramach struktury katody (i tylko w jednym kierunku). Ze względu na taką budowę materiał jest silnie anizotropowy i w praktyce ma niskie przewodnictwo jonowe (jony muszą wchodzić i wychodzić „po kolei”). W związku z tym nie da się go cyklować prądami wyraźnie wyższymi niż  $\sim 1\text{C}$ .



C.M. Julien, A. Mauger, K. Zaghib, H. Groult, *Inorganics* 2 (2014) 132.

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{LiFePO}_4$

Ładowanie  
i rozładowanie  
 $\text{LiFePO}_4$



Y. Wang, P. He, H. Zhou, Energy Environ. Sci. 4 (2011) 805.

ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{LiFePO}_4$

## Zalety $\text{LiFePO}_4$ :

- Niska cena;
- Przyjazny środowisku/nietoksyczny, także proces produkcji używa wody, kwasu askorbinowego i podobnie bezpiecznych i nietoksycznych związków;
- Praktycznie brak degradacji/spadku pojemności wraz z cyklowaniem;
- Bezpieczeństwo;
- Teoretycznie duża pojemność – max  $170 \text{ mAh g}^{-1}$ , w większości do uzyskania w praktyce –  $150 \text{ mAh g}^{-1}$ .

# KATODY DO OGNIW LI-ION – $\text{LiFePO}_4$

Wady  $\text{LiFePO}_4$ :

- Niski potencjał względem litu (średnio 3,45 V vs Li);
- Nie da się ładować ani rozładować szybko ciągle ani impulsowo (nie więcej niż ok. 1C)
- Praktycznie nie przewodzi elektronowo (trzeba dodawać dużo dodatku zwiększającego przewodnictwo elektronowe);
- Wysoka pojemność osiągalna tylko dla małych szybkości rozładowania – dla wyższych szybkości rozładowania osiągalne tylko ok. 150 mAh g<sup>-1</sup> – wynika to z dużej ilości węgla przewodzący (obniża pojemność) i złego znoszenia szybkiego ładowania/rozładowania.

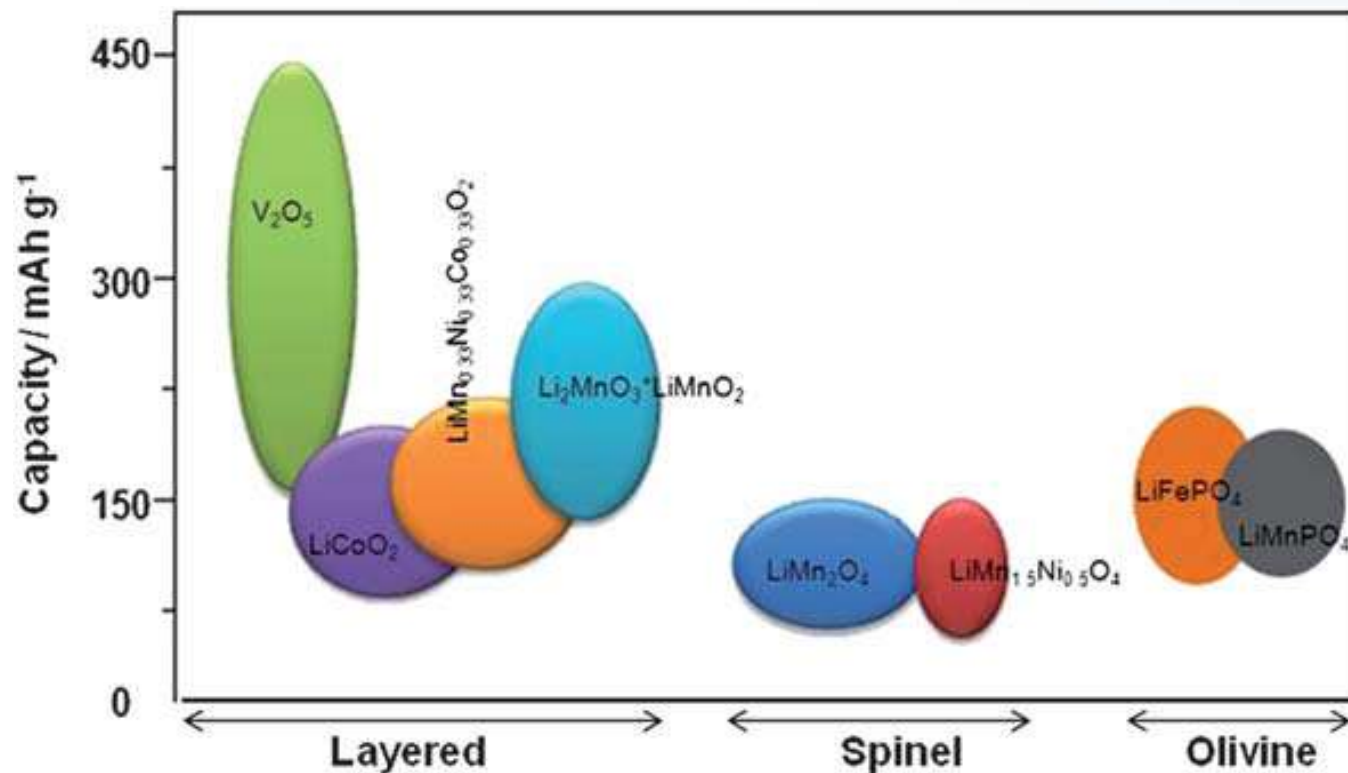


# KATODY DO OGNIW LI-ION

Materiały mogące interkalować więcej niż jeden kation litu (np.  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ ) na jeden atom metalu przejściowego są uważane za przyszłość ogniw litowo-jonowych nie tylko ze względu na większą pojemność, ale też i wyższe potencjały względem litu i niższe ceny. Większość nowych materiałów katodowych stara się produkować z manganu, żelaza, krzemu i fosforu, które są rozpowszechnione na ziemi i bardzo tanie. Żelazo i krzem są najbardziej rozpowszechnionymi odpowiednio metalem przejściowym i niemetalem w skorupie ziemskiej (pomijając tlen, który też jest obecny w tych wszystkich materiałach katodowych).

# MATERIAŁY KATODOWE

Gęstości energii w różnych typach materiałów:



R. Pitchai, V. Thavasi, S.G. Mhaisalkar, S.Ramakrishna, J. Mater. Chem. 21 (2011) 11040.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



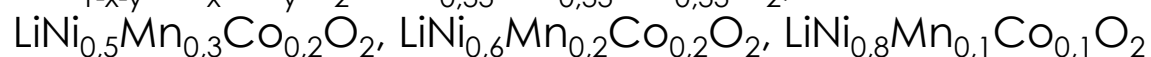
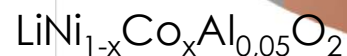
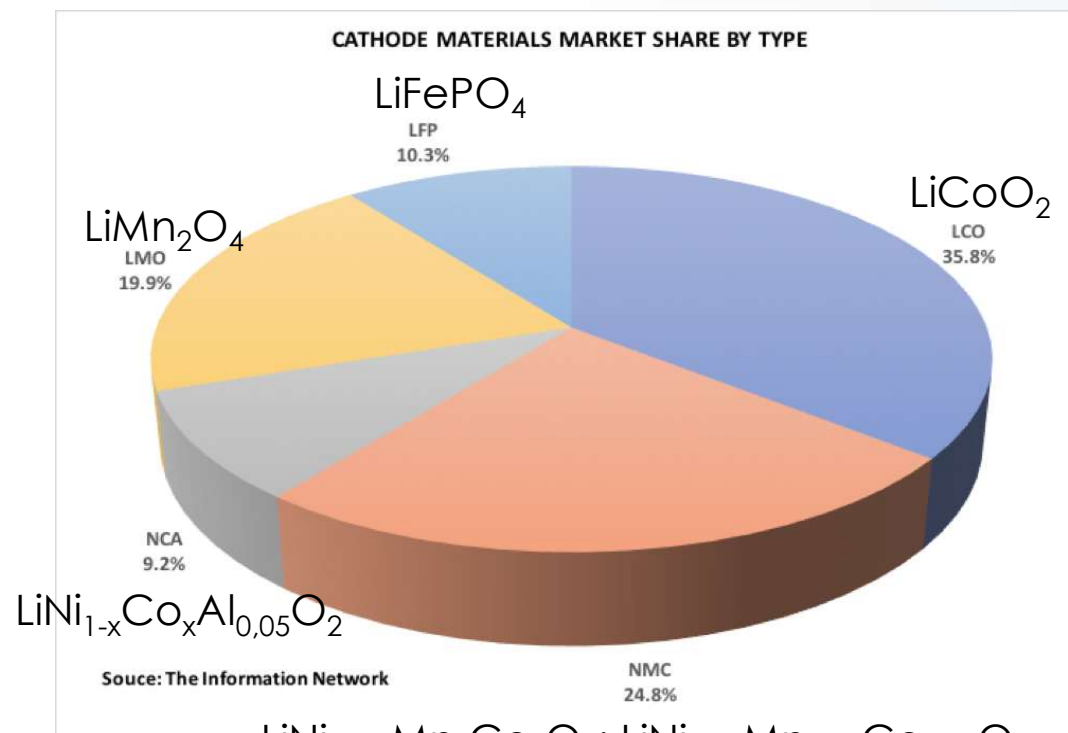
Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# MATERIAŁY KATODOWE

Użycie materiałów katodowych w ogniwach litowo-jonowych w 2017-2018 roku:



ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI

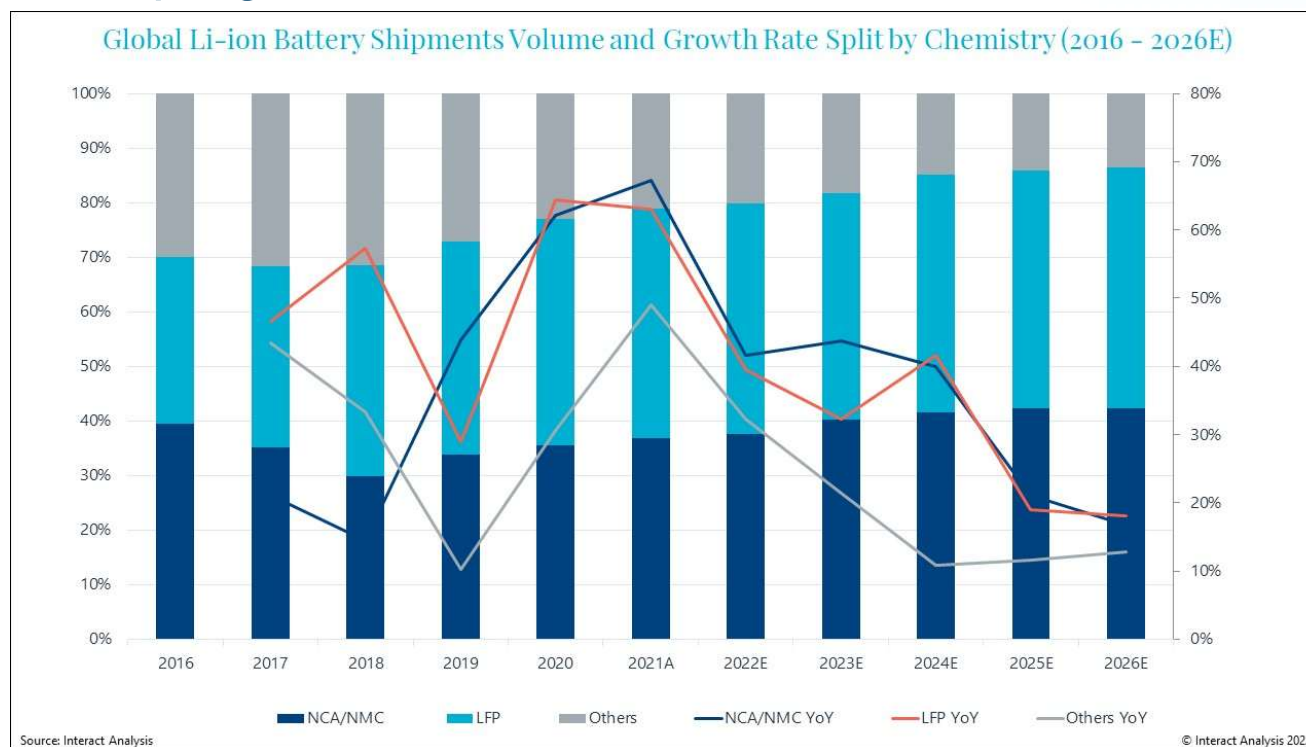


Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# MATERIAŁY KATODOWE

Użycie materiałów katodowych w ogniwach litowo-jonowych w 2016-2021 roku i prognoza:



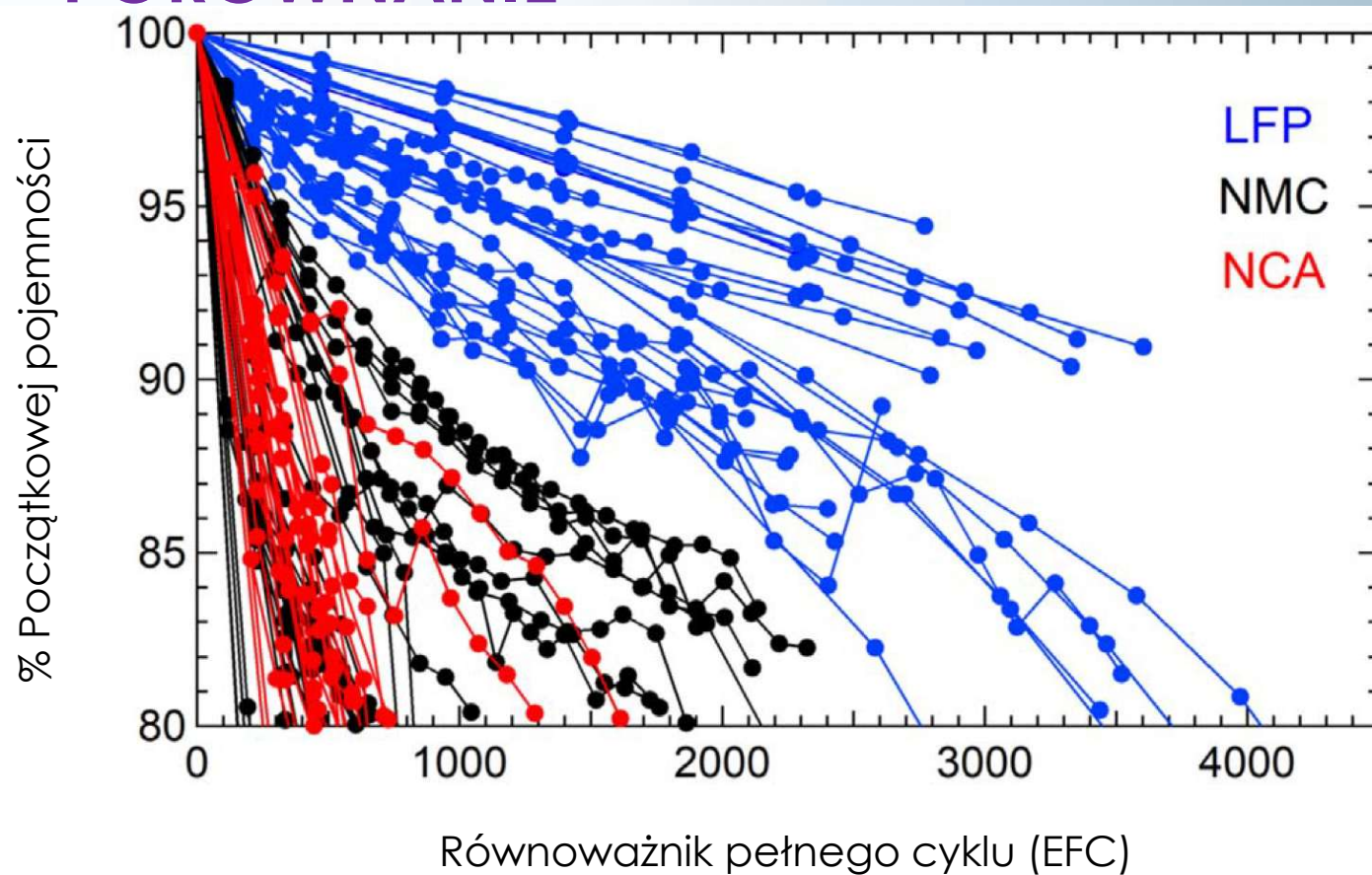
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY – PORÓWNANIE



Y. Preger, H. M. Barkholtz, A. Fresquez, D.L. Campbell, W. Juba, J. Romàn-Kustas, S.R. Ferreira, B. Chalamala, J. Electrochem. Soc. 167 (2020) 120532.

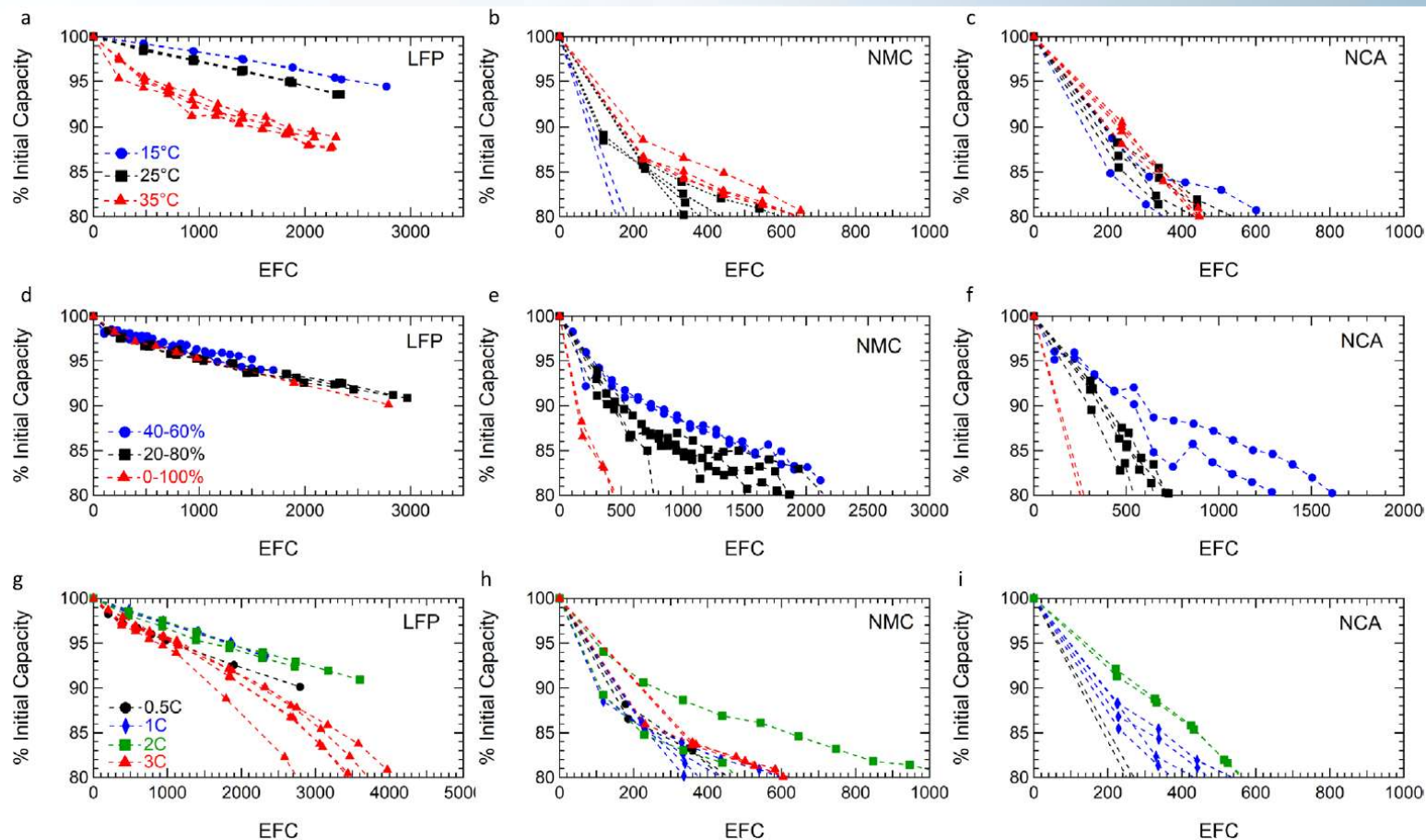
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY – PORÓWNANIE



Y. Preger, H. M. Barkholtz, A. Fresquez, D.L. Campbell,

W. Juba, J. Romàn-Kustas, S.R. Ferreira, B. Chalamala, J. Electrochem. Soc. 167 (2020) 120532.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KATODY – PORÓWNANIE

| Katoda                                                                      | struktura      | E / V | d / g cm <sup>-3</sup> | gęstość Q / mAh/g | gęstość E / Wh/kg | max C | życie / cykle | bezpieczeństwo |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|------------------------|-------------------|-------------------|-------|---------------|----------------|
| LiCoO <sub>2</sub>                                                          | warstwowa (2D) | 3,9   | 5,1                    | 150               | 585               | 1     | 700           | średnie        |
| LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                            | spinel (3D)    | 3,8   | 4,3                    | 110               | 420               | 10    | 600           | średnie        |
| LiFePO <sub>4</sub>                                                         | oliwin (1D)    | 3,45  | 3,6                    | 160               | 550               | 1     | 3000          | wysokie        |
| Li(Ni <sub>0,33</sub> Mn <sub>0,33</sub> Co <sub>0,33</sub> )O <sub>2</sub> | warstwowa (2D) | 3,7   | 4,7                    | 160               | 590               | 2     | 1000          | średnie        |
| Li(Ni <sub>0,5</sub> Mn <sub>0,3</sub> Co <sub>0,2</sub> )O <sub>2</sub>    | warstwowa (2D) | 3,7   | 4,6                    | 165               | 610               | 5     | 1000          | średnie        |
| Li(Ni <sub>0,6</sub> Mn <sub>0,2</sub> Co <sub>0,2</sub> )O <sub>2</sub>    | warstwowa (2D) | 3,7   | 4,5                    | 170               | 630               | 5     | 800           | średnie        |
| Li(Ni <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,1</sub> Co <sub>0,1</sub> )O <sub>2</sub>    | warstwowa (2D) | 3,7   | 4,4                    | 190               | 700               | 2     | 800           | średnie        |
| Li(Ni <sub>0,8</sub> Co <sub>0,15</sub> Al <sub>0,05</sub> )O <sub>2</sub>  | warstwowa (2D) | 3,7   | 4,7                    | 180               | 665               | 1     | 600           | średnie        |

# Ogniwa Li-ion – elektrolity

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# ELEKTROLITY DO OGNIW LITOWO-JONOWYCH

Elektrolit ma za zadanie przekazywanie kationów litu od anody do katody i odwrotnie oraz nie może przewodzić elektronowo.

