

Dr hab. Wojciech Fabianowski

Warszawa, 3 IV 2017

Wydział Chemiczny

Politechnika Warszawska

Noakowskiego 3; 00 664 Warszawa

Tel. (022) 234 7670; kom. 0603980373

e-mail wofab@ch.pw.edu.pl

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotra Prokaryna
pt. "Technologia syntezy, obróbki i funkcjonalizacji polianiliny dla wytwarzania
biomedycznych mikrosystemów analitycznych"**

Praca pt. "Technologia syntezy, obróbki i funkcjonalizacji polianiliny dla wytwarzania biomedycznych mikrosystemów analitycznych" została przedłożona przez mgr inż. Piotra Prokaryna Radzie Naukowej Instytutu Technologii Elektronowej jako rozprawa doktorska. Praca zawiera 168 stron, ponad 90 rysunków, wykresów, równań chemicznych i zdjęć, 96 odnośników literaturowych. Praca podzielona jest w logiczny sposób na wstęp, 4 rozdziały teoretyczne dotyczące szerokiego przeglądu metod syntezy polimerów, a. następnie bardziej szczegółowo metod syntezy polimerów przewodzących w tym polianiliny, metod jej modyfikacji z uwzględnieniem wykorzystania jako warstwy aktywnej w szeregu czujników, sensorów biochemicznych. W kolejnych pięciu rozdziałach opisano wykonane doświadczenia, w tym zwłaszcza metody patterningu czyli kształtowania pożądaných kształtów i właściwości warstw aktywnych zbudowanych z polianiliny oraz wykorzystania ich do budowy czujników, omówionych na przykładach reakcji oznaczania stężenie kwasu askorbinowego, jodanów, konstrukcji przepływowego demonstratora. W kolejnych dwóch rozdziałach dokładnie zostały przedyskutowane otrzymane wyniki i dokonano podsumowania. W ostatnim, dwunastym rozdziale zawarto cytowaną bibliografię. Można powiedzieć, że praca mgr inż. Piotra Prokaryna napisana jest w klasyczny sposób, z wyraźnie zaznaczoną częścią teoretyczną i częścią badań własnych, doświadczalną. Aczkolwiek każda praca doktorska posiada jakiś swój własny, charakterystyczny rys i w tym przypadku jest nią forma ciągłego jakby dialogu, a dokładniej monologu Autora z czytelnikiem, któremu tłumaczy i wyjaśnia cel prowadzonych badań a dodatkowo ważniejsze sformułowania na końcu rozdziałów zostają jeszcze podkreślone.

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Jacek Marczewski z Instytutu Technologii Elektronowej w Warszawie.

Mgr inż. Piotr Prokaryn jest absolwentem Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej. W roku 2003 obronił pracę magisterską poświęconą przepływowym układom analitycznym do oznaczania fosforanów(V) i zaraz potem podjął pracę w Instytucie Technologii Elektronowej, początkowo jako inżynier-technolog a począwszy od 2008 jako asystent naukowy. Można śmiało powiedzieć, że od początków swojej działalności naukowej zajmował się otrzymywaniem struktur krzemowych, MEMS na skalę wielkolaboratoryjną, opracowując nowatorskie konstrukcje na zapotrzebowanie polskich, europejskich i też pochodzących z USA zlecniodawców. Mogę się przyznać, że sam coś wiem na ten temat, bo na przykład na zlecenie Lehigh University z PA, USA w końcówce lat 90-tych ubiegłego stulecia w ramach grantu z NSF opracowaliśmy a ITE wykonało serię kilkuset testerów elektronicznych do badania właściwości ochronnych – zabezpieczenia długotrwałego układów scalonych IC. Testery te nazwaliśmy PW ITE 5 i były to wówczas struktury porównywalne z ówczesnymi najbardziej zaawansowanymi strukturami amerykańskimi do tego celu, oznaczonymi jako ATC 01. Rada Naukowa ITE zna znacznie lepiej ode mnie historię swojego Instytutu, historię linii produkcyjnej w budynku przy ulicy Wołoskiej, jak wielkim wysiłkiem pracujących tam osób wykonywano w praktyce struktury krzemowe będące tylko może o krok, może o dwa opóźnione w stosunku do tego, co powstawało wówczas na świecie. Zgodnie z prawem Moore'a, zmniejszanie wymiarów odległości między liniami przewodnika (*spacing*) dwukrotne następuje co półtora - dwa lata, co w rzeczywistości oznacza wprowadzenie nowych rozwiązań technicznych i nowych technologii. Początkowa niewielka wielkość opóźnienia między wiodącymi firmami a technologią struktur krzemowych wykonywanych w ITE i ogólnie w Polsce stopniowo powiększała się. I moim zdaniem raczej nie ma co liczyć, że zostanie zmniejszona, to są koszty daleko przekraczające możliwości finansowe polskiego państwa. Czy to znaczy, że nic nie możemy zrobić ? Zdecydowanie nie, jak pokazują wiele innych doświadczeń światowych, na przykład siostrzanego Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych i produkcji u nich 2 calowych i 3 calowych płytek krzemowych, powstanie spółki Unisil w Tarnowie – można znaleźć swoją niszę produkcyjną, swoją technologię produkcji, wykorzystując słabsze zaplecze techniczne i nadrabiając to niewątpliwą pracowitością i inteligencją własnych pracowników. Zwłaszcza, że na układy ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*) będzie jeszcze długo zapotrzebowanie a wykonanie ich wymaga właśnie nowatorskich rozwiązań. Sądzę, że to było właśnie siłą napędową motywującą mgr inż. Piotra Prokaryna do napisania tej rozprawy, jego współpracowników i promotora do pomagania i umożliwienie powstania tej pracy. Sądzę, że przyjęty kierunek postępowania jest jak najbardziej właściwy. Niestety to wciąż

