

Prof. dr hab. inż. Dariusz Gawin, prof. zw. PŁ
Politechnika Łódzka
Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź

Łódź, 9 kwietnia 2016 roku.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Bochenek
„Ocena zmienności parametrów higro-termicznych betonu komórkowego
o zróżnicowanej gęstości”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 10 lutego 2016 r. oraz pismo Dziekana Wydziału – Pani dr hab. inż. Marii Kaszyńskiej - z dnia 15 lutego 2016 r.

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska „Ocena zmienności parametrów higro-termicznych betonu komórkowego o zróżnicowanej gęstości”, opracowana przez mgr inż. Magdalenę Bochenek z Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Halina Garbalińska z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Praca ma charakter doświadczalny, liczy 242 strony i zawiera 164 rysunki, 37 tablic oraz 272 pozycje literaturowe (w tym 18 polskich i zagranicznych norm oraz specyfikacji technicznych). Na moją prośbę Doktorantka opracowała także liczący 101 stron, oprawiony jako osobny tom „Załącznik do rozprawy doktorskiej”, w którym przedstawiła analizę statystyczną wyników swoich badań doświadczalnych.

3. Ogólna ocena rozprawy, ocena trafności doboru jej tematu i tytułu, sformułowania tez, jej układu i doboru źródeł

Recenzowana praca dotyczy bardzo ważnej praktycznie problematyki zmienności właściwości cieplno-wilgotnościowych porowatych materiałów budowlanych, narażonych podczas eksploatacji budynku na działanie zmiennych w czasie warunków środowiskowych, wpływających na stan higro-termiczny tych materiałów. W dysertacji wyznaczono, dla 4 betonów komórkowych o gęstości ok. 400, 500, 600 i 700 kg/m³, parametry struktury wewnętrznej, izotermy sorpcji wilgoci i współczynnik podciągania kapilarnego wody oraz zależności od wilgotności materiału: parametrów cieplnych i współczynnika dyfuzji pary wodnej. Dodatkowo zbadano rozkład wilgoci i parametrów cieplnych w próbkach tych materiałów podczas modelowego procesu ich wysychania w warunkach laboratoryjnych.

Praca wpisuje się w bardzo aktualny nurt badań materiałów budowlanych, który ma na celu modelowanie matematyczne zjawisk cieplno-wilgotnościowych i chemicznych zachodzących w tych materiałach w rzeczywistych warunkach środowiskowych oraz prognozowanie na tej podstawie ich trwałości. Wymaga to znajomości szeregu parametrów fizycznych, charakteryzujących mikrostrukturę porowatości, zjawiska transportu masy i energii, właściwości wytrzymałościowe oraz kinetykę procesów degradacji chemicznej i mechanicznej (pęknięcia) w materiałach budowlanych. Współcześnie stosowane modele matematyczne w/w zjawisk uwzględniają szereg nieliniowości materiałowych, głównie związanych ze stanem higro-termicznym, które należy wyznaczyć doświadczalnie. Stosuje się tu szereg metod badawczych, bazujących na bezpośrednim wyznaczeniu parametrów fizycznych materiałów podczas (quasi-)stacjonarnych procesów cieplnych i wilgotnościowych w różnych warunkach, albo opartych na rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego na podstawie wyników eksperymentalnych badań niestacjonarnych, modelowych procesów cieplnych i/lub wilgotnościowych. W ostatnim okresie obserwuje się szczególnie dynamiczny rozwój badań dotyczących tej ostatniej grupy. Promotorka Doktorantki od szeregu lat specjalizuje się w badaniach właściwości wilgotnościowych materiałów budowlanych za pomocą metod bezpośrednich, mając w dorobku kilka autorskich metod interpretacji ich wyników, które zostały opublikowane w wiodących czasopismach naukowych. Doktorantka zastosowała część z tych metod w swojej dysertacji, uzupełniając je nowszymi metodami, jak dy-

namiczna metoda wyznaczania izoterm sorpcji DVS (ang. *dynamic vapour sorption*) czy niestacjonarna metoda wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła i pojemności cieplnej materiału.

Badania przedstawione w rozprawie są w części powtórzeniem badań znanych już z literatury, m.in. z prac prof. Haliny Garbalińskiej, ale mają kompleksowy i systematyczny charakter oraz zostały przeprowadzone dla betonów komórkowych typowych klas gęstości produkowanych w naszym kraju. Tak więc ich podjęcie przez Doktorantkę należy uznać za celowe, zwłaszcza w kontekście szerokiego stosowania w polskim budownictwie mieszkaniowym tego materiału. Recenzowana dysertacja mieści się w nurcie badań, dotyczących właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów budowlanych, prowadzonych od wielu lat w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie, który stał się jednym z wiodących ośrodków badawczych z tej tematyki, o ugruntowanej pozycji nie tylko w naszym kraju.

Mam pewne zastrzeżenia do tytułu pracy, gdyż moim zdaniem użycie w nim terminu „*beton komórkowy o zróżnicowanej gęstości*” sugeruje, że dotyczy ona jednego betonu, gęstość którego jest w jakiś sposób zróżnicowana, np. po wysokości w ramach jednego bloczku. Moim zdaniem, bardziej adekwatnym do treści pracy byłby tytuł o brzmieniu „*Ocena zmienności parametrów higro-termicznych betonu komórkowego o różnej gęstości*”.

