

2. Metody eksperymentalne

Podstawą tworzonych wzorców eksperymentalnych jest zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych i odpowiedniego systemu rejestracji mierzonych wielkości, oraz wybór optymalnej konfiguracji naczyń pomiarowych i substancji modelowych. W niniejszym rozdziale opisano każdy z tych elementów, zwracając szczególną uwagę na aspekty istotne dla procesu tworzenia wzorca eksperymentalnego.

2.1. Opis metod pomiarowych

Podstawową metodą pomiarową stosowaną w tej pracy jest anemometria obrazowa (Particle Image Velocimetry - PIV), umożliwiająca ilościowy pomiar pól prędkości w płynach. Zastosowanie ciekłokrystalicznych zawiesin jako cząstek wskaźnikowych umożliwiło rozszerzenie anemometrii obrazowej na pomiary pól temperatury. Przez analogię metodę tę nazwano termometrią obrazową (Particle Image Termometry). Idea obu tych metod opiera się na analizie optycznej obrazów przepływu. Z tego powodu w prowadzonych badaniach stosowane płyny powinny być przezroczyste, podobnie jak ściany naczyń, w których ma miejsce badany przepływ. Przy tej okazji warto wspomnieć o nowej, przewodnościowej metodzie pomiarowej, rozwijanej w ramach prowadzonych obecnie prac (Rahaim [51], Dekajlo [53]). Istotną zaletą tego podejścia jest wykorzystanie różnic przewodnictwa elektrycznego w płynie, a zatem możliwy jest pomiar koncentracji składników czy temperatury cieczy w ośrodkach optycznie nieprzezroczystych. Z tego względu dalszy rozwój tej metody może spowodować, że stanie się ona cennym uzupełnieniem metod optycznych.

2.1.1. Pomiar pól prędkości

Współczesnym narzędziem pomiaru pól prędkości przepływu jest anemometria obrazowa, w skrócie oznaczana PIV (z ang. *Particle Image Velocimetry*). Poprzez oświetlenie badanego obszaru przepływu wąską płaszczyzną świetlną (tzw. nożem świetlnym) otrzymuje się obraz cząstek wskaźnikowych (posiewu) poruszające się w tej płaszczyźnie. Cyfrowa rejestracja pary kolejnych obrazów i ich korelacja w pamięci komputera prowadzą do wyznaczenia średnich przemieszczeń w każdym punkcie obrazu przepływu (Westerweel i inni, [64], Willert i Gharib, [65]). Dzięki temu na podstawie dwóch obrazów wykonanych w znanym odstępie czasu można wyznaczyć wielkość, kierunek i zwrot wektorów prędkości dla całego badanego przekroju przepływu. Procedura taka może być powtarzana dla wielu przekrojów, umożliwiając odtworzenie przestrzennej struktury wektorowego pola prędkości.

Dokładność pomiaru metodą PIV ograniczona jest wieloma czynnikami, z których najistotniejszymi są rozdzielczość obrazu oraz prawidłowy dobór sekwencji korelacji i odstępu czasowego między obrazami. W pracy dla zwiększenia dokładności i dynamiki pomiaru korelację obrazów przepływu przeprowadzano dla wielu par z dłuższych sekwencji zarejestrowanych obrazów. Dla typowych obrazów przepływu rejestrowanego przy rozdzielczości 768 x 512 pikseli uzyskiwana względna dokładność pomiarów prędkości (dla pojedynczego punktu) wynosiła $\pm 6\%$.

Klasyczna metoda PIV oparta na korelacji ma szereg wad, wynikających głównie ze sztywnego podziału analizowanego obrazu na okna próbkowania. Zastąpienie korelacji obrazów metodą potoków optycznych (ang. *optical flow*) pozwoliło na powiększenie dokładności pomiaru i ominięcie szeregu ograniczeń klasycznej analizy PIV (Quénot, Pakleza, Kowalewski, [50]). Metoda ta umożliwia wyznaczenie pola prędkości dla każdego elementu obrazu (piksela), wykorzystując sekwencję wielu (niekoniecznie dwóch) obrazów. Użycie tej metody w opisanych niżej badaniach pozwoliło w wielu przypadkach na istotną poprawę dokładności pomiaru pól prędkości.

Metoda pomiaru pól prędkości PIV, w szczególności w wersji opartej na potokach optycznych, w wielu wypadkach wymaga odpowiedniej filtracji obrazów, wykonywanej przy pomocy specjalnie przygotowanych programów pomocniczych. Obok poprawy kontrastu i równomierności oświetlenia istotne jest maskowanie fragmentów obrazów nieistotnych z punktu widzenia pomiaru pól prędkości. Liczne próby wykazały, że rezultat obliczeń oparty na potokach optycznych może

zależać od tekstury fragmentów obrazów nie należących do analizowanego przepływu (ścianki naczyń, elementy nie wypełnione cieczą). Na przykład występowanie we fragmentach obrazu w otoczeniu przepływu dużych obszarów o stałej jasności zakłóca w tych okolicach procedurę analizy przemieszczeń. Zminimalizowanie tego efektu uzyskano dzięki wypełnieniu takich obszarów teksturą odpowiednio przygotowanego obrazu odniesienia.

Procedura filtracji obrazów, tworzenia właściwej tekstury, maskowania odpowiednich fragmentów obrazów, obliczania pól wektorowych i transformacji rezultatów obliczeń do wygodnego dla programów graficznych formatu była przeprowadzana automatycznie dzięki wykorzystaniu środowiska Linux i odpowiednio przygotowanego pakietu skryptów powłoki systemu. Pozwoliło to na szybką analizę setek obrazów i przeprowadzenie odpowiednich operacji numerycznych prowadzących do wyznaczenia reprezentatywnych pól wektorowych.

Porównanie pełnego wektorowego pola prędkości w danym przekroju z jego odpowiednikiem otrzymanym w rezultacie obliczeń numerycznych pozwala na szybką, wizualną analizę zgodności i rozbieżności. Ilościowa ocena takiego porównania jest wygodniejsza do przeprowadzenia dla wybranych profili prędkości, wyekstrahowanych ze zmierzonych i obliczonych pól wektorowych. Takie profile posłużyły również do analizy dokładności obliczeń numerycznych przy definiowaniu opisanego dalej wzorca numerycznego.

2.1.2. Pomiar pól temperatury

Pomiar pola temperatury cieczy w badanych przepływach bazuje na zjawisku selektywnego rozproszenia światła przez niektóre substancje ciekłokrystaliczne. Objawia się to jako zmiana barwy światła (długości fali) w funkcji temperatury i kąta rozproszenia. Wykorzystanie zawiesiny ciekłokrystalicznej jako posiewu stworzyło możliwość wizualizacji temperatury cieczy w przepływie (Hiller i Kowalewski, [23]). Komputerowa analiza zmiany barwy światła rozproszonego na cząstkach wskaźnikowych doprowadziła do opracowania metody termometrii obrazowej PIT (*Particle Image Thermometry*). Stosowany w tej metodzie układ optyczny jest analogiczny do używanego do pomiaru pól prędkości metodą PIV. Umożliwiło to stworzenie przez Hillera i innych ([22]) podstawowego narzędzia pomiarowego do diagnostyki przepływów termicznych, będącego połączeniem w jednym eksperymencie obrazowych metod pomiaru pola prędkości (PIV) i pola temperatury (PIT). Przydatność tak utworzonej techniki hybrydowej do badań przepływów z przemianą fazową zademonstrowano w pracy Kowalewskiego i Cybulskiego ([30]).

