

## OCENA

rozprawy doktorskiej mgr. Grzegorza Knora

pt. *„Identyfikacja, modelowanie i sterowanie polami temperatury  
w konstrukcjach betonowych”*

opracowana na zlecenie  
Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN

### 1. Zakres rozprawy

Celem rozprawy było stworzenie komputerowo-zorientowanego systemu do numerycznej symulacji rozkładu temperatury w elementach betonowych w okresie ich twardnienia. System ten zawiera po pierwsze identyfikację zmiennych w czasie twardnienia parametrów termicznych betonu oraz wewnętrznych źródeł ciepła towarzyszących egzotermicznym reakcjom uwadniania składników cementu, następnie modelowanie zmiennych w czasie pól temperatury w modelach rzeczywistych obiektów połączone z walidacją proponowanego modelu numerycznego opartą o pomiary temperatury rzeczywistych obiektów oraz sterowanie polami temperatury podczas twardnienia betonu w rzeczywistym obiekcie w oparciu o optymalny model chłodzenia wnętrza rzeczywistego obiektu za pomocą cieczy chłodzącej przepływającej przez system rur umieszczanych we wnętrzu analizowanego obiektu.

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi bardzo obszerne opracowanie zawierające 203 strony, 132 rysunki i 17 tablic. Tak obszerne opracowanie zawiera zarówno obszerny przegląd literaturowy zagadnień poruszanych w rozprawie, omawiający 208 pozycji literaturowych jak i autorskie propozycje Doktoranta realizacji celów sformułowanych we wstępie rozprawy.

W pierwszym, wstępnym rozdziale rozprawy Autor podaje motywacje podjęcia tematyki pracy oraz określa jej cel i zakres. W rozdziale tym został ponadto dokonany przegląd literatury z zakresu identyfikacji termicznych własności betonu, modelowania przepływu ciepła i rozkładu temperatury w twardniejącym betonie oraz możliwości aktywnego sterowania rozkładem oraz wartościami temperatury wewnątrz obiektu, co może umożliwić zmniejszenie lub uniknięcia spękania betonu podczas jego stabilizacji.

Drugi rozdział rozprawy jest poświęcony problemom modelowania pól temperatury w obiektach betonowych. Doktorant omówił w tym rozdziale zagadnienie dojrzewania betonu wraz z upływem czasu, przedstawił równanie przewodnictwa cieplnego, omówił postawy modelowania przepływu ciepła w obiekcie przy wykorzystaniu jednowymiarowego w domenie przestrzeni równania nieustalonego przewodnictwa ciepła oraz bardziej ogólnej metody elementów skończonych modelowania nieustalonego przepływu ciepła w dwu- i trójwymiarowej przestrzeni. W końcowej części tego rozdziału przedstawiona została weryfikacja modeli numerycznych oraz analiza wrażliwości dla modelu dwuwymiarowego.

W trzecim rozdziale rozprawy doktorskiej mgr Knor omówił zagadnienie identyfikacji parametrów termicznych betonu i przedstawił procedurę rozwiązania problemu identyfikacyjnego.

Kolejny, czwarty rozdział rozprawy jest poświęcony możliwościom sterowania polami temperatury w dojrzewającym betonie i metodom rozwiązania tego zagadnienia.

W piątym rozdziale rozprawy została omówiona część eksperymentalna rozprawy dotycząca pomiarów temperatury w elementach betonowych podczas procesu ich dojrzewania. Doktorant przedstawił w tym rozdziale metodologię pomiaru zmiennej w czasie temperatury w próbkach traktowanych jako obiekty jedno-, dwu- i trójwymiarowe.

Dyskusję wyników uzyskanych na drodze eksperymentalnej i ich porównanie z rozkładami temperatury wyznaczonymi dla jedno-, dwu- i trójwymiarowych modeli numerycznych oraz wyniki modelowej optymalizacji chłodzenia masywnych elementów betonowych Doktorant przedstawił w szóstym rozdziale rozprawy.

W ostatnim, siódmym rozdziale mgr Knor dokonał podsumowania całości rozprawy doktorskiej, sformułował końcowe wnioski i przedstawił oryginalne, w Jego ocenie, koncepcje i osiągnięcia pracy.

