

Eksperymentalna weryfikacja zjawiska wymiany masy i energii w medium porowatym

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, WŁADYSŁAW CIERNIAK, JERZY GORGOŃ, ROBERT NOWAK

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Analiza numeryczna dowolnego przypadku przepływowego wymaga weryfikacji eksperymentalnej. Konieczność weryfikacji wzrasta przy bardziej skomplikowanych przypadkach przepływowych takich jak nieizotermiczna wymiana masy pomiędzy złożem porowatym a omywającą go strugą powietrza.

Elementarnym problemem z którym eksperymentator spotyka się w przypadku pomiarów wielkości przepływowych w materiale porowatym jest brak możliwości bezpośredniego pomiaru wartości niektórych wielkości, jak choćby prędkości płynu w porach. Stąd też konieczne jest zastosowanie pośrednich metod pomiarowych umożliwiających weryfikację danych numerycznych. Opisany w artykule eksperyment ma na celu pośrednią weryfikację wyników analiz numerycznych opisujących wymianę masy i energii pomiędzy strugą swobodną a złożem porowatym.

Warunkiem dobrze przeprowadzonego eksperymentu, w którym medium pomiarowe stanowi powietrze jest zapewnienie znanych oraz przede wszystkim stałych warunków przepływowych w przestrzeni wlotowej do komory pomiarowej.

W artykule opisano proces budowy stanowiska pomiarowego (rys. 3) spełniającego żądane kryteria, oraz przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych wymiany energii pomiędzy złożem porowatym a omywającą go strugą powietrza.

Słowa kluczowe:

Wstęp

Wymiana masy i energii pomiędzy złożem porowatym a otoczeniem nie jest zagadnieniem nowym. Na przestrzeni minionych kilkunastu lat problem ten był poruszany przez wielu badaczy na całym świecie. W znakomitej większości przypadków prace związane z tematem dotyczyły sposobu spalania paliw gazowych w złożu porowatym [Zhou, Pereira, 1997; Dillon, 1999], bądź też bardziej od strony inżynierii procesowej, filtracji lub sedymentacji cząstek stałych w wypełnieniach ceramicznych [Tobiś, 2006]. W przypadku prowadzenia eksperymentów w zakresie spalania paliw gazowych wewnątrz materiału porowatego podstawowymi parametrami mierzonymi były moc cieplna wytwarzana przez urządzenie oraz skład spalin, ze szczególnym naciskiem na zawartość tlenków węgla (CO) oraz azotu (NO_x).

W opracowaniach z drugiej grupy, szczególnie istotnymi parametrami były całkowity spadek ciśnienia mierzony na wlocie i wylocie wypełnienia porowatego bądź na całym aparacie oraz całkowita sprawność urządzenia.

Wspólnymi cechami obu grup prac związanych z wymianą masy lub/i energii w złożu porowatym były przede wszystkim konfiguracja geometryczna złoża; w każdym przypadku płyn penetrował złożę, które w całości wypełniało pewną przestrzeń, oraz rodzaj stosowanych wypełnień; w każdym przypadku złożę składało się z regularnych elementów (kulki, walce, sześciiany) przestrzennie jednoznacznie opisanych.

Trudno jest z kolei znaleźć w literaturze, danych dotyczących badań podstawowych, opisujących wymianę masy i energii w niestandardowych konfiguracjach przestrzennych.

Wyjątek stanowią przypadki opisujących konkretne obiekty w jednej, konkretnej konfiguracji przestrzennej, takich jak zroby [Ruxiang, 2009] lub zwałowiska odpadów pogórnich dla których wykonano eksperymenty opisujące rozkład wektora prędkości wewnątrz struktury porowatej.

Z tego powodu zdecydowano się na rozpoczęcie serii eksperymentów podstawowych mających na celu przybliżenie procesu wymiany masy i energii w odmiennej konfiguracji przestrzennej niż dotychczas spotykane.

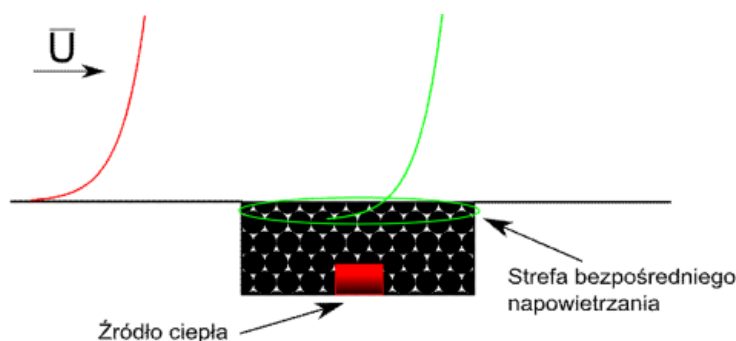
Opisany w artykule eksperyment może być przydatny do weryfikacji wyników analiz numerycznych opisujących wymianę masy i energii pomiędzy strugą swobodną a złożem porowatym.

Eksperyment, ze względu na skomplikowaną naturę zjawiska, musi być przeprowadzony z jak najmniejszą liczbą zmiennych warunków brzegowo-początkowych. Oznacza to precyzyjną konstrukcję tunelu aerodynamicznego w którym zostanie przeprowadzony eksperyment.

Cel i założenia eksperymentu

Celem podstawowym planowanego eksperymentu było określenie sposobu penetracji złoża porowatego przepływającą stycznie do niego strugą powietrza oraz jej wpływu na proces wymiany masy i energii pomiędzy złożem a omywającą go strugą powietrza.

Ideę eksperymentu opisuje rys. 1. Strumień powietrza przepływający stycznie do prostokątnej kawerny wypełnionej złożem porowatym powoduje zmienny rozkład ciśnień statycznych na jego górnej powierzchni. W wyniku zaistniałego gradientu podłużnego ciśnienia jest spodziewany wpływ na intensywność procesu wymiany masy pomiędzy złożem a otaczającą strugą.



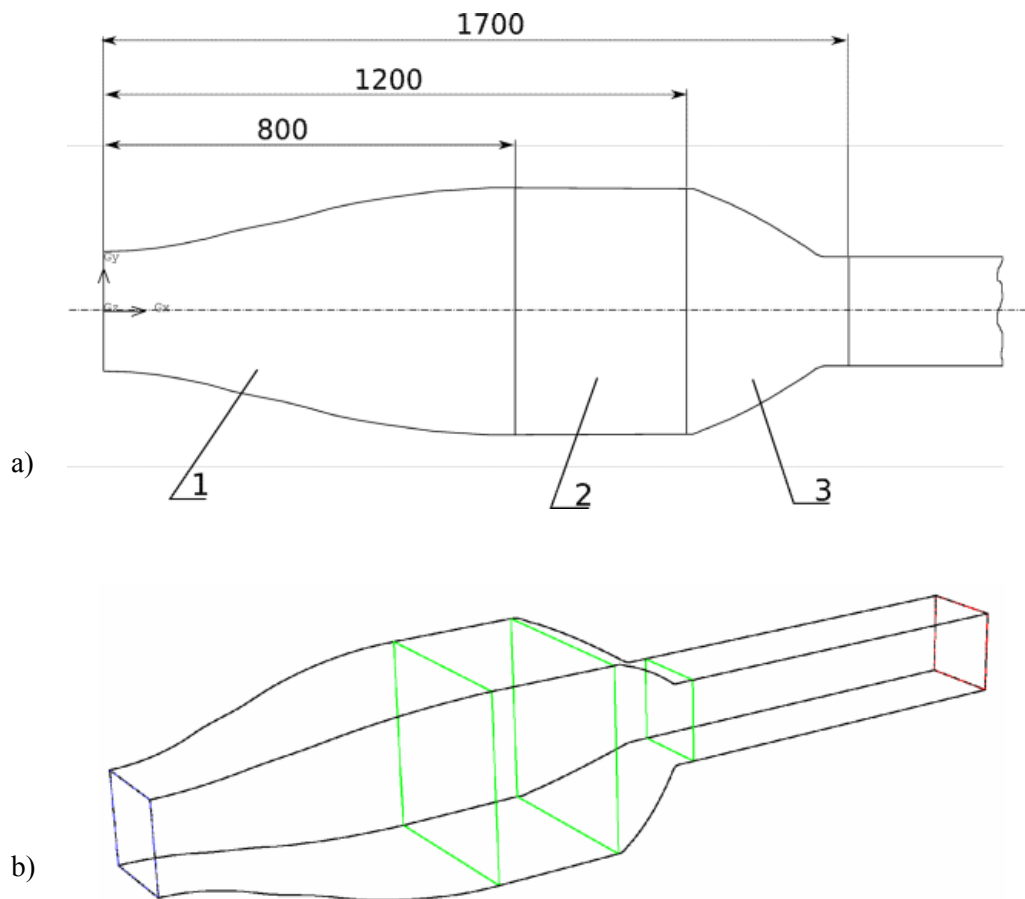
Rys. 1. Idea eksperymentu

Stanowisko pomiarowe

Pierwotna, wstępna realizacja stanowiska obarczona była błędami konstrukcyjnymi w części dolotowej powodującymi niewłaściwy sposób prowadzenia strugi powietrza od wentylatora zasilającego do przekroju wlotowego stanowiska. W wyniku przepływ strugi powietrza nad złożem nie był stacjonarny z powodu nieosiowego ustawienia wentylatora, oraz licznych nieszczelności. W celu wyeliminowania tych wad należało przekonstruować stanowisko w części dolotowej.

Właściwa konstrukcja tunelu pracującego w układzie tłocznym, pomiędzy wentylatorem dostarczającym powietrze do przestrzeni pomiarowej oraz przekrojem wlotowym do tunelu pomiarowego powinna zawierać komorę wyrównawczą. Komora, której schemat wraz z naniesionymi wartościami wymiarów głównych zamieszczono na rys. 2a składa się z dyfuzora (1), przestrzeni kierowniczej (2) oraz konfuzora (3). Zastosowanie właściwie skonstruowanej komory umożliwia uzyskanie stabilnych w czasie pól prędkości strugi powietrza w przestrzeni wlotowej tunelu pomiarowego.

