



### Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Ratyńskiego

pt. „Wyznaczenie parametrów elektrochemicznych nowych elektrod krzemowo-litowych”

Praca doktorska Pana mgr inż. Macieja Ratyńskiego pod w/w tytułem powstała pod kierunkiem promotora prof. dr hab. Andrzeja Czerwińskiego przy współudziale promotora pomocniczego dr Bartosza Hamankiewicza na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego w Pracowni Elektrochemicznych Źródeł Prądu.

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy niezwykle ważnych zagadnień magazynowania energii elektrycznej, a mianowicie poszukiwania nowych rozwiązań chemicznych dla anod ogniw litowo jonowych (LiBs). Zapotrzebowanie na elektrody o wyższej pojemności ładunku, niż pojemność powszechnie stosowanego grafitu, wynika z konieczności sprostania nowym wyzwaniom w obszarze magazynowania i konwersji energii w obliczu obserwowanych zmian klimatycznych. Badania w kierunku opracowania nowych anod ogniw litowo-jonowych prowadzone są na całym świecie. Obserwuje się bardzo duże zainteresowanie wykorzystaniem do tego celu krzemu w różnych formach morfologicznych, najczęściej w postaci nanostruktur uwięzionych w otoczkach węglowych, aby sprostać objętościowym zmianom materiału elektrody w trakcie procesu ładowania i rozładowania. Liczba artykułów w bazie WOS dla hasła „Silicon anode” i „Lithium ion batteries” to 4943, a ostatnich pięciu latach to 2982 z wysokim indeksem Hirsha ( $H=75$ ). Ogromny wysiłek badaczy i środki finansowe kierowane są na uzyskanie materiału elektrodowego zapewniającego wysoką pojemność ładunku, stabilność w trakcie wielocyklicznego ładowania przy zachowaniu lepszych parametrów bezpieczeństwa użytkowania ogniw litowo-jonowych. Obserwujemy kolejny etap rozwoju ogniw wtórnych LiBs, pracujących w zakresie napięć uniemożliwiających użytkowanie elektrolitów wodnych. Z ogniw, jako takich ludzkość korzysta od dawien dawna. Jednak dopiero rozwiązania w zakresie elektrolitów niewodnych, zapoczątkowane w latach 60. XX wieku, dały początek tworzeniu układów o napięciu roboczym ponad 3 V. Najpierw dla ogniw pierwotnych (*ang. primary cells*), i kolejno, w wyniku opanowania katod interkalowanych (dzięki pionierom, godnym nagrody Nobla, w osobach B.C.H. Steele’go, J.B. Goodenough’a i M.S. Whittingham’a), dla ogniw wtórnych (*ang. secondary batteries*). Z uwagi na bezpieczeństwo pracy ogniw litowych, lit metaliczny zastąpiono grafitem. Pierwotna nazwa takiego ogniwa wtórnego *ang. rocking chair batteries*, choć sugestywnie oddająca istotę działania, nie przyjęła się. Cena bezpieczeństwa to nieomal dziesięciokrotne obniżenie pojemności teoretycznej anody w ogniwach litowo-jonowych wprowadzonych na rynek w 1991 roku przez firmę Sony. Akumulatory litowo-jonowe (LiBs) zdominowały dzisiaj rynek baterii do przenośnych urządzeń elektronicznych. Stały się podwaliną rewolucji cyfrowej, która na stałe zmieniła funkcjonowanie społeczeństw. Początkowo LiBs zaspokajały zapotrzebowania na energię dla takich urządzeń jak telefon komórkowy, komputer, kamery cyfrowe – urządzenia tak zwanych *ang. 3Cs Technologies*. Obecnie akumulatory litowo-jonowe są użytkowane powszechnie w najróżniejszych dziedzinach życia, od wymienionych 3Cs po systemy UPS czy pojazdy elektryczne. **Praca doktorska Pana mgr Macieja Ratyńskiego należy do nowego nurtu badań nad udoskonaleniem ogniw litowo jonowych.** Wybór krzemu wynika z wysokiej pojemności właściwej elektrody w reakcji tworzenia stopu z litem.