W całkowitym koszcie komponentów ogniwa, zależnie od wielkości ogniwa, udział elektrolitu to między 5 a 15%. Około 2/3 tego to cena soli.



# ELEKTROLITY DO OGNIW LITOWO-JONOWYCH

Parametry ogniwa wynikające z parametrów elektrolitu (tylko, między innymi albo pośrednio):

- Gęstość prądu (przewodnictwo);
- Temperatura działania i przechowywania (stabilność termiczna);
- Wydajność cyklu ładowania-rozładowania (liczba przenoszenia kationu, przewodnictwo);
- Gęstość energii (stabilność elektrochemiczna i kompatybilność pozwalająca na użycie lepszych anod i katod);
- Bezpieczeństwo i przyjazność środowisku (stabilność, toksyczność);
- Cena (cena).

# ELEKTROLITY DO OGNIW LITOWO-JONOWYCH

Jakie właściwości powinien mieć elektrolit Li-ion:

- Dobre przewodnictwo jonowe ( $>1 \text{ mS cm}^{-1}$ );
- Brak przewodnictwa elektronowego;
- Wysoka liczba przenoszenia kationu litu ( $>0,3$ );
- Stabilność termiczna (w zakresie  $-20 - +150^{\circ}\text{C}$ );
- Stabilność elektrochemiczna (2-4,5 V vs Li);
- Kompatybilność z pozostałymi elementami ogniwa (w zakresie temperatur i potencjałów w ogniwie);
- Nietoksyczność;
- Niska cena.

# TYPY ELEKTROLITÓW

- Ciekłe
- Żelowe
- Ciekłe polimerowe (oligomerowe)
- Stałe Polimerowe (SPE)
- Ceramiczne
- Kompozytowe (np. żelowe z dodatkiem ceramiki)
- Polianionowe
- Ciecze jonowe
- Inne...

# ROZPUSZCZALNIKI/MATRYCE

- Węglany (PC, EC, DMC, DEC, EMC, VC, FEC)
  - Oligomery (głównie PEG)
  - Zaniechane: AN, GBL, THF, 2-MeTHF, EA.
- 
- Matryce polimerowe: PEO (do stałych), PVdF (do żelowych)
  - W praktyce zaniechane: PAN, PMMA, itd.

# JAKIE ROZPUSTCZALNIKI SĄ PREFEROWANE (LISTA ŻYCZEŃ)

- Niska lepkość;
- Niska temperatura topnienia;
- Wysoka temperatura wrzenia/rozkładu;
- Wysoka stała dielektryczna;
- Liczba akceptorowa-liczba donorowa;
- Niska prężność par (albo ich brak);
- Brak wiązań łatwych do zerwania w utleniających albo redukujących warunkach (szeroka stabilność elektrochemiczna);
- Tanie;
- Nietoksyczne;

# Dlaczego mieszaniny?

| Rozpuszczalnik | Zalety ( $\eta$ / mPa s, $T$ / °C)                | Wady                                                                      |
|----------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| EC             | wysoka $\epsilon$ , wysoka $T_{wrz}$ (+248), tani | wysoka $T_{top}$ (+36), wysoka $\eta$ (1,9)                               |
| PC             | wysoka $\epsilon$ , wysoka $T_{wrz}$ (+242), tani | eksfoliacja grafitu, wysoka $\eta$ (2,5)                                  |
| DME            | bardzo niska $\eta$ (0,45), niska $T_{top}$ (-58) | niestabilna SEI                                                           |
| DMC            | niska $\eta$ (0,58), tani                         | niska $\epsilon$ (3,1), niska $T_{wrz}$ (+91),<br>wysoka $T_{top}$ (+4,6) |
| DEC            | niska $\eta$ (0,75), niska $T_{top}$ (-74)        | niska $\epsilon$ (2,8), drogi                                             |
| EMC            | niska $\eta$ (0,64), niska $T_{top}$ (-53)        | niska $\epsilon$ (2,9), drogi                                             |

# Dlaczego mieszaniny?

| Rozpuszczalnik | Zalety ( $\eta$ / mPa s, $T$ / °C)                                                 | Wady                                                                      |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| EC             | wysoka $\epsilon$ , wysoka $T_{wrz}$ (+248), tani                                  | wysoka $T_{top}$ (+36), wysoka $\eta$ (1,9)                               |
| PC             | <del>wysoka <math>\epsilon</math>, wysoka <math>T_{wrz}</math> (+242), tani</del>  | <del>eksfoliacja grafitu, wysoka <math>\eta</math> (2,5)</del>            |
| DME            | <del>bardzo niska <math>\eta</math> (0,45), niska <math>T_{top}</math> (-58)</del> | <del>niestabilna SEI</del>                                                |
| DMC            | niska $\eta$ (0,58), tani                                                          | niska $\epsilon$ (3,1), niska $T_{wrz}$ (+91),<br>wysoka $T_{top}$ (+4,6) |
| DEC            | niska $\eta$ (0,75), niska $T_{top}$ (-74)                                         | niska $\epsilon$ (2,8), drogi                                             |
| EMC            | niska $\eta$ (0,64), niska $T_{top}$ (-53)                                         | niska $\epsilon$ (2,9), drogi                                             |

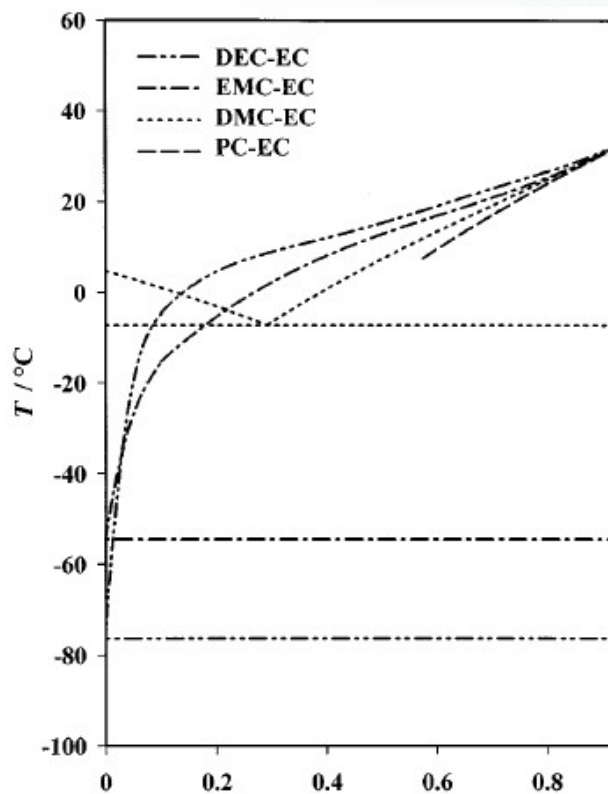


# Dlaczego mieszaniny?

Używane w praktyce mieszaniny od najczęściej używanych (w nawiasie podane typowe stosunki mieszania):

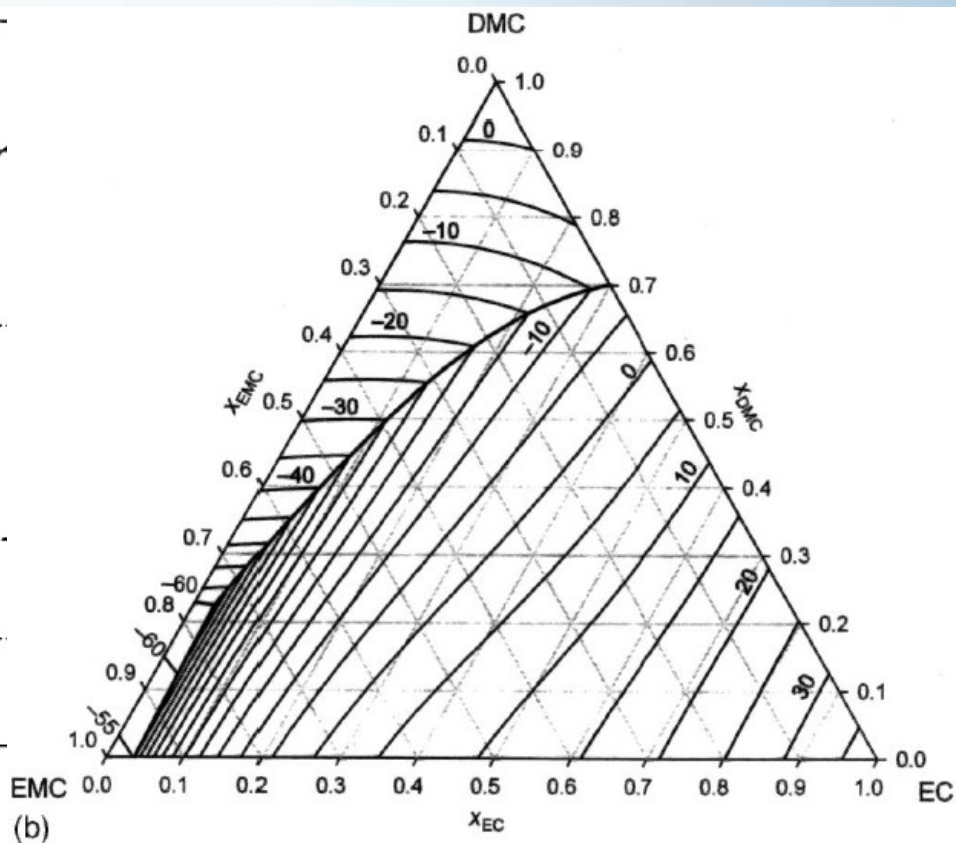
- **EC:DMC** (1:1, 3:7, 1:2)
- **EC:DEC** (3:7, 1:2)
- **EC:DEC:DMC** (1:1:1)
- **EC:EMC** (droższe urządzenia, 1:2)
- **EC:DMC:EMC** (zastosowania niskotemperaturowe, 1:1:1)
- **EC:DEC:DMC:EMC** (zastosowania niskotemperaturowe, 1:1:1:2)
- **EC:PC** (PC może być używane w obecności dużej zawartości bardziej polarnego EC, który tworzy otoczkę solwacyjną litu)
- **EC:PC:DMC** (1:1:2, 1:1:1)
- **EC:DMC:DME** (1:2:0.125), itd.

# Dlaczego mieszaniny?



Ułamek molowy EC

M.S. Ding, K. Xu, S. Zhang, T.R. Jow,  
*J. Electrochem. Soc.* 148 (2001) A299.



M.S. Ding, *J. Electrochem. Soc.* 151 (2004) A731.

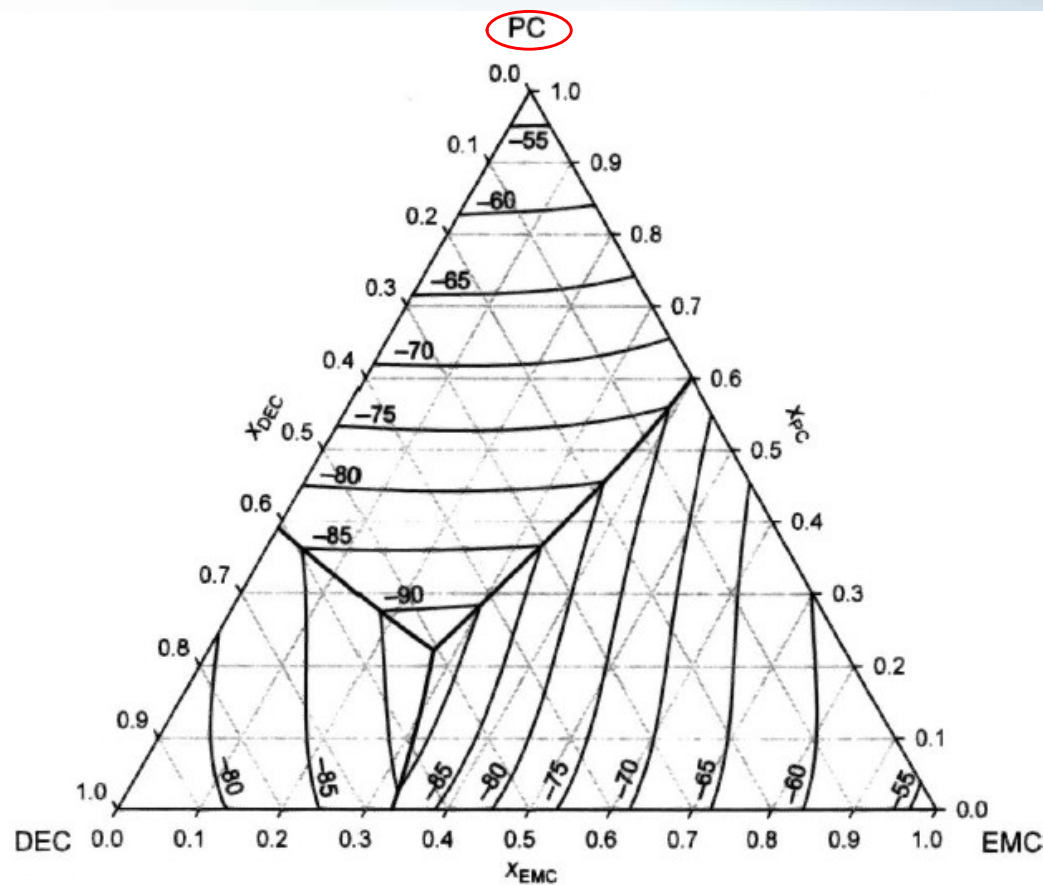
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
 Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# Dlaczego mieszanki?



M.S. Ding, J. Electrochem. Soc. 151 (2004) A731.

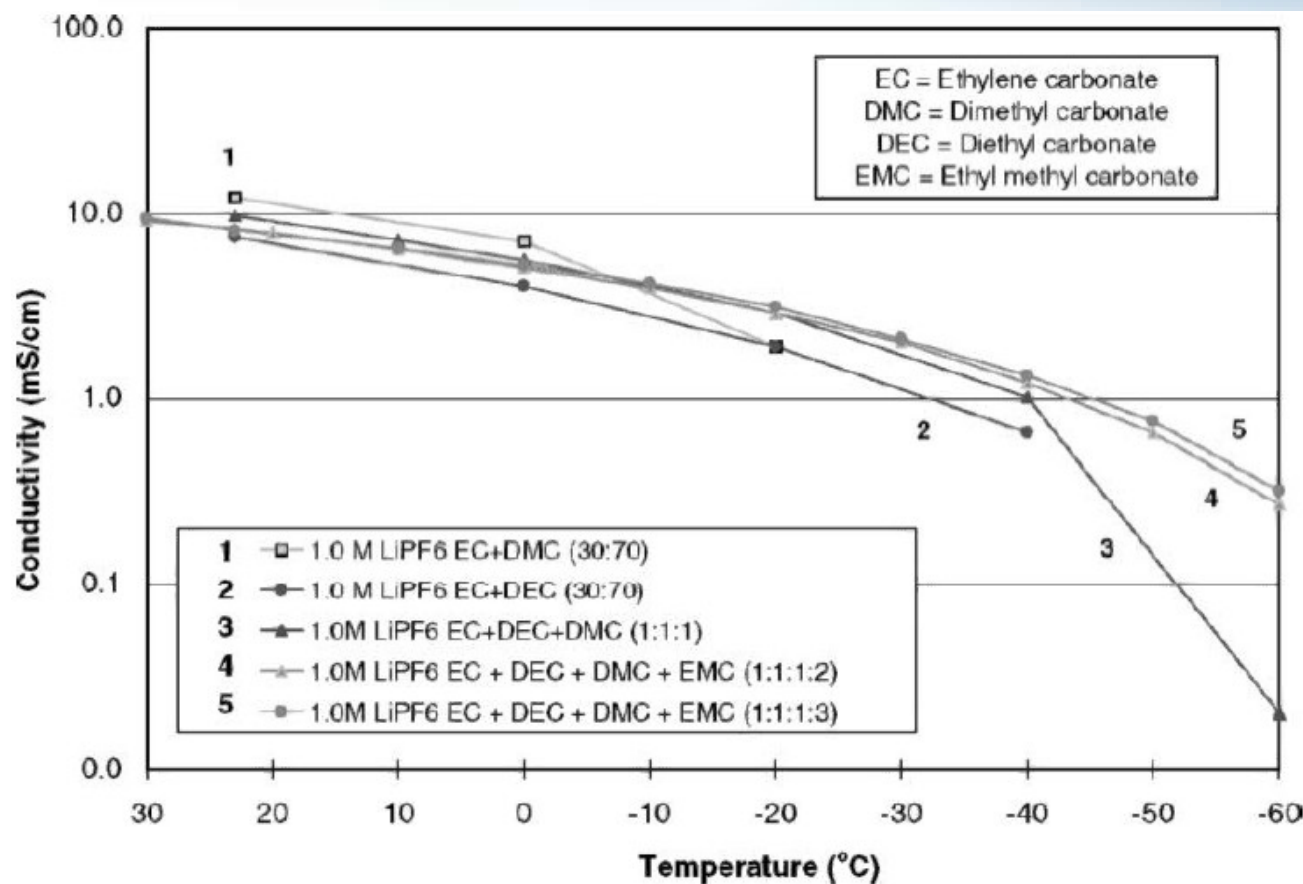
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# Dlaczego mieszanki? Wpływ soli