początek tej drogi, ale pierwsze, wyraźne kroki zostały już wykonane. I to nie przez nowicjuszy, amatorów ale przez świadomych pracowników, takich jak mgr inż. Piotr Prokaryn. Warto w tym miejscu dodać, że mgr inż. Piotr Prokaryn jest współautorem 10 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, w tym liczące się w branży MEMS jak *Journal of Nano Research* (w 2016 roku). Jest też współautorem 5 patentów i zgłoszeń patentowych (3 w latach 2015 i 2016). W ogóle mgr inż. Piotr Prokaryn jest współautorem 26 artykułów, 49 wystąpień konferencyjnych. Był cytowany (stan na 8 III 2017) 113 razy i co najważniejsze, liczba cytowań w ostatnich latach rośnie. W dniu 27 III 2017 ma wygłosić seminarium na temat swojej pracy doktorskiej w Wydziale Chemicznym PW, czyli reasumując, nie zwalnia tempa swojej działalności. Po tak długim wstępie przejdę do omówienia rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Prokaryna. Z obowiązku recenzenta od razy przejdę do wymienienia różnych błędów, które pojawiły się w pracy. Do grupy drobnych błędów zaliczyłbym pewne literówki, brak kursywy dla słów angielskich i niezręczne sformułowania zawarte w pracy, przykładowo na stronach 4; 9; 11; 12; 16 (winny być przedrostki L i D albo R i S ale nie L lub R); 18; 31; 33; 34; 35 (pięć razy zamieniona literka „r” w słowie surfaktant; proces RIM to reaktywne wtryskiwanie a nie wytłaczanie); 44; 48; 51; 54; 57; 58 (Rys. 11 jest nieczytelny); 60; 63; 66; 67; 68; 73; 74; 78; 86; 97; 140; 142; 146 (dokładniejszy opis rys. 81); 155; 161; 165; 167. Mogłoby się wydawać, że w epoce powszechnych edytorów tekstu takie błędy nie powinny się zdarzać ale muszę podkreślić, że te drobne niezręczności nie wpływają na znacznie pracy mgr inż. Piotra Prokaryna. Szkoda również, że w pracy nie został zamieszczony wykaz stosowanych skrótów, tak pomocny przy późniejszym przeglądaniu opracowania. W wykazie stosowanych materiałów (rozdział 9.1 str. 141) nie podano nazw handlowych wykorzystanych polimerów (np. stosowanego Sylgardu, pleksi). W podsumowaniu (rozdział 10, str. 155) Autor nie opisał struktury czujników wielopolowych a to może być przyszłość dla wielu rozwiązań. Sądzę, że mgr inż. Piotr Prokaryn jest sam tego świadomy, zresztą sam pisze (str. 159), żepolianilina na drodze elektropolimeryzacji wykazuje dużo większą uniwersalność...”.

