

dr inż. Roman Jaskulski

ZAŁĄCZNIK 3A

**AUTOREFERAT PRZEDSTAWIAJĄCY
OPIS DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH KANDYDATA
PO OTRZYMANIU STOPNIA DOKTORA**

Płock, 29 kwietnia 2019 r.

SPIS TREŚCI

	str.
1. Imię i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
3.1. Miejsce zatrudnienia obecnie	3
3.2. Historia zatrudnienia	3
3.3. Pełnione funkcje	4
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	4
4.2. Dane bibliograficzne publikacji stanowiącej osiągnięcie naukowe.....	5
4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników.....	5
4.3.1. <i>Wstęp</i>	5
4.3.2. <i>Zagadnienia naukowe podjęte w pracy</i>	7
4.3.3. <i>Omówienie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników</i>	15
4.3.4. <i>Podsumowanie</i>	28
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	30
5.1. Okres przed uzyskaniem stopnia doktora.....	30
5.2. Okres po uzyskaniu stopnia doktora.....	31
6. Podsumowanie działalności naukowo-badawczej.....	34

1. Imię i nazwisko

Roman Jaskulski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

2005 stopień doktora nauk technicznych,

Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii,

Tytuł rozprawy: „Wpływ wybranych założeń obliczeniowych na zapas bezpieczeństwa zginanych i ściskanych żelbetonowych elementów prętowych, wyznaczany metodą Monte Carlo”,

Promotor: dr hab. inż. Jan Pawlikowski, prof. PW;

Recenzenci: dr hab. inż. Jacek Kubissa, prof. PW; dr hab. inż. Szczepan Woliński, prof. PRz.

2000 tytuł zawodowy magistra inżyniera budownictwa w zakresie konstrukcji budowlanych i inżynierskich,

Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii,

Tytuł pracy magisterskiej: „Metoda trzech równań w projektowaniu betonów wysokowartościowych”

Promotor: dr inż. Włodzimierz Koper.

Dyplom z oceną celującą, studia ukończone z 1. lokatą spośród wszystkich absolwentów Wydziału w tym roczniku.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

3.1. Miejsce zatrudnienia obecnie

Politechnika Warszawska,

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii,

Instytut Budownictwa,

Zakład Mechaniki Konstrukcji i Materiałów Budowlanych,

09-400 Płock, ul. Łukasiewicza 17

3.2. Historia zatrudnienia

2017 – obecnie: asystent w Zakładzie Mechaniki Konstrukcji i Materiałów Budowlanych Instytutu Budownictwa Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku;

2015 – 2016: starszy specjalista w Pracowni Pól Odkształceń Zakładu Wytrzymałości Materiałów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie (zatrudnienie w ramach projektu finansowanego z NCBiR);

2007 – 2017: adiunkt w Zakładzie Mechaniki Konstrukcji i Materiałów Budowlanych Instytutu Budownictwa Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku;

2004 – 2007: asystent w Zakładzie Konstrukcji Budowlanych (obecnie Zakład Konstrukcji i Technologii Budowlanych) Instytutu Budownictwa Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku (1/2 etatu);

2001 – 2004: doktorant w Zakładzie Konstrukcji Budowlanych (obecnie Zakład Konstrukcji i Technologii Budowlanych) Instytutu Budownictwa Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku (prowadzenie zajęć dydaktycznych na zasadzie wolontariatu podczas studiów doktoranckich na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej);

1999 – 2000: asystent-stażysta w Zakładzie Konstrukcji Budowlanych (obecnie Zakład Konstrukcji i Technologii Budowlanych) Instytutu Budownictwa Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku (w czasie VIII i IX semestru jednolitych studiów magisterskich)

3.3. Pełnione funkcje

2012 – 2016: członek Komisji ds. Jakości Kształcenia Rady Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii;

2012 – 2016: Rzecznik Dyscyplinarny ds. Studentów i Doktorantów;

2012 – 2016: członek Kolegium Elektorów do wyboru Rektora i Prorektorów;

2012 – 2013: Wydziałowy Pełnomocnik ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii;

2012 – 2013: członek Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej;

2012 – 2013: członek Uczelnianej Rady ds. Jakości Kształcenia;

2008 – 2012: członek Rady Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii;

2008 – 2012: sekretarz Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

„Właściwości cieplne betonowych osłon biologicznych w instalacjach jądrowych” – monografia naukowa

4.2. Dane bibliograficzne publikacji stanowiącej osiągnięcie naukowe

Autor: Roman Jaskulski

Tytuł: Właściwości cieplne betonowych osłon biologicznych w instalacjach jądrowych

Rok wydania: 2019

ISBN: 978-83-7814-903-3

Nazwa wydawnictwa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej

Recenzenci wydawniczy:

prof. dr hab. inż. dr h.c. Andrzej M. Brandt

dr hab. inż. Karol Prałat

4.3. Omówienie celów naukowych i osiągniętych wyników

4.3.1. Wstęp

Beton jest materiałem konstrukcyjnym, którego korzenie sięgają czasów starożytnych. Stosowany był już w starożytnym Rzymie jako opus caementitum nazywane też betonem rzymskim. Po upadku Cesarstwa Rzymskiego technologia produkcji betonu została praktycznie zapomniana na długie wieki i dopiero w wieku XIX w., po wynalezieniu cementu portlandzkiego, beton zaczął swój wielki tryumfalny powrót jako materiał konstrukcyjny.

Od tego czasu datować można również naukowe podejście do technologii wytwarzania tego materiału. Jako pierwsze podjęto zagadnienia zmierzające do uzyskania materiału o coraz większej wytrzymałości, a także o określonych parametrach funkcjonalnych (mrozoodporność, nasiąkliwość, szczelność). Następnie w polu zainteresowań naukowych znalazła się jego trwałość, a ostatnio rosnącego znaczenia nabierają zagadnienia poświęcone zmniejszaniu jego szkodliwego wpływu na środowisko, w tym redukcji emisji CO₂ przy produkcji cementu i zużycia nieodnawialnych zasobów naturalnych.

W porównaniu z wymienionymi zagadnieniami właściwościom cieplnym betonu w praktyce projektowej i inżynierskiej poświęcano, i nadal poświęca się, niewielką uwagę. Wartości właściwości termicznych betonu w większości przypadków przyjmuje się jako stałe lub zmieniające się niewielkim zakresie i jako takie zapisane są w odnośnych normach. Tymczasem beton, co wynika także z moich badań, może charakteryzować się szerokim zakresem zarówno ciepła właściwego, jak też współczynnika przewodności cieplnej, czy też współczynnika rozszerzalności cieplnej. W szczególności dotyczy to betonu osłonowego, który wykonywany jest z zastosowaniem kruszyw ciężkich i wodoronośnych o właściwościach cieplnych dość znacznie różniących się od kruszyw stosowanych w produkcji betonu zwykłego.

Znajomość rzeczywistych, a nie normatywnych, wartości właściwości cieplnych betonu nabiera szczególnego znaczenia w przypadku konstrukcji masywnych, w których ciepło hydratacji cementu jest wydzielane w ilościach istotnie wpływających na parametry materiału oraz jego strukturę. Kiedy w grę dodatkowo wchodzi szczególne warunki pracy betonu, jak to ma miejsce w przypadku konstrukcji

osłonowych instalacji jądrowych oraz szczególne wymagania dotyczące szczelności takich konstrukcji, wspomniane właściwości cieplne stają się kluczowe.

Mimo ważkości tematu w polskiej i światowej literaturze stosunkowo niewiele jest publikacji poświęconych właściwościom cieplnym betonu osłonowego. Wynika to, jak sądzę, z co najmniej dwóch powodów. Pierwszy to sytuowanie się tego zagadnienia w wąskiej niszy naukowej. Sam beton osłonowy (w znakomitej większości jest to beton ciężki) stanowi jakiś ułamek promila betonu konstrukcyjnego i choćby z racji tego nie stanowi atrakcyjnego przedmiotu badań, bowiem wyniki jego badań nie mają dużych szans na uzyskanie szerokiego oddźwięku w świecie nauki. Drugim jest fakt, że zagadnienie badania właściwości cieplnych betonu w ogólności sytuuje się na pograniczu dyscyplin naukowych i dziedzin nauki. I chociaż w nauce na takich pograniczach nie ma zwykle ostrych podziałów, to jednak pewne dziedziny przenikają się wzajemnie płynnie i gładko, a w przypadku niektórych linie demarkacyjne są dość wyraźnie wyznaczone. Na pogranicza tego drugiego rodzaju badacze wybierają się zwykle mniej chętnie i to ma miejsce właśnie w przypadku badań, którym poświęciłem moją monografię.

Wracając do zasadniczego toku niniejszego opracowania należy stwierdzić, że o ile pewne zagadnienia z zakresu właściwości cieplnych betonu osłonowego można znaleźć w literaturze, w tym także w monografiach naukowych, to zwykle są one przedstawiane niejako przy okazji i rzadko stanowią główny wątek publikacji, w których się znajdują. Problem ten dotyczy zresztą nie tylko zagadnień związanych z właściwościami cieplnymi samego betonu osłonowego, ale także kruszyw ciężkich i wodoronośnych stanowiących podstawową bazę surowcową przy produkcji takiego betonu. Utrudnia to znakomicie weryfikację poprawności otrzymanych wyników badań czy choćby przewidywanie zakresów, w jakich badane właściwości powinny się znajdować. W licznych opracowaniach geologicznych trudno jest znaleźć informacje na temat wartości współczynnika przewodności cieplnej, ciepła właściwego, dyfuzyjności cieplnej czy współczynnika rozszerzalności cieplnej skał takich jak baryt, magnetyt czy serpentynit, które są bazą do pozyskiwania kruszyw osłonowych. Ten niedostatek informacji znalazł swoje odzwierciedlenie zarówno w samej treści monografii, której zawartość zostanie omówiona w dalszej części, jak też w założeniach, na których zostały oparte badania, których jest ona wynikiem.

Praca zawiera oryginalne wyniki badań właściwości cieplnych betonu z kruszywami specjalnymi stosowanymi w konstrukcjach osłon biologicznych przed promieniowaniem jądrowym. Badania obejmowały wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej, objętościowej pojemności cieplnej i dyfuzyjności cieplnej, a także obliczenie ciepła właściwego betonu. Przeprowadzono je metodą niestacjonarną analogiczną do metody „hot plate” z wykorzystaniem urządzenia ISOMET 2114. Wyznaczone zostały również wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej. Uzyskane wyniki pomiarów i badań właściwości cieplnych posłużyły do przeprowadzenia obliczeń modelowych, których cel i zakres opisano w dalszej części.

W pracy zamieszczono również opis, analizę wrażliwości oraz wyniki uzyskane za pomocą metody numerycznego rozwiązania zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła. Za pomocą tej metody określono parametry

cieplne młodego betonu osłonowego, czyli materiału w ciągu 72 godzin od chwili jego przygotowania. Poza właściwościami cieplnymi, określono również funkcję źródła ciepła, która choć nie zalicza się do zbiorów parametrów cieplnych betonu, jednak gra podstawową rolę w procesach cieplno-wilgotnościowych zachodzących w młodym betonie. Uzyskane wyniki to wartości ciepła właściwego oraz współczynnika przewodności cieplnej uzyskane w czterech punktach czasowych. Wartości funkcji emisji ciepła określone zostały natomiast w odstępach 4-godzinnych.

Ambicją moją było, aby przygotowywana monografia naukowa poza znaczącym wkładem w naukę miała także walor edukacyjny, co jest wynikiem mojej prawie 20-letniej pracy jako wykładowcy akademickiego. Temu celowi służą pierwsze rozdziały pracy, które poza zwykłym w tym miejscu przeglądem literatury, stanowią także kompendium wiedzy na temat właściwości cieplnych w ogólności, właściwości cieplnych betonu zwykłego i jego składników, modeli wykorzystywanych do opisu właściwości cieplnych oraz metod ich badania. Rozdziały te stanowią też tło dalszych części monografii zawierających oryginalne wyniki badań uzupełniających luki w wiedzy lub poszerzających ją. W ostatnim rozdziale pracy przedstawiono krótkie podsumowanie uzyskanych wyników wraz z wnioskami, które mogą stanowić wskazówki dla projektantów konstrukcji betonowych osłon biologicznych przed promieniowaniem jonizującym.

4.3.2. Zagadnienia naukowe podjęte w pracy

W monografii podjąłem następujące zagadnienia naukowe, które zostaną bliżej omówione w dalszej części rozdziału:

1. Wyznaczenie właściwości cieplnych (współczynnik przewodności cieplnej, objętościowa pojemność cieplna, dyfuzyjność cieplna) betonu osłonowego metodą niestacjonarną.
2. Wyznaczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu osłonowego w zakresie temperatury 20 – 65°C, który jest typowym zakresem temperatury pracy osłony biologicznej podczas normalnej pracy reaktora.
3. Obliczenia modelowe mające na celu zbadanie możliwości określenia wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego w sytuacji braku informacji nt. parametrów cieplnych kruszywa, w wyniku rozwiązania odpowiednio sformułowanego zagadnienia odwrotnego.
4. Wyznaczanie zmiennych w czasie wartości parametrów cieplnych młodego betonu osłonowego (oraz jednocześnie także funkcji emisji ciepła) poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła.
5. Analiza wrażliwości zastosowanej metody rozwiązania zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła.
6. Określenie możliwości ograniczenia gradientu temperatury w twardniejącym betonie osłonowym z wykorzystaniem domieszki znacznie redukującej ilość wody zarobowej (modyfikującej przebieg procesu hydratacji cementu i towarzyszącego mu procesu emisji ciepła).

Ad. 1. Wyznaczenie wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego zostało przeprowadzone metodą analogiczną do metody „hot-plate” przy niestacjonarnych przepływie ciepła. Wykorzystano do tego celu aparat ISOMET 2114, który, sądząc po dość bogatej literaturze zawierającej wyniki nim dokonywane, znalazło swoje miejsce wśród uznanych urządzeń warsztatu badacza. Pomimo, że metody niestacjonarne spotykają się z krytyką części badaczy (przykładem może tu być zacytowana w mojej monografii publikacja prof. Pogorzelskiego), to wydaje się, że na dłuższą metę mogą stać się one złotym standardem badań ze względu na stosunkowo krótki czas i możliwość badania materiałów w określonym stanie nasycenia, który w czasie badania nie ulega znaczącej zmianie (inaczej niż w przypadku metod stacjonarnych). Stanie się tak jednak tylko pod warunkiem, że rozpoznane zostaną ograniczenia tychże metod, szczególnie w przypadku materiałów tak niejednorodnych makroskopowo (w tym porowatych i o różnym stanie nasycenia) jak beton. I że wraz z rozpoznaniem tych ograniczeń zostaną zaproponowane sposoby kalibracji wyników lub wymagań, jakie należy spełnić, aby wyniki mogły być uznane za wiarygodne. Pewien niewielki przyczynek do tego również został przeze mnie dodany podczas przeprowadzanych badań, o czym wzmiankowałem w jednej z moich publikacji.

