

Białystok, 12 lutego 2022 r.

Prof. dr hab. Krzysztof Winkler
Wydział Chemii
Uniwersytet w Białymstoku
e-mail: winkler@uwb.edu.pl

**Opinia o osiągnięciach naukowych, dydaktycznych i organizacyjnych
Pani dr Agnieszki Ewy Łękawy-Raus, w związku z postępowaniem o nadanie
stopnia doktora habilitowanego**

Podstawą wykonania recenzji jest decyzja Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 7 grudnia 2021 r. o wyznaczeniu składu komisji habilitacyjnej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego dr Agnieszce Łękawie-Raus w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika z moją osobą wskazaną jako recenzent. Recenzji dokonałem w szczególności kierując się Art. 221 ust. 8 i Art. 219 ust 1 pkt. 2. ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018. W recenzji zawarłem również opinię o wniosku bazując na własnym doświadczeniu, ale też odwołując się do zasad zwyczaju i tradycji akademickiej.

W roku 2008 Pani Agnieszka Ewa Łękawa-Raus uzyskała stopień magistra inżyniera, broniąc pracę na temat „*Application of spin valve giant magnetoresistance sesors in bioelectromagnetism*”. Praca była wynikiem wspólnego projektu prof. Henryki Stryczewskiej z Politechniki Lubelskiej oraz prof. Sotoshi Yamada z Kanazawa University. W ramach pracy magisterskiej Kandydatka odbyła półroczny staż naukowy w Japonii. Przedmiotem badań były pola magnetyczne o małym natężeniu symulujące pracę ludzkiego nerwu obwodowego.

Dalsza działalność naukowa Kandydatki związana jest z University of Cambridge w Wielkiej Brytanii. Krótki 3-miesięczny oraz przede wszystkim dłuższy 6-miesięczny staż na Department of Materials Science and Metallurgy rozpoczął Jej naukową przygodę z przewodnikami tworzonymi z nanorurek węglowych. Zagadnienia te były przedmiotem Jej rozprawy doktorskiej zatytułowanej „*Carbon nanotube fibers for electrical wiring applications*” realizowanej na Trinity College, University of Cambridge w ramach stypendium doktorskiego, a obronionej w 2013 roku. Promotorami tej pracy byli prof. Krzysztof Koziol oraz prof. Alan Wingle z University of Cambridge. Współpraca z profesorem Koziolem, bardzo zresztą owocna, będzie trwała przez szereg następnych lat. Wynikiem pracy doktorskiej oraz dalszych badań, prowadzonych w ramach stypendiów podoktorskiego na tym samym wydziale, było szereg prac opublikowanych w liczących się czasopismach z listy filadelfijskiej. Zdecydowana większość tych publikacji dotyczy zagadnień związanych z przewodzącymi

włóknami z nanorurek węglowych. Obejmują one zarówno obszar badań podstawowych jak i pokazują możliwości ich praktycznego zastosowania.

Pani Agnieszka Ewa Łękawa-Raus była współautorką pracy, w której badano wpływ odkształcenia nanorurek węglowych na ich właściwości przewodzące (*ACS Nano* 8 (2014) 11214). Porównanie wyników eksperymentalnych oraz obliczeń teoretycznych pozwoliło opracować model wyjaśniający obserwowane zmiany przewodnictwa związane z odkształceniami mechanicznymi. W innej pracy opublikowanej w *Matter. Lett.* 133 (2014) 186 wskazywano na możliwości podwyższenia przewodnictwa włókien poprzez wprowadzenie w ich strukturę nanocząstek metali, na przykład srebra. Badania zależności przewodnictwa od temperatury, w szerokim zakresie temperatur, pozwoliły opracować model opisujący i wyjaśniający zmiany przewodnictwa włókien tworzonych z nanorurek węglowych modyfikowanych w różnych warunkach. Zagadnienia te były przedmiotem szeregu artykułów opublikowanych w *Scripta Mater.* 106 (2015) 34, *Sci. Rep.* 8 (2018) 14332, *Carbon* 84 (2015) 118 oraz *Carbon* 87 (2015) 18. Praktyczne wykorzystanie włókien z nanorurek węglowych wymaga pokrycia ich warstwą izolacyjną. Zagadnieniom tym poświęcona była praca opublikowana w *Carbon* 68 (2014) 597. Pani Agnieszka Łękawa-Raus, będąca pierwszą współautorką tego artykułu, wykazała, że pokrycie przewodu z nanorurek węglowych odpowiednio dobranym materiałem polimerowym nie prowadzi do istotnych zmian przewodnictwa włókna. Takie izolowane włókna mogą znaleźć elektrotechnologiczne zastosowania, na przykład zastępując uzwojenia metaliczne w transformatorach (*Adv. Funct. Mater.* 24 (2014) 619). Zagadnienia związane zarówno z aspektami teoretycznymi jak i praktycznymi dotyczącymi przewodnictwa włókien z nanorurek węglowych zostały podsumowane w krótkiej pracy przeglądowej opublikowanej w *Scripta Mater.* 131 (2017) 112. Pani Łękawa-Raus jest również współautorką obszernej pracy przeglądowej opublikowanej w *Adv. Funct. Mater.* 24 (2014) 3661, która podsumowuje okres nieco wcześniejszych badań przewodników z nanorurek węglowych.

