

POLITECHNIKA KRAKOWSKA IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI

WYDZIAŁ MECHANICZNY

INSTYTUT APARATURY PRZEMYSŁOWEJ I ENERGETYKI

PRACA DOKTORSKA

**BADANIA LODU BINARNEGO JAKO CHŁODZIWA
W POŚREDNICH SYSTEMACH CHŁODZENIA**

MGR INŻ. ŁUKASZ MIKA

Promotor:

DR HAB. INŻ. WOJCIECH ZALEWSKI, PROF. PK

Kraków, 2003



*Bardzo serdecznie dziękuję mojemu promotorowi
dr hab. inż. Wojciechowi Zalewskiemu, prof. PK
za poświęcony czas oraz okazaną pomoc przy pisaniu
tej pracy.*

SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń	3
1. Przedmiot, cel i zakres pracy	7
2. Dotychczasowy stan zagadnienia – przegląd literatury	8
2.1. Wstęp	8
2.2. Wytwarzanie lodu zawiesinowego	9
2.3. Zalety i wady lodu zawiesinowego jako czynnika pośredniczącego	10
2.4. Model przepływu	13
2.5. Zależności na współczynnik przejmowania ciepła	15
2.6. Wnioski z przeglądu literatury	20
3. Teza pracy	21
4. Metodyka i zakres badań doświadczalnych	22
4.1. Budowa i opis stanowiska badawczego	22
4.2. Zakres badań	29
4.3. Metody pomiaru poszczególnych wielkości	29
4.4. Badane wymienniki ciepła	32
4.5. Analiza błędów wielkości mierzonych i liczonych	36
5. Zestawienie zależności służących do wyznaczania właściwości fizycznych i termodynamicznych czynników	40
5.1. Właściwości lodu zawiesinowego	40
5.2. Właściwości wodnego roztworu glikolu etylenowego	43
5.3. Właściwości wody	45
5.4. Właściwości powietrza	47
6. Badania porównawcze wymienników ciepła zasilanych lodem zawiesinowym oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego	48
6.1. Wyniki badań wymienników zasilanych lodem zawiesinowym	48
6.2. Wyniki badań wymienników zasilanych wodnym roztworem glikolu etylenowego	54
6.3. Wskaźniki porównawcze	60
6.4. Analiza kosztów	74
6.5. Wnioski wynikające z porównania chłodziw	77
7. Opracowanie zależności na współczynnik przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego	79
7.1. Wyznaczanie prędkości przepływu powietrza przez wymiennik	79
7.2. Wyznaczanie średnich współczynników przejmowania ciepła	81
7.3. Wyniki badań eksperymentalnych wymienników ciepła zasilanych lodem zawiesinowym	85
7.4. Opracowanie zależności na współczynnik przejmowania ciepła	91
8. Podsumowanie, wnioski i uwagi końcowe	104
Bibliografia	107

WYKAZ OZNACZEŃ

A_{cz} [m ²]	- pole powierzchni przekroju kanału,
A_o [m ²]	- pole powierzchni przepływu powietrza przez wymiennik,
B [m]	- szerokość płyty (wymennik płytowy),
c_p [J/(kgK)]	- ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
d_f [m]	- średnica żeber,
d_h [m]	- średnica hydrauliczna,
d_k [m]	- średnica kanału w płaszczyźnie płyty (wymennik płytowy),
d_r [m]	- średnica rdzenia rury,
d_w [m]	- średnica wewnętrzna rury,
d_z [m]	- średnica zewnętrzna rury,
F_k [m ²]	- pole powierzchni rury gładkiej,
F_w [m ²]	- pole powierzchni wymiany ciepła po stronie płynu chłodzącego,
F_z [m ²]	- pole powierzchni wymiany ciepła po stronie powietrza,
F_{zeb} [m ²]	- pole powierzchni żeber,
Gz [-]	- liczba Graetza,
h_z [m]	- wysokość zebra,
He [-]	- liczba Hedstroma,
i [J/kg]	- entalpia właściwa,
k_w [W/(m ² K)]	- współczynnik przenikania ciepła odniesiony do wewnętrznej powierzchni rury,
l [m]	- długość, współrzędna liniowa,
l_c [m]	- całkowita długość węzownicy w wymienniku,
l_r [m]	- długość prostoosiowych odcinków,
L [m]	- wysokość wymiennika (długość płyt),
L_R [m]	- długość przepływu (wymennik płytowy),
m [kg]	- masa,
n_k [-]	- liczba kanałów w płycie (wymennik płytowy),
n_r [-]	- liczba rzędów rur,
n_{rr} [-]	- liczba rur w rzędzie,
n_z [-]	- liczba zasilań wymiennika,
Nu [-]	- liczba Nusselta,

Nu [-]	- liczba Nusselta,
Pr [-]	- liczba Prandtla,
p [Pa]	- ciśnienie,
p_a [Pa]	- ciśnienie atmosferyczne,
p_{wn} [Pa]	- ciśnienie pary wodnej na linii nasycenia,
\dot{Q}_N [W]	- moc nagrzewnicy,
\dot{Q} [W]	- wydajność cieplna oziębiacza,
Re [-]	- liczba Reynoldsa,
r_l [J/kg]	- ciepło topnienia lodu w temp. 0[°C]; $r_l = 333\ 440$ [J/kg],
s [m]	- grubość żebra,
S_l [m]	- podziałka wzdłużna rur,
S_q [m]	- podziałka poprzeczna rur,
T [K]	- temperatura w stopniach Kelwina,
t [°C]	- temperatura w stopniach Celsjusza,
t_o [m]	- podziałka ozebrowania,
V [m ³]	- objętość,
\dot{V} [m ³ /s]	- strumień objętości,
w [m/s]	- prędkość przepływu,
w_{cz} [m/s]	- prędkość powietrza przed wymiennikiem,
w_{ch} [m/s]	- prędkość chłodziwa,
w_o [m/s]	- prędkość powietrza w wymienniku,
w_p [m/s]	- prędkość powietrza,
W_{S1} [-]	- stosunek zmiany entalpii właściwej chłodziwa (odpowiadający zmianie temperatury chłodziwa od -6°C do -5°C) do zmiany entalpii właściwej wody (odpowiadającej zmianie temperatury wody od 1°C do 0.01°C), wskaźnik porównawczy,
W_{S2} [-]	- stosunek oporu przepływu chłodziwa w temperaturze -5°C do oporu przepływu wody w temperaturze 0.01C przez ten sam wymiennik, wskaźnik porównawczy,
W_{S3} [-]	- stosunek współczynnika przejmowania ciepła lodu zawieszinowego do współczynnika przejmowania ciepła wodnego roztworu glikolu etylenowego, wskaźnik porównawczy,

W_{S4} [-]	- stosunek wydajności wymiennika zasilanego lodem zawieszinowym do wydajności tego samego wymiennika ciepła zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego, wskaźnik porównawczy,
x [kg _w /kg _{ps}]	- zawartość wilgoci,
x_i [kg/kg]	- udział masowy (zawartość) lodu w mieszaninie,
x_{ibr} [kg/kg]	- stężenie (koncentracja) wodnego roztworu alkoholu etylowego,
x_g [%]	- stężenie wodnego roztworu glikolu etylenowego,
α [W/(m ² K)]	- współczynnik przejmowania ciepła,
α_{pz} [W/(m ² K)]	- współczynnik przejmowania ciepła uwzględniający sprawność żeber,
δ [m]	- grubość,
$\delta\alpha$ [%]	- błąd względny (różnica procentowa),
$\overline{\delta\alpha}$ [%]	- średni błąd względny,
$ \overline{\delta\alpha} $ [%]	- średni moduł błędu względnego.
Δp [Pa]	- spadek ciśnienia,
$\Delta p_1, \Delta p_2$ [Pa]	- spadek ciśnienia na zwężkach,
ΔT_m [K]	- średnia logarytmiczna różnica temperatur czynników w wymienniku,
φ_p [%]	- wilgotność względna powietrza,
γ [rad]	- kąt odkształcenia postaciowego,
$\dot{\gamma}$ [rad/s]	- szybkość ścinania,
λ [W/(mK)]	- współczynnik przewodzenia ciepła,
λ_T [-]	- współczynnik strat tarcia,
μ [Ns/m ²]	- dynamiczny współczynnik lepkości,
ρ [kg/m ³]	- gęstość,
ξ [-]	- współczynnik strat miejscowych,
τ_o [Pa]	- krytyczne naprężenie styczne,

Ponadto, w pracy stosowane są indeksy:

- 1 - parametry na wejściu do wymiennika,
- 2 - parametry na wyjściu z wymiennika,
- al - aluminium,

- bad - wielkość uzyskana z badań,
ch - chłodziwo,
g - wodny roztwór glikolu etylenowego,
l - lód,
lb - lód zawieszinowy,
lbr - wodny roztwór alkoholu etylowego,
m - wartość średnia,
obl - wielkość uzyskana z obliczeń,
p - powietrze,
s - stal,
w - woda.
z - żebro,
zw - zwężka pomiarowa.

Liczby kryterialne są zdefiniowane w tekście.

1. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY

Przedmiotem pracy jest lód binarny (zawiesinowy) jako chłodziwo do stosowania w pośrednich systemach chłodzenia.

Lód zawiesinowy jest to mieszanina drobinek lodu (o wymiarach do 0.5mm, sporadycznie nieco większych) i cieczy (najczęściej wodnego roztworu alkoholu etylowego) z dodatkiem środka antykorozyjnego (inhibitora). Wytwarzany jest on w specjalnych urządzeniach, zwanych wytwornicami lodu zawiesinowego.

Właściwości lodu zawiesinowego w dużym stopniu zależą od udziału masowego drobinek lodu:

- przy zawartości do 20% drobinek lodu jest to płyn o cechach cieczy,
- przy zawartości od 20 do 40% drobinek lodu mieszanina ta jest nadal płynna lecz posiada dużą „lepkość” i nadaje się w zasadzie tylko do magazynowania „zimna”,
- przy zawartości ponad 40% mieszanina ta wygląda jak mokry śnieg i ze względu na trudności transportowe nie jest stosowana w chłodnictwie.

Obecnie lód zawiesinowy znalazł zastosowanie w niektórych krajach, jeszcze na niewielką skalę, jako czynnik pośredniczący w systemach klimatyzacyjnych budynków, kopalń, w urządzeniach chłodniczych supermarketów, browarów, itp.

W stosunku do tradycyjnie stosowanych chłodziw (wody, wodnych roztworów glikoli, alkoholi czy solanek) posiada on wiele zalet, przede wszystkim charakteryzuje się dużą właściwą wydajnością cieplną ze względu na dużą wartość ciepła topnienia lodu.

Przedmiotem badań w pracy jest lód zawiesinowy powstały z wodnego roztworu alkoholu etylowego o nazwie handlowej „talin” (96.3% alkoholu) z dodatkiem inhibitora o nazwie handlowej „corrin”, zalecanego przez producenta posiadanej wytwornicy lodu. Stężenie początkowe roztworu alkoholu wynosi 10%.

Celem pracy jest ocena przydatności lodu zawiesinowego jako chłodziwa do stosowania w pośrednich układach chłodzenia. Na podstawie wyników badań doświadczalnych oraz obliczeń przeprowadzona została analiza porównawcza tego płynu z innymi, tradycyjnymi chłodziwami. Badaniom poddane zostało pięć wymienników ciepła (oziębiacze powietrza) o różnej konstrukcji: wymienniki ożebrowane, rurowe i wymiennik płytowy (panelowy), o przepływie chłodziwa w kanałach o przekroju sześciokątnym. Jako płyny chłodzące użyte zostały: lód zawiesinowy i wodny roztwór glikolu etylenowego.

W części teoretycznej pracy zaproponowany został model obliczeniowy, służący do wyznaczania właściwości fizycznych i termodynamicznych lodu zawiesinowego,

niezbędnych w obliczeniach cieplnych i przepływowych wymienników ciepła. W oparciu o otrzymane wyniki badań wyznaczone zostały zależności na średnie współczynniki przejmowania ciepła podczas przepływu lodu zawieszinowego w wymiennikach węzownicowych i płytowych.