Właściwości cieplne betonu osłonowego zostały przeze mnie wyznaczone w dwóch skrajnych stanach nasycenia: przy pełnym nasyceniu betonu możliwym do uzyskania pod ciśnieniem atmosferycznym i po wysuszeniu próbek do stałej masy w temperaturze 65°C. Temperaturę taką wybrałem z dwóch powodów: chcąc uniknąć potencjalnych uszkodzeń i zmian w strukturze betonu, które mogą zajść w materiale po podgrzaniu go do wyższej temperatury rzędu 105°C i więcej oraz ze względu na to, że jest to typowa temperatura w jakiej pracuje w beton osłony biologicznej w normalnych warunkach, jak to już zostało wspomniane powyżej.

W celu przeprowadzenia badań opracowałem najpierw procedurę, która obejmowała m.in. sposób przygotowywania próbek z materiału wyjściowego, kolejność badań (najpierw próbki nasycone), warunki przechowywania próbek nasyconych przed badaniem, procedurę suszenia (i warunki pozwalające przyjąć, że osiągnięto stałą masę), wreszcie procedurę samego badania pozwalającą przyjąć, że trwający ok. trzech kwadransów pomiar dokonywany jest na materiale o tych samych parametrach wilgotnościowych, także inne mniej istotne okoliczności.

Opracowana procedura badawcza jest jednym z moich pomniejszych osiągnięć naukowych związanych z omawianym zagadnieniem. Kolejnym jest określenie wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego, gdyż zarówno w polskiej jak i światowej literaturze można dostrzec w tej materii dużą lukę. Nie twierdzę, że nikt dotąd nie wyznaczał wartości tych parametrów, ale to, co można znaleźć w literaturze, ma charakter fragmentaryczny. Można odnieść wrażenie, że badania właściwości cieplnych zostały dokonane niejako przy okazji „poważniejszych” badań, a same wyniki często nie są uzupełnione o opis procedury badawczej lub choćby metody i warunków w jakich zostały wyznaczone. Z tego punktu widzenia uważam, że przeprowadzony przeze mnie szeroki program badawczy obejmujący wyznaczenie wartości trzech parametrów cieplnych betonu osłonowego (oraz obliczenie czwartego, czyli ciepła właściwego) jest znaczącym i twórczym wkładem w naukę. Na poparcie tego stwierdzenia chciałbym

przytoczyć fakt, że badania objęły beton zróżnicowany zarówno pod względem składu stosu okruszowego, jak też rodzaju cementu, co pozwoliło na wykonanie dodatkowych analiz będących przedmiotem jednego z kolejnych zagadnień naukowych. Ponadto uzyskane wyniki mogą stanowić bazę porównawczą do dalszych badań i analiz. Ze względu na to, że w przypadku każdego rodzaju betonu wykonano dużą liczbę pomiarów (w granicach 20 – 30 po odrzuceniu wyników odstających) możliwe było ich gruntowne opracowanie statystyczne i uzyskanie wiarygodnych wartości średnich oraz niepewności. Ponadto jestem zdania, że wyniki moich badań dają podstawy do wyróżnienia betonu osłonowego jako osobnego materiału z punktu widzenia właściwości cieplnych.

Dodatkowym osiągnięciem naukowym jest określenie ogólnej zależności między ciepłem właściwym betonu osłonowego, a jego gęstością w stanie suchym i przy pełnym nasyceniu. Zależności te opisane są następującymi wzorami empirycznymi:

$$c_{p,s} = -215\rho + 1304$$

$$c_{p,d} = -214\rho + 1234$$

gdzie: $c_{p,s}$ i $c_{p,d}$ to ciepło właściwe betonu osłonowego odpowiednio w stanie w pełni nasyconym i suchym, ρ – gęstość betonu osłonowego wyrażona w $[\text{Mg}/\text{m}^3]$.

Ad. 2. Kolejnym podjętym przeze mnie zagadnieniem naukowym było wyznaczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu osłonowego. Badania służące do rozwiązania tego zagadnienia przeprowadzone zostały metodą tradycyjną, z wykorzystaniem dylatometrów i elektronicznych mierników przemieszczeń. Jednak ze względu na narzucone sobie założenia, m.in. badanie materiału w trzech różnych stanach nasycenia, zagadnienie to wymagało autorskich rozwiązań zarówno w zakresie oprzyrządowania, jak i procedur badawczych.

Poza pomiarem współczynnika rozszerzalności cieplnej na próbkach wykonanych z betonu osłonowego przeprowadzono dodatkowe pomiary na próbkach o mniejszych gabarytach przygotowanych z betonu określonego w monografii mianem „drobnoziarnistego”. Określenie to ma związek z ograniczeniem wielkości ziaren zastosowanych kruszyw do 8 mm. W badaniach tych poza kruszywami osłonowymi wykorzystano również dwa kruszywa stosowane w technologii betonu zwykłego: kruszywo kwarcytowe i wapienne, a uzupełnieniem programu badań były zaprawy wykonane z piaskiem kopalnym oraz piaskiem o uziarnieniu normowym. Celem tych było oszacowanie współczynnika rozszerzalności samych kruszyw, dlatego pod względem stosu okruszowego próbki te były jednorodne (zawierały zawsze tylko jeden rodzaj kruszywa). Dwa kruszywa wykorzystywane w technologii betonu zwykłego zostały tak wybrane, aby stanowić klamrę zamykającą przedział zmienności współczynnika rozszerzalności cieplnej od dołu i od góry. Jak się jednak później miało okazać, górnym ograniczeniem stało się kruszywo barytowe. Wynik pomiaru, który na to wskazywał został uznany za poprawny dopiero po kolejnej dogłębnej kwerendzie źródeł literatury z zakresu geologii, co wpisuje się we wspomniany wcześniej niedostatek wyników badań kruszyw osłonowych.

Wzmiankowane wcześniej trzy różne stany nasycenia badanych próbek, to beton całkowicie nasycony wodą, beton wysuszony do stałej masy i beton w warunkach powietrzno-suchych uzyskanych przez przechowywanie próbek przez 6 tygodni w laboratorium w warunkach powietrzno-suchych i temperaturze ok. $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Każdy stan nasycenia wymagał odmiennych procedur badawczych, które zostały w tym celu opracowane. Beton w pełni nasycony wodą badany był pod wodą, która jednocześnie służyła za medium transportujące ciepło do i z próbki. Do badań tych zostało skonstruowane specjalne stanowisko. Jego konstrukcja miała na celu zapewnienie możliwie równomiernego rozkładu temperatury wody, w której zanurzona była próbka oraz stabilizację jej temperatury w założonych granicach dopuszczalnych odchyień. W przypadku betonu wysuszonego do stałej masy kluczowe było zapewnienie z jednej strony jak najniższych strat ciepła przy przenoszeniu próbki z cieplarki do dylatometru, z drugiej zaś ograniczenie ilości wilgoci pochłanianej z powietrza podczas trwającego zwykle ponad 16 godzin pomiaru. Tak długi czas pomiaru wynikał z gabarytów próbki i związanego z tym czasu osiągnięcia równowagi cieplnej z otoczeniem po ostygnięciu.

Najmniej kłopotliwe, choć też nie trywialne, było badanie próbek w stanie powietrzno-suchym. Tutaj wyzwaniem było utrzymanie podobnego stanu nasycenia w kolejnych pomiarach próbek, które musiały być najpierw nagrzane do temperatury około 65°C . W tym celu kontrolowano ich masę po każdym badaniu i tak dobierano czas między kolejnymi pomiarami, aby różnice masy minimalizować. Dodatkowo, aby zmniejszyć wpływ ewentualnych wahań temperatury w laboratorium na zmianę długości ramy dylatometru, (co miało bezpośredni wpływ na dokładność wyników) zastosowana została osłona w postaci zbiorników z wodą opływającą słupki ramy. Duża bezwładność cieplna wody ograniczała wpływ wahań temperatury otoczenia na konstrukcję dylatometru zbliżając jej bezwładność cieplną do bezwładności cieplnej badanych próbek.

Do osiągnięć naukowych w tym zaliczam przede wszystkim określenie wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu osłonowego o zróżnicowanym składzie w trzech różnych stanach nasycenia wodą. Tak przekrojowych wyników nie ma w literaturze. Ich uzyskanie i publikacja wypełnia kolejną lukę w wiedzy na temat właściwości cieplnych betonu osłonowego. Wyniki te mogą stanowić bazę do dalszych analiz, a także punkt odniesienia dla innych badaczy. Pomniejszym twórczym osiągnięciem naukowym jest także opracowanie procedur badawczych i rozwiązań sprzętowych. Część z nich nie została ujawniona w publikacjach i w monografii, gdyż są obecnie przedmiotem analizy, czy mogą stanowić podstawę wniosku o przyznanie patentu.

Ad. 3. Wyniki uzyskane w toku rozwiązania dwóch wcześniej opisanych zagadnień naukowych posłużyły jako dane wykorzystane do realizacji kolejnego zagadnienia, którego celem było zbadanie możliwości oszacowania wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego w sytuacji niedoboru danych. Zagadnienie to podzielone było na dwa etapy.

Pierwszym etapem było rozwiązanie trzech zagadnień odwrotnych, w wyniku czego na podstawie parametrów cieplnych betonu (jego ciepła właściwego, współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz współczynnika przewodności cieplnej) określano wartości

tych samych parametrów w odniesieniu do kruszyw. W dwóch przypadkach (tj. ciepła właściwego i współczynnika rozszerzalności cieplnej) do rozwiązania zagadnienia odwrotnego wykorzystano model w formie reguły mieszanin ze względu na addytywny charakter określanych wielkości. Natomiast w przypadku współczynnika przewodności cieplnej wykorzystano kilka modeli, aby ocenić, który z nich pozwala uzyskać najbardziej wiarygodne wyniki. W pierwszym etapie wykorzystano parametry cieplne uzyskane w badaniach betonu osłonowego wykonanego z jednym rodzajem kruszywa oraz betonu drobnoziarnistego.

Drugim etapem była weryfikacja uzyskanych wyników rozwiązań. Wykorzystano do tego celu parametry cieplne określone w toku badań betonu osłonowego wykonanego z wykorzystaniem dwóch różnych rodzajów kruszywa osłonowego w zmiennych proporcjach. Wyniki badań skonfrontowano z wynikami obliczeń. W obliczeniach skorzystano z wartości parametrów cieplnych kruszyw uzyskanych w trakcie pierwszego etapu. Wyniki obliczeń oraz pomiarów porównano. W przypadku ciepła właściwego i współczynnika rozszerzalności cieplnej pozwoliło to wykazać przydatność reguły mieszanin w takiej procedurze. Natomiast w przypadku współczynnika rozszerzalności cieplnej wskazano modele, których wykorzystanie prowadzi do wyników najbardziej zbliżonych do uzyskanych wyników badań.

W omawianym zagadnieniu naukowym chciałbym wskazać co najmniej dwa osiągnięcia naukowe. Pierwszym jest wykazanie, że możliwe jest oszacowanie z dużą dokładnością ciepła właściwego oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu w sytuacji braku kompletu danych z wykorzystaniem reguły mieszanin poprzez rozwiązanie odpowiednio sformułowanego zagadnienia odwrotnego. Drugim osiągnięciem jest wskazanie istnienia takiej możliwości także w przypadku współczynnika przewodności cieplnej wraz ze wskazaniem, które modele pozwalają uzyskać wyniki najbardziej zbliżone do wyników uzyskanych w toku badań w zależności od stanu nasycenia betonu (w obu analizowanych stanach nasycenia wskazane zostały różne modele).

Ad. 4. Wyznaczanie zmiennych w czasie parametrów cieplnych młodego betonu jest kolejnym zagadnieniem naukowym podjętym w monografii. Motywacją do zajęcia się tym zagadnieniem była z jednej strony jego złożoność stanowiąca wyzwanie badawcze, jak również duże znaczenie szczególnie w przypadku betonu osłonowego. Beton tego rodzaju musi tworzyć szczelną osłonę instalacji jądrowej (najczęściej reaktora), dlatego kluczowy w jego przypadku jest okres twardnienia, kiedy powstający gradient temperatury w betonie, który nie osiągnął jeszcze odpowiednio wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, może spowodować wczesne spękania i tym samym zwiększenie przepuszczalności materiału. Wiedza na temat tego, jak kształtują się parametry cieplne betonu na tym etapie pozwala z większą dokładnością symulować pola temperatury i przewidywać oraz przeciwdziałać powstawaniu rys i spękań termicznych. Ze względu na przyjętą metodę rozwiązania wraz z określonymi parametrami cieplnymi identyfikowana jest również „sprzężona” z nimi funkcja opisująca ilość emitowanego ciepła w czasie. Taki łączny zestaw danych może być podstawą do przeprowadzenia symulacji zmian temperatury w masywnym bloku betonowym.

Zmiany właściwości cieplnych młodego betonu można badać bezpośrednio przez ich pomiar, przy czym w grę wchodzi tu jedynie metody niestacjonarne zarówno ze względu na postać materiału (początkowo płynna przechodząca w stałą), jak i wymagany krótki czas pomiaru. Przeprowadzenie pomiaru jest jednak dość kłopotliwe. Zatem aby uzyskać te poszukiwane wartości parametrów cieplnych sięgnięto po metodę pośrednią stosowaną już zresztą wcześniej w tym celu. W metodzie tej nośnikiem informacji o właściwościach cieplnych betonu i zmianie ilości ciepła wydzielanego w czasie jest historia zmian jego temperatury. Informacja ta jest jednak w pewnym sensie skompresowana i aby ją odczytać należy rozwiązać zagadnienie odwrotne przepływu ciepła. Aby zagadnienie takie nie było źle postawione (z ang. *ill posed*), co jest warunkiem znalezienia jego rozwiązania, musi zostać spełnionych kilka warunków. Między innymi należy właściwie i precyzyjnie zdefiniować warunki brzegowe i początkowe oraz możliwie uprościć samo zadanie przez ograniczenie liczby niewiadomych. Takim uproszczeniem jest m.in. założenie jednowymiarowości zagadnienia przez wymuszenie przepływu ciepła w jednym kierunku. Przepływ taki, w przeprowadzonych badaniach, uzyskano przez umieszczenie próbki betonu w izolowanej termicznie cylindrycznej formie. Izolacja boków i spodu formy ograniczała ucieczkę ciepła przez te powierzchnie prowadząc do sytuacji, w której niemal cały jego strumień odpływał z układu przez górną powierzchnię.