Określenie lokalnej temperatury cieczy wiąże się z wyznaczeniem barwy (długości fali) światła rozproszonego przez znajdujące się tam cząstki posiewu ciekłokrystalicznego. Zastosowana analiza obrazów, prowadząca do wyznaczenia barwy dominującej światła rozproszonego (długości fali o maksymalnej intensywności), opiera się na klasycznej metodzie kolorymetrii, czyli rozkładzie rejestrowanego światła na trzy składowe podstawowe, barwę czerwoną, zieloną i niebieską (*RGB*). Odpowiednia transformacja algebraiczna tych trzech zmierzonych dla danego punktu obrazu zmiennych umożliwia wyznaczenie istotnego dla metody PIT parametru, tzn. barwy dominującej (ang. *Hue*). Wartość *Hue*, czyli barwa dominująca, jest bezpośrednio funkcją temperatury ciekłego kryształu. Pomiar lokalnej temperatury cieczy w przepływie metodą PIT wymaga wyznaczenia krzywej kalibracyjnej, będącej relacją wartości *Hue* w funkcji zmian temperatury (Kowalewski, [28]). Zastosowana w tej pracy metoda kalibracyjna opiera się na 8-bitowej reprezentacji barw składowych i zapewnia rozdzielczość koloru lepszą niż 1%. Jednak z uwagi na silnie nieliniową charakterystykę odwzorowania, dokładność pomiaru temperatury zależy od wartości *Hue* i zmienia się od 3% do 10% pełnego zakresu zmiany barw. Dla ciekłych kryształów używanych w opisywanych niżej eksperymentach daje to absolutną dokładność pomiaru $0.15K$ dla niższych temperatur (czerwony-zielony zakres zmian koloru) i $0.5K$ dla wyższych temperatur (niebieski zakres kolorów). Największa czułość metody ma miejsce przy zmianie barwy materiału ciekłokrystalicznego z czerwieni do zieleni, odpowiadającej zmianie wartości temperatury poniżej jednego stopnia.

Typowe materiały ciekło-krystaliczne mają ciężar właściwy zbliżony do ciężaru właściwego wody i w stosowanych cieczach cząstki posiewu mogły być traktowane jako neutralne względem siły wyporu. Czas relaksacji termicznej materiału ciekło krystalicznego jest stosunkowo długi i dla typowej zawiesiny cząstek o wymiarze 50 μ m wynosi około 3 ms. Jest to jednak nadal czas zupełnie wystarczający dla badań problemów konwekcji termicznej w cieczach.

Pomiar pól temperatury techniką PIT, chociaż bardzo atrakcyjny z uwagi na bezinwazyjność metody i możliwość uzyskania informacji o rozkładzie temperatury w całym przekroju przepływu, posiada szereg ograniczeń. Zakres zmian barwy materiału ciekłokrystalicznego na ogół nie pokrywa całego interesującego nas zakresu zmian temperatury. Uzyskiwana informacja o polu temperatury jest często niepełna lub obarczona błędami wskutek przekłamań barw wynikających z odbić światła czy jego rozproszenia na elementach naczynia. Niezbędna jest więc niezależna kontrola zmian temperatury w przepływie, pozwalająca na weryfikacje i ewentualną korektę wyników pomiaru metodą PIT. Takie pomiary konieczne są również dla przeprowadzenia procedury kalibracyjnej. W opisanych badaniach lokalne pomiary temperatury wykonywano w kilku a nawet czasami kilkunastu wybranych punktach (np. w płaszczyźnie ścianek lub na wlotach cieczy) używając systemu termopar i czujników oporowych typu Pt-100. Uzyskiwana dokładność punktowego pomiaru temperatury wynosiła $\pm 0.1K$.

2.1.3. Wizualizacja struktur przepływu

Ważnym narzędziem eksperymentalnej analizy przepływów jest ich wizualizacja. Informacja zbierana podczas wizualizacji odpowiada scałkowanym w czasie torom poruszającego się z płynem posiewu i stanowi cenne uzupełnienie metody PIV. Wizualizacja przepływu pozwala stosunkowo łatwo identyfikować i interpretować poszczególne struktury pola przepływu. W opisanych badaniach wykorzystywano tą metodę analizy przepływu zarówno do jakościowej oceny zgodności symulacji numerycznych z rezultatami pomiarów jak również do wydobycia szczegółów pól prędkości, trudnych do identyfikacji na podstawie pól wektorowych.

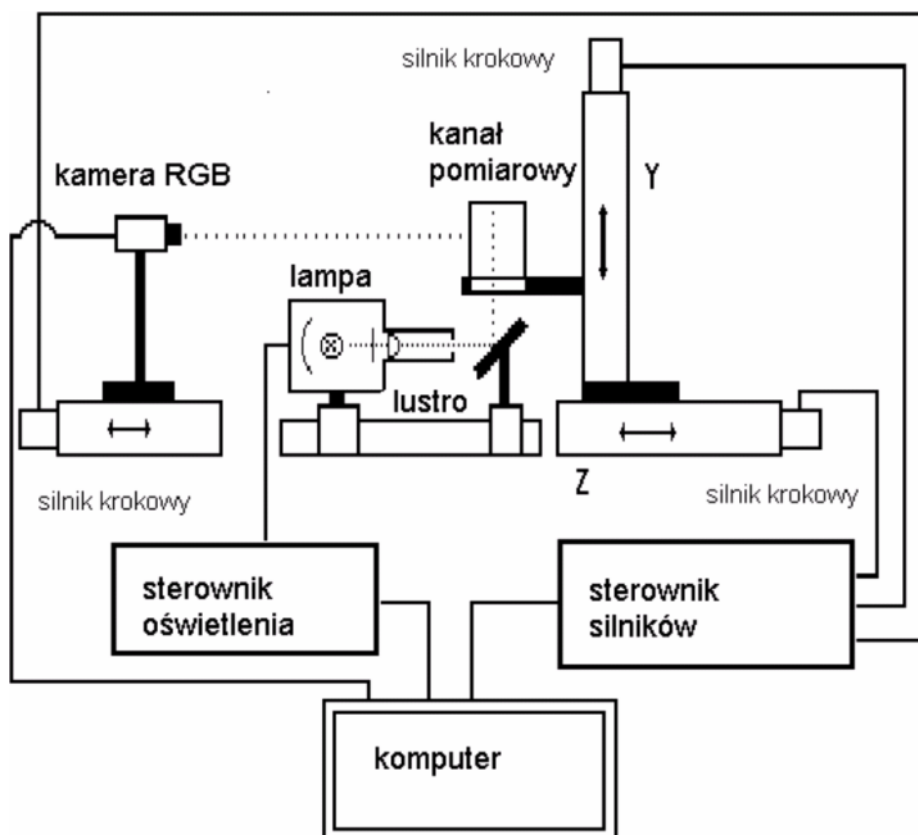
W klasycznej postaci wizualizacja torów cząstek uzyskiwana jest przez wielokrotne zsumowanie obrazów przepływu na kliszy czy matrycy światłoczułej aparatu fotograficznego. W niniejszej pracy, komputerowa rejestracja obrazów przepływu umożliwiała rejestrację dłuższych sekwencji obrazów i ich późniejsze zsumowanie w pamięci komputera. Przed zsumowaniem poszczególne obrazy komputerowe poddawano dodatkowo filtracji pozwalającej na wzmocnienie kontrastu i pełniejsze wyodrębnienie poszczególnych cząstek. Odpowiedni dobór parametrów filtracji, liczby sumowanych obrazów i odstępów czasowych umożliwiał wizualizację tych torów cząstek, które były najbardziej istotne dla dalszej analizy struktur przepływu.

Wizualizacja torów cząstek pozwoliła uzyskać globalny opis struktur przepływu i ułatwia interpretację podstawowych charakterystyk pola prędkości. Otrzymana z eksperymentów informacja o torach cząstek wskaźnikowych była porównywana z wirtualnymi torami cząstek, generowanymi na bazie otrzymanych rozwiązań numerycznych danego problemu. Procedura taka, zwana *particle tracking*, w pewnym sensie jest zbliżona do wyznaczania linii prądu przepływu. Podobna operacja mogła być również wykonana z wykorzystaniem zmierzonych metodą PIV pól prędkości, pozwalając wykreślić wirtualne tory cząstek dla zmierzonego pola prędkości. Porównanie uzyskanych rezultatów eksperymentalnych, tzn. fizycznych torów pochodzących z wizualizacji przepływu, i wirtualnych torów powstałych przez scałkowanie pól prędkości, umożliwiło właściwą interpretację skomplikowanych struktur przepływu i procesów odpowiedzialnych za konwekcyjną dyfuzję ciepła.