2. DOTYCHCZASOWY STAN ZAGADNIENIA – PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Wstęp

Z uwagi na zaostrenie przepisów odnośnie ochrony środowiska, a szczególnie atmosfery obecnie można zaobserwować następujące równoległe drogi rozwoju techniki chłodniczej:

- 1) Poszukiwanie nowych czynników ziębniczych, które zastępują starsze, bardziej szkodliwe freony z grupy CFC oraz ograniczanie stosowania freonów z grupy HCFC. Badania w tej dziedzinie trwają do dziś. Ich owocem jest np. R134a, który jednak okazał się freonem mającym także znaczny wpływ na tworzenie efektu cieplarnianego. W związku z tym na pewno jego stosowanie w przyszłości będzie zabronione.
- 2) Badania nad zastosowaniem czynników całkowicie neutralnych dla środowiska naturalnego takich jak: woda, powietrze, dwutlenek węgla. Teoretycznie mogą one być używane jako czynniki ziębnicze, ale nie są szeroko stosowane ze względu na swoje właściwości termodynamiczne.
- 3) Stosowanie pośrednich układów chłodzenia, które umożliwiają zastosowanie dwóch różnych czynników: jednego do produkcji, drugiego do transportu „zimna”. W tym rozwiązaniu ogranicza się ilość szkodliwych czynników ziębniczych, które są używane tylko do samego procesu produkcji „zimna”. Jest ono następnie przekazywane za pomocą czynnika pośredniczącego (neutralnego dla środowiska) np. solanki do odbiornika.

Takim czynnikiem transportującym „zimno” w pośrednich systemach chłodzenia może być na przykład, stosowany jeszcze na niewielką skalę, lód zawieszinowy. Mieszanina ta, składająca się z wody, alkoholu i kryształków lodu nadaje się doskonale nie tylko do transportu, ale także do magazynowania „zimna”.

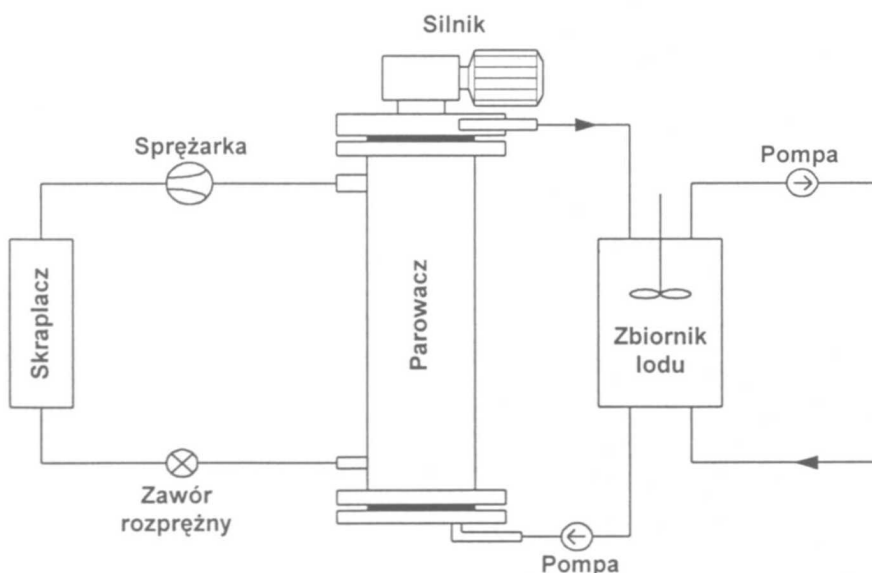
2.2. Wytwarzanie lodu zawiesinowego

Ze względu na osiąganą wydajność oraz temperaturę pracy, urządzenia do wytwarzania lodu zawiesinowego można podzielić na trzy grupy:

1. Wytwornice typu FLO-ICE o wydajności $1 \div 500$ kW i temperaturze pracy $-1 \div -40^{\circ}\text{C}$,
2. Wytwornice typu MAXIM ICE o wydajności $10 \div 450$ kW i temperaturze $-2 \div -4^{\circ}\text{C}$,
3. Wytwornice typu VACUUM ICE o wydajności $185 \div 2250$ kW i temperaturze $-0.5 \div -4^{\circ}\text{C}$.

Schemat wytwornicy typu FLO-ICE został przedstawiony na rysunku 2.2.1.

Wytwarzanie lodu zawiesinowego w urządzeniu typu FLO-ICE (rys. 3.2.1) przebiega w sposób następujący [Paul, 1992-1993]. Roztwór alkoholu i wody schładzany jest w parowaczu, który ma kształt cylindrycznego zbiornika. Na jego zewnętrznej ścianie następuje odparowanie czynnika chłodniczego (freonu). Powoduje to tworzenie się lodu na wewnętrznej ścianie cylindra, w którym znajduje się roztwór. Wzrost kryształków jest mechanicznie ograniczony poprzez obracające się ostrza skrobaka, prześlizgujące się po wewnętrznej ścianie parowacza. Na skutek powstawania kryształków lodu wzrasta stężenie etanolu w wodzie (część wody staje się drobkami lodu). Dzięki temu następuje obniżenie temperatury zamarzania, co ogranicza dalsze powstawanie lodu i mieszanina pozostaje „pompowalna”. Następnie zostaje ona przepompowana do zbiornika – akumulatora, gdzie jest nieustannie mieszana w celu uniknięcia zbrylenia się lodu oraz zapewnienia homogenizacji mieszaniny.



Rys. 2.2.1. Schemat wytwornicy lodu typu FLO-ICE

Ze zbiornika lód zawiesinowy jest transportowany za pomocą pompy obiegowej do odbiornika „zimna” (wymiennika), skąd po odebraniu ciepła wraca do zbiornika.

Wytwornice typu MAXIM ICE różnią się od systemu FLO-ICE przede wszystkim konstrukcją parowacza. W tym rozwiązaniu parowaczem jest wymiennik płaszczowo-rurowy. Czynnikziębniczy odparowuje w przestrzeni międzyrurowej, oziębiając ciecz płynącą w rurkach. Ciecz spływając cienką warstwą po wewnętrznych ściankach rur zamarza. Następnie lód (podobnie jak w urządzeniu typu FLO-ICE) jest zdrapywany przez obracające się pręty i opada w postaci kryształków do specjalnego zbiornika (w kształcie misy), skąd razem z cieczą zostają przetransportowane do zbiornika - akumulatora.

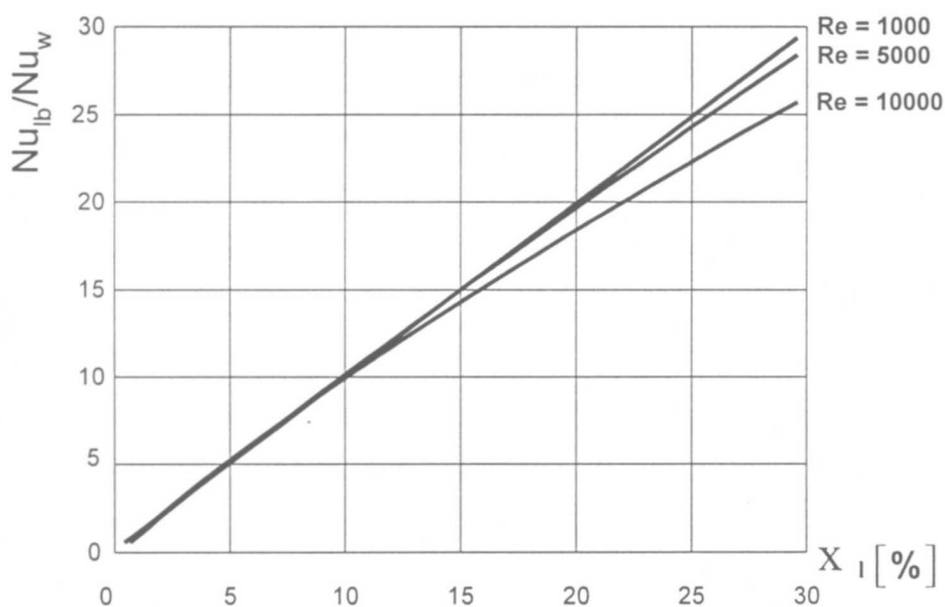
System VACUUM ICE działa na innej zasadzie. W metodzie tej wykorzystuje się właściwości punktu potrójnego. Jak wiadomo, w tym punkcie występują jednocześnie trzy fazy: stała, ciekła i gazowa. Dla wody parametry punktu potrójnego wynoszą: ciśnienie 0.00061 MPa, temperatura 0.01°C. Na skutek zasysania pary przez sprężarkę następuje zaburzenie równowagi termodynamicznej poprzez obniżenie ciśnienia. Powoduje to natychmiastowe odparowanie części cieczy (tzw. „błysk-parowanie”). Na skutek tego następuje odebranie porcji ciepła z cieczy i tworzą się w niej kryształki lodu. Ciecz z lodem zawieszonym jest odprowadzana do zbiornika – akumulatora. Zassana przez sprężarkę para zostaje skroplona w skraplaczu i może zostać ponownie użyta do wytworzenia lodu.

Mniej rozpowszechnione (na skutek trwających jeszcze nad nimi badań) są urządzenia, które do wytwarzania lodu wykorzystują inne zjawiska jak np. wykorzystanie bezpośredniego kontaktu czynników nierozpuszczalnych w wodzie. Stosuje się również wymienniki zbudowane z rurek o bardzo gładkiej powierzchni ścianki, co zapobiega osadzaniu się na niej lodu [Kauffeld, 1999].

2.3. Zalety i wady lodu zawieszinowego jako czynnika pośredniczącego

Wyniki badań doświadczalnych prezentowanych w literaturze wskazują, że w porównaniu z tradycyjnymi chłodziwami lód zawieszinowy posiada kilka znaczących zalet. Największą zaletą jest duża właściwa wydajność cieplna na skutek utajonego ciepła topnienia lodu. Lód zawieszinowy charakteryzuje się także znacznie wyższymi współczynnikami przejmowania ciepła. Dla mieszaniny wody i bryłek lodu o średnicy do 1 mm i przy zawartości lodu na poziomie 20%, współczynnik przejmowania ciepła może wzrosnąć nawet 5-krotnie, zaś przy zawartości lodu w zawieszynie wynoszącym 30%, wzrost tego współczynnika może być nawet 10-krotny w odniesieniu do czystej wody [Podberezskij i Żurawskij, 1989].

W niektórych publikacjach [Wetzler, 1999] prezentowane są jeszcze wyższe wartości współczynników przejmowania ciepła, które można otrzymać przy zastosowaniu lodu zawiesinowego w roztworze wodnym etanolu. Na rysunku 2.3.1 przedstawiono wzrost intensywności przejmowania ciepła, wyrażonej poprzez stosunek liczb Nusselta, przy przepływie lodu zawiesinowego w wodnym roztworze etanolu w odniesieniu do czystej wody, w zależności od udziału lodu w mieszaninie i liczby Reynoldsa. Wykres ten, został sporządzony na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych przy przepływie lodu zawiesinowego o stężeniu masowym etanolu od 8 do 12% oraz zawartości lodu od 0 do 30%, w rurze o średnicy 21.6 mm, w zakresie prędkości od 0.7 do 2.5 m/s [Kalinowski i inni, 2000].



Rysunek 2.3.1. Stosunek liczby Nusselta dla przepływu lodu zawiesinowego w wodnym roztworze etanolu Nu_{lb} do liczby Nusselta dla przepływu czystej wody Nu_w w zależności od zawartości lodu x_l oraz liczby Reynoldsa Re

Z wykresu na rysunku 2.3.1 wynika, że wzrost intensywności wymiany ciepła jest niemal wprost proporcjonalny do zawartości lodu. Liczba Reynoldsa czyli prędkość przepływu mieszaniny ma niewielki wpływ na poprawę przejmowania ciepła w odniesieniu do czystej wody.

Kolejną zaletą lodu zawiesinowego są korzystne właściwości pod względem oporów przepływu. Cechą charakterystyczną tej mieszaniny jest brak występowania, w klasycznej

postaci, przepływu laminarnego bądź turbulentnego. Ruch tego płynu można nazwać przepływem tłokowym, czyli niemal w całym przekroju rurociągu prędkość płynu jest jednakowa. W zakresie niskich prędkości przepływu, lód zawieszony stwarza większe opory przepływu w odniesieniu do wody, lecz powyżej pewnej prędkości opory przepływu lodu zawieszony (dla zawartości drobinek lodu 20-30%) są znacząco mniejsze od oporów przepływu wody, zwłaszcza dla niższych zawartości lodu [Kalinowski i inni, 2000].

