

dr hab. inż. Tadeusz Urban, prof. PŁ
Katedra Budownictwa Betonowego
Politechnika Łódzka

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Sokala pt.:
**Wytrzymałość na docisk w betonach wysokiej wytrzymałości
wzmocnionych stalowym zbrojeniem spiralnym**

1. Podstawa formalna recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały podjętej przez Radę Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej w dniu 21 września 2016r. i informacji zawartej w piśmie z dnia 26 września 2016r. przesłanym przez Dziekana Wydziału Profesora Andrzeja Szaratę.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Sokala: „Wytrzymałość na docisk w betonach wysokiej wytrzymałości wzmocnionych zbrojeniem spiralnym”. Promotorem recenzowanej rozprawy jest dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK.

3. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa została zawarta w jednym tomie na 281 stronach, a jej zasadniczą treść podzielono na 10 rozdziałów, do której dołączono obszerne podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, objaśnienia oznaczeń oraz spis cytowanej literatury.

Tematem recenzowanej rozprawy są badania elementów betonowych wykonanych z betonów wysokiej wytrzymałości lokalnie obciążonych. Rozważano elementy bez zbrojenia oraz ze zbrojeniem w postaci stalowych spirali.

Zasadnicze elementy rozprawy to:

- prezentacja stanu wiedzy z zakresu docisku w betonie, poszerzona o zagadnienia dotyczące problematyki betonów wysokiej wytrzymałości i wpływu skrępowania na jego parametry wytrzymałościowe,
- zebrany materiał literaturowy obejmujący stan wiedzy był podstawą do wykonania obszernej analizy parametrycznej zjawiska docisku,
- własne badania eksperymentalne przeprowadzone na elementach z betonu o wytrzymałościach na ściskanie 53, 70 i 100 MPa; zakres badań obejmował łącznie 155 ciał próbnych, z czego 51 było niezbrojonych, a 104 były wzmocnione spiralami stalowymi; parametrami zmiennymi, oprócz wytrzymałości betonu, były: stosunek pola powierzchni przekroju

poprzecznego elementu do pola powierzchni docisku, średnica rdzenia spirali oraz średnica prętów spirali,

- ostatnim ważnym elementem rozprawy jest autorska analiza numeryczna metodą elementów skończonych przeprowadzona za pomocą programu ATENA firmy Červenka Consulting.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym – *Wprowadzenie*, Autor rozprawy uzasadnia celowość podjętej problematyki, która wynika z coraz większego stosowania w praktyce inżynierskiej betonów wysokiej wytrzymałości w sytuacji, gdy większość badań dostępnych w literaturze przedmiotu dotyczy betonów normalnych o wytrzymałości na ściskanie nieprzekraczającej 50 MPa. Zasadniczym celem pracy jest rozszerzenie stanu wiedzy na temat docisku w obszarze betonów wysoko wartościowych (BWW), zarówno w zakresie elementów niezbrojonych i zbrojonych. Autor rozprawy ściśle precyzuje te cele w sześciu punktach na stronie 20. Jednocześnie formułuje cztery tezy przytoczone poniżej w wersji oryginalnej:

Teza I – *Stosunek wytrzymałości na docisk do wytrzymałości na ściskanie betonu maleje wraz ze stosowaniem betonu o wyższej wytrzymałości betonu ściskanie;*

Teza II – *W próbkach zbrojonych spiralą, poddanych dociskowi o tej samej powierzchni docisku (i powierzchni przekroju) naprężenia w zbrojeniu spiralnym, w chwili występowania maksymalnej siły docisku, maleją wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie;*

Teza III – *W betonach wysokiej wytrzymałości bardziej jest korzystne niż w betonie zwykłym jest stosowanie spirali o mniejszej średnicy;*

Teza IV – *W elementach zbrojonych spiralą wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu na ściskanie uzyskuje się większy wzrost nośności na docisk w stosunku do elementów niezbrojonych.*

4. Ogólna ocena merytoryczna rozprawy

4.1. Ocena tematu

Podjęta tematyka rozprawy, zdaniem recenzenta, zasługuje na wysoką ocenę. Jest to problem aktualny i ważny dla dalszego rozwoju inżynierii budowlanej.