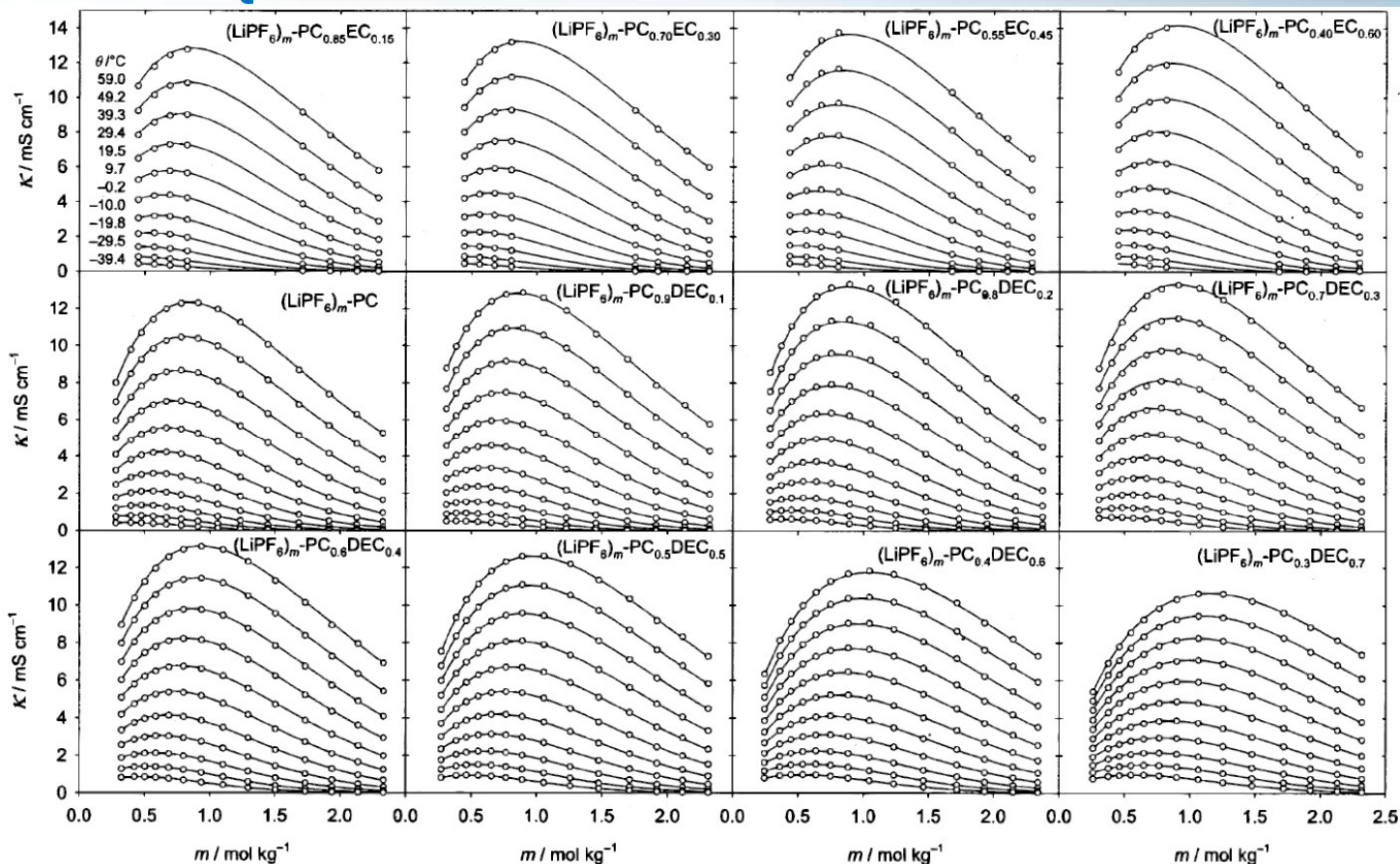
M.C. Smart, B.V. Ratnakumar, L.D. Whitcanack, K.B. Chin, S. Surampudi, H. Croft, D. Tice, R. Staniewicz, *J. Power Sources* 119-121 (2003) 349.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# Wpływ soli - stężenie



M.S. Ding, T.R. Jow, *J. Electrochem. Soc.* 150 (2003) A620.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**

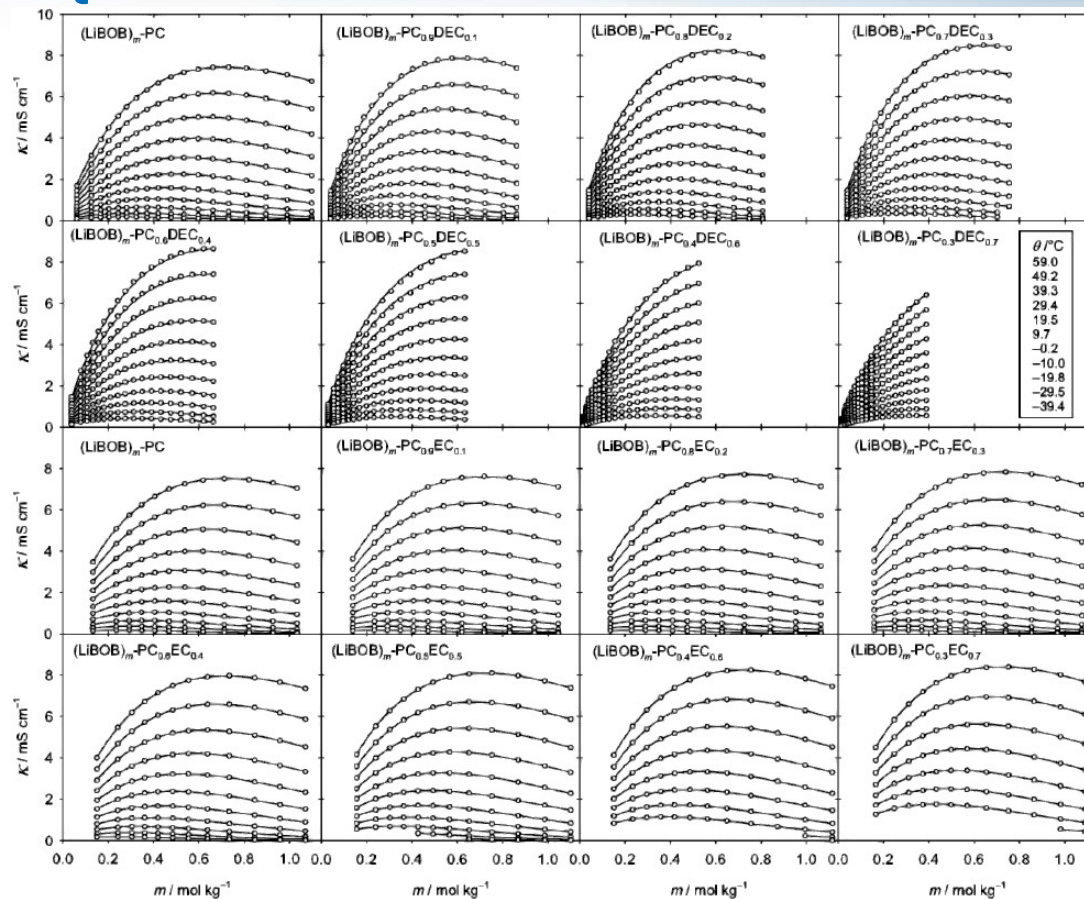


Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# Wpływ soli - stężenie



M.S. Ding, K. Xu, T.R. Jow, *J. Electrochem. Soc.* 152 (2005) A132.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

## DODATKI - STOSOWANE WG POTRZEB

- Zwiększające przewodnictwo (np. DME <10%, ceramiczne – w formie zawiesiny; rzadko stosowane);
- Zwiększające liczbę przenoszenia kationu (np. kaliksareny - pułapki anionowe; w praktyce nie stosowane);
- Zwiększające stabilność elektrochemiczną, chemiczną lub stabilizujące warstwę międzyfazową (SEI) (VC 1-3%, FEC 5-15%);
- Zmniejszające palność (TFP >10%);
- Usuwające wilgoć (sorbenty);
- Usuwające gazy, głównie CO<sub>2</sub> (sorbenty).
- **Obecność dowolnego dodatku wpływa na inne parametry elektrolitu!**



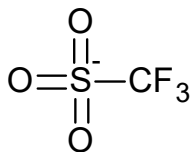
# SOLE

Proponowane na przestrzeni lat sole:

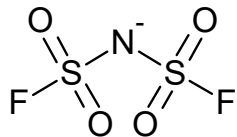
- $\text{LiClO}_4$  - wybuchowe w wyższej temperaturze;
- $\text{LiBF}_4$  (tworzy  $\text{LiF}$ , niestabilną i rosnącą SEI);
- $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiAsF}_6$ ,  $\text{LiSbF}_6$  - toksyczne, niestabilne;
- $\text{LiTf}$ ,  $\text{LiFSI}$ ,  $\text{LiTFSI}$ ,  $\text{LiBETI}$  – korozja aluminium, drogie;
- $\text{LiBOB}$ ,  $\text{LiDFOB}$ ,  $\text{LiPF}_4(\text{C}_2\text{O}_4)$  – tworzą niestabilną SEI;
- $\text{LiTFSM}$ ,  $\text{LiTFAB}$  – drogie w produkcji;
- Rodzina soli imidazolowych- $\text{BF}_3$  – niskie przewodnictwo;
- Rodzina soli aluminium – niskie przewodnictwo i niestabilne przy wymaganych potencjałach;
- Rodzina soli azolowych (np. TDI).

# SOLE

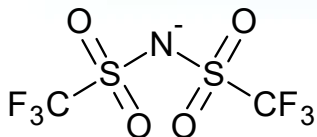
LiTf



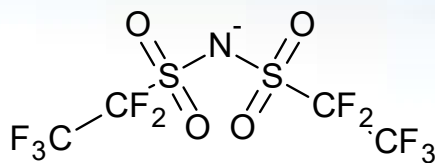
# LiFSI



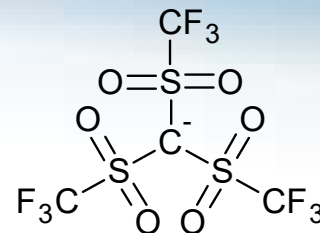
# LiTFSI



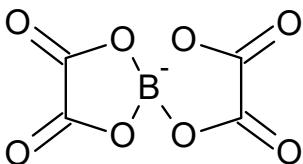
# LIBETI



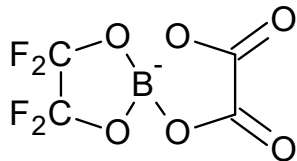
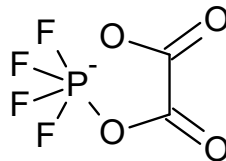
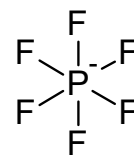
# LiTFSM



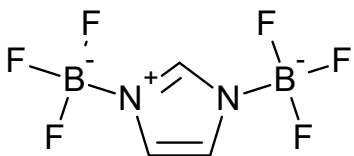
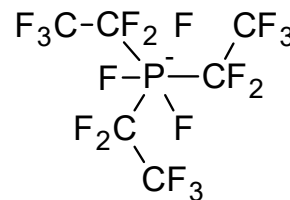
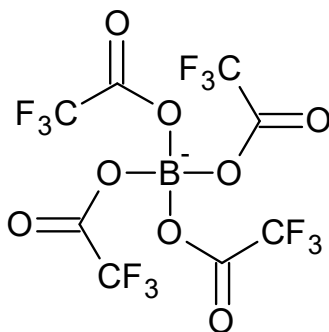
# LiBOB



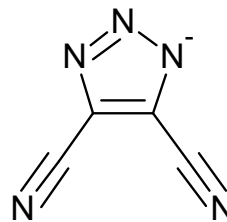
# LIDFOB


$$\text{LiPF}_4(\text{C}_2\text{O}_4)$$

$$\text{LiPF}_6$$


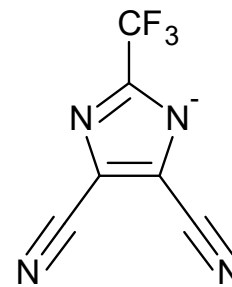
LiFAP


$$\text{LiIm}(\text{BF}_3)_2$$


# LITFAB



# LiDCTA



# LITDI

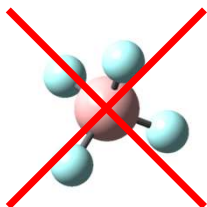
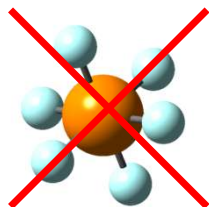
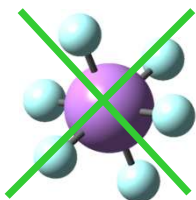
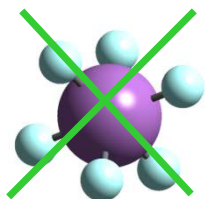
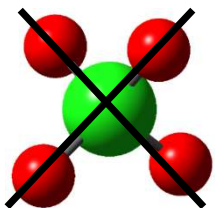
# ELEKTROMOBILNOŚĆ

## DLA NAUCZYCIELI

Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

## ALE NIE TE SOLE...



-  $\text{ClO}_4^-$  – wybuchowe zwłaszcza w styczności z metalami przejściowymi (katody);

-  $\text{AsF}_6^-$  i  $\text{SbF}_6^-$  – są toksyczne;

-  $\text{PF}_6^-$  i  $\text{BF}_4^-$  – łatwo rozpadają się;



$\text{PF}_6^-$  rozkłada się w obecności choćby śladów (1/1 000 000) wody lub kwasu:



- LiTf, LiFSI, LiTFSI i LiBETI – korodują aluminium (kolektory prądu);

## ALE NIE TE SOLE...

$\text{LiPF}_6$  jest póki co dominującą solą na rynku bateryjnym mimo znanych wad (stąd na przestrzeni lat zaproponowano dziesiątki zamienników):

- Rozkład do toksycznych, żrących i rakotwórczych związków (np.  $\text{HF}$ ,  $\text{POF}_3$ ) po zetknięciu nawet ze śladami wody (nawet 1 ppm, a więc z każdym rozpuszczalnikiem, które standardowo zawierają do 30 ppm) – dlatego nie wolno otwierać ogniw Li-ion;
- Rozkład termiczny już od  $70^\circ\text{C}$  (stąd ostrzeżenia żeby nie wystawiać baterii na słońce i nie podgrzewać ponad  $60^\circ\text{C}$ );
- Brak kompatybilności z nowymi generacjami elektrod (zarówno anod – krzem, jak i katod – krzemiany);
- Niska wydajność cyklu (jednym z powodów niska  $T_{\text{Li}^+} \approx 0,3$ );

# SOLE W PRAKTYCE

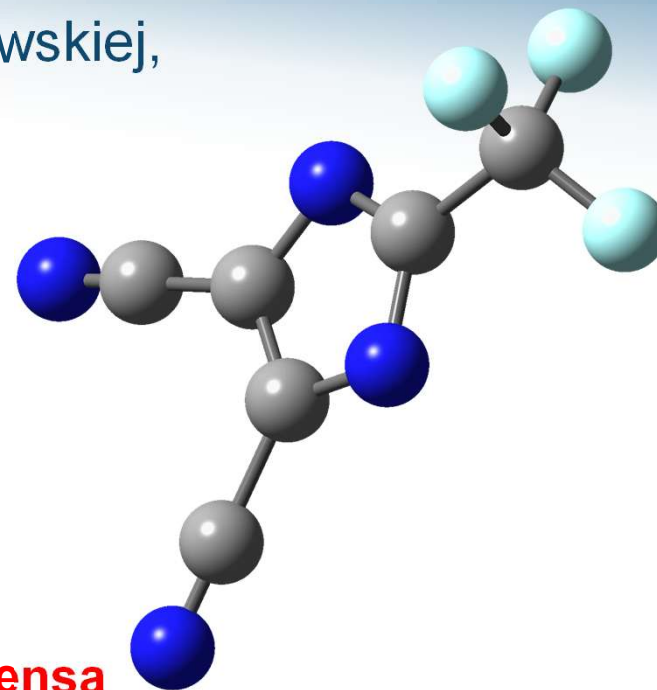
- $\text{LiPF}_6$  jest używany niemal we wszystkich komercyjnie dostępnych ogniwach Li-ion (we wszystkich urządzeniach na rynku konsumenckim);
- Od 2018 roku w wielu ogniwach do zastosowań w droższej elektronice i samochodach elektrycznych zaczęto stosować drugą w historii przemysłu sól –  $\text{LiTDI}$  - jako główną sól lub jako drugą sól (20-66% zawartości  $\text{LiPF}_6$ );
- $\text{LiBF}_4$  jest często używany w ogniwach litowych jednorazowych, ale w acetonitrylu, PC lub GBL z racji niskiej ceny, braku wymagań takich jak dla Li-ion i braku metali przejściowych w ogniwie;

# SÓL LITDI – PRODUKT POLSKI

Sól wytworzony i opracowana na Politechnice Warszawskiej, druga sól w 30-letniej historii ogniw Li-ion, pierwsza w Europie. Opatentowana w 2008 roku, produkt współpracy Europejskiego Instytutu Naukowego ALISTORE. Szeroka współpraca jak przy każdym większym współczesnym wynalazku:

Politechnika Warszawska,  
Uniwersytet Pikardyjski im. Juliusza Verne'a (Francja),  
Uniwersytet Rzymski La Sapienza (Włochy),  
Uniwersytet w Uppsali (Szwecja).

Wdrożenie w latach 2010-2018  
przez francuską firmę Arkema.



- **Nagroda Siemens**
- **Nagroda naukowa Premiera RP**
- **Nagroda Rektora PW**
- **Nagroda naukowa im. Ignacego Mościckiego**

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# SÓL LITDI

LiTDI:

- jest stabilna do 256°C; jest stabilna do 4,7 V względem litu i nie koroduje aluminium;
- jest stabilna względem wody;
- nie wymaga dodatków zwiększających stabilność ani sorbentów kwasów/wilgoci;
- posiada wyższe liczby przenoszenia (ponad 0,5) i to samo efektywne przewodnictwo (kationów litowych);
- jest kompatybilna z nowymi materiałami elektrodowymi;
- nie jest tak toksyczna jak  $\text{LiPF}_6$  i nie rozkłada się do toksycznych związków (ale uwaga na oczy);

Jest to pierwsza od 30 lat sól spełniająca wszystkie wymagania przemysłu.



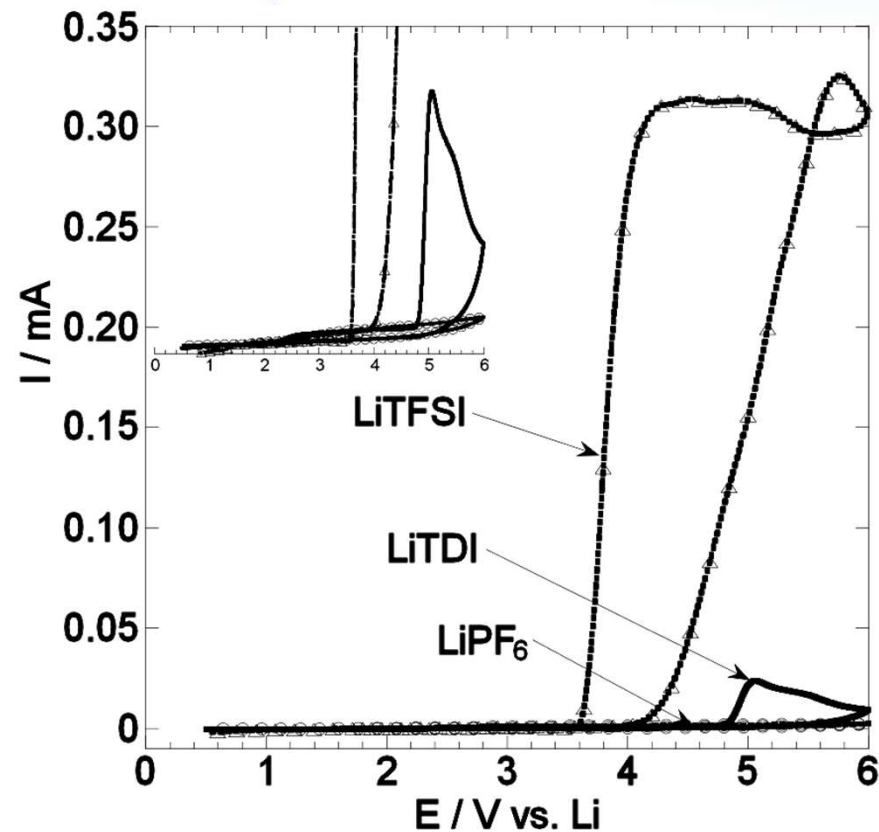
# SÓL LiTDI

Dodatkowo sól LiTDI przez swoją właściwość trwałego kompleksowania wody (bez strat funkcjonalności soli) wyciąga wilgoć z reszty ogniwa dosuszając je i wydłużając jego życie, np. minimalizując korozję materiału katodowego.

Przez to LiTDI używane jest także jako dodatek do standardowych elektrolitów, który wydłuża życie ogniwa nawet o 2-3 razy.

Wydłuża także znacznie życie ogniw zwłaszcza w wyższych temperaturach, w których standardowe elektrolity oparte na  $\text{LiPF}_6$  bardzo szybko przestają działać. Przykładowo, w  $45^\circ\text{C}$  (tyle ile ma telefon w czasie szybkiego ładowania albo w czasie gry w grę z dobrą grafiką 3D) ogniwo z  $\text{LiPF}_6$  żyje do 200 cykli, a z LiTDI bez problemu ponad 1000, lub jeśli LiTDI jest dodatkiem do  $\text{LiPF}_6$ , to do 600-700 cykli.

# STABILNOŚĆ ELEKTROCHEMICZNA WOBEC ALUMINIUM LITDI I $\text{LiPF}_6$



L. Niedzicki, G.Z. Zukowska, M. Bukowska, P. Szczecinski, S. Grugeon, S. Laruelle, M. Armand, S. Panero, B. Scrosati, M. Marcinek, W. Wieczorek, *Electrochim. Acta* 55 (2010) 1450.