Temperaturę betonu monitorowano za pomocą umieszczonych w nim czterech czujników usytuowanych na osi cylindrycznej próbki. Pomiar dokonywany był przez co najmniej 72 godziny, ale nie dłużej niż 120 godzin. Następnie na podstawie zarejestrowanej historii zmian temperatury betonu oraz temperatury otoczenia, a także znając parametry opisujące izolacyjność formy, rozwiązywane było zagadnienie odwrotne, w którym niewiadomymi były zmienne w czasie wartości ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej mieszanki betonowej. Wraz z nimi określano także funkcję opisującą moc ciepła wydzielanego w czasie hydratacji cementu. Parametry cieplne określone były w czterech chwilach czasowych co 24 godziny, a funkcja źródła ciepła co 4 godziny. Samo poszukiwanie rozwiązania zagadnienia odwrotnego polegało na iteracyjnym wyznaczaniu wartości szukanych niewiadomych i rozwiązywaniu na ich podstawie zagadnienia jednowymiarowego przepływu ciepła. Uzyskane z obliczeń wartości temperatury były porównywane z wartościami uzyskanymi z pomiarów i na tej podstawie dokonywana była ocena dokładności rozwiązania poprzez obliczenie wartości błędu. Jeśli była ona wyższa od założonej, przeprowadzana była kolejna iteracja, w której wartości szukanych niewiadomych były korygowane. Do korygowania wartości niewiadomych i tym samym do poszukiwania rozwiązania zastosowany został algorytm wyszukiwania bezpośredniego. Ponieważ skrypt obliczeniowy został przygotowany w programie MATLAB, dlatego wykorzystano w nim polecenie *patternsearch*, które jest implementacją wymienionego algorytmu w środowisku programu MATLAB.

W ramach rozwiązywania tego zagadnienia naukowego wykonano kilkadziesiąt mieszanek betonowych o różnym składzie, a następnie przeprowadzono po 30 obliczeń w przypadku każdej mieszanki. Ze względu na ogromny zakres i czasochłonność obliczeń wykorzystano do tego procesory klastra obliczeniowego Grafen zarządzanego

przez IPPT PAN. Poszukiwanie jednego rozwiązania w przypadku jednej mieszanki trwało od 24 do 72 godzin, przy czym zwykle czas ten był bliższy większej z podanych liczb. Żeby uświadomić ogrom pracy wykonanej przez procesory klastra obliczeniowego wystarczy podać, że przy 24 mieszankach i 30 rozwiązaniach przypadających na jedną mieszankę oraz przy założeniu, że czas obliczeń wynosił 72 godziny w przypadku jednego rozwiązania czas potrzebny na wykonanie wszystkich obliczeń na jednym dobrej jakości komputerze wyniósłby niemal 6 lat ciągłej pracy. W rzeczywistości ze względu na nieuniknione błędy, korekty i modyfikacje skryptu oraz ich testowanie wykonano ponad trzykrotnie więcej obliczeń, niż wynikałoby to z liczby mieszanek uwzględnionych w monografii.

Rezultatem tak sformułowanego zagadnienia naukowego były osiągnięcia naukowe polegające na wyznaczeniu wartości ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej betonu w okresie do 72 godzin od chwili przygotowania mieszanki w przypadku 24 mieszanek betonowych o zróżnicowanym składzie. Jako osiągnięcie naukowe potraktować należy także to, że wyznaczono we wspomnianych 24 przypadkach także funkcje opisujące emisję ciepła w twardniejącym betonie oraz obliczono na ich podstawie ciepło hydratacji cementu analizując, jak skład betonu wpływa na uzyskiwane tą metodą wyniki.

Znaczenie praktyczne uzyskanych wyników zostało już częściowo zweryfikowane, choć nie znalazło jeszcze odzwierciedlenia w publikacji. Wykonane zostały symulacje rozkładu temperatury w masywnym bloku betonowym, których wyniki porównano z pomiarami w rzeczywistym elemencie przygotowanym w warunkach półprzemysłowych. Uzyskano dość dobrą zgodność, wystarczającą do celów inżynierskich oszacowań ryzyka powstania wczesnych spękań termicznych.

Realizacja opisywanego zagadnienia otworzyła także pole do dalszych badań i pozwoliła sformułować kolejne zagadnienia naukowe, które obecnie są na różnych etapach realizacji

Ad. 5. Kolejnym zagadnieniem naukowym podjętym w monografii była analiza wrażliwości zastosowanej metody rozwiązania zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła. Analiza ta miała na celu określenie wpływu zmian wybranych założeń na uzyskiwane wyniki. Założenia, których zmiany analizowano, dotyczyły narzuconych ograniczeń wartości wyznaczanych niewiadomych oraz liczby wyznaczanych parametrów. W tym pierwszym przypadku przyjmowano różne ograniczenia górnych i dolnych wartości ciepła właściwego, współczynnika przewodności cieplnej oraz funkcji opisującej emisję ciepła. W drugim przypadku zmieniano liczbę punktów czasowych, w których wyznaczane były wartości poszukiwanych niewiadomych. W przypadku parametrów cieplnych było to odpowiednio: 2, 4 i 7 punktów, co odpowiada okresom: 72, 24 i 12 godzin. Natomiast wartości funkcji opisującej emisję ciepła wyznaczano w 13, 19 lub 25 punktach czyli co 6, 4 lub 3 godziny.

Aby można było porównać wpływ różnych założeń na wyniki wszystkie obliczenia w ramach analizy wrażliwości przeprowadzono z wykorzystaniem jednego wybranego zestawu danych uzyskanych z pomiarów temperatury twardniejącej mieszanki betonowej. Kryteria oceny różnic były dwojakie. Przede wszystkim analizowano

otrzymane wartości porównując wizualnie ich wykresy w funkcji czasu. Bezpośrednie porównywanie wartości nie zawsze było możliwe, gdyż w poszczególnych wariantach obliczeniowych uzyskiwano wartości w różnych chwilach czasowych, które tylko częściowo się pokrywały. Ponadto przy analizowaniu wpływu ograniczeń wartości ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej zakresy tych ograniczeń były rozłączne. Drugim kryterium oceny były wartości ciepła twardnienia betonu obliczane na podstawie wykresu funkcji emisji ciepła. Wartości te uzyskiwane w poszczególnych wariantach obliczeń były ze sobą porównywane bezpośrednio.

Osiągnięciem naukowym będącym rezultatem rozwiązania tak postawionego zagadnienia naukowego jest określenie wpływu założeń przyjmowanych w zastosowanej procedurze rozwiązania zagadnienia odwrotnego na uzyskiwane wyniki. Wiedza na ten temat pozwala na bardziej świadome kształtowanie tych założeń, co służyć będzie uzyskiwaniu wyników bliższych rzeczywistym. Przeprowadzona analiza pozwoliła również wskazać potencjalne słabe punkty zastosowanej metody, co może być asumptem do podjęcia prób jej ulepszenia lub do modyfikacji procedur pozyskiwania danych wejściowych do obliczeń. W celu ograniczenia „szumów” w wynikach rozważyć można np. zwiększenie izolacyjności formy, zwiększenie masy badanego próbki betonu, zwiększenie liczby punktów pomiaru temperatury, prowadzenie pomiaru w stałej temperaturze otoczenia, czy też modyfikacja kształtu formy do pomiaru temperatury.

Ad. 6. Ostatnie zagadnienie naukowe, jakie zostało przedstawione w mojej monografii jest konsekwencją realizacji jednego z poprzednich zagadnień. Podczas wykonywania części mieszanek do identyfikacji parametrów cieplnych młodego betonu osłonowego w celu zapewnienia ich zbliżonej konsystencji wykorzystywana była domieszka znacznie redukująca ilość wody zarobowej, gdyż jednym z założeń było utrzymanie stałej wartości współczynnika w/c. Podczas analizy przebiegów zmian temperatury mieszanek betonowych, w których wykorzystano domieszkę dał się zauważyć jej wpływ na przebieg hydratacji cementu. Uzyskane wykresy temperatury charakteryzowały się m.in. spłaszczonym przebiegiem oraz przesunięciem w czasie punktu osiągnięcia maksymalnej wartości. Wykonane jednocześnie obliczenia gradientu temperatury w badanych mieszankach wskazały na zmniejszenie jego wartości w tych przypadkach, kiedy zastosowano domieszkę. Jednak ze względu na jednoczesne zróżnicowanie składu mieszanek betonowych trudno było rozstrzygnąć, czy był to efekt zastosowania domieszki. Aby to jednoznacznie rozstrzygnąć wykonane zostały dodatkowo cztery mieszanki o tym samym składzie z wykorzystaniem kruszywa serpentynitowego, które różniły się od siebie jedynie ilością zastosowanej domieszki znacznie redukującej ilość wody. Mieszanki te poddano tej samej procedurze badawczej, jaka została przyjęta przy rozwiązywaniu zagadnienia identyfikacji parametrów cieplnych młodego betonu osłonowego. Uzyskane wartości temperatury zostały przeanalizowane pod kątem wartości powstającego jej gradientu.

Jednocześnie w kalorymetrze izotermicznym wykonano badania samego zaczynu cementowego, do którego również dodano odpowiednie porcje domieszki. Wyniki tych badań posłużyły jako dane wejściowe do obliczeń symulacyjnych wykonanych w programie Comsol. Zdefiniowano w nim blok betonowy o wymiarach

1000 x 1000 x 1000 mm izolowany 100 mm warstwą styropianu na czterech płaszczyznach bocznych i na spodzie. Tak przygotowany model posłużył od przeprowadzenia łącznie szesnastu symulacji. Poza czterema funkcjami opisującymi emisję ciepła hydratyzującego cementu, które zostały uzyskane w badaniu w kalorymetrze, przyjęto cztery zestawy parametrów cieplnych odpowiadających czterem rodzajom betonu różniącym się od siebie rodzajem zastosowanego kruszywa. Łącznie dało to wspomniane wcześniej szesnaście kombinacji. W zdefiniowanym bloku analizowano zmianę wartości temperatury w kilku wybranych punktach, a następnie wykorzystując uzyskane wyniki obliczano maksymalną wartość powstałego gradientu. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła stwierdzić, że zastosowana domieszka znacznie redukująca ilość wody zarobowej może mieć wyraźny wpływ na maksymalną wartość gradientu temperatury powstającego w masywnym bloku wykonanym z betonu osłonowego i że wpływ ten zależy od parametrów cieplnych betonu, a te głównie od zastosowanego kruszywa.

Konkluzja ta jest kolejnym moim osiągnięciem naukowym, które uważam za istotny wkład w wiedzę na temat zjawisk cieplnych w betonie. Na pierwszy rzut oka może się ona wydawać trywialna; jednak znajomość mechanizmów zjawisk cieplno-wilgotnościowych i ich złożoności w przypadku twardniejącego betonu (zachodzące jednocześnie przemiany fazowe, zmiany parametrów cieplnych w czasie, transport masy i ciepła, etc.) powinna prowadzić do wniosku, że uzyskany efekt nie jest wcale taki oczywisty i prawdopodobnie nie zawsze uda się go uzyskać. Otwiera to pole do dalszych badań w tym zakresie.

4.3.3. Omówienie uzyskanych wyników

Poniżej zostaną pokrótce omówione wybrane wyniki uzyskane w toku realizacji poszczególnych zagadnień naukowych. Przyjęta poniżej numeracja fragmentów tekstu odpowiada kolejności zagadnień naukowych sformułowanych na początku poprzedniego rozdziału.

1. Przykładowe wyniki pomiarów wartości współczynnika przewodności cieplnej betonu osłonowego przedstawiono w tabelicy 1. Litery po myślniku w oznaczeniu serii betonu oznaczają kruszywa: M – magentytowe, S – serpentynitowe, B – barytowe oraz A – grys amfibolitowy (kruszywo referencyjne). Dokładniejszy opis składów mieszanek znajduje się w monografii.

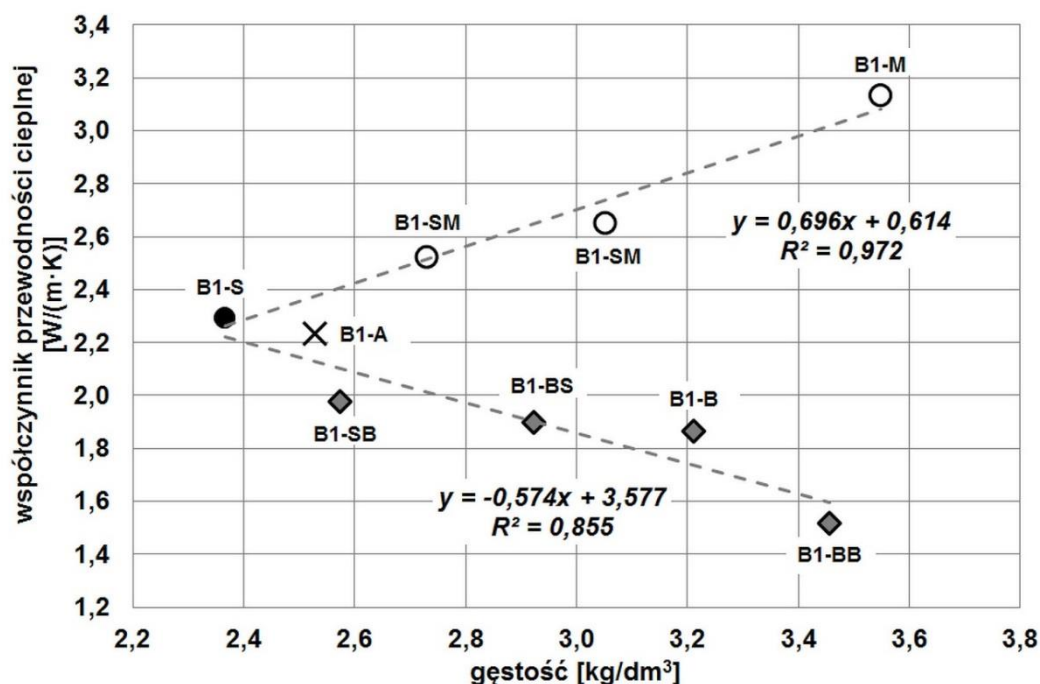
Wyniki wskazują na wyraźnie większą wartość współczynnika przewodności cieplnej betonu, w którym zastosowano kruszywo magnetytowe w stosunku do kruszywa referencyjnego. Kruszywo serpentynitowe charakteryzuje się współczynnikiem przewodności na zbliżonym poziomie, a zastosowanie kruszywa barytowego zdecydowanie obniża wartości tego współczynnika.

