

Prof. dr hab. inż. Dariusz Gawin
Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź.

Łódź, 30 grudnia 2014 roku.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Grzegorza Knora
„Identyfikacja, modelowanie i sterowanie polami temperatury w konstrukcjach betonowych”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania jest Uchwała Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk z dnia 25 września 2014 r. oraz pismo Sekretarza Rady Naukowej IPPT PAN dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, prof. IPPT, z dnia 30 września 2014 r. i umowa o dzieło z dnia 3 października 2014 roku, zlecające mi opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej mgr Grzegorza Knora.

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska, opracowana przez mgr Grzegorza Knora, asystenta w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, zatytułowana „*Identyfikacja, modelowanie i sterowanie polami temperatury w konstrukcjach betonowych*”. Jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Jan Holnicki-Szulc z IPPT PAN w Warszawie. Praca ma charakter interdyscyplinarny - dotyczy zagadnień z zakresu mechaniki obliczeniowej i inżynierii materiałów budowlanych. Część badań w niej przedstawionych została zrealizowana w ramach projektu Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Praca liczy 213 stron (10 w części wstępnej, ponumerowanych od „I” do „X”, oraz 203 strony części zasadniczej) i zawiera 247 rysunków, 17 tablic oraz 208 pozycji literaturowych, zestawionych na końcu pracy w kolejności cytowania (w tym 8 wydawnictw organizacji technicznych i normalizacyjnych).

3. Ogólna ocena rozprawy, w tym: trafności doboru jej tematu i tytułu, sformułowania celu, jej układu i doboru źródeł

Recenzowana praca podejmuje bardzo ważną praktycznie problematykę wykonawstwa i trwałości masywnych konstrukcji wykonanych z betonu, który jest obecnie najpowszechniej stosowanym na świecie materiałem budowlanym. W szczególności praca dotyczy modelowania, identyfikacji parametrów materiałowych oraz badań doświadczalnych masywnych elementów betonowych podczas procesu ich twardnienia wskutek hydratacji cementu, czemu towarzyszą egzotermiczne reakcje chemiczne powodujące zjawisko tzw. samo-nagrzewu i samo-osuszania betonu. Mogą one być przyczyną występowania dużych gradientów temperatury w konstrukcji, zwłaszcza w przypowierzchniowych jej warstwach, co w połączeniu ze skurczem wskutek wysychania, może powodować pękanie konstrukcji i rozwój w niej rys, negatywnie wpływających na trwałość i właściwości użytkowe budowli betonowych. Problematyka ta jest niezwykle aktualna, zwłaszcza w kontekście paradygmatu zrównoważonego rozwoju ludzkości oraz wynikającego z niego trendu do stosowania w produkcji cementu surowców odpadowych w postaci żużli i popiołów lotnych (w Polsce także ze spalania węgla brunatnego), istotnie wpływających na przebieg procesu hydratacji cementu i jego właściwości fizyczne po stwardnieniu. Tematykę tę podejmuje obecnie szereg zespołów badawczych na świecie, o czym świadczy mnogość publikacji, zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych, ukazujących się w wiodących periodykach naukowych z zakresu inżynierii materiałów budowlanych, co znalazło odzwierciedlenie w bogatym spisie literatury na końcu dysertacji.

Dotychczasowe prace z tej tematyki, wykonywane w naszym kraju i zagranicą, dotyczyły głównie aspektów fizyko-chemicznych procesu hydratacji cementu i koncentrowały się na stworzeniu modelu matematycznego tego procesu, najczęściej typu fenomenologicznego, badaniu i opisie ewolucji właściwości

wytrzymałościowych kompozytów cementowych podczas ich dojrzewania, a także analizie ich stanu ciepło-wilgotnościowego oraz naprężenia i odkształcenia elementów wykonanych z tego materiału (często są to tzw. studia przypadku konkretnych konstrukcji – ang. *case studies*). W najbardziej zaawansowanych teoretycznie pracach uwzględniane są wzajemne sprzężenia między zjawiskami chemicznymi (hydratacją cementu), termicznymi i wilgotnościowymi oraz stanem naprężenia i wywołanym nim zniszczeniem materiału (powstaniem i rozwojem rys). Recenzowana praca mieści się w tym szerokim nurcie badań, choć koncentruje się niemal wyłącznie na procesach cieplnych i chemicznych. Podjęcie przez Doktoranta próby opracowania oryginalnej, bazującej na rozwiązaniu tzw. zagadnienia odwrotnego, metody identyfikacji parametrów modelu matematycznego, opisującego rozwój temperatury w dojrzewającym betonie, oraz zastosowanie tego modelu do optymalizacji instalacji chłodzącej masywne konstrukcje podczas ich betonowania i pielęgnacji, należy uznać za ciekawe z naukowego punktu widzenia, choć moim zdaniem stosowane obecnie, klasyczne metody wyznaczania właściwości termicznych betonu (m. in. kalorymetria izotermiczna i semiadiabatyczna) są znacznie dokładniejsze od proponowanej w pracy, przy zbliżonej czasochłonności badań.

Pewnym dodatkowym uzasadnieniem podjęcia w/w problematyki badawczej mogą być próby wykorzystania do produkcji cementu w naszym kraju żużli i popiołów lotnych z elektrowni stosujących jako paliwo węgiel brunatny, które to cementy badał Doktorant w ramach projektu POIG, oraz licznie budowane obecnie w Polsce, masywne konstrukcje betonowe, zwłaszcza infrastruktury transportowej i energetycznej, np. fundamenty i pylony mostów, fundamenty bloków energetycznych itp.

Podsumowując, uważam, że tematyka pracy została dobrana trafnie i stanowi oryginalny problem badawczy o interdyscyplinarnym charakterze, obejmujący fizyko-chemię betonu, metody numeryczne mechaniki oraz teorię optymalizacji i rozwiązywania zadania odwrotnego. Tytuł rozprawy w zasadzie odpowiada jej treści, choć zagadnieniom sterowania polem temperatury w konstrukcjach betonowych poświęcono stosunkowo mniej miejsca niż sugerowałby to tytuł (moim zdaniem należy stosować liczbę pojedynczą w odniesieniu do „pola temperatury”), zaś przyjęty w niej model zjawisk cieplnych w dojrzewającym betonie ma klasyczną postać i trudno go uznać za oryginalne osiągnięcie Doktoranta.

Układ i kompozycja pracy są poprawne i logicznie wynikają z jej tematu. Po krótkim uzasadnieniu i wprowadzeniu do problematyki badań, obejmującym przegląd literatury, w kolejnych rozdziałach Autor omówił zagadnienia związane z modelowaniem zjawisk cieplnych w dojrzewającym betonie, identyfikacją jego parametrów termicznych i sterowaniem polem temperatury w elementach z niego wykonanych, przedstawił wyniki badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych pola temperatury w elementach betonowych, w których występował 1-, 2- i 3-wymiarowy przepływ ciepła, oraz przeanalizował te wyniki w kontekście walidacji modelu matematycznego, identyfikacji jego parametrów materiałowych oraz optymalizacji systemu chłodzenia masywnych elementów podczas ich betonowania. Dysertację kończą podsumowanie i wnioski oraz spisy ilustracji, tablic i cytowanej literatury. Tak więc, nie ma ona klasycznego układu rozprawy doktorskiej, gdyż nie zawarto w niej żadnych tez, które zwykle formułowane są na początku pracy, a następnie uzasadniane w dalszych jej częściach. Moim zdaniem, przyjęta przez Autora kompozycja Jego dysertacji jest logiczna, a formułowanie na jej początku pewnych tez i ich udowadnianie w przypadku tematyki recenzowanej pracy byłoby zabiegiem sztucznym i niecelowym. Pewnym mankamentem rozprawy jest brak zestawienia pełnych wyników z przeprowadzonych przez Doktoranta badań doświadczalnych, najlepiej w postaci załącznika do pracy, zawierającego dane w formie tabelarycznej, np. w postaci cyfrowej na CD.