Problem do rozwiązania dla Doktoranta leży w opracowaniu składu warstw elektrodowych w taki sposób, aby nastąpiło skuteczne buforowanie zmian objętości składnika elektroaktywnego. Obok aspektu aplikacyjnego, na zainteresowanie tematyką wysokoenergetycznych źródeł prądu LiBS wpływają cele czysto poznawcze, praca łączy w sobie zagadnienia chemii i fizykochemii nanomateriałów, zagadnienia z zakresu mechaniki i inżynierii materiałów oraz elektrochemii środowisk wodnych i przede wszystkim środowisk niewodnych.

Wszystkie dokonywane przez Doktoranta wybory, czy to materiałów i ich oddziaływania na środowisko, czy sposobu ich obróbki, jak i wyznaczenia wielkości fizykochemicznych, prowadzone były w kontekście użycia nowym rozwiązań w urządzeniach komercyjnych. Doktorat został przeprowadzony w ramach projektu międzynarodowego „*Silicon based materials and New processing Technologies for improved lithium-ion batteries*” (SINTBAT) w programie Horyzont 2020. Projekt realizowany jest przez 9 ośrodków EU, w tym przez Uniwersytet Warszawski. Zadaniem partnera UW było „*Wyznaczenie parametrów elektrochemicznych materiału aktywnego elektrody ujemnej oraz gotowych elektrod. Testy pojemności i odporności cyklicznej elektrod krzemowych*”. Osobą kierującą projektem jest Profesor Andrzej Czerwiński, promotor w omawianym przewodzie doktorskim.

Autor dysertacji za cel swojej pracy obrał poznanie i opisanie procesów elektrochemicznych zachodzących podczas ładowania i rozładowania elektrod krzemowych poprzez wyznaczenie szeregu parametrów elektrochemicznych dla elektrod o zmieniających się parametrach geometrycznych w trakcie polaryzacji oraz optymalizację składu warstw elektrodowych i modyfikację podłoża w kierunku zwiększenia odporności w trakcie cykli ładowania i rozładowania. Główny cel to wyznaczenie podstawowych parametrów reakcji litu z krzemem, takich jak współczynnik dyfuzji litu, opór elektryczny, rezystancja warstwy elektrolitu stałego granicy faz (SEI), rezystancja przeniesienia ładunku w odniesieniu do rzeczywistych wielkości powierzchni elektroaktywnej zmieniającej się w trakcie tworzenia/rozpadu stopu  $\text{Li}_x\text{Si}$ . Wyznaczenie parametrów reakcji litu z krzemem pozwoliło na ich wykorzystanie w projekcie SINTBAT w uniwersalnych programach symulujących pracę ogniw z anodą krzemową. Ogromną wagę stanowi zatem odniesienie wyznaczonych parametrów fizykochemicznych do rzeczywistej wielkości powierzchni elektroaktywnej użytego nanomateriału krzemowego. Samo sformułowanie założeń i celu badań zajęło Doktorantowi 5 stron, co dobitnie potwierdza **ponadstandardowy zakres zagadnień**, których wykonania podjął się Autor. Podkreślić trzeba, że zadania zrealizował.

Badane materiały elektrodowe zawierały dwa składniki krzem i węgiel o elektroaktywności w podobnym zakresie potencjałów. Badania musiały być przeprowadzone z dużą starannością i dociekliwością, aby umożliwiło to oznaczenie wielkości fizykochemicznych (np. dotyczy to wyznaczenia chemicznego współczynnika dyfuzji litu w krzemie). Pan mgr Maciej Ratyński przeprowadził systematyczne badania dwóch grup elektrod, a mianowicie elektrod komercyjnych wytworzonych przez firmę VARTA Micro Innovation GmbH z krzemowym składnikiem aktywnym produkcji firmy 3M Company. Drugą grupę elektrod stanowiły elektrody zawierające nanocząstki Si, przygotowane we własnym zakresie.

