

Prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski, prof. zw.  
Członek korespondent Polskiej Akademii Nauk  
Politechnika Poznańska  
Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej  
ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań

Poznań, 26.07.2017 r.

## Recenzja

### Rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Partyki pt. „**Wpływ warunków zewnętrznych na proces krzepnięcia wody w materiałach porowatych**”

Promotor: dr hab. inż. Zygmunt Lipnicki, prof. UZ

#### Krótką charakterystyka rozprawy i jej cele

W pracy doktorskiej przedstawiono badania wpływu niskich temperatur występujących zarówno w technice jak i przyrodzie na procesy dyfuzyjne oraz krzepnięcie wody w wilgotnych materiałach porowatych. Wiele takich materiałów występujących w przyrodzie, budownictwie, środowisku oraz technice posiada porowatą strukturę, zwykle nasyconą wilgocią. Istotne jest usystematyzowanie zakresu wiedzy o materiałach porowatych, obejmujące sposoby badania struktury tych materiałów oraz mechanizmów ich nasycania, a także analizę kinetyki procesów dyfuzji o różnej strukturze porów oraz ekstrakcji różnych substancji, w tym także krzepnięcie wody w ciałach porowatych.

Proces wnikania wilgoci występuje często w przegrodach budowlanych wykonanych z ceramicznych materiałów porowatych. Wnikająca wilgoć obejmuje zwykle pewien obszar określony punktem rosy, który w warunkach niskich temperatur charakteryzuje się strefą przemarzania. Podobne zagadnienia zamrażania występują w przemyśle spożywczym przy utrwalaniu produktów żywnościowych, a także w budownictwie oraz geologii podczas procesów krzepnięcia wilgoci zachodzącej w warunkach zimowych.

Obecność wilgoci w materiałach porowatych powoduje zmianę wartości współczynnika przewodzenia ciepła danego materiału, a także wpływa destrukcyjnie na trwałość tego materiału. W wyniku oddziaływania niskich temperatur woda zawarta w wilgotnych materiałach podlega przemianie fazowej, a tworzący się lód którego objętość jest większa od cieczy powoduje uszkodzenie struktury tego materiału. Warunki mrozowe powodują uszkodzenia, które wpływają na destrukcję właściwości użytkowych elementów budowlanych. Należą do nich nieizolowane mury, gzymsy, żelbetowe ściany oporowe, betonowe elementy obiektów hydrotechnicznych (śluzy, zapory, obiekty mostowe), a także elementy nawierzchni i wszelkiego typu odwodnienia.

Uszkodzenia mrozowe mogą występować również w obiektach częściowo zagłębionych w gruncie, stanowiących elementy konstrukcyjne niezabezpieczone przed skutkami działania niskich temperatur. Konstrukcja poddana zjawisku przemarzania może przyczynić się wtedy do obniżenia parametrów wytrzymałościowych oraz pogorszenia warunków eksploatacyjnych obiektów budowlanych i doprowadzić do uszkodzeń materiału, a nawet jego zniszczenia w wyniku zamrażającej wody.

## Charakterystyka podjętej tematyki badawczej

W niniejszej rozprawie doktorskiej opracowano model teoretyczny przydatny do opisu i obliczeń procesu krzepnięcia wody w nasyconych materiałach porowatych oraz jego eksperymentalną weryfikację możliwą w zastosowaniach praktycznych. Podjęta tematyka badawcza ma służyć trzem celom, a mianowicie:

- Aspektowi poznawczemu – służącemu poznaniu i zrozumieniu procesu krzepnięcia występującego w wilgotnych materiałach porowatych, realizowanych na podstawie założonej koncepcji badawczej i badań teoretycznych oraz eksperymentalnych;
- Aspektowi aplikacyjnemu – służącemu wyznaczaniu charakterystycznych parametrów dotyczących procesu krzepnięcia, w tym: czasowi krzepnięcia, grubości warstwy zakrzepłej, rozkładowi temperatury w porowatym złożu kontaktującym się z zimną powierzchnią;
- Aspektowi przyszłościowemu – służącemu wskazaniu możliwości kontynuowania eksperymentów z zastosowaniem różnorodnych materiałów porowatych, wykorzystując przy tym model teoretyczny.