Spis literatury jest bardzo bogaty i obejmuje 208 pozycji, głównie polsko- i angielskojęzycznych, opublikowanych w okresie od lat 30-tych XX wieku aż do 2014 roku, z których szereg można uznać za „klasyczne” już piśmiennictwo z zakresu wymiany ciepła, metod numerycznych, teorii optymalizacji czy rozwiązywania zagadnienia odwrotnego. Zawarto w nim także większość najważniejszych prac autorów polskich, zajmujących się masywnymi konstrukcjami betonowymi. Stosunkowo mniej cytowano natomiast klasyczne publikacje z zakresu modelowania hydratacji i zjawisk ciepło-wilgotnościowych w betonie, jak np. pionierskie prace Bażanta z lat 60-tych, czy też prace Coussy’ego i Ulma z lat 90-tych XX wieku.

Moim zdaniem, literatura cytowana w rozprawie została dobrana na ogół właściwie, choć brak w niej pozycji przedstawiających zaawansowane modele matematyczne i numeryczne sprzężonych zjawisk chemo-higro-termo-mechanicznych w dojrzewającym betonie w ujęciu mechaniki ośrodków porowatych, w tym także modeli wielkoskalowych, które stanowią najnowszy trend w opisie tego materiału budowlanego (ang. *multi-scale, multi-phase poro-mechanical models*). Pewną niedogodnością w lekturze dysertacji jest też

brak, zwyczajowego w przypadku prac doktorskich, uporządkowania spisu literatury w kolejności alfabetycznej, co utrudnia prześledzenie cytowania prac poszczególnych autorów.

4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów, wykazu ilustracji i tablic oraz spisu literatury, obejmującego 208 pozycji, zestawionych na końcu w kolejności cytowania. Na pozytywną ocenę zasługuje obecność w spisie literatury aż 8 prac Doktoranta z lat 2011-2014 (współautorem 6 z nich jest Jego promotor, a 2 są samodzielne), głównie referatów na ważnych konferencjach międzynarodowych, co świadczy o systematyczności i dobrym poziomie Jego badań.

Na początku dysertacji zamieszczono jej streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis stosowanych w niej skrótów i symboli. W przypadku tych ostatnich nie podano jednostek, co może być przyczyną pewnych niejednoznaczności, gdyż niektóre z przyjętych symboli występują we wzorach czysto fenomenologicznych, np. (1.3), (1.5), lub mają niejednoznaczne nazwy (np. zawartość powietrza podawana jest zwykle w procentach objętościowych [m^3/m^3 , %V], zaś zawartość kruszywa w procentach masowych [kg/kg , %M] lub jednostkach masy odniesionych do objętości mieszanki [kg/m^3]).

W początkowej części rozdziału pierwszego Autor przekonująco uzasadnił motywację podjęcia swoich badań oraz podał główny cel pracy, którym była, według Jego słów, „... próba zastosowania abstrakcyjnych metod matematycznych do opisu zjawisk zachodzących w materiałach betonowych podczas ich twardnienia.” Wspomnianymi metodami, wymienionymi dalej *explicite*, były: rozwiązanie odwrotnego problemu przewodnictwa cieplnego, numeryczne modelowanie pola temperatury, walidacja modelu matematycznego za pomocą wyników badań doświadczalnych oraz rozwiązanie problemu optymalizacji systemu chłodzącego maszyną konstrukcję podczas jej betonowania i dojrzewania. Doktorant wymienił też 6 celów szczegółowych i elementów nowatorskich, mających doprowadzić do osiągnięcia głównego celu pracy. Przyjęta koncepcja i metodyka badań jest logiczna, w części nowatorska, oraz generalnie zgodna z najnowszymi trendami w badaniach kompozytów cementowych. Pewne wątpliwości mogą dotyczyć całkowitego pominięcia zjawisk wilgotnościowych, które w pewnych warunkach mogą mieć istotny wpływ na przebieg procesu hydratacji cementu w przypowierzchniowych warstwach masywnych konstrukcji betonowych, oraz bardzo uproszczonej, opartej na podejściu czysto praktycznym (tj. ograniczania wartości gradientu temperatury), analizie stanu naprężenia konstrukcji betonowych (bazującej na liniowym modelu termo-sprężystym ośrodka), która ma pozwolić na uniknięcie występowania pęknięć i rys w konstrukcjach po ich wykonaniu. Jednak przyjęte uproszczenia oceniam jako dopuszczalne, biorąc pod uwagę aplikacyjny charakter prowadzonych badań oraz złożony charakter odkształceń dojrzewającego betonu, zwłaszcza skurczu autogenicznego i pęcznienia w początkowym okresie hydratacji, co znacznie komplikowałoby analizowane zagadnienie, zwłaszcza podczas badań doświadczalnych.

Kończącą część rozdziału pierwszego (punkty 1.4.1-1.4.3) stanowi przegląd literatury dotyczącej zagadnień identyfikacji parametrów funkcji, opisujących ewolucję właściwości termicznych betonu podczas jego dojrzewania (ciepła hydratacji, współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego), modelowania tego procesu oraz sterowania podczas jego trwania polem temperatury w masywnych elementach betonowych. Przedstawione podsumowanie aktualnego stanu wiedzy jest na ogół wyczerpujące, choć brakuje w nim kilku ważnych prac dotyczących opisu procesu hydratacji traktowanego jako swoistej reakcji chemicznej, np. autorstwa Ulma i Coussy [1995, 1996] oraz Cervery i in. [1999], oraz prac analizujących specyfikę procesu hydratacji, w różnych temperaturach, cementów z domieszką żużla, np. Jabłoński, Gawęda, Gawin, Experimental and numerical analysis of the hydration process of cement pastes, *Proc. of 17th Conf. Thermophysics 2013*, 222-228, Podkylava, Slovak Republic, 13-15.11.2013 (www.fch.vutbr.cz/lectures/thermophysics/2013/pdf/Thermophysics_2013_proceedings.pdf). Ta ostatnia praca (np. Fig.1 i Fig.5 na str. 224-227) pokazuje, że w przypadku cementów z domieszką żużla (badanych w dalszej części rozprawy) nie można uzyskać zadowalającej zgodności z danymi doświadczalnymi przy opisie wpływu temperatury na przebieg hydratacji cementu za pomocą jednej tylko wartości pozornej energii aktywacji, co było jednym z istotnych założeń recenzowanego doktoratu. Moim zdaniem należało zastosować osobne opisy hydratacji dla klinkieru portlandzkiego i dla żużla, np. wg podanych w pracy równań (1.14) i (1.15).

Mam też ogólną uwagę dotyczącą układu tego rozdziału. Logiczniej byłoby najpierw przedstawić aktualny stan wiedzy z tematyki pracy, a dopiero potem, na podstawie jego analizy, sprecyzować zakres i cel pracy. W przeciwnym przypadku nasuwa się pytanie, czemu służył przegląd literatury...

W rozdziale drugim omówiono szereg zagadnień związanych z modelowaniem pola temperatury w dojrzewających elementach betonowych. W podrozdziale 2.1 przedstawiono różne sposoby opisu procesu dojrzewania betonu i na tej podstawie wybrano tzw. równoważny wiek betonu jako parametr opisujący postęp procesu hydratacji cementu w zmiennej temperaturze, której wpływ uwzględniono za pomocą zależności typu Arrheniusa z jedną wartością tzw. pozornej energii aktywacji. Na podstawie literatury pokazano też, że wielkość ta zależy od składu i uziarnienia cementu oraz ilości domieszek żużla i cementu. Według mojej wiedzy i doświadczenia, popartego badaniami własnymi w ramach projektu POIG, taki opis wpływu temperatury jest dość niedokładny w przypadku cementów z dużym dodatkiem żużla i popiołu lotnego, jak już wspomniano podczas dyskusji treści rozdziału 1.

