

Dr hab. inż. Jadwiga KRÓLIKOWSKA, prof. PK
Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **Pani mgr inż. Karoliny KOLASIŃSKIEJ** pt., „Zmiany właściwości substratów w czasie ich użytkowania na zielonych dachach”

1. Podstawa formalna recenzji

Recenzję opracowano w związku z pismem Dziekana Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z dnia 25.06.2018 roku o nr IDDD0000.4000.132.2018 oraz na podstawie umowy o dzieło z dnia 26.06.2018 roku.

2. Krótka charakterystyka rozprawy

Praca ma charakter badawczy i składa się z trzech podstawowych części: części literaturowej (rozdz. 3), części badawczej (rozdz. 5) oraz analizy otrzymanych wyników (rozdz. 6) a także podsumowania, spisu rysunków, tabel i bibliografii. Całość rozprawy obejmuje łącznie 7 rozdziałów, 170 stron, w tym 63 rysunków, 50 tabel, bibliografia zawiera 269 pozycji.

3. Ocena celowości podjęcia tematu

Miasta to swoisty ekosystem, w którym harmonijnie powinni współistnieć ludzie, infrastruktura i przyroda. Wyzwaniem natomiast jest takie ukierunkowanie rozwoju miasta, aby pozytywnie oddziaływał na wszystkie obszary życia, również na jakość środowiska przyrodniczego. Na terenach miast od zawsze występują zagrożenia naturalne generując straty społeczne, gospodarcze i środowiskowe, co wiąże się z panującym na danym obszarze klimatem, uwarunkowaniami przyrodniczymi oraz działalnością człowieka. Obecnie obserwuje się intensyfikację tych zagrożeń w Polsce jak i na świecie, a główną przyczynę upatruje się w postępującym ociepleniu klimatu, z którym wiąże się intensyfikacja ekstremalnych zjawisk atmosferycznych, w tym z występowaniem katastrof naturalnych.

Bardzo dobrym sposobem radzenia sobie z niekorzystnymi przejawami zmian klimatycznych mogą być rozwiązania oparte na wykorzystaniu sił natury, do których zalicza się zielono-błękitną infrastrukturę a wśród niej zielone dachy. Błękitno-zielona infrastruktura jest kluczowym elementem w wielu strategiach np. Narodowa Strategia Rozwoju Regionalnego 2010-2020, Europa 2020: Strategia Europejska (Bruksela, 03.3.2010 COM (2010) 2020 czy Strategia Rozwoju Kraju 2020 przyjęta 25 września 2012 przez Radę Ministrów. Zielono-błękitna infrastruktura w jednostkach zurbanizowanych jest technologią przyszłości w dziedzinie eko-inżynierii.

Dachy zielone cechują zdolności retencyjne, zdolności oczyszczania powietrza, możliwości ograniczenia powstawania miejskich wysp ciepła. O ich efektywności decyduje szereg czynników min.: uwarunkowania zewnętrzne (intensywność opadów, temperatura powietrza, zagospodarowanie przestrzenne), rozwiązanie konstrukcyjne dachu zielonego, warunki eksploatacyjne dachu zielonego.

Najważniejszą warstwą techniczną dachu zielonego, warunkującą rozwój roślinności, a tym samym gwarantującą spełnianie przez dach zielony środowiskowych funkcji jest substrat. Znajomość charakterystyki jego parametrów, jak się zmieniają w czasie jest wiodącym zagadnieniem na etapie projektowania dachu zielonego i późniejszej jego eksploatacji. Tych właśnie utylitarnych badań dotyczących zmian właściwości substratu wraz z upływem okresu jego eksploatacji podjęła się **Doktorantka** w swojej rozprawie. Brak dostatecznego rozpoznania tematu, bardzo aktualne kwestia stały się przesłanką do podjęcia tych badań.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

W części wprowadzającej (**rozd. 1**) zdefiniowane zostały skutki procesu urbanizacji, do których zaliczono: miejskie wyspy ciepła, wzrost liczby ekstremalnych zjawisk pogodowych takich jak intensywne opady czy huraganowe wiatry, obniżanie poziomu wód podziemnych. Zrównoważoną architekturę tj. rozwiązania techniczne zaliczane do zielonej architektury (zielonej infrastruktury) wskazano jako sposób na poprawę bilansu wodnego obszaru zurbanizowanego oraz obniżenia maksymalnych temperatur w lecie.