## **2. Ogólna ocena merytoryczna**

Tematyka recenzowanej rozprawy dotyczy interesującego problemu modelowania i sterowania polami temperatury generowanymi wewnątrz elementów konstrukcyjnych wykonanych z betonu w wyniku przemian chemicznych zachodzących podczas dojrzewania betonu. Rozpatrywany problem jest ważny z inżynierskiego punktu widzenia, gdyż dotyczy istotnego problemu technologii wytwarzania masywnych obiektów betonowych z betonu o różnym składzie, zapobiegającej lub co najmniej niwelującej ryzyko wystąpienia rys i spękań wewnątrz lub na powierzchni wytwarzanego elementu wywołanych wzrostem temperatury i następnie niekontrolowanym chłodzeniem obiektów. Praca jest również istotna z naukowego punktu widzenia, gdyż przedstawia i realizuje metody połączenia ze sobą badań eksperymentalnych umożliwiających identyfikację parametrów termicznych mieszanek betonowych, zorientowanych komputerowo metod analizy ruchu ciepła i rozkładu temperatury w ciągłych i dyskretnych modelach rzeczywistych obiektów betonowych oraz modelowania procesów schładzania obiektów podczas procesu dojrzewania betonu. Z uwagi na powyższe, uważam, że tematyka pracy doktorskiej została wybrana poprawnie i stanowi istotny problem zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

W rozdziałach od drugiego do czwartego recenzowanej rozprawy, Doktorant omówił obszernie aktualny stan wiedzy dotyczący tematyki rozprawy oraz równocześnie przedstawił metodologię własnego rozwiązania analizowanych problemów. Takie ujęcie tematu nie jest, w mojej opinii, zbyt klarowne, gdyż utrudnia wyraźne oddzielenie własnego twórczego wglądu Doktoranta od zagadnień znanych, już dostatecznie dobrze opisanych w literaturze przedmiotu. Uważam, że cytowana w pracy literatura (208 pozycji) jest zbyt obszerna i 'przytłacza' własne osiągnięcia mgr Grzegorza Knora. Ograniczenie się do rezultatów prac innych autorów, bezpośrednio wykorzystywanych przez Doktoranta w swoich badaniach uwypukliło by bardziej jego własne osiągnięcia. Ponadto przedstawiony przez Doktoranta opis stosowanych znanych metod numerycznych, siłą rzeczy skrótowy, jest nieraz nieprecyzyjny lub wręcz błędny.

Rozdział 5 rozprawy przedstawia przede wszystkim własne osiągnięcia mgr Knora dotyczące eksperymentalnego pomiaru temperatury w dojrzewających próbkach betonowych i jest bez wątpienia wartościowym elementem rozprawy. Podobnie wartościowym wkładem Doktoranta jest rozdział 6 rozprawy, w którym zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych i ich porównanie z wynikami uzyskanymi w wyniku modelowania numerycznego. Jednak i tu nasuwa się uwaga, podobna do poprzedniej, że nadmiar wyników i ich graficzna ilustracja (123 rysunki lub wykresy w całej pracy, w tym 60 w rozdz. 6) bardziej zaciemnia niż uwypukla osiągnięcia Doktoranta. Ostatni, siódmy rozdział pracy, zawierający

podsumowanie całej rozprawy i podkreślający oryginalne koncepcje i osiągnięcia Doktoranta jest poprawny i nie budzi żadnych zastrzeżeń.

Biorąc pod uwagę scharakteryzowaną powyżej rozprawę doktorską mgr Grzegorza Knora, mogę stwierdzić, że tematyka rozprawy została określona właściwie. Zawartość merytoryczna rozprawy, wskazująca zarówno na przyswojenie przez Doktoranta odpowiedniej wiedzy z zakresu termomechaniki ciał odkształcalnych i metod przybliżonego rozwiązywania tych zagadnień, jak i na umiejętność samodzielnego rozwijania i poszerzania tej wiedzy, może stanowić podstawę do ubiegania się przez Kandydata o stopień naukowy doktora nauk technicznych.

Czuję się jednak w obowiązku do sformułowanie kilku krytycznych uwag ogólnych, jakie nasunęły mi się przy czytaniu tekstu rozprawy.