Kluczowym elementem komory wyrównawczej jest dyfuzor. Jego rolą jest wstępne „uspokojenie” mocno sturbulizowanej strugi powietrza wychodzącej z wentylatora dzięki konwersji energii kinetycznej przepływającej strugi płynu (w tym przypadku powietrza) na energię związaną z przyrostem ciśnienia statycznego na ścianach dyfuzora. Negatywną w ujęciu sprawności transportu masy powietrza w dyfuzorze cechą przepływu jest zjawisko separacji warstwy przyściennej występujące w przypadku wystąpienia zbyt



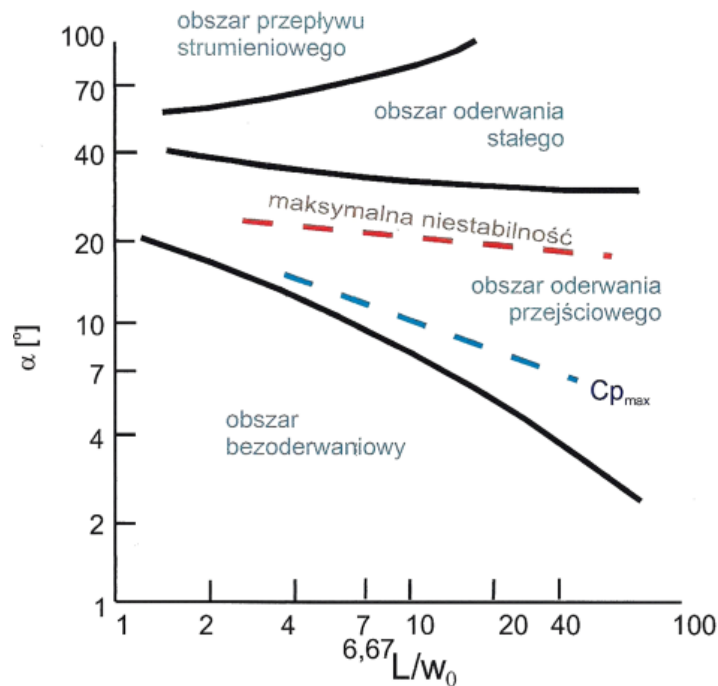
Rys. 2. Schemat komory wyrównawczej tunelu dolotowego.
a) schemat wraz z głównymi wymiarami, b) widok przestrzenny modelu numerycznego

dużego gradientu ciśnienia na ścianie dyfuzora. Powszechnie uznaje się [Skotniczny, 2004], że rodzaj przepływu płynu w dyfuzorze jest głównie uwarunkowany jego wielkościami geometrycznymi; kątem rozwarcia ścian oraz stosunkiem L/w_0 , gdzie L oznacza długość dyfuzora a w_0 szerokość wlotu dyfuzora. Na podstawie tych informacji, we wstępnym procesie projektowania dobór właściwej geometrii dyfuzora odbywa się przy pomocy nomogramu [Skotniczny, 2004], zamieszczonego na rys. 3.

Długość dyfuzora była ograniczona ze względów konstrukcyjnych do wartości $L = 800$ mm. Całkowita długość Stanowska pomiarowego musiała być mniejsza od 5 m, z uwagi na brak stosownego pomieszczenia laboratoryjnego mogącego pomieścić stanowisko o większych gabarytach. Zadana długość dyfuzora, oraz szerokość wylotu wentylatora w_0 przy stosunku $L/w_0 = 3,2$ przy zadanej wartości przekroju wylotowego 500×500 mm, wymusiły zastosowanie dyfuzora o całkowitym kącie rozwarcia ścian wynoszącym maksymalnie $\alpha = 18^\circ$. Nanosząc te wartości na nomogram (rys. 3) można zauważyć, że projektowany dyfuzor mieści się tuż nad linią opisującą przepływ bezoderwaniowy, w pobliżu linii opisującej maksymalny współczynnik odzysku ciśnienia statycznego $C_{p \max}$.

Kolejną istotną częścią komory wyrównawczej jest przestrzeń kierownicza. W omawianym przypadku zrezygnowano z wypełnień typu „plaster miodu” z uwagi na brak konieczności wyeliminowania zjawiska skręcenia osiowego strugi powietrza (efekt znany z tuneli aerodynamicznych pracujących w układzie ssącym, z wentylatorem osiowym). Konieczne było natomiast zastosowanie filtrów wyrównawczych wykonanych z siatek nylonowych o podziałce 100 (100 oczek/cal²). Filtry wyrównawcze, stanowiące wypełnienia o równomiernym spadku ciśnienia na całej powierzchni miały za zadanie zredukowanie wpływu ewentualnego oderwania warstwy przyściennej w dyfuzorze dolotowym oraz „przeniesienia” fluktuacji ciśnienia do przekroju wylotowego komory wyrównawczej. Siatki nylonowe zostały rozpięte na wlocie i na wylocie przestrzeni kierowniczej.

Ostatnim elementem mającym zapewnić precyzyjne doprowadzenie strugi powietrza do tunelu pomiarowego był konfuzor. W idealnym przypadku, kontrakcja opisywana jako stosunek A_1/A_2 ; gdzie A_1 pole



Rys. 3. Nomogram typowych przepływów. Kropką zaznaczono konstruowany dyfuzor

powierzchni przekroju wlotowego, A_2 pole powierzchni przekroju wylotowego powinna być większa od 4. W omawianym przypadku, ze względów konstrukcyjnych wartość kontrakcji wynosiła 3.33.

W kolejnej fazie projektowania należało sprawdzić wstępne założenia konstrukcyjne. Przeprowadzono eksperyment numeryczny, którego celem była weryfikacja sposobu prowadzenia strugi powietrza w komorze wyrównawczej. Na rys. 2b zamieszczono schemat geometrii komory wyrównawczej z fragmentem tunelu pomiarowego. Geometria została stworzona w preprocesorze Gambit, natomiast obliczenia wykonano we Fluencie.

Obliczenia przeprowadzono z użyciem modelu $k-\omega$ -SST [Fluent User Manual, 2006] przy założeniu niestacjonarnego przepływu, z krokiem czasowym $\Delta t = 0.1$ s.

Wyniki symulacji opisujące potencjalne strefy separacji warstwy przyściennej w dyfuzorze dolotowym przedstawiono na rys. 4. Rysunek 4a przedstawia zasięg strefy oderwania dla przypadku przepływu strugi powietrza z prędkością wlotową $U_{in} = 1$ m/s, natomiast rys. 4b przedstawia podobny przykład dla prędkości $U_{in} = 5$ m/s.

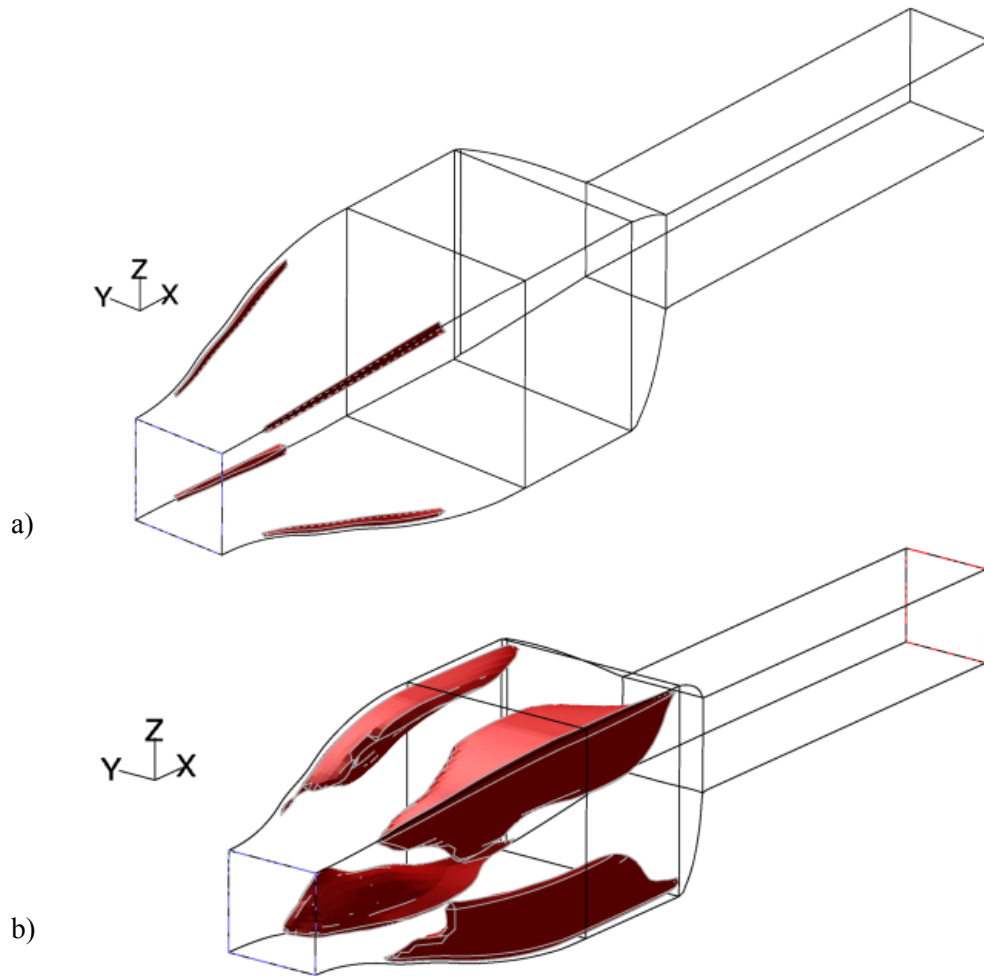
Ponadto, na rys. 5 zamieszczono rozkład wartości modułu prędkości w płaszczyźnie leżącej w osi symetrii komory. Linie wartości prędkości wskazują na równomierny rozkład pól prędkości w przekroju.