Podrozdział 2.2 zawiera wyprowadzenie równania opisującego przepływ ciepła w anizotropowym ośrodku z wewnętrznymi źródłami ciepła, wraz ze stosownymi warunkami początkowymi i brzegowymi. Podobne, uproszczone wyprowadzenie można znaleźć w większości podręczników podstaw wymiany ciepła, więc jego przytoczenie w tej formie w pracy doktorskiej (zwłaszcza w jednym z wiodących ośrodków mechaniki teoretycznej i komputerowej w Polsce) uważam za niecelowe, gdyż jest ono mało precyzyjne i nieeleganckie z matematycznego punktu widzenia oraz nie podano istotnych założeń dotyczących przyjętego układu współrzędnych. Prosiłbym o ich podanie podczas publicznej obrony, przyjmując za punkt wyjścia ogólne równanie przewodnictwa cieplnego w ośrodku anizotropowym z tensorem przewodzenia ciepła. Ponadto, zależność (2.22) zakłada, że wpływ temperatury na natężenie objętościowych źródeł ciepła można wyrazić za pomocą zależności Arrheniusa, co budzi moje istotne zastrzeżenia, jak wspominałem powyżej.

W podrozdziale 2.3 opisano, przyjęte w pracy, metody numerycznego rozwiązania równania przewodnictwa cieplnego w dojrzewającym betonie dla przypadku zadań 1-, 2- i 3-wymiarowych. Moje wątpliwości budzi tytuł tego podrozdziału, gdyż zawiera on opis numerycznego „modelu przepływu ciepła w dojrzewającym betonie”, a nie „model temperatury betonu” – jak brzmi jego aktualne brzmienie.

Podobnie jak w przypadku modelu matematycznego, przedstawiony opis stosowanych metod numerycznych jest mało elegancki i ma podstawowy, podręcznikowy charakter. Moim zdaniem można było go pominąć, powołując się na stosowną literaturę i podając jedynie końcowe postaci zdyskretyzowanych równań - tym bardziej, że do rozwiązania metodą różnic skończonych (MRS) 1-wymiarowego zagadnienia początkowo-brzegowego stosowano procedury i funkcje komercyjnego oprogramowania *MATLAB*, zaś do rozwiązania zadania 3-wymiarowego metodą elementu skończonego (MES) – program *COMSOL Multiphysics*. Rozwiązanie zadania 2-wymiarowego metodą MES uzyskano stosując klasyczne sformułowanie, którego opis można znaleźć w wielu podręcznikach tej metody, więc można było pominąć kolejne kroki wyprowadzenia jej równań. Pomimo w/w zastrzeżeń w mojej ocenie przyjęte przez Doktoranta metody numeryczne i oprogramowanie zostały wybrane poprawnie. Pozwalają one na efektywne rozwiązanie analizowanych w pracy zagadnień początkowo-brzegowych, choć pełnią one w pracy jedynie pomocniczą rolę i jako takie nie mają obecnie wartości naukowej.

Podrozdział 2.4 poświęcony jest modelowaniu temperatury otoczenia, niezbędnej do określenia warunków brzegowych na powierzchni konstrukcji stykającej się z powietrzem zewnętrznym. Moim zdaniem, zamiast interpolacji przebiegu zmian tej temperatury funkcją sinus – wzór (2.65), korzystniejsze byłoby bezpośrednio zastosowanie godzinowych danych pogodowych Typowego Roku Meteorologicznego, które są dostępne na stronie internetowej Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju dla 61 lokalizacji w Polsce. Ponadto zbiór ten zawiera dane o promieniowaniu słonecznym, które są silnie skorelowane z temperaturą powietrza, dzięki czemu możliwe byłoby dokładniejsze modelowanie temperatury powierzchni konstrukcji.

W podrozdziale 2.5 zweryfikowano wyniki numerycznych obliczeń pola temperatury za pomocą stosowanego w pracy oprogramowania (w części autorskiego – program TMC) przez porównanie z rozwiązaniem analitycznym (zadanie 1-wymiarowe) i numerycznym, uzyskanym programem *COMSOL* (zadanie 2-wymiarowe). Wynik porównania rozwiązań był w obu przypadkach pozytywny. Zastanawia mnie tylko, w jakim celu porównano na Rys. 2.15 rozwiązania 2-D w postaci kolorowych wykresów warstwicznych, gdyż umożliwia to co najwyżej stwierdzenie ogólnego podobieństwa rozwiązań, a nie ich porównanie ilościowe.

Rozdział 2.6 zawiera wyniki analizy wrażliwości rozwiązania modelowego zadania, dotyczącego wymiany ciepła w 2-wymiarowym elemencie betonowym podczas jego dojrzewania, na zmianę wybranych parametrów termicznych materiału (ciepła właściwego i współczynnika przewodzenia ciepła betonu), temperatury powietrza zewnętrznego oraz początkowej temperatury betonu. W przypadku rozwiązywania zadania odwrotnego, przeprowadzenie analizy wrażliwościowej jest niezbędne, gdyż pozwala ona uzyskać istotne informacje o spodziewanej dokładności identyfikowanych parametrów modelu matematycznego (ewentualnie o braku możliwości ich identyfikacji, tj. rozwiązania zadania odwrotnego). Doktorant wykonał analizę typu numerycznego, tzn. zmieniał jeden z parametrów modelu, pozostawiając niezmiennymi wszystkie pozostałe. Moim zdaniem, przeprowadzona w pracy analiza miała charakter bardziej jakościowy niż ilościowy, gdyż badane parametry nie były zmieniane w systematyczny sposób (np. o określony procent wielkości, np. $\pm 5\%$), aby oszacować wartość pochodnej wynikowej wielkości (np. temperatury w wybranym punkcie) po analizowanym parametrze (np. ciepła właściwym lub współczynnikiem jego zależności od temperatury). Tego typu analiza potencjalnie pozwoliłaby na oszacowanie dokładności identyfikowanej wielkości, np. ciepła właściwego, w zależności od dokładności pomiaru wartości wynikowej, np. temperatury w danym punkcie. W moim odczuciu Doktorant nie wykorzystał tej możliwości. Ponadto, nie zbadał wrażliwości na zmianę parametrów opisujących natężenie objętościowego źródła ciepła towarzyszącego hydratacji, które mają największy wpływ na ewolucję temperatury w dojrzewającym masywnym elemencie betonowym. Moim zdaniem, analiza tego typu byłaby bardzo przydatna, a nawet niezbędna, i powinna być wykonana dla zadania 1-wymiarowego, które było wykorzystywane w dalszej części pracy do identyfikacji parametrów termicznych dojrzewającego betonu. Wykonane przez Doktoranta obliczenia wskazują, że temperatura w analizowanym elemencie jest stosunkowo mało wrażliwa na współczynnik przewodzenia ciepła betonu, nieco bardziej wrażliwa na jego ciepło właściwe oraz bardzo wrażliwa na temperaturę początkową i temperaturę otoczenia.

Rozdział trzeci prezentuje przyjęty przez Doktoranta sposób identyfikacji parametrów termicznych betonu na podstawie pomiarów temperatury w wybranych punktach badanego elementu betonowego. Zawiera on sformułowanie problemu i opis metody jego rozwiązania, a także szereg testów numerycznych. Wątek identyfikacji parametrów dojrzewającego betonu jest moim zdaniem najciekawszym elementem dysertacji i ma największą wartość naukową. Zastosowana przez Doktoranta metoda identyfikacji – tzw. poszukiwania bezpośredniego za pomocą wzorca (ang. *pattern search*) z regularyzacją Tichonowa, choć znana z literatury, jest stosunkowo rzadziej stosowana. W przypadku analizowanego problemu ewolucji pola temperatury w dojrzewającym elemencie betonowym, metoda ta okazała się być bardzo efektywna, pozwalając na wystarczająco dokładne wyznaczenie funkcji opisującej rozwój w czasie źródeł ciepła hydratacji oraz ciepła właściwego i współczynnika przewodzenia ciepła dojrzewającego betonu, na podstawie rozwiązania 1-wymiarowego problemu testowego z dodanym do temperatury wynikowej szumem gaussowskim ($\pm 0.09^\circ\text{C}$). Należy jednak podkreślić, że przebiegi temperatury, na podstawie których identyfikowano poszukiwane parametry termiczne betonu, zostały otrzymane w wyniku rozwiązania równań przyjętego modelu matematycznego analizowanego procesu, więc pozytywny wynik testów nie przesądza jeszcze o przydatności proponowanej metody identyfikacji, tj. nie jest jej praktyczną walidacją, a jedynie stanowi jej weryfikację numeryczną.