Formułując w punkcie 2.3.2 rozprawy metodę elementów skończonych w zastosowaniu do zagadnień termicznych, Doktorant nie precyzuje dokładnie czy metodę Galerkiną rozwiązywania równania różniczkowego stosuje do całego obszaru, w którym obowiązuje to równanie czy też tylko do fragmentu tego obszaru, nazywanego w terminologii metody elementów skończonych 'elementem skończonym'. Stwierdzenie zawarte na str. 46 rozprawy po wzorze (2.45) '*Przy założeniu, że warunki brzegowe Dirichleta są zerowe....*' może być prawdziwe przy stosowaniu takiego podejścia dla całego obszaru, lecz jest całkowicie błędne w odniesieniu do pojedynczego elementu (niezależnie od wymiarowości elementu 1D, 2D lub 3D). Na brzegach każdego elementu istnieje określone pole temperatury i strumień ciepła, przez które to wielkości elementy 'łączą się' ze sobą. Podobnie funkcje kształtu stosowane w elementach są opisane w sposób niejasny i wiele stwierdzeń zawartych w tekście jest niepoprawnych (np. str.47 po w. (2.47): '*Założenie takie pozwala pozbyć się pochodnych przestrzennych w równaniu (2.46). . .*'). Niestety sformułowania zawarte w tym punkcie wskazują, że Doktorant nie w pełni posiadał wiedzę dotyczącą istoty metody elementów skończonych. Szczęśliwie, błędy popełnione w tym punkcie nie mają żadnego wpływu na rezultaty uzyskane przez Doktoranta, gdyż do rzeczywistego modelowania rozkładu temperatury wykorzystał on gotowe biblioteki metody elementów skończonych zawarte w pakietach MATLAB i COMSOL. Ponadto warto zauważyć, że metoda elementów skończonych w zastosowaniu do szerokiej klasy problemów technicznych jest dobrze znana i szeroko opisana i nie było potrzeby, moim zdaniem, zamieszczać tak szczegółowego jej opisu w recenzowanej rozprawie.

Przedstawiony w podrozdziale 3.2 opis bezgradientowych algorytmów poszukiwań prostych lub bezgradientowych metod poprawy stosowanych do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych jest nieprecyzyjny i nadmiernie rozwlekły. Stosowane metody są dobrze znane i udokumentowane w literaturze. Podanie i omówienie bardzo prostego przykładu poszukiwania minimum funkcji będącej sumą kwadratów dwóch zmiennych niezależnych jest zupełnie zbędne i nie wnosi żadnych dodatkowych informacji o naturze stosowanego algorytmu. Znacznie bardziej interesujące było by przedstawienie i ocena dokładności, czasu i historii rozwiązania rzeczywistego problemu rozpatrywanego w pracy, szczególnie w przypadku gdy doktorant realizuje wielokrotne rozwiązanie tego samego problemu z losowo wybranym punktem startowym.

Również podrozdział 2.2.6 zatytułowany *Analiza wrażliwości modelu termicznego*, ma niewiele wspólnego z tym co powszechnie w mechanice jest uznawane za analizę wrażliwości, czyli inaczej analizę czułości zmian lokalnych lub globalnych wielkości na zmianę parametrów od których te wielkości zależą. Rozważania przedstawione w tym rozdziale sprowadzają się w zasadzie do przedstawienia odpowiedzi modelu numerycznego dla arbitralnie wybranych różnych wartości parametrów termicznych betonu. Przedstawione wnioski trudno uznać za

wnioski dotyczące wrażliwości pól temperatury na zmianę ciepła właściwego betonu, współczynnika przewodnictwa cieplnego i temperatury otoczenia.

Omawiając w punkcie 5.2 pomiary temperatury w próbkach jednowymiarowych, Doktorant stwierdza, że z uwagi na niski współczynnik przewodności ciepła osłonowej pianki polietylenowej z metalizowaną powierzchnią zewnętrzną, komora pomiarowa jest izolowana termicznie od otoczenia. Brakuje jednak potwierdzenia tego założenia przez jakąkolwiek próbę kalibracji termicznej komory i ustalenia rzeczywistych warunków przenikania ciepła przez powierzchnię zewnętrzną i powierzchnie górną i dolną formy. Wydaje się, że jedną z takich możliwości byłby termowizyjny pomiar temperatury zewnętrznej powierzchni formy w której umieszczono liniowe źródło ciepła o zadanej wydajności (np. grzałkę elektryczną). Informacja o zmianach w czasie temperatury powierzchni zewnętrznej i powierzchni górnej i dolnej pozwoliłaby na zweryfikowanie założenia o izolacji termicznej komory pomiarowej lub też na oszacowanie współczynnika przewodności cieplnej obudowy komory lub współczynnika przewodzenia ciepła.