Eksperyment główny– rozmieszczenie termopar w złożu porowatym

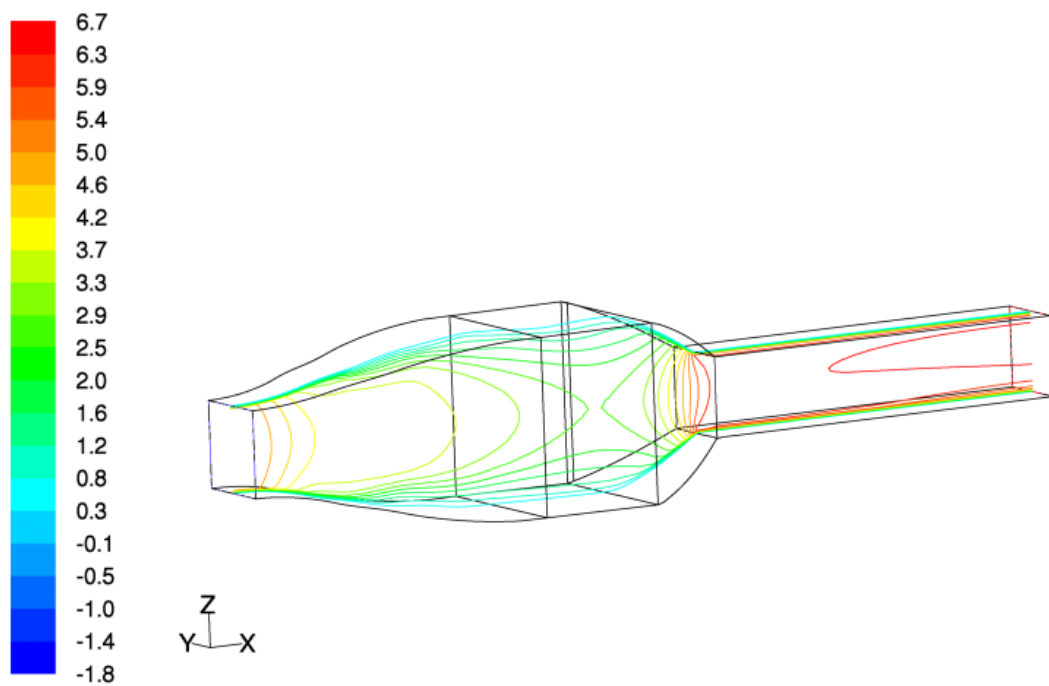
Zastosowany przyrząd pomiarowy umożliwiał jednoczesny pomiar zespołem 20 termopar, ponumerowanych od T0 do T19. Termopary zostały ułożone w 3 rzędach wewnątrz złoża porowatego (rys. 4); oddalone od siebie pionie o 20 mm każda.

Zademonstrowany na rys. 4 sposób rozmieszczenia termopar wymagał zastosowania dodatkowego zabiegu umożliwiającego ich precyzyjne pozycjonowanie wewnątrz złoża porowatego. Odbywało się to dzięki zastosowaniu siatki z drutu $\phi 0.3$ rozpostartej pomiędzy przeciwległymi ścianami komory. (fotografia na rys. 5).

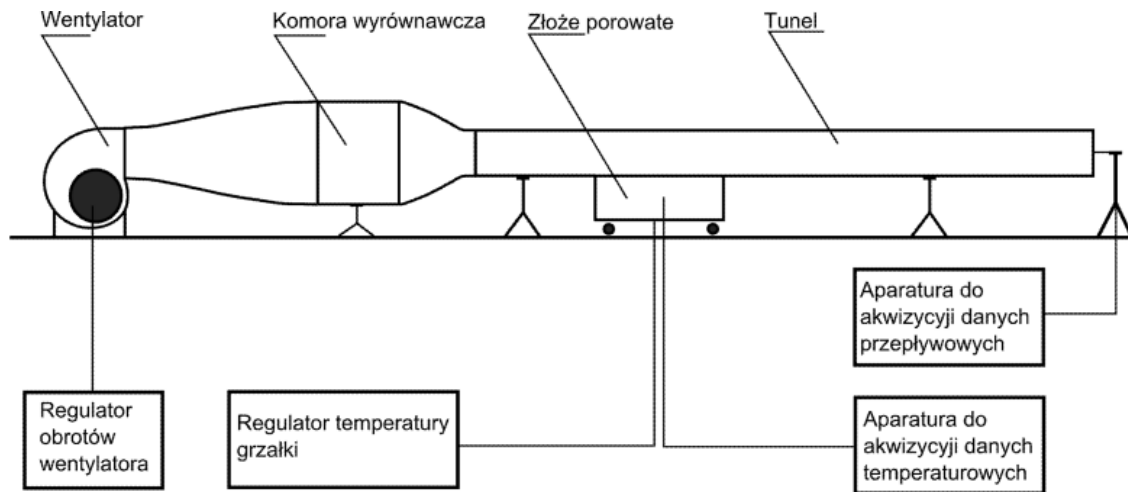
Każda z termopar została indywidualnie umieszczona w żądanej pozycji, utwierdzona a następnie przysypana warstwą ballotyny. Sekwencyjny sposób umieszczania termopar umożliwił, oprócz precyzyjnego umieszczenia ich w żądanym położeniu, równomierne ułożenie szklanych kulek o średnicy $d = 5$ mm (ballotyna) w złożu.



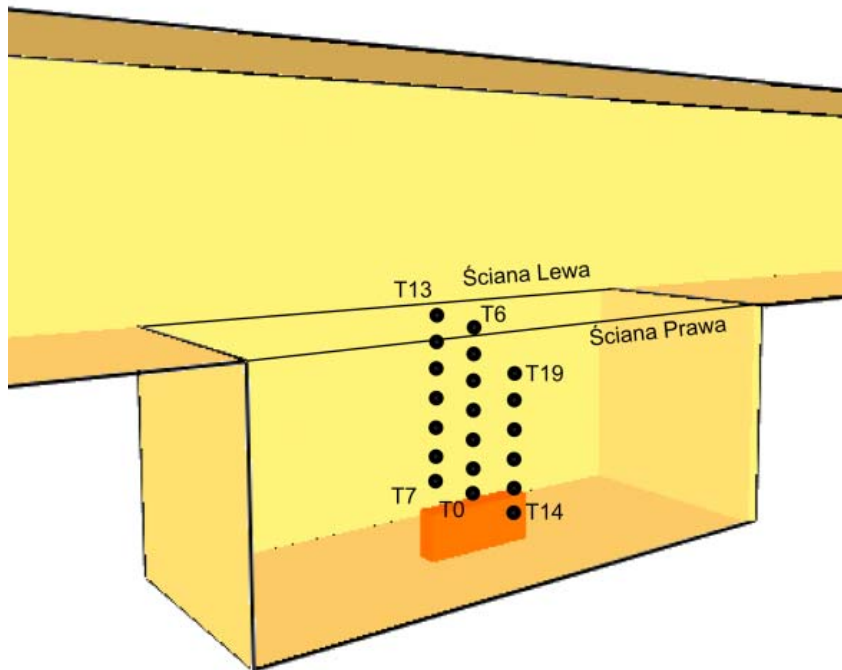
Rys. 4. Obszary występowania separacji warstwy przyściennej w dyfuzorze dolotowym. a) $U_{in} = 1$ m/s, b) $U_{in} = 5$ m/s



Rys. 5. Rozkład wartości modułu prędkości w płaszczyźnie leżącej w osi symetrii komory



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego



Rys. 7. Sposób rozmieszczenia termopar w złożu porowatym. Na rysunku zaznaczono też grzałkę

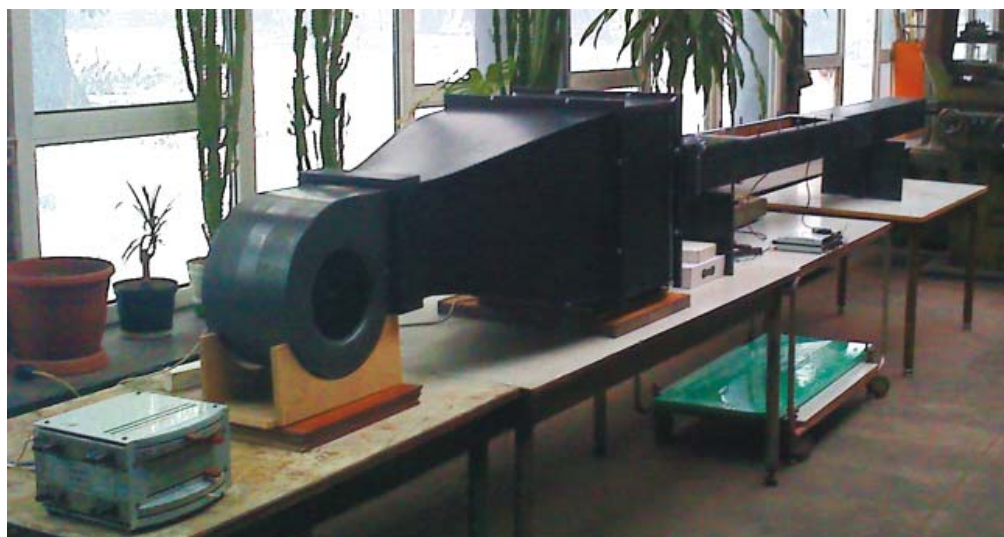
Kalibracja stanowiska

Przed przystąpieniem do eksperymentu należało wykonać kalibrację stanowiska. Zabieg ten polegał na wykonaniu serii pomiarów kontrolnych opisujących zjawiska przepływowe oraz termiczne mające miejsce na stanowisku badawczym.