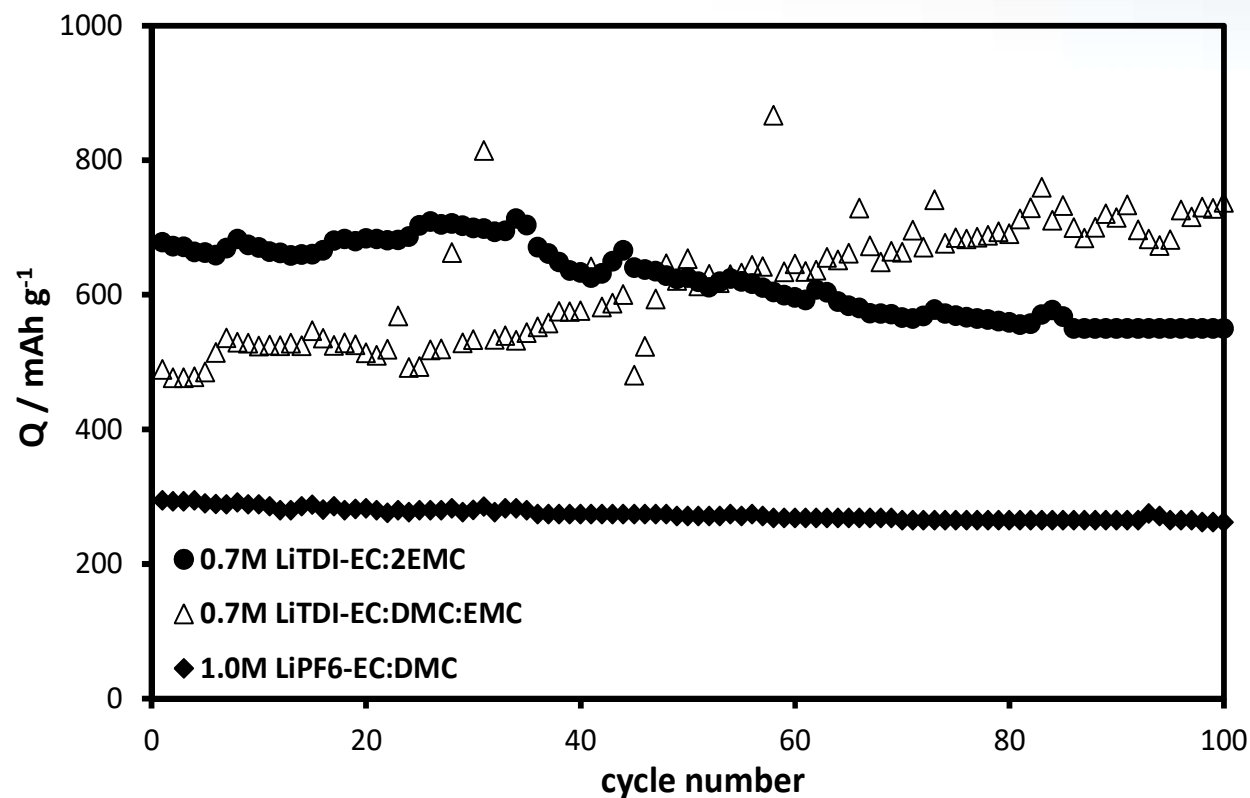
ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# STABILNOŚĆ LiTfDI I LiPF<sub>6</sub> W CYKLOWANIU Z MATERIAŁAMI ANODOWYMI – C/Si



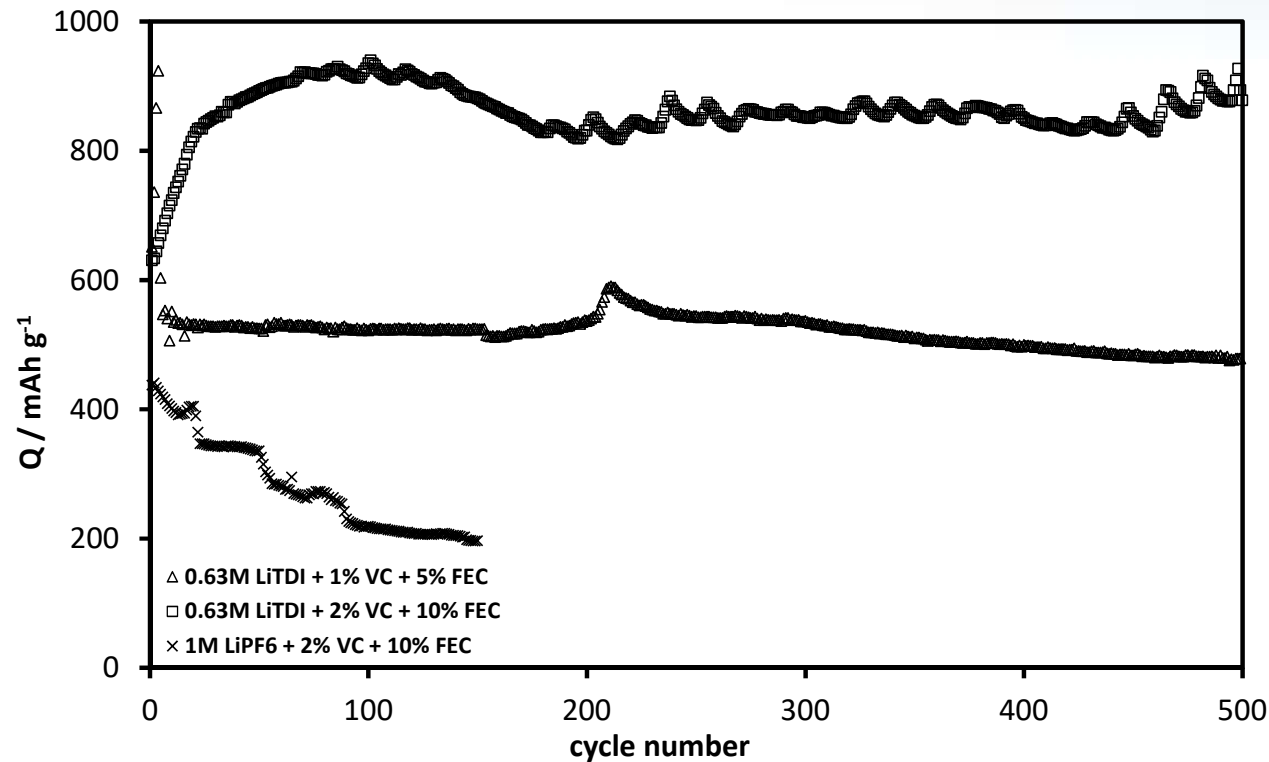
L. Niedzicki, B. Brzozowski, P. Wiecek, *Electrochim. Acta* 174 (2015) 625.

ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI



Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# STABILNOŚĆ LiTDI I LiPF<sub>6</sub> W CYKLOWANIU Z MATERIAŁAMI ANODOWYMI – C/SI



L. Niedzicki, B. Brzozowski, P. Wiecek, *Electrochim. Acta* 174 (2015) 625.

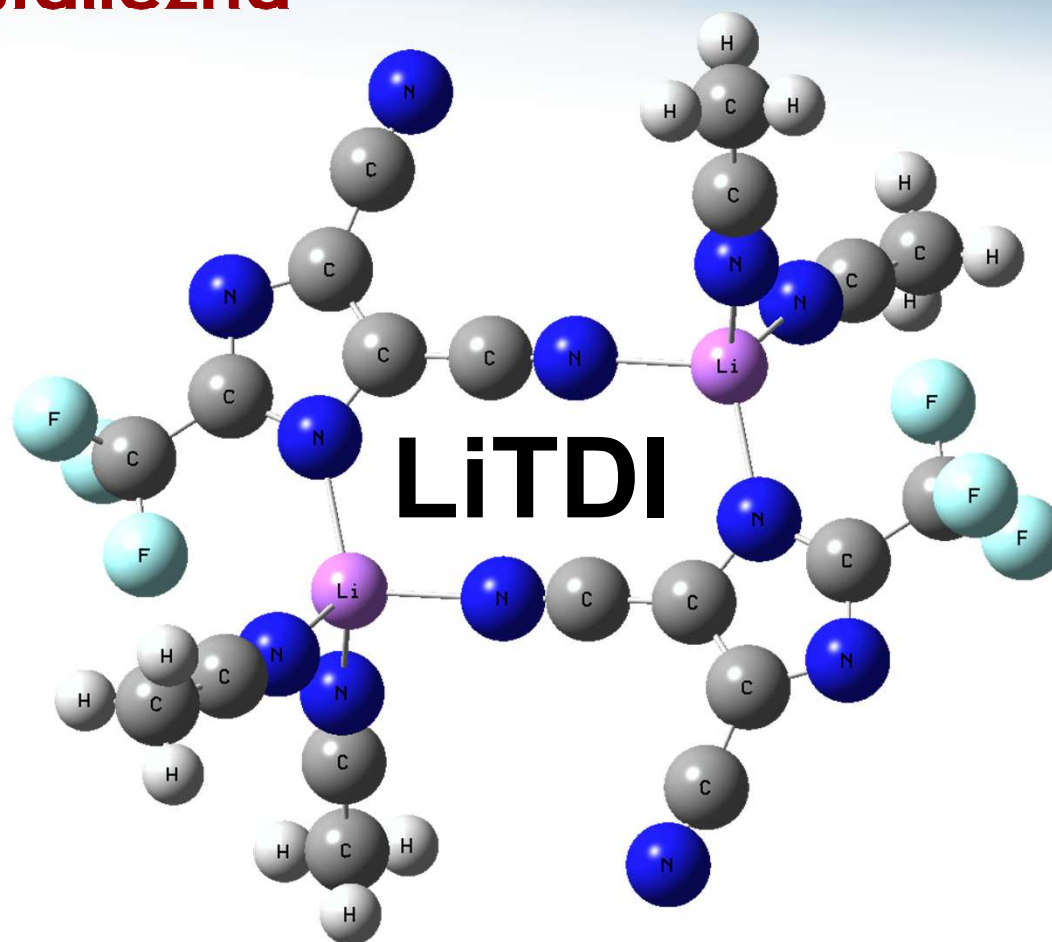
**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# Struktura krystaliczna



**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



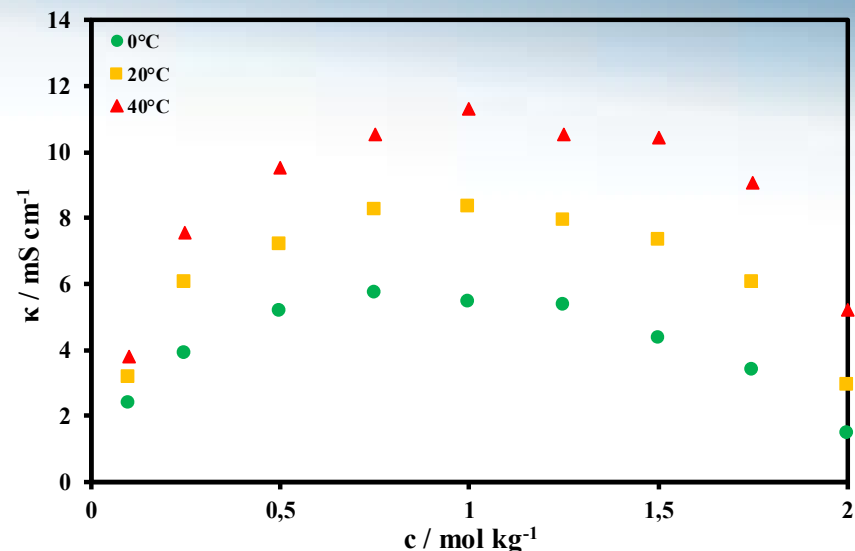
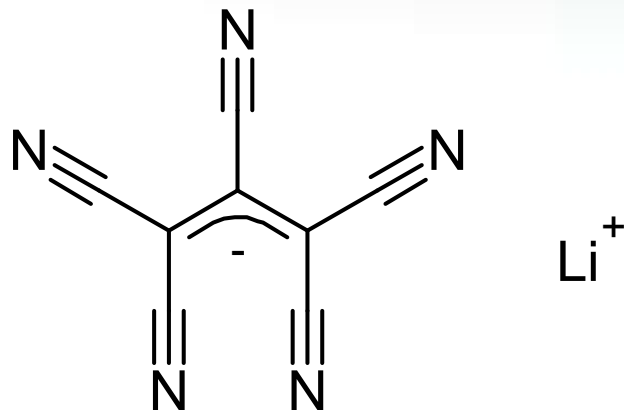
Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# LITDI W MIESZANINACH BATERYJNYCH

| mieszanina                                      | $\sigma$ / mS cm <sup>-1</sup> | T <sub>Li+</sub> | $\sigma_{Li+}$ / mS cm <sup>-1</sup> |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| 0,3 mol/kg LiTDI w EC:DEC:DMC (1:1:1)           | 5,52                           | 0,333            | 1,84                                 |
| 0,7 mol/kg LiTDI w EC:DEC:DMC (1:1:1)           | 4,96                           | 0,497            | 2,47                                 |
| 0,4 mol/kg LiTDI w EC:DEC (1:2)                 | 3,24                           | 0,601            | 1,95                                 |
| 0,7 mol/kg LiTDI w EC:DEC (1:2)                 | 3,51                           | 0,563            | 1,98                                 |
| 0,31 mol/kg LiTDI w EC:DMC (1:2)                | 5,09                           | 0,622            | 3,17                                 |
| 0,63 mol/kg LiTDI w EC:DMC (1:2)                | 5,70                           | 0,553            | 3,15                                 |
| 0,3 mol/kg LiTDI w EC:DEC:DME (8:16:1)          | 4,07                           | 0,614            | 2,50                                 |
| 0,5 mol/kg LiTDI w EC:DEC:DME (8:16:1)          | 4,35                           | 0,850            | 3,69                                 |
| 1,2 mol/kg LiTDI w EC:DEC:DME (8:16:1)          | 3,74                           | 0,666            | 2,49                                 |
| 0,4 mol/kg LiTDI w EC:DMC:DME (8:16:1)          | 6,17                           | 0,648            | 4,00                                 |
| 1 mol/kg LiTDI w EC:DMC:DME (8:16:1)            | 6,13                           | 0,731            | 4,48                                 |
| 1 mol/kg LiPF <sub>6</sub> w EC:DEC:DMC (1:1:1) | 10,08                          | 0,244            | 2,46                                 |
| 1 mol/kg LiPF <sub>6</sub> w EC:DMC (1:2)       | 10,15                          | 0,350            | 3,55                                 |

# SÓL BEZFLUOROWA - LiPCP



L. Niedzicki *et al.*, patent PL 232856

- Bezfluorowa (pierwsza w historii)
- LiPCP w EC:DMC (1:2):
  - wysokie przewodnictwo -  $\sigma > 8 \text{ mS cm}^{-1}$
  - wysoka  $t_{\text{Li}^+} > 0,5$
  - stabilność elektrochemiczna do **4,4 V vs Li** (nie koroduje aluminium)
  - stabilność termiczna do **280°C**

ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI



Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# ELEKTROLITY STAŁE

Elektrolity stałe, a konkretnie stałe elektrolity polimerowe (SPE) to materiały przewodzące jonowo projektowane tak, by zastąpić elektrolity ciekłe. SPE (oparte na PEO) mają przewagę nad ciekłymi w zakresie bezpieczeństwa:

- są niepalne (nie są lotne);
- buforują zmiany gęstości elektrod (są elastyczne);
- nie mogą wyciec w razie uszkodzenia ogniwa.

# ELEKTROLITY STAŁE

Stałe elektrolity polimerowe (oparte na PEO) niestety mają też wady względem elektrolitów ciekłych (i stąd w praktyce nie są jeszcze używane poza zastosowaniami wysokotemperaturowymi, chociaż uważane są za przyszłość branży bateryjnej z racji wysokich walorów bezpieczeństwa):

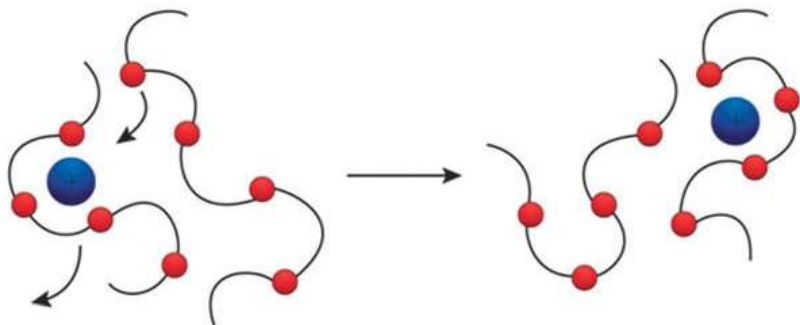
- przewodzą bardzo słabo (zwykle  $<0,1 \text{ mS cm}^{-1}$  w  $20^{\circ}\text{C}$ );
- mają bardzo złe parametry w niskich temperaturach ( $<40^{\circ}\text{C}$ , im niżej tym gorzej);
- mają bardzo kiepski kontakt z elektrodami (punktowy);
- niskie liczby przenoszenia kationu litu (zwykle  $<0,2$ );
- stabilność PEO (bez modyfikacji) tylko do ok. 4 V vs Li;
- niektóre potrafią reagować z litem metalicznym.

# ELEKTROLITY STAŁE

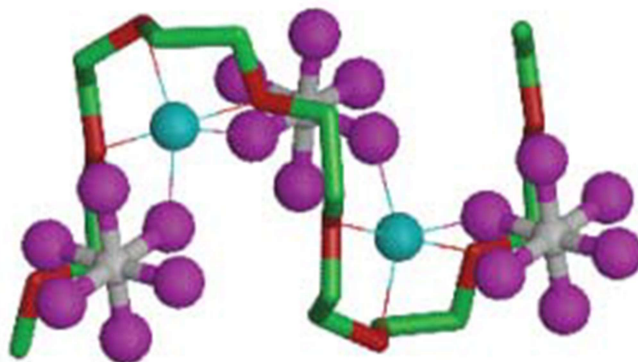
SPE najczęściej są oparte na PEO (poli(tlenek etylenu),  $(-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}-)_n$ ), jednak pozostawia to dość duże pole manewru. Po pierwsze polimer można kopolimeryzować (na etapie polimeryzacji można dodać mery innych polimerów), można rozgałęziać łańcuchy (w tym hiperrozgałęziać), można też dodawać plastyfikatorów, powodujących lepsze właściwości w niższych temperaturach i wyższe przewodnictwo. Stosuje się też dodatki ceramiczne, które zmniejszają stopień krystaliczności polimeru.

# ELEKTROLITY STAŁE

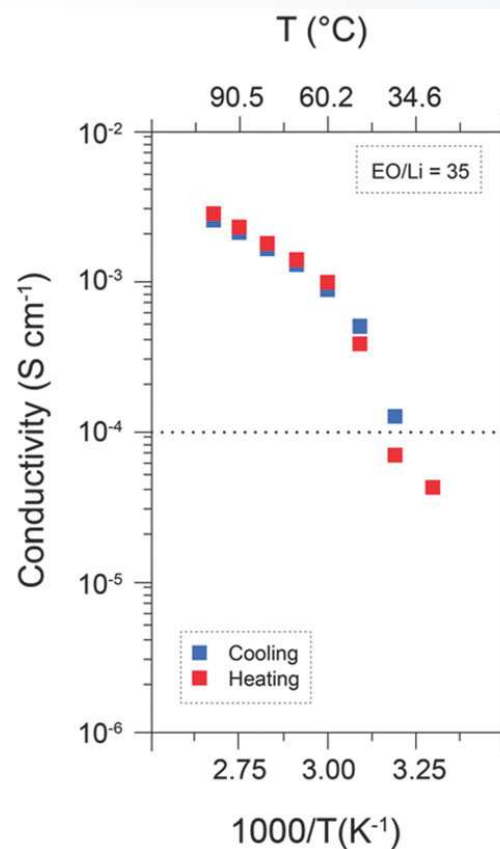
Mechanizm ruchu kationów litu w PEO:



D. Bresser, S. Passerini, B. Scrosati, Chem. Commun. 49 (2013) 10545.



P.G. Bruce, Dalton Trans. (2006) 1365.



**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ELEKTROLITY STAŁE

PEO przewodzi przede wszystkim w formie amorficznej. Kompleks Li-PEO formuje się w fazie amorficznej w stosunku umożliwiającym łatwy przeskok kationów litu wzdłuż łańcuchów i pomiędzy nimi, a także umożliwia ruch łańcuchom (odpowiedni stopień swobody). Niestety poniżej  $65^{\circ}\text{C}$  PEO krystalizuje i to w znacznym stopniu. W fazie krystalicznej również istnieje przewodnictwo jonowe (w krystalitach o stechiometrii Li:EO 1:6, w Li:EO 1:3 już nie, gdyż brak jest wolnych „miejs” w łańcuchu na przeskoki). Jest ono jednak dużo niższe, przez co przewodnictwo poniżej  $60^{\circ}\text{C}$  wyraźnie spada.

# ELEKTROLITY STAŁE

Dodatki zmniejszające stopień krystaliczności i/lub uniemożliwiające tworzenie krystalitów a także dobór soli i stosunku soli do polimeru umożliwia obniżenie temperatury, przy której dochodzi do dużej zmiany przewodnictwa. Niestety nie udaje się tej temperatury obniżyć wyraźnie poniżej 40°C, co umożliwiałoby stworzenie ogniw działających dobrze w temperaturze pokojowej lub niższych (inaczej wymagane są duże straty energii i gęstości energii na grzanie i izolację termiczną ogniw).