Wszystkie te braki mają małe znaczenie, są to w zasadzie przyczynki lub drobne uwagi. Jeżeli ktoś jednak pomyślał, że są jakieś zastrzeżenia, to skutecznie przekonał go Autor, dając liczne autocytowania (24 na 96 pozycji literaturowych). To taka autopromocja, ale też potrzebna, może szczególnie nam, pomijającym zwykle swoje osiągnięcia.

W rozdziale 2 mgr inż. Piotr Prokaryn dokonał szerokiego opisu procesów polimeryzacji, zarówno od strony mechanizmów reakcji jak i technologii prowadzenia procesu w skali przemysłowej. Początkowo wydawało mi się to całkowicie zbędne, ale szybko uświadomiłem

sobie, że mgr inż. Piotr Prokaryn współpracuje nie tylko z chemikami, ale głównie z fizykami, informatykami i wprowadzenie, głębsze zrozumienie tej dziedziny wiedzy chemii i technologii polimerów jest jak najbardziej na miejscu. W rozdziale drugim zajmuje się też polimerami przewodzącymi a w kolejnym trzecim rozdziale zajmuje już tylko polianiliną. Warto jednak wspomnieć, że w przemyśle elektronicznym, elektrotechnicznym stosowane tworzywa sztuczne to są jednak głównie izolatory i przyswojenie sobie wiedzy na ich temat jest jak najbardziej celowe. Warto tutaj podkreślić, że mgr inż. Piotr Prokaryn omawia i cytuje opracowania literaturowe w sposób wybiórczy, a jednocześnie praktyczny i celowy. Jest skoncentrowany na swoich konkretnych wymaganiach w stosunku do polimerów i ocenia informacje literaturowe pod kątem przydatności do swoich potrzeb, konkretnie konstrukcji układów MEMS. Nie każdy młody badacz jest tak świadomy swoich działań i potrafi tak selektywnie „filtrować” podawaną wiedzę i dobrze jest to widoczne w opracowaniach mgr inż. Piotra Prokaryna, już ukształtowanego, świadomego swych działań naukowca. Często w swoim opracowaniu odwołuje się do dalszej swojej działalności i podkreśla, jakie cechy omawianych polimerów będą dla niego w przyszłych doświadczeniach istotne. Czasem zaznacza to nawet podkreśleniem (str. 19; 21; 27; 28; 30; 35; 42; 44). Przykładowo opisując problemy polimeryzacji przy przechodzeniu ze skali laboratoryjnej do przemysłowej, wymienia problemy do rozwiązania – inhibitująca rola tlenu, wzrost lepkości, zmiana współczynnika przewodnictwa cieplnego (str. 36), które stają się również istotne w skali mikro, gdy przy otrzymywaniu cienkich aktywnych warstw będzie pracował z ilościami tylko gramowymi monomerów i polimerów. Jest to szczególnie istotne, gdyż pracuje w Instytucie o charakterze przemysłowym i jednocześnie technologicznym. Widoczne staje się, że Autor nie przypadkowo jest nie tylko magistrem, ale też ma inżynierskie wyczucie problemów. Podobne zrozumienie spraw istotnych można zauważyć na takim drobnym przykładzie, gdy mgr inż. Piotr Prokaryn wymienia w tekście pewne osoby z imienia i nazwiska. Wymienia prof. W. Kutnera (str. 16; ref. 7) co jest zrozumiałe ze względu na jego dokonania i fakt współpracy z mgr inż. Piotrem Prokarynem w ramach doświadczeń z imprintowanymi polimerami. Ale wymienia też W. Carothersa (str. 32, ref. 11), jednego z największych badaczy i wizjonerów w dziedzinie polimerów.