W pierwszej kolejności wykonano pomiary wartości wektora prędkości w przekroju wylotowym z tunelu. Pomiary zostały wykonane przy użyciu systemu termooanemometrycznego w skład którego wchodzi: sonda trójwłknowa, anemometr ATU oraz karta przetwornikowa wraz z komputerem PC. Ponieważ konstrukcja czujnika, którego oś tworząc kąt $\alpha = 54.7^\circ$ z osiadką mocującą uniemożliwiała wykonanie pomiarów w całym przekroju, wartość wektora prędkości została zmierzona w wybranym fragmencie przekroju. Kluczowym zagadnieniem było uzyskanie możliwie jak najbardziej równomiernego pola prędkości w przekroju wylotowym tunelu dla pełnego zakresu wartości nastawionej prędkości obrotowej wentylatora.



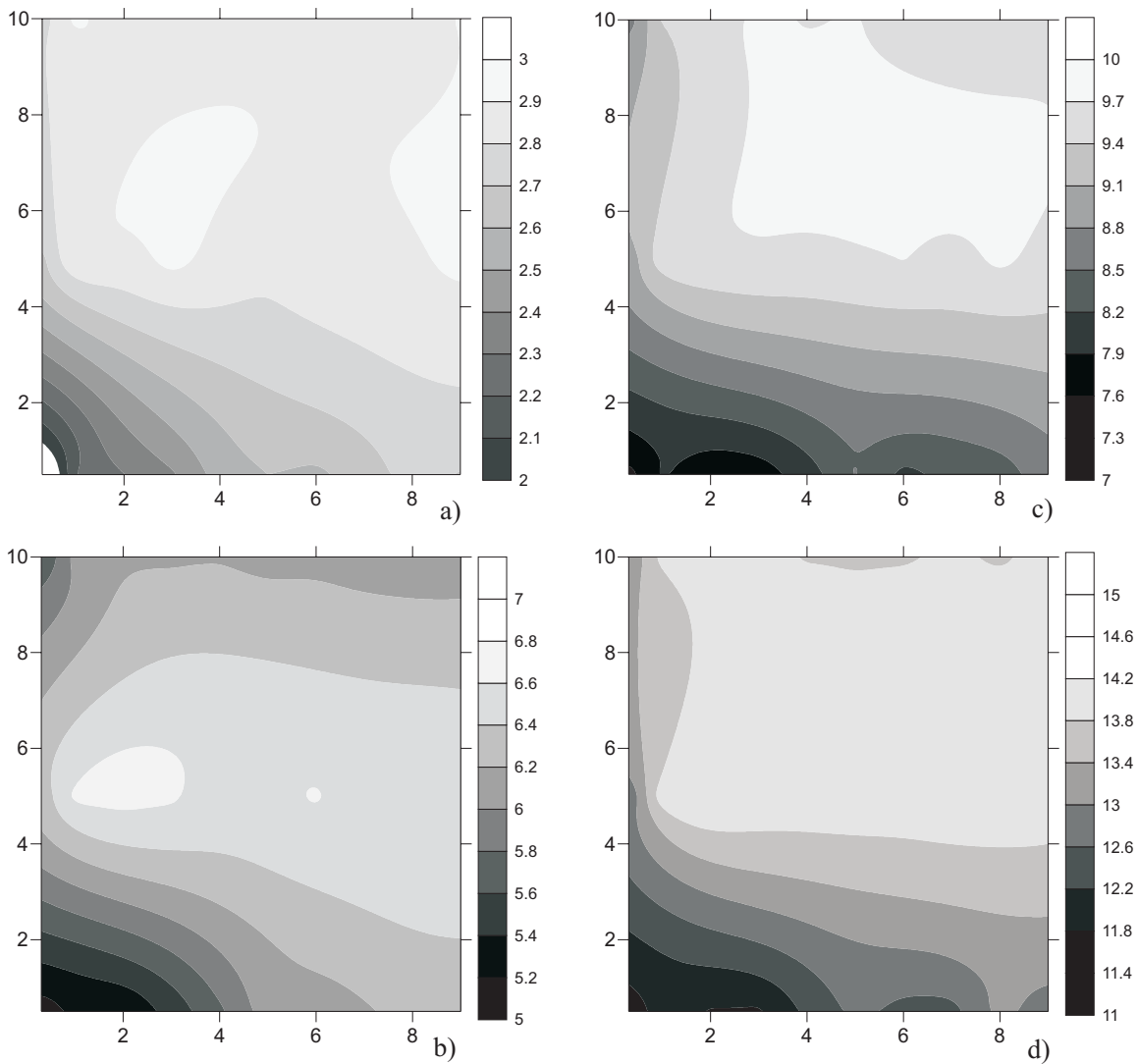
Rys. 8. Sposób mocowania termopar w złożu



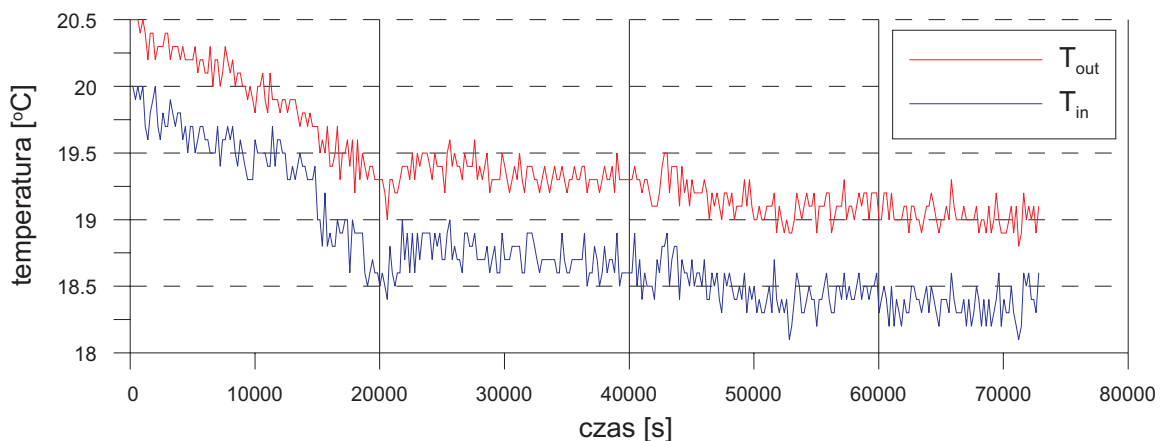
Rys. 9. Widok stanowiska pomiarowego

Sądząc po mapach prędkości zamieszczonych na rys. 10 a, b c i d, uzyskany przepływ charakteryzował się satysfakcjonująco równomiernym rozkładem wartości wektora prędkości w skrajnych przypadkach nie przekraczającym wartości 4 m/s (rys. 10 d). Ponadto, zgodnie z oczekiwaniem w obrazie prędkości zaobserwowano istnienie tak zwanego „efektu blokowania” charakteryzującego się występowaniem obszarów o zmniejszonej wartości wektora prędkości, charakterystycznych dla przepływu płynów w przewodach o przekroju prostokątnym. Zaobserwowane zjawisko nie miało jednak wpływu na stabilność zmierzonych pól prędkości.

Podczas pomiarów zarówno kalibracyjnych jak i właściwych była monitorowana temperatura na wlocie i wylocie stanowiska pomiarowego. Przykładowy wykres zmienności temperatury podczas trwania eksperymentu zamieszczono na rys. 11. Wykres T_{out} , na rys. 11 opisuje zmianę wartości temperatury na wylocie stanowiska, z kolei wykres T_{in} – na wlocie. Stała różnica w wartościach tych dwóch temperatur, wynosząca około 1°C wynikała z różnic w ich charakterystykach. Z kolei w przebiegach wykresów T_{in} i T_{out} można zauważyć dobową zmienność wartości temperatury w pomieszczeniu laboratoryjnym. Dla pomiaru trwającego ponad 20 h, temperatura w pomieszczeniu spadła o ponad 2°C.



Rys. 10. Rozkłady prędkości powietrza w przekroju wylotowym tunelu dla 4 wybranych prędkości. a) 3 m/s, b) 7 m/s, c) 10 m/s i d) 15 m/s