Oprócz zagadnień związanych z przewodnictwem włókien z nanorurek węglowych Habilitantka brała udział w szeregu innych projektów związanych z praktycznym zastosowaniem włókien z nanorurek węglowych. Jest Ona na przykład współautorką pracy dotyczącej tworzenia lutu na bazie włókien z nanorurek węglowych pozwalającego spajać materiały węglowe (*ACS Nano* 9 (2015) 8099).

W ostatnim okresie pobytu w Cambridge Pani Łękawa-Raus rozpoczyna badania możliwości pokrycia materiałów nieprzewodzących włóknami z nanorurek węglowych i właściwościami takich układów kompozytowych. Zagadnienia te będą przedmiotem jej badań na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, gdzie zostaje zatrudniona w 2016 r. na stanowisku adiunkta naukowego. Tematyka ta jest w znacznej mierze podstawą jej osiągnięcia naukowego w tym przewodzie habilitacyjnym, którym jest monografia naukowa zatytułowana „Makroskopowe przewodniki elektryczne z nanorurek węglowych”. W dużej mierze jest ona oparta o wyniki badań prezentowane w artykułach, których współautorką jest Habilitantka. Omawiając osiągnięcie naukowe skupię się przede wszystkim na opisie i ocenie oryginalnych publikacji Pani Łękawy-Raus będących podstawą tej monografii. O części tych prac, powstałych podczas pobytu Habilitantki na University of Cambridge, wspominałem wcześniej. Większość jednak prac, będących podstawą tej monografii, przeprowadzona została po

uzyskaniu przez Panią Łękawę-Raus stanowiska adiunkta na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

W monografii autorka skupia się przede wszystkim na właściwościach przewodzących materiałów zbudowanych z nanorurek węglowych. Zależą one od rodzaju nanorurek, sposobu ich łączenia w makroskopowe włókna, sposobu i zakresu modyfikacji ich powierzchni. W pierwszej części monografii Pani Łękawa-Raus przedstawia rodzaje nanorurkowych struktur przewodzących oraz omawia sposoby ich wytwarzania. Opisuje też parametry takich makrostrukturalnych układów wpływające na ich właściwości elektryczne. W dalszej części opisane są właściwości elektryczne struktur składających się z samych nanorurek węglowych lub zawierających nanorurki węglowe. Autorka dzieli je na struktury jedno-, dwu- i trójwymiarowe. Opisując struktury 1D Autorka przedstawia metody wytwarzania włókien z nanorurek węglowych oraz omawia sposoby poprawy ich przewodności elektrycznej. Ten podrozdział w dużej mierze opiera się na wynikach badań własnych Habilitantki opublikowanych we wspomnianej już pracy *Sci. Rep.* 8 (2018) 14332 oraz w publikacji *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11(2019) 33207. Pierwszy z wymienionych artykułów dotyczy wpływu sposobu oczyszczania włókien z nanorurek węglowych oraz domieszkowania odczynnikami o charakterze utleniającym (H_2O_2 , $HClO_4$, H_2SO_4 , Br_2) na właściwości przewodzące tych materiałów. Badania autorów tego artykułu pozwalają określić optymalne warunki przygotowania włókien węglowych zapewniające maksymalne przewodnictwo. W pracy tej brakuje mi jednak jakościowego wytłumaczenia obserwowanych zmian rezystancji nanorurek, poddanych oczyszczaniu i domieszkowaniu. Przedmiotem badań pracy opublikowanej w *ACS Appl. Mater. Interfaces* był kompozyt grafenu oraz nanorurek węglowych. Również w tym przypadku obserwowano istotne zmiany przewodnictwa materiału kompozytowego poddanego działaniu różnych związków domieszkujących. Wykazano, że obecność grafenu w istotny sposób zwiększa efektywność domieszkowania. Obliczenia teoretyczne pokazały, że obecność grafenu zmienia strukturę elektronową układu prowadzącą do poprawy właściwości przewodzących materiału. Dodatkowo, domieszkowanie ma również bardzo pozytywny wpływ na te parametry. Opis wyników badań przedstawionych w tych dwóch artykułach z listy filadelfijskiej uzupełniają wyniki opublikowane w materiałach konferencyjnych. Dotyczą one wpływu fluorenowej pochodnej tetracyjanoquinodimetanu oraz odczynnika Fentona na przewodnictwo włókien z nanorurek węglowych.