W konstrukcji struktur MEMS istotne znaczenie ma *patterning* czyli możliwość uzyskania zaplanowanego kształtu, miejsca osadzenia warstwy aktywnej. Znanych i stosowanych jest cały szereg metod postępowania w przypadku standardowej techniki otrzymywania układów IC ale są one zawodne w przypadku warstw polimerowych, takich jak warstwy polianilinowe. Szkoda, że temu ważnemu zagadnieniu poświęcono tylko krótki rozdział 3.2 (str 54). Nie

opisano na przykład metody selektywnego doprowadzania określonej wartości potencjału do elektrody i zapobieganie w ten sposób osadzaniu na niej monowarstwy – prace M. Tencera (M. Tencer, A. Olivieri, B. Tezel, H.-Y. Nie and P. Berini, Chip-scale electrochemical differentiation of SAM-coated gold features using a probe array; *Journal of the Electrochemical Society*, 159, J77-J82 (2012) DOI: 10.1149/2.087203jes.

Ten brak nadrabia ciekawie napisany rozdział 3.3 (str. 55) opisujący metody funkcjonalizowania materiałów wielkocząsteczkowych. To swoisty „autorski” przegląd metod które mogą być wykorzystane do *patterningu*. Ważne sposoby, które mogą służyć do otrzymywania zwłaszcza struktur wielopolowych. Sądzę, że ten kierunek poszukiwań będzie kontynuowany, zwłaszcza, że jest rzadko w literaturze opisywany a możliwości wykorzystania w konstrukcji czujników matrycowych są bardzo duże. W jednej próbie można jednocześnie zbadać kilka różnych czynników. Rozdział 4, poświęcony przeglądowi metod analitycznych stosowanych w systemach czujników i wykorzystujących polimery przewodzące, ze szczególnym uwzględnieniem polianiliny jest dobrze napisany. Wartościowy, pozwala na lepsze poznanie możliwości wrażliwych na działanie bodźców polimerów, w których zmianie ulegają nie tylko właściwości elektryczne, elektrochemiczne ale też i optyczne. Znajomość ich dobrze rokuje w przyszłych pracach badawczo-wdrożeniowych. Zwłaszcza, jak mgr inż. Piotr Prokaryn stwierdza, że czujniki optyczne są”od lat w obszarze zainteresowań autora...”. Szkoda, że przy opisie elektrod jonoselektywnych wykorzystujących zdyspergowane jonofory w plastyfikowanej membranie z poli(chlorku winylu) mgr inż. Piotr Prokaryn nie wspomniał o ich zasadniczej wadzie czyli ekstrakcji plastyfikatora w roztworze analitu i w konsekwencji utratę czułości membrany i elektrody jonoselektywnej. Wolne od tej wady są elektrody jonoselektywne zbudowane z polimerów przewodzących i to jest ich duża zaleta.

Z technologicznego punktu widzenia ważny jest rozdział 7 niniejszej rozprawy „Nakładanie warstw PANI na podłoża i kształtowanie wzorów” (str. 80). Jak zauważa mgr inż. Piotr Prokaryn, jedynym sposobem nakładania cienkich warstw z PANI jest wylewanie ich z roztworu. Jest to nieodpowiedni sposób, tak zwana „mokra robota”, nie lubiany wśród technologów pracujących z strukturami krzemowymi, przywykłymi do stosowania procesów *CVD*, *PECVD*, środowiska gazowego, działania wysokiej temperatury i plazmy. Dodatkowo został zastosowany rozpuszczalnik, w tym przypadku kwas dichlorooctowy. Jest to związek trudno lotny i korozyjny. Wyklucza to stosowanie tak popularnej metalizacji Al. i wymaga stosowania kosztowniejszej metalizacji Au. Niektóre problemy związane z kwasem dichlorooctowym mgr inż. Piotr Prokaryn elegancko rozwiązał, wykorzystując swój