Porównanie wyników uzyskanych w przypadku betonu nasyconego oraz suszonego (pod tym określeniem kryje się beton, którego próbki wysuszono do stałej masy w temperaturze 65°C) wskazuje na znaczny wpływ stanu nasycenia betonu na wyniki przewodności. Ze względu na dużą porowatość materiału wypełnienie porów betonu wodą powoduje wzrost jego współczynnika przewodności cieplnej ze względu

na znaczną różnicę przewodności cieplnej wody (a dokładniej cieczy porowej) i powietrza.

Tablica 1. Wartości współczynnika przewodności cieplnej (beton z cementem CEM I 42,5N LH/SR3/NA)

Oznaczenie betonu	Przewodność cieplna [W/(m·K)]	
	beton nasycony	beton suszony
B1-M	3,13 ± 0,05	2,51 ± 0,02
B1-S	2,29 ± 0,03	1,78 ± 0,01
B1-MS	2,65 ± 0,07	2,08 ± 0,04
B1-SM	2,52 ± 0,02	1,99 ± 0,01
B1-BB	1,52 ± 0,02	1,21 ± 0,01
B1-B	1,87 ± 0,03	1,42 ± 0,01
B1-BS	1,90 ± 0,01	1,49 ± 0,01
B1-SB	1,97 ± 0,03	1,53 ± 0,02
B1-A	2,23 ± 0,03	1,82 ± 0,01



Rys. 1. Zależność między wartością przewodności cieplnej serii betonu a jego gęstością – próbki nasycone betonu z cementem CEM I 42,5N LH/SR3/NA

Pomimo, że woda jest gorszym przewodnikiem ciepła niż beton, nie znaleziono korelacji między zbadaną porowatością betonu a wartością jego współczynnika przewodności cieplnej. Ze względu na zróżnicowany skład surowcowy badanego

materiału korelacja taka mogła zostać zamaskowana przez znacznie większe różnice współczynnika przewodności cieplnej wynikające z zastosowania różnych kruszyw. Możliwe, że korelacja taka byłaby możliwa do znalezienia w przypadku materiału wykonanego z tych samych materiałów, ale różniącego się zawartością porów.

Znaleziono natomiast bardzo wyraźną korelację między gęstością betonu, a współczynnikiem przewodności cieplnej i to zarówno w przypadku betonu nasyconego, jak i suszonego. Na rysunku 1 przedstawiono zależności tych dwóch parametrów w przypadku betonu nasyconego. Warto zwrócić uwagę, że zależność ta ma dwie gałęzie o przeciwnej monotoniczności. Na jednej sytuują się mieszanki betonowe z udziałem kruszywa magnetytowego (wzrost przewodności wraz z wzrostem gęstości), a na drugiej z udziałem kruszywa barytowego (spadek przewodności wraz ze wzrostem gęstości).

W tabelicy 2 przedstawiono obliczone wartości ciepła właściwego mieszanek oraz gęstości betonu wyznaczonej bezpośrednio na badanych próbkach. Wartość ciepła właściwego obliczano na podstawie zmierzonej wartości objętościowej pojemności cieplnej oraz wyznaczonej w powyższy sposób gęstości betonu.

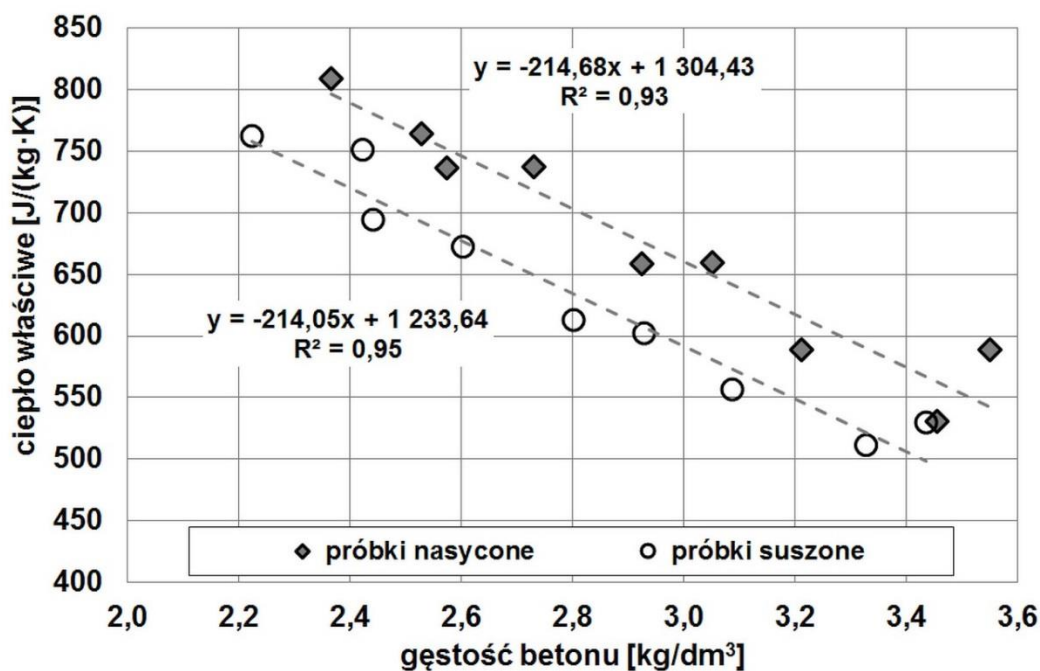
Tablica 2. Wartości gęstości i ciepła właściwego (beton z cementem CEM I 42,5N LH/SR3/NA)

Oznaczenie betonu	Gęstość [kg/m ³]		Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	
	beton nasycony	beton suszony	beton nasycony	beton suszony
B1-M	3549 ± 26	3436 ± 23	589 ± 17	530 ± 8
B1-S	2366 ± 3	2223 ± 4	809 ± 21	762 ± 7
B1-MS	3050 ± 25	2928 ± 27	659 ± 22	602 ± 7
B1-SM	2731 ± 10	2603 ± 10	737 ± 25	672 ± 10
B1-BB	3455 ± 9	3329 ± 9	531 ± 8	511 ± 5
B1-B	3212 ± 8	3086 ± 8	589 ± 12	557 ± 7
B1-BS	2924 ± 25	2801 ± 26	659 ± 15	613 ± 6
B1-SB	2574 ± 17	2442 ± 16	736 ± 17	694 ± 14
B1-A	2529 ± 2	2459 ± 2	765 ± 17	750 ± 5

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy zależności ciepła właściwego betonu od jego gęstości. Podobnie jak w przypadku współczynnika przewodności cieplnej znaleziono i tutaj wyraźne korelacje zarówno w przypadku materiału nasyconego jak i suszonego.

Analiza wyników zamieszczonych w tabelicy 2. wskazuje, że beton wykonany z zastosowaniem obu kruszyw ciężkich wykazuje najniższe wartości ciepła właściwego, które rosną wraz ze wzrostem udziału kruszywa serpentynitowego. Wzrost udziału tego kruszywa powoduje jednocześnie spadek gęstości betonu. Zależność ciepła właściwego betonu osłonowego od jego gęstości jest na tyle uniwersalna, że na rysunku 2 nie ma potrzeby wyróżniania poszczególnych serii betonu w zależności od składu stosu okruszowego. Bardzo wysokie wartości współczynnika determinacji R^2 uzyskane

przy znacznej liczbie wyników wskazują na uogólniający charakter uzyskanych zależności. Pozwala to uznać, że mogą one posłużyć do oszacowania ciepła właściwego betonu osłonowego na potrzeby obliczeń inżynierskich.



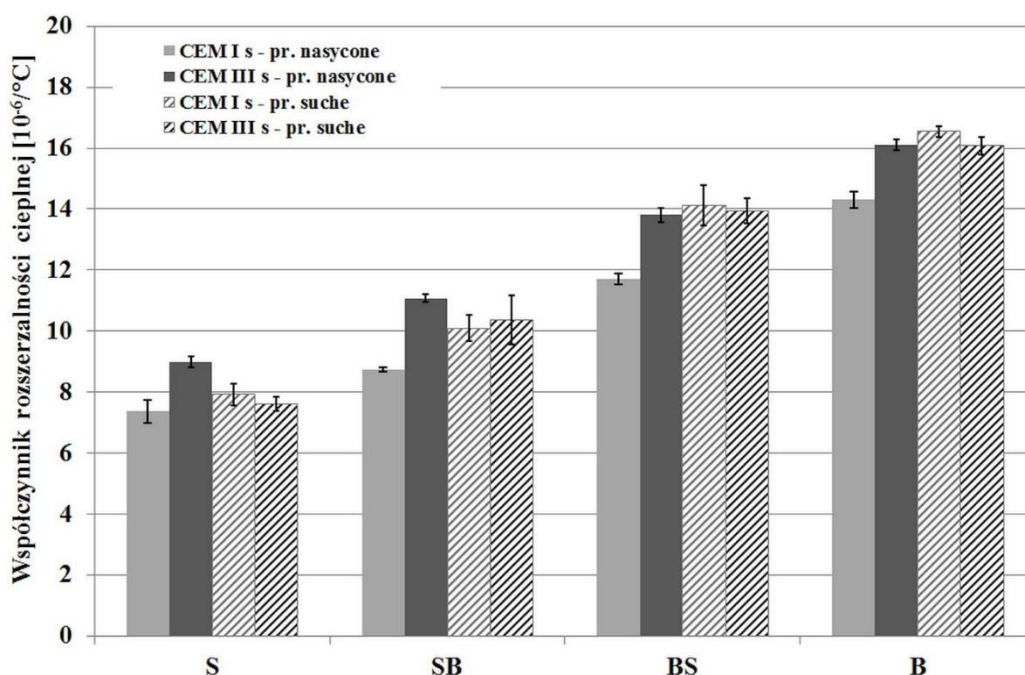
Rys. 2. Zależności ciepła właściwego betonu osłonowego od jego gęstości

Ad. 2. W tabelicy 3 przedstawiono przykładowe wyniki badania współczynnika przewodności cieplnej betonu osłonowego. Wyniki te uzyskano na próbkach w pełni nasyconych wodą, wysuszonych do stałej masy i w stanie powietrzno-suchym. Natomiast na rysunku 3 porównano wyniki uzyskane w przypadku betonu wykonanego z dwóch różnych rodzajów cementu przy zastosowaniu kruszywa barytowego, serpentynitowego i mieszanki tych kruszyw.

Tablica 3. Wartości współczynnika rozszerzalności betonu z cementem CEM I 42,5N LH/SR3/NA

Seria betonu	Stan nasycenia betonu		
	suchy [10 ⁻⁶ /°C]	powietrzno-suchy [10 ⁻⁶ /°C]	mokry [10 ⁻⁶ /°C]
B1-A	7,94 ± 0,02	9,67 ± 0,10	8,77 ± 0,10
B1-M	8,17 ± 0,36	10,55 ± 0,57	8,73 ± 0,16
B1-MS	8,18 ± 0,42	10,07 ± 0,54	7,95 ± 0,20
B1-SM	7,76 ± 0,67	10,20 ± 0,55	7,70 ± 0,13
B1-S	7,92 ± 0,18	10,11 ± 0,55	7,37 ± 0,37
B1-SB	10,09 ± 0,93	11,48 ± 0,06	8,75 ± 0,07
B1-BS	14,13 ± 0,53	15,29 ± 0,83	11,72 ± 0,18
B1-B	16,55 ± 0,79	17,24 ± 0,93	14,31 ± 0,28
B1-BB	17,91 ± 0,14	17,75 ± 0,96	15,76 ± 0,10

Jak można zauważyć analizując wyniki w tabelicy 3, najniższe wartości współczynnika rozszerzalności uzyskane zostały w przypadku betonu z kruszywem magnetytowym, serpentynitowym lub mieszanką tych kruszyw. Najwyższe wartości natomiast charakteryzują próbki z betonu, w którym występuje kruszywo barytowe. Różnica między najmniejszymi i największymi wartościami współczynnika rozszerzalności jest nawet dwukrotna. Przy czym najmniejszą rozszerzalność wykazuje beton w stanie mokrym, a największą w stanie powietrzno-suchym. Możliwym wytłumaczeniem tej prawidłowości jest transport masy między żelem C-S-H, a porami kapilarnymi betonu. W przypadku betonu nasyconego wodą transport ten praktycznie nie występuje, gdyż wszystkie pory betonu, oraz otoczenie próbki podczas badania, wypełnia woda. W przypadku betonu suszonego transport ten jest mocno ograniczony ze względu na niewielkie ilości wody pozostającej w strukturze betonu. W największym stopniu transport ten może zachodzić w betonie w stanie powietrzno-suchym, gdyż część porów niewypełniona wodą może stanowić rezerwuuar wilgoci uwalnianej z żelu C-S-H pod wpływem rosnącej temperatury, do którego wilgoć ta wraca po obniżeniu się temperatury.



Rys. 3 Wyniki badania współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu z cementami CEM I s i CEM III s w dwóch stanach nasycenia wodą.