W dalszej części rozdziału poświęconego strukturom 1D z udziałem nanorurek węglowych Autorka przedstawiła zagadnienia związane z izolacją włókien węglowych. Praktyczne wykorzystanie przewodników wymaga odpowiedniej izolacji elektrycznej. Badania w tym obszarze zapoczątkowała praca wykonana jeszcze podczas Jej pobytu na University of Cambridge, a opublikowana w *Carbon* 68 (2014) 597. Takie izolowane przewody z nanorurek węglowych zostały wykorzystane jako uzwojenia w transformatorach zastępując tradycyjne uzwojenia z drutu miedzianego (*Adv. Funct. Matter.* 24 (2014) 619). Zespół kierowany przez Habilitantkę opracował również metodę pokrywania włókien nanorurkowych polimerami tekstylnymi (*Carbon* 172 (2021) 334). Układy takie mogą znaleźć szereg praktycznych zastosowań w tekstronice, o czym pisze Kandydatka w końcowym podrozdziale części monografii poświęconej strukturom 1D.

Kolejna część monografii poświęcona jest dwuwymiarowym materiałom węglowym. Znaczącym wkładem Autorki w tą tematykę były badania pokryć powierzchni drewnianych

warstwami nanorurek węglowych. Stosując różne metody powierzchniowej modyfikacji uzyskiwano przewodzące bądź półprzewodzące warstwy nanorurek węglowych na powierzchniach materiałów drewnianych i drewnopochodnych. Zagadnieniom tym poświęcona jest praca opublikowana w *Composites A* 127 (2019) 105656, której wyniki opisane są dokładniej w omawianym rozdziale. Dobrze przylegające do materiału drewnianego warstwy węglowe testowane były jako czujniki wilgoci, czujniki temperatury, czy czujniki nacisku. Mogą być one również stosowane, jako podłogowe układy grzewcze. W artykule opublikowanym w *Prog. Org. Coat.* 125 (2018) 23 zwrócono uwagę, że trwałe warstwy nanorurek węglowych mogą skutecznie chronić materiały drewniane przed wilgocią. Znaczna część tego rozdziału monografii poświęcona została materiałom powstałym podczas osadzania warstwy nanorurek węglowych na foliach PET i EVA. Te giętkie i przezroczyste materiały mogą również spełniać rolę elementów grzewczych. Ta część monografii opierała się na wynikach badań przedstawionych w artykule opublikowanym w *Materials* 13 (2020) 431.

Ostatnia część monografii poświęcona jest kompozytom z udziałem nanorurek węglowych i materiałów polimerowych. Stosując technologię polegającą na infiltracji makrostruktur nanorurkowych polimerami uzyskano kompozyty o znacznej zawartości nanorurek węglowych. Badania Habilitantki pokazały, że tworzone w ten sposób kompozyty mogą na przykład spełniać rolę ochrony odgromowej w samolotach (*Carbon* 158 (2020) 282). Ciekawe rozwiązanie stanowiły też kompozyty, w których warstwy nanorurkowe łączone były za pośrednictwem polimerów termoplastycznych, co prowadziło do znaczącej poprawy parametrów mechanicznych włókien węglowych.

Oceniając osiągnięcie naukowe chciałbym podkreślić, że zaprezentowana monografia stanowi zwięzłe podsumowanie stanu wiedzy na temat właściwości przewodzących materiałów zawierających nanorurki węglowe oraz możliwości ich praktycznego zastosowania. W przeważającej części podsumowuje ona wyniki badań, których współautorką była Pani Agnieszka Łękawa-Raus. Nie ulega wątpliwości, że wkład prac zespołu, w którym pracowała Habilitantka w University of Cambridge, a następnie zespołu kierowanego przez Nią podczas pracy na Politechnice Warszawskiej, w postępie w tej tematyce badań jest bardzo znaczący. Habilitantka deklaruje swój istotny wkład w realizację tego projektu. Analiza prac, które opublikowane zostały po podjęciu przez Kandydatkę zatrudnienia na Politechnice Warszawskiej pozwala sądzić, że Pani Łękawa-Raus znalazła własny obszar badań związany z praktycznymi aspektami wykorzystania przewodzących włókien z nanorurek węglowych, w połączeniach z materiałami drewnianymi oraz tekstyliami. Prace prezentujące wyniki uzyskane w tym obszarze badań stanowią znaczący udział w ocenianym osiągnięciu naukowym.

Podsumowując, publikacje będące w dużym stopniu podstawą przedstawionej do oceny monografii stanowią istotny wkład w badania przewodzących materiałów zawierających nanorurki węglowe, a szczególnie w zakresie ich praktycznego wykorzystania. Uważam, że spełnione są w tym zakresie kryteria stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego.