niewątpliwy talent inżynierski (ogrzewanie *spin coater* promiennikami) ale to nie wszystkie problemy. Dużo pracy doświadczalnej poświęcono pracom nad uzyskaniem *patterningu* warstw polianilinowych. Wykorzystano trzy metody postępowania (str. 80) – testowanie oporności struktur 2D; - próba wykorzystania polianiliny do zapewnienia kontaktów w pionie (struktury *vias*); - selektywne usuwanie warstw przewodzących z naniesionych wcześniej warstw polianiliny. Pierwszy sposób postępowania jak stwierdził to mgr inż. Piotr Prokaryn (str. 84) był skazany na niepowodzenie z powodu nieodporności na działanie kwasów (azotowego, octowego, fosforowego) nie tylko metalizacji Al. ale też samej warstwy polianilinowej. Podobnie niekorzystnie działała plazma chlorowa i tlenowa. Schematy przedstawione na rys. 26; 29 są najważniejszymi praktycznymi osiągnięciami mgr inż. Piotra Prokaryna. Pomimo, że obie próby zostały zakończone niepowodzeniem i nieuzyskaniem zaplanowanych wyników, to w przekonujący sposób pokazały, które techniki, standardowo stosowane w otrzymywaniu *MEMS* mogą być, a które nie mogą być stosowane w przypadku warstw z organicznych polimerów przewodzących. Te niby proste stwierdzenia mają duże znaczenie praktyczne i wskazują kierunek operacji, które mogą być stosowane bez popełniania błędów opisanych w rozdziałach 7.1.2 i 7.1.3. Podobnie ważne są stwierdzenia ze strony 88, eliminujące z obróbki warstw polianiliny plazmę chlorową i tlenową. Z kolei, trzeba to podkreślić, sprytnym posunięciem mgr inż. Ania)Piotra Prokaryna była obserwacja utleniającego działania plazmy tlenowej i wywołana przez nią utrata przewodnictwa przez warstwę polianilinową. Zostało to potraktowane nie jako „no go zone” (nieodpowiedni sposób działania) ale jako metoda konstrukcji czujników wrażliwych na obecność czynnika utleniającego (rozdział 8.3). Ważna cecha dla badacza – przekształcenie porażki w celowe, pozytywne działanie. Dobrze to świadczy o zdolności mgr inż. Piotra Prokaryna do szerokiego, analitycznego rozpracowania otrzymanych wyników i dokonanych obserwacji. Podobnie dobrze świadczy o predyspozycjach badawczych mgr inż. Piotra Prokaryna opisana w rozdziale 7.1.3 metoda selektywnego unieczynniania (eliminowania) przewodzącej polianiliny przez kontakt z wodnymi alkaliami. Wystarczy do tego celu tylko kilkunasto sekundowe przedłużenie czasu standardowej operacji usuwania fotorezystu przez kontakt z alkaliami. To też dobrze to świadczy o przenikliwości Autora (str 89, rys. 32 str 90). Ciekawym rozwiązaniem jest również sprawdzana przez Autora (rozdział 7.3.1; 7.3.2) metoda elektrochemicznego osadzania warstw polianilinowych na wybranych powierzchniach elektrody. W ten sposób omijana jest mało precyzyjna metoda *glob-top*.
Możliwości praktycznego wykorzystania elektrod polianilinowych zwłaszcza w układzie przepływowym, w porównaniu do zwykłych elektrod złotych zostało szczegółowo omówione

w rozdziale 8.1 (str.106 - 114). Uzyskane wartości stopnia korelacji powyżej 0.99 występują dla obu elektrod, ale elektrody polianilinowe mogą być skutecznie regenerowane. Szczególnie interesujące są możliwości opisane w rozdziale 8.2 (str. 117 - 128), gdzie opisano trzy sposoby funkcjonalizacji warstwy polianilinowej przez wprowadzenie enzymu fosfatazy kwaśnej podczas elektrochemicznego osadzania warstwy polianilinowej – poprzez zmianę wartości pH procesu; przez fizyczną funkcjonalizację polianiliny w wyniku zanurzenia w roztworze enzymu; przez funkcjonalizację elektrochemiczną. Dwie pierwsze próby były nieudane, co też jest wynikiem pozytywnym, bo wyeliminuje pewne procedury w przyszłości. Szczególnie interesująca jest metoda trzecia, funkcjonalizacji przez zmianę wartości przyłożonego potencjału. Szkoda, że mgr inż. Piotr Prokaryn nie poświęcił więcej pracy temu zagadnieniu, ani od strony teoretycznej ani od strony doświadczalnej, bo to może być skuteczny sposób na funkcjonalizację jednoczesną matrycy zbudowanej z kilkudziesięciu sensorów, na przykład $6 \times 8 = 48$ pól sensorowych znajdujących się w dużej liczbie na powierzchni jednej płytki krzemowej. To może być rozwiązanie na produkcję sensorów matrycowych, gdzie dotychczas każde pole jest osobno modyfikowane żmudną metodą *dip-ink*. Podobne rozwiązania zostały opisane w literaturze (dotyczące monowarstw) w wcześniej cytowanych pracach M. Tencera. Takie rozwiązanie jest po pierwsze przyszłościowe, bo pozwala na jednoczesne wykonanie całego szeregu analiz (krwi, płynu rdzeniowo-mózgowego). Analiza sygnałów pozytywnych (co znajduje się w badanym płynie) i sygnałów negatywnych (co nie znajduje się w badanym płynie) pozwala lekarzowi na znalezienie odpowiedzi na kluczowe pytanie o wystąpieniu/niewystąpieniu badanej choroby. W obecnej chwili, przy bardzo wysokich kosztach wprowadzenia do obrotu nowych leków (procedury FDA) trudno liczyć na uzyskanie jakiegoś nieznanego poprzednio leku, to w dziedzinie diagnostyki i opracowania wyrafinowanych, matrycowych sensorów jest dużo do zrobienia. Praca mgr inż. Piotra Prokaryna dobrze rozpoznaje to zagadnienie i można sądzić, że będzie właściwym rozwiązaniem do opracowania systemów ASIC w pracach ITE. Zwłaszcza, że mgr inż. Piotr Prokaryn wykazał się dużą biegłością i zręcznością nie tylko w modyfikowaniu warstw z polianiliny (wprowadzeni kwasu nordihydrogwaretowego str. 129) ale też na przykład sam wykonał elektrody chlorosrebrowe (str. 31).