2.2. Układy pomiarowe i systemy akwizycji danych

Podstawowy schemat stanowiska pomiarowego stosowanego w doświadczeniach ilustrują rysunki 1 i 2. Wspólnymi elementami obu układów pomiarowych są systemy oświetlenia, rejestracji obrazów i systemy termostatów do stabilizacji temperatury. Rysunek 1 przedstawia stanowisko do rejestracji obrazów dla badań w kanale sześciennym z dodatkowym systemem przesuwu położenia

płaszczyzny świetlnej, umożliwiającym odtworzenie struktur przestrzennych. Rysunek 2 ilustruje układ pomiarowy stosowany do badań w prostopadłościennym modelu układu zalewowego, obejmujący naczynie z cieczą modelową o zmiennym nachyleniu, ciśnieniowy system napełniania oraz dodatkowy układ punktowych pomiarów temperatury.



Rys. 1. Podstawowe elementy układu rejestracji obrazów przepływu

2.2.1. Rejestracja obrazów

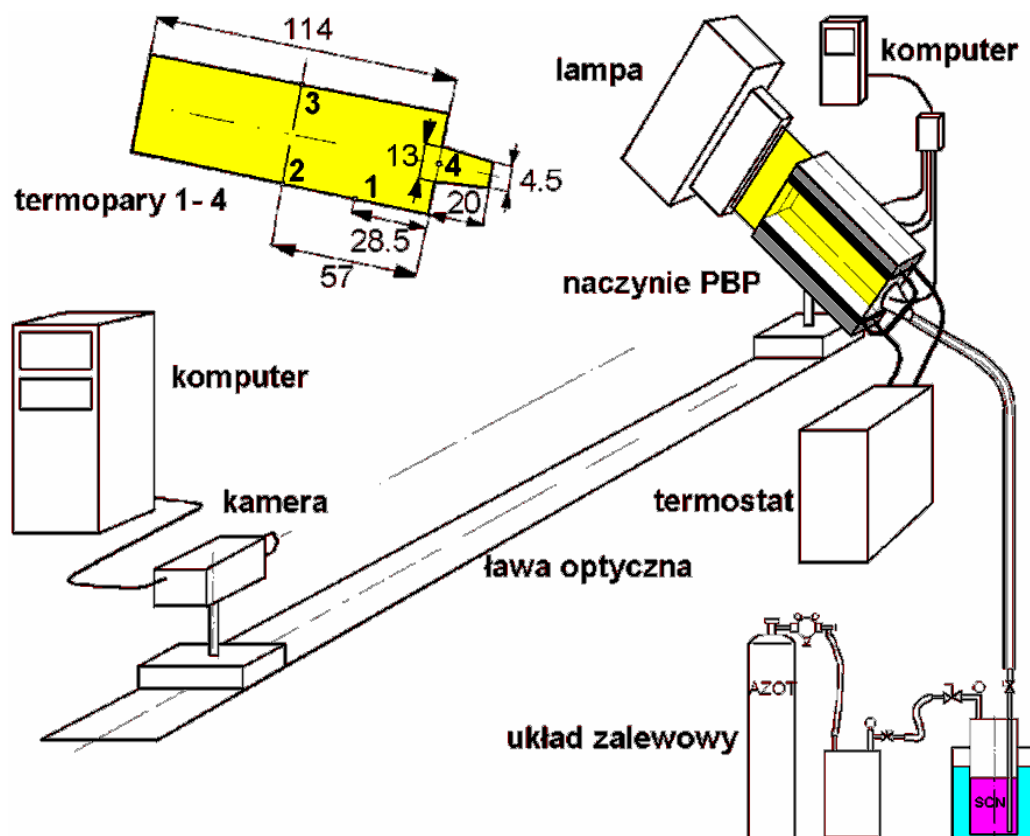
Cyfrowe obrazy posiewu znajdującego się w przepływie są podstawą wykorzystywanych w pracy metod pomiaru pól prędkości i temperatury. Narzędziem pomiarowym w tych badaniach jest kamera CCD połączona z procesorem obrazowym i umożliwiająca cyfrową rejestrację obrazów przepływu w przekrojach wyróżnionych przez nóż świetlny. Rejestracja obrazów odbywa się z kierunku prostopadłego do płaszczyzny światła. Komorę modelującą formę odlewniczą umieszczano na ławie optycznej i obserwowano przy pomocy kamery przesuwanej wzdłuż ławy. Podstawowe elementy układu do rejestracji obrazów, pokazane schematycznie na rys. 1, to:

- kamera,
- komputer,
- karta akwizycji obrazów w komputerze,
- nóż świetlny – liniowe źródło światła służące dla wytworzenia płaszczyzny świetlnej o szerokości 100 mm i grubości 1-2 mm,
- system silników krokowych oraz
- układ zwierciadeł.

Płaszczyznę obserwacji wybierano przez oświetlenie wnętrza komory warstwą świetlną formowaną przez układ optyczny oświetlacza halogenowego o mocy 1000 W. Zmiany położenia płaszczyzny oświetlającej umożliwiał system silników krokowych sterujący przemieszczaniem kamery, źródła światła i komory pomiarowej. Program komputerowy sterujący eksperymentem kontrolował ruch

silników krokowych, włączanie oświetlenia, rejestracje temperatury z czujników i proces rejestracji i zapisu obrazów przepływu. Pozwoliło to na automatyzację wcześniej zaprogramowanego przebiegu eksperymentu, łącznie z szybkim wyborem różnych płaszczyzn przekroju przepływu.

Obrazy wykorzystywane do analizy pól temperatury i prędkości metodą hybrydową PIV oraz PIT uzyskiwano wykorzystując trójprzetwornikową kamerę 3CCD typu XC003/P firmy Sony, podłączoną do 32-bitowego modułu akwizycji obrazów AM-STD-RGB (Imaging Tech. Inc.). Kamera ta charakteryzuje się stosunkowo niewielką rozdzielczością wynoszącą 768x542 pikseli. Dla uzyskania precyzyjnych pomiarów pól prędkości użyto wysoko rozdzielczej (1300x1024 pikseli), czarno-białej kamery CCD typu A113P firmy Basler, współpracującej z 16-bitowym modułem akwizycji obrazów AM-DIG (Imaging Tech. Inc.).



Rys. 2. Układ eksperymentalny do badania procesów zalewania i krzepnięcia w modelach form odlewniczych – zalewanie ciśnieniowe, punkty kontroli temperatury

Stosowane karty akwizycji umieszczono w komputerach osobistych klasy PC-Pentium, wyposażonych w szybkie szyny transmisji danych PCI. Rejestrację obrazów wykonywano przy pomocy trzech specjalnie opracowanych programów komputerowych, pozwalających na elastyczny wybór wielkości sekwencji pomiarowej, czasu między obrazami oraz kontrolowanie dodatkowych elementów stanowiska pomiarowego, jak silniki krokowe czy termopary. Dwa z opracowanych programów o nazwach VFGLAB i PCISTD oparte są na systemie czasu rzeczywistego MS-DOS. Ograniczenia tego systemu operacyjnego nie pozwalają na pełne wykorzystanie pamięci współczesnych komputerów. W związku z tym dodatkowo opracowano nowy program akwizycji obrazów AMDIG, oparty o wielowątkowy system operacyjny LINUX i pozwalający na nieograniczone wykorzystywanie zasobów komputerowych. W praktyce oznacza to możliwość rejestracji serii kilkuset obrazów wysokorozdzielczych w pamięci komputera podczas jednej sesji akwizycji. Dodatkową zaletą przejścia z systemu DOS do systemu operacyjnego LINUX jest możliwość zdalnego sterowania i obserwacji procesu rejestracji z wykorzystaniem protokołu TCPIP.