4.2. Ocena metodyki podjętych badań

Oceniając zastosowaną metodykę i środki wykorzystane do rozwiązywania problemu naukowego, należy również wystawić wysoką ocenę. Autor rozprawy wykonał szeroką kwerendę istniejących źródeł informacji literaturowej od najstarszych z końca XIX wieku (*Bauschinger* – 1876) do 2013 roku (*Zhou* i inni). Wykorzystał te informacje twórczo w autorskiej analizie parametrycznej.

Wiedza wyniesiona ze studium literaturowego zostaje następnie wykorzystana do sformułowania własnego programu badawczego. Na tym etapie, doktorant wykazuje

się ostrożnością działania, wykonując najpierw badania wstępne, które pozwalają mu sprawdzić wiele technicznych szczegółów badawczych chroniąc go zarazem przed popełnieniem błędów w badaniach głównych. Badania własne są najważniejszym elementem rozprawy wnoszącym niepodważalny wkład do rozwoju wiedzy w zakresie konstrukcji betonowych. Na szczególną uwagę i pozytywną ocenę zasługują wykorzystane przez doktoranta różnorodne sposoby pomiarów odkształceń betonu i zbrojenia. Są to:

- tensometria elektrooporowa – pomiary na zbrojeniu,
- czujniki strunowe – pomiary odkształceń betonu,
- metoda wizyjna – pomiary odkształceń na powierzchni betonu,
- drut elektrooporowy – jako czujnik momentu zarysowania.

Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły doktorantowi szczegółowo opisać proces niszczenia elementów na docisk zarówno niezbrojonych i zbrojonych. Uzyskane wyniki liczbowe pozwoliły na wszechstronną ich analizę, w wyniku której zostały zaproponowane przez doktoranta wzory obliczeniowe nośności na docisk. Wzory te zarówno dla betonu niezbrojonego (8.4), (8.5), jak i zbrojonego (8.6), (8.7) wykazały znacznie lepszą zgodność z wynikami eksperymentalnymi doktoranta niż wzory zaczerpnięte z literatury lub wzory normowe. Pozytywny wyjątek stanowi tutaj polska norma PN-B 03264:2002, która wykazała również bardzo dobrą zgodność z eksperymentem.

Ostatnią metodą wykorzystaną przez doktoranta w rozwiązywaniu naukowego problemu jest nieliniowa analiza numeryczna MES. Główna część tej analizy została poświęcona ustaleniu i sprawdzeniu założeń do modelu numerycznego. Wykonano dwa podejścia w tym celu: jedno bazowało na parametrach materiału dostępnych w literaturze (w normach) oraz drugie, na podstawie wyników badań własnych materiału. Parametry literaturowe wykorzystano do wstępnej analizy parametrycznej modelu, która pozwoliła udowodnić zbieżność modelu numerycznego.

Wyniki numeryczne porównano z wynikami eksperymentalnymi uzyskując bardzo dobrą zgodność, średni stosunek $q_{MES}/q_{exp} = 0,997 \div 0,999$. Nieco gorszy wynik uzyskano w przypadku porównania naprężeń w zbrojeniu spiralnym. Średni stosunek wartości z obliczeń MES do wartości eksperymentalnych ze wszystkich próbek wyniósł 0,918, przy przeciętnym błędzie względnym 22,1%. Pominięcie elementów o stosunku $R = 1$ znacznie poprawiło tę statystykę - $\sigma_{s,mid,MES} / \sigma_{s,mid,exp} = 0,967$, przy przeciętnym błędzie 11,5%.

Reasumując ocenę metodyki rozwiązywania problemu naukowego należy stwierdzić, że doktorant podszedł do tematu wzorowo. Najpierw dokonuje szerokiej analizy literaturowej problemu, a potem podejmuje własny program badawczy na drodze eksperymentalnej i numerycznej.