Uzyskane wyniki wskazują, że pod względem rozszerzalności cieplnej beton barytowy powinien zostać sklasyfikowany jako oddzielny rodzaj betonu, gdyż wykazuje się niemal dwukrotnie większym współczynnikiem rozszerzalności niż pozostałe rodzaje betonu. W jego przypadku daje się zauważyć również bardzo wyraźnie różnica rozszerzalności cieplnej betonu wykonanego z zastosowaniem różnych rodzajów cementu. Analiza wyników uzyskanych przy dwóch skrajnych stanach nasycenia wodą wskazuje, że zróżnicowanie takie ma miejsce w przypadku betonu w stanie nasyconym. We wszystkich przypadkach beton wykonany z wykorzystaniem cementu

portlandzkiego wykazuje niższą rozszerzalność cieplną w stosunku do betonu wykonanego z wykorzystaniem cementu hutniczego. Efekt ten wymaga dalszych badań, a w przypadku jego potwierdzenia, podjęcia próby wyjaśnienia tego zróżnicowania.

Ad. 3. Wyniki predykcji wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego przedstawiono w tablicach 4 i 5 oraz na rysunku 4. Przedstawione w tablicy 4 wyniki obliczeń ciepła właściwego betonu zestawiono z wynikami uzyskanymi z badań.

Tablica 4. Obliczone i zmierzone wartości ciepła właściwego wybranych serii

Ciepło właściwe	Mieszanka			
	B1-BS	B1-MS	B1-SB	B1-SM
beton nasycony wodą				
Obliczone [J/(kg·K)]	630	640	714	717
Zmierzone [J/(kg·K)]	659	659	736	737
Różnica [%]	4,4	2,9	3,0	2,9
beton suszony				
Obliczone [J/(kg·K)]	611	587	678	661
Zmierzone [J/(kg·K)]	613	602	694	672
Różnica [%]	0,4	2,5	2,4	1,7

Obliczenia przeprowadzono wykorzystując wartości ciepła właściwego kruszyw uzyskane z rozwiązania zagadnienia odwrotnego, w którym modelem obliczeniowym była reguła mieszanin. Jak widać różnica między obliczonymi i zbadanymi wartościami nie przekracza 5% co wskazuje na dużą dokładność zastosowanej metody obliczeń i możliwość jej wykorzystania w innych podobnych obliczeniach.

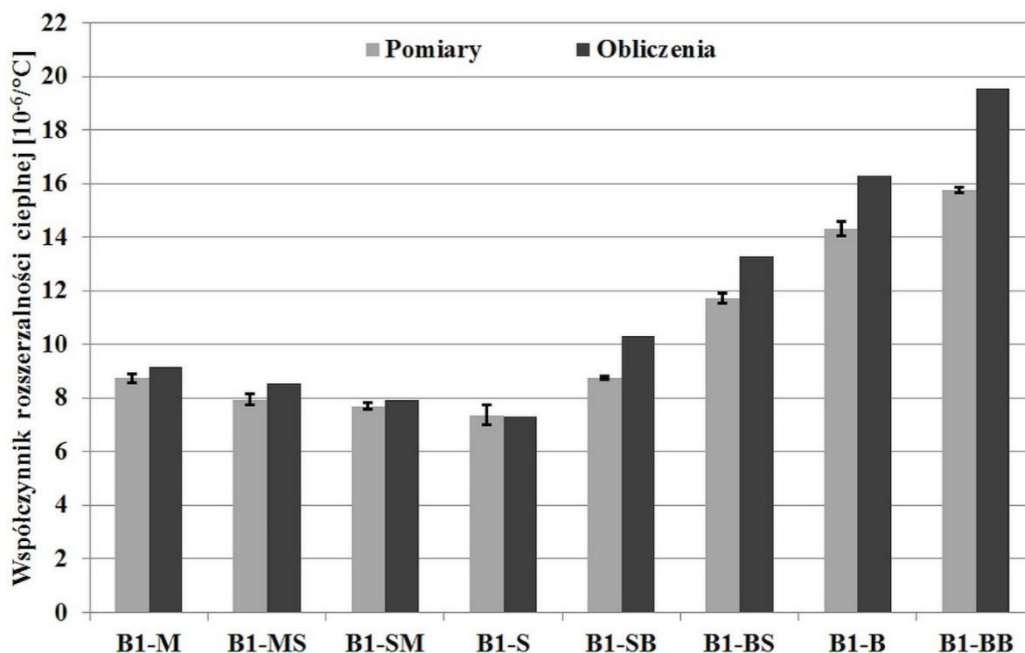
Tablica 5. Wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej kruszyw uzyskane jako rozwiązanie zagadnienia odwrotnego

Kruszywo	Współczynnik rozszerzalności cieplnej [10 ⁻⁶ /°C]		
	z obliczeń	dolne ograniczenie*	górne ograniczenie*
amfibolitowe	8,82	6,5	8,5
barytowe	22,23	14,7	25,0
kwarcytowe	13,17	11,0	12,5
magnetytowe	9,75	8,6	9,7
serpentytowe	6,54	6,3	9,2
wapienne	9,04	-0,4	10,1
piasek	10,82	10,0	12,5

*) na podstawie danych z literatury

W tablicy 5 przedstawiono obliczone w toku rozwiązania zagadnienia odwrotnego wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej kruszyw. Wyniki uzyskano z wykorzystaniem modelu w postaci reguły mieszanin. Dodatkowo w tablicy tej

umieszczono w celu porównania graniczne wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej kruszyw, jakie udało się znaleźć w literaturze. Jak widać, obliczone wartości w przypadku kruszyw osłonowych wartości obliczone mieszczą się w granicach ustalonych w toku badań.



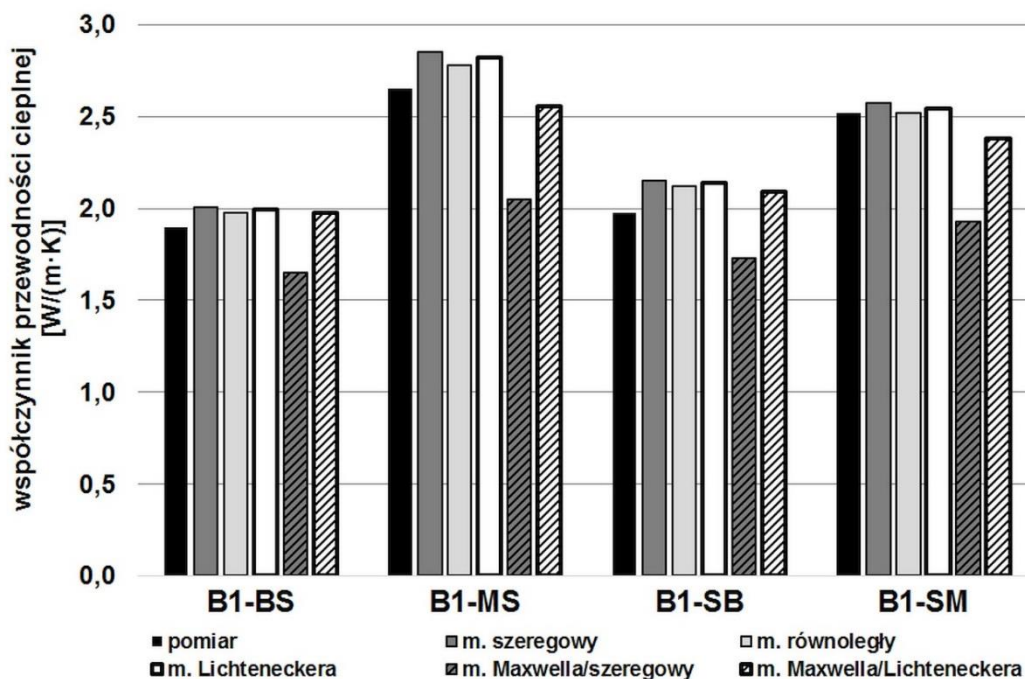
Rys. 4. Porównanie wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej otrzymanych z pomiarów i z obliczeń

Na rysunku 4 zestawiono wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej uzyskane w toku badań i w wyniku obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem wartości przedstawionych w tabeli 5. Jak widać, wyniki uzyskane obiema metodami wykazują bardzo dużą zgodność w przypadku mieszanek z kruszywem magnetytowym i serpentynitowym. W przypadku mieszanek, w których zastosowano kruszywo barytowe, zgodność ta jest dużo mniejsza. Wraz ze wzrostem ilości barytu w mieszance rośnie różnica między wynikami badań i pomiarów. Wskazuje to na możliwe przeszacowanie wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej tego rodzaju kruszywa w wyniku obliczeń. Widoczne różnice nie dyskwalifikują jednak zastosowanej procedury obliczeniowej, ale wskazują co najwyżej na konieczność jej kalibracji i ewentualnych dodatkowych badań przed jej ewentualnym szerszym stosowaniem.

Przykładowe wyniki predykcji wartości współczynnika przewodności cieplnej betonu osłonowego przedstawiono na rysunku 5. Są wyniki uzyskane w przypadku próbek w pełni nasyconych.

Analiza wyników przedstawionych na rysunku 5 wskazuje, że metoda predykcji wartości współczynnika przewodności cieplnej betonu osłonowego z zastosowaniem rozwiązania zagadnienia odwrotnego pozwala uzyskać wyniki zbliżone do wyników pomiarów z zadowalającą dokładnością pod warunkiem wykorzystania odpowiedniego modelu. W przypadku próbek nasyconych wodą najmniejsze różnice między obliczeniami i badaniami uzyskano stosując na obu etapach obliczeń model równoległy.

Takie podejście do zagadnienia wyznaczania współczynnika przewodności cieplnej ma charakter nowatorski. Mnogość modeli służących do określania właściwości cieplnych materiałów wielofazowych świadczy o złożoności tego zagadnienia. W tej sytuacji pomyślne rozwiązanie zadania odwrotnego należy uznać za znaczący sukces i znaczące osiągnięcie naukowe.

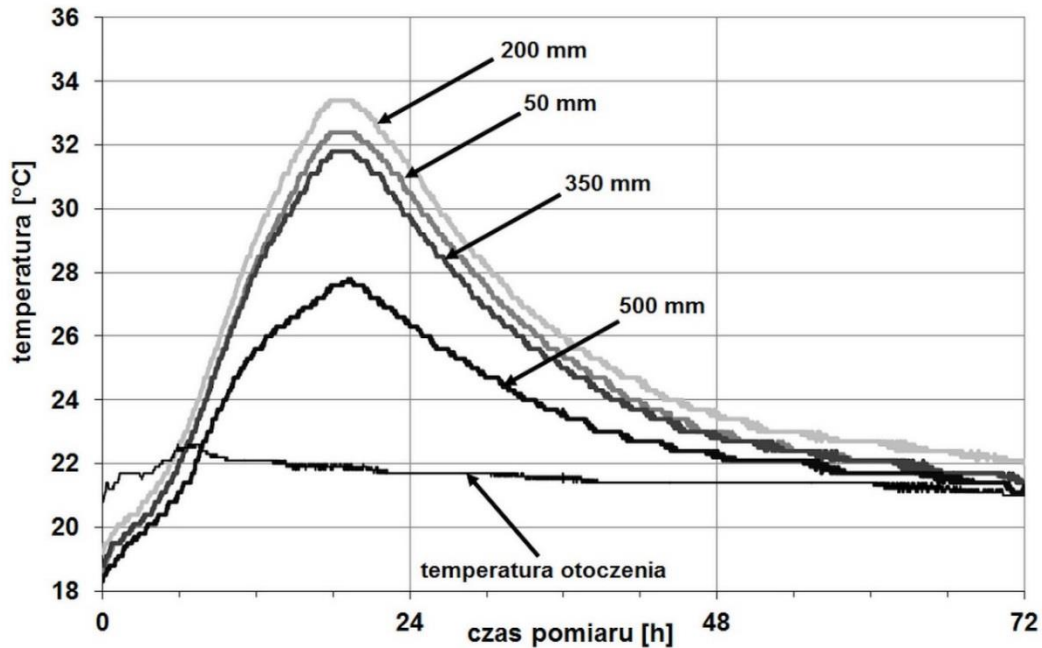


Rys. 5. Wartości współczynnika przewodności cieplnej badane i obliczone – cement CEM I 42,5N NA/SR3/LH, próbki nasycone

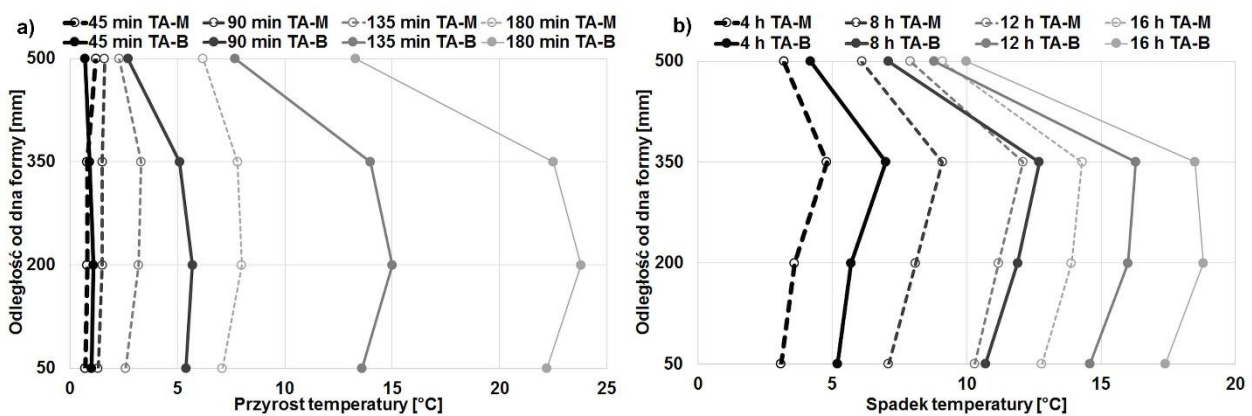
Ad. 4. Zagadnienie naukowe polegające na identyfikacji wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego wraz z określeniem przebiegu funkcji ciepła emitowanego podczas hydratacji betonu wymagało w pierwszym etapie realizacji dokonania pomiarów temperatury w betonie. Przykładowy przebieg zmian temperatury zarejestrowany na tym etapie przedstawiono na rysunku 6. Bardzo wyraźnie widać na nim pewną prawidłowość, która powtórzyła się w niemal wszystkich przypadkach, choć niekiedy była bardzo słabo zaznaczona. Otóż maksymalna wartość temperatury została zarejestrowana na wysokości 200 mm nad dnem formy, a nie, jak mogłoby się wydawać, tuż przy jego dnie, czyli na wysokości 50 mm. Efekt taki spowodowany jest między innymi stratami ciepła, do jakich dochodzi przez dolną izolowaną część formy badawczej. Izolacja ogranicza znacznie ucieczkę ciepła, ale jego straty są wciąż na tyle istotne, że znajdują odzwierciedlenie w wykresach przebiegu temperatury

Mimo, że przebiegi temperatury nie były podstawą żadnego zagadnienia naukowego, zostały jednak krótko omówione w tekście monografii. Opis ten objął mieszanki z wykorzystaniem cementu glinowego, które charakteryzowały się szybkim przyrostem temperatury. Wykresy profili rozkładu temperatury w dwóch przykładowych mieszankach z tym cementem przedstawiono na rysunku 7. Widać na nim wpływ

zróznicowania rodzaju wykorzystanego kruszywa na osiągnięte maksymalne wartości temperatury i tempo jej narastania oraz spadku.