Praca doktorska liczy 297 stron, 118 rysunków, 26 tabel, 70 równań reakcji chemicznych i równań funkcji matematycznych. Bibliografia (część nr 6) liczy pokaźny zbiór 319 odnośników, z czego tylko 2 odnoszą się do stron internetowych. Praca pod względem edytorskim jest przygotowana z dużą starannością. Podzielona jest na trzy, dobrze wyważone,



główne rozdziały: Część literaturową (2), Metodykę (3) i Część eksperymentalną (4). Główne części poprzedza pięciostronicowy rozdział „Założenia i cel pracy” (1) oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Wnioski zawarto w rozdziale „Podsumowanie” (część 5) liczącym 5 stron.

Część literaturowa (2) składa się z 4 podrozdziałów. Autor przedstawił w nich aktualny stan wiedzy dotyczący budowy ogniw litowo-jonowych. W rozdziałach 2.1 do 2.3. osobno scharakteryzowano poszczególne materiały katodowe, elektrolity, i najwięcej uwagi, zgodnie z celem pracy, poświęcono materiałom anodowym ogniw litowo-jonowych. Autor scharakteryzował elektrody interkalacyjne (LTO, grafit, inne), anody stopowe i anodowe materiały konwersyjne. Podrozdział 2.4 w całości dotyczy krzemu jako materiału anodowego. Jest to szczegółowe kompendium na temat elektrochemicznego procesu wprowadzania litu do struktury krzemu. Autor na podstawie dostępnych najnowszych danych literaturowych omawia mechanizm reakcji tworzenia stopu  $\text{Li}_x\text{Si}$ , wskazuje na generowane naprężenia, dalej omawia złożone etapy kontrolujące szybkość procesu. Krytyczna analiza wyników literaturowych dotyczących mierzonych, efektywnych (ang. *apparent*) chemicznych współczynników dyfuzji doprowadziła do wniosku o konieczności odniesienia wyznaczonych wielkości do rzeczywistych parametrów geometrycznych elektroaktywnego materiału. W podrozdziałach 2.4.5 i 2.4.6 przedstawiono opis termodynamiczny i wyniki eksperymentalne procesów w ogniwie prowadzących do naprężeń mechanicznych. W opisie tym Autor nie wzmiankuje o udziale elektrolitu stałego granicy faz – ten wątek jest omówiony oddzielnie. Rozdział 2.4.7. opisuje przykłady literaturowe modelowania naprężeń, gdzie krytycznie przestudiowano proponowane ujęcia problemu zmiany naprężeń w funkcji zawartości litu. Rozdział 2.4.8 poświęcony jest elektrochemii krzemu w ogniwie Li-jon. Przywołano krzywe polaryzacyjne elektrod zawierających krzem. Autor stwierdza, że na podstawie istniejących interpretacji obraz reakcji elektrochemicznej jest niespójny. Wywodzi, że obecność dwóch pików anodowych i katodowych nie może być wynikiem postulowanego w literaturze mechanizmu, choć obraz jakościowo jest koherentny, str. 93-94. W kolejnym rozdziale Autor przedstawia szczegółowo informacje na temat tworzenia SEI na powierzchni krzemu jako wynik rozkładu składników elektrolitu. Spoiwa, jako niezbędny składnik elektrod, omówiono w kontekście ich oddziaływań z podłożem kolektora elektronowego i składnika elektroaktywnego. Tabelaiczny zestaw wyników wybranych elektrod krzemowych ilustruje kluczową rolę morfologii w pojemności maksymalnej, stabilności w trakcie cykli tzw. „odporności cyklicznej”. Autor w Podsumowaniu części literaturowej wskazuje na przeciwstawne efekty wynikające z obniżenia rozmiaru ziarna krzemu i jako obiecujący sposób na zapewnienie wysokiej cykliczności elektrod podaje wykorzystanie kompozytów krzemu z innymi materiałami. Celowość poszukiwań anod o wysokiej pojemności do 1000 mAh/g przy obecnych materiałach katodowych daje zysk 33%, co potwierdza zdaniem Autora (i słusznie), „*że krzem w roli materiału aktywnego elektrody ujemnej pozwala na znaczący wzrost pojemności właściwej ogniw Li-jon*” str. 120.