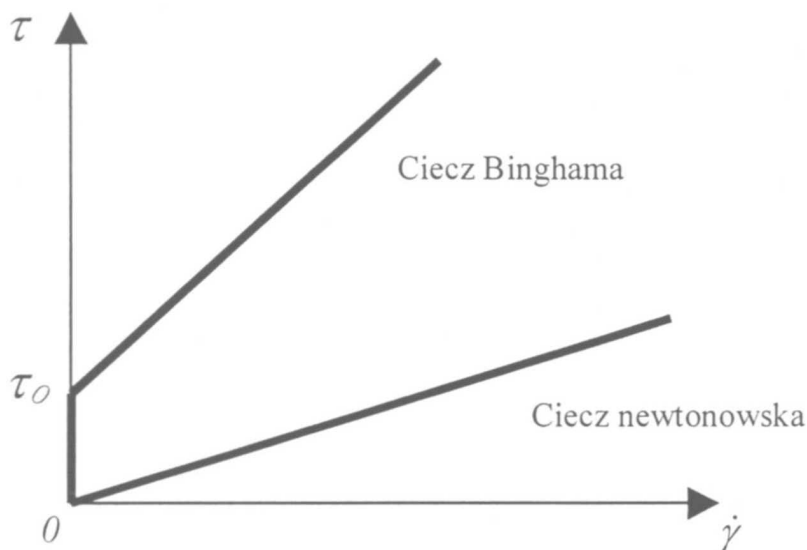
Oprócz wymienionych powyżej zalet lodu zawieszony występują także i wady. Jedną z nich jest jego skłonność do zbrylania się w zbiorniku lodu, a więc co za tym idzie, konieczność dbania o homogenizację mieszaniny. Wadę tę można jednak usunąć montując w zbiorniku lodu zawieszony specjalne mieszadło, które zapewni ujednoczenie składu mieszaniny w każdym miejscu zbiornika. Pozwoli ono również zasilać wymiennik mieszaniną o jednakowym składzie. Doświadczenia wykazały [Egolf i inni, 1996], że najlepszy efekt homogenizacji uzyskuje się przy lekko skośnym ustawieniu mieszadła względem zbiornika. Nie bez znaczenia jest także samo ukształtowanie rurociągów. Nie można dopuścić do tego, aby lód zawieszony w jakimś odcinku rurociągu pozostawał przez dłuższy czas w spoczynku, ponieważ w stanie statycznym następuje rozwarstwienie cząstek lodu w cieczy. Dzieje się tak dlatego, że występuje istotna różnica w gęstości mieszaniny oraz zamrożonych drobinek lodu. Różnica ta wynika z tego, że zamarza jedynie woda w mieszaninie, czyli następuje zmiana stężenia pozostałego roztworu. Ponadto, ze względu na właściwości fizyczne, inna jest objętość lodu, a inna wody z niego wytopionej. Wynika to z faktu, że woda należy do tej grupy substancji, które krzepnąc zwiększają swoją objętość.

Po dłuższym czasie rozwarstwienie mieszaniny może doprowadzić do zablokowania rurociągu. To samo zjawisko może zachodzić w trójnikach z odgałęzieniem skierowanym ku górze. Cząstki lodu mogą się gromadzić w przewodzie odgałęźnym, prowadząc do zablokowania tego przewodu. Dlatego odgałęzienia należy projektować w takich instalacjach w kierunku poziomym lub do dołu.

Istnieje cały szereg tego typu instalacji działających w Danii, Niemczech, Szwajcarii, Japonii a nawet w państwach afrykańskich, gdzie urządzenia te wykorzystuje się do ochładzania powietrza wentylacyjnego w kopalniach [Kauffeld, 1999]. W Japonii lód zawieszony wykorzystywany jest w zasobnikach zimna instalacji klimatyzacyjnych. W Europie instalacje wykorzystujące lód zawieszony jako chłodziwo pośredniczące znajdują się w niektórych supermarketach, zakładach mięsnych, browarach.

2.4. Model przepływu

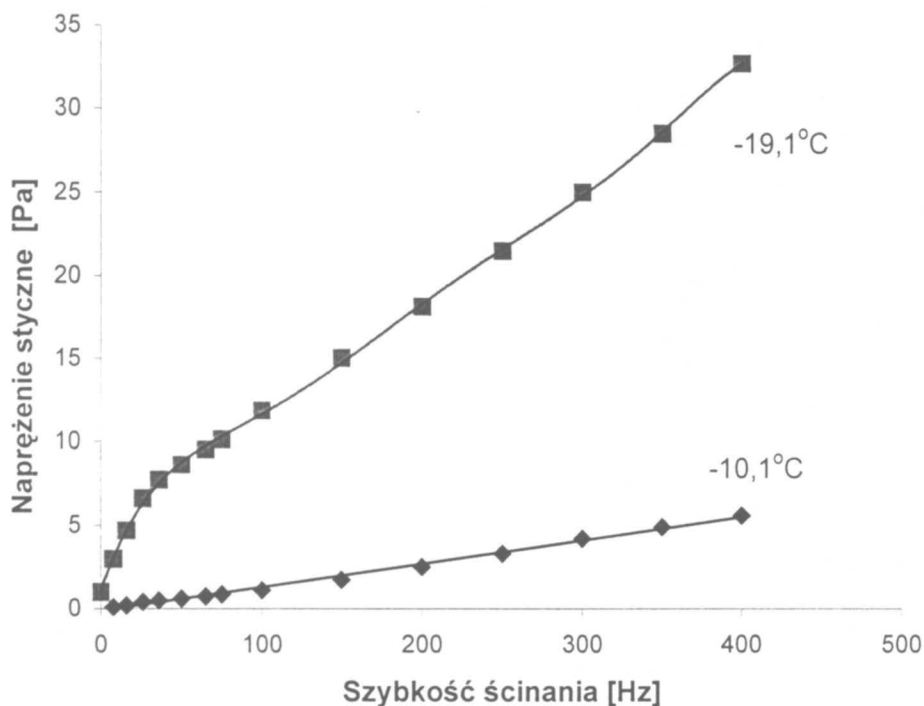
Płyny charakteryzujące się występowaniem granicznego naprężenia stycznego, poniżej którego zachowują się jak ciała stałe, a powyżej jak ciecze, noszą w literaturze [Matras, 2001] nazwę plastycznolepkich cieczy nienewtonowskich. Mogą to być płyny dwu- lub wielofazowe, których strukturę tworzy jednorodna (z makroskopowego punktu widzenia) mieszanina cieczy i rozproszonych w nich cząstek ciała stałego lub gazu. Należą do nich na przykład stopiona czekolada, szlam cementowy, niektóre smary, papkowate suspensje kredy lub wapna, stężone zawiesiny przemysłowe, pasty, pigmenty. Powyższe ciecze można traktować jako ciecz Bingham (rys. 2.4.1)



Rysunek 2.4.1. Zależność naprężenia stycznego τ od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ dla cieczy newtonowskiej oraz cieczy Bingham

Ciecz Bingham wykazuje krytyczne naprężenie styczne τ_0 . Takie substancje zaczynają „płynąć”, kiedy naprężenie styczne przekroczy wartość krytyczną. Ciecz Bingham charakteryzuje się tym, że podczas przepływu w rurze prawie w całym przekroju posiada stały (jednakowy) wektor prędkości. Ten przepływ jest nazwany w literaturze przepływem tłokowym.

Zależność zmierzonego naprężenia stycznego w zależności od szybkości ścinania [Egolf i inni, 1996] dla 30% wodnego roztworu alkoholu etylowego poniżej i powyżej temperatury zamarzania roztworu przedstawia rysunek 2.4.2.



Rysunek 2.4.2. Zależność zmierzonego naprężenia stycznego w zależności od szybkości ścinania dla 30% wodnego roztworu alkoholu etylowego poniżej i powyżej temperatury zamarzania roztworu

Z rysunku 2.4.2 wynika, że roztwór dwóch cieczy (wody i alkoholu) bez cząstek lodu jest cieczą newtonowską. Wraz z powstawaniem cząsteczek lodu roztwór staje się mieszaniną, wzrasta krytyczne naprężenie styczne i ciecz przechodzi w nienewtonowską ciecz Binghama. Inni autorzy [Ayel i inni, 2003] proponują, aby lód zawieszony o małej zawartości drobinek lodu (6÷15%) traktować jak ciecz newtonowską a powyżej jako ciecz nienewtonowską. Proponują także kilka modeli obliczeniowych, które mogą być używane dla wyższych udziałów drobinek lodu. Są to modele: Ostwalda, Binghama, Herschel-Buckley'a, Cassona.

2.5. Zależności na współczynnik przejmowania ciepła

Jedynym zgodnym wnioskiem wynikającym z przedstawionych w literaturze wyników badań nad współczynnikiem przejmowania ciepła podczas przepływu w rurze lodu zawieszinowego, jest wzrost liczby Nusselta (współczynnika przejmowania ciepła) wraz ze wzrostem prędkości przepływu chłodziwa (liczby Reynoldsa). Wpływ zawartości lodu na intensywność wymiany ciepła nie jest już tak jednoznaczny. W niektórych badaniach [Snoek i Bellamy, 1997, Knodel i inni, 2000] zaobserwowano spadek liczby Nusselta ze wzrostem udziału drobinek lodu w mieszaninie. Jednak zdecydowana większość badaczy lodu zawieszinowego wykazała wzrost liczby Nusselta ze wzrostem udziału drobinek lodu w mieszaninie.

W literaturze spotyka się wyłącznie zależności na współczynnik przejmowania ciepła dla przepływu prostymi rurami poziomymi.

1. Dworzak zaproponował równanie na współczynnik przejmowania ciepła dla lodu zawieszinowego dające 30% błąd obliczeń w odniesieniu badań [Dworzak, 2000].

Wzór Dworzaka:

$$\text{Nu}_{lb} = \varepsilon \cdot \text{Nu}_{lbr} \quad (2.5.1)$$

gdzie:

$$\varepsilon = 1 + 103 \cdot x_l - 2.003 \cdot \text{Re}_{lb}^a \cdot (100 \cdot x_l)^b \quad (2.5.2)$$

$$a = -0.192 \cdot (30 - 100 \cdot x_l) / 30 \quad (2.5.3)$$

$$b = 0.339 \cdot \text{Re}_{lb} \cdot 10^{-4} \quad (2.5.4)$$

x_l [kg/kg] - udział masowy lodu,

Nu_{lb} [-] - liczba Nusselta dla lodu zawieszinowego,

Nu_{lbr} [-] - liczba Nusselta dla wodnego roztworu alkoholu etylowego.

Wzór obowiązuje w zakresie prędkości przepływu lodu zawieszinowego od 0.7 ÷ 2.5 m/s oraz dla udziału masowego drobinek lodu $x_l = 0 \div 30\%$.

2. Meewisse i Ferreira podają zależność w zakresie stosowania dla liczby Reynoldsa $\text{Re}_{lb} > 2000$ oraz dla udziału masowego drobinek lodu: $0 < x_l < 35\%$ [Ayel i inni, 2003].

Wzór Meewisse'a i Ferreiry:

$$Nu_{lb} = 38.3 \cdot Gz_{lb}^{0.15} \cdot x_l^{0.52} \quad (2.5.5)$$

gdzie:

$$Gz_{lb} = \frac{\pi \cdot Re_{lb} \cdot Pr_{lb} \cdot d_w}{4 \cdot l} \quad (2.5.6)$$

x_l [kg/kg] – udział masowy lodu,

Pr_{lb} [-] – liczba Prandtla dla lodu zawiesinowego,

l [m] – długość rury,

d_w [m] – średnica wewnętrzna rury.

Badania były prowadzone dla drobinek lodu $0.01\text{mm} < d < 0.1\text{mm}$ i wodnych roztworów CaCl_2 , NaCl , etanolu ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) oraz glikolu etylenowego. Zaobserwowano wzrost współczynnika przejmowania ciepła wraz ze wzrostem udziału drobinek lodu. Największy wzrost współczynnika przejmowania zaobserwowano dla wodnych roztworów CaCl_2 i NaCl (od $250\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ dla $x_l = 0\%$ do $2500\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ dla $x_l = 30\%$). Dla wodnych roztworów etanolu i glikolu etylenowego wzrost współczynnika przejmowania ciepła wyniósł odpowiednio (od $250\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ dla $x_l = 0\%$ do $2200\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ dla $x_l = 30\%$).

3. Harada do swoich badań wykorzystywał innego rodzaju zawiesiny. Były to mieszaniny cieczy z cząsteczkami szkła oraz cieczy z cząsteczkami żywicy o średnicy $0.06\text{mm} < d < 1\text{mm}$ [Ayel i inni, 2003]. Badania dotyczyły współczynników przejmowania ciepła dla rury poziomej o średnicy 14, 19 i 25 mm. Zakres stosowania zależności: $8000 < Re_{lbr} < 50000$, $0.01 < x_l < 0.1$ oraz stosunek średnicy drobinek lodu do średnicy wewnętrznej rury w zakresie $0.0024 < d/d_w < 0.071$. Powyższa zależność daje 15% błąd względny odniesiony do badań.