Typowy eksperyment, wymagający rejestracji zmieniających się w czasie pól prędkości, generuje setki kilku-megabajtowych obrazów. Wielokrotne powtarzanie badań dodatkowo zwiększa ilość danych. W związku z tym analiza wyników pomiarów jest możliwa jedynie przy pełnym zautomatyzowaniu tego procesu. Dla filtracji obrazów, analizy pól prędkości i temperatury oraz wyznaczenia położenia frontów fazowych wykorzystano własne programy komputerowe: PIV (korelacyjna anemometria obrazowa), OPFLOW (anemometria metodą potoków optycznych), MY8LOC (specyficzna dla PIV filtracja obrazów), IMGPROC (wielofunkcyjny manipulator obrazów), LFARBE (analiza barw dla metody PIT), MYXVK i BTMESS (pomiar położenia frontów fazowych). Wykorzystanie tych programów w środowisku LINUX umożliwiło tworzenie skryptowego systemu zarządzania wykonywanymi operacjami i pełną automatyzację analizy dużych pakietów obrazowych.

2.2.2. Punktowa rejestracja temperatury

Istotnym parametrem w badaniach przepływów termicznych jest temperatura. Obok pomiarów pól temperatury metodą PIT konieczny jest dokładny pomiar temperatury w wybranych, charakterystycznych punktach układu przepływowego. Jest to szczególnie ważne w systemach zalewanych cieczą (faza wypełniania formy), charakteryzujących się szybkimi zmianami temperatury. W trakcie badań prowadzonych w takich układach stwierdzono konieczność wielopunktowego monitorowania temperatury zarówno cieczy jak i zmieniającej się w czasie wypełniania temperatury ścian naczynia pomiarowego. Informacja o temperaturze ścian naczyń odgrywa istotną rolę przy ustalaniu termicznych warunków brzegowych w symulacjach numerycznych, często niesłusznie upraszczanych jako adiabatyczne czy izotermiczne.

W związku z tym w każdym z przeprowadzanych eksperymentów, niezależnie od rejestracji pól temperatury metodą PIT, monitorowano w sposób ciągły zmiany temperatury w wybranych punktach badanego przepływu, na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych ścianek naczyń ograniczających przepływ oraz w elementach układu stabilizowanych termicznie przez termostaty. Do rejestracji temperatur wykorzystywano termopary i elementy oporowe Pt100 połączone z dwoma wielokanałowymi przetwornikami analogowo - cyfrowymi. Pierwszy z nich to 8 kanałowy rejestrator firmy Advantech opartym na kartach PCLD-779 i PCL-711B, współpracujący z własnym programem akwizycji obrazów VFGLAB. Dokładność pomiaru temperatury dla tego układu wynosiła około $0.2K$. Celem zwiększenia dokładności pomiarów i liczby monitorowanych punktów w części badań wykorzystano specjalistyczny rejestrator firmy Prema. Przyrząd ten umożliwia jednoczesną obsługę 30 czujników temperatury i pomiar temperatury z dokładnością rzędu $0.01K$.

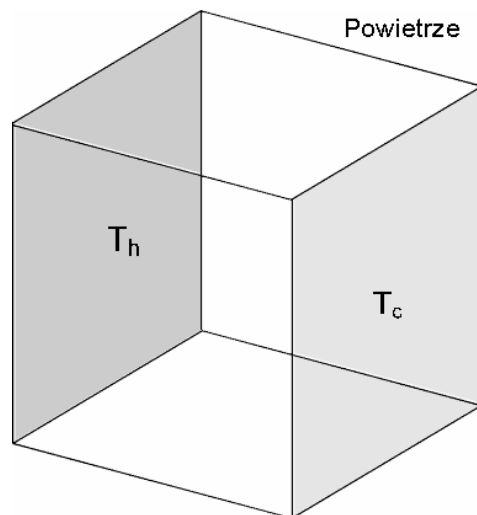
Szczegóły rozmieszczenia punktów pomiaru temperatury podano przy opisie geometrii stosowanych naczyń oraz przy opisach zarejestrowanych przebiegów temperatur w czasie procesu zalewania i krzepnięcia. Częstotliwość rejestracji temperatury wynosiła dla większości eksperymentów 1Hz.

2.3. Wybrane geometrie naczyń

Mając na względzie, że przeprowadzone badania miały na celu sformułowanie wzorców eksperymentalnych, podstawowym zagadnieniem był wybór geometrii naczyń do obserwacji zjawisk przepływowych. Podjęte przy tym decyzje wynikały z konieczności spełnienia warunku, by układ ścian i użyte materiały umożliwiały stosowanie metod optycznych. Po rozważeniu wybrano cztery podstawowe geometrie: a) sześcián grzany różnicowo, b) sześcián z chłodzoną górną powierzchnią, c) pochylony prostopadłościán (bez lub z przegrodami) i d) sześcián otwarty, wypełniany cieczą od dołu. Dla uproszczenia opisu w dalszej części pracy geometrie te są odpowiednio oznaczane skrótami: SRG, SIG, PBP (lub PZP – zależnie od wariantu), oraz SP. Poniżej omówiono podstawowe cechy wybranych układów geometrycznych, zwracając uwagę na kryteria jakimi się kierowano dokonując wyboru, szczegóły konstrukcyjne konieczne dla zdefiniowania warunków brzegowych oraz rozmieszczenie elementów pomiarowych.

2.3.1. Sześcian grzany różnicowo (SRG)

Pierwsza wybrana konfiguracja wiąże się z klasycznym układem, który był przedmiotem wielu prac teoretycznych, numerycznych i eksperymentalnych z wymiany ciepła. Geometrię naczynia stanowi sześcian z dwiema przeciwległymi ściankami pionowymi utrzymywanymi w zadanych stałych temperaturach T_h i T_c (rys. 3). Wymuszony różnicą temperatur przepływ konwekcyjny w takim naczyniu stanowi klasyczny wzorzec (*benchmark*) do testowania programów numerycznych. Obniżenie temperatury jednej ze ścianek izotermicznych poniżej temperatury zmiany fazy T_s cieczy prowadzi do stworzenia wzorca procesów krzepnięcia. Prostota geometrii, dobrze zdefiniowane termiczne warunki brzegowe i własności materiałowe tworzą układ bardzo wygodny do badania wiarygodności obliczeń numerycznych. Warto zauważyć, że mimo tych zalet symulacja procesów krzepnięcia dla tego układu nadal wykazuje poważne rozbieżności w porównaniu ze zdefiniowanymi wcześniej wzorcami eksperymentalnymi (Kowalewski, Rebow [33]).



Rys. 3. Geometria sześcianu różnicowo grzanego (SRG)

Wybór tej dobrze znanej i wielokrotnie zbadanej konfiguracji w niniejszej pracy wynikał z konieczności wstępnego zweryfikowania stosowanych modeli numerycznych. Stosunkowo duży materiał, zarówno eksperymentalny, jak i teoretyczny, pozwalał na identyfikację podstawowych mechanizmów decydujących o przemianie fazowej w obecności czystej konwekcji naturalnej. Rozpatrywana geometria naczynia została wybrana także jako kontynuacja badań opisanych w pracy Banaszka i innych ([5]).