W rozdziale czwartym opisano proponowany przez Autora sposób sterowania polem temperatury, za pomocą odpowiednio zaprojektowanego układu rur z cieczą chłodzącą/grzewczą, w masywnych konstrukcjach betonowych podczas ich dojrzewania. Po sformułowaniu ogólnego, 3-wymiarowego problemu i jego stosownych uproszczeniach, które w mojej ocenie są dopuszczalne i dobrze uzasadnione, otrzymano osiowo-symetryczne równanie przewodnictwa ciepła w dojrzewającym betonie wraz z warunkiem brzegowym, uwzględniającym wymianę ciepła betonu z rurą, w której płynie ciecz chłodząca o zmieniającej się wzdłuż jej długości temperaturze (zależnej od promienia i grubości ścianki oraz materiału rury, a także natężenia przepływu cieczy). Temperaturę cieczy wyznaczano z analitycznego rozwiązania zadania ustalonego przepływu cieczy w rurze. Sformułowano także 3 możliwe, z praktycznego punktu widzenia, funkcje celu zadania optymalizacji układu chłodzącego: 1) minimalizacji wartości maksymalnej różnicy temperatury dwóch dowolnych punktów w analizowanej konstrukcji, odniesionej do ich odległości; 2) minimalizacji maksymalnej wartości gradientu temperatury w całej analizowanej konstrukcji; 3) nieprzekroczenia maksymalnej dopuszczalnej temperatury w analizowanej konstrukcji. Na bazie kryteriów 2) i 3) sformułowano 2-kryterialne za-

danie optymalizacji w sensie Pareto, które rozwiązywano numerycznie za pomocą algorytmu *BiMADS*, opisanego w literaturze, poz. [198].

W rozdziale piątym przedstawiono podstawowe informacje o przeprowadzonych przez Doktoranta pomiarach ewolucji temperatury w próbkach betonu dojrzewającego w odpowiednio izolowanych termicznie formach o kształcie walcowym (przepływ 1-D), pryzmatycznym (przepływ 2-D) i prostopadłościennym (przepływ 3-D). Opisano podstawowe wymiary form i materiały, z których zostały one wykonane, oraz rodzaj i rozmieszczenie w formie czujników temperatury. Brak jest natomiast danych o dokładności pomiaru przez nie temperatury oraz tolerancji ich położenia w formie, co ma istotne znaczenie przy ocenie dokładności identyfikowanych charakterystyk termicznych betonu. Nie podano także grubości lub oporu cieplnego izolacji termicznej ścianek w/w form, co ma znaczenie przy doborze warunków brzegowych podczas numerycznej analizy wymiany ciepła w badanych elementach betonowych. W końcowej części tego rozdziału podano także składy 10 badanych serii mieszanek betonowych, oznaczonych jako serie: 1, L, T, W, P, E, G, DP, DZ i Z, wykonanych z cementu CEM I 42.5R, z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów (W), popiołu lotnego krzemiankowego z Elektrowni Opole (V) i żużła wielkopieczowego (S).

W mojej ocenie, najbardziej wartościowy naukowo, szósty rozdział dysertacji zawiera przedstawienie i dyskusję wyników badań doświadczalnych, przeprowadzonych przez Doktoranta. W podrozdziale 6.1, za pomocą stygnącego piasku, zbadano straty ciepła przez ścianki formy walcowej, mającej w założeniu zapewnić warunki 1-wymiarowego przepływu ciepła. Aby uwzględnić te straty w modelu matematycznym, założono istnienie upustu ciepła o natężeniu zależnym od temperatury próbki i otoczenia, a następnie wyznaczono równanie, opisujące upust ciepła w przeprowadzonym doświadczeniu, które na 95% poziomie ufności dało bardzo wysoki współczynnik determinacji $R^2 = 0.996$. W mojej ocenie, przyjęty sposób uwzględnienia strat ciepła przez ścianki formy 1-D jest właściwy, choć celowym byłaby dodatkowa weryfikacja uzyskanych współczynników równania (6.7) przy wyższej temperaturze początkowej piasku, gdyż w niektórych badaniach hydratacji cementu uzyskiwano temperatury wyraźnie wyższe niż 62°C.

W podrozdziale 6.2 przedstawiono graficznie wybrane wyniki pomiaru ewolucji temperatury w czterech punktach formy 1-D (w dwóch konfiguracjach pomiarowych formy) podczas hydratacji cementu w 5 mieszankach betonowych serii L o zróżnicowanym składzie (różne proporcje cementu CEM I, wapiennego popiołu lotnego i kruszywa amfibolitowego), które w następnej części pracy, obok wyników badań innych mieszanek betonowych, posłużyły do rozwiązania zadania odwrotnego. Szkoda, że wyniki wszystkich badań twardnienia betonu w formie 1-D, starannie przeprowadzonych przez Doktoranta, nie zostały zestawione w formie tabelarycznej w załączniku do dysertacji (najlepiej w postaci cyfrowej na CD), jak to jest praktykowane w przypadku prac doświadczalnych w przodujących ośrodkach np. we Francji (ale także na moim Wydziale), gdyż mogłyby być one w przyszłości wykorzystane przez innych badaczy, np. do walidacji ich modeli matematycznych hydratacji cementu lub metod rozwiązania zadania odwrotnego. Domyślam się, że są one dostępne w formie raportów projektu POIG, ale sugerowałbym ich załączenie także do dysertacji.

W podrozdziale 6.3 przedstawiono wybrane wyniki rozwiązania zadania odwrotnego, mającego na celu wyznaczenie właściwości termicznych (natężenia objętościowych źródeł ciepła hydratacji, ciepła właściwego, współczynnika przewodzenia ciepła) betonu podczas jego twardnienia, które otrzymano za pomocą metody identyfikacji, opisanej w rozdziale 3. Na podstawie testów numerycznych Doktorant pokazał, że za pomocą tej metody, z zastosowaniem regularyzacji Tichonowa, można równocześnie wyznaczyć 2 parametry opisujące ciepło właściwe, 2 - współczynnik przewodzenia ciepła oraz 72 - źródła ciepła. Jest to bardzo dobry wynik, wskazujący na wysoką efektywność proponowanej metody rozwiązania trudnego zadania odwrotnego.

Mam jednak kilka uwag dyskusyjnych, w części krytycznych, do strony metodycznej i praktycznej przeprowadzonych badań. W pełnej postaci, tj. zależności w/w wielkości fizycznych od równoważnego wieku betonu (ekwiwalentnego czasu hydratacji w temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$), przedstawiono wyniki jedynie dla jednej mieszanki serii W, tj. W50 I. Przedstawiono także wyznaczone natężenie źródła ciepła w funkcji równoważnego wieku dla 2 mieszanek serii L (Rys. 6.11 – w przypadku mieszanki L 60 30 60 czas badań był zbyt krótki – widoczny jest wzrost natężenia źródeł ciepła wskutek hydratacji popiołu lotnego) i zakumulowane ciepło wydzielone podczas twardnienia w funkcji równoważnego wieku dla 4 mieszanek serii DP i DZ (Rys. 6.12). Jakościowo wyniki te są zgodne z danymi literaturowymi oraz wynikami badań wykonanych przez mój zespół w ramach tematu 3.1 projektu POIG.