Rozdz. 2 obrazuje zainteresowanie badawcze zielonymi dachami w skali kraju i świata wskazując, że najwięcej rozpraw naukowych związanych jest z aspektami energetycznymi, zmianami jakości wód opadowych, hydrologią zielonych dachów czy wpływowi zielonych dachów na ekologię miejską. W rozdziale **Doktorantka** definiuje cel swojej rozprawy:

„Celem niniejszej pracy było określenie stanu wiedzy o zielonych dachach oraz podjęcie badań w tematyce pozwalającej w ograniczonym zakresie ten stan wiedzy rozszerzyć”

Rozdz. 3, dość obszerny obejmuje 62 strony i dotyczy przeglądu literatury stanowiącego tło do podjętych badań przez **Doktorantkę**. Przeglądu dokonano w wielu obszarach min.: rysu historycznego (**rozd. 3.1**), konstrukcji dachów zielonych (**rozd. 3.2**), hydrologii dachów zielonych (**rozd. 3.3**), wpływu zielonych dachów na jakość wody (**rozd. 3.4**) oraz aspektów ekonomicznych stosowania dachów zielonych (**rozd. 3.5**).

W **rozd. 4** zaprezentowano hipotezy badawcze pracy. Jak dowodzą przeprowadzone studia literaturowe dachy należą do elementów zrównoważonej gospodarki wodami opadowymi na obszarach miejskich. Przy nielicznych publikacjach dotyczących zmian właściwości substratów pod wpływem czynników zewnętrznych (starzenie się substratu), braku badań, których celem byłoby określenie sezonowej zmienności składu odpływów postawiono dwie hipotezy badawcze:

- 1) W czasie eksploatacji zielonych dachów dochodzi do dynamicznych zmian struktury porów substratów, co wpływa na zmianę retencji wody.
- 2) Skład wód odpływających z zielonych dachów wykazuje sezonową zmienność.

Aby udowodnić postawione hipotezy **mgr inż. Karolina Kolasińska** zrealizowała badania, dla których opis i metodyka przedstawione zostały szczegółowo w **rozdz. 5**.

Program badań (**rozdz. 5.1**) w odniesieniu do pierwszej hipotezy obejmował dwa eksperymenty: określenie wpływu 22 miesięcznej eksploatacji i 44 miesięcznej eksploatacji substratów, w warunkach naturalnych na zmiany zdolności do zatrzymania przez nie wody wyznaczając krzywe sorpcji wody pF oraz określenie wpływu zamarzania wody na właściwości badanych substratów. Dla weryfikacji drugiej hipotezy analizowano opad atmosferyczny oraz odpływ z dachów doświadczalnych w okresie od 15.03.2013 do 29.01.2015 r. W skład stanowiska badawczego (**rozdz. 5.2**) wchodziły cztery kuwety, stanowiące modele dachów zielonych typu ekstensywnego (oznaczone w pracy symbolem odpowiednio K1, K2, K3 i K4) i jedna, stanowiąca model dachu tradycyjnego, nazywanym później dachem referencyjnym. Badania przeprowadzono na trzech substratach: typu E Optigruen (A), typu M Optigruen (B) oraz typu PERL KÖRNUNG 2/10 (C).

Rozdz. 5.3 poświęcono opisowi metody oznaczania gęstości właściwej i objętościowej substratu, barwy i zwilżalności substratu, właściwości wodnej substratu oraz wpływu zamarzania i rozmrażania substratów na ich strukturę, uziarnienie.

Gęstość właściwą oznaczono metodą piknometryczną (porównawczą) a gęstość objętościową z użyciem cylinderków Kopecky'ego.

Oceny barwy substratów wykonano z zastosowaniem skali barw Munsella opartej na opisie trzech cech: barwy, nasycenia i jasności, porównując próbę ze wzornikiem i odczytaniu symbolu najbliższego wzorca.

Badania zwilżalności substratów wykonano metodą MED (ang. *Molarity Etanol Dropped*), która polega na zadawaniu kropli alkoholu o różnym stężeniu na próbkę substratu i obserwacji w czasie 3 sekund, przy jakim stężeniu kropla alkoholu wsiąka w substrat.

Właściwości wodne substratów określono na podstawie empirycznie ustalonych krzywych sorpcji wody (krzywych pF). Substraty do badań krzywej pF pobierano w stanie naturalnym, w 3 powtórzeniach do cylinderków Kopecky'ego, które zalewano wodą do połowy ich wysokości. Czas nasiąkania wynosił 2 tygodnie, zdolność retencyjne substratów oznaczono przy użyciu bloków piaskowych i kaolinowo piaskowych firmy Eijkelkamp w zakresie pF 0-2,7 oraz komór Richarda w zakresie pF 3,2-4,2.