Wzór Harady:

$$Nu_{lb} \cdot Pr_{lbr}^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_{lb}}{\mu_{lbr}} \right)^{-0.14} = 1.61 \cdot 10^{-2} \cdot Re_{lbr}^{0.88} \quad (2.5.7)$$

$$\text{Nu}_{lb} = \frac{\alpha_{lb} \cdot d_w}{\lambda_{lbr}} \quad (2.5.8)$$

$$\text{Pr}_{lbr} = \frac{c_{pm} \cdot \mu_{lbr}}{\lambda_{lbr}} \quad (2.5.9)$$

$$\text{Re}_{lbr} = \frac{\rho_m \cdot w_m \cdot d_w}{\mu_{lbr}} \quad (2.5.10)$$

Autor zaobserwował 10÷30% wzrost współczynnika przejmowania ciepła w odniesieniu do cieczy bez drobinek ciała stałego.

4. Jensen badał wodny roztwór alkoholu etylowego (którego stężenie początkowe wynosiło 10%) z drobinami lodu o średnicy $0.01\text{mm} < d < 0.2\text{mm}$ [Ayel i inni, 2003]. Autor wyznaczał zależność na współczynnik przejmowania ciepła dla rury poziomej o długości 1m i średnicy: 12, 16 i 20mm. Zakres udziału masowego drobinek lodu wynosił $5\% < x_l < 30\%$.

Wzór Jensena:

dla $x_l > 1\%$

$$\frac{\text{Nu}_1}{\text{Nu}_{lbr}} = 10.42 \cdot \text{Re}_{lbr}^{0.81} \cdot \text{He}^{0.14} \quad (2.5.11)$$

dla $x_l < 0.15\%$

$$\frac{\text{Nu}_2}{\text{Nu}_{lbr}} = 1 \quad (2.5.12)$$

dla $0.15 < x_l < 1\%$

$$\text{Nu}_{lb} = A \cdot \text{Nu}_1 + (1 - A) \cdot \text{Nu}_2 \quad (2.5.13)$$

gdzie:

$$\text{Nu}_{lb} = \text{Nu}_1 = \text{Nu}_2 = \frac{\alpha_{lb} \cdot d_w}{\lambda_{lbr}} \quad (2.5.14)$$

$$A = \frac{x_l - 0.0015}{0.0085} \quad (2.5.15)$$

$$\text{He} = \frac{d_w^2 \cdot \rho_{lbr} \cdot \tau_0}{\mu_{lbr}^2} \quad (2.5.16)$$



τ_0 - krytyczne naprężenie styczne [Pa].

Zależność na liczbę Nusselta dla części roztworu, która nie zamarza (wzór Hoffmana):

$$Nu_{lbr} = 0.0237 \cdot Re_{lbr}^{0.81} \cdot Pr_{lbr}^{0.39} \quad (2.5.17)$$

Wzór Jensena daje 20% błąd względny obliczeń w odniesieniu do badań, a 90% wyników obliczeń tym wzorem mieści się w granicach 10% błędu względnego. Według Jansena dla prędkości przepływu lodu zawiesinowego 0.5 m/s współczynnik przejmowania ciepła znajduje się w zakresie od 1500 W/(m²K) dla $x_1 = 5\%$ do 3500 W/(m²K) dla $x_1 = 30\%$, a dla prędkości 1.5m/s znajduje się w zakresie od 3500W/(m²K) dla $x_1 = 5\%$ do 5000 W/(m²K) dla $x_1 = 25\%$.

5. Christensen i Kauffeld badali wodny roztwór alkoholu etylowego (którego stężenie początkowe wynosiło 10%) [Ayel i inni, 2003]. Autorzy wyznaczyli zależność na współczynnik przejmowania ciepła dla rury poziomej o długości 1m i średnicy 21.6mm. Udział masy drobinek lodu wynosił $0\% < x_1 < 30\%$. Zakres prędkości przepływu lodu zawiesinowego wynosił $w_{lb} = 0.7 \div 2.5$ m/s.

Wzór Christensena i Kauffelda:

dla $x_1 < 5\%$

$$\frac{Nu_{lb}}{Nu_{lbr}} = 1 \quad (2.5.18)$$

dla $x_1 > 5\%$

$$\frac{Nu_{lb}}{Nu_{lbr}} = 1 + 0.103 \cdot x_1 - 2.003 \cdot Re_{lb}^{-0.192} \left(\frac{30-x_1}{30} \right) \cdot x_1^{0.339} \left(\frac{Re_{lb}}{10000} \right) \quad (2.5.19)$$

Wzór Christensena i Kauffelda daje 35% błąd względny odniesiony do badań, a 75% wyników obliczeń mieści się w granicach 30% błędu względnego. Według autorów dla prędkości przepływu lodu zawiesinowego 1m/s współczynnik przejmowania ciepła znajduje się w zakresie od 2000 W/(m²K) dla $x_1 = 5\%$ do 6000 W/(m²K) dla $x_1 = 30\%$, a dla prędkości 2m/s znajduje się w zakresie od 3000 W/(m²K) dla $x_1 = 5\%$ do 9000 W/(m²K) dla $x_1 = 25\%$.

6. Petukhov badał mieszaninę, w której udział masowy lodu wynosił $4\% < x_l < 11\%$ [Knodel, 2000]. Zaobserwował on spadek współczynnika przejmowania ciepła wraz ze wzrostem udziału masowego drobinek lodu.

Wzór Petukhova:

$$\text{Nu}_{lb} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot \text{Re}_{lb} \cdot \text{Pr}_{lb}}{K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^2 \cdot \left(\text{Pr}_{lb}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (2.5.20)$$

gdzie:

$$\text{Nu}_{lb} = \frac{\alpha_{lb} \cdot d_w}{\lambda_{lb}} \quad (2.5.21)$$

$$\text{Pr}_{lb} = \frac{c_{p_{lb}} \cdot \mu_{lb}}{\lambda_{lb}} \quad (2.5.22)$$

$$\text{Re}_{lb} = \frac{\rho_{lb} \cdot w_{lb} \cdot d_w}{\mu_{lb}} \quad (2.5.23)$$

$$f = (1.82 \cdot \log \text{Re}_{lb} - 1.64)^{-2} \quad (2.5.24)$$

$$K_1 = 1 + 3.4 \cdot f \quad (2.5.25)$$

$$K_2 = 11.7 + 1.8 \cdot \text{Pr}_{lb}^{-\frac{1}{3}} \quad (2.5.26)$$

W badaniach Petukhova liczba Reynoldsa zmieniała się w zakresie $40000 < \text{Re}_{lb} < 70000$.

7. Przedmiotem badań Snoeka i Bellamy'ego był 8÷10% roztwór glikolu etylenowego [Ayel i inni, 2003]. Autorzy wyznaczyli zależność na współczynnik przejmowania ciepła dla rury poziomej o długości 2m i średnicy 15.74mm. Udział masowy drobinek lodu wynosił $4\% < x_l < 33\%$. Zakres prędkości przepływu lodu zawiesinowego wynosił $w_{lb} = 0.9 \div 2.8$ m/s.

$$\text{Nu}_{lb} = 0.023 \cdot \text{Re}_{lb}^{0.8} \cdot \text{Pr}_{lb}^{0.4} \quad (2.5.27)$$

Wzór Snoeka i Bellamy'ego daje 30% błąd względny odniesiony do badań.

2.6. Wnioski z przeglądu literatury

- Zastosowanie lodu zawiesinowego jako czynnika pośredniczącego niesie z sobą wiele korzyści, jak na przykład: małe zagrożenie degradacji atmosfery ze względu na ograniczenie stosowania szkodliwych czynników ziębicznych, duże współczynniki przejmowania ciepła (co daje możliwość zmniejszenia powierzchni wymiany ciepła), niższa wymagana moc pomp obiegowych ze względu na niskie opory przepływu czynnika przez instalację oraz możliwość stosowania mniejszych średnic rurociągów w stosunku do innych chłodziw. Jednak są to wnioski wynikające głównie z niekompletnych badań doświadczalnych oraz informacji producentów urządzeń do wytwarzania lodu zawiesinowego. Brakuje pełnej charakterystyki tego chłodziwa, stabelaryzowania jego właściwości fizycznych i termodynamicznych, co mogłoby się przyczynić do szerokiego i powszechnego stosowania go w pośrednich układach chłodzenia. Zamiarem autora jest to, aby niniejsza praca stała się przyczynkiem do opracowania takich danych dla lodu zawiesinowego.
- Brakuje również wiarygodnych zależności pozwalających na wyznaczenie średnich współczynników przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego. Wyniki obliczeń otrzymane ze spotykanych w literaturze formuł obliczeniowych różnią się między sobą nawet o kilkaset procent. Zamiarem autora było wyznaczenie zależności na średnie współczynniki przejmowania ciepła podczas przepływu lodu zawiesinowego przez wybrane typy oziębiaczy powietrza.
- Sygnalizowane są równocześnie wady i ograniczenia w stosowaniu lodu zawiesinowego, takie jak między innymi: brak dowolności w ukształtowaniu rurociągów, (które należy budować tak, aby wykluczyć możliwość zablokowania ich lodem), duże opory przepływu (szczególnie przy niskich prędkościach przepływu), utrudniony pomiar zawartości lodu zawiesinowego, kłopotliwa kontrola stężenia roztworu. Dlatego nasuwa się pytanie: czy i w jakim zakresie lód zawiesinowy może zastąpić dotychczas stosowane chłodziwa? Badania porównawcze wymienników (wymenników ożebrowanych, z rurami o przekroju kołowym oraz wymiennika płytowego) zasilanych lodem zawiesinowym oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego powinny przyczynić się do odpowiedzi na to pytanie.

3. TEZA PRACY

Teza pracy: Celowe jest zastąpienie w pośrednich systemach chłodzenia, w określonych warunkach, tradycyjnie stosowanych chłodziw takich jak woda, wodne roztwory alkoholi oraz solanki przez lód zawieszinowy.

Korzyści możliwe do osiągnięcia dzięki zastosowaniu lodu zawieszinowego mogą być następujące:

- mniejsza degradacja atmosfery w przypadku awarii ze względu na ograniczenie stosowania szkodliwych czynników ziębniczych (np. freonów),
- możliwość stosowania mniejszych wymienników ciepła (wyższe współczynniki przejmowania ciepła), a co za tym idzie oszczędność materiałów i miejsca zajmowanego przez te wymienniki,
- mniejsza średnica rurociągów (zmniejszenie ilości chłodziwa),
- niższe koszty eksploatacyjne ze względu na:
 - niższą moc pomp obiegowych (niższe opory przepływu),
 - niższą wymaganą wydajność ziębniczą układu dzięki lepszym właściwościom magazynowania „zimna”,
 - niższe koszty produkcji „zimna” (możliwość nagromadzenia zapasu „zimna” podczas pracy nocnej).

4. METODYKA I ZAKRES BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

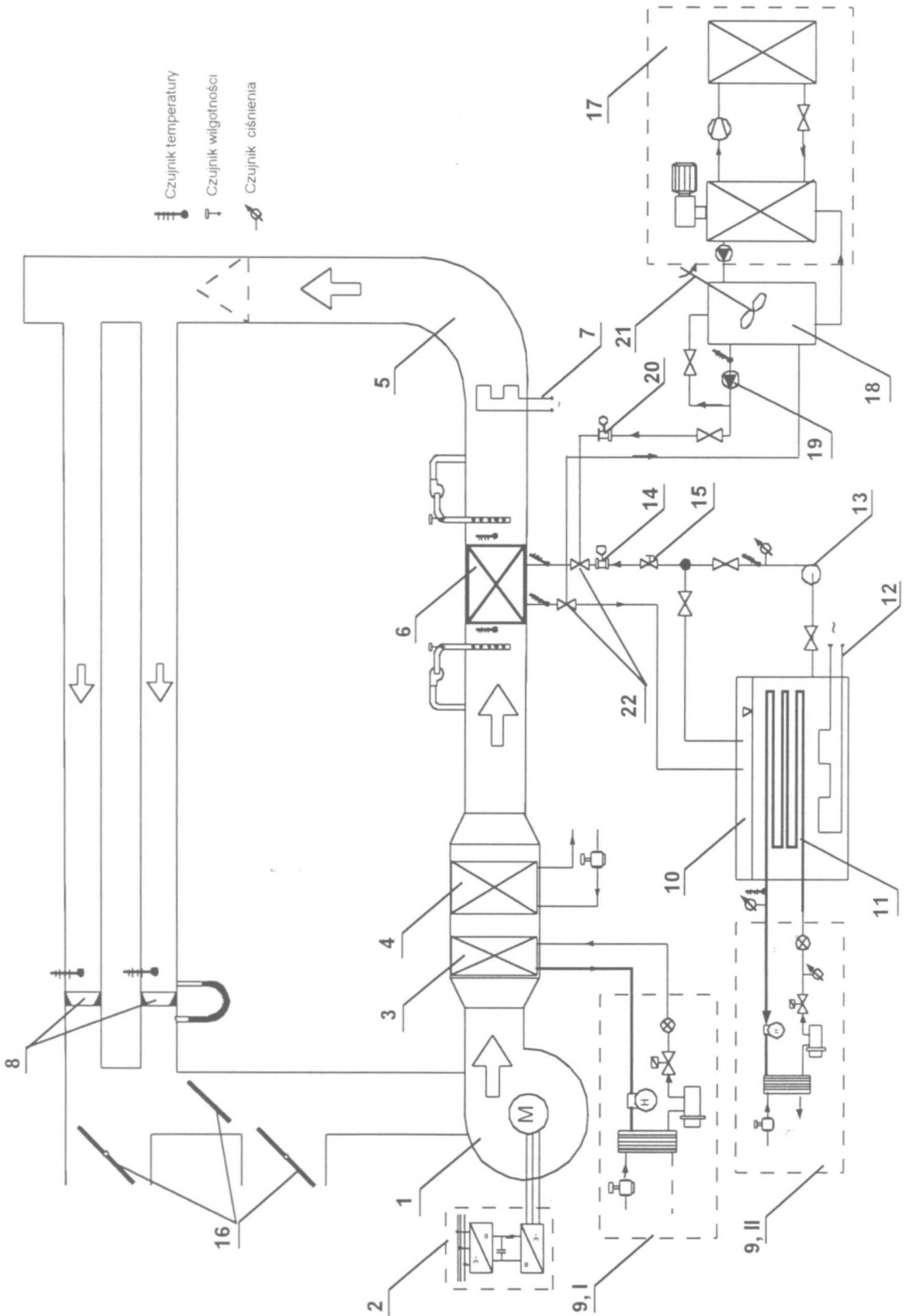
4.1. Budowa i opis stanowiska badawczego