Jednak ich ocenę ilościową, a tym samym validację proponowanej w doktoracie metody, można przeprowadzić jedynie przez porównanie z wynikami badań wykonanych innymi metodami, np. w przypadku kluczowej dla praktyki budowlanej, krzywej opisującej natężenie źródeł ciepła towarzyszących hydratacji w funkcji ekwiwalentnego wieku betonu – za pomocą kalorymetrii izotermicznej w temperaturze 20°C, która pozwala bezpośrednio wyznaczyć w/w krzywą z dobrą dokładnością. Według mojej wiedzy kilka ośrodków w naszym kraju posiada ten aparat (w tym moja Katedra). Jak wskazują wyniki analizy wrażliwościowej w rozdziale 2. (Rys. 2.17 i 2.28), pozostałe parametry termiczne betonu mają wyraźnie mniejsze znaczenie dla przebiegu zmian temperatury w dojrzewającym betonie, a wyznaczony przez Doktoranta zakres ich zmienności podczas tego procesu: ok. 5% wartości dla ciepła właściwego i ok. 2% dla współczynnika przewodzenia ciepła, jest bardzo mały i porównywalny z błędem pomiarowym, więc w mojej ocenie podczas obliczeń numerycznych można założyć stałe wartości tych parametrów, np. na podstawie wyników pomiarów wykonanych dla próbek dojrzałego betonu (por. Rys. 3.3).

Moim zdaniem, jako minimum, Doktorant powinien przedstawić w pracy, dla zbadanych przez Niego mieszanek betonowych, porównanie zmierzzonego i obliczonego numerycznie przebiegu temperatury, otrzymanego dla zidentyfikowanych parametrów termicznych betonu. Dopiero wówczas będzie możliwa ocena, czy proponowana metoda jest wystarczająco dokładna dla zastosowań praktycznych i uznać ją za zwalidowaną doświadczalnie, a nie jedynie zweryfikowaną numerycznie (wyniki przedstawione w rozdziale 3. na Rys. 3.8 i 3.9 są tylko weryfikacją metody). Proszę, aby Doktorant podczas publicznej obrony przedstawił taką validację dla kilku zbadanych przez Niego mieszanek betonowych o zróżnicowanej zawartości cementu i popiołów lotnych.

Ponadto, na podstawie wyników analizy wrażliwościowej oraz dokładności pomiaru temperatury i tolerancji współrzędnych punktów pomiarowych, należałoby oszacować dokładność, z jaką wyznaczane są identyfikowane parametry termiczne dojrzewającego betonu za pomocą proponowanej w pracy metody. Moim zdaniem taka analiza jest niezbędna, tym bardziej, że w założeniu Autora metoda ta ma być stosowana praktycznie i jest przedmiotem zgłoszenia patentowego. Proszę, aby podczas publicznej obrony Doktorant przedstawił takie oszacowanie, co nie powinno mu sprawić problemu jako absolwentowi Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

W zakończeniu tego podrozdziału, na potrzeby rozwiązania w porozdz. 6.6 zadania optymalizacji systemu chłodzenia masywów betonowych podczas ich twardnienia, dla części wyników badań mieszanek betonowych serii L, DP i DZ, tj. źródeł ciepła hydratacji oraz ciepła właściwego i współczynnika przewodzenia ciepła, zostały wyznaczone krzywe regresji, które bardzo dobrze aproksymują wyniki badań.

W mojej ocenie proponowana przez Doktoranta metoda identyfikacji parametrów termicznych dojrzewającego betonu, choć bardzo ciekawa i cenna z naukowego punktu widzenia, może pełnić jedynie podmocniczą rolę przy projektowaniu procesu betonowania masywnych konstrukcji betonowych, oraz nie zastąpi badań kalorymetrem semi-adiabatycznym lub izotermicznym, które są rutynowo wykonywane dla elementów konstrukcyjnych tego typu. Pełnią one na ogół bardzo odpowiedzialną rolę w budowlach, np. fundamentów bloków energetycznych, pylonów i filarów mostów, elementów infrastruktury hydrotechnicznej (zapór, jazów itp.), więc przy ich projektowaniu stosuje się najlepsze i najdokładniejsze dostępne metody badań, mimo ich wyższego kosztu. Ponadto, w chwili obecnej kilka ośrodków w kraju, zajmujących się badaniami dojrzewającego betonu i/lub projektowaniem masywnych konstrukcji betonowych, dysponuje najnowszym sprzętem pomiarowym, w tym kalorymetrami semi-adiabatycznymi i/lub izotermicznymi do badania procesu hydratacji cementu/betonu.

W podrozdziale 6.4 przedstawiono i przedyskutowano wyniki badań ewolucji temperatury dla mieszanki DP 30 i 3 mieszanek betonowych serii P (o różnej zawartości cementu CEM I i/lub popiołu lotnego), podczas ich dojrzewania w formach 2-D o przekroju trapezowym. Podobnie, jak w przypadku badań w formie 1-D, moim zdaniem celowe byłoby zamieszczenie w załączniku pełnych wyników pomiaru temperatury w formie tabelarycznej (najlepiej w postaci cyfrowej na CD). Dla badanych mieszanek serii P porównano wyniki pomiarów temperatury w 7 dobrze wybranych punktach z wynikami obliczeń numerycznych, wykonanych dla zidentyfikowanych, opisaną w rozdz. 3 metodą bazującą na doświadczeniu w formie walcowej, parametrów termicznych i pomierzonej podczas badań temperatury otoczenia. Zgodność wyników jest zadowalająca we wszystkich przypadkach. Doktorant podawał w swojej pracy oszacowania błędów obliczeń w stosunku do danych doświadczalnych, biorąc pod uwagę średnie wartości błędów odniesione do wartości

maksymalnej temperatury. Moim zdaniem, powinno brać się pod uwagę maksymalne odchylenia odniesione do maksymalnego przyrostu temperatury, bo dopiero ta wielkość daje pogląd o jakości i dokładności obliczeń, które mają służyć do oszacowania zagrożenia wystąpienia termicznego spękania elementu. Takie też wartości podałem poniżej.

W przypadku mieszanki bez popiołu lotnego (P 50 0) maksymalne różnice temperatury nie przekraczały 3 K przy jej przyroście wskutek hydratacji o maksymalnie ok. 25 K, tj. max. błąd względny (odniesiony do przyrostu temperatury) nie przekraczał ok. 12%. Obliczone wartości temperatury były zarówno wyższe, jak i niższe od zmierzonych, tak więc maksymalne, wyznaczone numerycznie różnice temperatury w elemencie betonowym mogą być nawet o 5 K niższe od zmierzonych, są więc po stronie bezpiecznej. W przypadku mieszanki z dużą domieszką popiołu lotnego (P50 60 Ws) maksymalne różnice temperatury nie przekraczały 2 K, przy jej przyroście wskutek hydratacji o maksymalnie ok. 10.5 K, co daje dokładność ok. 19% w stosunku do zmierzonego przyrostu temperatury. Tutaj także otrzymane numerycznie różnice temperatury między różnymi punktami elementu są niższe od zmierzonych i nie przekraczają ok. 3 K – są więc po stronie bezpiecznej. W przypadku mieszanki z bardzo dużą zawartością cementu portlandzkiego PP 50 0, uzyskano podobną dokładność względną ok. 21.5% - maksymalne różnice temperatury nie przekraczały 16 K przy jej przyroście wskutek hydratacji o maksymalnie ok. 74 K. W tym przypadku obliczone, maksymalne różnice temperatury między różnymi punktami elementu w okresie występowania maksymalnych wartości temperatury, są mniejsze od zmierzonych, przy czym różnica ta nie przekracza 10 K – wyniki obliczeń numerycznych są więc po stronie niebezpiecznej. Maksymalne różnice temperatury zmierzonej i obliczonej występują w fazie stygnięcia elementu, co może świadczyć o źle dobranych warunkach brzegowych w tych obliczeniach (choć były one dobrze kontrolowane w laboratorium). Doktorant podjął także dość udaną próbę wykorzystania kamery termowizyjnej do monitorowania temperatury powierzchni dojrzewającego elementu betonowego z mieszanki P50 0 (znane są z literatury wcześniejsze próby tego rodzaju). Wyniki tych pomiarów są zadowalająco zgodne z wynikami obliczeń, przy czym potwierdza się wniosek o mniejszych wartościach różnic temperatury zmierzonych doświadczalnie.