# ELEKTROLITY POLIANIONOWE

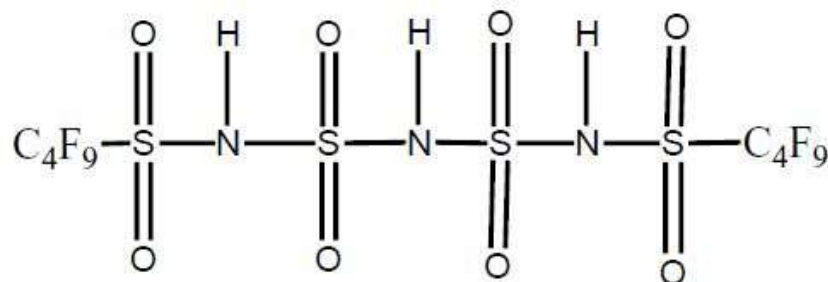
Podtyp stałych elektrolitów polimerowych. Polianiony są to polimery, które w każdym merze posiadają przynajmniej jedną grupę funkcyjną, która może dysocjować (np. grupa kwasowa) i utworzyć stabilną grupę anionową.

Do popularnych należały grupy  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{COOH}$ , ale także niektóre polimery z grupą amidową ( $-\text{C}(\text{O})\text{NH}-$ ). Osobną grupę stanowią polikwasy, np. fosforowe lub niedawno stworzone oligomery TFSI, typu  $\text{CF}_3-(\text{SO}_2\text{NH})_n\text{SO}_2\text{CF}_3$  lub polimer zawierający grupę  $(-\text{SO}_2\text{NH-SO}_2\text{CF}_3)$ .

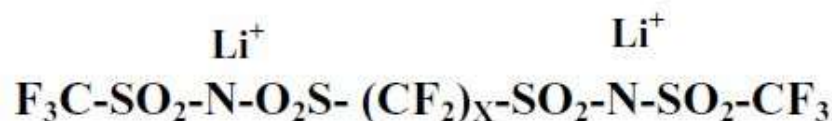


# ELEKTROLITY POLIANIONOWE

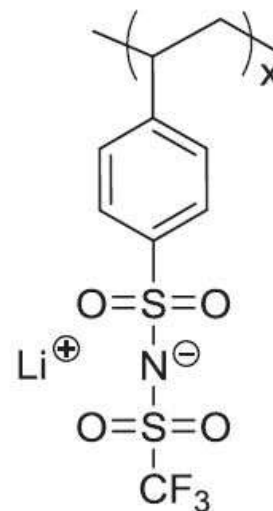
Polianiony mają przewodnictwo zbliżone do polimerowych, tzn. nie przekracza  $0,1 \text{ mS cm}^{-1}$  w temperaturze pokojowej. Niektóre mają bardzo wysokie liczby przenoszenia ( $T_+ > 0,9$ ), jednak kosztem przewodnictwa. Oligomery mają niskie  $T_+$  ( $< 0,2$ ).



J. Nie, X. Li, D. Liu, R. Luo, L. Wang, J. Fluor. Chem. 125 (2004) 27.



O.E. Geiculescu, Y. Xie, R. Rajagopal, S.E. Creager,  
D.D. DesMarteau, J. Fluor. Chem. 125 (2004) 1179.



S. Feng, D. Shi, F. Liu, L. Zheng, J. Nie,  
W. Feng, X. Huang, M. Armand, Z. Zhou,  
Electrochim. Acta 93 (2013) 254.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ELEKTROLITY ŻELOWE

Elektrolity żelowe są połączeniem koncepcji stałych elektrolitów polimerowych i elektrolitów ciekłych, przez co wnoszą zalety obu tych materiałów przy minimalizacji wpływu ich wad.

Do zalet należą:

- wysokie przewodnictwo (bliskie ciekłego, w porównaniu do faktycznego przewodnictwa ciekłych uwzględniając separator);
- wytrzymałość mechaniczna bliższa SPE;
- stabilność elektrochemiczna zbliżona do ciekłych (np.  $>4,5$  V vs Li);
- przy uszkodzeniu ogniwa nie wyciekają (siły kapilarne trzymają ciekły elektrolit w porach nawet przy dużym podciśnieniu).

# ELEKTROLITY ŻELOWE

Do wad elektrolitów żelowych należą:

- wysoki koszt produkcji;
- problemy z kontaktem z elektrodami (jak SPE);
- PVdF-HFP potrafi się rozkładać w obecności metalicznego litu;
- właściwości mechaniczne nie są na tym poziomie co właściwości SPE.

# ELEKTROLITY ŻELOWE

Elektrolity żelowe działają na zasadzie trzymania elektrolitu ciekłego w porach materiału, który może być elektrolitem stałym. PVdF-HFP posiada fazę krystaliczną, która odpowiada za utrzymanie właściwości mechanicznych elektrolitu (szkielet budowli). Faza amorficzna natomiast tworzy powierzchniowo z elektrolitem ciekłym rodzaj elektrolitu stałego, ale o przewodnictwie zbliżonym do ciekłego (ze względu na znaczny udział tego ostatniego).

# ELEKTROLITY ŻELOWE

Podstawowa metoda wytwarzania elektrolitów żelowych nazywana jest metodą Bellcore (od pierwszej firmy stosującej ją komercyjnie). Polimer (PVdF-HFP) rozpuszcza się w mieszaninie rozpuszczalników lotnego (zwykle aceton) i niskolotnego (zwykle DBF – ftalan dibutyłu) (ew. niemieszającego się z pierwszym, np. cykloheksan). Następnie odparowuje się lotny, a potem z prawie gotowej membrany ekstrahuje się (lub odparowanie w bardziej ostrych warunkach) niskolotny (np. za pomocą eteru dietylowego). Powstałe pory po drugim rozpuszczalniku to pory, które następnie nasiąkają elektrolitem ciekłym, którego nie da się już usunąć. Średnica porów jest wyraźnie mniejsza od 500 nm.

# ELEKTROLITY CERAMICZNE

Bazują nie na przewodnictwie zdysocjowanych soli, ale na ruchu defektów w strukturze krystalicznej/amorficznej o charakterze jonowym. Ruch ten wymaga energii (energia aktywacji), stąd im wyższa temperatura, tym lepsze przewodzenie. Stąd też elektrolity ceramiczne znajdują zastosowania w wysokotemperaturowych ogniach (Na-S, ZEBRA), ale w ostatnich latach pojawiły się elektrolity o przewodnictwie w temperaturze pokojowej zbliżonym do ciekłych ( $10^{-5}$ - $10^{-4}$ , a nawet podchodzącym pod  $10^{-3}$  S cm<sup>-1</sup>).



# ELEKTROLITY CERAMICZNE

Elektrolity ceramiczne to głównie materiały o mieszanej strukturze szkło-kryształ. O ile lit jest obowiązkowym składnikiem tych materiałów, to dominują materiały zawierające także siarkę i/lub fosfor, np.:  $(1-x)\text{Li}_2\text{S}-x\text{P}_2\text{S}_5$  ( $x=0,3$  to punkt odniesienia dla większości elektrolitów ceramicznych), a przewodnictwo polepsza obecność atomów grupy IV (14) np.:

$\text{Li}_2\text{S}-\text{P}_2\text{S}_5-\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{S}-\text{SiS}_2(+\text{Li}_3\text{PO}_4)$ ,

$\text{Li}_2\text{S}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2-\text{LiI}$ . Ostatnio popularne stały się też materiały niestechiometryczne domieszkowane, np.:

$\text{Li}_{3+x}\text{Ge}_x\text{P}_{1-x}\text{S}_4$  (np.  $\text{Li}_{3,25}\text{Ge}_{0,25}\text{P}_{0,75}\text{S}_4$ ).

Popularne są też struktury perowskitu, np.:

$\text{Li}_{3x}\text{La}_{2/3-x}\text{TiO}_3$  (np.  $\text{Li}_{0,36}\text{La}_{0,54}\text{TiO}_3$ ).



# CIECZE JONOWE

Ciecze jonowe (IL) składają się z samych jonów i są w praktyce solami, które temperaturę topnienia mają poniżej  $100^{\circ}\text{C}$ . Do celów praktycznych wyróżnia się grupę cieczy jonowych ciekłych już w temperaturze pokojowej – RTIL.

Do zastosowań bateryjnych oczywiście wskazane jest, aby temperatura topnienia elektrolitu wyraźnie była niższa od  $0^{\circ}\text{C}$ . Ciecze jonowe mają bardzo różnoraki skład, gdyż anionami i kationami mogą być liczne struktury organiczne i nieorganiczne. Istnieje (tylko odkrytych dotąd) paręset kationów i parędziesiąt anionów, które mogą tworzyć ciecze jonowe (choć nie we wszystkich kombinacjach).

# CIECZE JONOWE

Do zastosowań w ogniwach Li-ion potencjalnie (ze względu na wymaganą odporność na utlenianie i redukcję w szerokim zakresie potencjałów) nadaje się kilkadziesiąt kationów i kilka-kilkanaście anionów.

Typowe aniony używane w cieczach jonowych jako elektrolitach do ogniw Li-ion to te same, które były lub są używane do produkcji soli:

$\text{ClO}_4^-$ ,  $\text{BF}_4^-$ ,  $\text{PF}_6^-$ ,  $\text{AsF}_6^-$ ,  $\text{B}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$ ,  $\text{BF}_2(\text{C}_2\text{O}_4)^-$ ,  $\text{B}(\text{OC}(\text{O})\text{CF}_3)_4^-$ ,  $\text{B}(\text{CN})_4^-$ ,  $\text{SO}_3\text{CF}_3^-$ ,  $\text{N}(\text{SO}_2\text{F})_2^-$ ,  $\text{N}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2^-$ ,  $\text{N}(\text{SO}_2\text{CF}_2\text{CF}_3)_2^-$ ,  $\text{C}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_3^-$ ,  $\text{PF}_3(\text{CF}_2\text{CF}_3)_3^-$ , oraz eksperymentalne, np. DCTA i TDI.

Najpopularniejsze są  $\text{PF}_6^-$ ,  $\text{BF}_4^-$ ,  $\text{SO}_3\text{CF}_3^-$  (Tf),  $\text{N}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2^-$  (TFSI) i  $\text{PF}_3(\text{CF}_2\text{CF}_3)_3^-$  (FAP).

# CIECZE JONOWE

Kationy z potencjałem do elektrolitów do ogniw Li-ion:

- **imidazolowe** (zwykle 1-alkilo-3-metyloimidazole lub 1-alkilo-2,3-dimetyloimidazole, gdzie alkil jest w zakresie 2-8, najczęściej o parzystej liczbie węgli);
- **pirolidyniowe** (np. 1-metylo-1-alkilopirolidyniowe, gdzie alkil może być prosty lub rozgałęziony);
- **amoniowe** (niesymetryczne tetraalkiloamoniowe lub trialkiloalkoxyamoniowe);
- **piperydyniowe** (N-alkilo-N-metylopiperydyniowe);
- **pirydyniowe** (N-alkilo-pirydyniowe, gdzie alkil to prosty lub rozgałęziony łańcuch);
- **fosfoniowe** (niesymetryczne tetraalkilofosfoniowe gdzie alkile to łańcuchy co najmniej czterowęglowe).

W zastosowaniach dominują imidazolowe, w mniejszym stopniu pirolidyniowe i piperydyniowe.

# ELEKTROLITY KOMPOZYTOWE

Elektrolity kompozytowe to elektrolity o mieszanym składzie, łączące dwa lub więcej materiałów z różnych klas, np. SPE z ceramicznymi, ciekłe z ceramicznymi, SPE z ciekłymi, SPE z cieczami jonowymi. W skali laboratoryjnej próbowano już chyba wszystkich możliwych kombinacji (także 3- i 4-składowych) z różnym skutkiem. W praktyce rzadko udaje się uzyskać wyraźny efekt poprawy parametrów (synergię) w stosunku do najlepszych materiałów jednoskładnikowych. Jednym z nielicznych naprawdę udanych materiałów to elektrolity żelowe (ciekłe+SPE). Obecnie prowadzone są szeroko zakrojone badania nad materiałami kompozytowymi zawierającymi ciecz jonową. Do tej klasy należą też formalnie elektrolity zawierające np. ceramiczne dodatki funkcjonalne.

# Ogniwa Li-ion – dodatki do elektrolitów, pozostałe komponenty

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# DODATKI FUNKCJONALNE DO ELEKTROLITÓW

- Dodatki zwiększające przewodnictwo: FEC, DME (dimetoksyetan), nano- i mikro- cząstki napełniaczy ceramicznych do żeli, np.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  (modyfikowane powierzchniowo grupami kwasowymi lub zasadowymi);
- Dodatki absorbujące (lub ograniczające produkcję) produkty gazowe tworzenia się SEI i rozkładu rozpuszczalnika oraz  $\text{LiPF}_6$ ; wychwytyjące  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , itd.  
Są to np. izocyjaniany aromatyczne, aminy alkilowe, aminosilany, imidy.
- Dodatki zwiększające trwałość termiczną i chemiczną  $\text{LiPF}_6$ , np.  $\text{LiF}$ , TFEP, NMP. Wyłapują wolne rodniki  $\text{PF}_5$ .

# DODATKI FUNKCJONALNE DO ELEKTROLITÓW

- Dodatki zapobiegające przeładowaniu, np. : difluoroanizol, antracen, pochodne p-dimetoksybenzenu, fluorodekaboran litu (wahadła redoks, utleniają się i odzyskują postać na katodzie), difenyloalkany, pochodne tiofenu, LiBOB, ksylen (izolują anodę przez utworzenie warstwy polimeru lub wytworzenie gazu w przypadku przeładowania), itd.;
- Dodatki zwiększające zwilżalność separatora (np. TMP, TEP, cykloheksan), zmniejszające lepkość (np.  $P_2O_5$ );
- Dodatki zwiększające dysocjację jonową, np.: eter 12-korona-4 (zwiększa rozpuszczalność soli litu), alkiloborany, perfluoroaryloborany (receptor anionów);



# DODATKI FUNKCJONALNE DO ELEKTROLITÓW

- Dodatki wpływające na poprawną redukcję litu na elektrodach, np.: nitrometan,  $\text{SO}_2$ , wielosiarczki, FEC, 2-MeTHF (usuwanie dendrytów), chlorki alkiloamoniowe, sole perfluoroalkilosulfonowe, perfluoropolieter, nitryloceluloza (surfaktanty),  $\text{AlI}_3$ ,  $\text{SnI}_2$  (tworzą stopy z litem);
- Dodatki inhibicji korozji aluminium, np.: LiBOB, LiDFOB;
- Dodatki uniepalniające, np.: TMP, TEP, HMPN (generalnie fosforyn alkilowe i cyklofosfazeny) (akceptory wolnych rodników, utrudniające zapłon), metoksyperfluorobutan, fluorowany PC (rozpuszczalniki nie mogące ulec samozapłonowi);

# DODATKI FUNKCJONALNE DO ELEKTROLITÓW

Dodatki tworzące odpowiednią warstwę SEI:

- stabilizacja produktów rozkładu:  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , bezwodniki maleinowy lub NBS;
- wbudowujące się w powierzchnię elektrody:  $\text{B}_2\text{O}_3$ , trialkilborany, trialkoksyborany, LiBOB;
- osłabiające solwatację litu przez węglany (mniejsza współinterkalacja):  $\text{NaClO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ;
- rozpuszczające kryształy LiF: tris(pentafluorofenylo)boran.

# DODATKI FUNKCJONALNE DO ELEKTROLITÓW

Dodatki tworzące odpowiednią warstwę SEI c.d.:

- osłabiające właściwości redukujące grafitu:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CS}_2$ , wielosiarczki, arylosiarczki, silany, siloksany, związki fluorowcowane;
- polimeryzujące tworząc szczelną warstwę SEI: alkiloazotany, BrGBL, FEC;
- redukujące się zamiast węglanów i polimeryzują: VC, siloksany z gr. winylową, estry winylu, 2-winylopirydyna, akrylonitryl, 2-cyjanofuran, fosfoniany.

# DODATKI FUNKCJONALNE DO ELEKTROLITÓW

Dodatki stosuje się w ilościach zwykle nie przekraczających w sumie 25%. Najczęściej są to FEC, VC, TMP lub inne fosfory, nieco rzadziej LiF,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  i LiBOB. Największe stężenia ( $>10\%$ ) stosuje się dla FEC i TMP, pozostałe nie przekraczają 5%;

Należy pamiętać, że dowolny dodatek w nawet najmniejszej ilości zmienia właściwości nie tylko elektrolitu (przewodnictwo, liczba przenoszenia), ale także całego ogniwa (np. równowagi w SEI).

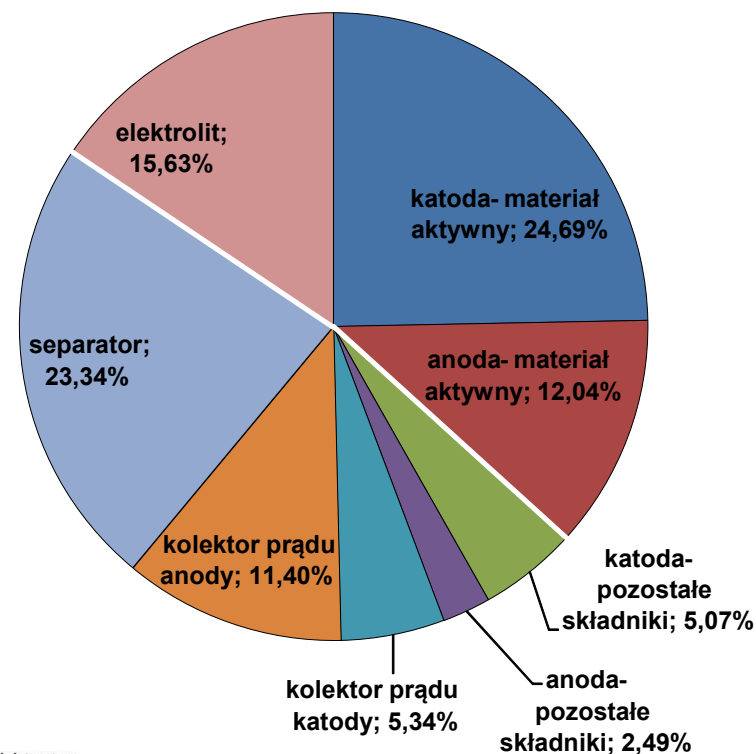
# SKŁADNIKI NIE UCZESTNICZĄCE W REAKCJACH

Składniki nie uczestniczące w reakcjach stanowią ok. 50% kosztów i 33% masy (nie licząc jeszcze obudowy, która w przypadku stali ma ponad 33% masy wnętrza ogniwa)

Table A-1. Cost of Materials in Cell Windings of a 40-kW 48-Cell Battery (24.7-Ah cells) That Employs the Gen 2 Cell Materials

| Type of Material                                                                  | 40-kW Maximum Power-Assist Battery |                     |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|----------|
|                                                                                   | Quantity                           | Unit Cost           | Cost, \$ |
| <b>Cathode</b>                                                                    |                                    |                     |          |
| Active material ( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ ) | 7.707 kg                           | 20.52/kg            | 158.15   |
| SFG-6                                                                             | 0.367 kg                           | 15.00/kg            | 5.51     |
| Carbon black                                                                      | 0.367 kg                           | 6.82/kg             | 2.50     |
| PVDF binder                                                                       | 0.734 kg                           | 10.00/kg            | 7.34     |
| NMP binder solvent                                                                | 5.383 kg                           | 3.18/kg             | 17.12    |
| <b>Anode</b>                                                                      |                                    |                     |          |
| Active material                                                                   | 5.143 kg                           | 15.00/kg            | 77.15    |
| PVDF binder                                                                       | 0.478 kg                           | 10.00/kg            | 4.78     |
| NMP binder solvent                                                                | 3.504 kg                           | 3.18/kg             | 11.14    |
| Aluminum foil current collector                                                   | 34.18 m <sup>2</sup>               | 1.00/m <sup>2</sup> | 34.18    |
| Copper foil current collector                                                     | 36.53 m <sup>2</sup>               | 2.00/m <sup>2</sup> | 73.07    |
| Separator                                                                         | 74.77 m <sup>2</sup>               | 2.00/m <sup>2</sup> | 149.54   |
| Electrolyte ( $\text{LiPF}_6$ in EC:EMC)                                          | 5.01 liters                        | 20.00/L             | 100.14   |
| Total material cost                                                               |                                    |                     | 640.61   |