Wobec wymienionych celów badawczych rozważanego problemu procesu krzepnięcia wody w materiałach porowatych sformułowano następującą hipotezę badawczą:

**„Położenie wilgotnych elementów budowlanych i warunki zewnętrzne wpływają na usytuowanie frontu krzepnięcia i jego rozwój w ośrodku porowatym”.**

Zasadnicze cele badawcze niniejszej pracy doktorskiej dotyczą następujących zagadnień odnoszących się do teorii i badań eksperymentalnych, w tym:

1. Opracowanie uproszczonego modelu teoretycznego zjawiska krzepnięcia zachodzącego w wilgotnym materiale porowatym;
2. Wykonanie obliczeń numerycznych na podstawie modelu teoretycznego i przedstawienie otrzymanych wyników w formie wykresów;
3. Opracowanie racjonalnej konstrukcji stanowiska badawczego i jego zbudowanie celem przeprowadzenia badań eksperymentalnych;
4. Wykonanie badań eksperymentalnych frontu krzepnięcia wykorzystujących metodę cylindra pomiarowego oraz metodę ekstrapolacyjną i optyczną;
5. Dokonanie walidacji opracowanego modelu teoretycznego na bazie wykonanych badań eksperymentalnych.

*Istotnym problemem naukowym* w kontekście szczegółowego zbadania zjawiska krzepnięcia było opracowanie racjonalnego modelu teoretycznego, określającego warunki procesu krzepnięcia zachodzące w wilgotnym ośrodku porowatym i tworzenia się warstwy zakrzepłej podczas wymiany ciepła wywołanej konwekcją swobodną. Przedstawiono porównawcze zależności grubości warstwy zakrzepłej w dwóch różnych usytuowaniach względem siły grawitacji: ustawienie – A oraz ustawienie – B, str. 56. Dokonano porównania zależności grubości warstwy zakrzepłej od czasu jej narastania w wilgotnym ośrodku porowatym w ustawieniu A oraz ustawieniu B, składającym się z mikro-kulek szklanych zmieszanych z wodą destylowaną. Jako podsumowanie wykonanych badań teoretycznych przedstawiono następujące wnioski:

- Zaproponowane modele teoretyczne do opisu zjawiska konwekcji swobodnej i krzepnięcia wody, zachodzące w wilgotnym ośrodku porowatym są zadowalające i dają istotne korzyści praktyczne,

- Do głównych zadań pracy należało wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła  $h$  na powierzchni frontu krzepnięcia, którego znajomość jest pomocna i konieczna w opracowanym teoretycznym modelu krzepnięcia. Współczynnik ten decyduje o wartości bezwymiarowej liczby Biota ( $Bi$ ), która jest jednym z podstawowych parametrów opisujących zjawisko krzepnięcia na powierzchni frontu krzepnięcia,
- Brak konwekcji swobodnej w wilgotnym ośrodku porowatym przyspiesza proces krzepnięcia ze względu na zmniejszony dopływ ciepła do warstwy zakrzepłej w ośrodku porowatym przy odwróconym kierunku siły grawitacji i strumieniu ciepła.

**Badania eksperymentalne** krzepnięcia wilgotnych materiałów porowatych przeprowadzono na stanowisku badawczym wykonanym według indywidualnego projektu, zrealizowanym w Centralnym Laboratorium Instytutu Inżynierii Środowiska przy Instytucie Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego. W realizacji eksperymentu zastosowano trzy oryginalne metody wyznaczania położenia frontu krzepnięcia w zależności od czasu w badanym wilgotnym elemencie porowatym, a mianowicie: zastosowano metodę cylindra miarowego (wykorzystano tu przyrost objętości lodu  $\rho_L = 917 \text{ kg/m}^3$  w stosunku do objętości wody  $\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$ ), wykorzystano metodę interpolacyjną rozkładu temperatury, oraz zastosowano metodę optyczną do obserwacji frontu krzepnięcia.