Na rysunku 4.1.1 przedstawiono schemat stanowiska do badań wymienników ciepła zasilanych lodem zawieszonym oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego, gdzie:

1 – wentylator, 2 – przetwornik częstotliwości, 3 – pomocniczy oziębiacz powietrza, 4 – nawilżacz powietrza, 5 – kanał powietrzny 400 x 400 mm, 6 – badany wymiennik ciepła, 7 – nagrzewnica elektryczna, 8 – z węzki pomiarowe, 9 – zespół skraplacza I, II, 10 – zbiornik wodnego roztworu glikolu etylenowego, 11 – rurociąg freonowej instalacji ziębniczej, 12 – grzałka wodnego roztworu glikolu etylenowego, 13 – pompa obiegowa, 14 – przepływomierz turbinkowy, 15 - zawór regulacyjny, 16 – przepustnica powietrza, 17 – wytwornica lodu zawieszynowego, 18 – zbiornik lodu zawieszynowego, 19 – pompa obiegowa, 20 – przepływomierz elektromagnetyczny, 21 – mieszadło, 22 – zawór trójdrogowy.

Stanowisko to składa się z następujących elementów:

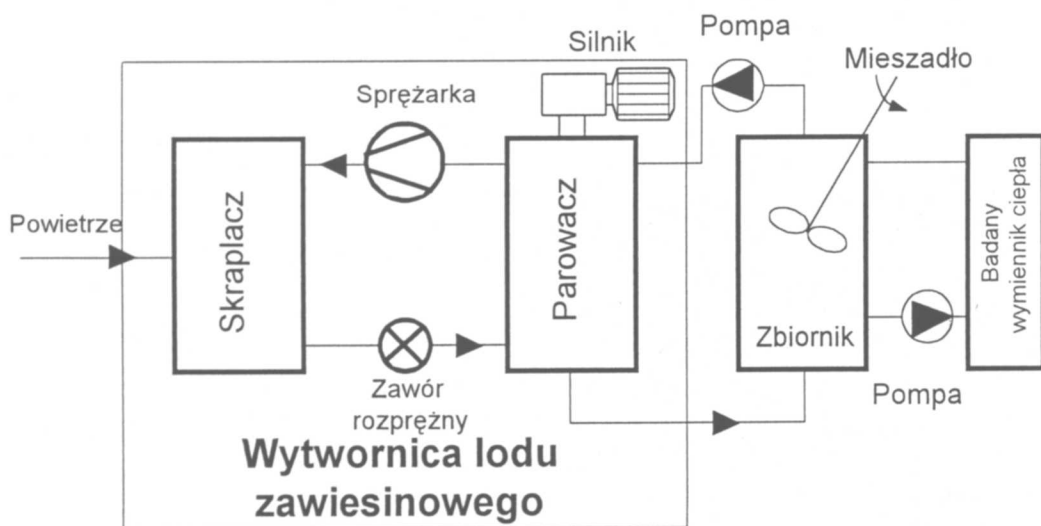
- 1) Wytwornicy lodu zawieszynowego FLO-ICE o wydajności 3.5 kW (rys. 4.1.2, 4.1.3), która została zmontowana i połączona ze specjalnie wykonanym izolowanym zbiornikiem lodu zawieszynowego o pojemności ok. 0.7 m³ (rys. 4.1.4) z wbudowanym mieszadłem (rys. 4.1.5, 4.1.6) do zapewniania jednolitego składu mieszaniny drobinek lodu i wodnego roztworu alkoholu etylenowego. Nie mieszany lód zawieszynowy jak widać na rysunkach 4.1.5 oraz 4.1.6 na skutek różnicy gęstości rozwarstwa się.
- 2) Badanych wymienników ciepła (4 wymienniki ożebrowane i wymiennik płytowy) umieszczonych w uzbrojonym czujnikami pomiarowymi kanale powietrznym.
- 3) Oddzielnej instalacji do zasilania badanych wymienników wodnym roztworem glikolu etylenowego.
- 4) Oddzielnej instalacji ziębniczej oraz nawilżacza parowego do przygotowania wymaganych parametrów powietrza w kanale (temperatura i wilgotność).
- 5) Systemu gromadzenia i archiwizacji danych.



Rysunek 4.1.1. Schemat stanowiska do badań wymienników ciepła zasilanych lodem zawiesinowym oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego

Kanał powietrzny ma zainstalowane bardzo dokładne czujniki do pomiaru temperatury powietrza przed i za badanym wymiennikiem (HART), czujniki temperatury lodu zawiesinowego na wejściu i wyjściu z wymiennika (LIHMATERM), czujniki wilgotności powietrza przed i za wymiennikiem (EE), czujniki wilgotności i temperatury otoczenia (EE) oraz kryzy pomiarowe do wyznaczania wydatku i prędkości powietrza. Posiada on także urządzenia służące do przygotowania powietrza o żądanych parametrach czyli nagrzewnicę i chłodnicę powietrza, nawilżacz parowy oraz ma możliwość osuszania powietrza.

Dodatkowo mierzona jest także temperatura w zbiorniku lodu zawiesinowego oraz temperatura na wyjściu ze zbiornika. Jest to konieczne do wyznaczenia zawartości drobinek lodu w mieszaninie, (sposób wyznaczenia zawartości lodu opisano w rozdziale 4.3). Pomiar objętościowego natężenia przepływu jest wykonywany za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego MPP-04 na odcinku zbiornik lodu – wymiennik. Przepływomierz ten, według producenta, umożliwia dokonywanie pomiarów cieczy czystych i zanieczyszczonych, mieszanin oraz pulp przewodzących prąd elektryczny. Przepływomierz elektromagnetyczny mierzy strumień objętości przepływającej cieczy łącznie ze znajdującym się w niej ciałami stałymi oraz pęcherzykami gazów.



Rysunek 4.1.2. Schemat instalacji do wytwarzania lodu zawiesinowego



Rysunek 4.1.3. Wytwornica lodu zawieszinowego FLO-ICE



Rysunek 4.1.4. Zbiornik magazynujący wytworzony lód zawieszinowy



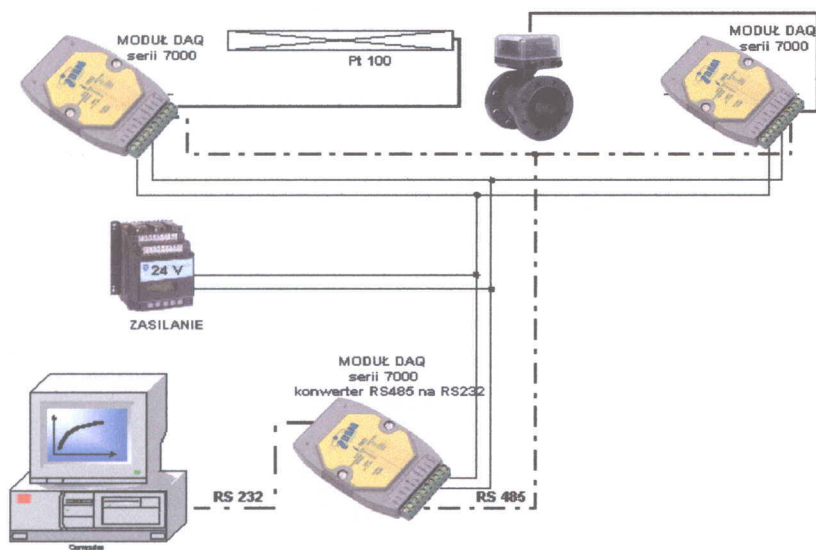
Rysunek 4.1.5. Rozwarstwiony lód zawieszinowy oraz fragment mieszadła



Rysunek 4.1.6. Jedno z dwóch mieszadeł zamontowanych w zbiorniku lodu zawieszinowego

Całe stanowisko badawcze jest włączone w komputerowy system gromadzenia i archiwizacji danych IDAM 7000. Każdy czujnik ma swój własny przetwornik (moduł), dzięki któremu po sczytaniu wartości z danego punktu pomiarowego i przetworzeniu jej jest ona przesyłana do komputera. Częstotliwość sczytywania danych jest nastawiana w programie (LABORATORIUM) do obsługi systemu i może wynosić od 1 sekundy do kilku godzin.

Na rysunku 4.1.7 przedstawiono zasadę działania komputerowego systemu gromadzenia i archiwizacji danych. Sygnał z czujników przesyłany jest do modułów IDAM serii 7000. Długość przewodów między czujnikami a modułami wynosi od 3 do 15 m.

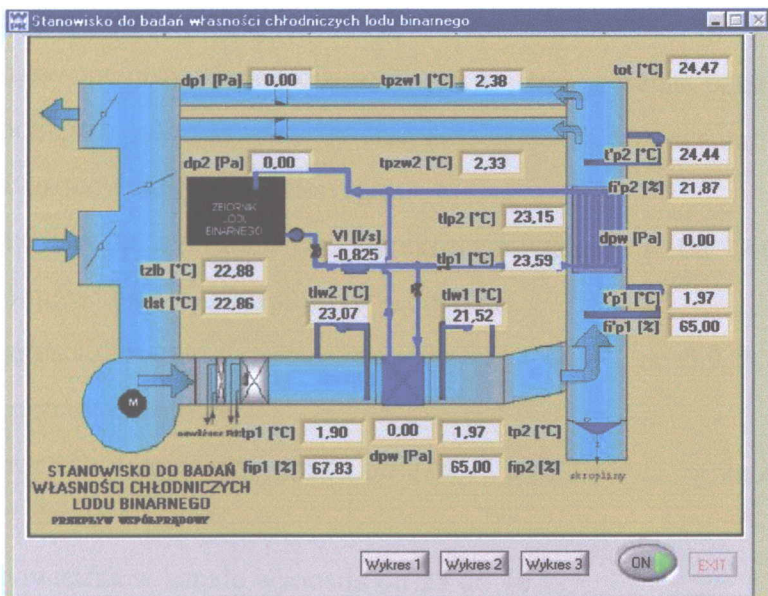


Rysunek 4.1.7. Schemat działania komputerowego systemu gromadzenia i archiwizacji danych IDAM 7000

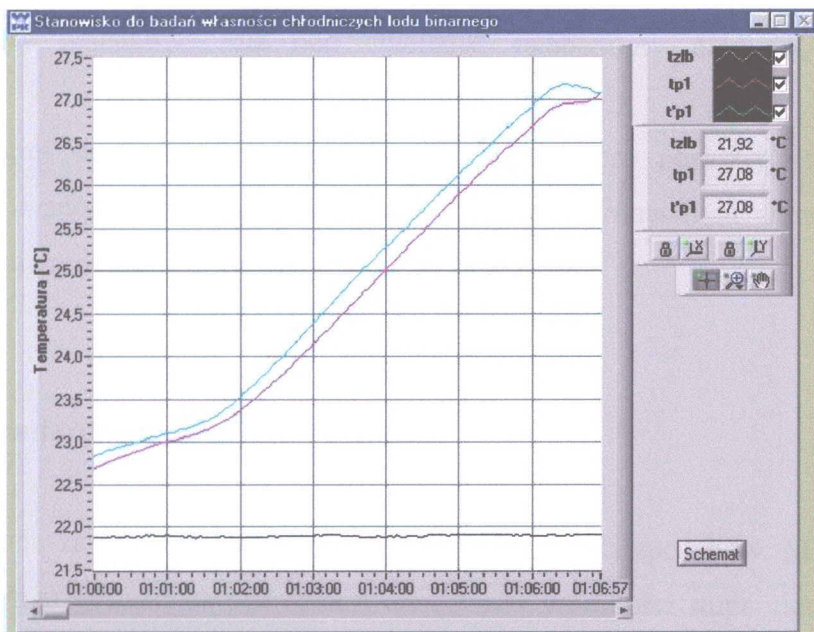
Moduły podłączone są do wspólnej magistrali zasilającej i przesyłającej dane. Interfejs RS485 pozwala na jednoczesną pracę do 256 modułów IDAM. Moduł I-7020 konwertuje RS485 na interfejs RS232 zgodny z interfejsem komputera. Moduł ten połączony jest z komputerem przez jedno z wejść typu COM (rys. 4.1.7). Do wizualizacji zmian zachodzących w badanym układzie wykorzystano programu LabVIEW.