Po wprowadzeniu do tematyki dysertacji i podsumowaniu stanu wiedzy, w rozdziale trzecim Doktorantka sformułowała tezę brzmiącą: „*Zarówno stany równowagowe, jak i współczynniki higro-termiczne betonu komórkowego, jako testowego ośrodka porowatego, wykazują silną a jednocześnie zróżnicowaną zależność od poziomu wilgotności oraz specyficznej mikrostruktury poszczególnych klas gęstości*”.

Jest ona niewątpliwie trafna, ale jednocześnie dość oczywista w świetle współczesnego stanu wiedzy i dostępnej literatury, w tym także prac Promotorki Doktorantki. Należy jednak podkreślić, że badania przedstawione w pracy jednoznacznie potwierdziły prawdziwość tej tezy.

Kolejność i układ rozdziałów rozprawy są logiczne i dostosowane do jej eksperymentalnego charakteru, choć moim zdaniem daje się odczuć brak załącznika ze szczegółowymi wynikami badań, które mogłyby być przydatne innym badaczom zajmującym się modelowaniem zjawisk cieplno-wilgotnościowych w betonie komórkowym (zwłaszcza te zawarte w rozdziale 9.). Badania te zostały bowiem przeprowadzone bardzo starannie, co należy podkreślić. Na moją prośbę Doktorantka wykonała analizę niepewności wszystkich Jej pomiarów, co dodatkowo podniosło wartość merytoryczną pracy i przydatność jej wyników dla innych badaczy.

Drugim mankamentem przyjętego układu dysertacji są niewłaściwe, moim zdaniem, proporcje między oryginalnymi wynikami badań i rozważaniami Doktorantki (ok. 86 stron, tj. 44.3% objętości pracy), a przeglądem literatury i wyników badań innych autorów (ok. 85 stron – 43.8%). Zwyczajowo w pracach doktorskich podsumowanie aktualnego stanu wiedzy z danej tematyki jest punktem wyjścia do dalszych rozważań i zasadniczej części merytorycznej, a w przypadku recenzowanej rozprawy oba te elementy zostały potraktowane równorzędnie i przeplatają się w wielu jej rozdziałach. Podobny układ pracy bywa czasem przyjmowany we francuskich pracach doktorskich, ale moim zdaniem utrudnia on lekturę i wyodrębnienie oryginalnego wkładu autora. Należy jednak przyznać, że mgr inż. M. Bochenek udało się zebrać większość prac polskich i zagranicznych autorów, które dotyczyły doświadczalnych badań właściwości fizycznych betonów komórkowych, co może ułatwić zapoznanie się z tą tematyką badań przez osoby nią zainteresowane. Wynikiem takiego podejścia jest niezwykle bogaty spis literatury cytowanej przez Doktorantkę, obejmujący 272 pozycje (139 polskich, 115 angielskich oraz 18 norm i specyfikacji technicznych), w tym 9 prac Doktorantki i aż 60 Jej Promotorki (czy wszystkie z tych prac są na tyle ważne, że wymagają ich zacytowania?).

Spis ten jest wyczerpujący i na ogół trafnie dobrany, choć z jednej strony jest on zbyt liczny jak na rozprawę doktorską, a z drugiej brak w nim choćby kilku najważniejszych prac dotyczących zastosowania zagadnienia odwrotnego do identyfikacji parametrów charakteryzujących właściwości fizyczne materiałów budowlanych (np. z zastosowaniem transformaty Boltzmanna, stosowanej do wyznaczania parametrów cieplno-wilgotnościowych już od lat 80-tych XX wieku – patrz doktorat R. Kohonena z 1984 r., czy też późniejsze, liczne prace badaczy z grupy prof. R. Černego).

Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy odpowiada jej treści (z zastrzeżeniem dotyczącym użycia w nim terminu „*zróżnicowana gęstość*”), zaś tematyka pracy została dobrana trafnie oraz stanowi aktualny i ważny problem badawczy fizyki materiałów budowlanych.

4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z dziesięciu rozdziałów, streszczenia polskiego i angielskiego, spisu ważniejszych oznaczeń, rysunków i tabel oraz spisu literatury, obejmującego 272 pozycje uporządkowane w kolejności alfabetycznej, w tym 18 norm i specyfikacji technicznych (podanych wśród innych pozycji literatury, choć moim zdaniem logiczniejsze byłoby ich osobne zestawienie na końcu spisu).

Uzupełnieniem pracy jest wydany w osobnym tomie załącznik z oceną niepewności wyników badań doświadczalnych, poprzedzony krótkim opisem zastosowanych w niej metod analizy statystycznej.

Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie i uzasadnienie tematyki podjętych w pracy badań, a także krótkie podsumowanie stanu wiedzy z zakresu zjawisk wilgotnościowych w porowatych materiałach budowlanych. Krótko omówiono w nim także właściwości fizyczne betonu komórkowego oraz wyniki badań dyfraktometrycznych, porozymetrii rtęciowej i mikrotomografii rentgenowskiej, wykonanych przez Doktorantkę dla czterech klas gęstości tego materiału: 400, 500, 600 i 700 kg/m³. Rozdział ten kończy krótkie przedstawienie układu pracy, opisowe i graficzne. Moim zdaniem umieszczenie w rozdziale zatytułowanym „Wstęp”, wyników badań struktury porowatości i składu chemicznego analizowanych betonów komórkowych nie jest właściwe i logiczne – lepiej byłoby wyodrębnić osobny rozdział poświęcony opisowi mikrostruktury tych materiałów, tym bardziej, że w tezie pracy mówi się o zależności parametrów fizycznych od „specyficznej mikrostruktury poszczególnych klas gęstości” betonu komórkowego.

Nie zgadzam się ze stwierdzeniem Doktorantki na str. 13, że: „... występują ewidentne braki w odniesieniu do cieplnych oraz wilgotnościowych współczynników materiałowych – zarówno, jeżeli chodzi o sprawdzoną metodykę ich pomiaru, jak i poprawnie odtworzone funkcyjne zależności tych współczynników od parametrów środowiskowych oraz strukturalnych.”. Moim zdaniem metodyka pomiarów właściwości cieplnych i wilgotnościowych jest już dobrze dopracowana i stosowana w praktyce, więc trudno mówić o jej brakach. Na przykład w ramach projektu Międzynarodowej Agencji Energii „Annex 41”, zakończonego w 2008 roku, wykonano szerokie badania porównawcze tych właściwości dla wzorcowego materiału budowlanego w kilku wiodących laboratoriach w Europie (file:///C:/Users/user/Downloads/byg_r191.pdf). Na konferencjach naukowych z zakresu fizyki budowli, np. *Building Physics in Nordic Countries, International Conference on Building Physics*, wielokrotnie przedstawiano wyniki takich badań dla różnych materiałów budowlanych. Jak wiadomo, właściwości te są ściśle powiązane z mikrostrukturą konkretnego materiału i niemożliwe jest ich zbadanie dla wszystkich materiałów, a nawet wszystkich odmian tego samego materiału, np. betonu komórkowego, więc trudno oczekiwać wielu publikacji naukowych na ten temat. Parametry te są rutynowo umieszczane w bazach danych materiałowych wielu programów komputerowych służących do symulacji zjawisk cieplno-wilgotnościowych w przegrodach budynku, np. dobrze znanego w Polsce programu WUFI, opracowanego w Instytucie Fraunhofera Fizyki Budowli w Holzkirchen i zawierającego polskie dane materiałowe i pogodowe opracowane w Politechnice Łódzkiej.

Nie zgadzam się ze stwierdzeniem Doktorantki na str. 18 „Pomimo licznych badań [...] brak jest jednak metod pozwalających na teoretyczne wyznaczenie izoterm sorpcji i desorpcji dla dowolnego materiału porowatego”. Od kilkunastu już lat stosowane są 3-wymiarowe i niestrukturalne modele siatkowe (*ang. pore network models*), które na podstawie krzywej rozkładu wielkości porów pozwalają na przewidywanie izoterm sorpcji i współczynników transportu kapilarnego z dobrą dokładnością - por. prace z Delft University i University of Leuven, np. (file:///C:/Users/user/Downloads/Berentsen_2009.pdf).

Podczas omawiania podstawowych mechanizmów transportu wilgoci, Doktorantka nie uwzględniła mechanizmu „kondensacja – przepływ kapilarny – odparowanie”, który występuje w stanie częściowego nasycenia porów wodą, przy zawilgoceniu poniżej wilgotności krytycznej. Mechanizm ten został odkryty i wyjaśniony przez Philipa i de Vries dla ośrodków gruntowych już w latach 50-tych XX wieku, a w 1971 roku wymieniony w kontekście transportu wilgoci w betonie komórkowym w doktoracie Van der Kooi z Delft University, patrz (<https://pure.tue.nl/ws/files/3515933/101248.pdf>).

W rozdziale drugim bardzo szczegółowo omówiono wyniki badań doświadczalnych opublikowanych w 17 pracach (głównie autorów polskich i czeskich), dotyczących wpływu wilgotności na właściwości fizyczne betonu komórkowego. Jest to bardzo wyczerpujący i starannie przygotowany (w postaci tabelarycznej i graficznej) przegląd. W drugiej części tego rozdziału Autorka przedstawiła wyniki swoich badań wstępnych (nazwanych przez Nią rekonesansowymi) współczynnika przewodzenia ciepła, objętościowej pojemności cieplnej i wytrzymałości na ściskanie próbek wyciętych z bloczków betonu komórkowego 4 klas gęstości,

o dwóch zróżnicowanych wilgotnościach, otrzymanych w wyniku podciągania kapilarnego wody przez te bloczki. Wyniki tych wstępnych badań wykazały istotną zależność analizowanych parametrów od stanu zawilgocenia badanych materiałów.