Głównym elementem stanowiska badawczego była walcowa jednostka centralna wykonana z polimetakrylanu metylu. Wykorzystano tu właściwość materiału, która dotyczy przejrzystości rzędu 98%, co w odpowiednich warunkach trwania eksperymentu umożliwiało wizualizację przebiegu zjawiska i dokonywanie pomiarów w czasie. Jednostkę centralną stanowiła rura o długości 25 cm i średnicy wewnętrznej 6,4 cm oraz grubości ścianek 0,3 cm.

Właściwości materiału walcowej jednostki centralnej wykorzystane w badaniach eksperymentalnych stanowiły:

- Minimalna temperatura użytkowa wynosząca  $-40^\circ\text{C}$  i maksymalna równa  $+70^\circ\text{C}$ ,
- Duża twardość według skali Rockwella,
- Stałość postaciowa do temperatury  $102^\circ\text{C}$ ,
- Odporność na większość produktów chemicznych.

**Porowate złożo** stanowiła mieszanina mikro-kulek szklanych o średnicy 1,5 mm oraz kruszywo z wodą o frakcji 2 – 8, 8 – 16 i 16 – 32 mm. W dolnej części porowate złożo przylegało do miedzianej płytki o grubości 1 cm, gdzie drażnienia obwodowe niewielkiej głębokości zwiększały efektywność odprowadzania ciepła, powstającego w wyniku zachodzącego procesu krzepnięcia. W badaniach zastosowano glikol etylenowy o temperaturze krzepnięcia wynoszącej ok.  $-35^\circ\text{C}$ , utrzymywany w systemie ciągłego obiegu wywołanego pompą. Przewody z przepływającym glikolem wykonane były z tworzywa sztucznego oraz izolowane pianką poliuretanową z określeniem kierunku przepływu glikolu. Zastosowano tu urządzenie sterujące z mikroprocesorowym regulatorem temperatury i zbiornikiem na glikol zapewniającym odpowiednią wentylację podczas pracy ultratermostatu. Urządzenie to zapewniało przepływ 15 l/min glikolu i precyzyjną stabilizację jego temperatury rejestrowanej za pomocą czterech czujników termo-rezystancyjnych Pt 100, oraz służyło do pomiaru objętości wody wypieranej z zamarzającego materiału porowatego. Termometr cyfrowy z sondą posiadał zakres pomiarowy od  $-50^\circ\text{C}$  do  $110^\circ\text{C}$  z rozdzielczością i dokładnością pomiaru w zakresie  $0,1^\circ\text{C}$ .

Zbudowane stanowisko badawcze zapewniało łatwość podłączenia do źródła zasilania oraz doprowadzenie i odprowadzenie glikolu. W ramach poszczególnych etapów badań przeprowadzono następujące czynności:

- Dokonano zestawienia niezbędnych przyrządów pomiarowych,
- Połączono elementy układu pomiarowego według opracowanego schematu i sprawdzono szczelności połączeń poszczególnych elementów,
- Przygotowano niezbędne próbki materiałów porowatych i określono ich porowatości oraz umieszczono je w jednostce centralnej napełniając wodą destylowaną,
- Napełniono cylinder miarowy wodą o określonej temperaturze początkowej oraz włączono przepływ glikolu etylowego o ściśle zadanej temperaturze,
- Ustalono parametry początkowe procesu badań: tj. temperatury poszczególnych składników umieszczonych w porowatym złożu, poziom wody w cylindrze miarowym, prędkość i natężenie przepływu płynów w przewodach, oraz dokonano obserwacji procesu krzepnięcia zachodzącego w porowatym złożu i ewidencji zmian w zakresie temperatury, objętości wody, wahań poziomów napełnienia piezometrów glikolem.