G.L. Henriksen, K. Amine, J. Liu, P.A. Nelson, ANL-03/5



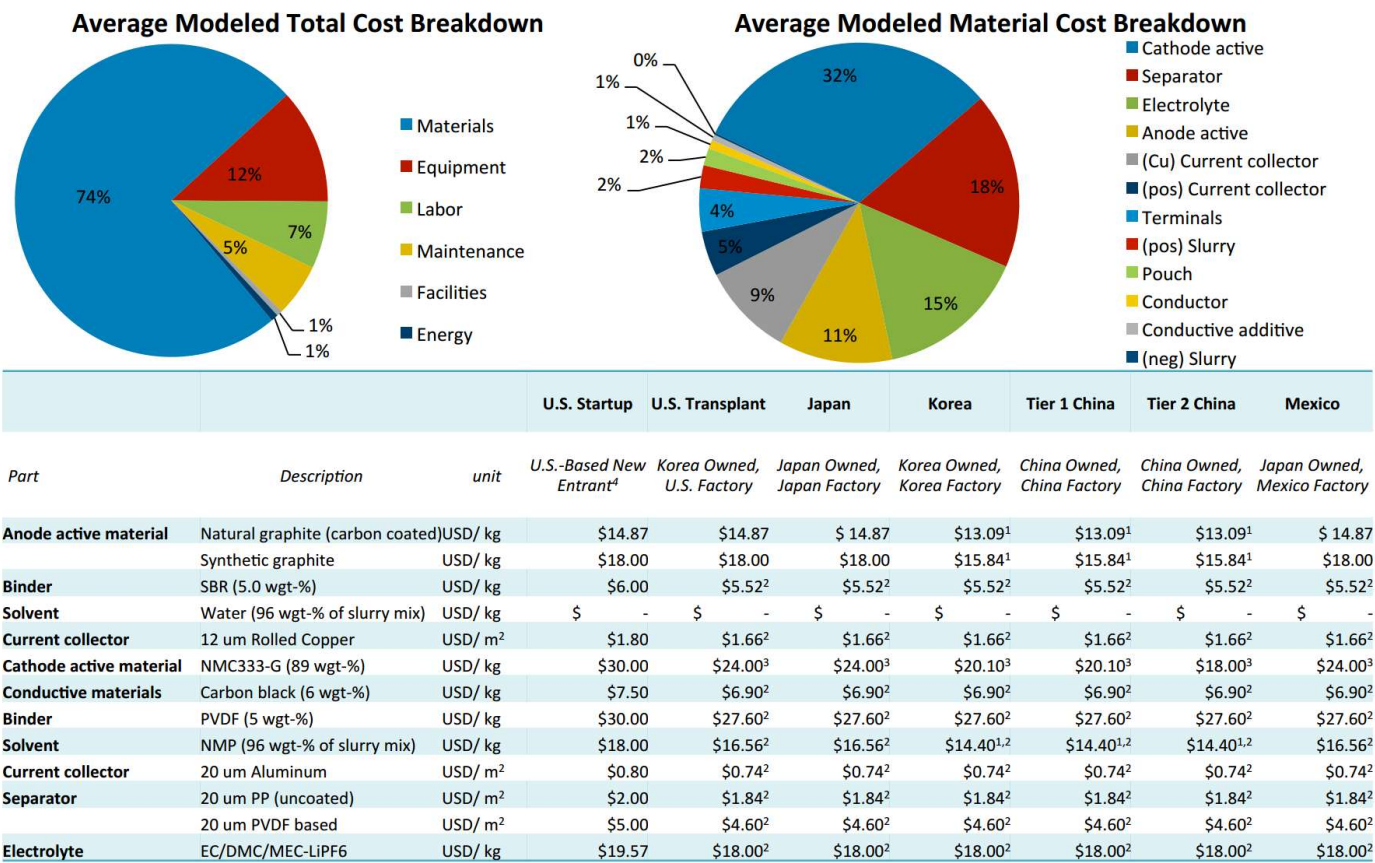
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# SKŁADNIKI NIE UCZESTNICZĄCE W REAKCJACH



# SEPARATORY

Główne zadanie separatora:

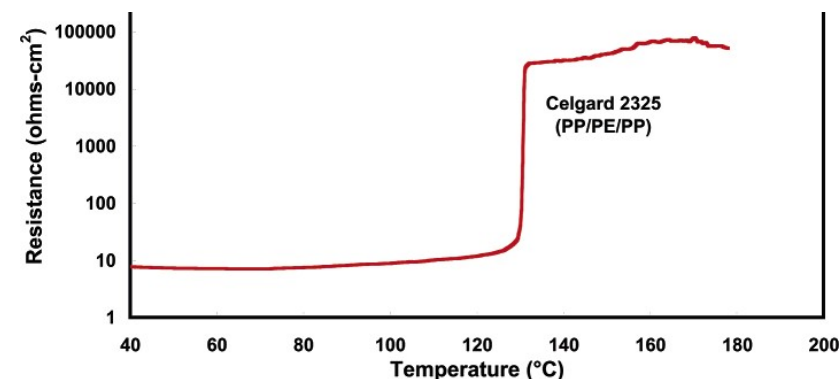
- Rozdzielenie mechaniczne elektrod (zapobieganie zwarcia);
- Izolacja elektryczna (brak przewodnictwa elektronowego);
- Umożliwienie przepływu elektrolitu;
- Dobry kontakt z powierzchniami elektrod (zwilżanie ich elektrolitem) nawet w podwyższonej temperaturze i po zgięciu (zrolowaniu ogniwa);
- Inne (np. zabezpieczenie wysokotemperaturowe).



# SEPARATORY

Pożądane cechy separatora:

- Dobra nasiąkliwość i zwilżalność (szybka i całkowita);
- Bycie izolatorem dla przewodnictwa elektronowego;
- Wysoka porowatość (40-60%, pory  $<1\text{ }\mu\text{m}$  średnicy);
- Kompatybilność z innymi komponentami ogniwa;
- Odporność na wysokie i niskie potencjały;
- Wytrzymałość termiczna i brak kurczenia się lub fałdowania w podwyższonej temperaturze ( $<90^{\circ}\text{C}$ );
- Zamknięcie porów w przypadku wysokiej temperatury ( $>130^{\circ}\text{C}$ );
- Odporność na ściskanie;
- Brak zanieczyszczeń, otworów i zagięć.



# SEPARATOR

Separator nie powinien wpływać na jakiegokolwiek parametry ogniwa (łącznie z oporem) pomijając aspekty bezpieczeństwa - powinien je podnosić.

Separator trzyma elektrolit najczęściej siłami kapilarnymi, stąd musi mieć dobry kontakt z elektrodami, inaczej w miejscach niedociśniętych do elektrod elektrolit może z nimi stracić kontakt.

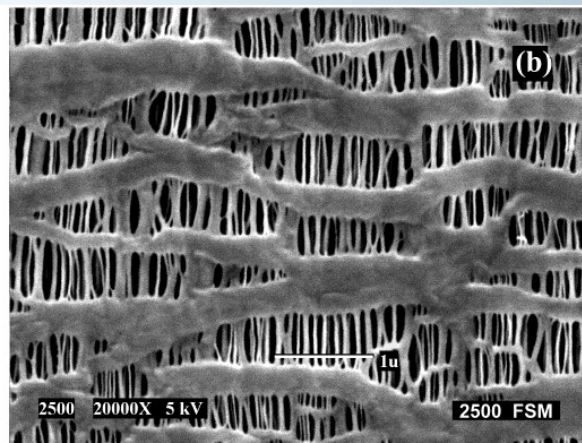
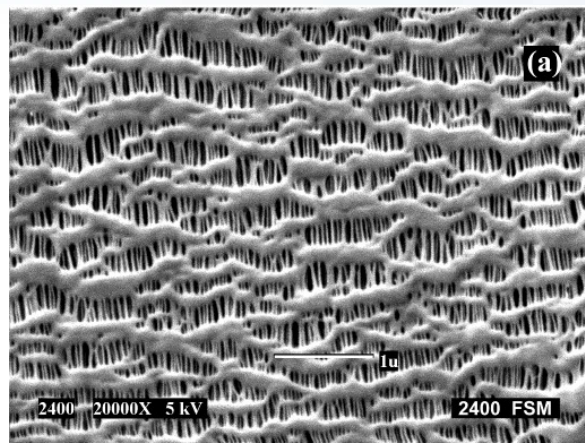
Separatory muszą zapobiegać przerośnięciu whiskersami lub innymi krystalitami tworzonymi na powierzchniach elektrod, aby nie przebiły się i nie uzyskały kontaktu z przeciwną elektrodą (zwarcie).

# SEPARATORY

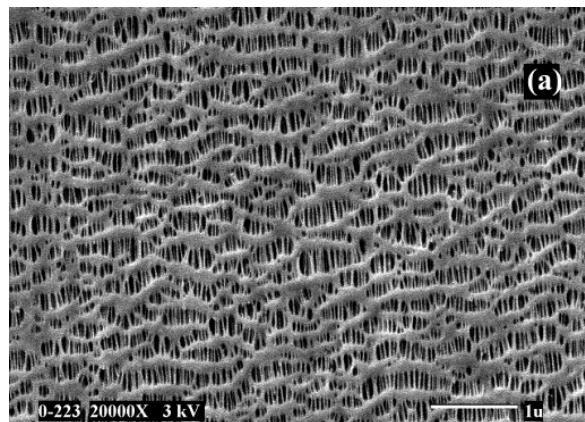
Separator jest zwykle włókniną, ew. membraną porowatą z PE, PP lub innych polimerów lub kopolimerów, włókien wielowarstwowych, ew. domieszkowanych materiałami ceramicznymi lub uniepalniaczami. Istnieją też separatory z ceramiki porowatej lub tworzone *in-situ* z materiałów elastycznych, ale porowatych (dzięki czemu zwiększają kontakt z elektrodami). Istnieją też separatory z włókna szklanego (tkane) lub kevlarowe (poliaramidy).

Separatory mogą mieć grubość 10-200  $\mu\text{m}$ , ale zwykle mają 10-30  $\mu\text{m}$  (zależnie od zastosowania). Jednak nawet te cienkie zwykle zmniejszają przewodnictwo elektrolitu nawet kilkukrotnie (nawet ok. 6 razy)

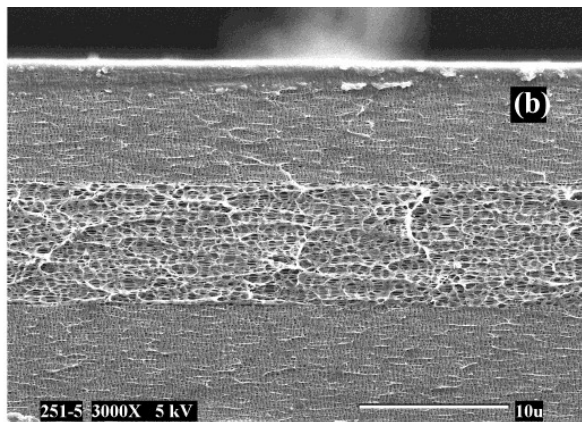
# SEPARATORY



Typowe separatory PP produkowane metodą suchą – powierzchnia drobnoporowatego i z dużymi porami



P. Arora, Z. Zhang, Chem. Rev. 104 (2004) 4419.



Trójwarstwowy separator PP/PE/PP produkowany metodą suchą powierzchnia i przekrój poprzeczny

**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**

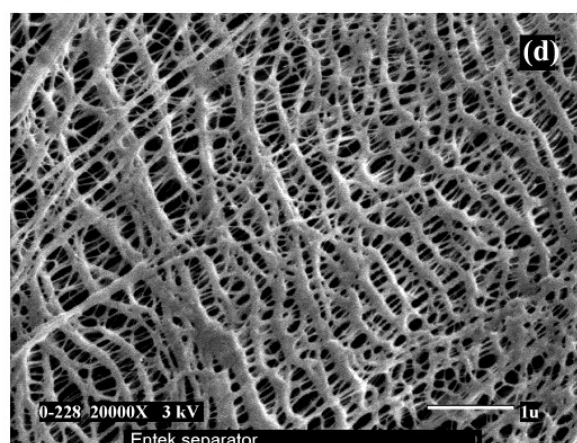
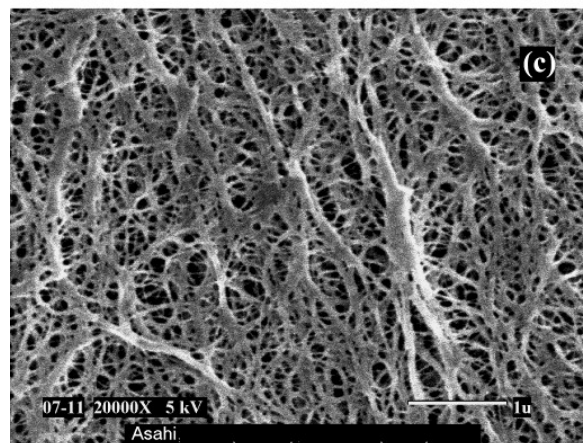
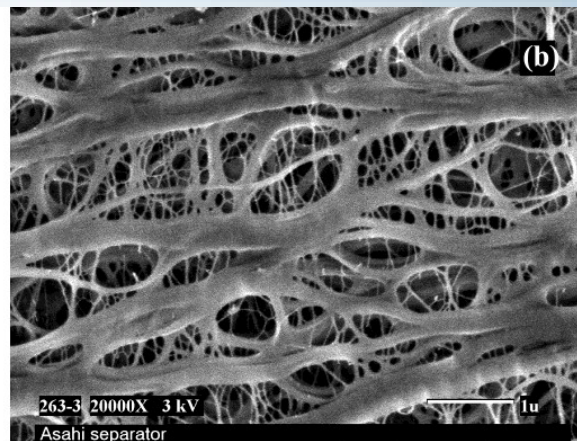
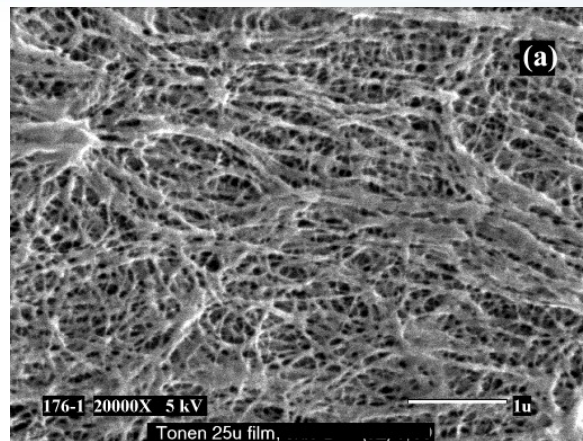


Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# SEPARATORY



P. Arora, Z. Zhang, Chem. Rev. 104 (2004) 4419.

Typowe separatory PE i PP uzyskiwane metodą mokrą

**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KOLEKTORY PRĄDU

Kolektory prądu mają za zadanie odprowadzać/doprowadzać elektrony powstałe/potrzebne w reakcjach elektrodowych. Ich zadaniem jest dobre przewodzenie elektronowe, odporność na warunki w ogniwie (temperatura, chemikalia, utlenianie, redukcja) i dobry kontakt z materiałem aktywnym elektrod.



# KOLEKTORY PRĄDU

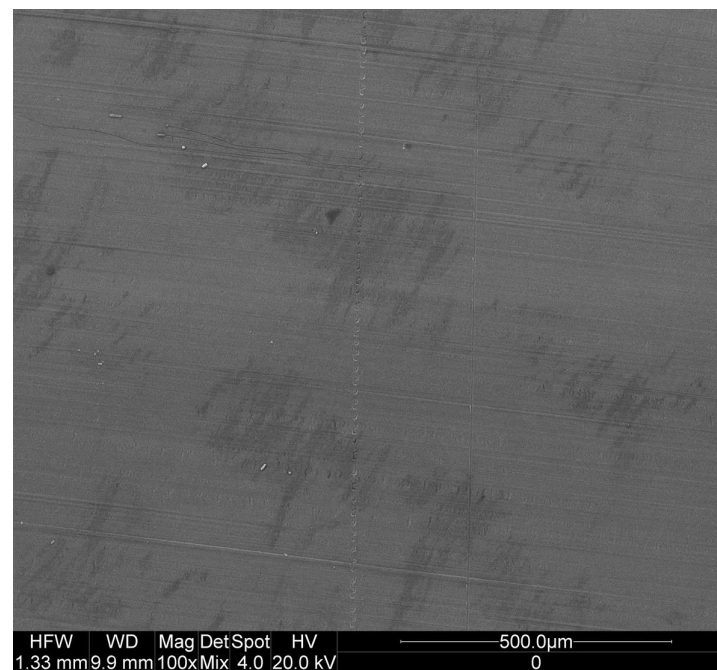
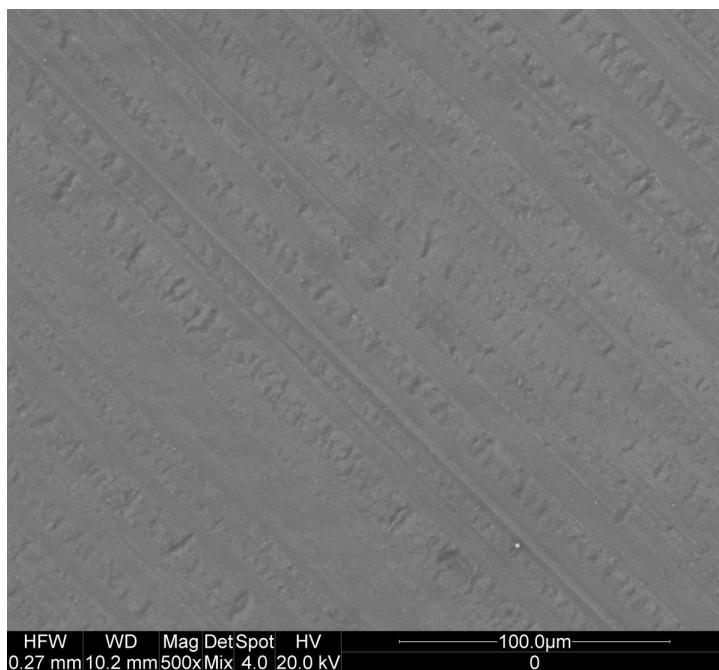
Kolektory prądu powinny być możliwie jak najcieńsze, ale wystarczająco grube aby wytrzymać naprężenia, zginanie (przy zwijaniu ogniwa), a także nacisk przy pracy ogniwa, nawet po osłabieniu korozją wynikającą z kontaktu z kwasem fluorowym (HF) i innymi utleniającymi lub redukującymi chemikaliami przy wysokiej temperaturze (do 80°C) i zmiennym potencjale.

W praktyce są to folie miedziane (anoda) i aluminiowe (katoda) o grubości 5-15  $\mu\text{m}$ . Aluminium jest lżejsze (3x niższa gęstość) i tańsze, ale tworzy stopy z litem przy niskich potencjałach i nie nadaje się na kolektor anodowy.