Komputerowy system gromadzenia danych oprócz zbierania i zapisywania sczytywanych wartości umożliwia także nieustanny podgląd mierzonych parametrów na monitorze (rys. 4.1.8), a także tworzenie na bieżąco wykresów ze wskazanych wielkości w czasie (rys. 4.1.9). System ten jest tak skonstruowany, że posiada pewne funkcje diagnostyczne i potrafi samodzielnie wykryć i zlokalizować awarię. Ma także możliwość wprowadzania wartości

współczynników korekcyjnych dla każdego czujnika, uzyskanych na podstawie wzorcowania układu.



Rysunek 4.1.8. Przykładowy widok ekranu monitora komputerowego systemu zbierania danych podczas badań



Rysunek 4.1.9. Przykładowy wykres, tworzony na bieżąco przez program na ekranie monitora komputerowego systemu zbierania danych podczas badań

4.2. Zakres badań

Badania zostały wykonane w szerokim zakresie i jedynymi ich ograniczeniami są możliwości stanowiska badawczego i poszczególnych urządzeń.

1. Badania zostały przeprowadzone dla roztworu o 10% stężeniu początkowym alkoholu etylowego, ponieważ taki roztwór, zgodnie z zaleceniem producenta, jest wymagany do zasilania wytwornicy lodu zawiesinowego.
2. Udział drobinek lodu był udziałem wynikowym, zależnym od obciążenia cieplnego wymiennika i mieścił się w zakresie od 9% do 14%.
3. Wydatek objętościowy lodu zawiesinowego wynosił od 0.1 do 0.9 l/s i ograniczony był wydajnością pompy obiegowej.
4. Prędkość powietrza w kanale wynosiła od 1 do 3.8 m/s i była ograniczona wydajnością wentylatora.
5. Wilgotność powietrza w kanale wynosiła od 25 do 70 %.
6. Temperatura powietrza w kanale wynosiła od 0 do 12°C.

Badania doświadczalne zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap objął porównawcze badania wymienników: ożebrowanych oraz płytowego (patrz punkt 4.4) zasilanych najpierw lodem zawiesinowym, a potem wodnym roztworem glikolu etylenowego. Utrzymane były jednakowe, dla obu chłodziw, temperatury mediów na wejściu do wymiennika.

W drugim etapie zostały wykonane badania, które posłużyły do wyznaczenia zależności na współczynnik przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego dla wszystkich wymienników.

4.3. Metody pomiaru poszczególnych wielkości

1. Zawartość lodu zawiesinowego można wyznaczać na kilka sposobów. Można ją określić np. poprzez pomiar gęstości za pośrednictwem różnicy wysokości słupa cieczy w zbiorniku lub odcinku rury. Drugim sposobem jest wyznaczenie udziału lodu za pomocą urządzenia do pomiaru strumienia masy, wykorzystującego występowanie siły Coriolisa. Ponadto do pomiaru udziału lodu można wykorzystać zmianę przewodności lub pojemności elektrycznej

mieszaniny w stosunku do roztworu bez lodu. Kolejnym sposobem jest wykorzystanie zmieniającej się przepuszczalności światła w funkcji zawartości lodu [Kauffeld, 1996].

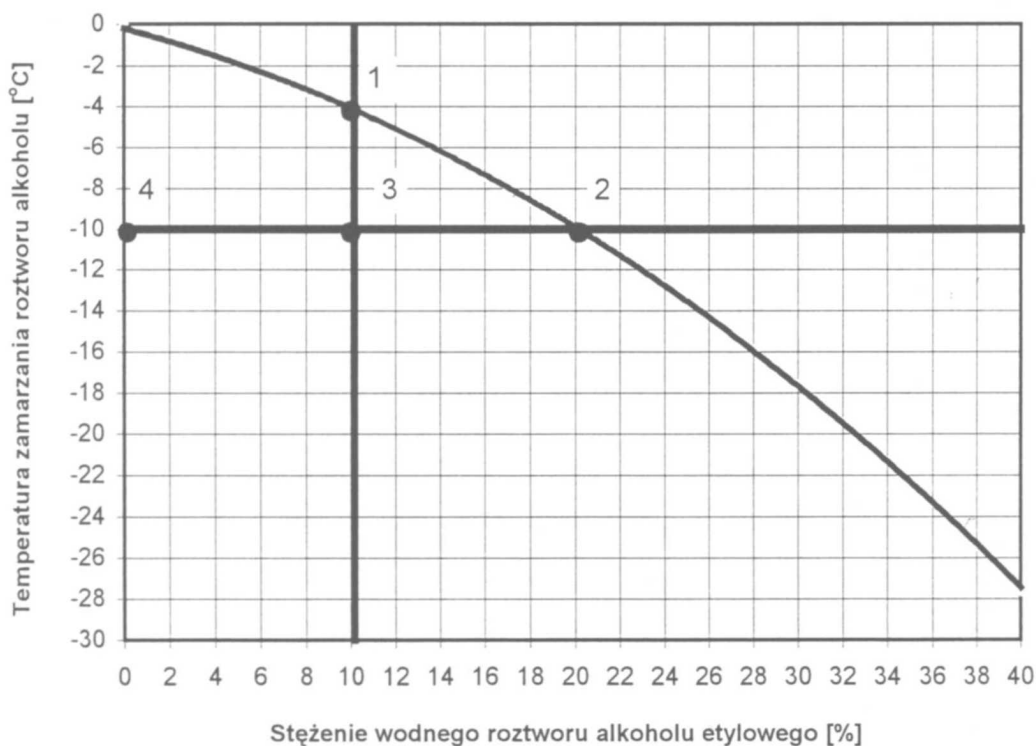
Udział masowy lodu w pracy został wyznaczony z wykresu przedstawiającego krzywą zamarzania roztworu woda – alkohol etylowy w przedziale stężeń od 0 do 40% alkoholu (rys. 4.3.1). Krzywa na tym wykresie powstała na podstawie badań doświadczalnych takiego samego (jak w pracy) roztworu [Lottin, Epiard, 2001] i została opisana wielomianem trzeciego stopnia o współczynnikach wynoszących odpowiednio:

$$a_1 = -0.36015496,$$

$$a_2 = -0.00525292,$$

$$a_3 = -0.00007594.$$

Sposób wyznaczenia zawartości drobinek lodu dla danego stężenia początkowego roztworu (10%) oraz temperatury mieszaniny -10°C wyjaśnia poniższy przykład. Chłodząc odpowiednio przygotowany roztwór o stężeniu masowym 10% alkoholu obniża się jego temperaturę aż osiągnięty zostanie punkt 1 na krzywej zamarzania (rys. 4.3.1). W tym miejscu zaczynają się tworzyć pierwsze kryształki lodu i roztwór staje się mieszaniną. Na skutek tego, że część wody z roztworu została zamrożona w kryształkach lodu, wzrasta stężenie alkoholu w niezamrożonej części roztworu. Prowadzi to do obniżenia jego temperatury zamarzania.



Rysunek 4.3.1. Krzywa zamarzania roztworu woda – alkohol etylowy w przedziale stężeń od 0 do 40% alkoholu

Poprzez dalsze obniżanie temperatury mieszaniny osiąga się punkt zamarzania dla innego stężenia niezamarzniętej części roztworu i tworzą się kolejne drobinki lodu.

Aby wyznaczyć udział drobinek lodu dla 10% roztworu alkoholu etylowego oraz temperatury mieszaniny -10°C należy wyznaczyć długości odcinków (2-3) i (2-4). Udział masowy lodu w mieszaninie dla tych parametrów jest równy ilorazowi długości odcinka (2-3) do długości odcinka (2-4):

$$x_l = \frac{\overline{2-3}}{\overline{2-4}} \quad (4.3.1)$$

W podobny sposób można wyznaczyć zawartość lodu w mieszaninie dla dowolnego punktu znajdującego się pod krzywą zamarzania. Należy znać jedynie temperaturę mieszaniny.

Metoda proporcji pozwala wyznaczyć zawartość lodu zawiesinowego w dowolnym miejscu instalacji. Jest to prosta metoda, która nie powoduje żadnych zaburzeń warunków pracy układu. Wymagany jest jedynie pomiar temperatury mieszaniny. Ta metoda umożliwia wyznaczenie składu lodu zawiesinowego zasilającego wymienniki ciepła nawet bez konieczności izolacji cieplnej zbiornika - akumulatora lodu. Zaizolowanie zbiornika ma wpływ tylko na ekonomikę pracy samej wytwornicy lodu zawiesinowego. W porównaniu do innych metod służących do wyznaczania bieżącego udziału lodu zawiesinowego, metoda proporcji cechuje się prostotą i brakiem konieczności używania skomplikowanych układów i przyrządów pomiarowych. Jej wadą jest jednak pewna niedokładność ze względu na konieczność dokonywania odczytów z wykresu. W celu usprawnienia odczytów w pracy posługiwano się specjalnie opracowanym programem komputerowym.

2. Strumień objętości powietrza w kanale został wyznaczony za pomocą kryz pomiarowych. Ze względu na ilość krążącego w obiegu powietrza oraz ograniczoną miejscem długość odcinków pomiarowych, pomiar ilości powietrza odbywał się w dwóch równoległych rurociągach o średnicy $D = 200 \text{ mm}$ (rury SPIRO). Pomiar został dokonany przy pomocy dwóch zwężek pomiarowych (przepływowych) z podwójnymi kryzami ISA z przytarczowym pomiarem ciśnienia wg PN-65/M-53950.

Po uwzględnieniu parametrów zwężek oraz ich ilości, równanie określające strumień objętości powietrza ma postać:

$$\dot{V}_p = 0,016245 \cdot \left(\sqrt{\frac{\Delta p_1}{\rho_p}} + \sqrt{\frac{\Delta p_2}{\rho_p}} \right) \quad (4.3.2)$$

Prędkość przepływu powietrza można wyznaczyć ze wzoru:

$$w_p = \frac{\dot{V}_p}{A_{cz}} \quad (4.3.3)$$

gdzie:

A_{cz} - (pole przekroju kanału).

3. Pozostałe wielkości takie jak: temperatury po stronie powietrza i lodu, wilgotności powietrza oraz strumień objętości lodu zawiesinowego zostały zmierzone i poprzez moduły (przetworniki) przesłane do komputera.