Rys. 6. Wyniki pomiaru temperatury w formie



Rys. 7. Profile rozkładu temperatury mieszanek TA-M i TA-B2: a) od początku pomiaru, b) od chwili osiągnięcia temperatury maksymalnej

Przykładowe wartości uzyskane w toku rozwiązywania zagadnienia odwrotnego przedstawiono w tabelicy 6. Tak jak to zostało już podkreślone w monografii, wyników tych nie należy traktować jako tablicowe wartości parametrów cieplnych betonu osłonowego, ale jako parametry efektywne, które łącznie z wyznaczonym przebiegiem zmienności funkcji emisji ciepła należy traktować łącznie jako zestaw danych gwarantujący najlepsze odwzorowania zjawisk cieplnych w twardniejącym młodym betonie. Pojęcie wartości efektywnych związane jest z uwzględnieniem niedokładności określenia wartości energii aktywacji reakcji hydratacji poszczególnych składników cementu. Tak wyznaczone wartości parametrów cieplnych wraz z powiązaną z nimi funkcją emisji ciepła mogą posłużyć do modelowania pól temperatury w twardniejącym

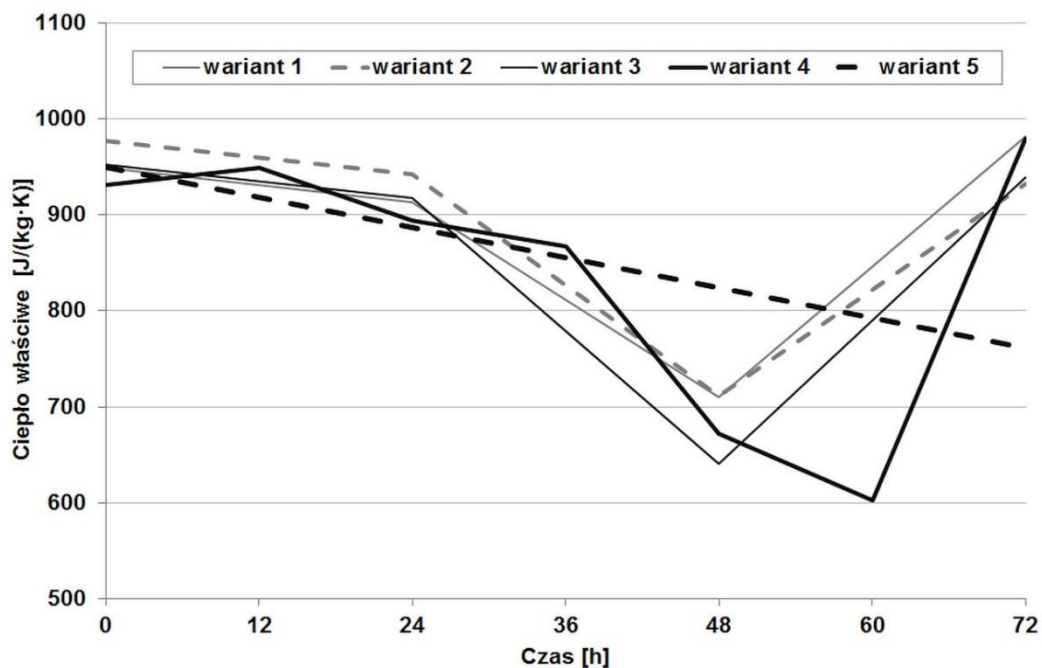
masywnym betonie, w tym osłonowym. Modelowanie pól temperatury w początkowym etapie wiązania i twardnienia betonu w takich konstrukcjach jest kluczem do identyfikacji zagrożeń wczesnymi spękaniami, które prowadzić mogą do znacznego obniżenia szczelności materiału, czyli cechy, która w przypadku konstrukcji osłonowych ma kluczowe znaczenie.

Tablica 6. Rozwiązania zagadnienia odwrotnego – mieszanki T1S

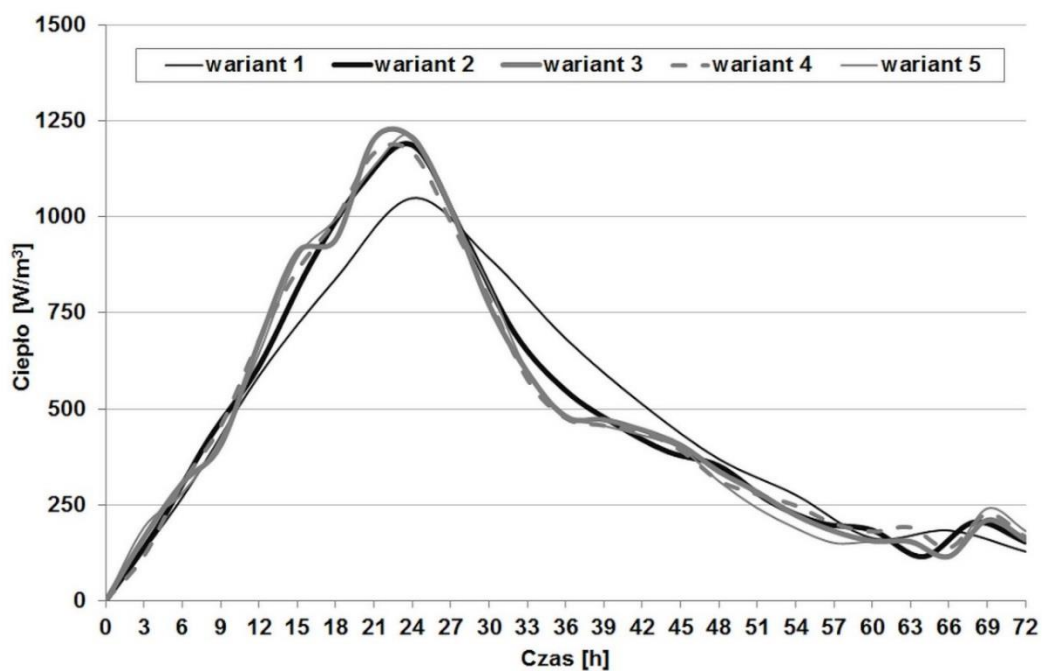
Określany parametr		Badana mieszanka betonowa			
		T1S-A	T1S-B2	T1S-M	T1S-S
Współczynnik przewodności cieplnej [W/(m·K)]	0 h	2,27 ± 0,12	2,09 ± 0,11	3,56 ± 0,25	2,32 ± 0,09
	24 h	2,39 ± 0,09	2,24 ± 0,07	3,60 ± 0,23	2,30 ± 0,09
	48 h	2,34 ± 0,12	2,26 ± 0,07	3,49 ± 0,31	2,13 ± 0,14
	72 h	2,53 ± 0,06	2,32 ± 0,06	3,52 ± 0,31	2,48 ± 0,01
Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	0 h	958 ± 27	750 ± 21	867 ± 38	1085 ± 10
	24 h	952 ± 31	730 ± 30	824 ± 105	1077 ± 15
	48 h	952 ± 25	583 ± 36	847 ± 80	1043 ± 29
	72 h	639 ± 29	550 ± 25	783 ± 107	869 ± 32
Ciepło hydratacji po 72 h [J/g _{cem}]		310 ± 3	259 ± 3	323 ± 6	345 ± 4

Ad. 5. Na rysunkach od 8 do 11 przedstawiono wybrane rezultaty analizy wrażliwości zastosowanej metody rozwiązania zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła. Na rysunku 8 przedstawiono zmiany wartości ciepła właściwego obliczanego w zależności od liczby niewiadomych przyjętych w algorytmie obliczeniowym. I tak w wariantach 1, 2, 3 ciepło właściwe obliczano w czterech punktach czasowych przy jednocześnie zmieniającej się liczbie punktów, w których obliczano wartość funkcji emisji ciepła (odpowiednio: 13, 19 i 25 punktów). Natomiast w wariantach 4 i 5 funkcja ciepła obliczana była w 25 punktach czasowych, a liczba punktów, w których obliczano ciepło właściwe wynosiła odpowiednio 7 (wariant 4) i 2 (wariant 5).

Na rysunku 9 przedstawiono postać wygładzonej funkcji emisji ciepła w zależności od przyjętego wariantu obliczeniowego. Jak widać, w przypadku wariantu pierwszego tj. po przyjęciu 13 punktów obliczeniowych, funkcja ma gładki przebieg, jednak uzyskana wartość maksymalna jest wyraźnie mniejsza od uzyskanej w pozostałych wariantach. Natomiast wykres funkcji w wariantach 3, 4 i 5, w których przyjęto 25 punktów obliczeniowych, staje się pofałdowany. Uzyskane fluktuacje postaci funkcji nie znajdują uzasadnienia w przebiegu procesu hydratacji cementu. W wariantcie 2 natomiast, w którym przyjęto 19 punktów obliczeniowych, zarówno uzyskany przebieg funkcji jest gładki, jak i wartość maksymalna nie wygląda na zaniżoną.

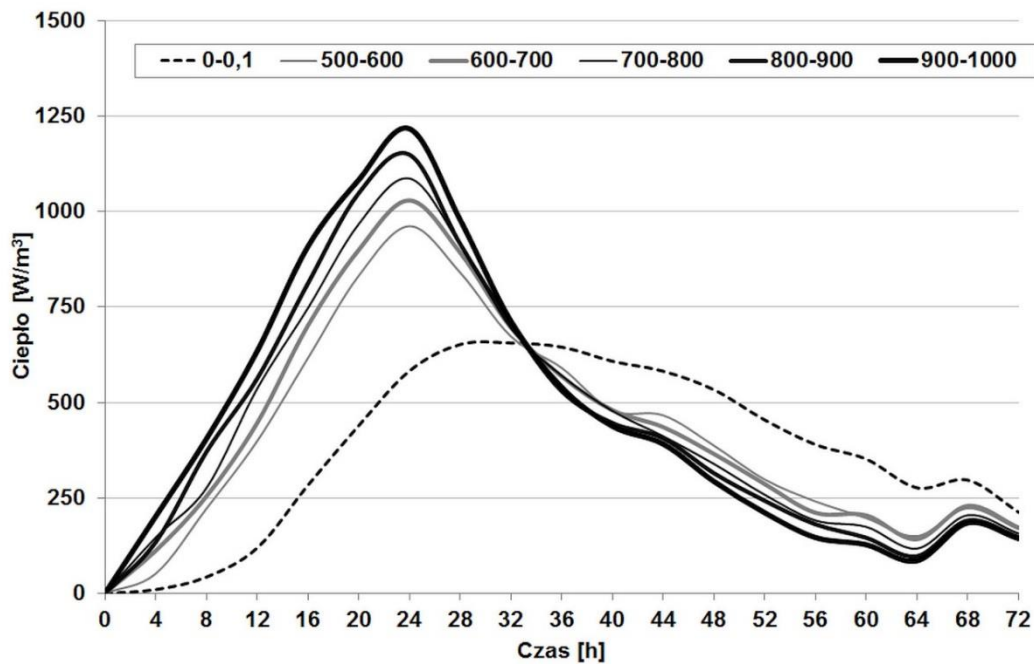


Rys. 8. Zależność ciepła właściwego w zależności od liczby parametrów (I etap analizy).



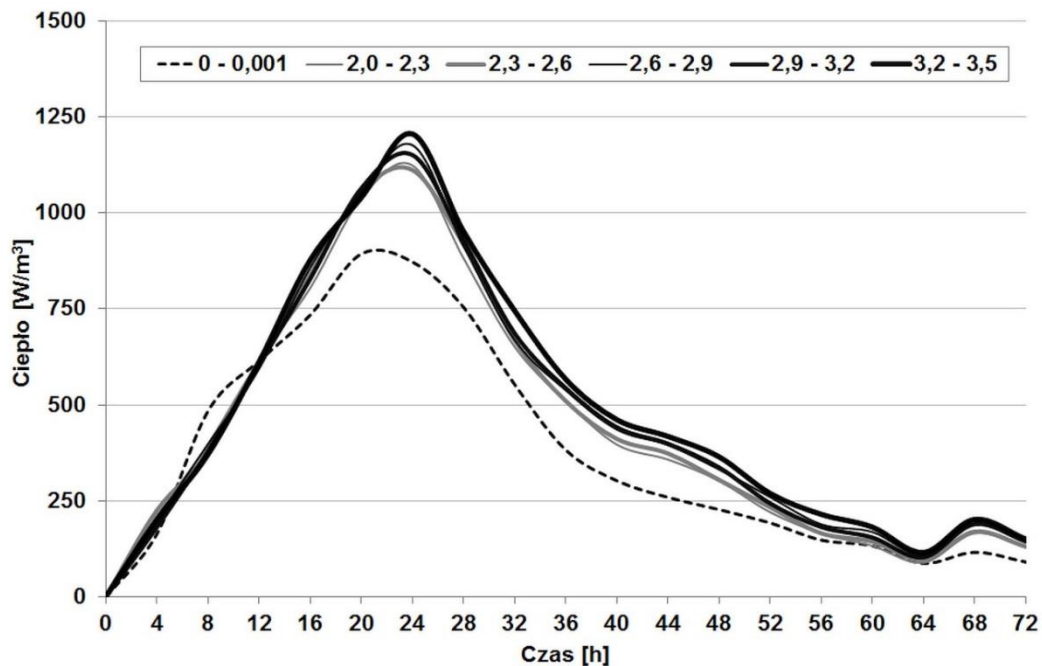
Rys. 9. Zależność funkcji źródła od liczby wyznaczanych parametrów

Obserwacje te prowadzą do wniosku, że istnieje pewna optymalna liczba punktów przy określaniu przebiegu funkcji źródła. Przyjęcie zarówno zbyt dużej jak i zbyt małej ich liczby prowadzi do zdeformowania postaci funkcji.