W rozdziale trzecim Doktorantka sformułowała tezę, cel i zakres swojej dysertacji. Moją ocenę merytoryczną i uwagi dotyczące tezy pracy zawarłem już w poprzedniej części recenzji. Tutaj chciałbym odnieść się do zakresu przeprowadzonych badań, które były niezwykle czasochłonne i dostarczyły ważnych praktycznie danych o zależności parametrów materiałowych badanych betonów komórkowych od ich zawilgocenia, a jednak brakuje w nich przysłowiowej „kropki nad i”. Mgr inż. M. Bochenek wykonała bowiem bardzo pracochłonne badania zmian rozkładu wilgoci w próbkach gazobetonowych podczas ich wysychania w warunkach laboratoryjnych (rozdział 9.), ale nie wykorzystwała tych wyników do walidacji wyznaczonych przez siebie w poprzednich częściach dysertacji zależności parametrów materiałowych od ich zawilgocenia. Dysponowała przecież kompletem danych, aby wykonać takie obliczenia, np. programem WUFI dostępnym na wielu polskich uczelniach (przygotowanie danych i obliczenia zajęłyby kilka godzin), i porównać ich wyniki ze swoimi danymi doświadczalnymi. Taka walidacja byłaby potwierdzeniem, że wyniki Jej badań parametrów ciepło-wilgotnościowych gazobetonów mogą być wykorzystane praktycznie i włączone do bazy danych programu komputerowego stosowanego przez wielu inżynierów w Polsce i na świecie. Byłby to dodatkowy rezultat Jej badań, który mógłby być równocześnie jednym z celów Jej pracy, być może najważniejszym z praktycznego punktu widzenia.

Rozdział czwarty zawiera obszerny przegląd literatury dotyczącej sorpcji wilgoci w materiałach porowatych oraz badań izoterm sorpcji / desorpcji metodami równowagową i dynamiczną DVS (*ang. Dynamic Vapour Sorption*). Omówiono w nim podstawy teoretyczne i wyniki badań przeprowadzonych tymi metodami dla wybranych materiałów budowlanych, w tym betonów komórkowych. W drugiej części tego rozdziału przedstawiono wyniki badań sorpcji i desorpcji wilgoci, przeprowadzonych przez Doktorantkę metodami równowagową (nazywaną tradycyjną) i dynamiczną dla czterech klas gęstości betonu komórkowego. We wszystkich przypadkach stwierdzono istnienie histerezy oraz wyznaczono parametry modelu matematycznego Pelega, opisującego równania izoterm sorpcji / desorpcji materiałów kapilarno-porowatych. Wydaje się, że w niektórych przypadkach wyznaczone w ten sposób równania izoterm desorpcji w pewnym zakresie wilgotności względnych przebiegają poniżej izoterm adsorpcji (np. na Rysunkach 4.37, 4.39, 4.40). Czy według Doktorantki taki wynik jest dopuszczalny fizycznie? Moim zdaniem należało przyjąć dodatkowe ograniczenia przy wyznaczaniu równania regresji izoterm sorpcji i desorpcji modelem Pelega, aby uniknąć tego nie fizycznego efektu, albo opisywać wspólnym równaniem przebieg izoterm w zakresie wilgotności, w którym nie występuje histereza. Mam też wątpliwość dotyczącą danych w Tabeli 4.6 – jak interpretować ujemną wartość wilgotności w przypadku $\varphi = 0.3\%$ dla BK 400?

W pierwszej części rozdziału piątego przedstawiono przegląd literatury na temat metodyki i wyników badań współczynników dyfuzji pary wodnej podczas niestacjonarnych procesów sorpcji i desorpcji w różnych porowatych materiałach budowlanych, w tym tabelarycznie podsumowano wyniki badań różnych autorów. W drugiej, obszernej części tego rozdziału, Doktorantka opisała wyniki swoich badań współczynników dyfuzji pary wodnej dwiema metodami, które bazują na szczegółowych wynikach pomiarów procesów sorpcji i desorpcji wilgoci podczas dochodzenia do stanu równowagi termodynamicznej, opisanych w rozdziale czwartym.

Mam pewne wątpliwości dotyczące metodyki tych badań. Czy zdaniem Doktorantki, współczynniki dyfuzji mogą być wyznaczone proponowanymi metodami także w zakresie najwyższych wilgotności względnych, zwłaszcza powyżej 95%, gdy o masowym transporcie wilgoci decyduje głównie przepływ kapilarny wody, albo w zakresie 75% - 95%, gdy jest to mechanizm "kondensacja - przepływ kapilarny - odparowanie", w którym biorą udział zarówno para wodna, jak i ciekła woda? Jaki jest sens fizyczny współczynnika dyfuzji wyznaczonego przez Doktorantkę w tych zakresach wilgotności?

Na Rys. 5.7a,b,c,d,e końcowe wilgotności materiału (tj. po 700 h sorpcji wilgoci) są niższe niż te po ok. 60 h – co było przyczyną otrzymania takich wyników?

