

dr hab. inż. Jadwiga Fangrat, prof. ITB
Instytut Techniki Budowlanej,
00-611 Warszawa

Warszawa, 11 września 2018 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Iwony Pokorskiej-Silva
pt.: „Analiza efektywności termicznej budynków na podstawie badań doświadczalnych i
symulacji numerycznych”**

Energooszczędność to ważne i aktualne wyzwanie współczesnego budownictwa. Rosnące od lat ceny surowców energetycznych są powodem, dla którego budynek energooszczędny jest jednym z najważniejszych tematów w budownictwie. Dane statystyczne wskazują, że budynki pochłaniają 42 % całkowitego zużycia energii w krajach Unii Europejskiej. Z tej przyczyny nowoczesne technologie pozwalające na zmniejszenie energochłonności budynku przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiego komfortu cieplnego jego użytkownikom są obecnie i będą w kolejnych dekadach stałym wyzwaniem badawczym, inżynierskim i technologicznym nowoczesnego budownictwa XXI wieku. W ten nurt doskonale wpisuje się przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska. Wybór tematyki ukierunkowanej na efektywność cieplną budynków stanowiącą zasadniczy element ich bilansu cieplnego uważam za trafny. Ocena wiarygodności i użyteczności symulacji przepływu ciepła na przykładzie istniejącego obiektu testowego w skali naturalnej i w rzeczywistych warunkach otoczenia nie była dotychczas dostatecznie poznana przez badaczy, zatem wybór tej tematyki jest moim zdaniem właściwy.

Główną tezą recenzowanej pracy doktorskiej jest stwierdzenie, że odpowiednie numeryczne odtworzenie badań *in situ* oraz badań laboratoryjnych stwarza możliwość właściwego numerycznego przewidywania zachowań określonych układów charakterystycznych, definiowanych jako układy rzeczywiste odbiegające parametrami (t.j.: geometrią, kształtem, orientacją przestrzenną, warunkami klimatu zewnętrznego i wewnętrznego, kontaktem z podłożem) jedynie w określonych granicach od parametrów przypisanych obiektom badawczym. Natomiast powiększanie modelu obliczeniowego od skali badawczej do skali rzeczywistej może zmienić badaną odpowiedź cieplną układu w zakresie możliwym do zdefiniowania.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów i liczy 144 strony wraz z trzema załącznikami. Po krótkim wprowadzeniu i określeniu celu, tez i zakresu pracy Autorka rozprawy przedstawia, na podstawie danych literaturowych, obszerną analizę problemów związanych z badaniami laboratoryjnymi i numerycznymi efektywności cieplnej budynków (rozdziały 3 ÷ 5). W rozdziale piątym Autorka bardzo zwięźle scharakteryzowała istniejące programy symulacyjne, a nieco szerzej opisała wykorzystany w pracy program *Environmental Systems Performance* (ESP) dostępny na warunkach licencji typu *Open Source* (tzw. otwarte oprogramowanie). Główna część pracy przedstawiona w rozdziałach 6 ÷ 9 jest poświęcona opisowi warunków zewnętrznych na podstawie danych klimatycznych, stanowisk i metod badawczych, wyników przeprowadzonych pomiarów temperatury w przebiegu procesu stygnięcia w skali laboratoryjnej i w skali naturalnej (tzn. w istniejących obiektach mieszkalnych w kształcie kopuły) i analizie wyników tych pomiarów oraz wyników uzyskanych z obliczeń (symulacji) otrzymanych z wykorzystaniem przyjętych modeli, w tym analizy statystycznej. Rozdział dziesiąty zawiera zwięźle podsumowanie wyników uzyskanych w trzech obszarach badawczych: A – badania laboratoryjne obiektu o charakterze testowym, B – badania *in situ* obiektu o charakterze testowym, C – badania *in situ* obiektu rzeczywistego. Każdy z wymienionych obszarów był przedmiotem symulacji/eksperymentów numerycznych. Omówienie poszczególnych obszarów badawczych zakończono wnioskami cząstkowymi, a w końcowej części rozdziału dziesiątego sformułowano wnioski uogólnione. Zamieszczono też wykaz literatury, z której Autorka korzystała podczas wykonywania pracy. Uzupełnienie pracy stanowią trzy krótkie załączniki zawierające: mapy klimatu Polski przedstawiające temperaturę i nasłonecznienie, spis ważniejszych elementów aparatury pomiarowej wykorzystanej w badaniach oraz opis budowy przegród obiektu testowego znajdującego się na stanowisku badawczym Politechniki Śląskiej.