4.4. Badane wymienniki ciepła

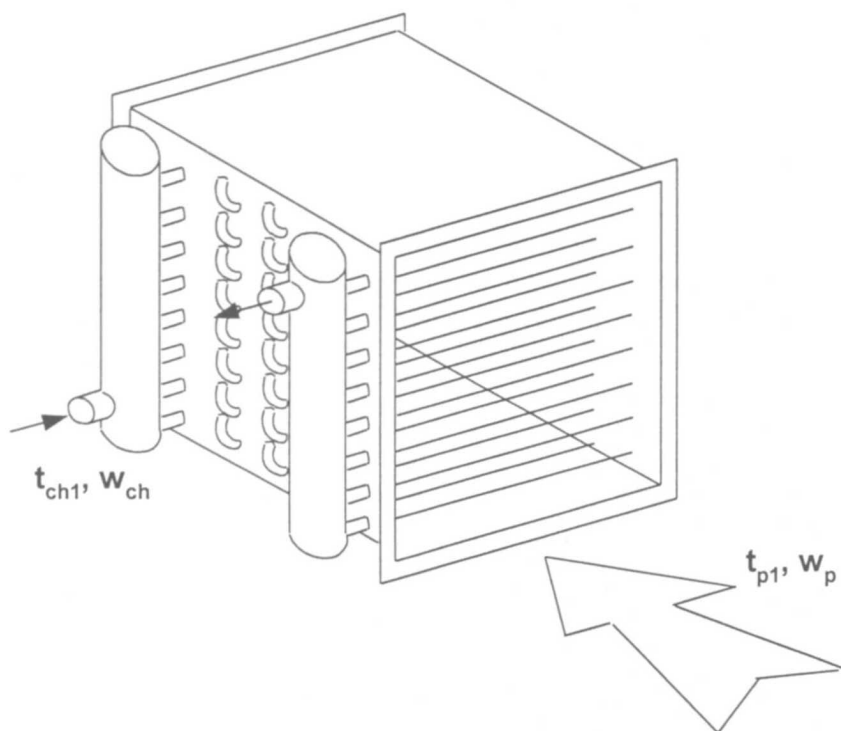
Do badań doświadczalnych przyjęto cztery rurowe, wężownicowe wymienniki ciepła oraz jeden płytowy (panelowy) wymiennik ciepła. Cztery wymienniki rurowe to (rys. 4.4.1) ożebrowane oziębiacze powietrza, wykonane z wężownic o zewnętrznej średnicy rury $d_z = 0.017\text{m}$ i średnicy żeber $d_f = 0.038\text{m}$. Grubość żebra wynosi $s = 0.00035\text{m}$, a podziałka ożebrowania $t_o = 0.0028\text{m}$ (rys. 4.4.2). Podziałka wzdłużna układu rur wymiennika $S_l = 0.039\text{m}$, a poprzeczna $S_q = 0.047\text{m}$. Liczba rur w rzędzie wynosi $n_{rr} = 8$. Wymiary gabarytowe wszystkich czterech wymienników: długość $L = 0.395\text{m}$, wysokość $H = 0,4\text{m}$ i szerokość $G = 0.4\text{m}$.

Dla pierwszego wymiennika ożebrowanego (WO1) liczba rzędów rur wynosi $n_r = 6$, a liczba zasilań $n_z = 8$. Długość przepływu chłodziwa wynosi 6 szerokości wymiennika tj. $l_c = 2.4\text{m}$ (rys. 4.4.1, 4.4.3).

Drugi wymiennik ożebrowany (WO2) ma taką samą liczbę rzędów rur i liczbę zasilań $n_r = n_z = 2$. Długość przepływu chłodziwa wynosi 8 szerokości wymiennika tj. $l_c = 3.2\text{m}$. W tym wymienniku czterokrotnie zmniejszono, w odniesieniu do wymiennika WO1, liczbę zasilań w celu uzyskania większych prędkości przepływu chłodziwa.

Trzeci wymiennik ożebrowany (WO3) ma liczbę rzędów rur $n_r = 2$, a liczbę zasilań $n_z = 1$. Długość przepływu chłodziwa jest dwukrotnie większa niż w drugim wymienniku – wynosi 16 szerokości wymiennika (długa węzownica) tj. $l_c = 6.4\text{m}$. W tym wymienniku dwukrotnie zwiększono długość przepływu chłodziwa w odniesieniu do wymienników ożebrowanych WO2 oraz WO4, aby sprawdzić wpływ długości przepływu chłodziwa na wydajność wymiennika ciepła.

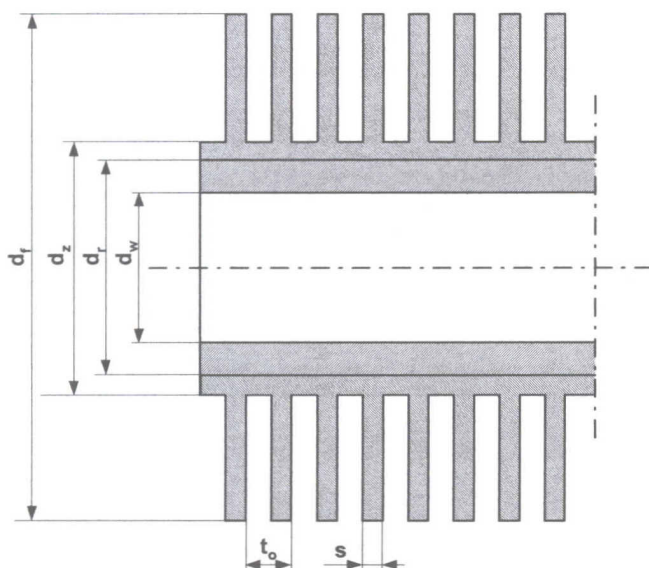
Czwarty wymiennik ożebrowany (WO4) ma taką samą liczbę rzędów rur i liczbę zasilań $n_r = n_z = 1$. Długość przepływu chłodziwa wynosi 8 szerokości wymiennika (krótka węzownica) tj. $l_c = 3.2\text{m}$. W tym wymienniku dwukrotnie zmniejszono, w stosunku do wymiennika WO2, liczbę zasilań przy zachowaniu tej samej długości przepływu chłodziwa ($l_c = 3.2\text{m}$). Pozwoliło to na uzyskanie maksymalnej prędkości przepływu chłodziwa przez wymiennik (przy tej samej pompie obiegowej).



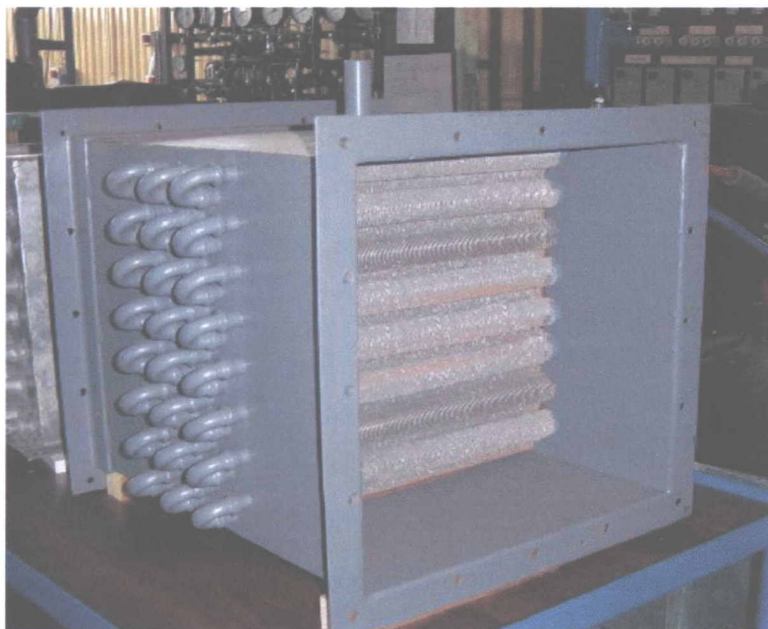
Rysunek 4.4.1. Schemat wymiennika ożebrowanego WO1 ($n_z=8, n_r=6, l_c = 2.4\text{m}$)

Wszystkie wymienniki ożebrowane są zbudowane z tych samych rur bimetalowych, stalowo-aluminiowych (rys. 4.4.2). Wewnątrz znajduje się rura stalowa o średnicy wewnętrznej $d_w = 0.0124\text{m}$ i zewnętrznej średnicy (rdzenia) $d_r = 0.016\text{m}$. Na zewnątrz jest aluminiowa rura ożebrowana o średnicy wewnętrznej d_r , zewnętrznej $d_z = 0.017\text{m}$ oraz

średnicy żebra $d_f = 0.038\text{m}$. Rury rozmieszczone są w układzie przestawnym o podziałkach: S_l, S_q .

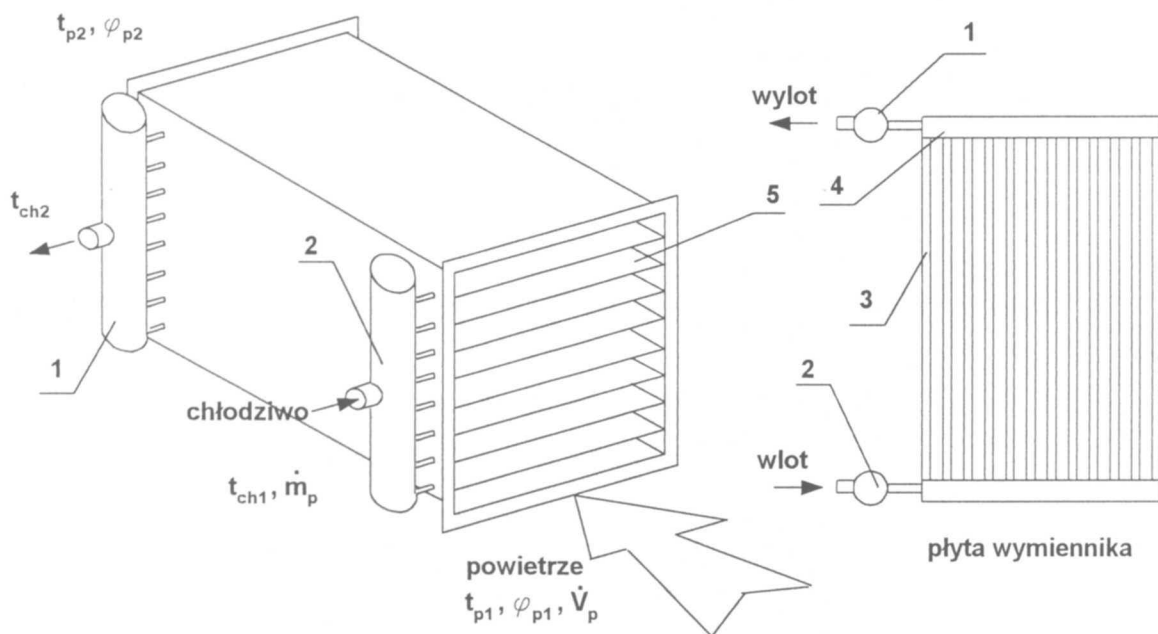


Rysunek 4.4.2. Przekrój ożebrowanej rury wymiennika



Rysunek 4.4.3. Badany wymiennik ożebrowany WO1 ($n_z=8, n_r=6, l_c=2.4\text{m}$)

Piątym wymiennikiem jest przedstawiony na rysunkach 4.4.4 i 4.4.6 wymiennik płytowy (WO5), w którym chłodziwo przepływa kanałami o przekroju sześciokątnym.

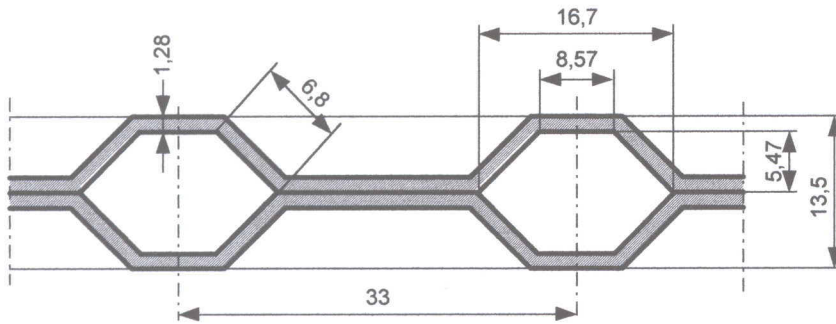


Rysunek 4.4.4. Badany wymiennik płytowy WO5 oraz jedna z płyt wymiennika

Składa się on z 8 płyt stalowych (paneli) o wymiarach: szerokość $B = 400\text{mm}$, długość $L = 900\text{mm}$, osadzonych w izolowanym stalowym korpusie $400 \times 400 \times 900\text{mm}$, gdzie:

- 1 – kolektor wylotowy,
- 2 – kolektor zasilający,
- 3 – kanały cieczowe (12 szt. na każdej płycie),
- 4 – kanał kolektorowy (2 szt. na każdej płycie),
- 5 – płyta.

Płyty wymiennika powstały przez zgrzanie dwóch arkuszy blachy o grubości 1.28mm. Płyta wymiennika (5) posiada 12 kanałów (3) wzdłuż dłuższego boku oraz po jednym kanale kolektorowym (4) wzdłuż obu krótszych boków. Każdy z 12 kanałów ma przekrój sześciokątny - dwóch trapezów o podstawach 16.7mm i 8.57mm oraz wysokości 5.47mm (rys. 4.4.5). Przekrój kanałów kolektorowych stanowią 2 trapezy o podstawach 26.5mm i 41.1mm oraz wysokości 5.47mm. Długość przepływu chłodziwa w wymienniku płytowym wynosi $L_R = 0.85\text{m}$.