Zamrażanie substratu wykonywano w cylinderkach Kopecky'ego przetrzymując próby substratu w temperaturze -12°C przez 14 godzin w zamrażalniku chłodziarki a rozmrażano w warunkach pokojowych przez 10 godzin. Skład granulometryczny zawiesin w roztworach, po usunięciu z nich dużych cząstek oznaczono na granulometrze laserowym Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments Ltd.6

Metodykę badania jakości opadów i odpływów z modeli dachów przedstawia (**rozdz. 5.4**). Do oceny jakości opadu i odpływów ze stanowisk badawczych dachów **Doktorantka** posłużyła się podstawowymi wskaźnikami, określając je zgodnie z obowiązującymi normami. Są to: azot amonowy, azot azotynowy, azot azotanowy, utlenialność, ChZT, BZT₅, siarczany, chlorki, odczyn oraz przewodność elektroniczna właściwa.

Najobszerniejszy **rozdział rozprawy (6)** prezentuje wyniki przeprowadzonych badań i ich analizę.

Wyznaczone metodą piknometryczną gęstości właściwe substratów nie wykazywały istotnych zmian w wyniku eksploatacji zielonych dachów, zaobserwowano niewielki wzrost gęstości właściwej substratów wraz ze wzrostem głębokości pobrania prób. Gęstość objętościowa była bardzo zróżnicowana (**rozdz. 6.1**).

Badania wpływu czasu eksploatacji substratów na zmianę ich barwy wykazały, że wszystkie substraty w wyniku eksploatacji zmieniały barwę na czarną, co prowadzi do istotnych zmian stosunku ilości promieniowania odbitego do padającego. Eksploatacja substratów nie wpływa na zwilżalność powierzchni substratów (**rozdz. 6.2**).

W **rozdz. 6.3 Doktorantka** prezentuje wyniki wpływu czasu eksploatacji substratów na ich zdolności retencyjne. Posługując się krzywą pF określiła właściwości wodne substratów, wyliczając na jej podstawie ilości wody grawitacyjnej, łatwo, trudno i niedostępnej dla roślin, efektywną i potencjalną retencję użytkową jak również udział procentowy makro-, mezo- i mikroporów. (rys. 28-31, tab. 15-18). Analiza otrzymanych wyników wskazywała, że w nowych substratach w czasie eksploatacji dochodzi do zagęszczenia struktury substratu a w konsekwencji do zmniejszenia ilości makroporów co skutkuje zmniejszeniem zdolności do zatrzymania wody przez substrat, skróceniem czasu opóźnienia odpływu z dachów zielonych.

Wyniki badań wpływu zamrażania i rozmrażania na właściwości substratów przedstawiono w **rozdz. 6.4**. W tabelach 19-22 oraz na rys. 32-35 przedstawiono wyniki badań krzywych pF wykonanych dla substratów pobranych z dachów K1, K2, K3 i K4 po 40, 80 i 120 cyklach zamrażania i rozmrażania oraz wyliczone na ich podstawie ilości wody grawitacyjnej, łatwo, trudno i niedostępnej dla roślin, efektywną i potencjalną retencję użytkową jak również udział procentowy makro-, mezo- i mikroporów. Z ich analizy **Doktorantka** słusznie wnioskuje, że przy każdym zamrażaniu i rozmrażaniu substratu zmianie ulega przestrzenny układ makro-, mezo- i mikroporów, co przekłada się na dynamiczne zmiany krzywej pF oraz udział wody wolnej, łatwo, trudno i niedostępnej dla roślin. Rysunki 37-39 przedstawiają dystrybuanty prawdopodobieństwa objętości cząstek o danej średnicy zastępczej wraz z cząstkami o średnicach mniejszych wymytych z substratów pobranych z dachów K1, K2, K3 i K4 oraz po 40, 80 i 120 cyklach zamrażania i rozmrażania. **Doktorantka** stwierdza, że podczas zamrażania prób dochodziło do zmiany składu granulometrycznego zawiesin o średnicach zastępczych cząstek od 0,02 do 2000 μm we wszystkich badanych substratach, są one efektem powstawania naprężeń w makro- i mezoporach wskutek tworzenia się kryształitów lodu. W wyniku zamrażania dochodziło do „rozdrabniania” cząstek zawiesiny. Zmiany liczebności cząstek w zakresie od 0,02 do 2000 μm obecnych w porach zewnętrznych substratów mają charakter losowy jako efekt stochastycznego przebiegu zjawisk wpływających na ich powstanie.