Doktorant podjął też próbę jakościowej analizy naprężenia w badanym elemencie betonowym za pomocą programu *COMSOL Multiphysics*, przyjmując dwa różne rodzaje warunków brzegowych na styku formy i elementu betonowego (tj. zablokowane przemieszczenia i tarcie Coulomba) oraz ewolucję parametrów wytrzymałościowych wg modelu ACI dla dojrzewającego betonu (traktowanego jako materiał liniowo termo-sprężysty). Moim zdaniem ten fragment pracy można było pominąć, gdyż bazuje on na zbyt uproszczonym, w stosunku do aktualnego stanu wiedzy modelu materiału i nie wnosi nic wartościowego do pracy.

W rozdziale 6.5 przedstawiono i przedyskutowano wyniki pomiarów temperatury w 7 wybranych punktach elementów betonowych wykonanych z 6 mieszanek serii W i 4 mieszanek serii D, dojrzewających w formach 3-D. W przypadku pierwszej serii badań powierzchnia elementu była przykryta plandeką, co skutecznie tłumiło wahania temperatury (poza krótkotrwałym zdjęciem plandeki, co spowodowało skokowy spadek temperatury o kilka Kelvinów ok. 100 godziny badań). Różnice temperatury między analizowanymi punktami nie przekraczały 15 K, co w świetle doświadczeń praktycznych pozwala wnioskować o braku zagrożenia wystąpienia spękań betonu. Podczas drugiej serii badań wahania temperatury w bezpośrednim otoczeniu form były wyraźnie większe i ich amplituda sięgała 20 K. Różnice temperatury między analizowanymi punktami elementów betonowych nie przekraczały 25 K, co może świadczyć o zagrożeniu wystąpienia spękań betonu.

Doktorant wykonał obliczenia numeryczne zmian temperatury w 3-wymiarowych elementach betonowych z mieszanki DP 0 w formie 3-D (z izolacją górnej powierzchni elementu i bez niej) w przybliżony sposób, analizując zmiany temperatury w środkowym, pionowym przekroju elementu za pomocą tego samego, co w poprzednim podrozdziale, modelu 2-wymiarowego. Warunki brzegowe dla wymiany ciepła przyjęto zróżnicowane dla poszczególnych ścian formy, korzystając z danych literaturowych. W przypadku formy 3-D izolowanej ze wszystkich stron, maksymalna różnica między wynikami pomiarów i obliczeń wynosiła 7 K, przy maksymalnym przyroście temperatury wskutek hydratacji o ok. 36 K, co daje błąd względny ok. 19.5%. Otrzymana z obliczeń numerycznych różnica temperatury między różnymi punktami tego elementu 3-D była zbliżona, a w okresie występowania maksymalnych temperatur nawet nieco wyższa, co pozwala na realistyczne oszacowanie niebezpieczeństwa pęknięcia betonu.

W przypadku elementu z jedną powierzchnią nieizolowaną, maksymalna różnica temperatur wynosiła 12.7 K, przy maksymalnym przyroście temperatury wskutek hydratacji o ok. 40 K, co daje błąd względny ok. 31.5%. Także w tym przypadku obliczone i zmierzone różnice temperatur między różnymi punktami betonowego elementu są zbliżone, co pozwala na właściwe oszacowanie zagrożenia pęknięcia betonu.

Pomimo ok. 4-krotnie wyższych od podanych przez Doktoranta względnych różnic obliczeń temperatury w stosunku do wartości doświadczalnych, można uznać, że podany przez Niego wniosek o możliwości uzyskania wystarczająco dokładnych dla celów praktycznych, wyników temperatury w 3-wymiarowych elementach betonowych za pomocą modelu 2-wymiarowego, można uznać za słuszny.

W dalszej części tego podrozdziału przedstawiono wyniki 3-wymiarowych obliczeń pola temperatury w analizowanych poprzednio elementach betonowych z mieszanki DP 0 oraz dojrzewających w formie 3-D oraz w betonowym filarze mostu podczas jego dojrzewania, wykonanych programem *COMSOL*. Dla tej drugiej konstrukcji przyjęto parametry materiałowe mieszanki DP 30, starając się realistycznie zamodelować warunki brzegowe, uwzględniając wymianę ciepła z gruntem oraz wpływ promieniowania słonecznego i radiacyjne straty ciepła do otoczenia. Po analizie, otrzymanych w wyniku obliczeń, rozkładów temperatury w wybranych chwilach czasu Autor stwierdził, że model ten dał „poprawne jakościowo rezultaty”. Moim zdaniem brak wystarczających przesłanek do takiej konkluzji, a ponadto analizy rzeczywistych konstrukcji mają na celu uzyskanie wyników poprawnych ilościowo, w tym zwłaszcza oszacowania naprężeń i możliwych uszkodzeń (pęknięć i zarysowań).

W podrozdziale 6.6 przedstawiono wyniki obliczeń mających na celu optymalizację systemu chłodzenia masywnych konstrukcji betonowych podczas jej dojrzewania, stosując metodę opisaną w rozdziale 4.

Na początku tej części pracy Doktorant stwierdził, że „ze względu na akademicki charakter rozważań ... nie będzie brany pod uwagę aspekt ekonomiczny”. Moim zdaniem jest to zbytne uproszczenie zagadnienia, gdyż w praktyce gospodarczej jest to bardzo istotny element, może nawet jeden z najważniejszych, biorąc pod uwagę bardzo wysokie koszty instalacji chłodzących. Wykonawca zawsze będzie dążył do spełnienia wymagań technicznych projektu (końcowa wytrzymałość i moduł sprężystości Younga betonu, brak pęknięć i zarysowań konstrukcji) przy jak najniższych kosztach (odpowiedni skład mieszanki, technologia i kolejność betonowania, ewentualne zastosowanie instalacji chłodzącej). Dlatego zadanie optymalizacyjne dotyczące wykonania konstrukcji betonowej powinno uwzględniać zarówno kryteria techniczne (np. w formie przedstawionej w pracy), jak i ekonomiczne (tj. minimalizacja kosztu wykonania). Proszę Doktoranta o komentarz, jak uwzględnienie dodatkowego kryterium ekonomicznego wpłynęłoby (choćby jakościowo) na uzyskane rozwiązania zagadnienia optymalizacyjnego.

Analizy wykonano dla dwóch mieszanek betonowych z serii L (bez i z popiołem lotnym) oraz rur chłodniczych wykonanych ze stali. Przeprowadzono optymalizację jedno- i dwukryterialną (w sensie Pareto), przyjmując jako zmienne decyzyjne: początkową temperaturę betonu, temperaturę wody na wlocie do instalacji chłodzącej, promień rury chłodzącej i grubość jej ścianki, natężenie przepływu wody, odległość sąsiednich rur chłodzących. W przypadku dwóch optymalizacji jednokryterialnych - wg (4.33) i (4.34) otrzymano, łatwo do przewidzenia, wartości odpowiadające granicom górnym lub dolnym przyjętego przedziału ich zmienności. Wykazano, że kryteria te są przeciwstawne, co wymaga zastosowania optymalizacji dwukryterialnej w sensie Pareto. Doktorant otrzymał rozwiązania niezdominowane w/w zadania optymalizacji, które odpowiadały pośrednim wartościom zmiennych decyzyjnych. Graficznie przedstawiono front Pareto dla minimalizacji dwóch funkcji celu w przypadku mieszanki serii L bez popiołu lotnego (Rys. 6.47) i z popiołem lotnym (Rys. 6.48). Proszę o komentarz, jakie dodatkowe kryterium proponowałby zastosować Doktorant, aby wybrać jeden konkretny, optymalny zestaw zmiennych decyzyjnych? Czy wartości tych zmiennych byłyby dla obu mieszanek takie same?