**Bardzo wysoko oceniam część literaturową.** Opracowanie to ma ogromny walor poznawczy, i jego rozpowszechnienie jest wskazane. Zebrana wiedza jest oparta na licznych danych literaturowych (285), przekazanych w przemyślany sposób. Stanowi unikatowy przegląd, warty przygotowania artykułu. Pan Maciej Ratyński formułuje opinie w sposób bardzo dojrzały, wykazując zacięcie badawcze i naukowy krytycyzm.

Rozdział 3 pod nazwą Metodyka (od str. 123 do 143) zawiera opis procedur, technik i metod, spis materiałów. Szczegółowo przedstawiono budowę naczynek elektrochemicznych, uzasadniono konieczność pracy w układzie trójelektrodowym (z czym każdy się zgodzi). Przedstawione elektrochemiczne metody pomiarowe to chronopotencjometria, z tym że czas



przejścia  $\tau$  w tej metodzie nie jest tą wartością, która wynika z rys. 35. Odcinek wyznaczony w przecięciu stycznych to czas przejścia reakcji przeniesienia ładunku w chronopotencjometrii. Natomiast czas mierzony w eksperymencie ładowania-rozładowania niekoniecznie jest tą wartością, jak to zaznaczono na rys.35.

Krzywe ładowania/rozładowania posłużyły Doktorantowi do wyznaczenia szeregu istotnych wielkości takich jak *i*) potencjał wprowadzania/wyprowadzania litu (tzw. litacji/delitacji), *ii*) wielkość histerezy potencjału, *iii*) pojemność właściwą, *iv*) wydajność prądową, *v*) odporność na wielocykliczne ładowanie i rozładowanie, *vi*) przebieg krzywych zmian potencjału w funkcji pojemności/ stopnia rozładowania. Metoda chronowoltamperometryczna posłużyła do wyznaczania chemicznego współczynnika dyfuzji jonów litu w materiale aktywnym elektrody i identyfikacji pików prądowych. Metoda elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej (EIS) jest tu narzędziem do wyznaczenia zarówno rezystancji warstwy SEI, rezystancji przeniesienia ładunku oraz współczynników dyfuzji. Autor dyskutuje konieczność użycia elementu stałofazowego *CPE* w przeprowadzanych analizach widm impedancyjnych i stwierdza, że jedynie kroplowa elektroda rtęciowa nie wymaga użycia do opisu impedancji elementu *CPE*, z czym można by polemizować (P.G. Bruce *et al.* J. Electroanal. Chem. 384 1995 85, G.J. Brug, *et al.* J. Electroanal Chem. 176 1984 275), ale nie o tym ten doktorat.