4.3. Uwagi krytyczne

– do studium literaturowego

Rozdział 4, traktujący o skrępowaniu betonu ma bezpośredni związek z problematyką doktoratu, zasługuje na pochwałę za wnikliwe przedstawienie stanu wiedzy z tego zakresu. Zostały tutaj przedstawione wszystkie ważne prace poczynając od *Considera* (1903) do *El-Fattaha* (2012). Szkoda tylko, że nie przywołano prac *Olszaka*, choć w spisie literatury widnieje pozycja z 1960r. „Zagadnienia teorii elementów uzwojonych”. Archiwum Inżynierii Lądowej 2. Brakuje również ważnej pozycji autorstwa *Piotra Korzeniowskiego* – Żelbetowe słupy uzwojone. Badania i teoria (2000), choć jest przywołany rozdział tego autora w zbiorowym opracowaniu pod redakcją *Lewickiego* w „Komentarzu naukowym do PN-B-03264:2002”.

Natomiast rozdział 3 o betonie wysokiej wytrzymałości, zdaniem recenzenta, jest nadmiernie rozbudowany. Informacje w nim zawarte nie wiążą się bezpośrednio z tematem doktoratu. Przywołana wielokrotnie pozycja **fib Bulletin 42** (2008) nie została uwzględniona w spisie literatury. Informacja zawarta w zdaniu na stronie 69 „... że wytrzymałość betonu na ściskanie dla *BWW* pod długotrwałym obciążeniem wynosi około 80%, gdy dla betonu zwykłego może ona osiągnąć tylko $60\%f_c$ (**fib Bulletin 42**).” zdaniem recenzenta wartość 60% jest nieprawdziwa – patrz:

- Zygmunt Jamróży: Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2005, Rys. 15.32. str.291.
- Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006, Tabl. 4.11. str. 227.
- w opracowaniu **fib bulletin 42** (2008), Constitutive modeling of high strength / high performance concrete – nie podano wartości 60% w odniesieniu do betonów zwykłych.

– do programu badań

Recenzent żałuje, że program badań nie obejmował elementów o pełnej niejednorodności (patrz rys. 6.25 w EN 1992-1-1:2004+AC:2008). Wszystkie elementy badawcze stanowiły obszary o częściowej niejednorodności. Oznacza to, że powierzchnia rozdziału A_{c1} zawsze determinowana była polem powierzchni przekroju próbki. **Zdaniem recenzenta zakres badań nie obejmował istotnej części problemu.** Co prawda, na stronie 21 doktorant zastrzega, że „Zadaniem pracy nie było określenie wielkości powierzchni rozdziału.”, ale w żaden sposób nie uzasadnia tego ograniczenia. Zasada przyjmowania powierzchni rozdziału jest istotnym elementem problemu docisku. Odpowiedź na pytanie, czy rys. 2.5

zamieszczony w pracy (zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2008 i przyjęty również w MC 2010) jest prawdziwy dla całego zakresu wytrzymałości betonów konstrukcyjnych od $f_{ck} = 12$ do $f_{ck} = 120$ MPa, byłaby bardzo ważna dla praktyki inżynierskiej.

– do uzyskanych wyników badań materiałów

Zaskakujące są relacje pomiędzy wytrzymałością betonu na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie. Przyjmując, że wytrzymałości na ściskanie zostały ustalone prawidłowo (jest to proste badanie) to w wątpliwość, należy poddać wyniki badań betonu na rozciąganie. Zostały wykonane badania bezpośrednie i pośrednie na rozłupywanie. Badania bezpośrednie są bardzo rzadko wykonywane ze względu na trudności ich realizacji. Autor rozprawy przeprowadził te badania na próbkach walcowych według zaleceń **RILEM TC 187-SOC** (2007) (tej przywołanej pozycji brakuje również w spisie literatury). Jednocześnie wykonał również badania na rozłupywanie na kostkach o boku 150 mm. Uzyskane relacje pomiędzy $f_{ct}/f_{ct,sp}$ są dziwne i wynoszą dla poszczególnych betonów: **A - 0,687, B - 0,694, C - 0,782**. Raczej należało się spodziewać wartości zbliżonej do około 0,9, tak jak to przyjęto w normie Eurokod 2 w p.3.1.2(8). Jeśli przyjąć jako podstawę wytrzymałość betonu na ściskanie ustaloną przez doktoranta i dalej za prawdziwe zależności według Eurokodu 2 (Tablica 3.1 w doktoracie), to wytrzymałość na rozciąganie i rozłupywanie powinna wynosić:

beton	f_c	f_{ct}	$f_{ct,sp}$	f_{ctm}	$f_{ct,sp}$
	badania			wg EC 2	
A	53,41	2,85	4,15	4,25	4,73
B	69,39	3,31	4,77	4,39	4,88
C	94,50	4,68	5,98	4,97	5,53