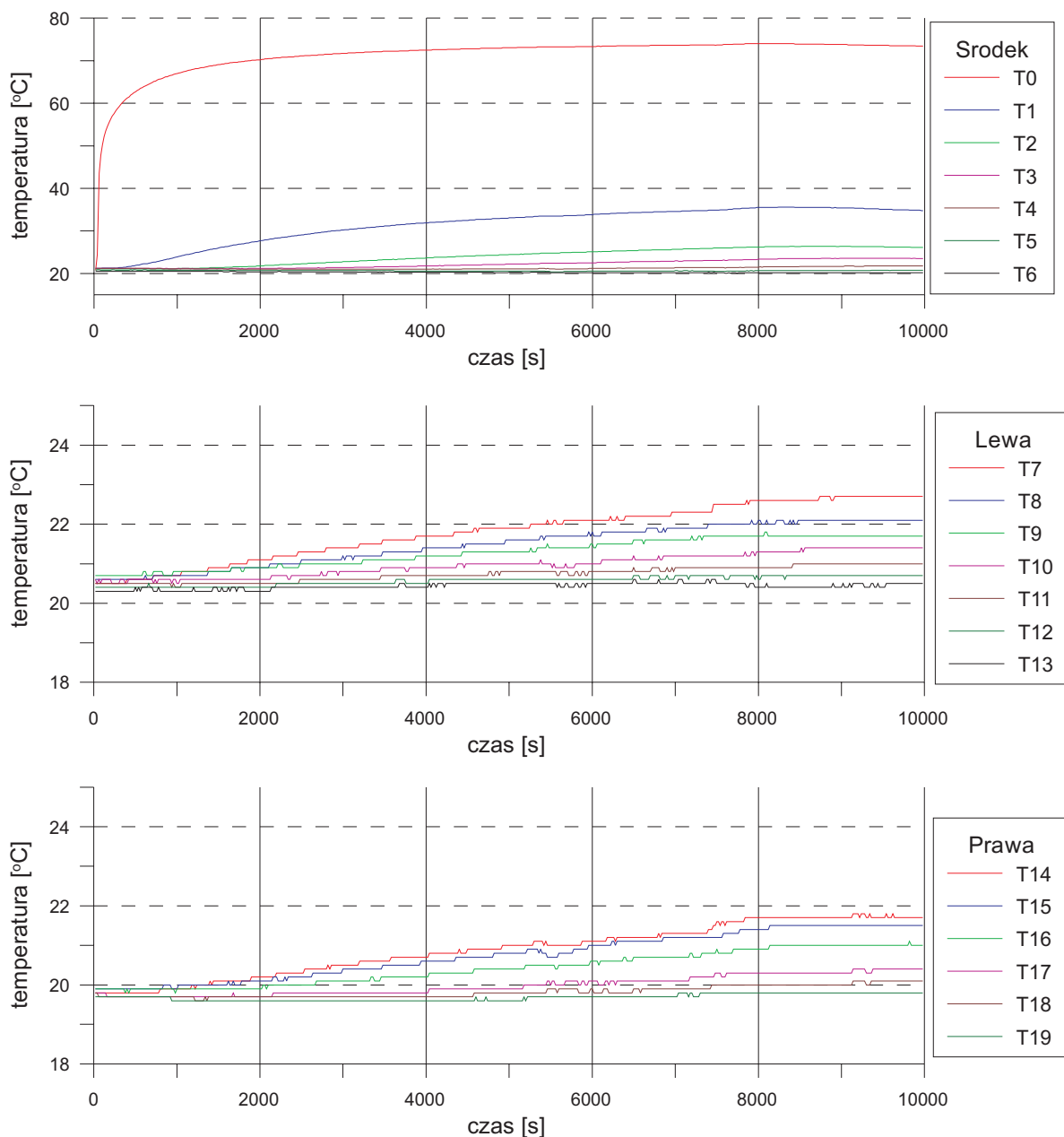
Rys. 11. Temperatura na wlocie – T_{in} i na wylocie T_{out} stanowiska pomiarowego

Podczas trwania cyklu eksperymentów kalibracyjnych sprawdzono nagrzewanie i chłodzenie złoża porowatego. Przebieg eksperymentu określającego sposób nagrzewania złoża przedstawiał się następująco:

Przy wyłączonym wentylatorze wymuszającym przepływ w kanale została uruchomiona rejestracja temperatur złoża dwudziestoma termoparami oznaczonymi od T0 do T19. Następnie został uruchomiony

regulator temperatury ustanawiający temperaturę grzałki na poziomie $t_g = 100^\circ\text{C}$. Pomiar odbywał się w czasie 10000 s (około 3 h) do ustabilizowania się wskazań temperatury na poszczególnych kanałach przyrządu pomiarowego. Odczyt wartości temperatur w poszczególnych punktach pomiarowych odbywała się z interwałem 20 sekundowym, natomiast rejestrowano uśrednione wartości temperatur z przedziału 20 sekundowego.

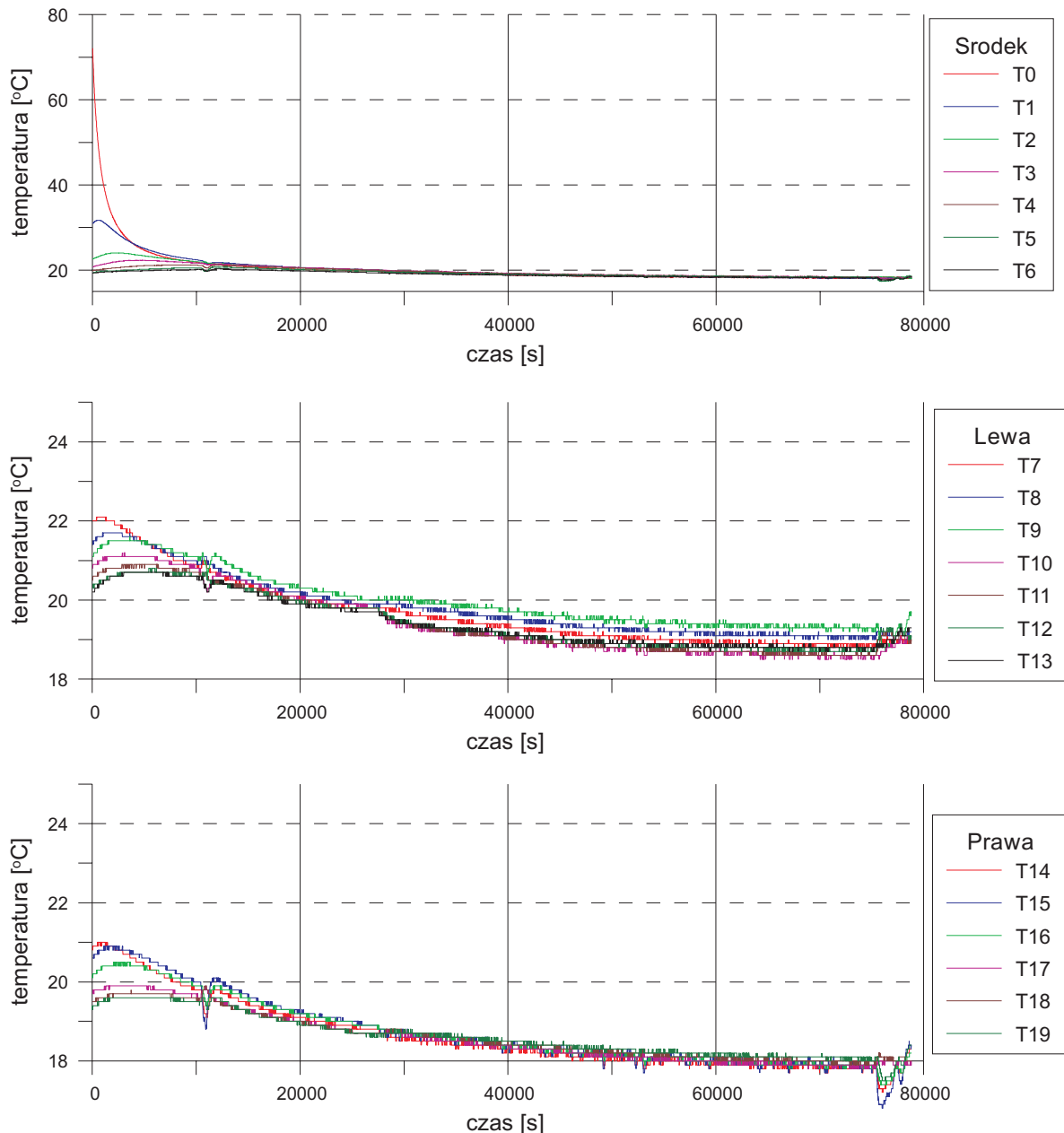
Wyniki eksperymentu nagrzewania są zademonstrowane na wykresach na rys. 12. Wyniki zgrupowano na trzech wykresach, odpowiadających odpowiednio środkowemu, rozmieszczonemu nad źródłem rzędowi termopar, lewemu oraz prawemu leżącym 4 mm od lewej i prawej ściany komory ograniczającej złożę porowate. W przebiegu krzywej nagrzewania dla termopary T0 można zaobserwować relatywnie szybki przyrost wartości temperatury. Czas nagrzewania tego fragmentu złoża jest



Rys. 12. Krzywe nagrzewania złoża porowatego

Analogicznie postąpiono podczas eksperymentu mającego na celu wyznaczyć krzywe chłodzenia złoża. Procedura postępowania zasadniczo była podobna do przypadku nagrzewania. Przy wyłączonym wentylatorze, po doprowadzeniu złoża do stanu równowagi (po czasie około 3 h, jak wynikało z wcześniejszego

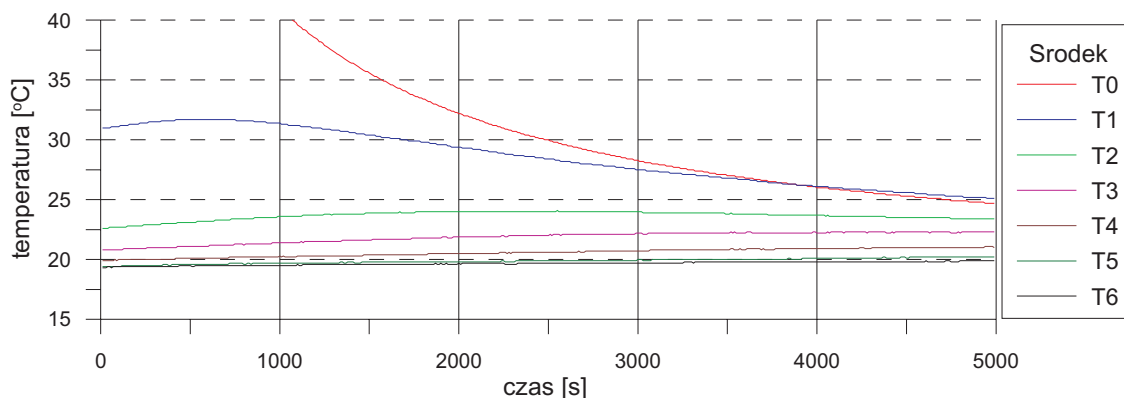
eksperymentu) założono rejestrację temperatur w 20 punktach pomiarowych z takim samym interwałem czasowym. Następnie wyłączono prąd zasilający grzałkę. Z uwagi na to, że proces studzenia w warunkach konwekcji swobodnej w przestrzeni ograniczonej zachodzi dużo wolniej niż proces nagrzewania, zdecydowano się wydłużyć procedurę pomiaru do 80000 s (około 22 h). Wyniki eksperymentu zamieszczono w postaci krzywych na rys. 13.