Najważniejsza część rozprawy, czyli wyniki własne Doktoranta zawarte są w rozdziale zatytułowanym Część Eksperymentalna, liczącym 128 stron, 76 rysunków (od 42 do 118) i 19 tabel (od 6 do 25). Doktorant przeprowadził badania elektrod krzemowych dla dwóch grup materiałów. Pierwsza grupa to stopowy materiał wytworzony przez firmę 3M. Druga grupa to nanocząstki krzemu wytworzone samodzielnie. Charakterystyka materiału firmy 3M metodami SAXS (wykonanych w CEA) i XRD pozwoliła Doktorantowi na identyfikację struktury, gdzie ziarna krzemowe są poprzepłatane krzemkiem (a nie „krzemikiem”, str 123) żelaza  $FeSi_2$  o imponująco niskich rozmiarach domen (5-10 nm). Stop został użyty do przygotowania szeregu elektrod (SINT-A, SINT-B, SINT-C) o różnej zawartości materiału stopowego 3M. Testowano różne spoiwa polimerowe z grupami karboksylowymi i hydroksylowymi (w tym CMC, PVDF), stosowane w elektrodach z nanokrzemem i węglem Vulcan (serie Si-01, Si-04, Si-05). Spośród badanych elektrod najlepsze wyniki osiągnięto dla elektrod Si-04/Si05, zawierających nanokrzem. Imponujące parametry to maksymalna pojemność 1700-2300 mAh/g przy nieznacznym spadku w kolejnych cyklach. Najniższy spadek pojemności w kolejnych cyklach zarejestrowano dla elektrody modyfikowanej oksydacyjnie Si-OH-2.

**Bardzo wysoko oceniam przedstawione wyniki pracy Doktoranta** nad obiema grupami materiałów. Wyniki zostały przeanalizowane w oparciu o doniesienia literaturowe i badania własne. Jest tu ogrom cennych obserwacji i nowych interpretacji o bardzo szerokim spektrum, od przydatnych do wykorzystania w modelowaniu procesu tworzenia stopu litu z krzemem do pozwalających stworzyć warunki zapewniające kontakt elektryczny warstw z kolektorem miedziowym. Na szczególną uwagę zasługują niektóre z nich:

- a) elektrochemiczny sposób modyfikacji powierzchni kolektora miedziowego poprzez wytworzenie porowatej wierzchniej warstwy miedzi, z umiejętnym ograniczeniem wpływu zmian energii powierzchniowej nowego podłoża na adhezję pasty elektrodowej, co przekłada się bezpośrednio na zwiększoną stabilność w trakcie cykli ładowania/rozładowania mierzoną jako tzw. „odporność cykliczna”,



- b) wykazanie zależności pomiędzy rodzajem użytego spoiwa polimerowego a stabilnością elektrody, wykazanie wpływu nacisku na generowanie naprężenia blokującego całkowitą tzw. „litację”, wyjaśnienie zjawiska aktywacji obserwowanego w przebiegu CV i krzywych ładowania / rozładowania w kolejnych cyklach,
- c) wykazanie, że rezystancja przeniesienia ładunku zmienia się z kolejnym cyklem, i wyjaśnienie obserwowanych zmian poprzez zaproponowanie złożonego mechanizmu reakcji elektrodowej obciążonej naprężeniami w ziarnach krzemu oraz zjawiskiem powstawania i zaniku tzw. „frontu reakcji” w ciele stałym,
- d) wskazanie rozmiaru ziaren dla których stres nie powinien powodować rozpadu ziarna,
- e) wyznaczenie efektywnego chemicznego współczynnika dyfuzji litu dwiema metodami EIS i CV oraz podjęcie cennej próby wyznaczenia wielkości  $D$  w odniesieniu do rzeczywistej powierzchni elektroaktywnej, wyznaczonej w oddzielnym badaniu,
- f) wykazanie zależności oporu warstwy elektrolitu stałego granicy faz od liczby cykli ładowania / rozładowania, szczegółowe wyjaśnienie zjawiska w kontekście stopnia zawartości litu, obecności związków modyfikujących interfejs i wskazanie na konieczność wstępnego formatowania elektrod,
- g) niezwykle cenną adaptację znanych powszechnie zależności elektrochemicznych, wyprowadzonych w oryginale dla elektrod stałych o stałej powierzchni  $A$ , do opisu zjawisk na elektrodach zmieniających swą geometrię w trakcie reakcji, w tym zaproponowanie wprowadzenia bezwymiarowego współczynnika  $L$  do równań kinetycznych,
- h) doprowadzenie powierzchni nanocząstek Si do stabilności w kontakcie z pozostałymi składnikami elektrody poprzez prosty zabieg oksydacji krzemu, co przyczyniło się do znacznej poprawy funkcjonowania bardziej spójnej elektrody.