Mam wątpliwości dotyczące komentarza dotyczącego wyników przedstawionych na Rys. 5.25 - czy rzeczywiście współczynniki dyfuzji wyznaczone dla betonu komórkowego klasy 400 i 700 w procesie sorpcji wilgoci, dwiema różnymi metodami są do siebie zbliżone? Z Tabeli i wykresu wynika, że różnią się one o ok. 35% wartości dla klasy 400 i ok. 50% dla klasy 700. Stwierdzenie to jest usprawiedliwione w przypadku de-

sorpcji, ale nie sorpcji. Jak można wytłumaczyć takie właśnie wyniki badań i czy można było się ich spodziewać? Ponadto zaskakujące jest, że współczynnik dyfuzji pary wodnej dla betonu komórkowego klasy 400 jest mniejszy niż dla klasy 500. Biorąc pod uwagę jedynie dyfuzję pary wodnej, powinno być na odwrót! Jak zdaniem Doktorantki można wytłumaczyć fizycznie taki właśnie wynik Jej badań?

W rozdziale szóstym obszernie przedstawiono klasyczną metodę badania współczynnika dyfuzji pary wodnej w materiałach porowatych, tzw. metodę miseczkową (ang. *cup method*): mokrą i suchą, oraz jej modyfikację pozwalającą na wyznaczenie wartości tego współczynnika w węższych przedziałach wilgotności względnej. Pokazano także wybrane z literatury wyniki badań kilkunastu kompozytów cementowych wykonanych tymi metodami (w tym betonu komórkowego o różnej gęstości). Czy zdaniem Doktorantki metoda "inverted wet cup", pokazana na Rys. 6.2c pozwala zmierzyć współczynnik dyfuzji pary wodnej czy też dyfuzji ciekłej wody? Wyniki pomiaru tą metodą są zapewne silnie zależne od warunków brzegowych na dolnej powierzchni próbki – jak to wpłynie na dokładność pomiaru? Proszę o komentarz podczas obrony pracy.

Druga część tego rozdziału zawiera bardzo ciekawe wyniki badań wykonanych zmodyfikowaną metodą miseczkową, przeprowadzonych przez Doktorantkę w 6 stosunkowo wąskich przedziałach wilgotności względnej w analizowanych w pracy klasach betonu komórkowego. Wyniki te pokazują wyraźną zależność współczynnika dyfuzji pary w tych materiałach od ich wilgotności względnej. Analizując te wyniki, Tablice 6.8–11 i Rysunki 6.12–15, nasuwa się pytanie, jak można wytłumaczyć taki właśnie przebieg zmian efektywnego współczynnika dyfuzji pary wodnej w zależności od wilgotności materiału (tj. istnienie dwóch maksimum dla $\varphi \cong 45\%$ i $\varphi \cong 80\%$)? Czy zdaniem Doktorantki, odpowiada za to jedynie dyfuzja pary wodnej, czy też decydują o tym także inne mechanizmy transportu wilgoci? Proszę o komentarz podczas obrony pracy.

Rozdział siódmy poświęcony jest badaniom współczynnika podciągania kapilarnego wody. Rozpoczyna go przegląd literatury, w którym krótko omówiono podstawy fizyczne i normowe warunki tych badań (wg norm europejskich i amerykańskiej ASTM) oraz wybrane z ponad 20 pozycji literaturowych wyniki badań różnych materiałów budowlanych, w tym betonów komórkowych różnych klas gęstości.

Nie zgadzam się ze stwierdzeniem na str. 143, że obecność w przegrodzie wody kapilarnej "może być efektem błędów projektowych lub wykonawczych, bądź też sytuacji nadzwyczajnych, związanych np. z awariami instalacji sanitarnych, czy działaniem wód powodziowych." Moim zdaniem, przyczyną tą są najczęściej opady atmosferyczne, jak wskazują liczne badania doświadczalne i obliczenia symulacyjne, np. programem WUFI. Wyjaśnienie na str. 147, dotyczące zmiany nachylenia przebiegu krzywej przyrostu masy próbki w funkcji pierwiastka kwadratowego z czasu, mówiące, że "wzrost masy jest związany z procesem redystrybucji uwięzionego powietrza i wprowadzaniem w to miejsce niewielkich już ilości wody." jest nie do końca prawdziwe. Moim zdaniem najważniejszą przyczyną tego zjawiska jest osiągnięcie górnej powierzchni próbki przez front wody podciąganej kapilarnie w części porów.

W drugiej części tego rozdziału przedstawiono wyniki badań własnych współczynnika podciągania kapilarnego wykonanych dla betonu komórkowego czterech klas analizowanych w pracy. Wyniki tych badań wskazują na duże zróżnicowanie wartości tego parametru w ramach jednej klasy gęstości betonu komórkowego, które w niektórych przypadkach przewyższało nawet różnice między różnymi klasami gęstości.

Mam kilka uwag i pytań do Doktorantki dotyczące wyników jej badań. Co było przyczyną spadku masy jednej z próbek podczas badania podciągania kapilarnego betonu komórkowego klasy 400 (Rys.7.13)? Czy wyniki badań tej próbki zostały odrzucone podczas wyznaczania średniego współczynnika podciągania kapilarnego dla tego materiału? Proszę o odniesienie się do tego problemu podczas publicznej obrony pracy.

Analizując wyniki pokazane na Rys. 7.17 i Tab. 7.6, można zauważyć wyraźnie różne od innych odmian betonu komórkowego zachowanie się betonu klasy 500. Jak zdaniem Doktorantki można wytłumaczyć to odmienne zachowanie, które nie pasuje do trendu wykazywanego przez pozostałe klasy gęstości tego materiału, tj. wyraźnie wolniejsze podciąganie kapilarne wody? Proszę o odpowiedź podczas publicznej obrony.