Zdaniem recenzenta bardziej wiarygodne wydają się wyniki badań na rozłupywanie uzyskane przez doktoranta, wykonane na próbkach kostkowych. Bezpośrednie badanie na rozciąganie powinno być bliżej przedstawione w trakcie prezentacji pracy. Służyło on również do ustalenia energii pęknięcia G_F zgodnie z bardzo wyrafinowaną procedurą według zaleceń **RILEM TC 187-SOC** (2007). Interesującym byłoby bliższe przedstawienie procedury ustalenia G_F (charakterystycznych pomiarów i sporządzenia wykresu nawiązującego do poniżej przedstawionego). Recenzent próbował ustalić G_F według Model Code 2010. Otrzymał znacznie różniące się wartości od podanych w Tabeli 6.9 doktoratu. Wydaje się, że zostały popełnione jakieś błędy badawcze w próbie bezpośredniego rozciągania.

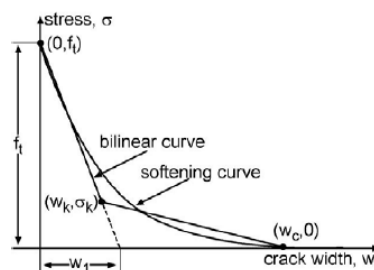


Figure 9. Bilinear softening curve.

Beton	Wartości G_F wg Autora doktoratu	Wartości G_F wg recenzenta Model Code 2010
A	210	149,6
B	242	156,6
C	158	165,5

Zaskakujące wydają się być również wyniki badań skurczu betonu. Doktorant wprawdzie zastrzega się, że są to przybliżone pomiary skurczu. Biorąc jednak pod uwagę wiek betonu w chwili badania (beton A ~ 40 dni, B ~ 63÷73 dni, C ~ 95÷113 dni), przyjmując jeden tydzień pielęgnacji (ochrona przed utratą wody), oraz wilgotność względną powietrza $RH = 50\%$ (jest to założenie przyjęte przez recenzenta), to można byłoby się spodziewać skurczu dla betonu A około 0,23‰, dla betonu B ~ 0,30‰ i dla betonu C ~ 0,45‰.