W podrozdziale 6.7 zestawiono tabelarycznie i przedyskutowano wartości: maksymalnych temperatur i czasu ich wystąpienia, maksymalnego przyrostu temperatury, maksymalnej szybkości wzrostu temperatury, gradientów temperatury, maksymalnej różnicy temperatury podczas pomiaru oraz wydzielonego ciepła hydratacji, uzyskane przez Doktoranta podczas badań poszczególnych mieszanek betonowych w formach trzech rodzajów (1D, 2D i 3D). Przeanalizowano także korelację wybranych z tych wielkości z zawartością cementu, popiołu i kruszywa w mieszance, uzyskując wyniki zgodne z oczekiwaniami (tj. intuicją fizyczną i danymi literaturowymi). Proszę o wyjaśnienie, dlaczego Doktorant na podstawie przedstawionych wyników wyciągnął wniosek o przydatności proponowanej formy walcowej (1-D) do wstępnego szacowania

kaloryczności mieszanek betonowych. Moim zdaniem mogłyby to potwierdzić jedynie badania w kalorymetrze izotermicznym lub semi-adiabatycznym, których nie przeprowadzono.

Ponadto mam wrażenie, że zgodnie z intuicją fizyczną, dane przedstawione na Rys. 6.55, tj. czas wystąpienia maksimum temperatury i maksymalny przyrost temperatury, są do siebie odwrotnie proporcjonalne, a Doktorant nie zaobserwował między nimi korelacji – proszę o wyjaśnienie tej kwestii, czy rzeczywiście współczynnik korelacji tych wielkości jest tak niski. Proszę też o wyjaśnienie, jak należy rozumieć stwierdzenie o „odpowiedniości wyników pomiarów 1D i 3D”, wykonanych tej samej mieszanki”. Wnioski dotyczące Rys. 6.59 i 6.60 są dość trywialne – jest chyba dość oczywistym, że wyższe ciepła hydratacji danej mieszanki zawsze spowoduje wyższy przyrost temperatury, niezależnie czy będziemy ją mierzyć w formie walcowej (1D), czy też prostopadłościowej (3D). Moim zdaniem, cały ten fragment nic istotnego nie wnosi i można go było pominąć. Bardzo cieszy mnie natomiast ostatni akapit rozdziału 6, świadczący o tym, że Doktorant zdaje sobie sprawę, że jego rozważania dotyczące: pola temperatury w masywnych elementach betonowych, dojrzewających w różnych formach, i modelowania jego ewolucji, odpowiedniego doboru składu mieszanki, oraz optymalizacji systemu chłodzenia mieszanki, powinny uwzględniać inne ważne kwestie, jak względy ekonomiczne, ekologiczne, a przede wszystkim właściwości wytrzymałościowe i trwałość konstrukcji betonowej po jej stwardnieniu.

W rozdziale siódmym Doktorant krótko podsumował uzyskane wyniki i główne wnioski ze swoich badań. W moim odczuciu precenzena On znaczenie i możliwości symulacji numerycznych w stosunku do badań doświadczalnych, pisząc że „całkowite wyeliminowanie podejścia empirycznego jest niemożliwe” jedynie „ze względu na potrzebę weryfikacji używanych modeli”. Moją opinię opieram na ponad 20-letnim doświadczeniu w numerycznym modelowaniu złożonych procesów degradacji mechanicznej i chemicznej materiałów budowlanych w warunkach zmiennej temperatury, wilgotności i koncentracji agresywnych czynników chemicznych. W przypadku masywnych budowli betonowych stwierdzenie to jest bardzo dalekie od praktyki budowlanej, bo nie wyobrażam sobie, aby można było zaprojektować odpowiedzialne konstrukcje masywne, jak np. fundamenty bloków energetycznych czy pylony dużych mostów, oraz technologię ich betonowania (obejmującą dobór składu mieszanki, sposób i kolejność jej wlewania do formy, dobór ewentualnej instalacji chłodzącej) bez kompleksowych badań doświadczalnych: kalorymetrycznych, wytrzymałościowych i ich trwałości, np. mrozoodporności i/lub przepuszczalności. Potwierdza to bogate doświadczenie praktyczne zespołu z Politechniki Łódzkiej, który ma w dorobku zaprojektowanie i nadzór nad betonowaniem (bez instalacji chłodzących!) szeregu bardzo dużych i trudnych budowli masywnych, jak np. fundamenty bloków energetycznych elektrowni Bełchatów (27 tys. m³) i Pątnów-Adamów, fundamenty pylonu mostu we Wrocławiu, czy fundamenty świątyni „Opatrzności Bożej” w Warszawie.

Doktorant stwierdził też, że zaproponował „... kompleksową metodę monitorowania zmienności pola temperatury w obiektach betonowych w trakcie ich dojrzewania i eksploatacji oraz mitygowania jego gradientów...” – według mojej wiedzy podobne działania są prowadzone rutynowo w wielu, jeśli nie we wszystkich, odpowiedzialnych masywnych budowlach betonowych (m. in. we wszystkich prowadzonych przez zespół z PŁ). Nie zgadzam się ze stwierdzeniem, że zaproponowana w pracy, „... alternatywna do istniejących, procedura identyfikacji parametrów termofizycznych mieszanek betonowych pozwala na zastąpienie kosztownych badań eksperymentalnych ... poprzez punktowe pomiary temperatury i numeryczne rozwiązanie zagadnienie odwrotnego przepływu ciepła”. Biorąc pod uwagę, często wielomilionowe, koszty masywnych elementów betonowych oraz moje uwagi z poprzedniego akapitu, a także brak rzetelnej walidacji proponowanej w rozprawie metody identyfikacji (tzn. porównania z wynikami badań kalorymetrycznych ciepła hydratacji i pojemności cieplnej oraz badań współczynnika przewodzenia ciepła), uważam to stwierdzenie za przedwczesne.

W tej części pracy Doktorant wskazał także kierunki dalszych badań z tej tematyki, które Jego zdaniem powinny dotyczyć identyfikacji parametrów termofizycznych w funkcji temperatury i wilgotności, a nie ekwiwalentnego wieku betonu, wyznaczania stanu naprężenia i zmian pola wilgotnościowego w dojrzewających elementach betonowych, oraz wielokryterialnej optymalizacji systemu ich chłodzenia podczas tego procesu.

W końcowej części tego rozdziału wymieniono oryginalne, zdaniem Autora, koncepcje i osiągnięcia pracy. Nie negując elementów podanej przez Niego listy, mam wątpliwości czy wszystkie z nich można uznać za oryginalne. W szczególności trudno uznać, że opracowany został jakiś nowy model matematyczny

wymiany ciepła w dojrzewającym betonie – co najwyżej zostały wyznaczone wyrażenia opisujące poszczególne parametry klasycznego modelu wymiany ciepła w ośrodku z objętościowymi źródłami ciepła. Trudno mi też wskazać, jakie „założenia teoretyczne modelu” (matematycznego użytego w pracy) „zostały zweryfikowane eksperymentalnie”. Największe moje wątpliwości budzi stwierdzenie o „wyznaczeniu naprężeń termicznych powstałych na skutek nierównomiernego rozkładu pola temperatury oraz określeniu obszarów zagrożonych spękaniami” – zostały wykonane jedynie, za pomocą komercyjnego oprogramowania, „rutynowe” obliczenia inżynierskie bazujące na normowym modelu termo-sprężystym, co ma bardzo ograniczoną wartość naukową (o ile jakkolwiek). Ponadto, potwierdzono istnienie, dość oczywistej z fizycznego punktu widzenia, korelacji między parametrami termicznymi mieszanek betonowych a ich składem.