W pracy przedstawiono obszerne badania w zakresie oceny adekwatności wyników numerycznych symulacji - cieplnej odpowiedzi obiektu na przyjęte przez Autorkę determinanty. Podstawę oceny stanowiły wyniki badań laboratoryjnych oraz badań *in situ*. W toku pracy Autorka określiła funkcje cieplnej odpowiedzi badanych obiektów jako funkcje odpowiedzi globalnej układów obiekt-otoczenie zewnętrzne; układy te analizowała przy różnych warunkach brzegowych. Poszukiwanie odpowiedzi globalnej można uznać za skuteczną ocenę jakości energetycznej obiektu (m.in. poprzez określenie czasu wychładzania t). Przedmiotem badań i analiz były obiekty rozważane jako jednostrefowe o zróżnicowanej geometrii i wymiarach, rozpatrywane jako: (i) jednostka niezależna, sprzęgnięta w różny

sposób z podłożem gruntowym, lub (ii) cząstka wyodrębniona z całości. W pracy przedstawiony został proces kalibrowania numerycznego modelu obliczeniowego, zachodzący poprzez dopasowanie odpowiedzi otrzymanej w procesie symulacji do odpowiedzi otrzymanej w badaniach laboratoryjnych lub badaniach *in situ*, przy czym zwrócono uwagę na uszczegółowienie opisu odpowiedzi badanego obiektu w przebiegu symulacji numerycznej. Istotną część pracy stanowią badania *in situ* oraz symulacje numeryczne rzeczywistego obiektu mieszkalnego w kształcie kopuły. Badania obejmowały temperaturę powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej (mierzonej wzdłuż południka i równoleżnika) oraz temperaturę wewnątrz obiektu, a także pomiary zmian temperatury gruntu w obrysie obiektu i poza obiektem - do głębokości około 2,5 m.

Przeprowadzone badania doświadczalne oraz obliczenia numeryczne pozwoliły na wykazanie przydatności funkcji wychładzania do oceny efektywności cieplnej nietypowego obiektu oraz możliwości wyrażenia tej efektywności poprzez zapotrzebowanie obiektu na energię do ogrzewania, a także uogólnienie tej oceny wynikające z analizy cieplnej odpowiedzi obiektu na dynamiczne zmiany warunków zewnętrznych. Ponadto w wyniku realizacji pracy wykazano, że w przypadku obiektów nietypowych skuteczna ocena wymaga wyboru numerycznej metody analizy ich cieplnej lub energetycznej odpowiedzi, ponieważ metody klasyczne są niewystarczające. Tym samym postawiona na początku rozprawy teza została udowodniona. Praca jest napisana staranną polszczyzną; Autorka, poza nielicznymi wyjątkami, ustrzegła się błędów stylistycznych i redakcyjnych.

Praca zawiera również pewne niedostatki. Podstawową metodą badawczą, którą posłużyła się Autorka w swojej pracy jest metoda regresji wielorakiej. Metoda ta, ze względu na przyjęte założenia np. założenie liniowości i założenie normalności, posiada pewne ograniczenia. Autorka rozprawy dobrze zdaje sobie sprawę, że podstawowym ograniczeniem metodologicznym leżącym u podstaw wszystkich technik regresyjnych jest fakt, że przy ich pomocy można jedynie przekonać się o istnieniu relacji, nie można natomiast dowieść istnienia związku przyczynowego będącego podłożem tej relacji. Ponadto w aspekcie wyboru zmiennych, regresja wieloraka jest techniką złudną, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z niewielką liczbą obserwacji. Wskazałam tylko niektóre z istniejących problemów metodologicznych wartych przedyskutowania wobec zastosowanej podstawowej metody badawczej. Szkoda, że Autorka nie potrudziła się nad głębszą analizą tego zagadnienia w odniesieniu do rozpatrywanego problemu badawczego, zamiast formułowania wyrywkowych stwierdzeń.

Inne niedostatki pracy to stosunkowo mały udział literatury zagranicznej anglojęzycznej w podanej bibliografii wynoszący 72 spośród 111 wszystkich cytowanych publikacji naukowych (ok. 64%) nie licząc trzynastu dokumentów normatywnych i innych, podczas gdy w ostatnich dekadach ogólna liczba wartościowych artykułów naukowych z tego zakresu opublikowanych w języku angielskim rosła lawinowo a ich liczba to rząd setek, jeśli nie tysięcy. Oczywistym stwierdzeniem jest, że obszar badawczy efektywności cieplnej budynków był niezwykle intensywnie eksploatowany w ostatnich dziesięcioleciach. Ponadto Autorka używa wielokrotnie określenia „termiczny” w znaczeniu „cieplny”, podczas gdy jest to tzw. kalka z angielskiego słowa „thermal”, które ma swój polski odpowiednik - „cieplny”. Niektóre dane są w pracy powtarzane. Wymienione niedociągnięcia nie zmniejszają jednak w sposób zasadniczy wartości poznawczej ocenianej rozprawy doktorskiej.

Autorka rozprawy wykonała liczne badania doświadczalne przy wykorzystaniu nowoczesnej aparatury pomiarowej oraz wykonała symulacje z wykorzystaniem komercyjnego programu komputerowego. Reasumując stwierdzam, że praca dotyczy ważnego problemu w dyscyplinie budownictwo w aspekcie efektywności energetycznej budynków, wykonana jest bardzo rzetelnie zarówno pod względem badawczym jak i redakcyjnym. Autorka posiada bardzo dobre rozeznanie w tematyce a wyniki pracy stanowią wartościowy i oryginalny wkład do dziedziny nauk technicznych w dyscyplinie budownictwo. Uważam, że praca spełnia wymogi *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Beaty Pokorskiej-Silva do publicznej obrony jej rozprawy.

Jednocześnie z uwagi na niezwykle interesujące i oryginalne sformułowanie i przedstawienie problemu badawczego oraz walory poznawcze i aplikacyjne pracy w zakresie poprawy efektywności energetycznej budynków stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy mgr inż. Beaty Pokorskiej-Silva pt. „Analiza efektywności termicznej budynków na podstawie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych.”