# KOLEKTORY PRĄDU

Głównym problemem kolektorów prądu jest korozja pod wpływem HF, ew. innych kwasów i ew. anionu soli litowej.



czyste aluminium

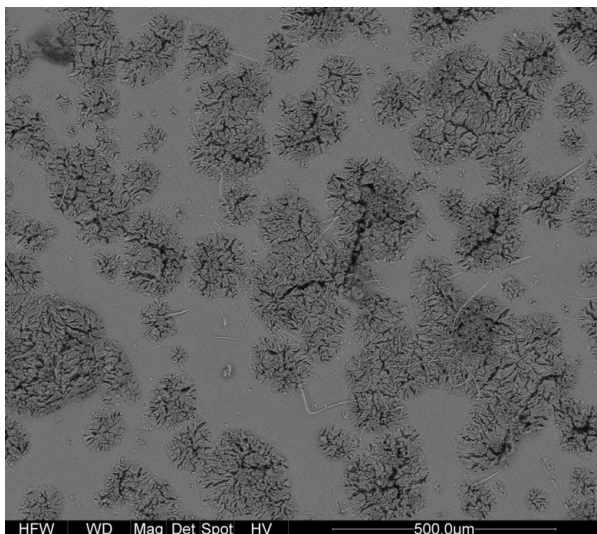
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



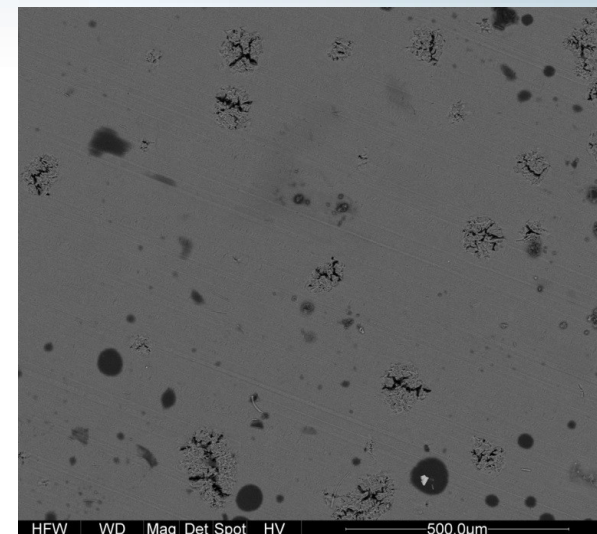
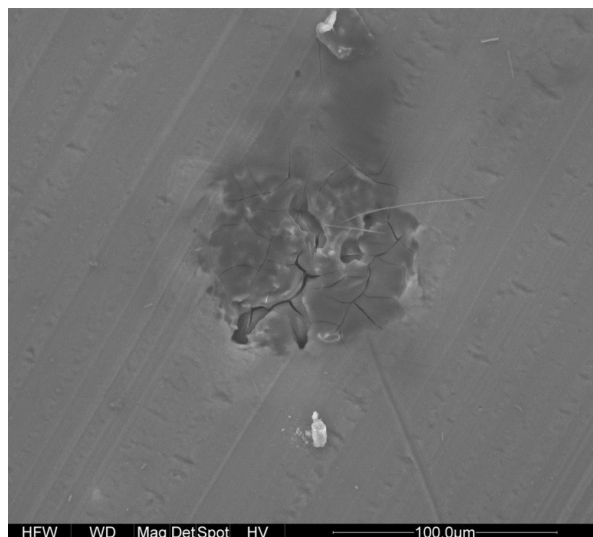
Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KOLEKTORY PRĄDU



różne typy korozji  
na aluminium



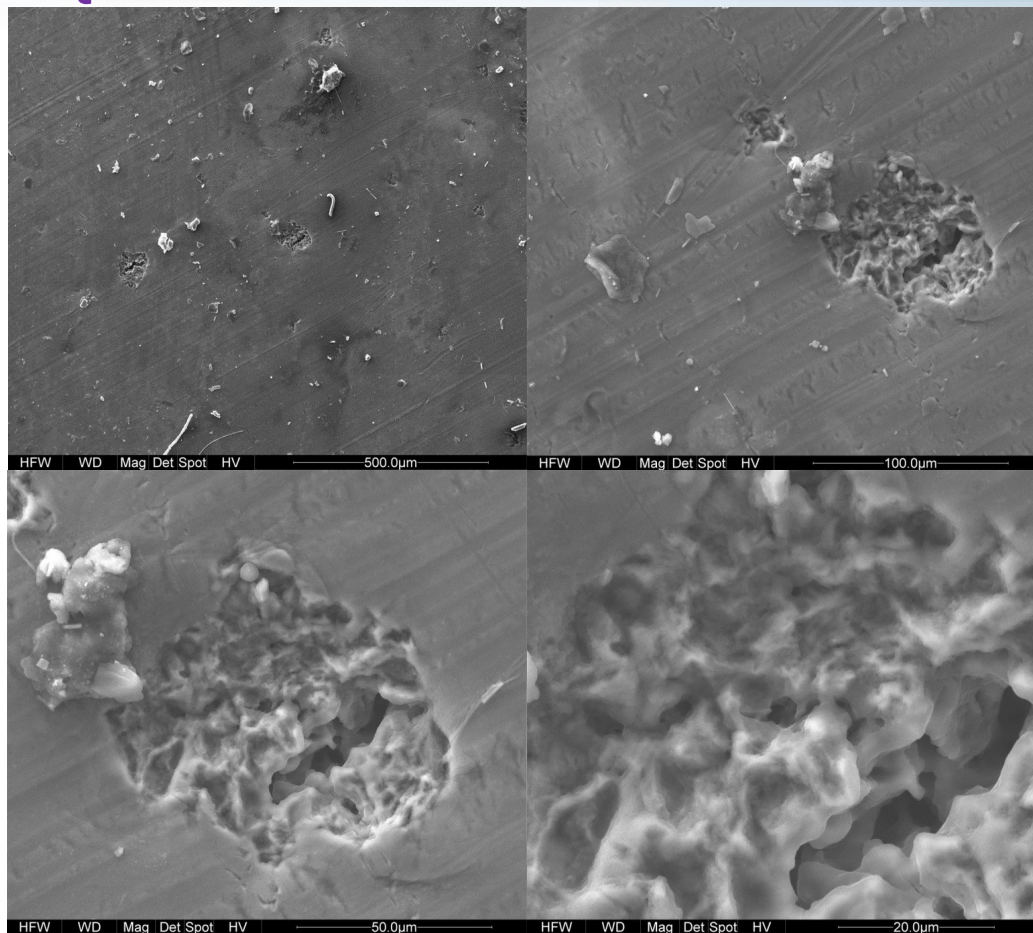
**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# KOLEKTORY PRĄDU



**ELEKTROMOBILNOŚĆ  
DLA NAUCZYCIELI**



Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# LEPISZCZE

Lepiszczce służy do zlepiania materiału aktywnego (MA), który zwykle ma formę proszku, i utworzyć z niego jednolitą masę o równomiernym rozproszeniu MA. Jednocześnie chodzi o równomierne rozprowadzenie wokół MA dodatku poprawiającego przewodnictwo elektronowe (w przypadku katod i anod niewęglowych) i dodatki funkcjonalne. Wspólną cechą (i wymogiem) lepiszczy jest uniemożliwienie aglomeracji ziaren składników elektrod, tworzenie warstewki równomiernie przylegającej do powierzchni ziaren MA i zapewnienie przewodnictwa jonowego i elektronowego.



# LEPISZCZE

Zbyt mała ilość lepiszcza nie pozwala na dobre przewodnictwo, zbyt duża zmniejsza ilość masy aktywnej i pogarsza kontakt z dodatkami poprawiającymi przewodnictwo. Tworzy się też zbyt gruba warstwa lepiszcza, który przewodzi gorzej niż dodatki.

Typowym lepiszczem jest PVdF (poli(difluorowinylyden), lateks), ale w ostatnich latach używa się także modyfikowanej celulozy, PVP (poli(winylopirolidon)), oraz gum niefluorowanych.

Dodatek lepiszcza może się wahać w zakresie 2-20%, zależnie od konstrukcji ogniwa i potrzeb, ale w praktyce najczęściej jest używany w zakresie 2-5%.

# DODATKI POPRAWIAJĄCE PRZEWODNICTWO

Dodatki poprawiające przewodnictwo działają zgodnie z nazwą 😊 (chodzi o przewodnictwo elektronowe). Anody oparte na materiałach węglowych takich jak grafit, sadza, hard carbon, soft carbon, czy nanorurki węglowe przewodzą dobrze same z siebie, więc nie potrzebują takich dodatków. Z drugiej strony wszystkie materiały katodowe i anodowe nie oparte na węglu przewodzą źle lub bardzo źle, stąd wymagane jest stosowanie takich dodatków.

# DODATKI POPRAWIAJĄCE PRZEWODNICTWO

Materiałami węglowymi stosowanymi w elektrodach do ogniw Li-ion jest najczęściej czern acetylenowa (amorficzny węgiel, rodzaj oczyszczonej z zanieczyszczeń sadzy), grafit, niekiedy jeszcze inne formy węgla. Zwłaszcza czern acetylenowa ma tendencje do tworzenia aglomeratów mocno rozgałęzionych, co akurat jest pozytywne, gdyż umożliwia stosowanie jej niewielkiej ilości przy jednoczesnym osiągnięciu progu perkolacji przy bardzo niskim stężeniu. Dodatki stosuje się w stężeniu od 2 do 15%, ale wszystkie razem nie powinny przekraczać zawartości lepiszcza w elektrodzie.



# MASA ELEKTRODOWA

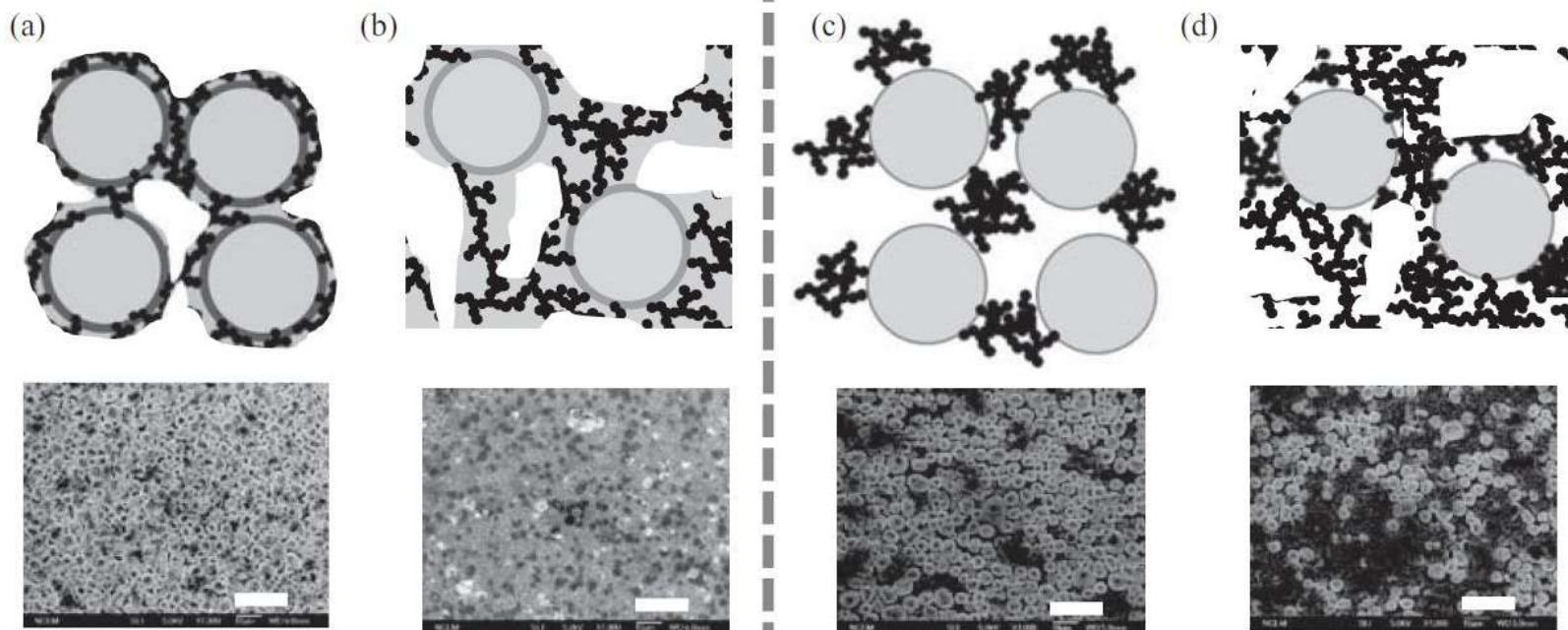
Czerń acet.:PVdF  
MA dużo

mało

dużo

1:5 4:5

mało



G. Liu, H. Zheng, X. Song, V.S. Battaglia, J. Electrochem. Soc. 159 (2012) A214.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ROZPUSZCZALNIK DO FORMOWANIA ELEKTROD

Rozpuszczalnikiem jest często NMP (N-metylopirolidon), ale dawniej stosowano też acetonitryl, a współcześnie coraz częściej stosuje się wodę (tam gdzie to możliwe). Rozpuszczalnik potrzebny jest do uformowania ciekłej masy elektrodowej, w której najpierw zostaną odpowiednio jednolicie rozprowadzone i zmieszane składniki (MA, dodatki, lepiszcze). Powinien umożliwiać odgazowanie (przeprowadzone zwykle za pomocą ultradźwięków), a więc umożliwiać tworzenie się pęcherzyków gazów (uwięzionych w porach materiałów) i ich łatwą ucieczkę. Powinien być też możliwie tani i łatwy w oczyszczeniu z substancji rozpuszczalnych i pyłów (aby po odparowaniu nie zostały zanieczyszczenia w masie elektrodowej).

# ROZPUSZCZALNIK DO FORMOWANIA ELEKTROD

Rozpuszczalnik ma więc umożliwić swobodne mieszanie się składników i ucieczkę pęcherzyków gazu (niska lepkość i napięcie powierzchniowe), z drugiej strony musi się go dać łatwo odparować po nałożeniu masy na folię kolektora prądu. Nie powinien też zbyt łatwo wnikać w pory (lub powinien łatwo być z nich usuwany) składników elektrody. Rozpuszczalnika używa się możliwie mało, aby łatwo było go odparować, ale nie mniej niż to potrzebne do łatwego wymieszania i odpowiedniej dyspersji MA i dodatków. Zwykle rozpuszczalnik stosuje się w ilościach w zakresie 75-125% masy końcowej (suchej) elektrody.

# OBUDOWY

Tradycyjnie jest to cienka warstwa stali, ew. stali odpornej na korozję lub stali powlekanej polimerem (np. PE). Współcześnie stosuje się jednak coraz częściej obudowy z tworzyw sztucznych (np. PE, PP), które są lżejsze i co najmniej tak samo odporne na chemikalia zawarte w ogniwie. Zwłaszcza w ogniwach pryzmatycznych stosuje się natomiast folie, tzw. coffee-bagi składające się z laminowanej obustronnie folii aluminiowej (np. PE i PET) w celu polepszenia właściwości mechanicznych (odporność na rozciąganie). Używa się też wytłoczonych na kształt ogniwa form plastikowych zgrzewanych termicznie.

# Ogniwa Li-ion – produkcja, recykling, użytkowanie

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**

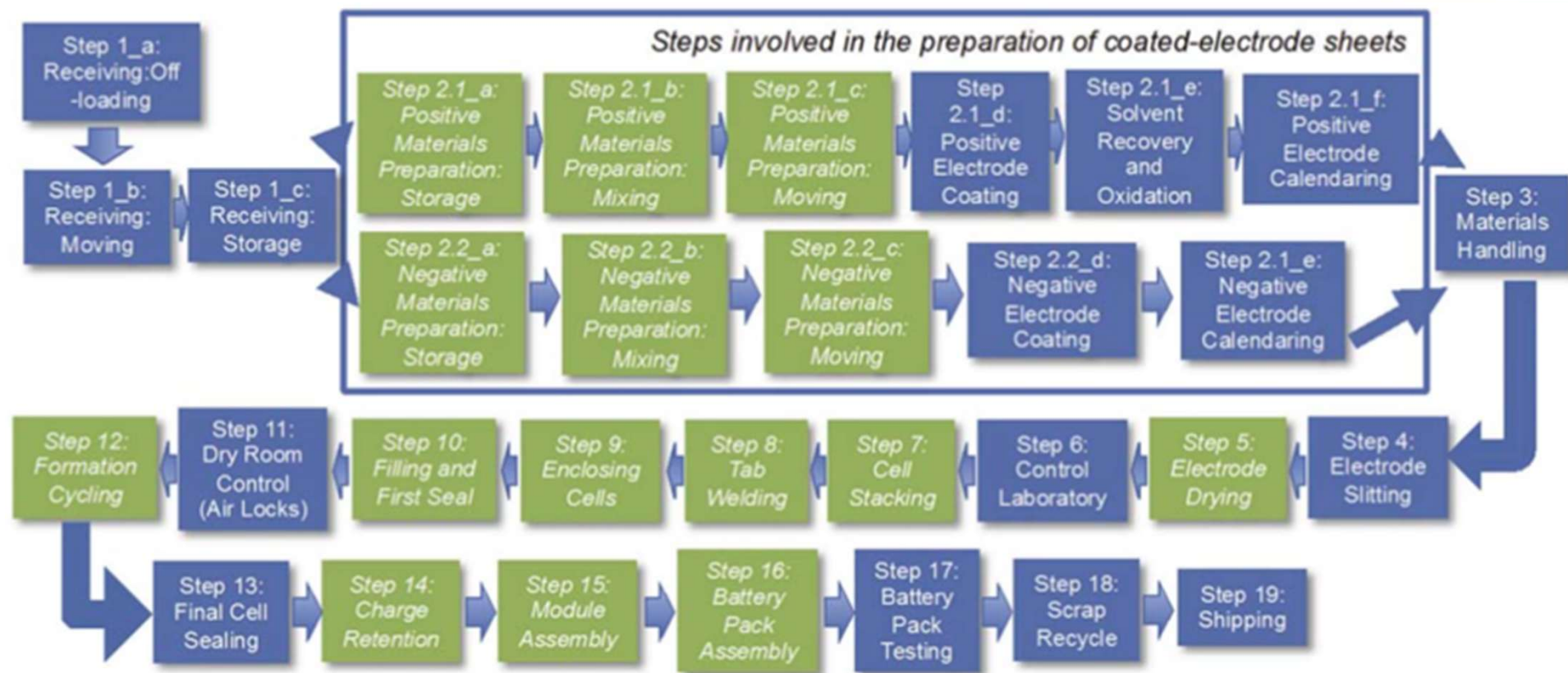


Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121



# SCHEMAT PRODUKCYJNY



A. Sakti, J. Michalek, R.H. Fuchs, J.F. Whitacre, J. Power Sources 273 (2014) 966.

# JESZCZE SŁOWO O ROZMIARACH OGNIW

Ogniwa cylindryczne oraz guzikowe są zestandaryzowane w ramach oznaczeń.

Ich numery są jednocześnie ich wymiarami. Pierwsze dwie cyfry (zwykle) oznaczają ich średnicę w milimetrach, natomiast pozostałe cyfry to ich długość/wysokość liczona w 0,1 milimetra (z zachowaniem odpowiednich tolerancji). Są to zewnętrzne wymiary całego ogniwa wraz z obudową.



# JESZCZE SŁOWO O ROZMIARACH OGNIW

## Przykłady:

- 2032 (popularna bateria guzikowa) ma 20 mm średnicy i 3,2 mm wysokości;
- 18650 (do niedawna najpopularniejsze ogniwo do laptopów, używane też w samochodach Tesli; high power – do zastosowań wymagających dużego prądu mają do 2500 mAh, ale możliwość szybkiego rozładowania, np. 5-10C, high energy – optymalizowane pod kątem pojemności – nawet do 3600 mAh, ale źle znoszące lub mające słabą pojemność przy prądach powyżej 1C) ma 18 mm średnicy i 6,5 cm wysokości (65,0 mm);
- 20700 i 21700 – (wprowadzone w 2018 roku ogniwa Tesli, Panasonic, LG i Samsunga; mają ok. 1,3x większą pojemność niż 18650, ale są trudniejsze w konstrukcji i do chłodzenia) mają 20 mm średnicy i 70mm wysokości; często są oznaczane nieprawidłowo nawet przez samych producentów – 2070 i 2170.

# RECYKLING

Większość ogniw, przynajmniej tych większych (np. do EV lub HEV) może być użyta ponownie po wymontowaniu z samochodu, gdyż nadal posiada 70-80% nominalnej pojemności.

Do zastosowań podtrzymywania napięcia/częstotliwości/jako UPS to w zupełności wystarcza. Pozwala to na pełne wykorzystanie potencjału ogniwa. Jednocześnie ponowne wykorzystanie powoduje, że cena ogniwa jest bardziej korzystna (odkupienie po zakończeniu użytkowania przez konsumenta).

# RECYKLING

Do niedawna jedyna wdrożona w większej skali metoda (zwana pirometalurgiczną) polega na wrzuceniu wszystkich składowych do wielkiego pieca i wygrzewaniu powyżej 2000°C. Nie da się w ten sposób odzyskać najdroższych komponentów (w sensie ceny zakupu wysoko przetworzonych komponentów, jak separator czy elektrolit).

Umożliwia natomiast odzysk w dość czystej formie niektórych metali użytych do produkcji, gdyż z punktu widzenia ceny surowców (do produkcji komponentów) to one są najdroższe.



© Umicore

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo Edukacji Narodowej Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# RECYKLING

Metoda pirometalurgiczna odzysku polega na wygrzewaniu całego wsadu (ogniwa w całości wraz z obudowami). W wyniku wysokiej temperatury wszystkie polimery i inne materiały organiczne ulegają odparowaniu do dwutlenku węgla i pary wodnej i zostają usunięte. Również chlor, fluor a nawet część węgla i fosforu (pochodzące głównie z elektrolitu lub dodatków funkcjonalnych) także zostają odparowane w formie związków lub czystych gazów (toksyczne zostają wyłapane na filtrach).

# RECYKLING

Na dnie pozostają jedynie metale w formie płynnej rozwarstwiające się według gęstości, dzięki czemu można zlać frakcje dość czystych metali lub ich stopów. Wyrzucane zostają jedynie nieopłacalne do odzysku metale (np. aluminium, żelazo), zanieczyszczony grafit i np. krzem – w formie żużłu.



© Umicore

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# METODA HYDROMETALURGICZNA

Od kilku lat na popularności zyskuje metoda najpierw rozdzielania (po rozdrobnieniu) miedzi, aluminium, plastików (separator, obudowa) i ew. stali z obudowy od materiałów elektrodowych. Następnie rozpuszcza się materiały elektrodowe przeprowadzając niektóre metale do formy soli (np. siarczanów) a następnie metodami metalurgicznymi i/lub elektrochemicznymi rozdziela się pozostałe metale od siebie. Zaletą metody jest kilkukrotnie mniejszy wsad do pieca metalurgicznego (oszczędność energii i pieniędzy) oraz dużo wydajniejszy odzysk większości metali (i są one czystsze). Metoda coraz częściej stosowana (w różnych wariantach).