Układ pracy jest właściwy, zaś sam tekst jest napisany w sposób niebudzący poważniejszych zastrzeżeń. Uważam za nieuzasadnione nadużywanie terminologii angielskojęzycznej obok powszechnie znanych i stosowanych nazw polskich. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych usterek merytorycznych oraz drobnych potknięć językowych, będących prawdopodobnie w dużej mierze efektem niezbyt starannie przeprowadzonej końcowej korekty. Na najważniejsze z nich zwracam uwagę w dalszej części recenzji.

Reasumując ogólną ocenę rozprawy, uważam, że prezentowane w pracy rezultaty stanowią w dużej części oryginalny wkład Autora w problematykę teoretycznej i numerycznej analizy pól termicznych w dojrzewającym betonie oraz świadczą o Jego umiejętności twórczego rozwijania osiągnięć własnych oraz innych autorów.

### 3. Uwagi szczegółowe

W tej części recenzji wymieniam najistotniejsze, moim zdaniem, uwagi i wątpliwości szczegółowe o różnej wadze merytorycznej, które nasunęły mi się podczas czytania tekstu.

1. W rozdziale 1, na str. 10 - 11 Autor przedstawia porównanie skuteczności algorytmów rozwiązujących proste zwyczajne równanie różniczkowe drugiego rzędu w pakietach MATLAB i COMSOL. Porównanie nie wnosi niczego oryginalnego do pracy i jest całkowicie zbędne.
2. Przedstawiona ze szczegółami w punkcie 2.3.1 metoda rozwiązania równania nieustalonego przepływu ciepła (2.26) z wykorzystaniem dyskretyzacji obszaru opartego o ilorazy różnicowe jest zupełnie zbędna. Ten problem jest znakomicie rozpoznany w literaturze a sama metoda jest powszechnie stosowana.
3. Przedstawiona w punkcie 2.5 weryfikacja modeli numerycznych jest niejasna . Brak jest danych dla modelu 1D i 2D, uzasadnionych założeń o rozkładzie temperatury w przekrojach poprzecznych dla modelu 1D.
4. W punkcie 2.6 brak rysunku 2.16, do którego następuje odwołanie w podpisie do rysunku 2.17
5. Na str. 75 brak jest informacji o źródle stosowanego wzoru (3.13).
6. Na str. 92 i dalszych wprowadzono arbitralnie trzy postacie funkcji celu. Brak jest jednak wyjaśnienia sensu stosowanych funkcji. Taka informacja uzasadniałaby bardziej późniejszy wybór jednej z nich jako funkcji użytej w algorytmach.

7. Przedstawiony na str. 103 opis wymiarów formy jest zbyt szczegółowy i nie wnosi istotnych dla rozważanego problemu informacji lub też brak uzasadnienia istotności tych informacji.

Powyższe uwagi szczegółowe powinny być, w moim przekonaniu, uwzględnione przez Autora w przypadku przygotowywania publikacji naukowych dotyczących tematyki prezentowanej w pracy. Oczekuje również, że Doktorant ustosunkuje się do nich w czasie publicznej obrony. Pragnę jednak równocześnie stwierdzić, że krytyczne uwagi zamieszczone w tym punkcie recenzji w żadnym stopniu nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy mgr Grzegorza Knora.

#### 4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr Grzegorza Knora stanowi przyczynek naukowy dotyczący zagadnień analizy zachowania się betonu podczas dojrzewania w próbkach i masywnych obiektach betonowych. Zawiera ona elementy stanowiące oryginalny wkład Autora do numerycznej praktyki rozwiązywania nieustalonych zagadnień przepływu ciepła w ciałach stałych. Równocześnie Autor wykazał dostateczną wiedzę i przygotowanie w zakresie zarówno mechaniki ciał odkształcalnych jak i komputerowo zorientowanych metod ich analizy. Dlatego też uważam, że przedstawiona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i **może być dopuszczona do publicznej obrony** przed Radą Naukową Instytutu Podstawowych Problemów PAN.