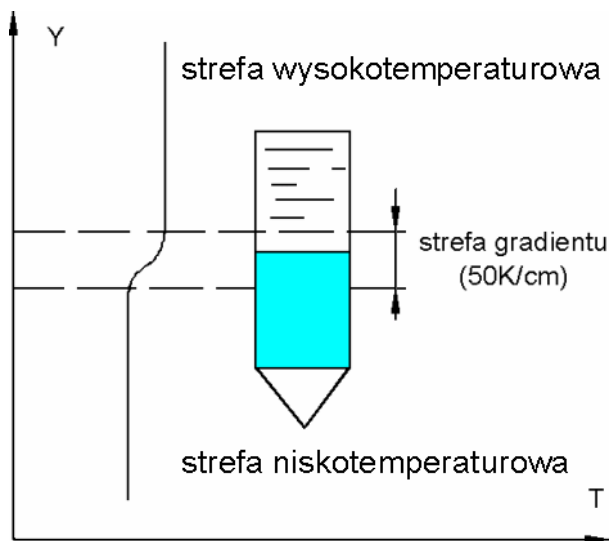
Wymiar wewnętrzny stosowanego do badań sześcianu wykonanego z pleksiglasu wynosi 38 mm a grubość czterech ścianek nieizotermicznych 6 mm . Pozostałe dwie ścianki wykonane zostały z aluminium a ich temperaturę stabilizował przepływ płynu z termostatu przez wewnętrzne kanaliki. Termopary w eksperymentach z układem o opisywanej geometrii były umieszczone tak, by mierzyć temperatury ścianek izotermicznych T_h i T_c . Zgromadzone wcześniej wzorcowe pola prędkości i temperatury oraz położenia frontu przemiany fazowej wykorzystano do przeprowadzenia testów wiarygodności kodów numerycznych, przed ich wykorzystaniem do bardziej skomplikowanych układów.

Zaproponowany w dalszej części pracy nowy wzorzec numeryczny oparty na tej geometrii ma pozwolić na wstępną weryfikację stosowanej metody numerycznej i ocenę wpływu stopnia dyskretyzacji na szybkość i dokładność uzyskanego rozwiązania.

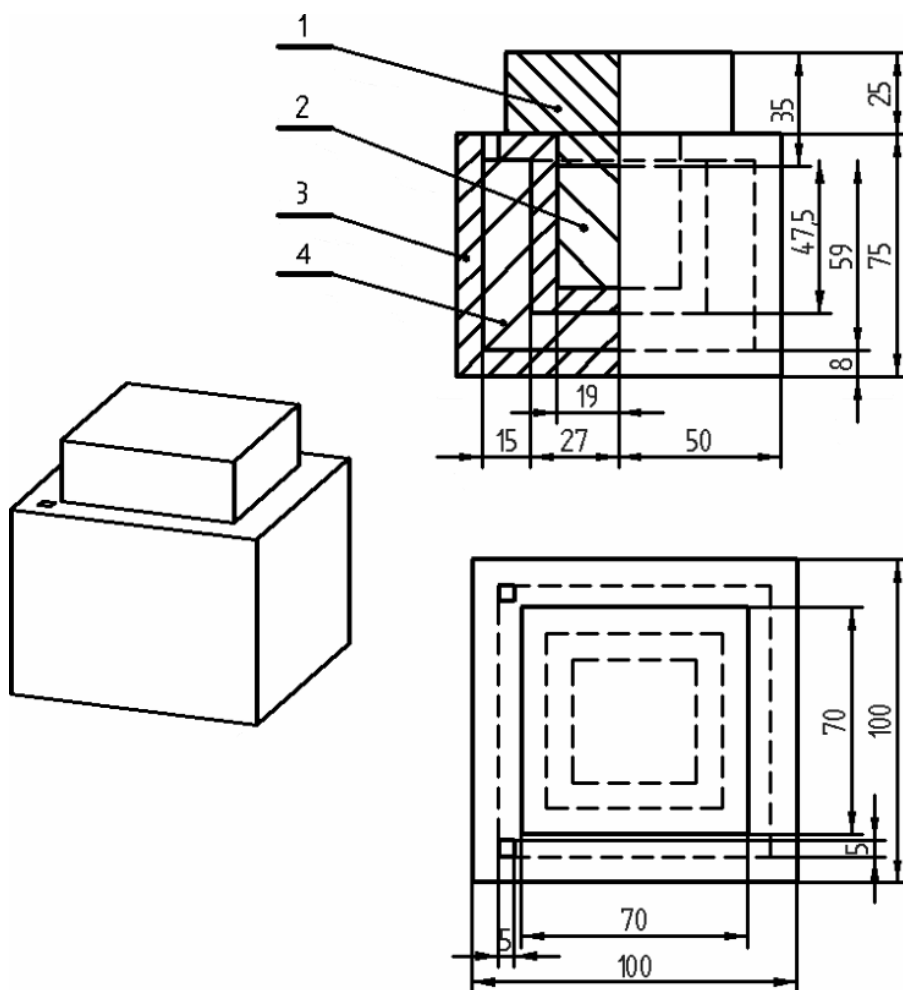
2.3.2. Sześcian z izotermiczną górną ścianką (SIG)

Drugi układ eksperymentalny wzorowano na procesie otrzymywania monokryształów w tzw. konfiguracji Bridgman'a, w której wymusza się konwekcję kierunkową i wykorzystuje w tym celu wytworzony pionowy gradient temperatury (rys. 4). Szybkość wzrostu monokryształu jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury, a jego wielkość zależy od przewodności cieplnej w punkcie topnienia. Skonstruowane dla tego układu naczynie posiada górną ściankę izotermiczną,

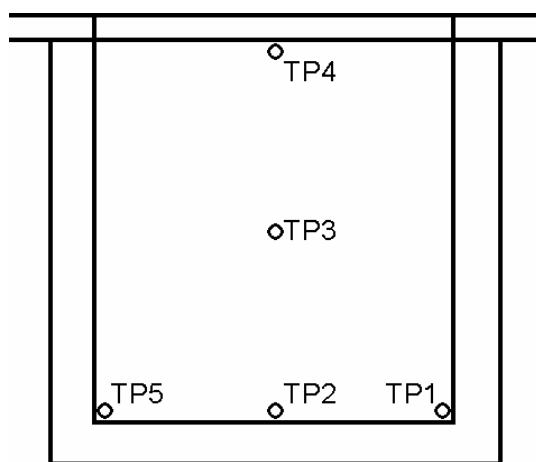
utrzymywaną w temperaturze T_c , poniżej temperatury krzepnięcia cieczy T_s . Pozostałe ścianki wykonano z pleksiglasu. Naczynie zanurzone jest w kąpeli wodnej, zapewniającej kontrolowany przepływ ciepła pomiędzy otoczeniem a krzepnącą w naczyniu cieczą. W konfiguracji Bridgman'a odpowiada to transportowi ciepła od ścianek pieca do materiału tworzącego kryształ.



Rys. 4. Schemat metody Bridgman'a stosowanej w hodowli kryształów



Rys. 5. Schemat geometrii SIG, naczynie wykonane z pleksiglasu z cieczowym płaszczem chłodzącym: 1 - aluminiowy korek, 2 - komora wypełniona cieczą modelową, 3 - zewnętrzna ścianka, 4 - kąpiel zewnętrzna



Rys. 6. Rozmieszczenie termopar typu K (NiCr-NiAl) w sześciennym naczyniu z płaszczem chłodzącym