# PORÓWNANIE TECHNOLOGII RECYKLINGU

Table 2. Summary of LiB recycling processes.

| Process              | Feed              | Pre-Processing                  | Mechanical Processing                                                                | Pyro                                | Hydro                                                                                                                   | Main Recoveries                                                                             | Secondary Recoveries                                           | Use of Main Recoveries             | Use of Secondary Recoveries | Losses                                  |
|----------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Umicore Valéas™      | LiB, NiMH         | Dismantling                     | -                                                                                    | Shaft furnace                       | Leaching solvent extraction                                                                                             | Co, Ni, Cu, Fe<br>CoCl <sub>2</sub>                                                         | Slag: Al, Si, Ca, Fe, Li, Mn, REE                              | Metal industry, cathode production | Construction industry       | Electrolyte, plastics, graphite         |
| Sumitomo-Sony        | LiB.              | Sorting<br>Dismantling          | -                                                                                    | Calcination                         | Hydro                                                                                                                   | CoO                                                                                         | Co-Ni-Fe alloy<br>Cu, Al, Fe                                   | Battery industry                   | Metal industry              | Electrolyte, plastics, Li, Ni, graphite |
| Retriev Technologies | LiB<br>Primary Li | Dismantling                     | Wet comminution, screening, shaking table, filtration,                               |                                     | Precipitation                                                                                                           | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>MeO                                                      | Steel<br>Cu, Co, Al                                            | Cathode production, metal industry | Metal industry              | Plastic                                 |
| Recupyl Valibat      | LiB<br>Primary Li | -                               | crushing, vibrating screen, secondary screen, magnetic separator, densimetric table, | -                                   | Hydrolysis leaching                                                                                                     | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,<br>LiCO <sub>2</sub> ,<br>Li <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | Steel<br>Cu, Al<br>Cu,<br>MeO, C                               | Cathode Production.                | Metal industry              | Cu, graphite                            |
| Akkuser              | LiB               | Sorting                         | 1st cutting, air filtration, cutting, magnetic separator                             | -                                   | -                                                                                                                       | Co, Cu powder<br>Fe                                                                         | Non-ferrous metals                                             | Various including metal industry   | Metal industry              | Plastic                                 |
| Accurec              | LiB               | Sorting<br>Dismantling          | Milling, separation, agglomeration, filtration, ambient                              | Vacuum thermal treatment, reduction | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                                                                          | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>Co-Alloy                                                 | Metallic alloy                                                 | Production of cathode material     | Metal recovery              | Electrolyte, polymers, graphite         |
| Battery Resources    | LiB               | Discharge                       | Shredding, magnetic separation, sieving, dense media; ambient                        | Sintering                           | Leaching by: NaOH, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , and Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>NMC(OH) <sub>2</sub>                                     | Ferrous metals                                                 | Battery cell production            | Metal industry              | Electrolyte                             |
| LithoRec             | LiB               | Discharge<br>Manual disassembly | Two-stage crushing, two-stage air classification; inert.                             | Drying, calcination                 | Undisclosed leaching agent                                                                                              | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>metal oxides                                             | Al-Cu, plastic fractions                                       | Battery cell production            | Metal industry              | Electrolyte                             |
| OnTo                 | LiB<br>Primary Li | Discharge<br>Dismantling        | Shredding, sieving, dense media separation; supercritical CO <sub>2</sub>            | Present (undisclosed).              | Leaching purification, dissolution                                                                                      | Refurbished cell cathode powder                                                             | Ferrous and non-ferrous metals                                 | Battery cell production            | Metal industry              | Binder, graphite                        |
| Aalto University     | LiB               | -                               | Shredding, sieving                                                                   | Aluminium smelter                   | Leaching                                                                                                                | CoC <sub>2</sub> O <sub>4</sub><br>Al                                                       | Jarosite, manganese dioxide, copper hydroxide, Li-Ni solution. | Reprocessing required              | Reprocessing required       | Graphite, binder, plastic, Cu, water    |

O. Velazquez-Martinez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, R. Serna-Guerrero, Batteries 5 (2019), 68.





# PORÓWNANIE TECHNOLOGII RECYKLINGU

## Odzysk materiału katodowego i litu (najcenniejsze)

Table 3. Cathode material recovery summary of the recycling processes.

| Process              | Co Recovery                     | Quality of Recovery                                                                  |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Umicore              | CoCl <sub>2</sub>               | Ready for LiCoO <sub>2</sub> synthesis                                               |
| Sumitomo-Sony        | CoO                             | Recovery needs pyrometallurgical processes before cathode synthesis                  |
| Retriev Technologies | MeO + cake                      | Elemental cobalt                                                                     |
| Recupyl              | LCO/Co(OH) <sub>2</sub> /Co     | final product                                                                        |
| Akkuser              | Co + graphite                   | Recovery requires hydro- and/or pyrometallurgical processes before cathode synthesis |
| Accurec              | Co alloy                        | Elemental cobalt                                                                     |
| Battery Resources    | NMC(OH) <sub>2</sub>            | Ready for cathode synthesis                                                          |
| LithoRec             | MeO                             | Ready for cathode synthesis                                                          |
| OnTo                 | Cathode powder (refurbished)    | Final product                                                                        |
| Aalto University     | CoC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | Recovery requires processing                                                         |

Table 4. Lithium recovery summary of the recycling processes.

| Process              | Li Product                                                       | Recovery Method                                                     | Efficiency  | Recovery Quality | Target Use of Recovery             |
|----------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|------------------|------------------------------------|
| Umicore              | Not recovered                                                    | -                                                                   | -           | -                | -                                  |
| Sumitomo-Sony        | Not recovered                                                    | -                                                                   | -           | -                | -                                  |
| Retriev Technologies | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                  | Precipitation with Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub> | 90%         | No data          | Metal manufacture                  |
| Recupyl              | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Li <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> | Precipitation with CO <sub>2</sub>                                  | No Data     | No data          | Not discussed                      |
| Akkuser              | Not recovered                                                    | -                                                                   | -           | -                | -                                  |
| Accurec              | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                  | Precipitation                                                       | 76–90%      | >99%             | Glass production/cathode synthesis |
| Battery Resources    | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                  | Precipitation with Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                  | 67–80%      | "High Purity"    | Cathode powder synthesis           |
| LithoRec             | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /LiOH                            | Precipitation                                                       | 85–95%      | No Data          | Cathode powder synthesis           |
| OnTo                 | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /cathode                         | Undisclosed                                                         | Undisclosed | 99%              | Battery production                 |
| Aalto University     | Li-Ni solution                                                   | Leaching                                                            | 93–97%      | 0.1%             | Not discussed                      |

O. Velazquez-Martinez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, R. Serna-Guerrero, Batteries 5 (2019), 68.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# PORÓWNANIE TECHNOLOGII RECYKLINGU

## Odzysk metali pozostałych (poza katodowymi)

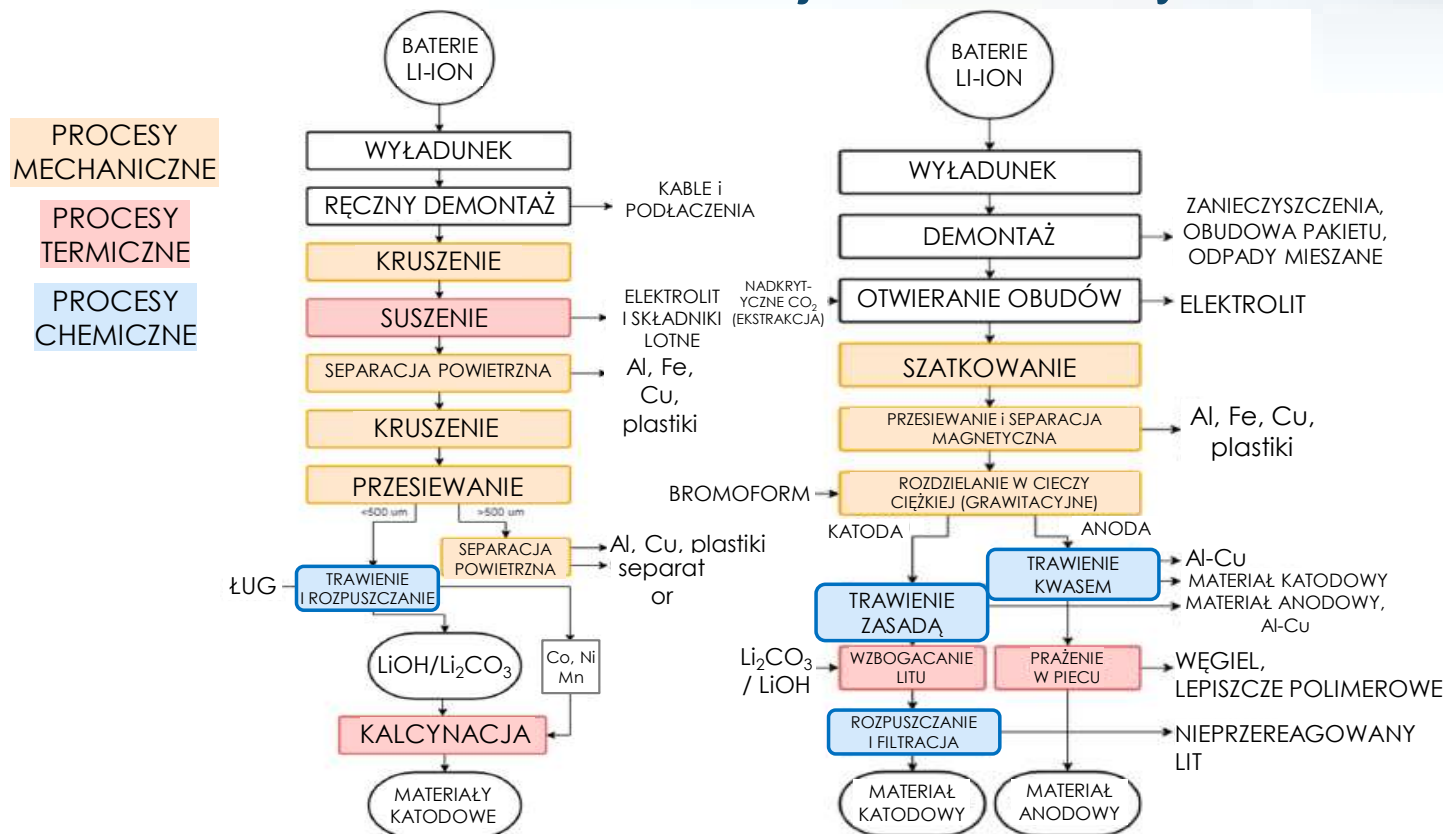
Table 5. Metal recovery summary of the recycling processes.

| Process              | Fe Casing                                                                       | Al and Cu Foils                                                                             | Losses                |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Umicore              | Fe: recovered in alloy                                                          | Cu: recovered in alloy                                                                      | Al, polymer           |
| Sumitomo-Sony        | Fe: recovered in alloy                                                          | Cu: recovered in alloy                                                                      | Al, polymer           |
| Retriev Technologies | Fe, Al, and plastics: recovered in shaking table                                | Not mentioned.                                                                              | Not mentioned         |
| Recupyl              | Fe: recovered with magnetic separator                                           | Al, Cu, and plastics: recovered with density separation                                     | Not mentioned         |
| Akkuser              | Fe: recovered with magnetic separator<br>Plastics: recovered via air filtration | Al and Cu: recovered from fin powder                                                        | Fraction of Cu and Al |
| Accurec              | Fe: recovered with magnetic separator                                           | Al and Cu: recovered via air separator                                                      | Polymer               |
| Battery Resources    | Fe: recovered with magnetic separator                                           | Al: recovered during leaching<br>Cu: recovered via dense media separation and precipitation | Not mentioned         |
| LithoRec             | Fe, Al, and plastics: recovered via air separator                               | Al and Cu: recovered via sieves and zig-zag sifter                                          | Not mentioned         |
| OnTo                 | Fe, Al, and plastics: recovered                                                 | Al and Cu: recovered                                                                        | Not mentioned         |
| Aalto University     | Fe: extracted at pre-processing                                                 | Rotary kiln                                                                                 | Cu, graphite.         |

O. Velazquez-Martinez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, R. Serna-Guerrero, Batteries 5 (2019), 68.

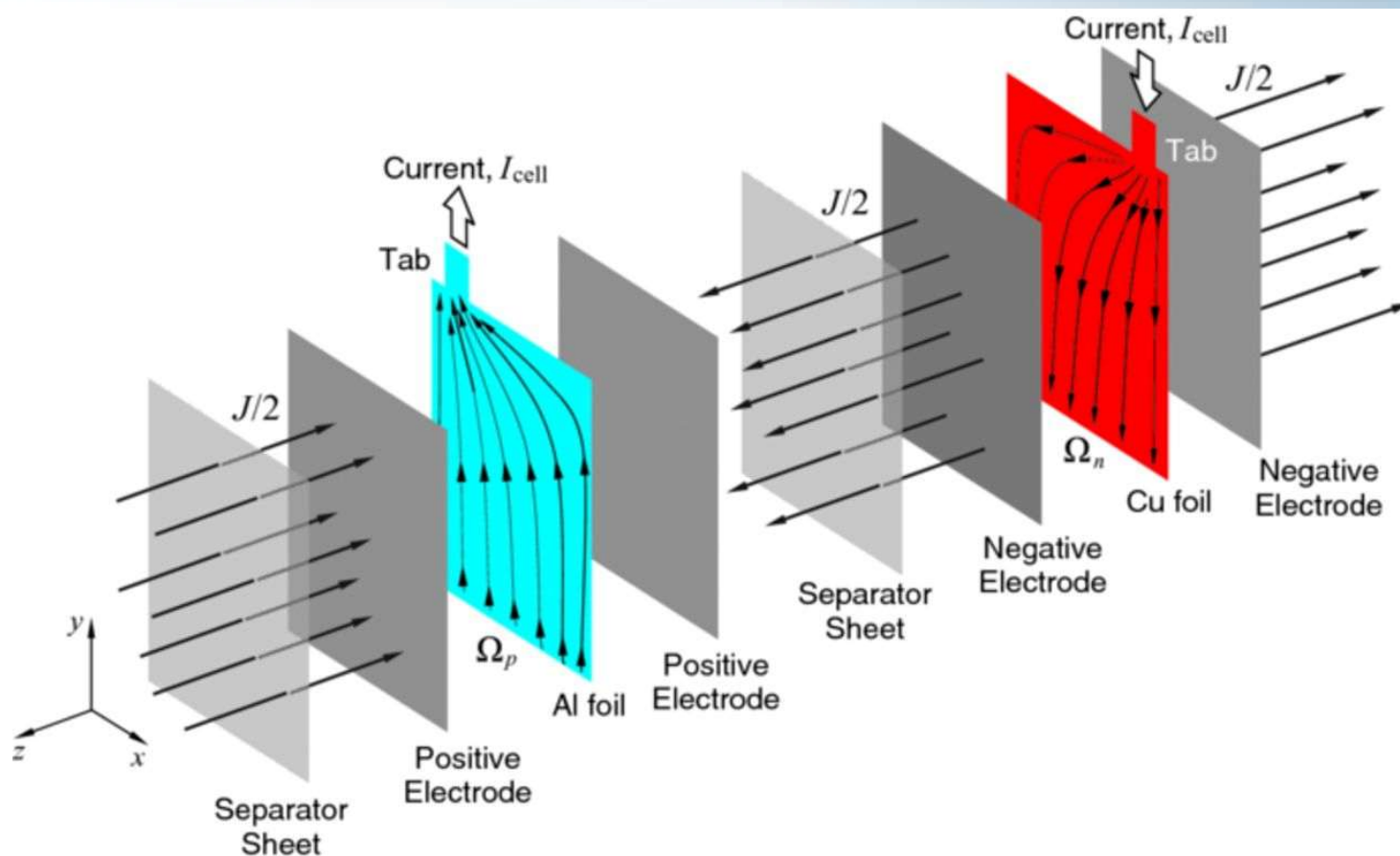
# PORÓWNANIE TECHNOLOGII RECYKLINGU

## Porównanie dwóch bardziej zróżnicowanych metod



O. Velazquez-Martinez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, R. Serna-Guerrero, Batteries 5 (2019), 68.

# ZABEZPIECZENIA PRZED PRZEGRZANIEM



P. Taheri, A. Mansouri, B. Schweitzer, M. Yazdanpour, M. Bahrami, J. Electrochem. Soc. 160 (2013) A1731.

**ELEKTROMOBILNOŚĆ**  
**DLA NAUCZYCIELI**



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach umowy nr MEN/2024/DKZ/2121

# ZABEZPIECZENIA PRZED PRZEGRZANIEM

Wysokie temperatury ogniwa wynikają z dużych przepływów prądu przez ogniwo. Jednak prawdziwym zagrożeniem są przegrzania lokalne (np. całe ogniwo ma średnio 40°C, ale w jednym punkcie jest nagle 90°C). Wystarczy przegranie nawet przez sekundę (zanim się nie rozejdzie ciepło), a już zaczynają się rozkłady elektrolitu i/lub elektrody. Sól  $\text{LiPF}_6$  rozkłada się powyżej 70°C, rozpuszczalniki zaczynają zwiększać prężność par (wzrost ciśnienia zagrażający ogniwu) ok. 100°C. Wszystkie katody tlenkowe zaczynają rozkład powyżej 130-140°C. Zwłaszcza rozkład katod jest niebezpieczny – wydziela się przy nim mnóstwo ciepła (rozgrzewając i przyspieszając rozkład reszty katody) oraz tlenu (łatwiejszy zapłon). Przez to metody gaśnicze odcinające tlen są nieskuteczne.



# ZABEZPIECZENIA PRZED PRZEGRZANIEM

Ryzyko wystąpienia przegrzania lokalnego ma źródło w konstrukcji ogniwa (bez znaczenia czy cylindrycznego czy pryzmatycznego). Wszystkie ogniwa mają wyprowadzenia z elektrod przez przyłącza będące przedłużeniem (wypustką) kolektora prądu i o jego grubości, a nawet jeśli są one pogrubione, to w pobliżu wyprowadzenia już ma miejsce zwiększony przepływ prądu (z całej elektrody elektrony przepływają przez bardzo wąski pasek, np. z elektrody 20x20cm wychodzi pasek o szerokości 1cm). Prąd kumuluje się więc w wąskim pasku i bardzo cienkim - kolektory mają grubość 8-16  $\mu\text{m}$ . Stąd okolice wyprowadzenia są najbardziej narażone na przegrzanie i potencjalny zapłon (początek mechanizmu tzw. thermal runaway).

# PIERWSZE ŁADOWANIE I WARUNKI ŁADOWANIA

Pierwsze ładowanie zwykle wykonuje się prądem na poziomie C/20, ponieważ większy prąd nie pozwoli na poprawną interkalację i całkowite wypełnienie wolnych miejsc w objętości anody.

Pierwsze ładowanie (i następne, o ile w warunkach kontrolowanych) wykonuje się metodą CC-CV, czyli „constant current, constant voltage”. Najpierw ładuje się prądem o stałym natężeniu aż do osiągnięcia ustalonego progu napięcia (cut-off voltage), np. 4,2 V. Następnie ładuje się przy stałym napięciu przy spadającym prądzie aż do spadku prądu poniżej ustalonej granicy (zwykle jako zakończenie programu przyjmuje się spadek prądu do poziomu równego C/50).



# SPRAWNOŚĆ KULOMBOWSKA VS SPRAWNOŚĆ CAŁKOWITA

Sprawność kulombowska, którą najczęściej posługują się elektrodycy, testujący elektrody i producenci ogniw, to procent ładunku zużywanego na reakcje ładujące lub rozładowujące ogniwo. W ogniwach Li-ion sprawność ta zwykle przekracza 99% (pomijając ew. pierwszy cykl, w którym tworzy się SEI), natomiast w ogniwach NiMH czy NiCd jest wyraźnie niższa (~95%), ponieważ zachodzą w nich reakcje uboczne.

# SPRAWNOŚĆ KULOMBOWSKA VS SPRAWNOŚĆ CAŁKOWITA

Sprawność całkowita („round-trip efficiency”) ogniwa jest w rzeczywistości niższa niż by to wynikało z CE (Coulombic efficiency). Sprawność liczona z odzyskanej energii z ogniwa (w czasie rozładowania) podzielona przez energię włożoną (w czasie ładowania) uwzględnia straty cieplne, rosnące nadpotencjały, jak i straty wynikające z tworzenia i utrzymywania gradientu stężeń. Zwłaszcza te ostatnie zaczynają mieć znaczenie przy dużych prądach (szybkie ładowanie/rozładowanie) oraz impulsowych rozładowaniach.



# Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

## *Elektromobilność dla nauczycieli*

Dziękuję  
za uwagę



Politechnika Warszawska



Ministerstwo  
Edukacji Narodowej

Realizowane w ramach  
umowy nr MEN/2024/DKZ/2121