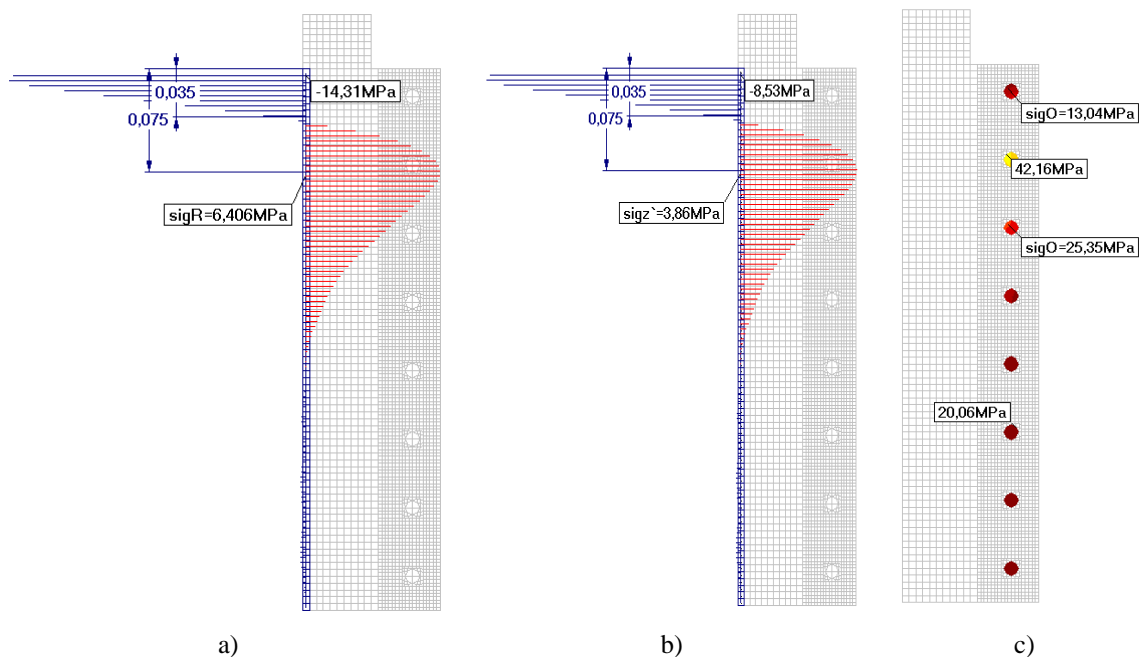
Pomiar skurczu betonu A i B dokonywano na normowych beleczkach 100x100x500 mm, a betonu C za pomocą czujników strunowych bezpośrednio na elementach głównych. Wiadomo, że rozwój skurczu zależy od wilgotności względnej powietrza i miarodajnego wymiaru przekroju elementu h_0 . **W przypadku rozpatrywanych betonów A oraz B wymiar h_0 był różny dla normowych beleczek i elementów głównych. Czy ten fakt został uwzględniony w analizie MES, za pomocą której badano wpływ skurczu na odkształcenia zbrojenia?** W podrozdziale 9.1.1.5 opisującym modelowanie skurczu betonu jest tylko stwierdzenie, że został on wprowadzany w 20 krokach, w których wzrastała jego wielkość. **Skurczowi towarzyszyło także pęcznienie - czy ten fakt został również uwzględniony?**

- do sposobu prezentacji wyników analiz i badań

Zdaniem recenzenta wyniki pomiarów wszystkich elementów badawczych powinny być zamieszczone w załączniku według określonej zasady. Były wykonywane po 3 lub 4 egzemplarze poszczególnych elementów, ale nigdzie nie podano sił niszczących dla każdego z nich. W tablicach 7.1 i 7.2 można znaleźć tylko wartości średnie dla każdego rodzaju elementu. Nie wiadomo co w tych

tablicach oznacza symbol „ ν ” wyrażony w %. Tego oznaczania nie ma również w opisie symboli (str. 17 i 18).

Mapy naprężeń uzyskane za pomocą MES są nieczytelne i trudno z nich coś wydedukować. Modele badawcze charakteryzowały się osiową symetrią, można było ten fakt wykorzystać w analizie. Bardziej czytelny sposób prezentacji wyników byłoby na wykresach, jak poniżej.



Naprężenia w modelu (R=4) przy działaniu siły dociskającej 1000kN: a) w betonie w kierunku radialnym, b) w betonie w kierunku obwodowym, c) naprężenia w zbrojeniu

Powyższą analizę recenzent wykonał w zakresie liniowo-sprężystej pracy modelu, chcąc tylko zademonstrować bardziej czytelną formę prezentacji wyników.

– uwagi edycyjne

Pod względem edycyjnym praca budzi wiele zastrzeżeń. Jest nieprzyjemna dla czytelnika. Zawiera wiele powtórzeń w różnych miejscach, jak również wiele informacji niezwiązanych bezpośrednio z tematyką doktoratu lub mało dla niej istotnych.