Rozprawa mgr. M. Ratyńskiego choć zawiera dużo wartościowych, bardzo dobrze opracowanych danych, pozostawia jednak pewne pole do dyskusji, uwag i pytań. Z recenzenckiego obowiązku kieruję moje uwagi do Autora poniżej.

- a) Współczynnik dyfuzji wyznaczany metodami elektrochemicznymi to chemiczny współczynnik dyfuzji (ang. *chemical diffusion coefficient*), natomiast metoda znaczników izotopowych [221] i inne pozwalają na wyznaczenie współczynnika dyfuzji własnej (*self diffusion coefficient*), stąd dane przedstawione w pracy [220] i na rysunku 12 należy analizować w kontekście tych dwóch różniących się wielkości fizycznych, które wiąże zależność zawierająca aktywność i koncentrację dyfundującego indywiduum (patrz np. 1) S Mrowiec Teoria Dyfuzji w stanie stałym PWN 1989, 2) W. Bogusz, F Krok, Elektrolity stałe WNT 1998, 3) P.G. Bruce *et al.*, SSI 57 (1992) 353).
- b) Stosując EIS do wyznaczenia chemicznego współczynnika dyfuzji Doktorant posługuje się funkcją Warburga, podczas gdy w materiale elektrody są niejako dwa

- strumienie dyfundujących jonów: w węglu i w krzemie (co można stwierdzić na podstawie analizy krzywych CV). Czy wyznaczone wielkości są miarą obu tych strumieni, czy odnoszą się do jednego z nich. Jak wpływa zmiana zawartości węgla na wyznaczone wielkości chemicznego współczynnika dyfuzji dla badanych elektrod?
- c) Doktorant wykazał, że modyfikacja kolektora miedziowego pozwala osiągnąć lepsze parametry pracy ogniwa. Moje pytanie odnosi się to zagadnień utylitarnych. Czy modyfikowana folia Cu jest odporna mechanicznie i czy mogłaby stanowić produkt komercyjny, zważywszy, że na rynku powinna pojawić się w rolkach?
  - d) W podpisie pod rys. 60 jest błąd, tlenek miedzi (I) raczej nie jest żółty.
  - e) Często używany w równaniach znak typograficzny asterysk „\*” niepoprawnie zastępuje znak mnożenia.
  - f) Wielkość czcionki użyta dla wyników analizy statystycznej w polu wykresów jest zbyt mała, poniżej 8 punktów.
  - g) Rys. 41 jest wklejony bez podania źródła.

Powyższe uwagi nie umniejszają bardzo wysokiej oceny pracy doktorskiej. W mojej opinii rozprawa świadczy dobitnie, że Doktorant ma wszelkie predyspozycje do pracy naukowej. Wykazał wysokie umiejętności eksperymentalne w zakresie elektrochemii środowisk niewodnych i wodnych, w zakresie preparatyki elektrochemicznej, opanował wiele technik pomiarowych ze szczególnym wskazaniem na metody elektrochemiczne. Ponadto, jakość przeprowadzonych analiz wyników własnych i doniesień literaturowych świadczy o dociekliwości i umiejętności logicznego, kreatywnego wnioskowania. Doktorat osadzony w elektrochemii wymagał wiedzy z różnych dziedzin jak: fizyka, chemia, mechanochemia, fizykochemia nanomateriałów, chemia powierzchni, która umożliwiła zrozumienie zjawisk fazowych i na granicy faz polaryzowanych materiałów elektrodowych pracujących elektrochemicznych źródeł prądu i doprowadziła do konkurencyjnych rozwiązań aplikacyjnych w postaci nowego materiału krzemowego z modyfikowaną powierzchnią. Pan mgr Maciej Ratyński jest współautorem 5 publikacji z JCR oraz współtwórcą w trzech zgłoszeniach patentowych. Uczestniczył w realizacji trzech projektów badawczych w tym najważniejszy z punktu widzenia realizacji doktoratu to projekt międzynarodowy SINBAT. W mojej opinii **przedstawiony doktorat jest bardzo ważkim opracowaniem, potwierdzającym przynależność ośrodka UW do elity wśród wykonawców prac badawczych grantu europejskiego w programie Horyzont 2020.**