Dla uzyskania lepszego efektu wizualnego eksperymentu dokonano podświetlenia jednostki centralnej, co umożliwiło bieżącą ocenę efektu procesu krzepnięcia w ośrodku porowatym. W eksperymencie zastosowano dwie metody:

- metodę cylindra miarowego dla określenia frontu krzepnięcia określanego przez pomiar przyrostu objętości wody w cylindrze połączonym z jednostką centralną,
- metodę ekstrapolacyjną – przydatną do analizy oraz sporządzania wykresów zależności grubości warstwy zakrzepłej od czasu,
- metodę optyczną – wykorzystaną do bieżącej oceny grubości warstwy zakrzepłej.

Średnią grubość warstwy zakrzepłej  $\delta$  w ośrodku porowatym, składającym się z mikro-kulek i wody określono, na podstawie zachowania masy z uwzględnieniem obecności powietrza w przestrzeniach międzygranulkowych ciała stałego, według poniższego wzoru:

$$\delta = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_l} \frac{\Delta V}{(\varphi + \varphi_p)\pi R^2} \quad (3.3)$$

gdzie  $\Delta V$  określa objętość wody w cylindrze miarowym,  $R$  jest promieniem kulki,  $\varphi$  jest porowatością złoża,  $\varphi_p$  określa obecność powietrza w przestrzeniach międzygranulkowych,  $\rho_w$  – gęstość wody,  $\rho_l$  – gęstość lodu.

Do określenia średniej grubości warstwy zakrzepłej zastosowano rozwiązanie analityczne [wzór (3.3)] oraz prezentację graficzną rys. (3.7) str. 80. Otrzymano w ten sposób zadowalającą zgodność wyników powstałego efektu procesu krzepnięcia w wilgotnym ośrodku warstwy zakrzepłej, potwierdzonego zastosowaną metodą optyczną (fot. 3.17).

**W celu weryfikacji teoretycznych** rozwiązań problemów konwekcji swobodnej i krzepnięcia w walcowym ośrodku porowatym przeprowadzono badania eksperymentalne. Jednostka centralna i powierzchnia tworzonego frontu krzepnięcia znajdowały się w różnym usytuowaniu względem siły grawitacji. Rozpatrywano różne położenia usytuowania jednostki centralnej i frontu krzepnięcia względem kierunku siły grawitacji. Na podstawie danych stanowiących załączniki 4, 6, 7 do pracy, przedstawiono graficzne zależności grubości tworzącej się warstwy zakrzepłej  $\delta$  od czasu krzepnięcia  $\tau$ , dla podstawowych parametrów występujących w opisie zjawiska.

W drugim etapie przeprowadzono badania *procesu krzepnięcia* wilgotnego ośrodka porowatego składającego się z mieszaniny niejednorodnych kruszyw z wodą destylowaną, a mianowicie: żwir do betonu 2–8 mm; żwir płukany 8–16 mm oraz żwir płukany 16–31 mm.

Dla określenia średniej grubości warstwy zakrzepłej, zastosowano rozwiązanie analityczne z wykorzystaniem wzoru (3.3) oraz prezentację graficzną przedstawioną na rys. (3.13). Natomiast badania eksperymentalne przeprowadzono w celu weryfikacji teoretycznych rozwiązań problemów konwekcji swobodnej i krzepnięcia w ośrodku porowatym dla mieszaniny żwiru i wody. W tym przypadku przedstawiono graficzne zależności grubości tworzącej się warstwy zakrzepłej  $\delta$  od czasu krzepnięcia  $\tau$  dla poszczególnym ośrodków porowatych.