Wyniki z ostatniego etapu badań dotyczących jakości wód opadowych i odpływających z dachu referencyjnego oraz modeli dachów zielonych zawiera **rozdz. 6.5**.

Dane o jakości wód opadowych **mgr inż. Karolina Kolasińska** pozyskała z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB, Oddział we Wrocławiu, które publikowane są na stronie internetowej

http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/chemistry_of_atmospheic_precipitation. (tabela 25

i rys. 41-44) oraz z własnych badań, analiz przeprowadzonych w Wydziałowym Laboratorium Technologii Wody i Ścieków Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (tabela 2.6).

Z przedstawionych danych (tabela 25 i rys. 41-44) widać, że skład chemiczny opadów na obszarze Polski jest silnie zróżnicowany w czasie i przestrzeni, uzależniony od lokalnych emisji zanieczyszczeń. W ramach pracy porównano zakresy zmienności wartości stężeń amoniaku, sumy azotu azotynowego i azotanowego, chlorków i siarczanów oraz wartości przewodności elektrolitycznej i odczynu wody z badań własnych oraz danych z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB, Oddział we Wrocławiu. Obserwowany zakres stężeń azotu amonowego w próbach własnych wód opadowych nie odbiegał od wartości tego wskaźnika z monitoringu chemizmu opadów atmosferycznych na obszarze Polski. Znaczna rozbieżność występuje w odniesieniu do sumy azotu azotynowego i azotanowego. Wyższe wartości tego wskaźnika określone na podstawie własnych badań **Doktorantka** wiąże z lokalnym zanieczyszczeniem powietrza tlenkami azotu pochodzenia komunikacyjnego. Wody opadowe na stanowisku we Wrocławiu charakteryzowały się również zwiększonymi stężeniami chlorków, siarczanów i przewodności elektrolitycznej oraz podwyższonymi wartościami utlenialności, ChZT, BZT₅. **Autorka** konkluduje, że wody opadowe na obszarach zurbanizowanych mogą wносить do kanalizacji oraz środowiska (wód powierzchniowych i podziemnych) znaczne ładunki zanieczyszczeń.

Wyniki własnych badań wód opadowych, odpływających z dachu referencyjnego oraz z modeli dachów zielonych K1, K2, K3 i K4 dotyczące stężeń azotu amonowego, azotu azotynowego, azotu azotanowego, chlorków, siarczanów, utlenialności, ChZT, BZT₅, odczynu oraz przewodności elektronicznej przedstawiła **Doktorantka** w tabelach 27-36, a wartości statystyczne tych wielkości (mediana, minimum, maksimum, kwantyl dolny, kwantyl górny), wyliczone ze zbioru 21 próbek w tabeli 37. Analizując otrzymane wyniki łatwo daje się zauważyć, że w przypadku wszystkich wskaźników jakości wód odpływających w wielu próbach ich wartości przekraczały wartości określone w opadzie dla dachu. Procent ogólnej liczby wykonanych analiz dla poszczególnych wskaźników wód w zależności od miejsca ich poboru, dla których stwierdzono wyższe wartości w porównaniu do wartości tych wskaźników w opadzie w dniu poboru prób zamieszczono w tabeli 38. Jak zauważa **Doktorantka** w przypadku dachu referencyjnego jest to związane ze splukiwaniem zanieczyszczeń tj. zakumulowanych w porze suchej pyłków zawierających sole amonowe w połączeniu z azotynami, azotanami, chlorkami czy siarczanami. W przypadku dachów zielonych na zmianę stężeń wpływ mają min. przemiany biochemiczne zachodzące w substratach. Na rysunkach 46-51 przedstawiono zmiany stężeń analizowanych parametrów jakości wody opadowej oraz wody odpływowej z dachów doświadczalnych uwzględniając poszczególne pory roku, w których pobierano próby do analizy. Badania potwierdzają, że na skład chemiczny odpływu z dachów zielonych wpływ ma wiele czynników: okresowe zmiany temperatur, cykliczność opadów atmosferycznych, skład substratu (zawartości substancji organicznej i nawozów), jego miąższość, stosowane zabiegi pielęgnacyjne, okres eksploatacji substratu, jakość powietrza, lokalne źródła zanieczyszczenia. W odpływach z dachów zielonych przeważają związki trudno rozkładalne na drodze przemian biochemicznych.