Ósmy rozdział dysertacji zawiera opis badań własnych parametrów termicznych betonu komórkowego 4 analizowanych klas gęstości przy różnej ich wilgotności. Poprzedza go krótki przegląd zależności opisujących wpływ zawilgocenia na wartość współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego, podawanych przez różne źródła literaturowe - najczęściej zależność ta miała charakter liniowy.

Druga część tego rozdziału przedstawia wyniki badań własnych współczynnika przewodzenia ciepła i objętościowej pojemności cieplnej próbek wyciętych z bloczków betonu komórkowego o zróżnicowanej wilgotności, uzyskanej w wyniku podciągania kapilarnego wody. Badania prowadzono metodą niestacjo-

narzną za pomocą czeskiego aparatu ISOMET 2104, który pozwala na wyznaczenie obu parametrów w ciągu kilku minut po wywołaniu impulsu strumienia ciepła, dzięki czemu unika się redystrybucji wilgoci w badanej próbce i wynikającego stąd błędu pomiaru. Dla wyników badań otrzymanych dla poszczególnych klas gazobetonu o różnej wilgotności wyznaczono parametry równania regresji liniowej, uzyskując we wszystkich przypadkach wysokie wartości współczynnika zgodności R^2 .

Doktorantka nie wyjaśniła, czy podczas wyznaczania dla poszczególnych klas gęstości betonu komórkowego zależności współczynnika przewodzenia ciepła i objętościowej pojemności cieplnej od wilgotności względnej, wykorzystwała równania izoterm sorpcji czy też desorpcji. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.

Proszę też o informację, czy Doktorantka ma jakieś doświadczenia dotyczące potwierdzenia dokładności pomiaru parametrów termicznych aparatem ISOMET 2104, np. poprzez porównanie wyników nim otrzymanych dla suchych materiałów budowlanych z klasycznymi pomiarami metodami stacjonarnymi, np. aparatem płytowym. Doświadczenia mojej grupy dotyczące badań prowadzonych tym aparatem nie są najlepsze i wskazują na duży wpływ na otrzymane wyniki jakości przygotowania powierzchni styku aparatu z badaną próbką.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono wyniki badań procesu wysychania w warunkach laboratoryjnych próbek wykonanych z czterech badanych klas gęstości betonu komórkowego. Tę część pracy rozpoczyna przegląd literatury dotyczącej teorii wysychania materiałów porowatych oraz przegląd wybranych wyników badań tego procesu w różnych materiałach budowlanych, opracowany na podstawie 20 pozycji literaturowych, polskich i zagranicznych.

Mam wątpliwość dotyczącą „*wiązania fizykochemicznego typu osmotycznego*” wspomnianego przez Doktorantkę w tej części pracy. Czy działanie ciśnienia osmotycznego można traktować jako rodzaj wiązania cząstek wody? Jest to efekt występujący w mikroskali struktury porowatości (najmniejsze mikropory materiału stanowią rodzaj membrany półprzepuszczalnej dla jonów soli), zaś wiązanie jest zwykle utożsamiane z oddziaływaniem w skali nanoskopowej. Proszę o komentarz na ten temat podczas publicznej obrony.

W drugiej części tego rozdziału Doktorantka omówiła wyniki swoich badań, przeprowadzonych metodą grawimetryczną i dotyczących zmian rozkładu wilgoci w próbkach betonu komórkowego różnych klas, wysychających w warunkach laboratoryjnych przez okres około 6 miesięcy.

Badania te były bardzo pracochłonne, gdyż zbadanie rozkładu wilgoci metodą grawimetryczną wymagało pocięcia tych próbek i ich późniejszego całkowitego wysuszenia. Przed jego rozpoczęciem badane były właściwości termiczne wilgotnych plastrów próbek. Zastosowana metoda wymagała użycia dużej ilości próbek, aby uniknąć wpływu naturalnego rozrzutu właściwości fizycznych materiału na otrzymane wyniki (rozkład wilgoci w różnych chwilach czasu był każdorazowo badany na innych próbkach). Czy prowadzony był monitoring całkowitej masy badanych próbek, aby wykluczyć te, w których przebieg procesu wyraźnie odbiegał od pozostałych? Proszę o uwzględnienie tego problemu podczas prezentacji pracy na obronie.

Jak już wspomniałem w komentarzu do rozdziału trzeciego, dane o zmianie rozkładu wilgotności materiału podczas wysychania w warunkach laboratoryjnych mają bardzo dużą wartość naukową. Mogły bowiem posłużyć do walidacji wyznaczonych wcześniej parametrów cieplno-wilgotnościowych zawilgoconych betonów komórkowych, a także do wyznaczenia efektywnego współczynnika dyfuzji wilgoci w funkcji jego wilgotności, stosując metodę rozwiązania zadania odwrotnego (np. po zastosowaniu transformaty Boltzmanna). Możliwe byłoby wówczas porównanie wyników badań metodami bezpośrednimi z metodą rozwiązania zadania odwrotnego, która jest współcześnie coraz powszechniej stosowana, także w fizyce budowlanej. Szkoda, że Doktorantka nie wykorzystwała tej możliwości i ograniczyła się do dość trywialnej konkluzji, że „*badania dowodzą silnego zróżnicowania w rozkładzie badanych wielkości fizycznych (λ , C_p oraz U_v)*” betonu komórkowego podczas wysychania.