#### **Przedstawiono następujące wnioski z części eksperymentalnej:**

1. W ustawieniu – A (Rys. 2.16) krzepnięcie w ośrodku porowatym przebiega szybciej ze względu na mniejszy opór cieplny warstwy kontaktu i występujące lepsze odprowadzenie ciepła do zimnej płytki.
2. W ustawieniu – B (Rys. 2.16) krzepnięcie przebiega wolniej, ponieważ jest większy opór cieplny warstwy kontaktu związany z obsuwaniem się porowatego złoża i występuje mniejsze odprowadzenie ciepła do zimnej płytki.
3. Porowatość wilgotnego ośrodka ma wpływ na szybkość zachodzącego w nim procesu krzepnięcia, bowiem im wyższa porowatość ośrodka tym krzepnięcie przebiega wolniej (Rys. 3.19).

Podsumowaniem wykonanych badań było porównanie badań teoretycznych z wynikami badań eksperymentalnych celem ich weryfikacji.

#### Uwagi krytyczne

Szereg uwag odnośnie prezentowanej pracy doktorskiej dotyczy precyzji pojęć, prezentacji rysunków i strony redakcyjnej. Mniej klarowny dla Czytelnika jest układ równań zachowania pędu (2.1), masy (2.2) i energii (2.3), stanowiący bezwymiarowy układ równań Darcy-Bousinesqa dla konwekcji swobodnej w jednorodnym izotropowym ośrodku porowatym. Doprecyzowania wymagają także warunki brzegowe (2.5) dla w/w układu równań oraz warunki początkowe (brak), oraz bliższe wyjaśnienie sposobu rozwiązania postawionego problemu, stanowiące zagadnienie na wartości własne wyrażające niestabilność wyrażoną przez krytyczne liczby Rayleigha. Komentarza wymagają także przedstawione w punkcie 2.2.3 liczby Rayleigha, Nusselta, oraz współczynniki przejmowania ciepła.

Opisane zjawisko oporu cieplnego przez warstwę kontaktu zostało zapisane za pomocą wzoru stanowiącego bilans ciepła dla warstwy krzepnącej o grubości  $\delta$ . Stwierdzono, że strumień ciepła przewodzonego przez warstwę zakrzepłą jest równy strumieniowi ciepła przejmowanemu przez warstwę przylegającą do ścianki. Z powyższego równania wyznaczono błędnie temperaturę  $T_c$  ścianki (por. wzór (2.33)).

Niewielkie uwagi krytyczne dotyczą drobnych usterek redakcyjnych, na przykład, literówek polegających na pisaniu „e” lub „a” zamiast „ę” i „ą”. Nie znalazłem wszystkich cytowanych w tekście pozycji literatury znajdujących się w spisie literatury. Literaturę internetową w spisie literatury sugerowałbym zestawić oddzielnie, podając przy każdej dacie jej ukazania się. Strony internetowe często znikają po pewnym czasie, co może utrudniać czytelnikowi sprawdzenie cytowanej informacji.

#### Merytoryczna ocena rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy interesującego zjawiska przemierzania przegród i konstrukcji budowlanych w warunkach niskich temperatur. Składa się z części teoretycznej prezentującej problem konwekcji ciepła oraz problem krzepnięcia wilgotnego materiału w

ośrodkach porowatych, oraz z części eksperymentalnej przedstawiającej badania procesu krzepnięcia wilgoci w ośrodku porowatym. Pozytywnie oceniam przygotowywanie Doktoranta do prowadzenia badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych, w tym, jego umiejętność w formułowaniu założeń do prezentowanych badań. Aby osiągnąć zamierzony cel dotyczący tematu „**Wpływ warunków zewnętrznych na proces krzepnięcia wody w materiałach porowatych**” przeprowadzono serię badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych. W części teoretycznej analizowano dwa podstawowe zagadnienia, tj. transport wody z wymuszoną i swobodną konwekcją ciepła w ośrodkach porowatych oraz opracowano model teoretyczny krzepnięcia wilgotnego materiału porowatego. W opracowanym modelu teoretycznym procesu krzepnięcia dokonano:

- analizy konwekcji swobodnej w wilgotnym materiale porowatym w pobliżu powierzchni krzepnięcia, prezentując uproszczone modele tego zjawiska,
- opracowano proces krzepnięcia wilgotnego ośrodka porowatego w kontakcie z zimną ścianką o stałej temperaturze (model A),
- opracowano proces krzepnięcia wilgotnego ośrodka porowatego w kontakcie z zimną ścianką chłodzoną konwekcyjnie (model B),
- przedstawiono rolę warstwy kontaktu w procesie krzepnięcia wilgotnego ośrodka porowatego (model C).
- analizowano wpływ ustawienia warstwy porowatej na proces krzepnięcia.