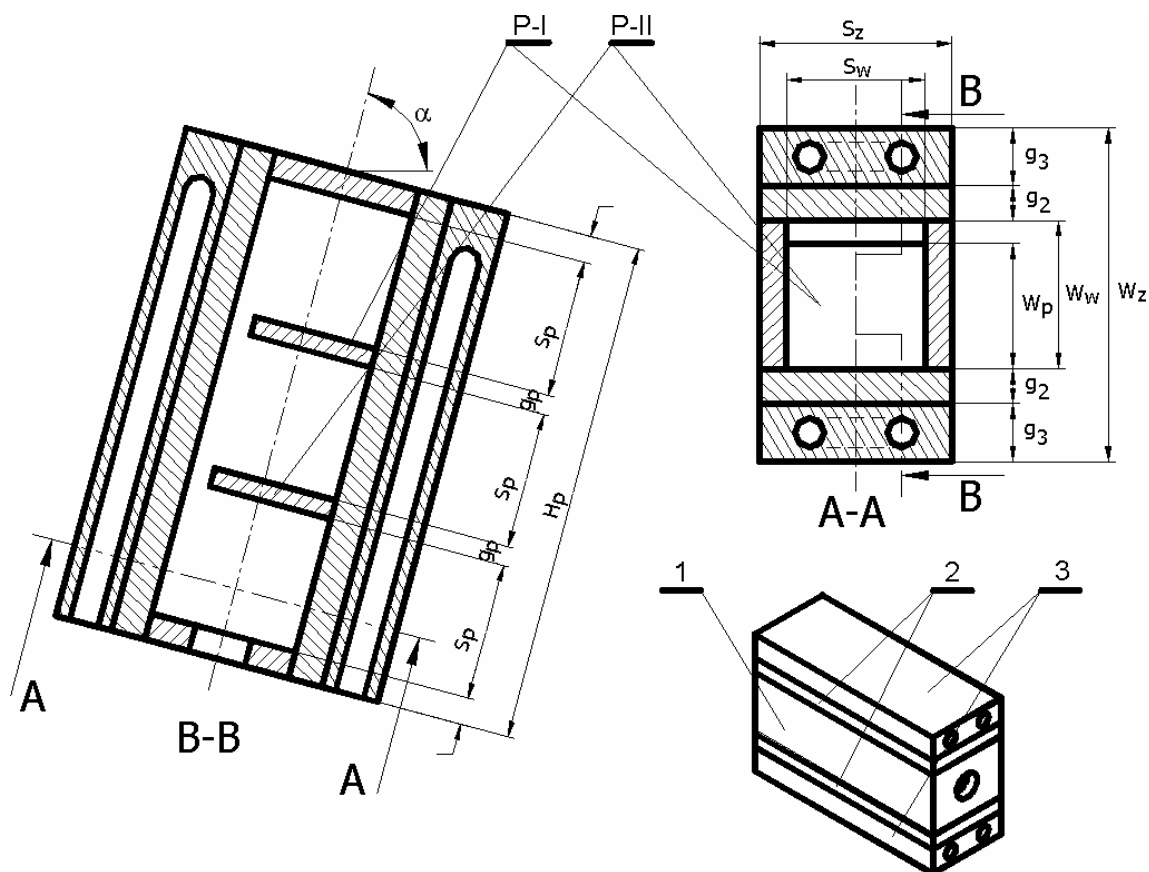
Rysunek 5 ilustruje szczegóły geometrii stosowanego naczynia. Górna ścianka naczynia, wykonana z aluminiowego „korka” (1) zamyka sześcienną komorę (3) wypełnioną materiałem (2) podlegającym przemianie fazowej. Komora umieszczona jest w większym pudełku tak, by w przestrzeni między naczyniami mogła przepływać ciecz z termostatu (4). Wewnętrzne ścianki sześciennego naczynia mają wymiar 38 mm . Zarówno komora, jak i zewnętrzne pudełko wykonano z pleksiglasu o grubości 8 mm . Termiczne warunki brzegowe eksperymentu wyznacza temperatura górnej ścianki T_c oraz temperatura cieczy T_{ext} w otaczającej komorę przepływową kąpieli wodnej. Różnica tych temperatur wymusza konwekcję naturalną w komorze i decyduje o przebiegu procesu krzepnięcia wewnątrz komory. W efekcie tych procesów ustala się strumień ciepła przepływającego przez ścianki z pleksiglasu. Dla kontroli temperatury wewnętrznej powierzchni jednej z tych ścianek służyły dodatkowe termopary rozmieszczone według układu prezentowanego na rys. 6.

Omawiana konfiguracja była przedmiotem wcześniejszych badań Kowalewskiego i Cybulskiego ([30]), które pozwoliły na wskazanie związku między strukturą przepływu konwekcyjnego, a geometrią tworzącego się frontu fazowego (kryształ). W niniejszej pracy zdefiniowano dla tej konfiguracji dwa eksperymentalne wzorce, jeden dla izotermicznego procesu krzepnięcia wykorzystując jako medium wodę destylowaną. Drugi wzorec, zdefiniowany dla poliglikolu, dotyczy nie-izotermicznego procesu krzepnięcia, charakteryzującego się formowaniem się na powierzchni międzyfazowej struktur dendrycznych. Z uwagi na obserwowany dla tej konfiguracji silny wpływ termicznych warunków brzegowych oraz własności termofizycznych użytych cieczy na strukturę przepływu, proponowane wzorce stanowią przydatny element walidacji procesu krzepnięcia w obecności konwekcji naturalnej.

2.3.3. Pochylony prostopadłościan (PBP i PZP)

Modelowanie fazy wypełniania komory odlewniczej przeprowadzono na stanowisku pomiarowym składającym się z nachylonego prostopadłościennego kanału z dwiema ściankami izotermicznymi. Model umożliwia symulacje prostego, quasi dwuwymiarowego zjawiska krzepnięcia między ściankami modelu formy odlewniczej. Wybór takiej geometrii naczynia podyktowany był dążeniem do maksymalnego uproszczenia problemu, tak by w pełni wykorzystać możliwości stosowanych optycznych metody pomiarowych. W trakcie badań modyfikowano wymiary naczynia i jego nachylenie, uzyskując różne reżimy procesu zalewania. Ogólną koncepcję układu schematycznie przedstawiono na rys. 7.

Podstawowy wariant wybranej geometrii naczynia (PBP) składa się z kanału utworzonego między dwiema bocznymi ściankami z pleksiglasu (1), oraz metalowymi ściankami górną i dolną (2) i (3). Naczynie zamykają dwie ścianki wykonane z pleksiglasu. W dolnej ściance znajduje się otwór, przez który wpływa ciecz, a górne zamknięcie pozwala na wprowadzenie płaszczyzny świetlnej z lampy oświetlającej. W drugim wariantcie (PZP), kształt wewnętrznej komory wypełnianej cieczą modelową był dodatkowo zmodyfikowany przez umieszczenie w niej dwóch wykonanych z pleksiglasu przegród P-I i P-II.



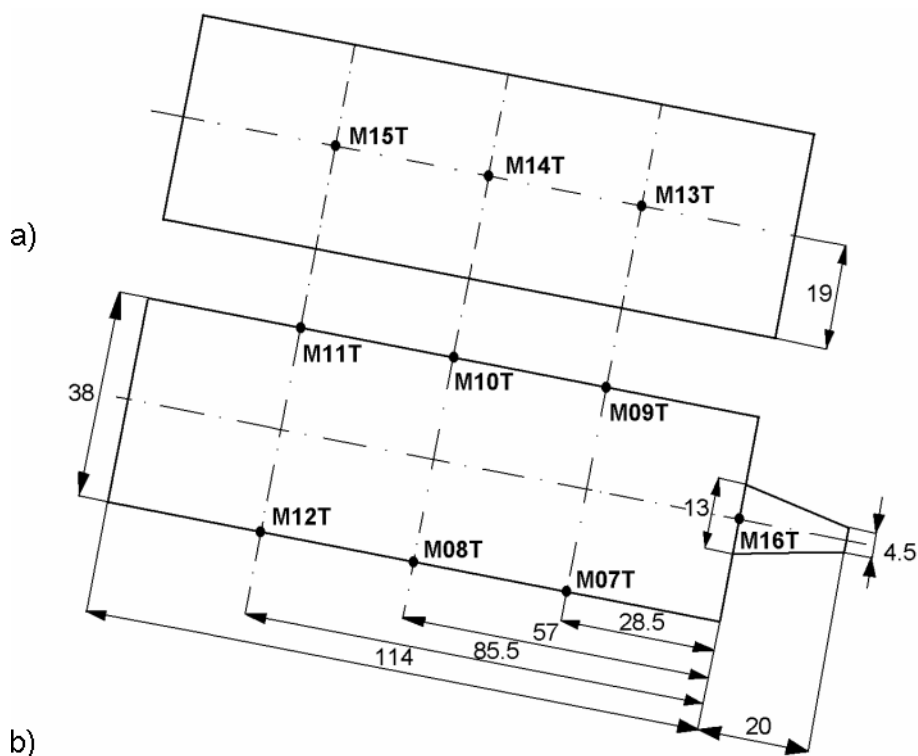
Rys. 7. Pochylony prostopadłościan (PBP): (1) ścianki z pleksiglasu, (2) i (3) okładki metalowe z wewnętrznym kanałem dla cieczy chłodzącej; przegrody P-I, P-II (wariant PZP), α - kąt pochylenia