Nasuwa się więc pytanie, jaki był cel badań procesów wysychania betonów komórkowych, przedstawionych w tym rozdziale. Stwierdzenie, że „*występujące między poszczególnymi klasami różnice o charakterze, zarówno jakościowym jak i ilościowym, wskazują na duże znaczenie parametrów mikrostrukturalnych, znacząco wpływających na przebieg procesu i tempo dochodzenia do stanu równowagi wilgotnościowej.*” jest dość oczywiste w świetle aktualnego stanu wiedzy z zakresu fizyki materiałów budowlanych i nie wymagało przeprowadzenia tak pracochłonnych badań.

W ostatnim, dziesiątym rozdziale pracy Doktorantka przedstawiła 17 wniosków końcowych z wykonanych przez siebie badań doświadczalnych i analizy ich wyników. W mojej ocenie większość tych wniosków

jest potwierdzeniem aktualnego stanu wiedzy, a jedynie 6 zawiera w sobie nowe elementy (wnioski numer 2, 3, 5, 11, 12, 15), które wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych badań i wykraczają poza aktualny stan wiedzy. Wśród wniosków końcowych zabrakło mi natomiast konkretnych zależności, opisujących parametry cieplne i wilgotnościowe badanych betonów komórkowych w funkcji wilgotności materiału, które są zawarte jedynie na wykresach. Moim zdaniem, poza sprawdzeniem zakresu stosowalności dynamicznej metody badania izoterm sorpcji DSV podczas badań betonu komórkowego, jest to największe osiągnięcie recenzowanej rozprawy doktorskiej, które może znaleźć bezpośrednie zastosowanie praktyczne.

W zakończeniu tego rozdziału Doktorantka stwierdziła jednoznacznie, że wykonane przez nią badania wykazały prawdziwość sformułowanej przez Nią w rozdziale trzecim tezy (z czym się całkowicie zgadzam) oraz podała kierunki swoich dalszych badań. Moim zdaniem Jej postulaty są słuszne oraz świadczą o dobrej znajomości i zrozumieniu tematyki pracy oraz świadomości niedostatków i nie zawsze zadowalającego zakresu własnych badań. Proponuję, aby uzupełnić planowane badania o walidację wyznaczonych parametrów materiałowych (o czy wspominałem w komentarzu do rozdziału trzeciego i dziewiątego) oraz porównać wyznaczone parametry z rozwiązaniem zadania odwrotnego bazującego na badaniach opisanych w rozdziale dziewiątym.

Na moją prośbę Doktorantka przygotowała załącznik, z którym przedstawiła opracowanie statystyczne wyników swoich pomiarów, zawierające wartości odchylenia standardowego i przedziały ufności wartości średniej wszystkich pomierzonych przez nią wielkości fizycznych. Przedziały te zostały naniesione też na wykresy z wynikami pomiarów, które zawarto w głównym tomie pracy (ale bez informacji o niepewności i rozrzucie pomiarów). Moim zdaniem, podnosi to istotnie wartość rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Bochenek.

Nasuwa mi się w związku z tym pytanie do Doktorantki, czy uwzględnienie niepewności wyników jej pomiarów, wpływa na jakieś wnioski szczegółowe podane w Jej pracy, na przykład dotyczące charakteru zmienności niektórych wielkości (np. Rysunki Z.4.1, Z.4.4). Proszę o odniesienie się do tego problemu podczas publicznej obrony pracy.

Praca nie zawiera załącznika ze szczegółowymi wynikami badań własnych Doktorantki, co uważam za pewien niedostatek Jej dysertacji, która ma przecież charakter ściśle doświadczalny. W innych krajach, np. we Francji i Szwajcarii, w pracach o charakterze eksperymentalnym zamieszczane są tabele ze szczegółowymi wynikami wszystkich pomiarów, co umożliwia ich ewentualne wykorzystanie przez innych badaczy. Biorąc pod uwagę praco- i czasochłonność badań oraz dużą staranność doktorantki, która widoczna jest w edycji pracy i załączonym opracowaniu statystycznym wyników jej badań, jestem przekonany, że byłby to bardzo wartościowy materiał dla innych badaczy.

Pozwolę sobie też ogólną uwagę dotyczącą recenzowanej pracy. Wydaje mi się, że w swoich badaniach i analizach Doktorantka zbyt często starała się stosować normy i znane metody. Naukowiec powinien, w razie potrzeby, wychodzić poza schematy narzucane normami, aby odkrywać nowe zależności i tworzyć nowe metody badań, które z czasem mogą stać się podstawą norm.

Powyższe uwagi dyskusyjne i krytyczne nie wpływają na moją wysoką ocenę rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Bochenek.