Brak jest natomiast jasnego stwierdzenia Doktoranta, czy wszystkie cele stawiane sobie przez Niego we wstępie do pracy zostały osiągnięte. Osobiście uważam, że udało się mu zrealizować większość z tych celów, ale nie wszystkie w pełnym zakresie, np. nie zwalidowano doświadczalnie metody identyfikacji charakterystyk termicznych betonów z dodatkami popiołu lotnego, więc nie ma pewności, że zostały one wyznaczone z zadowalającą dokładnością. Podobnie, pokazano przykładowy przebieg procesu optymalizacji jedno- i dwukryterialnej systemu chłodzenia masywnej konstrukcji masywnej podczas jej dojrzewania, ale nie wskazano jednego zestawu parametrów tego systemu, co można byłoby uznać za jej zaprojektowanie.

Powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne nie wpływają na moją, ogólnie pozytywną, ocenę pracy doktorskiej mgr Grzegorza Knora.

5. Uwagi szczegółowe

W niniejszej części recenzji zawarłem szereg uwag o bardziej szczegółowym charakterze, głównie zauważone przeze mnie nieścisłości i drobniejsze błędy merytoryczne.

W całym tekście rozprawy Autor stosuje zamiennie określenia „weryfikacja” i „walidacja”, choć mają one odmienne znaczenie (szczególnie często używa pierwszego z nich w znaczeniu drugiego). Pozwolę sobie to wyjaśnić w języku angielskim, za pomocą nieco żartobliwej definicji, podanej podczas wykładu plenarnego na Światowym Kongresie Mechaniki Komputerowej przez prof. Thomasa Hughesa: "validation is to check if you solve the right equations, verification is to check if you solve the equations right".

Doktorant, mimo iż jest fizykiem z wykształcenia, używa błędnych jednostek w układzie SI dla przyrostu i różnicy temperatury, która wyrażona jest w stopniach Celsjusza. Kiedyś tę różnicę wyrażano w jednostkach [deg], a obecnie powinien to być Kelvin [K]. Błąd ten dotyczy także jednostek wielkości pochodnych, np. współczynnika przewodzenia ciepła, którego prawidłową jednostką jest [W/(m·K)], ciepła właściwego [J/(kg·K)], gradientu temperatury [K/m], itp.

Określenia „ubytek energii cieplnej przez promieniowanie” i „ubytek ciepła przez tę część formy” (str. 98) jest co najmniej niezręczne – powinno mówić się raczej o „stratach ciepła przez promieniowanie” i „stratach ciepła przez tę część formy”.

Podobnie, zamiast „wibracyjny proces ubijania próbki” (str. 98) w języku technicznym mówi się o „wibracyjnym zageszczaniu próbki”.

Stwierdzenie „długość krawędzi została ustawiona na 28 cm” (str. 153) ma charakter potoczny i nie powinno być stosowane w publikacjach naukowych – powinno być „została przyjęta jako równa 28 cm”.

W całym podrozdziale 6.4 stosuje się dla mieszanki betonowej symbol „P50 Ws 60”, a wcześniej w Tabelicy 5.6 była ona oznaczona jako „P50 60 Ws” – symbole te powinny być zgodne ze sobą i stosowane konsekwentnie w całej pracy.

Stwierdzenie, że temperatury są „zmierzone przy użyciu termowizjera” (str. 136) jest ewidentnie błędne – chodzi zapewne o „termowizję” jako technikę badań, lub „kamerę termowizyjną” jako urządzenie ją wykorzystujące.

Sformułowanie, że „naprężenia termiczne w betonie mogą być mitygowane” (str. 149) jest „mało techniczne” (choć słowo „mitygować” występuje w słowniku Języka Polskiego) – mówi się raczej o „ograniczeniu naprężeń termicznych w betonie”.

Na str. 176 błędnie użyto symbolu „ ΔT ” dla oznaczenia gradientu temperatury – powinno być „ ∇T ”, tj. zgodnie z konwencją przyjętą w spisie symboli.

Rozprawa jest na ogół starannie zredagowana (poza wymienionymi przypadkami) i napisana poprawną polszczyzną, choć w niektórych fragmentach, zwłaszcza powstałych na podstawie przeglądu literatury

zagranicznej, można zauważyć stosowanie określeń i zwrotów wzorowanych na języku angielskim. W kilku miejscach w tekście błędnie stosowany jest zaimek „tą” zamiast „te”, np. „stosując tą samą miarę” (str. 136).

Doktorant popełnił też bardzo dużo błędów interpunkcyjnych, co czasami utrudnia zrozumienie jej treści. Nie ustrzegł się też szeregu błędów redakcyjnych (np. „w”, „z”, „i”, „a” na końcu wiersza), literowych (zaznaczonych przeze mnie w tekście rozprawy) oraz nieprecyzyjności i usterek językowych, z których część opisałem powyżej. Przed ewentualną publikacją pracy w języku polskim sugeruję usunięcie usterek językowych, gramatycznych, stylistycznych i redakcyjnych, które wymieniłem powyżej.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Doktorant samodzielnie wykonał badania ewolucji 1-, 2- i 3-wymiarowego pola temperatury w elementach betonowych podczas dojrzewania kilkunastu mieszanek betonowych. Następnie sformułował i rozwiązał numerycznie 1-wymiarowe zadanie odwrotne dotyczące tego procesu, w wyniku czego wyznaczył funkcje materiałowe opisujące właściwości termofizyczne tych mieszanek w funkcji równoważnego wieku betonu. Otrzymane funkcje materiałowe zastosował w modelu matematycznym wymiany ciepła w ośrodku ze źródłami ciepła i rozwiązał numerycznie równania tego modelu dla przypadku 1-, 2- i 3-wymiarowej wymiany ciepła w dojrzewających elementach betonowych, za pomocą komercyjnego i w części autorskiego (2-wymiarowy program MES), oprogramowania komputerowego. Wyniki wcześniej wykonanych badań doświadczalnych posłużyły do walidacji modelu matematycznego zjawisk termicznych w dojrzewającym betonie dla przypadku 2-wymiarowej wymiany ciepła. Następnie sformułował uproszczony model matematyczny warunków brzegowych na styku dojrzewającego betonu i rury systemu chłodzącego, który to opis wykorzystał do sformułowania i numerycznego rozwiązania, za pomocą oprogramowania komercyjnego, zadania optymalizacji jedno- i dwukryterialnej tego systemu dla dwu różnych mieszanek betonowych. Cele, jakie sobie postawił Autor pracy zostały w dużym stopniu osiągnięte.

Mgr G. Knor ma w dorobku publikacyjnym 4 artykuły w czasopismach z listy B MNiSW, 1 rozdział w książce, 6 referatów na konferencjach naukowych (w tym 3 zagranicznych) i 1 zgłoszenie patentowe.

W swojej rozprawie doktorskiej wykazał się dobrą wiedzą teoretyczną z zakresu teorii wymiany ciepła, teorii optymalizacji, rozwiązywania zagadnień odwrotnych, mechaniki ośrodków termo-sprężystych oraz znajomością zjawisk fizyko-chemicznych hydratacji cementu i dojrzewania betonu, a także umiejętnością formułowania i numerycznego rozwiązywania zagadnień początkowo-brzegowych, zadań odwrotnych i optymalizacji wielokryterialnej, dotyczących tych złożonych procesów, programowania oraz prowadzenia badań doświadczalnych i właściwego opracowywania ich wyników. Moim zdaniem, jego rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie interdyscyplinarnego problemu naukowego, a także wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że moim zdaniem rozprawa doktorska mgr Grzegorza Knora, zatytułowana „*Identyfikacja, modelowanie i sterowanie polami temperatury w konstrukcjach betonowych*”, spełnia wymagania „ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z późniejszymi zmianami, oraz wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.