W pracach badawczych z zakresu chemii, materiałów rzadko zwraca się uwagę na takie zagadnienia jak powtarzalność wyników, możliwość wielokrotnego stosowania danego materiału, dokładności wykonanych oznaczeń. A z punktu widzenia potem użytkownika danego wyrobu ma to wszystko kapitalne znaczenie. W opracowaniach z dziedziny technologii krzemu na pierwszym miejscu stawiany jest problem powtarzalności i

kontrolowania liczby defektów. W pracach badawczych zwykle zagadnienie to jest pomijane, wynika to przede wszystkim z kosztów jak i niskiej publikowalności wyników tego rodzaju. Uważa się to często za przyczynkarstwo. Ale nie można tego pominąć w praktyce, w konstrukcji urządzenia. Mgr inż. Piotr Prokaryn jest tego świadomy i cały rozdział 8.4 (str. 134 – 139) poświęcił na wyjaśnienie, czy elektroda polianilinowa może być w procesie bez regeneracji jak i w procesie z regeneracją wielokrotnie stosowana. Wykres 77 (str. 138) daje wyraźną i przekonującą odpowiedź, że nawet 20-krotne powtórzenie oznaczenia w elektrodzie polianilinowej z regeneracją nie powoduje zmian czułości badanej elektrody. Dobrze to świadczy o badanym materiale, jeszcze lepiej o osobie badacza, że zwrócił uwagę na ten problem i poświęcił mu czas i doświadczenia.

Reasumując, można śmiało stwierdzić, że w osobie mgr inż. Piotra Prokaryna mamy do czynienia z dojrzałym pracownikiem naukowym, dobrze znającym dziedzinę technologii krzemu, dobrze współpracującego z naukowcami z wielu laboratoriów, dojrzałego badacza zdolnego do wykonywania samodzielnych i odpowiedzialnych zadań. Może korzystać z coraz bardziej zaawansowanych metod badawczych, czyli wchodzić w obszary wiedzy sobie wcześniej nieznane. Jest to bardzo ważna cecha charakteryzująca dojrzałego i samodzielnego badacza i dlatego uważam, że praca przedstawiona przez mgr inż. Piotra Prokaryna jako rozprawa doktorska w pełni na ten tytuł zasługuje.

W przedstawionej pracy mgr inż. Piotr Prokaryn wykazał się dużymi zdolnościami eksperymentatorskimi, a zwłaszcza dużą sprawnością i przenikliwością w interpretacji wyników. Ważną zaletą Autora jest zdolność do porządkowania wyników i przedstawiania ich w logicznym łańcuchu zdarzeń, szukanie uogólnień i próby głębokiego zrozumienia opisywanego zagadnienia. Mgr inż. Piotr Prokaryn jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań i rozwiązywania ambitnych zadań. Dlatego jestem przekonany, że rozprawa ta spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom tego rodzaju i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Piotra Prokaryna do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