Tabela 1. Wymiary pochylonego prostopadłościanu (PBP i PZP, porównaj rys. 7)

Wariant	S_z	S_w	W_z	W_w	W_p	H_p	S_p	g_p	g_2	g_3
1	53	38	84	38	32.5	132	34.6	5	7	16
2	53	38	86	38	32.5	132	34.6	5	24	0

Gorąca ciecz modelowa wypełniająca kanał mogła być obserwowana przez przezroczyste ścianki boczne wykonane z pleksiglasu, usytuowane pionowo w przekroju A-A (rys. 7). Otwór wlewowy, umieszczony w ścianie równoległej do przegród, widoczny jest na przekroju B-B i w rzucie aksonometrycznym. Ścianki metalowe wykonane z płyty miedzianej wyposażono w kanałiki (uwidocznione w przekroju A-A) do stabilizacji temperatury przy pomocy obiegu cieczy z termostatu. Początkowo system chłodzący składał się z miedzianej okładki (2) i stykającej się z płytką (3) wykonaną z aluminium. Ten układ okazał się jednak nieefektywny i został zastąpiony okładkami wykonanymi tylko z miedzi.

W komorę wmontowano łącznie 10 termopar typu K (Ni-NiCr) w miejscach pokazanych na rys. 8. Po trzy termopary typu K umieszczono w pionowej płaszczyźnie centralnej każdej ze ścianek chłodzonych w taki sposób, by złącza pomiarowe znajdowały się w odległości 1 mm od powierzchni stykającej się z cieczą modelową. Kolejne trzy termopary umieszczone w tylnej ścianie (w stosunku do kamery) służyły do pomiaru temperatury cieczy na styku z naczyniem. Ostatnią termoparę umieszczono w osi otworu wlewowego. Stabilizację temperatury zapewniają sprzężone z termostatem czujniki oporowe Pt100 umieszczone w ściankach metalowych.



Rys. 8. Schemat rozmieszczenia czujników temperatury w komorze zalewowej (porównaj Tabela 2)

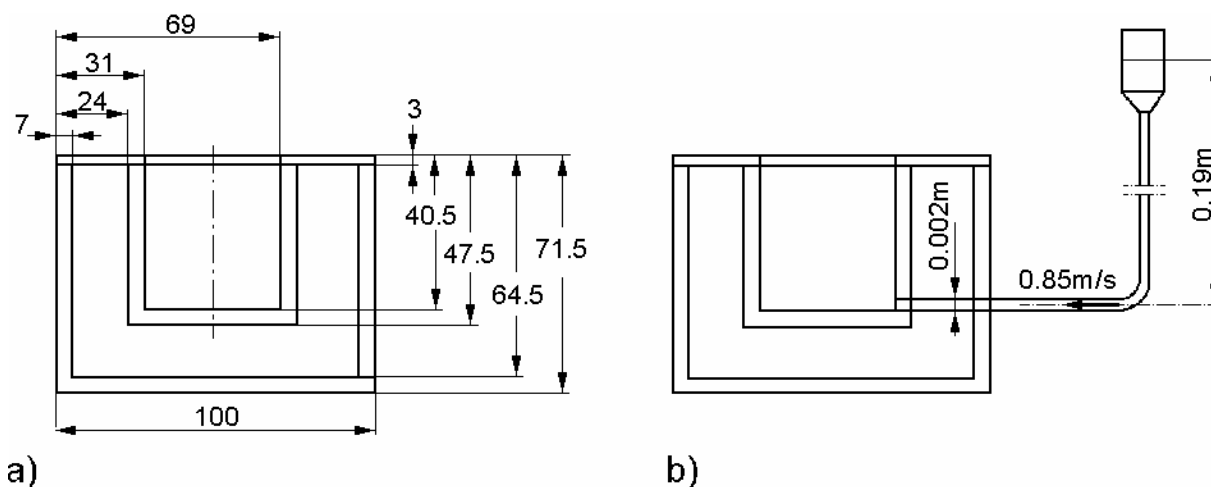
Tabela 2. Legenda czujników temperatury rozmieszczonych w komorze zalewowej

Symbol	Opornik/Termopara	Usytuowanie
M01R	Pt-100	w zbiorniku termostatu ścianki dolnej
M02R	Pt-100	w zbiorniku termostatu ścianki górnej
MCJ	Pt-100	mierzący temperaturę otoczenia
M07T	typ K	w dolnej okładce metalowej
M08T	typ K	w dolnej okładce metalowej
M09T	typ K	w górnej okładce metalowej
M10T	typ K	w górnej okładce metalowej
M11T	typ K	w górnej okładce metalowej
M12T	typ K	w dolnej okładce metalowej
M13T	typ K	w ściance tylnej z pleksiglasu względem kamery
M14T	typ K	w ściance tylnej z pleksiglasu względem kamery
M15T	typ K	w ściance tylnej z pleksiglasu względem kamery
M16T	typ K	w otworze wlotowym

2.3.4. Sześcián otwarty (SP)

Proces krzepnięcia w otwartych naczyniach wypełnianych cieczą od dołu jest typowy dla wielu procesów odlewniczych. Modelowanie takiego procesu przeprowadzono w naczyniu o kształcie sześciennym pokazanym na rys. 9, będącym prostą modyfikacją wcześniej omawianego sześcianu z izotermiczną ścianką górną (SIG). Geometrię otwartego sześcianu (SP) wybrano dla przeprowadzenia symulacji procesu zalewania formy odlewniczej, oddawania ciepła, stygnięcia oraz wielopłaszczyznowego krzepnięcia odlewu. Prowadzone przy jego użyciu badania pozwalają na określenie wzorcowych procesów zalewania od dołu i jednoczesnego tworzenia się frontu

krzepnięcia na pięciu ściankach naczyń. Podczas fazy wypełniania, szczególnie z większą prędkością, obserwowano silną cyrkulację cieczy, przechodzącą często w przepływ turbulentny i wyraźną deformację powierzchni swobodnej wywołaną napływającym strumieniem cieczy.



Rys. 9. Schemat otwartego naczynia w kształcie sześciangu (SP) stosowanego do modelowania procesu napelniania i krzepnięcia, a) gabaryty, b) układ zalewowy

Wymiary wykorzystywanego naczynia są identyczne jak dla konfiguracji SIG (rys. 5 i 6), jedynie usunięto górną ściankę metalową a w prawym dolnym narożu dna naczynia wykonano otwór wlewy o średnicy 2 mm. Przepływy obserwowano przez przezroczyste ścianki boczne i przez otwartą górną powierzchnię. Komorę zanurzano w kąpeli wodnej o temperaturze poniżej temperatury krzepnięcia cieczy. Strumień ciepła oddawanego do zewnętrznej kąpeli jest odpowiedzialny za tworzenie się na wszystkich 5 ściankach komory fazy stałej. Pomiar temperatury cieczy wykonywano w trzech wybranych punktach na ściance bocznej. Rozmieszczenie termopar było identyczne, jak w opisanym wcześniej naczyniu typu SIG (rys. 6). Badania przeprowadzone dla tej konfiguracji obejmowały głównie pomiar kształtu frontu fazowego i struktury pól prędkości podczas wypełniania komory cieczą i podczas procesu krzepnięcia.