Przykłady niezręcznych sformułowań i powtórzeń:

- str. 23. p.2.1. „...okolice podparcia belek”, lepiej byłoby – „strefy podparcia”;
- Rys. 5.1. zamiast sformułowania „próbki wykonane w ramach tej pracy” można napisać „badania własne”;
- zamiast „próbki z dotychczasowych badań – uwzględnione w analizie” można napisać „badania obce uwzględnione w analizie”;
- Rys. 5.2. jest powtórzeniem informacji z Tabeli 5.2.;

- na str. 94 jest mowa o wzorze (5.3), który pojawia się dopiero str. 98, jest to trochę niewygodne dla czytelnika;
- Tabela 5.13 – w badaniach Wurma i Daschnera (1977) podano stopień zbrojenia 22 i 32%;
- str. 54 – co to znaczy termin „objętościowy stopień zbrojenia poprzecznego” ?;
- str. 218, pierwszy akapit od góry – „Przemieszczenia poziome betonu...” – chyba chodziło o odkształcenia;
- str. 218 i 219 – tekst przed rys. 8.29 został powtórzony po rysunku.
- str. 212, na rys. 8.26, 8.27, 8.28 wartości średnie naprężeń w spiralach są większe od granicy plastyczności ($\sigma_{s,mid}/f_y > 1$);
- str. 213, w 2-gim akapicie w nawiasie jest „($\sigma_{s,mid} = 0,92 f_y$ – bez uwzględnienia uzwojenia i $\sigma_{s,mid} = 0,83 f_y$)” – o co chodzi ?;
- str. 215, w analizie naprężeń na poszczególnych pętlach spirali autor odwołuje się do punktów pomiarowych (p0.0 i p1.5), których położenie pokazano na str. 140. ułatwiłoby czytelność pracy, gdyby podano nr pętli licząc od powierzchni docisku lub rzędną w [mm] od tej powierzchni;
- wzory podane na str. 273 (10.1), (10.2) i (10.3) wcześniej były zanumerowane (8.5), (8.7) i (8.8);

Osobnym problemem jest przyjęty przez doktoranta sposób cytowania pozycji literaturowych bez przypisania poszczególnym pozycjom numerów. Wymusza to za każdym razem podawanie nazwiska i roku publikacji lub nazwy opracowania w przypadku norm i raportów. Nie wszystkie przywołane w tekście prace znalazły się w spisie. Być może również nie wszystkie prace w spisie są przywołane tekście – trudno to kontrolować bez automatycznej numeracji.

Niektóre pozycje są nieprecyzyjnie opisane. Nie wiadomo, czy to jest praca doktorska, magisterska lub inny rodzaj opracowania.

Przykłady takich pozycji:

- Bonetti, R.A. (2005). *Ultimate Strength of the Local Zone in Load Transfer Tests. Virginia Polytechnic Institute and State University.*
- Burdet, O.L. (1990) *Analysis and design of anchorage zones in post-tensioned concrete bridges. University of Texas at Austin.*
- Mertol, C. (2006). *Behavior of high-strength concrete members subjected to combined flexure and axial compression loadings. North Carolina State University.*
- Mörsh. (1924). *No Title.*

Ostatnią sprawą, na którą recenzent chciałby zwrócić uwagę, to terminologia używana w rozprawie:

- „**wyteżenie**” – termin przypisany do hipotez wytrzymałościowych materiałów; w pracy jest kilkadziesiąt razy użyty niewłaściwie w sensie stopnia zaawansowania obciążenia w stosunku do obciążenia granicznego;
- „**posiadać**” – może osoba, człowiek, ale nie beton czy element konstrukcyjny; lepiej byłoby użyć w tych wypadkach – „ma” lub „zawiera”.

5. Podsumowanie i wnioski

Podjęto znaczny wysiłek studialny i badawczy dotyczący tematyki docisku w betonie wysokiej wytrzymałości. Zestawienie dotychczasowych prac w tym zakresie i ich twórcza analiza oraz wyniki badań własnych, wnoszą określone wartości merytoryczne do rozważanego przedmiotu dysertacji. Podniesione przez recenzenta uwagi krytyczne należy traktować, jako dyskusyjne i służące do ewentualnego uwzględnienia w dalszych pracach badawczych i publikacjach.

Zgodnie Art. 13.1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zdaniem recenzenta rozprawa Pana **mgr inż. Piotra Sokala** spełnia wszystkie powyższe wymagania. Stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie kandydata do publicznej obrony tej pracy.



.....

Łódź, dnia 21 listopada 2016r.