Podsumowując moją recenzję z całym przekonaniem stwierdzam, że spełnione są wszystkie kryteria ustawowe stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk chemicznych. Zatem wnoszę o dopuszczenie Pana mgr Macieja Ratyńskiego do publicznej obrony rozprawy

Anne Lisoda Olszt



## **Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr Macieja Ratyńskiego**

*„Wyznaczanie parametrów elektrochemicznych nowych elektrod krzemowo-litowych ”*

Biorąc pod uwagę zdecydowanie ponadstandardową, jakość rozprawy, popartą 5 publikacjami w recenzowanych międzynarodowych czasopismach z listy JCR i zgłoszeniami patentowymi, z przekonaniem wnioskuję o jej wyróżnienie. Praca ta jest daleko więcej niż bardzo dobra.

Na sukces tej rozprawy składa się kilka czynników: i) predyspozycje Doktoranta do pracy naukowej; ii) publikacja wyników poszczególnych etapów prowadzonych badań w postaci raportów z realizacji grantu i artykułów; iii) udział w realizacji doskonale zdefiniowanego i zbieżnego z tematyką doktoratu projektu badawczego Horyzont 2020 SINTBAT (Silicon based materials and new procesing technologies for improved batteries) H2020-NMP-205-two-stage, nr UE 685716 jak i grantów krajowych NCN OPUS UMO2014/15/B/ST5/02118 oraz NCBiR TECHMASTRATEG 1/347431/14/NCBR/2018, iv) jakość grupy badawczej, w której realizowany jest doktorat, w szczególności jakość opieki ze strony promotora i promotora pomocniczego.

Udział w realizacji międzynarodowego projektu badawczego na pewno pomógł w zapewnieniu wysokiej jakości pracy doktorskiej. Najwyższą jakością realizowanego planu badawczego jest ściśle powiązanie aspektów aplikacyjnych z badaniami podstawowymi. W obu tych obszarach Doktorant osiągnął zamierzone, trudne cele. W efekcie mamy opracowaną nową metodologię badań elektrod zmieniających objętość w trakcie polaryzacji i jest też konkretne rozwiązanie aplikacyjne, a mianowicie anoda krzemowa o udokumentowanej pojemności i stabilności trudno osiągalnej tak niskimi kosztami wytwarzania.

Odnosząc się do bezpośrednio do pracy doktorskiej, chciałabym podkreślić, że szczególnie doceniam dwa jej aspekty. Po pierwsze, realizacja tej pracy wymagała zdobycia zaawansowanej wiedzy dotyczącej zagadnień z zakresu elektrochemii środowisk niewodnych, nanotechnologii, fizykochemii nanomateriałów i mechanochemii. Doktorant znakomicie sobie z tym poradził, co znalazło odzwierciedlenie m.in. w przedstawionych analizach otrzymanych wyników. Po drugie bardzo wysoko oceniam fakt, że Doktorantowi udało się połączyć prowadzone na wysokim poziomie badania podstawowe z wyżej wymienionych obszarów z jasno i precyzyjnie wyznaczonymi zadaniami aplikacyjnymi w ramach projektu SINTBAT i zrealizować oba.

*Anna Lisowska-Oleksiak*