2.4. Ciecze modelowe i materiały stosowane w badaniach

Poniżej opisane są aspekty związane z doбором materiałów – zarówno cieczy modelowych, jak i materiałów konstrukcyjnych samych naczyń. Wybór obu grup materiałów w zasadniczy sposób wpływa na skuteczność przeprowadzanych badań. Dokładna znajomość własności termofizycznych stosowanych materiałów i cieczy jest warunkiem koniecznym dla wykorzystania zdefiniowanych wzorców eksperymentalnych do atestacji symulacji numerycznych. Dlatego ograniczono się tylko do substancji i materiałów, których własności są dobrze opisane w literaturze.

Biorąc pod uwagę wcześniej opisywane charakterystyki stosowanych metod pomiarowych zdecydowano, aby jako ciecze modelowe użyć: wodę destylowaną, succinonitril (wzór chemiczny $\text{SCN NCCH}_2 \text{CH}_2 \text{CN}$), glikol polietylenowy (wzór chemiczny $\text{H(OCH}_2 \text{CH}_2)_n \text{OH}$) i glicerynę (wzór chemiczny $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$). Podstawowe własności tych cieczy zebrano w Tabeli 3. Wybór tych cieczy podyktowany był dwiema podstawowymi cechami: przezroczystość i niska temperatura krzepnięcia. W przypadku wody jej dodatkową zaletą jest niska lepkość, pozwalająca na symulacje typowych dla wypełniania form odlewniczych przepływów z wysoką liczbą Reynolds'a. Wybór glikolu polietylenowego (dalej w skrócie oznaczanego przez PEG 900) i succinonitrylu (SCN) został podyktowany charakterem przejścia fazowego, z typowym dla krzepnięcia metali narastaniem dendrytów i efektem przechłodzenia. Nie bez znaczenia jest również fakt, że obie wybrane ciecze są opisane w literaturze jako tzw. substancje analogowe, używane do modelowania procesów związanych z krzepnięciem.

Tabela 3. Własności termofizyczne cieczy modelowych i materiałów konstrukcyjnych naczyń badawczych

Wartości tabelaryczne	Wielkość fizyczna	Symbol	Jednostki	Woda ¹⁾	PEG 900 ¹⁾	Gliceryna ²⁾	SCN ¹⁾	Pleksyglas	Miedź ⁵⁾	Aluminium	
	Gęstość	ρ_l	[kg m ⁻³]	1000.000	1100.000	1263.000	985.000				
		ρ_s						1180.000	8933.000	2702.000	
	Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu	c_{pl}	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	4217.800	2260.000	2372.000	2000.000				
		c_{ps}						1500.000	385.000	903.000	
	Przewodność cieplna	k_l	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0.552	0.188	0.285	0.223				
		k_s						0.200	401.000	237.000	
	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	β	[K ⁻¹]	-0.070x10 ⁻³	0.760x10 ⁻³	0.480x10 ⁻⁴	0.810x10 ⁻³				
	Temperatura topnienia	T_l	[K]	273.000	308.000		329.000				
		T_s			306.000		327.000				
Lepkość kinematyczna	ν	[m ² s ⁻¹]	1.8x10 ⁻⁶	108.3x10 ⁻⁶	1180x10 ⁻⁶	2.6x10 ⁻⁶					
Ciepło utajone	λ	[Jkg ⁻¹]	335.0x10 ³	167-196x10 ³		46.5x10 ³					
Wartości w obliczeniach numerycznych	Wielkość fizyczna	Symbol	Jednostki	Woda ¹⁾	PEG 900 ¹⁾	Gliceryna ³⁾		Pleksyglas	Powietrze ⁴⁾		
	Gęstość	ρ_l	[kg m ⁻³]	999.800	1100.000	1271.900				1.225	
		ρ_s		916.800	1100.000			1180.000			
	Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu	c_{pl}	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	4212.000	2260.000	2298.000				1006.430	
		c_{ps}		2116.000	2260.000			1388.690			
	Przewodność cieplna	k_l	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0.566-0.572	0.188	0.284				0.0242	
		k_s		2.260	0.188			0.195			
	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	β	[K ⁻¹]	wzór (2.2)	0.00076	0.00047					
	Temperatura topnienia	T_l	[K]	273.000	308.000						
		T_s		273.300	306.000						
Lepkość dynamiczna	ν	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]	1.789x10 ⁻³	tabela 4	wzór (2.1)				1.789x10 ⁻⁵		
Ciepło utajone	λ	[Jkg ⁻¹]	335000.000	167-190x10 ³							
Napięcie powierzchniowe	σ	[Nm ⁻¹]	0.075		0.065						

Wartości dla temperatury: 1) topnienia; 2) 293K; 3) 298K; 4) 288K; 5) 300K

Drugą grupą są materiały konstrukcyjne użyte do budowy naczyń badawczych. Także i w tym przypadku warunek przezroczystości ścianek stanowił istotne kryterium selekcji. Dodatkowo dla naczyń typu PZP, PBP i SIG istotny jest przepływ ciepła przez przezroczyste ścianki naczyń. Wybrano pleksiglas jako podstawowy materiał budowy naczyń, uznany za optymalny ze względu na przezroczystość, łatwość obróbki mechanicznej i dobrze znane własności termo-fizyczne. Do konstrukcji termostatowanych ścianek metalowych stosowano aluminium lub miedź. Jako ciecz chłodzącą w obiegu termostatów opływająca naczynia typu PZP i PBP stosowano wodę lub przezroczysty glikol etylenowym.

W Tabeli 3 umieszczono komplet danych materiałowych cieczy modelowych i materiałów konstrukcyjnych użytych w badaniach. Pierwsza część tabeli obejmuje wartości termofizyczne używane dla opracowywania założeń planowanych eksperymentów. Druga część tabeli prezentuje wartości używane do wykonania obliczeń numerycznych. Widoczne różnice wynikają z faktu, że korzystano z różnych źródeł: tablic, danych fabrycznych i Internetu. Różnorodność danych, a równocześnie brak dostępu do bazy z kompletem wartości dla wymaganych własności powoduje, że należy mieć ograniczone zaufanie do wiarygodności wykorzystywanych źródeł informacji. Między innymi z tego powodu w dwóch przypadkach wykonywano własne pomiary. Wcześniejsze badania wykonane za pomocą aparatu płytowego dotyczyły pomiaru współczynnika przewodności cieplnej pleksiglasu. Zmierzona wartość $k=0.195$ W/(mK) różni się nieco od wartości katalogowej $k=0.2$ W/(mK). Silne zmiany lepkości i gęstości niektórych cieczy w funkcji temperatury wymagają szczególnej uwagi. Dla gliceryny i poliglikolu (PEG 900) zależność lepkości kinematycznej w funkcji temperatury wyznaczono wiskozymetrem Hepplera. Dla materiału PEG 900 zmierzone wartości (Tabela 4) implementowano bezpośrednio w symulacjach numerycznych. Zmierzone zmiany lepkości gliceryny przybliżono wielomianem (Sobiecki [58])

$$\mu(T) = 24301.95 - 309.8748 \cdot T + 1.482784 \cdot T^2 - 0.003155546 \cdot T^3 + 2.5198E - 06 \cdot T^4, \quad (2.1)$$

który później użyto w obliczeniach numerycznych. Anomalne zmiany gęstości wody w funkcji temperatury zostały również opisane wielomianem, zdefiniowanym na podstawie danych literaturowych (Kowalewski [33]):

$$\rho(T) = -5150.43 + 78.48118 \cdot T - 0.3769827 \cdot T^2 + 8.10902 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 6.621398 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Tabela 4. Zmiany wartości lepkości kinematycznej PEG-900 w funkcji temperatury

Temperatura [K]	Lepkość kinematyczna $\times 10^6$, [m ² /s]
307	108.311
308	103.216
309	98.300
310	93.875
311	89.979
312	86.188
313	82.397
314	78.383
315	75.295
316	72.171
317	69.479
318	66.725
319	63.895