W końcowej części **rozdziału 6 mgr inż. Karolina Kolasińska** określiła współzależność pomiędzy dwoma zbiorami oznaczonych wartości tego samego wskaźnika

dla różnych miejsc poboru prób. W obliczeniach statystycznych związków korelacyjnych zastosowano program STATISTICA 13PL Wykresy rozrzutu i histogramy częstości występowania dla stężeń azotu amonowego, azotu azotynowego, azotu azotanowego, chlorków, siarczanów, utlenialności, ChZT, BZT₅, odczynu oraz przewodności elektronicznej przedstawione zostały w postaci wykresów macierzowych (rys. 52-63). Wyniki obliczeń współczynników korelacji Rho Spearmana zbiorów wyników badań stężeń (wartości) analizowanych parametrów przedstawiono w tabelach 39—50.

Zakończenie rozprawy stanowią wnioski końcowe (**rozd. 7**). W ramach podsumowania **Doktorantka** odnosi uzyskane wyniki z prowadzonych badań do postawionych tez konkludując ich zasadność. W rozprawie zostało przedstawionych 9 wniosków. Zostały one precyzyjnie zredagowane i są dobrą rekapitulacją przeprowadzonych badań, świadcząca o ich realizacji w pełnym zakresie w stosunku do wcześniej zaplanowanego.

Spis literatury obejmuje 269 pozycji, na które składają się: publikacje zagraniczne (stanowią zdecydowanie większą liczbę pozycji), publikacje krajowe, dyrektywy, normy, strony internetowe. Świadczy to o dobrej znajomości przez **Doktorantkę** piśmiennictwa dotyczącego tematyki rozprawy, zarówno krajowego jak i zagranicznego, które ze znanstwem cytowała w swojej rozprawie. Doktorantka wykazała współautorstwo w jednej publikacji z omawianego obszaru.

Reasumując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że **mgr inż. Karolina Kolasińska** zaplanowała i przeprowadziła kompleksowe, pracochłonne i trudne w realizacji badania, które mają zarówno charakter naukowy, poznawczy jak i użyteczny. **Doktorantka** postawiła sobie szeroki zakres badań, gwarantujący udowodnienie hipotez. Zwraca pozytywną uwagę prezentacja wyników badań bardzo dobrze udokumentowanych licznymi wykresami różnych zależności i zestawieniami tabelarycznymi. Za istotny walor rozprawy należy uznać jej wymagany poziom naukowy oraz kompleksowy charakter zaprezentowanych rozważań.

Bardzo dobra znajomość tematyki rozprawy literatury, stosowanie nowoczesnych narzędzi badawczych, a także sposób realizacji zadania naukowego świadczą o bardzo dobrym opanowaniu przez **Doktorantkę** umiejętności rozwiązywania złożonych problemów naukowych.

Hipotezy rozprawy można uznać za udowodnione, cel rozprawy za wypełniony, a jej zakres za zrealizowany.

5. Uwagi szczegółowe

1. Str. 87. Tabela 14 Proszę o sprecyzowanie modele zielonego dachu K1 oraz K2, czym się różnią, na str. 101 podano informacje, że podłożem na dach K2 jest substrat B.

2. Str. 119 Proszę o wyjaśnienie zdania: *Podobną charakterystykę dla opadów przedstawiono wcześniej w tabeli 36*
3. Proszę wyjaśnić czym kierowano się przy wyborze substratów użytych w badaniach
4. Szkoda, że we wnioskach nie znalazły się praktyczne wskazania dotyczące eksploatacji substratów np. w jakich odstępach czasowych uzupełniać, regenerować.
5. Proszę podać czy i w jakim kierunku zamierza Pani prowadzić dalsze badania

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona przez **Panią mgr inż. KAROLINĘ KOLASIŃSKĄ** rozprawa doktorska pt. „Zmiany właściwości substratów w czasie ich użytkowania na zielonych dachach” stanowi znaczące, wartościowe osiągnięcia jej **Autorki** i wnosi oryginalny wkład do rozwoju wiedzy o warunkach eksploatacyjnych dachów zielonych, elementu zielono-błękitnej infrastruktury w jednostkach zurbanizowanych stanowiącej technologię przyszłości w dziedzinie eko-inżynierii.

Rozprawa spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami, o stopniach naukowych, tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki [jedn. tekst Dz. U. Nr 84 poz. 455 (2011)]. Wobec tego wnoszę o dopuszczenie **Doktorantki** do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, sierpień 2018 roku.