Całkowity dorobek naukowy Kandydatki po uzyskaniu przez nią stopnia doktora, zgodnie z bazą Web of Science, obejmuje 27 prac opublikowanych w czasopiśmie znajdujących się w bazie JCR, z których 22 to prace oryginalne w recenzowanych czasopiśmie i 5 publikacji pokonferencyjnych. Jedną spośród nich, opublikowaną w *Adv. Funct. Mat.* 24 (2014) 3361 ma charakter przeglądowy. Jest to też najczęściej cytowana praca

Kandydatki (284 cytowania). Wszystkie te artykuły ukazały się drukiem, po uzyskaniu przez Panią Łękawę-Raus stopnia doktora. Ilościowo nie jest to dorobek imponujący. Są to jednak artykuły z reguły publikowane w znaczących czasopismach naukowych. Prace współautorstwa Pani dr Agnieszki Łękawy-Raus były cytowane ponad 630 razy (około 570 z wyłączeniem cytowań własnych), a wartość indeksu Hirscha wynosi 11, co mieści się w granicach oczekiwań od osoby ubiegającej się o stopień naukowy doktora habilitowanego. Należy zaznaczyć, że prace opublikowane podczas pobytu Kandydatki na University of Cambridge cieszą się większym zainteresowaniem, niż będące wynikiem badań prowadzonych na Politechnice Warszawskiej. Być może okres czasowy odgrywa tu istotne znaczenie. Należy też podkreślić, że w przypadku publikacji, które ukazały się z afiliacją Politechniki Warszawskiej, Pani Łękawa-Raus jest autorką inicjującą badania, kontrolującą ich przebieg i odpowiadającą za korespondencję z redakcją czasopism. Nie ulega wątpliwości, że Kandydatka, mimo swego młodego wieku, posiada duże doświadczenia w badaniach przewodzących materiałów zawierających nanorurki węglowe. Świadczy o tym też powierzenie jej recenzji artykułów naukowych dla kilku znaczących czasopism, wśród których znajdują się *Chemical Enrineering Journal*, *Carbon* czy *Progress in Organic Coatings* i kilku innych ważnych czasopism z zakresu chemii materiałowej.

Wyniki prac Habilitantki były wielokrotnie prezentowane na konferencjach o zasięgu międzynarodowym. Dokumenty załączone do oceny przez Panią Agnieszkę Łękawę-Raus pokazują, że była ona współautorką 23 prezentacji, głównie na konferencjach międzynarodowych. Wielokrotnie była zapraszana do prezentacji wyników swoich badań na tych konferencjach. Czterokrotnie głosiła wykłady plenarne.

Badania prowadzone przez Panią Agnieszkę Łękawę-Raus mają w dużej mierze charakter aplikacyjny. Tematyka tych prac jest również bardzo aktualna. Wyrazem tego jest bardzo owocna współpraca Kandydatki z sektorem gospodarczym. Jest Ona współautorką dwóch patentów międzynarodowych, które były wynikiem jej pracy na University of Cambridge oraz trzech patentów krajowych, które powstały na Politechnice Warszawskiej. Dwa dalsze międzynarodowe zgłoszenia patentowe oczekują na rozpatrzenie. Pani Łękawa-Raus jest również współzałożycielką firmy typu spin-off zajmującą się produkcją past i tuszów na bazie nanomateriałów.

Krótką, ale pełną zaangażowania, działalność dydaktyczną Pani dr Agnieszki Łękawy-Raus związana jest z Jej zatrudnieniem na stanowisku adiunkta na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Opracowała i prowadziła szereg nowych wykładów oraz ćwiczeń. Sprawowała opiekę nad studentami realizującymi badania w ramach prac magisterskich i inżynierskich. Była promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich.

Pozytywnie oceniam umiejętność Kandydatki w zdobywaniu funduszy na działalność naukową. Była Ona kierownikiem projektu LIDER VI finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Realizowała też badania w ramach dwóch projektów europejskich realizowanych na Trinity College, University of Cambridge. Była też laureatką stypendium przyznawanego przez Cambridge University na realizację pracy doktorskiej. Szereg innych mniejszych stypendiów umożliwiło jej uczestnictwo w wielu konferencjach naukowych

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pani dr Agnieszka Łękawa-Raus zgromadziła dorobek naukowy spełniający kryteria stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego. Wyniki badań, na podstawie których w dużej mierze opiera się Jej osiągnięcie naukowe stanowią istotny wkład w badania przewodnictwa elektrycznego struktur z nanorurek węglowych. Osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne również pozwalają na pozytywną ocenę Kandydatki. Wnoszę zatem do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pani dr Agnieszki Łękawy-Raus do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.



Krzysztof Winkler