5. Uwagi szczegółowe

W niniejszej części recenzji zawarłem uwagi o bardziej szczegółowym charakterze, głównie zauważone przeze mnie nieliczne nieścisłości językowe, drobniejsze błędy merytoryczne i redakcyjne oraz błędy w nomenklaturze naukowej.

Dane pokazane na Rys. 1.2 w postaci wykresu tortowego byłyby, moim zdaniem, bardziej czytelne, gdyby zostały przedstawione w formie Tabeli. Przedstawione wykresy są niemal identyczne i jedynie opisy do nich pozwalają dostrzec różnice między nimi.

Stosowane w pracy stwierdzenie, że jakaś wielkość fizyczna jest "uzależniona" od innej wielkości (np. str. 46¹³, str. 54¹, str. 129¹, str. 181⁴) jest niepoprawne językowo - jest ona co najwyżej "zależna" od tej wielkości. "Uzależnionym" można być od leków lub narkotyków (jak mawiał niezapomniany prof. Z. Kączkowski...).

Na str. 56 użyto terminu "symulacyjne pomiary" - czy chodzi o symulację (odtworzenie) jakichś warunków występujących w naturze? Termin ten jest moim zdaniem dość niefortunny.

W załączniku, na wykresach przedstawiających wyniki pomiarów z zaznaczonymi przedziałami ufności, wewnątrz tych przedziałów zawarte są na kilku wykresach nie-fizyczne wartości, np. na Rysunkach Z.6.4, Z.6.5, Z.6.10, Z.6.19 i Z.6.20 ujemne zawartości wilgoci na niektórych głębokościach. Przed publikacją wyników pracy należy sprawdzić pod tym względem i odpowiednio skorygować wszystkie wykresy.

Rozprawa jest bardzo starannie zredagowana i napisana poprawną polszczyzną, jedynie w niektórych fragmentach, zwłaszcza powstałych na podstawie przeglądu literatury zagranicznej, można zauważyć pewne nieścisłości, z których kilka przykładowych wymieniam poniżej:

str. 8¹⁶ angielskie słowo "recreate" zostało użyte niewłaściwie w tym kontekście - jest to bezpośrednie tłumaczenie polskiego słowa "odtworzyć", użytego w polskim streszczeniu;

Str. 11₆: Doktorantka stosuje w swojej pracy określenia "krętość porów" jako tłumaczenie angielskiego terminu „*tortuosity*”- częściej w polskiej literaturze spotykałem się określeniem "krętność kapilar";

Str. 121: Doktorantka tłumaczy angielską nazwę metody "dry cup method" jako "metodę suchej miseczki" i "wet cup method" jako "metodę mokrej miseczki". Określenia te wydają mi się dość niefortunne - lepiej brzmi "sucha metoda miseczkowa" i "mokra metoda miseczkowa", albo przytoczenie oryginalnej angielskiej nazwy tych metod w cudzysłowie.

str. 144: Tłumaczenie angielskiego terminu "capillary suction curve" jako "krzywa natężenia ssania" wydaje mi się niewłaściwe. Zwykle wykres ten określa się je jako izotermę sorpcji, ale wyrażoną w funkcji ciśnienia kapilarnego (zamiast wilgotności względnej).

Sugeruję, aby przed ewentualną publikacją fragmentów rozprawy Doktorantka uwzględniła te uwagi i sugestie oraz poprawiła wymienione powyżej błędy merytoryczne i językowe.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Wyniki badań wykonanych przez Panią mgr inż. Magdalenę Bochenek wskazują, że mikrostruktura porowatości betonu komórkowego o czterech różnych klasach gęstości ma wpływ na jego cieplne i wilgotnościowe właściwości fizyczne, a pośrednio na przebiegające w tym materiale zjawiska higro-termiczne, zaś parametry materiałowe opisujące te właściwości fizyczne są zależne od zawartości wilgoci w jego porach.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych Pani mgr inż. Magdaleny Bochenek zaliczam:

- wyznaczenie parametrów funkcji materiałowych dla betonu komórkowego o różnej gęstości, opisujących współczynnik dyfuzji wilgoci, współczynnik przewodzenia ciepła i objętościową pojemność cieplną, przyjmując w nich jako argument: masową/objętościową zawartość wilgoci albo wilgotność względną;
- wyznaczenie współczynników podciągania kapilarnego czterech klas betonu komórkowego;
- przeprowadzenie kompleksowego badania procesu wysychania w w/w materiałach, w których określono zmiany przestrzennego rozkładu wilgoci w funkcji czasu;
- sprawdzenie przydatności i zakresu stosowania dynamicznej metody badania izoterm sorpcji DVS dla betonu komórkowego.

Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością najważniejszych prac związanych z tematem doktoratu, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu inżynierii i fizyki materiałów budowlanych oraz praktyczną z zakresu stosowanych w tych dyscyplinach metod badań doświadczalnych i opracowania ich wyników.

Moim zdaniem, Jej rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazuje Jej predyspozycje do pracy naukowej i umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Nią badań.

W związku z tym stwierdzam, że w mojej ocenie rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Bochenek zatytułowana „Ocena zmienności parametrów higro-termicznych betonu komórkowego o zróżnicowanej gęstości” spełnia wszystkie wymagania „ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami)” oraz wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.