**W części eksperymentalnej** wykonano badania procesu krzepnięcia w wilgotnych ośrodkach porowatych na zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku badawczym. Proces krzepnięcia zachodzący w ośrodku porowatym przebiegał w określonym czasie, a wizualizacja optyczna tworzącego się frontu krzepnięcia i określenie grubości tworzącej się warstwy zakrzepłej była możliwa przez wyznaczenie wielkości przyrostów objętości wody w cylindrze miarowym.

Podczas eksperymentu dokonywano pomiarów temperatury w porowatym złożu i określano wartości pozostałych parametrów i wielkości fizycznych takich jak: czas krzepnięcia, grubość warstwy zakrzepłej, natężenie przepływu płynu chłodzącego w zetknięciu z miedzianą płytką i temperaturą tej płytki.

Badania eksperymentalne krzepnięcia wilgotnych materiałów porowatych przeprowadzono na stanowisku badawczym wykonanym na podstawie indywidualnego projektu. Miejscem badań eksperymentalnych było Centralne Laboratorium Instytutu Inżynierii Środowiska działające przy Instytucie Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego.

W wyniku swoich badań Doktorant dostarczył interesującego materiału doświadczalnego, który może być pomocny przy projektowaniu elementów budowlanych w większej skali. Wykazał się dobrym opanowaniem narzędzia badawczego i wiedzy niezbędnej do wykonania postawionego zadania, zarówno w zakresie badań eksperymentalnych jak i w opracowaniu mechanizmów reakcji oraz przy formułowaniu wniosków końcowych. Wysoko oceniam jego zdolności inżynierskie związane z projektowaniem i wykonaniem stanowiska badawczego. Nie stwierdzam istotnych uchybień merytorycznych w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych i zastosowanej teorii. Sama praca sformułowana jest z zastosowaniem wielu interesujących rysunków, fotografii oraz danych eksperymentalnych w formie tabel, a także poprawne sformułowania pod względem logiki wywodu.

## Podsumowanie

Przedstawione powyżej niektóre uwagi krytyczne dotyczące strony redakcyjnej mają znaczenie marginalne w stosunku do poznawczych i praktycznych walorów pracy doktorskiej

wykonanej przez mgr inż. Jacka Partykę. Stwierdzam zatem, że mgr inż. Jacek Partyka wykonał pracę doktorską wnoszącą znaczący wkład do badań teoretyczno-doświadczalnych i wiedzy dotyczącej tematu „**Wpływ warunków zewnętrznych na proces krzepnięcia wody w materiałach porowatych**”. Przedstawione metody badawcze i wyniki badań mogą być pomocne w projektowaniu porowatych elementów budowlanych i porowatych materiałów w zastosowaniu do akumulacji ciepła.

Istotnym problemem naukowym w kontekście szczegółowego zbadania zjawiska krzepnięcia było opracowanie uproszczonego modelu teoretycznego, określającego warunki procesu krzepnięcia zachodzące w wilgotnym ośrodku porowatym i tworzenia się warstwy zakrzepłej podczas wymiany ciepła wywołanej konwekcją swobodną. Ponadto, zrealizowano eksperyment na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym, przeprowadzając badania procesu krzepnięcia z wykorzystaniem wilgotnych materiałów porowatych. Selektowność przemian i wydajność prowadzonych procesów pozwala stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku. Dlatego też wnoszę do Rady Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Stefan Jan Kowalski*