Rys. 13. Krzywe chłodzenia złoża porowatego

W tym przypadku, proces chłodzenia złoża od stanu maksymalnej temperatury do stanu temperatury otoczenia przebiegł w czasie około 60000 s (około 17 h). Dodatkowo uwagę zwraca sposób zachowania pola temperatury w przypadku gwałtownego wyłączenia zasilania grzałki. Na rys. 14 zamieszczono powiększony fragment wykresu opisującego rozkład temperatur na środku złoża. (rys. 13 – Środek).

Jak można zauważyć w czasie $t = 0$ s w którym nastąpiło wyłączenie grzałki temperatura T0 zaczęła gwałtownie maleć a pozostałe temperatury nieznacznie wzrosły wraz z upływem czasu, i tak T1 zmieniła wartość z 30.5 na 32°C w czasie około 500 s, T2 z wartości 22.5 na wartość 24.2°C w czasie 2500 s, T3 z 20.5 na 22 w czasie 4000 s. Zmiany pozostałych temperatur trudno określić z uwagi na możliwość popełnienia dużego błędu.

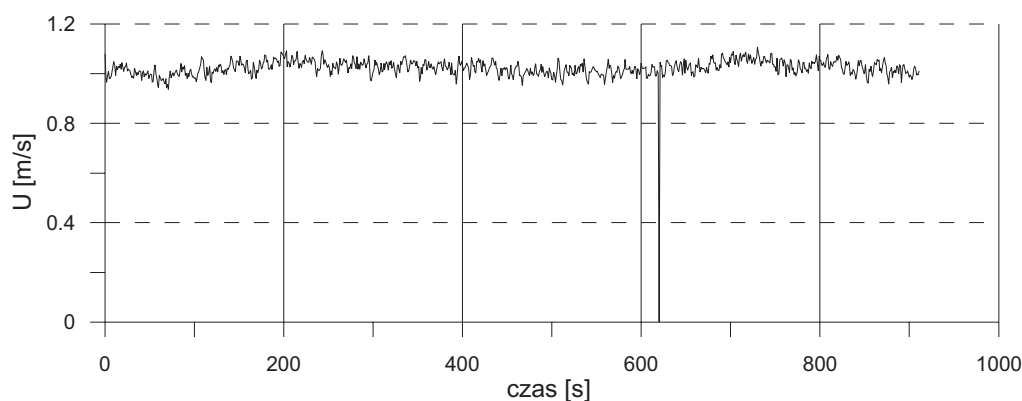


Rys. 14. Zjawisko inercyjne podczas chłodzenia złoża

Obserwowane zjawisko sugeruje zmianę w sposobie wymiany energii wewnątrz złoża porowatego podczas nagłego wyłączenia grzałki. We wstępnej fazie przed załączeniem urządzeń rejestrujących, a więc w fazie nagrzewania sposób wymiany energii jest mieszany z dominującą konwekcją, natomiast po zaniku konwekcji (wyłączona grzałka) wymiana energii odbywa się z dominacją dyfuzji (przewodzenie).

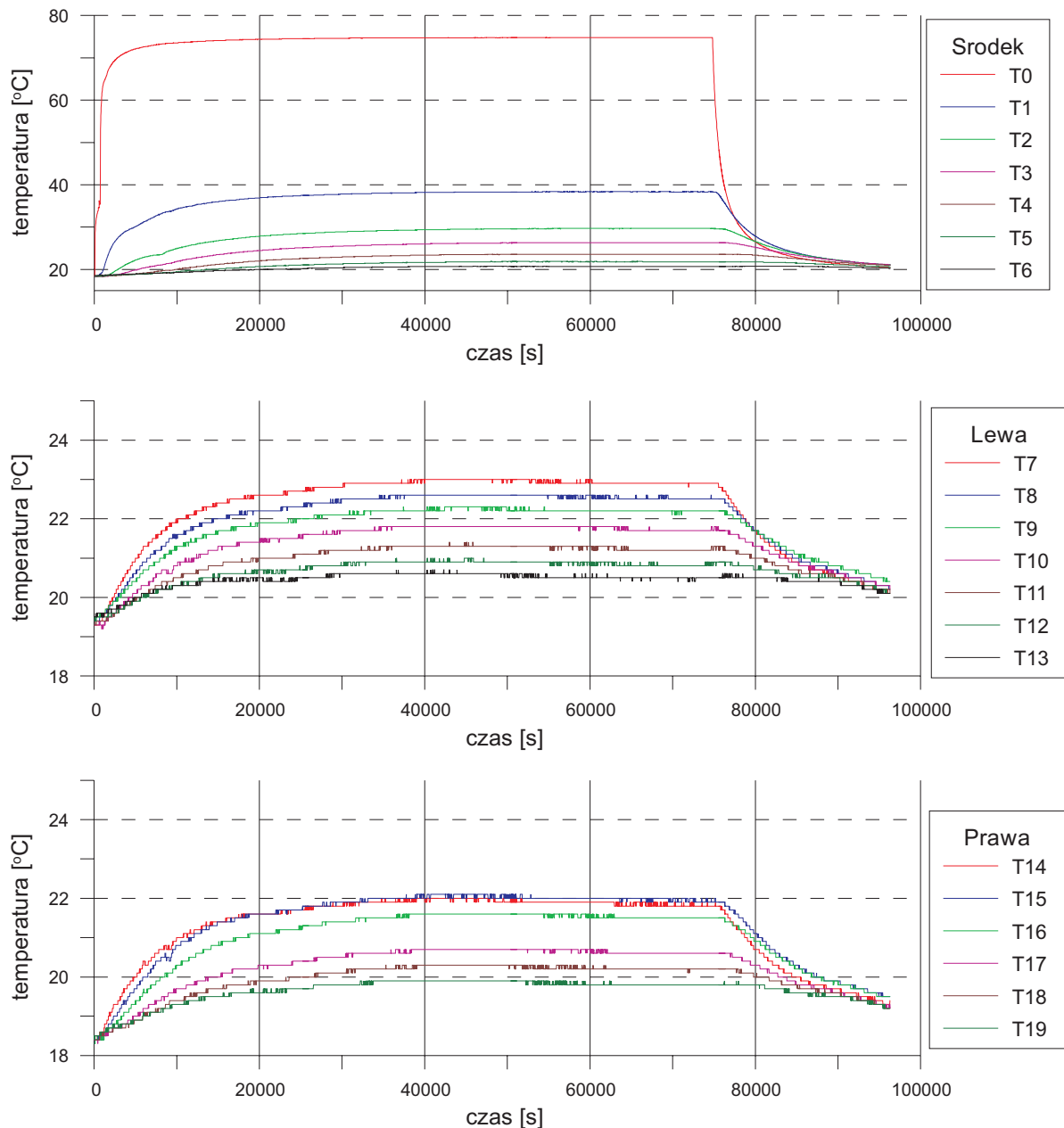
Wyniki eksperymentu głównego

Po kalibracji stanowiska pomiarowego dzięki której poznano czas oraz dynamikę nagrzewania oraz chłodzenia złoża porowatego przystąpiono do realizacji pierwszej serii pomiarowej. W tym przypadku eksperyment polegał na pełnym nagrzaniu, a następnie schłodzeniu złoża przy włączonym wentylatorze wymuszającym ruch powietrza. Podczas tego eksperymentu oprócz temperatur w złożu była rejestrowana również prędkość strugi powietrza w przekroju wylotowym stanowiska. Całkowity czas trwania serii, przy uwzględnieniu danych z kalibracji stanowiska wynosił 96000 s (około 27 h). Temperatura otoczenia zmieniała się zgodnie z krzywymi zamieszczonymi na rys. 11. Prędkość przepływu powietrza wahała się w granicach 1 m/s. Fragment wykresu przedstawiający przebieg zmian wektora prędkości przedstawiono na rys. 15.



Rys.15. Przebieg zmian wartości wektora prędkości w przekroju wylotowym stanowiska

Na rys. 16 zaprezentowano wykresy zmiany temperatury zarejestrowane podczas pierwszej serii pomiarowej. Porównując uzyskane dane z wartościami temperatur uzyskanymi podczas serii kalibracyjnych (rys. 12 i 13) dochodzi się do wniosku, że w zasadzie pomiędzy nimi nie ma żadnych istotnych różnic. Na uwagę zasługuje fakt większej temperatury rejestrowanej przy ścianie lewej niż przy ścianie prawej. Podobna sytuacja miała miejsce podczas wykonywania serii kalibracyjnej. Ponieważ jedna pełna seria pomiarowa nie mogła stanowić źródła danych na podstawie którym można zacząć pełną analizę przypadku, konieczne było wykonanie kolejnych eksperymentów.