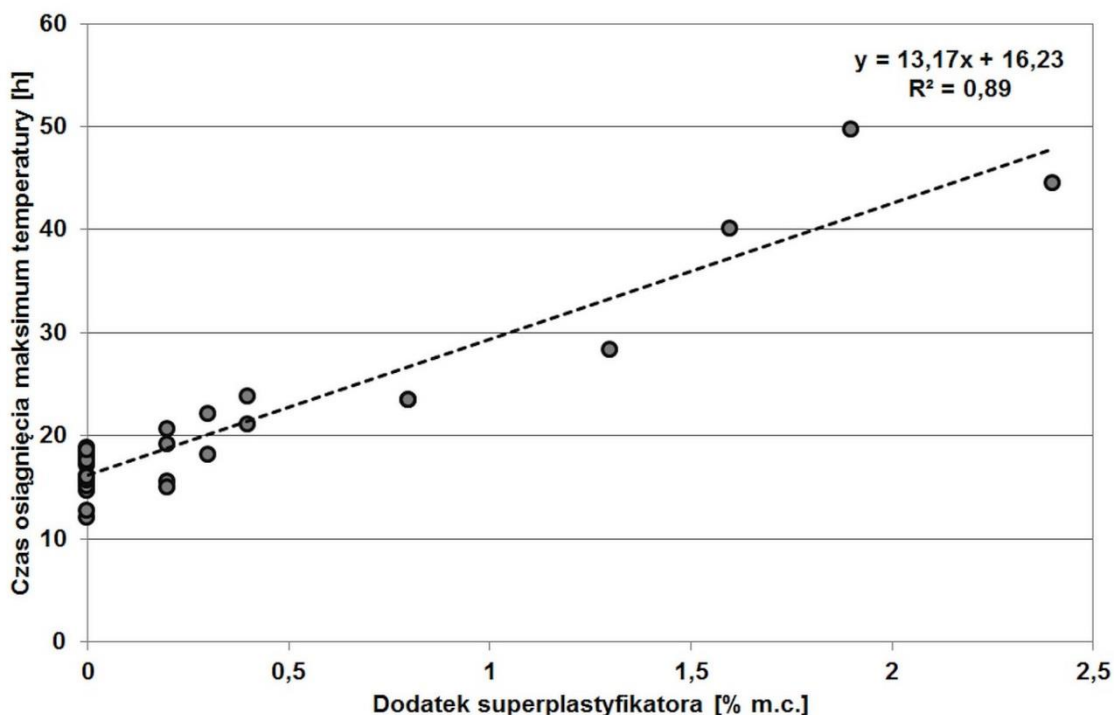
Rys. 10. Zależność funkcji źródła ciepła od ograniczeń wartości ciepła właściwego

Rysunki 10 i 11 prezentują wpływ różnicowania przyjętych ograniczeń wartości ciepła właściwego oraz współczynnika przewodności cieplnej na postać funkcji emisji ciepła. Analiza przebiegów funkcji na obu rysunkach prowadzi do wniosku, że zastosowana metoda jest dużo bardziej wrażliwa na zakres przyjętych ograniczeń ciepła właściwego, niż współczynnika przewodności cieplnej, co prowadzi do wniosku, że właściwe przyjęcie ograniczeń tego parametru w założeniach ma kluczowe znaczenie.



Rys. 11. Zależność funkcji źródła ciepła od ograniczeń wartości współczynnika przewodności cieplnej

Ad. 6. Wpływ domieszki znacznie redukującej ilość wody zarobowej na hydratację cementu, a dokładniej na czas osiągnięcia maksymalnej wartości temperatury mieszanki betonowej, zilustrowano na rysunku 12. Zależność tę wykreślono na podstawie wyników rejestracji temperatury w twardniejącym betonie osłonowym. Zwraca uwagę wysoka wartość współczynnika determinacji R^2 określającego jakość dopasowania znalezionej zależności do uzyskanych wyników.

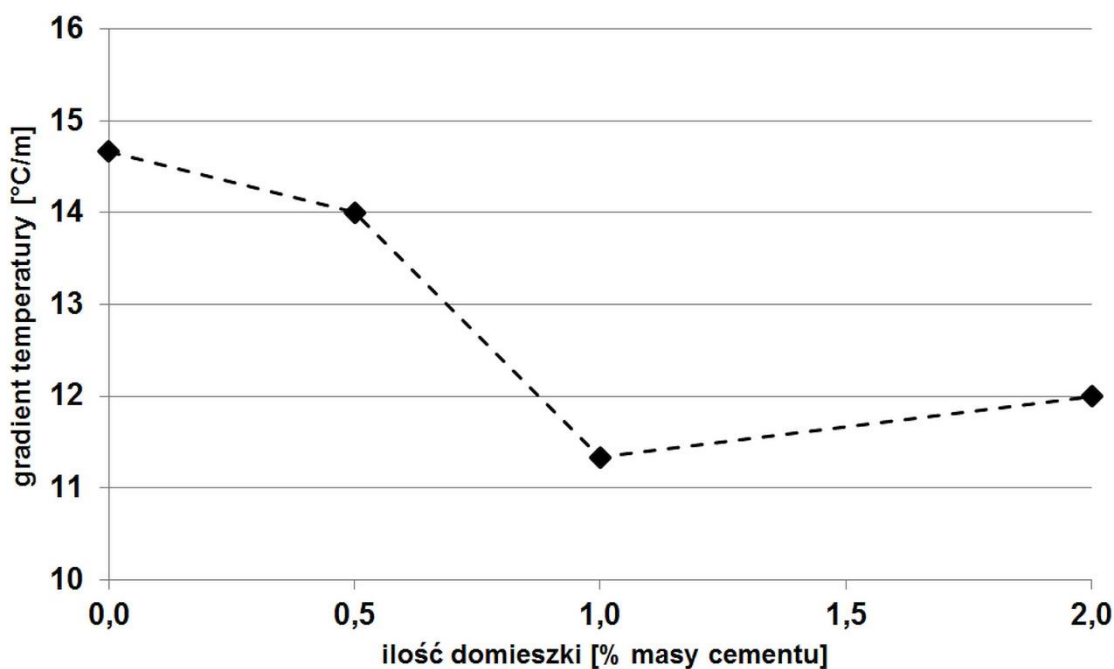


Rys. 12. Ilustracja wpływu domieszki uplastyczniającej na czas wystąpienia maksymalnej wartości temperatury w twardniejącym betonie osłonowym

Zależność powyższa była asumptem do podjęcia ostatniego zagadnienia naukowego, które zostało opisane w prezentowanej monografii, a także w jednej z publikacji, w której zawarty został dokładny opis przeprowadzonych badań oraz uzyskanych wyników. Badania te potwierdziły możliwość zmniejszenia wartości maksymalnego gradientu temperatury w twardniejącym betonie przez zastosowanie domieszki znacznie zmniejszającej ilość wody zarobowej. Wydaje się na pierwszy rzut oka oczywiste, że domieszka wpływając na tempo, w jakim następuje hydratacja cementu, wpływa na ilość ciepła wydzielanego w jednostce czasu. Ilość ciepła dostarczanego w jednostce czasu zmniejsza się, co przekłada się na zmniejszenie różnicy wartości temperatury i tym samym zmniejszenie jej gradientu. Takie wyjaśnienie uzyskanego efektu post factum ma co prawda pewien walor poprawności, ale jest daleko posuniętym strywializowaniem złożoności zjawisk ciepłno-wilgotnościowych oraz chemicznych zachodzących w twardniejącym betonie. Dowodem na to jest fakt, że maksymalne wartości gradientu temperatury podczas badań betonu w cylindrycznej formie zanotowano w fazie wzrostu temperatury. Natomiast w czasie symulacji pół temperatury w masywnym bloku betonowym maksymalny gradient zanotowano podczas stygnięcia betonu. Tym samym za redukcję wartości gradientu temperatury w obu przypadkach odpowiada inna

kombinacja czynników. Pokusę trywializacji zarejestrowanego efektu obniżenia wartości gradientu powinien także powstrzymywać fakt, że w literaturze nie ma dotąd doniesień o stosowaniu domieszek chemicznych w celu regulacji gradientu temperatury w masywnych konstrukcjach betonowych.

Na rysunku 13 przedstawiony został wynik badania wpływu domieszki na gradient zmierzony w twardniejącym betonie z kruszywem serpentynitowym umieszczonym w formie cylindrycznej wykorzystanej do badań parametrów cieplnych młodego betonu osłonowego. Jak widać, gradient temperatury obniżył się z prawie 15°C/m do nieco powyżej 11°C/m. Równie wyraźny efekt uzyskano prowadząc symulacje w programie Comsol na podstawie wyników badania ciepła twardnienia zaczynu cementowego z różnymi dawkami domieszki. Przeprowadzone symulacje wykazały, że najmniejszego wpływu można oczekiwać w przypadku zastosowania w betonie kruszywa magnetytowego, które charakteryzuje się największą wartością współczynnika przewodności cieplnej i dlatego samo z siebie przyczynia się do redukcji wartości gradientu. Natomiast największy wpływ zanotowano w przypadku betonu z kruszywem barytowym, co wynika prawdopodobnie z jego niskiej przewodności cieplnej. Sugeruje to, że właściwości cieplne kruszywa odgrywają w tym zjawisku dużą rolę.



Rys. 13. Maksymalne wartości gradientu temperatury w zależności od ilości użytej domieszki uplastyczniającej

4.3.4. Podsumowanie

Przedstawiony powyżej opis podjętych zagadnień naukowych i skrótove zestawienie otrzymanych wyników wskazują, w mojej ocenie, że zagadnienia naukowe przedstawione w przygotowywanej monografii naukowa stanowią znaczący i twórczy wkład w naukę, w szczególności w tematyce właściwości cieplnych betonu osłonowego,

ale też w zakresie zjawisk cieplnych zachodzących w betonie oraz inżynierii materiałowej. Uzyskane wyniki wskazują, że beton osłonowy ten pod względem jego wybranych właściwości cieplnych (w tym przede wszystkim ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej) należy zakwalifikować jako odrębny materiał w stosunku do betonu zwykłego. Powinno to znaleźć swoje odzwierciedlenie m. in. w odpowiednich dokumentach normalizacyjnych.

Rezultatem badań stanowiących podstawę przygotowanej monografii są osiągnięcia naukowe, z których do najważniejszych zaliczam:

- 1. Kompleksowe określenie wartości parametrów cieplnych (współczynnik przewodności cieplnej, objętościowa pojemność cieplna, dyfuzyjność cieplna i ciepło właściwe) betonu osłonowego o zróżnicowanym składzie i w dwóch skrajnych stanach nasycenia oraz wyznaczenie wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu osłonowego o zróżnicowanym składzie w trzech różnych stanach nasycenia wodą.**
- 2. Wykazanie, że możliwe jest oszacowanie z dużą dokładnością ciepła właściwego oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu w sytuacji braku kompletu danych z wykorzystaniem reguły mieszanin poprzez rozwiązanie odpowiednio sformułowanego zagadnienia odwrotnego.**
- 3. Wskazanie możliwości oszacowania współczynnika przewodności cieplnej w sytuacji braku kompletu danych wraz ze wskazaniem, które modele pozwalają uzyskać wyniki najbardziej zbliżone do wyników uzyskanych z badań oraz zróżnicowanie tych wytycznych w zależności od stanu nasycenia betonu.**
- 4. Wykazanie możliwości ograniczenia gradientu temperatury w twardniejącym betonie masywnym, w tym osłonowym, przez zastosowanie domieszek chemicznych modyfikujących przebieg hydratację cementu.**

Poza powyższymi do moich osiągnięć naukowych mniejszego kalibru zaliczam także:

5. Opracowanie procedury badania właściwości cieplnych betonu osłonowego metodą niestacjonarną przy dwóch różnych stanach nasycenia materiału.
6. Sformułowanie wytycznych dotyczących warunków przeprowadzania badań właściwości cieplnych materiałów porowatych metodą niestacjonarną „hot-plate”.
7. Opracowanie procedur badawczych i rozwiązań sprzętowych, w części nowatorskich, do badania współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu w stanie pełnego nasycenia wodą, w stanie powietrzno-suchym oraz w stanie wysuszenia do stałej masy.
8. Wyznaczenie zmiennych wartości ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej betonu w okresie do 72 godzin od chwili przygotowania mieszanki w przypadku 24 mieszanek betonowych o zróżnicowanym składzie.

9. Wykazanie możliwości określenia całkowitego ciepła hydratacji cementu w ciągu pierwszych 72 godzin na podstawie wyników uzyskanych w toku rozwiązania zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła na podstawie pomiaru temperatury twardniejącej próbki mieszanki betonowej.
10. Określenie wpływu założeń przyjmowanych w zastosowanej procedurze rozwiązania zagadnienia odwrotnego jednowymiarowego przepływu ciepła na uzyskiwane wyniki (tj. wartości parametrów cieplnych betonu i funkcji emisji ciepła przez hydratyzujący cement).

Powyższe osiągnięcia naukowe, zarówno te podstawowe, jak i te pomniejsze, stanowią w mojej ocenie twórczy, a więc także znaczny wkład w poszerzenie istniejącego stanu wiedzy na temat parametrów cieplnych materiałów budowlanych oraz ich badania, a także zjawisk cieplnych zachodzących w betonie.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1. Okres przed uzyskaniem stopnia doktora

W październiku 2000 r. obroniłem na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku pracę magisterską pt. „Metoda trzech równań w projektowaniu betonów wysokowartościowych”. Studia ukończyłem z oceną celującą i z pierwszą lokatą na wydziale spośród studentów wszystkich kierunków mojego rocznika. Jeszcze na IV roku podjąłem obowiązki dydaktyczne jako asystent-stażysta, które kontynuowałem w semestrze zimowym roku V. W semestrze letnim wyjechałem w ramach programu Erasmus na studia w Technische Universität Darmstadt, gdzie między innymi zrealizowałem pracę na temat zbrojenia ultralekkich betonów na kruszywie szklanym tkaninami z tworzyw sztucznych.