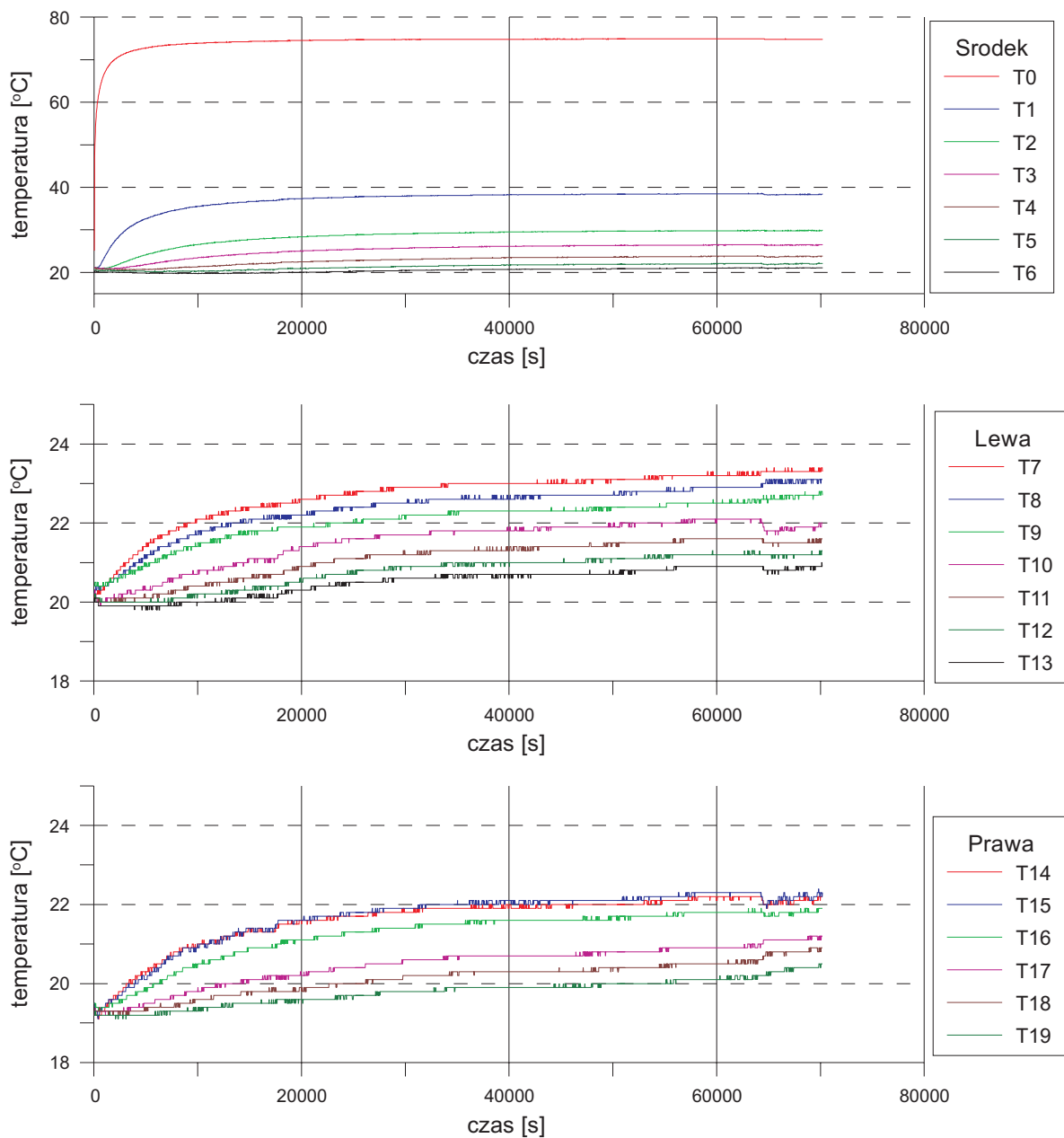
Rys.16. Rozkład temperatur w złożu porowatym podczas pierwszej serii eksperymentalnej

Eksperyment drugi koncentrował się głównie na pierwszej fazie procesu – na nagrzewaniu. Przebieg eksperymentu był podobny do serii pierwszej, za wyjątkiem wprowadzenia skokowej zmiany wartości wektora prędkości z około 1 m/s do 1.6 m/s. Zmiana (rys. 18) zaszła w 1500 sekundzie trwania nagrzewania złoża. Przebieg zmian temperatur wewnątrz złoża zaprezentowano na rys. 16. Na wykresach zamieszczonych na tym rysunku, szczególnie w przebiegach zmian temperatur w pobliżu ścian lewej i prawej można zauważyć interesujące zjawisko wzrostu temperatur powyżej wartości osiągniętych w poprzedniej serii.

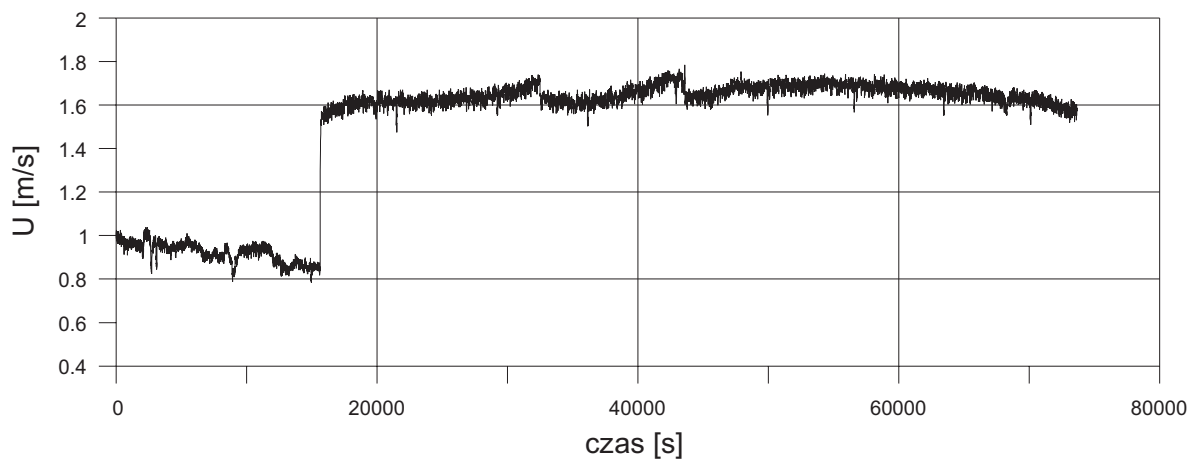
Jeżeli przyczyną owego wzrostu była skokowa zmiana wartości prędkości przepływu powietrza nad złożem, w związku z tym należało poprowadzić eksperyment w ten sposób żeby wzmocnić ten efekt. W serii trzeciej zdecydowano się na większą wartość początkową prędkości oraz na większy jej skok (rys. 19) zwłaszcza, że w przebiegu zmian temperatur z serii drugiej nie zaobserwowano wyraźnego, skokowego przyrostu wartości.

Przebieg zmian wartości temperatur w punktach pomiarowych znajdujących się wewnątrz złoża porowatego dla eksperymentu trzeciego zaprezentowano na rys. 20.

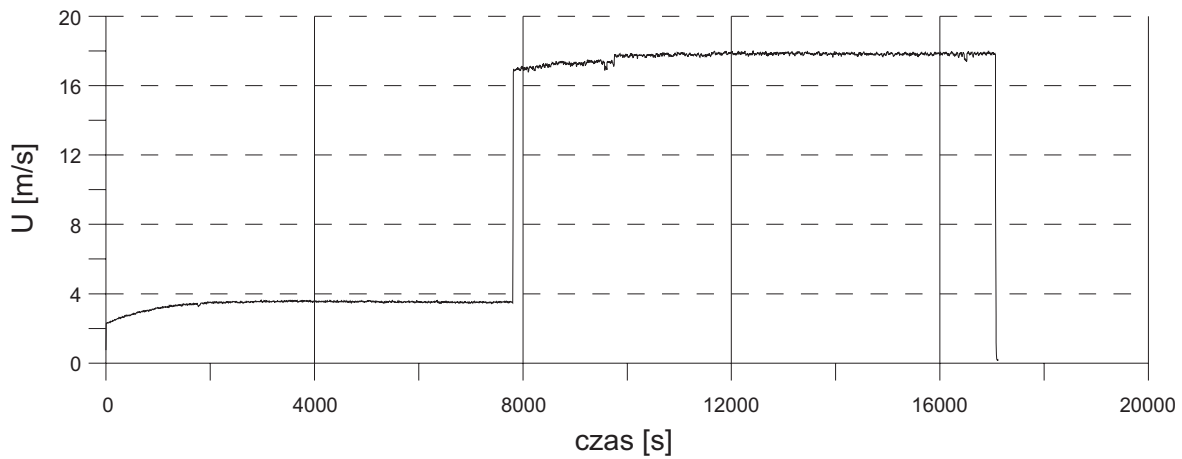
Podwyższona prędkość początkowa przepływu $U_p = 3.8$ m/s spowodowała intensyfikację procesu wymiany energii pomiędzy złożem porowatym a otoczeniem, której obrazem było zmniejszenie wartości