Po obronie dyplomu podjąłem studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Jednocześnie na początku roku 2001 podjąłem na zasadzie wolontariatu obowiązki dydaktyczne w Instytucie Budownictwa Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej. W październiku 2004 r. zostałem tam zatrudniony jako asystent w wymiarze $\frac{1}{2}$ etatu, a następnie otworzyłem na Wydziale przewód doktorski. Promotorem mojego doktoratu był pan dr hab. inż. Jan Pawlikowski, prof. PW i ITB. W 2005 r. obroniłem rozprawę doktorską na temat „Wpływ wybranych założeń obliczeniowych na zapas bezpieczeństwa zginanych i ściskanych żelbetowych elementów prętowych, określanej metodą Monte Carlo”. Mój dorobek naukowy przed obroną doktoratu składał się z 5 publikacji konferencyjnych (4 samodzielne) oraz 1 publikacji w czasopiśmie „Inżynieria i Budownictwo”.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej była analiza modeli nośności ściskanych i zginanych żelbetowych elementów prętowych pod kątem ich wrażliwości na zmiany wybranych założeń obliczeniowych. Za pomocą samodzielnie opracowanego oprogramowania przeprowadziłem symulacje nośności wybranych ściskanych i zginanych przekrojów elementów ramy żelbetowej. Symulacje prowadzone były

z wykorzystaniem metody Monte Carlo. Analizowanym wynikiem symulacji było oszacowane prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji przy określonych założeniach dotyczących geometrii przekroju, wytrzymałości materiałów, rozpiętości elementów oraz wartości obciążeń stałych i zmiennych. Wartości te przyjęte były jako zmienne losowe o określonym typie rozkładu i parametrach. Badano między innymi wpływ przyjęcia stałych oraz zmiennych losowo współczynników służących do przeliczenia obciążeń na określone siły wewnętrzne, a także wpływ wybranego rodzaju rozkładu wytrzymałości betonu m.in. normalnego, logarytmnormalnego, Pearsona III typu oraz opracowanego wspólnie z promotorem nowego trójparametrowego rozkładu NG (będącego liniową kombinacją rozkładu normalnego i rozkładu Gumbela). Przeprowadzone symulacje i analiza ich wyników pozwoliły rozwiązać trzy zagadnienia naukowe, które stanowiły podstawę rozprawy doktorskiej. Oryginalne wyniki uzyskane podczas przygotowywania doktoratu były prezentowane na konferencjach naukowych.

Przez cały okres studiów doktoranckich zajmowałem się działalnością dydaktyczną, a także, w miarę możliwości, projektową. Jeszcze w czasie studiów pracowałem w charakterze asystenta projektanta przy opracowaniu projektów wykonawczych konstrukcji stalowych budowanych w Płocku instalacji DRW VI, FKK II i HON VI Petrochemii Płock SA (obecnie PKN Orlen SA). W ramach moich obowiązków dydaktycznych opracowałem skrypt oraz pomoce naukowe do przedmiotu Podstawy Konstrukcji Budowlanych prowadzonego na kierunku inżynieria środowiska. Poza tym przedmiotem prowadziłem jeszcze ćwiczenia z Budownictwa Ogólnego, Podstaw Budownictwa Inżynierskiego (zarówno w zakresie budowy dróg jak i mostów) oraz byłem konsultantem dwóch prac dyplomowych.

5.2. Okres po uzyskaniu stopnia doktora

W pierwszych latach po uzyskaniu stopnia doktora skupiłem się na pracy dydaktycznej, choć kontynuowałem również pracę naukową głównie realizując granty naukowe pozyskiwane w ramach funduszy statutowych. Początkowo zajmowałem się także działalnością zawodową jako inżynier budownictwa biorąc udział w projektowaniu przebudowy Teatru Dramatycznego im. Jerzego Szaniawskiego w Płocku oraz salonu sieci Agata Meble również w Płocku. Później jednak rosnące obciążenie pracą dydaktyczną, spowodowane m.in. podjęciem w 2007 roku zatrudnienia na macierzystym wydziale na pełnym etacie na stanowisku adiunkta, spowodowało, że na pracę zawodową w charakterze asystenta projektanta nie miałem już czasu.

Zakres wykonywanej przeze mnie pracy dydaktycznej od roku 2007 stopniowo rósł i w szczytowym momencie osiągnął poziom blisko 750 godzin zajęć rocznie przy pensum wynoszącym 210 godzin. Spowodowało to spowolnienie mojego rozwoju naukowego. Mimo, że prowadziłem w tym czasie również pracę naukową i uzyskiwałem wartościowe wyniki, nie owocowała ona jednak publikacjami ze względu na deficyt czasu koniecznego na ich przygotowanie. W ramach swoich obowiązków prowadziłem, i częściowo obecnie nadal prowadzę, zajęcia (głównie ćwiczenia, projekty i laboratoria, choć w niektórych przypadkach także wykłady) m.in. z takich przedmiotów jak Mechanika Budowli, Mechanika Budowli II, Metody Obliczeniowe, Metody

Komputerowe w Inżynierii Lądowej, Konstrukcje Mostowe, Konstrukcje Drogowe, Niezawodność i Trwałość Konstrukcji na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych zarówno I jak i II stopnia. Prowadziłem również i prowadzę nadal zajęcia z przedmiotu Komputerowe Wspomaganie Prac Inżynierskich w Budownictwie na studiach doktoranckich, do którego przygotowałem jako współautor materiały pomocnicze. W związku z wprowadzeniem Krajowych Ram Kwalifikacji brałem kilkakrotnie udział w opracowywaniu nowych programów prowadzonych przeze mnie przedmiotów. Od chwili uzyskania stopnia doktora byłem opiekunem 102 obronionych prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich, a obecnie sprawuję opiekę nad 22 kolejnymi.

Od roku 2012 w związku ze stopniowo zmniejszającym się obciążeniem pracą dydaktyczną zacząłem w większym stopniu zajmować się pracą naukową, którą zacząłem traktować priorytetowo. Przy czym stopniowo zmniejszałem zaangażowanie w tematykę analizy probabilistycznej zapasów bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych, a zacząłem wracać do tematyki związanej z inżynierią materiałów budowlanych, czyli tej tematyki, z zakresu której wykonałem pracę magisterską. Jednak jeszcze przez kilka lat prowadziłem prace naukowe z obu wspomnianych wyżej dziedzin jednocześnie m.in. w ramach prac statutowych, których byłem wykonawcą lub kierownikiem. Przygotowywałem w tym czasie m.in. publikacje na podstawie wyników badań uzyskanych w latach wcześniejszych.

Początkowo moje zainteresowania w ramach inżynierii materiałów budowlanych nakierowane były wyłącznie na zagadnienia trwałości oraz możliwości wykorzystania kruszywa z recyklingu betonu. W ten sposób moja działalność naukowa oparła się na dwóch nogach wzbogać o dziedzinę, której zakres zaczął się z czasem poszerzać i obecnie obejmuje zagadnienia związane m.in. z modyfikacją kruszyw z recyklingu betonu, możliwością obróbki i wykorzystania odpadów z rozbiórki konstrukcji oraz elementów betonowych, czy zastosowaniem innych przemysłowych materiałów odpadowych w technologii materiałów budowlanych (w tym opartych na gipsie czy wapie).

W 2015 roku zostałem zaangażowany jako wykonawca do projektu "Trwałość i skuteczność betonowych osłon przed promieniowaniem jonizującym w obiektach energetyki jądrowej", którego kierownikiem był pan profesor Michał A. Glinicki. Projekt o akronimie ATOMSHIELD i numerze PBS2/A2/15/2014 był realizowany w ramach Programu Badań Stosowanych NCBiR. Mój udział w nim trwał 18 miesięcy, podczas których byłem zatrudniony na stanowisku starszego specjalisty w Pracowni Pól Odkształceń Zakładu Wytrzymałości Materiałów (obecnie Zakład Mechaniki Doświadczalnej) Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN. W ramach tego projektu zajmowałem się badaniem i analizowaniem szeroko rozumianych właściwości cieplnych betonu osłonowego. Moja praca w projekcie zaowocowała poważniejszym zainteresowaniem zagadnieniami cieplnymi w odniesieniu do materiałów budowlanych ze szczególnym uwzględnieniem betonu i tym samym poszerzyła zakres zagadnień naukowych znajdujących się w obszarze mojego zainteresowania o trzecią dziedzinę. Tym samym moja działalność naukowa zyskała trzecią „nogę”, a jak wiadomo ze statyki trójpunktowe oparcie jest najbardziej stabilne.

Wyniki uzyskane w ramach prac w ww. projekcie oraz uzyskane doświadczenia zaowocowały podjęciem decyzji o przygotowaniu monografii naukowej poświęconej zagadnieniom właściwości cieplnych betonowych osłon biologicznych w instalacjach jądrowych, która to monografia stanowi podstawę mojego wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

Obecnie moja działalność naukowa koncentruje się na zagadnieniach związanych z szeroko rozumianym transportem ciepła w materiałach budowlanych i konstrukcjach betonowych. Nie zaniedbuję jednak także drugiego obszaru mojej działalności naukowej jaką są zagadnienia związane z zastosowaniem odpadów przemysłowych w produkcji ekologicznych materiałów budowlanych. Trzeci obszar mojej działalności naukowej, to jest zagadnienia probabilistycznej analizy zapasów bezpieczeństwa konstrukcji chwilowo został przeze mnie opuszczony, ale planuję wrócić do niego modyfikując jednak zakres podejmowanych zagadnień w kierunku probabilistycznej analizy trwałości materiałów budowlanych i konstrukcji.

W ramach zagadnień transportu ciepła w konstrukcjach budowlanych pod moim merytorycznym nadzorem prowadzone są badania, na podstawie wyników których planowane jest przygotowanie rozprawy doktorskiej. Jestem również promotorem pomocniczym w innym otwartym już przewodzie doktorskim dotyczącym właściwości cieplnych modyfikowanych spoiw gipsowych. Poza tym nadal poświęcam czas i uwagę zagadnieniom recyklingu oraz zastosowania przemysłowych materiałów odpadowych w technologii betonu i materiałów budowlanych. Poświęcone są tym zagadnieniom realizowane prace dyplomowe oraz moje własne badania finansowane m.in. z funduszy przyznanych przez Prezydenta Miasta Płocka. Poszerzyłem obszar moich zainteresowań w tym polu o technologie materiałów silikatowych oraz autoklawizowanego betonu komórkowego, którym to zagadnieniom zamierzam poświęcić w najbliższej przyszłości znaczną część mojego czasu i energii w ramach zaplanowanych już badań wstępnych.

Ponieważ jestem zwolennikiem łączenia wiedzy z różnych obszarów nauki nie wykluczam, że swoje zainteresowania naukowe w najbliższym czasie poszerzę o kolejne zagadnienia. Z tym, że prawie na pewno będą one w jakiś sposób bezpośrednio powiązane z opisanymi powyżej trzema obszarami, w których dotychczas się poruszam.

6. Podsumowanie działalności naukowo-badawczej

W tabelicy 1 przedstawiłem zestawienie osiągnięć naukowych.

Szczegółowy wykaz wszystkich publikacji zamieszczony jest w załączniku nr 4.

Tablica 1. Zestawienie osiągnięć naukowych (stan na 26.04.2019)

Rodzaj pracy	Liczba prac w ujęciu sumarycznym	Liczba prac po uzyskaniu stopnia doktora	Liczba prac przed uzyskaniem stopnia doktora
Publikacje ogółem:			
Monografie naukowe	1	1	0
Artykuły ujęte w części A wykazu czasopism MNiSW posiadających Impact Factor	6	6	0
Artykuły ujęte w części B wykazu czasopism MNiSW	9	7	2
Rozdziały w monografiach w języku angielskim	1	1	0
Rozdziały w monografiach w języku polskim (publikacje pokonferencyjne)	10	7	3
Referaty na międzynarodowych konferencjach	35	34	1
Referaty na krajowych konferencjach	6	5	1
Udział w konferencjach naukowych:			
Krajowych	9	6	3
Międzynarodowych	13	12	1
Udział w projektach badawczych:			
Krajowe projekty badawcze	18	16	2
Międzynarodowe projekty badawcze	1	1	0

Sumaryczna punktacja wg listy MNiSW (dane wg Bazy Wiedzy Politechniki Warszawskiej): 606

Wyniki moich badań (po uzyskaniu stopnia doktora) zostały przedstawione w 6 publikacjach w czasopismach części A wykazu czasopism naukowych MNiSW znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR), posiadających Impact Factor. Są to następujące czasopisma z bazy JCR:

Journal of Renewable Materials (ISSN: 2164-6325 i 2164-6341)
Periodica Polytechnica Civil Engineering (ISSN: 1587-3773 i 0553-6626)
Materials (ISSN 1996-1944)
Construction and Building Materials (ISSN: 0950-0618)
International Journal of Heat and Mass Transfer (ISSN: 0017-9310)
Heat and Mass Transfer (ISSN: 0042-9929 i 1432-1181)

Kolejnych 7 publikacji ukazało się w 6 czasopismach ujętych w części B wykazu czasopism MNiSW:

Computer Assisted Methods in Engineering and Science (ISSN 2299-3649)
Inżynieria i Budownictwo (ISSN 0021-0315)
Materiały Budowlane (ISSN 0137-2971 i 2449-951X)
Architecture Civil Engineering Environment (ISSN: 1899-0142)
Roads and Bridges - Drogi i Mosty (ISSN: 1643-1618 i 2449-769X)
Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA
(ISSN 2300-5130 i 2300-8903)

Cztery moje publikacje ukazały się w dwóch czasopismach angielskojęzycznych spoza części B wykazu czasopism MNiSW, a kolejnych 39 pozycji w moim dorobku to recenzowane artykuły konferencyjne opublikowane w polskich i zagranicznych czasopismach oraz materiałach konferencyjnych indeksowanych w katalogu Web of Sciences.

Szczegółowy opis mojego dorobku uzyskanego po doktoracie wraz z danymi bibliograficznymi znajduje się w załączniku 4.

Wskaźniki bibliometryczne mojego dorobku kształtują się następująco:

Liczba cytowań (stan na 17.04.2019 r.):

- 33 według bazy Web of Science,
- 68 według bazy Scopus,
- 98 według bazy Google Scholar,
- 39 według bazy Publish or Perish (baza Crossref).

Indeks Hirscha (stan na 17.04.2019 r.):

- 3 według bazy Web of Science,
- 4 według bazy Scopus,
- 5 według bazy Google Scholar,
- 4 według bazy Publish or Perish (baza Crossref).

Sumaryczny Impact Factor:

- 12,649 - zgodnie z rokiem opublikowania
- 14,567 - 5-cio letni

Roman Jaskulski