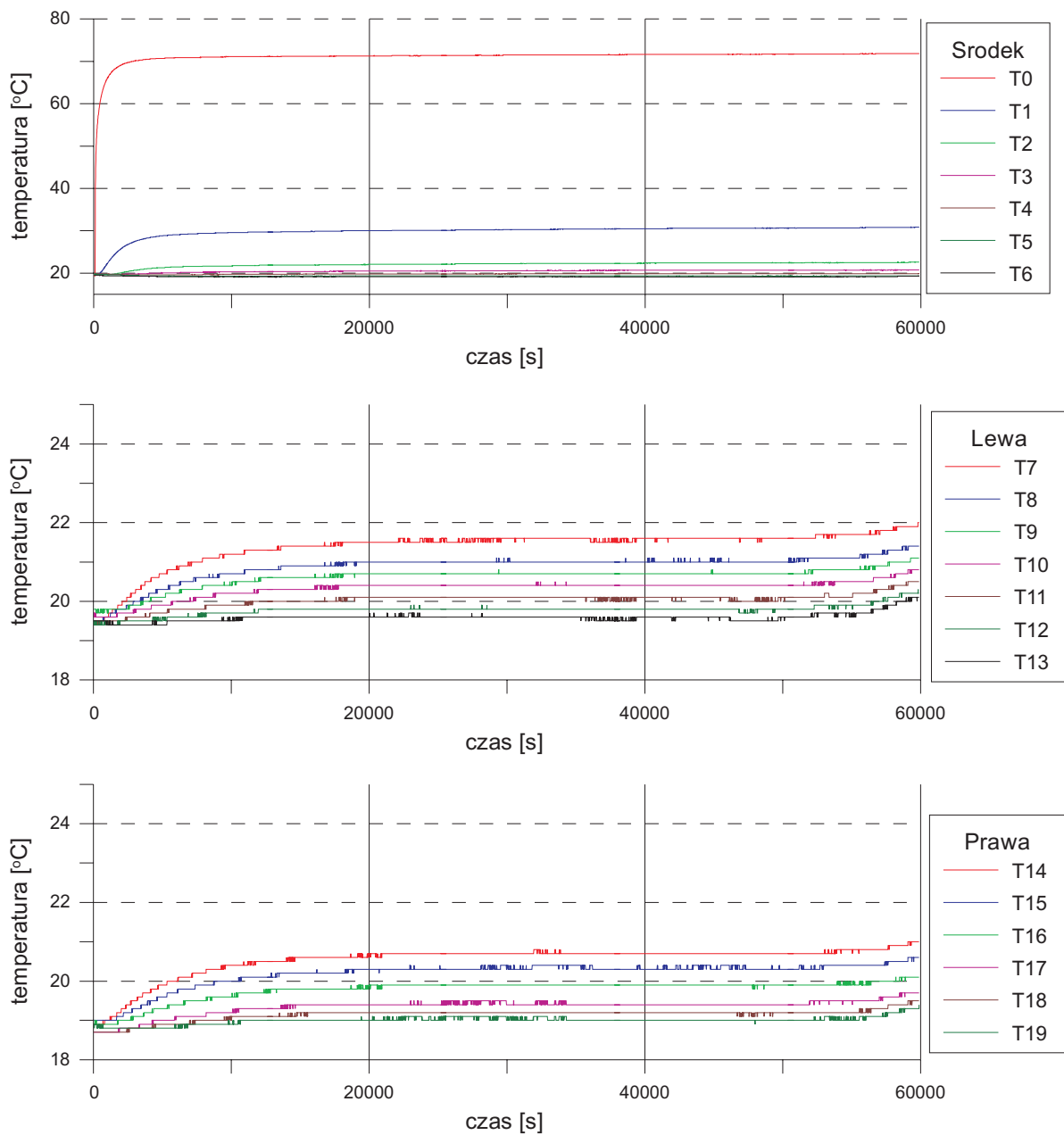
Rys. 17. Rozkład temperatur w złożu porowatym podczas drugiej serii eksperymentalnej



Rys. 18. Przebieg zmian wartości wektora prędkości w przekroju wylotowym stanowiska



Rys. 19. przebieg zmian wartości prędkości nad złożem w trzeciej serii pomiarowej



Rys. 20. Rozkład temperatur w złożu porowatym podczas trzeciej serii eksperymentalnej

temperatur średnio o około 2°C we wszystkich punktach pomiarowych, za wyjątkiem T0. Brak reakcji na podwyższenie wartości prędkości przepływu w tym punkcie był najprawdopodobniej spowodowany zbyt bliskim sąsiedztwem grzałki. Z kolei skokowa zmiana wartości prędkości z $U_p = 3.8 \text{ m/s}$ do $U_k = 17 \text{ m/s}$ zaowocowała podwyższeniem wartości temperatur głównie przy ścianach dopiero w 55000 sekundzie przepływu (około 15 godziny trwania eksperymentu)

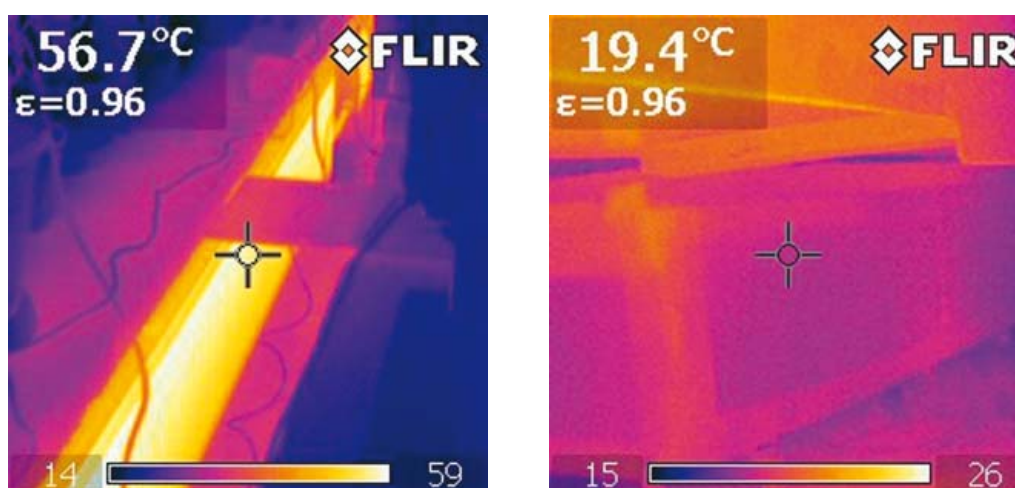
Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki trzech, wybranych serii pomiarowych opisujących wymianę energii pomiędzy punktowo nagrzanym złożem porowatym a strugą powietrza. W wyniku przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Proces nagrzewania i chłodzenia skonstruowanego ze szklanych kulek o średnicy 5 mm złoża jest długotrwały. Czas nagrzewania do maksymalnej temperatury $t_{\max} = 74.3^{\circ}\text{C}$ trwa ponad 3 godziny i jest prawie 6 razy krótszy niż czas całkowitego wystudzenia do temperatury otoczenia wynoszący 17 godzin.
2. Przeprowadzone eksperymenty ze zmiennymi wartościami prędkości w czasie wykazały słabą zależność zmian temperatury od prędkości przepływu powietrza nad złożem.
3. Z powodu dużej stałej czasowej złoża porowatego (około 3 h) reakcja pół temperatury na skokową zmianę prędkości jest trudna do zmierzenia z powodów sprzętowych (niewystarczająca wielkość pamięci wbudowanej w urządzenie pomiarowe)

W świetle doświadczeń zebranych podczas bieżących pomiarów dodatkowo nasuwają się następujące uwagi:

1. Sposób regulacji prędkości obrotowej wirnika wentylatora przy pomocy autotransformatora jest niewystarczający w świetle długotrwałych badań.
Zmiany napięcia w sieci podczas pomiarów trwających ponad 20 godzin powodowały silne fluktuacje prędkości obrotowej wirnika wentylatora, a co jest z tym związane fluktuacje prędkości przepływu strugi powietrza w tunelu.
2. Umieszczenie stanowiska pomiarowego w pobliżu grzejników powoduje zakłócenia w przebiegu eksperymentu; jedna ze ścian komory (w tym przypadku lewa) poddawana działaniu gorącego powietrza nagrzewała się, powodując zafałszowania w obrazie rozkładzie mierzonych temperatur. Skale zjawiska zademonstrowano na termogramie zamieszczonym na rys. 21.



Rys. 21. Termogram grzejników umieszczonych po lewej stronie stanowiska pomiarowego

Kolejnym krokiem w realizacji projektu jest uwzględnienie uwag poczynionych podczas bieżących serii pomiarowych w wyniku których nastąpią niewielkie modyfikacje stanowiska pomiarowego w szczególności w części odpowiedzialnej za utrzymywanie stałych obrotów wirnika wentylatora. Ponadto należy

konieczne uniezależnić wyniki eksperymentu od zmienności warunków zewnętrznych (głównie temperatura w pomieszczeniu).

Pewnym rozwiązaniem mogło by być zastosowanie w złożu porowatym kulek o większych średnicach (rzędu 10 mm) celem intensyfikacji procesów transportu energii a przez to skrócenia czasu poszczególnych serii pomiarowych. Jednak biorąc pod uwagę cel nadrzędny eksperymentu, którym jest pomiar i oszacowanie wymiany masy i energii w złożach porowatych o różnych parametrach takie działanie byłoby jedynie doraźny środkiem zaradczym.

Praca została wykonana w roku 2009 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- J. Tobiś *Turbulentny przepływ gazu w wypełnieniach o złożonej geometrii*, Prace Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej, PW, 2004.
- X.Y. Zhou, J.C.F. Pereira, *Numerical study of Combustion and pollutants formation In inert nonhomogeneous porous media*, Combustion Science and Technology, 1997.
- J. Dillon, *Report: Combustions in porous media*, California Institute of Technology, 1999.
- Qin Ruxiang, *Zastosowanie gazów znacznikowych dla lokalizacji nieuszczelności w zrobach ściany przewietrzanej systemem na Y*, 5 Szkoła Aerologii Górniczej, Wrocław 2009.
- D. Nield, A. Bejan, *Convection in porous media*, Springer Science + Business and Media, 2006.
- M. J.S. de Lemos *Turbulence in Porous Media*, Elsevier, 2006.
- P. Skotniczny, *Rozwój strugi powietrza w dyfuzorze prostokątnym*, Prace IMG, 2004.
- Fluent User Manual*, 2006.

Experimental verification of the process of mass and energy exchange in a porous medium

Abstract

Numerical analysis of any flow case requires an experimental verification, which becomes absolutely necessary when handling more complex cases, such as non-isothermal mass exchange between the porous deposit and the flowing stream of air.

The main problem faced by experimentators involved in measurements of flow parameters in porous media lies in the fact that certain quantities, such as fluid velocity in pores, cannot be measured directly. That prompts the use of indirect measurement methods to verify the numerical data. The main purpose of the experimental program described in the study is to verify the results of numerical analysis of the mass and energy exchange between the free flux and a porous deposit.

In order to successfully conduct an experiment, it is required that all the air flow conditions be known beforehand and flow conditions should remain constant at the inlet to the control chamber.

The study shows the experimental set-up (Fig. 3) that meets the above requirements and summarises the selected experimental data on energy exchange between the porous medium and a stream of air flowing tangent to it.

Keywords: porous deposit, energy exchange, thermography