Rysunek 4.4.5. Fragment przekroju poprzecznego płyty wymiennika z wymiarami kanałów



Rysunek 4.4.6. Zaizolowany wymiennik płytowy WO5 z widocznym kolektorem wylotowym

4.5. Analiza błędów wielkości mierzonych i liczonych

W tabeli 4.5.1 przedstawiono wszystkie wielkości mierzone podczas badania oziębiacza. Nie wszystkie wielkości mierzone były brane bezpośrednio pod uwagę przy wyznaczaniu wydajności oziębiacza. Część pomiarów na przykład miała charakter kontroli stanu ustalonego działania wymiennika. Szerszej analizie poddano jedynie te wielkości, które wykorzystano przy bilansowaniu wydajności oziębiacza (Q_p , Q_{ch} , Q_{Np} , Q_{Ng}) oraz parametry regulowane.

W tabeli 4.5.1. zamieszczono także przedziały wartości maksymalnych błędów względnych, z jakimi należy się liczyć, biorąc pod uwagę klasę użytych przyrządów pomiarowych. Błąd maksymalny dla wielkości pośrednich oszacowano korzystając z ogólnie znanej zależności, zgodnie z którą błąd wielkości złożonej $a = f(x, y, z \dots)$ pochodzący od błędów, którymi obarczone są wielkości mierzone $\Delta x, \Delta y, \Delta z \dots$ wynosi:

$$\Delta a = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z + \dots \quad (4.5.1)$$

Maksymalny błąd względny wielkości mierzonych Δx podano w tabeli 4.5.1.

W przypadku wielkości tablicowych przyjęto zasadę, że błąd bezwzględny równy jest dziesięciu jednostkom ostatniego miejsca znaczącego.

Tabela 4.5.1. Zestawienie wielkości mierzonych, przyrządów pomiarowych i błędów pomiaru

Lp.	Wielkość mierzona	Ozn.	Przyrząd pomiarowy	Max. błąd bezwzgl. Δx	Max. błąd wzgl. δx [%]
1.	Strumień obj. chłodziwa [dm ³ /s]	\dot{V}_{ch}	Przepływomierz turbinowy HOFFER FLOW RP-R-0-1-S	0.00603 [dm ³ /s]	3.0
			Przepływomierz elektromagnetyczny MPP – 04 ENKO	0.0091 [dm ³ /s]	1.0
2.	Temperatura początkowa chłodziwa [°C]	t_{ch1}	Czujnik oporowy HART SCIENTIFIC 5613 + karta IDAM 7000	0.1 [K]	1.0
3.	Temperatura końcowa chłodziwa [°C]	t_{ch2}	Czujnik oporowy HART SCIENTIFIC 5613 + karta IDAM 7000	0.1 [K]	1.0
4.	Temperatura powietrza na wlocie do wymiennika [°C]	t_{p1}	Czujnik oporowy HART SCIENTIFIC 5613 + karta IDAM 7000	0.1 [K]	1.0

5.	Wilgotność powietrza na wlocie do wymiennika [%]	φ_{p1}	Pojemnościowy wilgotnościomierz typu EE 20 + karta IDAM 7000	2.0 [%]	5.0
6.	Temperatura powietrza na wylocie z wymiennika [°C]	t_{p2}	Czujnik oporowy HART SCIENTIFIC 5613 + karta IDAM 7000	0.1 [K]	1.0
7.	Wilgotność powietrza na wylocie z wymiennika [%]	φ_{p2}	Pojemnościowy wilgotnościomierz typu EE 20 + karta IDAM 7000	2.0 [%]	5.0
8.	Temperatura powietrza przed zwężkami pomiarowymi [°C]	t_{pzw}	Czujnik oporowy PT100 LIMATHERMA + karta IDAM 7000	0.25 [K]	2.5
9.	Spadek ciśnienia na zwężkach pomiarowych [Pa]	Δp_{zw}	Miernik EARL 238 afc + karta IDAM 7000	3 [Pa]	2.0
10.	Moc nagrzewnicy powietrza i glikolu [W]	\dot{Q}_N	Watomierz laboratoryjny LW1	60 [W]	4.0
11.	Ciśnienie barom. [mm Hg]	P_a	Barometr sprężynowy M 67	0.5 [mm Hg]	0.07
12.	Temperatura otoczenia [°C]	t_{ot}	Czujnik oporowy PT100 LIMATHERMA + karta IDAM 7000	0.25 [K]	1.5

Wyniki obliczeń wartości maksymalnych błędu oszacowania wielkości obliczanych przedstawiono w tabeli 4.5.2.

Tabela 4.5.2. Maksymalny błąd oszacowania wielkości obliczanych

Lp.	Wielkość obliczana	Ozn.	Max. błąd bezwzgl.		Max. błąd wzgl. $\delta x = \frac{\Delta x}{x} 100\%$
			Δx	wymiar	
1.	Strumień objętości powietrza	\dot{V}_p	0.0025 ... 0.004	m ³ /s	0.4 ... 1.4
2.	Zawartość wilgoci w powietrzu	x	0.0002 ... 0.0003	kg/kg _{p.s.}	3.9 ... 5.3
3.	Entalpia właściwa powietrza	i_p	590 ... 790	J/kg _{p.s.}	2.2 ... 2.7
4.	Zawartość drobinek lodu	x_l	1.42 ... 1.48	%	10.3 ... 10.8
5.	Wydajność oziębiacza z bilansu powietrza	\dot{Q}_p	120 ... 220	W	7.5 ... 10.0
6.	Wydajność oziębiacza z bilansu roztworu glikolu	\dot{Q}_g	20 ... 60	W	1.3 ... 2.2
7.	Średnia logarytmiczna różnica temperatur	ΔT_m	0.24 ... 0.25	K	2.0 ... 3.7
8.	Współczynnik przenikania ciepła	k_w	11.7 ... 17.6	W/(m ² K)	6.5 ... 14.5
9.	Współczynnik przejmowania ciepła lodu zawieszinowego	α_{lb}	97.2 ... 1762.6	W/(m ² K)	11.3 ... 15.7

5. ZESTAWIENIE ZALEŻNOŚCI SŁUŻĄCYCH DO WYZNACZANIA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH I TERMODYNAMICZNYCH CZYNNIKÓW

5.1. Właściwości lodu zawiesinowego

Istnieje w literaturze kilka modeli obliczeniowych właściwości lodu zawiesinowego.

Są one oparte na założeniach, że [Egolf i inni, 1994, 1995, 1996]:

- lód zawiesinowy powstaje z wodnego roztworu alkoholu etylowego z dodatkiem niewielkich ilości środków antykorozyjnych, których wpływ na właściwości mieszaniny jest pomijalny,
- powstające cząsteczki lodu nie zawierają alkoholu etylowego,
- maksymalne stężenie roztworu alkoholu etylowego nie przekracza 30%.

W modelu obliczeniowym zaproponowanym przez Dworzaka właściwości lodu zawiesinowego uzależniono od właściwości wodnego roztworu alkoholu etylowego [Dworzak, 2000, Niezgoda-Żelasko, 2003]. Właściwości wodnego roztworu alkoholu etylowego można wyznaczyć w zakresie stężenia alkoholu 0÷30% oraz temperatury roztworu 0÷-25°C z zależności podanych przez Niezgodę-Żelasko [Niezgoda-Żelasko, 2003] na podstawie danych zamieszczonych w VDI – Wärmeatlas. Korelacje Dworzaka są prawdziwe przy założeniu, że maksymalne stężenie roztworu alkoholu etylowego nie przekracza 12%. Zakłada się także, że w mieszaninie ciecz - lód, ciecz będąca wodnym roztworem alkoholu traktowana jest jak czynnik jednorodny.

a) gęstość lodu zawiesinowego ρ_{lb} [kg/m³]:

$$\rho_{lb} = \left(1 - \frac{x_l}{100}\right) \cdot \rho_{lbr} + \frac{x_l}{100} \cdot \rho_l \quad (5.1.1)$$

gdzie:

ρ_l [kg/m³] - gęstość lodu wodnego; przyjęto dla temperatury lodu -5°C: $\rho_l = 918$ [kg/m³] [Bonca i inni, 1998],

a gęstość wodnego roztworu alkoholu etylowego ρ_{lbr} [kg/m³] opisana jest zależnością:

$$\rho_{lbr} = 985.9524 - 0.02282 \cdot x_{lbr}^2 - 0.6671 \cdot t_{lbr} \quad (5.1.2)$$

b) ciepło właściwe lodu zawiesinowego c_{plb} [J/(kgK)]:

$$c_{plb} = c_{pl} \cdot x_{lb} + (1 - x_{lb}) \cdot c_{plbr} \quad (5.2.3)$$

gdzie ciepło właściwe lodu c_{pl} [J/(kgK)] wyraża się wzorem:

$$c_{pl} = -0.0475 \cdot t_{lb}^2 + 3.65 \cdot t_{lb} + 2039 \quad (5.2.4)$$

a ciepło właściwe wodnego roztworu alkoholu etylowego c_{plbr} [J/(kgK)] jest opisane zależnością:

$$c_{plbr} = e^{8.3927 + 1.5031 \cdot 10^{-6} \cdot x_{lbr}^3 + 1.1652 \cdot 10^{-3} \cdot t_{lbr}} \quad (5.2.5)$$

c) współczynnik przewodzenia ciepła lodu zawiesinowego λ_{lb} [W/(mK)]:

$$\lambda_{lb} = \lambda_{lbr} \cdot \frac{1 + 2 \cdot d \cdot b}{1 - d \cdot b} \quad (5.2.6)$$

gdzie:

$$a = \frac{\lambda_{lbr}}{\lambda_l} \quad (5.2.7)$$

$$b = \frac{1 - a}{2 \cdot a + 1} \quad (5.2.8)$$

$$c = \frac{\rho_l}{\rho_{lbr}} \quad (5.2.9)$$

$$d = \frac{x_l}{x_l + (100 - x_l) \cdot c} \quad (5.2.10)$$

λ_l [W/(mK)] – współczynnik przewodzenia ciepła lodu; przyjęto dla temperatury lodu -5°C $\lambda_l = 2.24$ [W/(mK)] [Bonca i inni, 1998],

a współczynnik przewodzenia wodnego roztworu alkoholu etylowego λ_{lbr} [W/(mK)] jest opisany zależnością:

$$\lambda_{lbr} = e^{-0.5162 - 0.01105 \cdot x_{lbr} + 8.97 \cdot 10^{-4} \cdot t_{lbr}} \quad (5.2.11)$$

d) dynamiczny współczynnik lepkości lodu zawiesinowego μ_{lb} [Pas]:

$$\mu_{lb} = \mu_{lbr} \cdot \left(1 + 2.5 \cdot d + 10.05 \cdot d^2 + 0.00273 \cdot 10^{16.6 \cdot d}\right) \quad (5.2.12)$$

gdzie:

$$d = \frac{x_l}{x_l + (100 - x_l) \cdot c} \quad (5.2.13)$$

$$c = \frac{\rho_l}{\rho_{lbr}} \quad (5.2.14)$$

a dynamiczny współczynnik lepkości wodnego roztworu alkoholu etylowego μ_{lbr} [Pas] jest opisany zależnością:

$$\mu_{lbr} = 0.001 \cdot e^{2.2326 - \frac{11.8767}{x_{lbr}} - 0.0663 \cdot t_{lbr}} \quad (5.2.15)$$

e) entalpia właściwa lodu zawiesinowego i_{lb} [J/kg]:

$$i_{lb} = \left(1 - \frac{x_l}{100}\right) \cdot c_{plbr} \cdot t_{lbr} + \frac{x_l}{100} \cdot (c_{plb} \cdot t_{lb} + r_l) \quad (5.2.16)$$

gdzie:

r_l [J/kg] – ciepło topnienia lodu, w pracy przyjęto $r_l = 333440$ [J/kg] [Bonca i inni, 1998].

5.2. Właściwości wodnego roztworu glikolu etylenowego

W pracy badaniami objęto wodny roztwór glikolu etylenowego o stężeniu 47%. Formuły do obliczania właściwości wodnego roztworu glikolu etylenowego w zależności od temperatury i stężenia glikolu zostały opracowane wg danych tablicowych z literatury [ASHRAE Fundamentals, 2001] za pomocą programu komputerowego „TableCurve 3D Windows v 2.06”. Zakres zastosowania zależności:

$$\text{dla } 40\% \leq x_g \leq 80\% \quad -20 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_g \leq 125^\circ\text{C}.$$

a) gęstość wodnego roztworu glikolu etylenowego ρ_g [kg/m³]:

$$\rho_g = a + b \cdot t_g + c \cdot x_g + d \cdot t_g^2 + e \cdot x_g^2 + f \cdot t_g \cdot x_g \quad (5.2.1)$$

gdzie:

$$a = 1002.18,$$

$$b = -0.198085,$$

$$c = 1.74751,$$

$$d = -0.0023495,$$

$$e = -0.0036363,$$

$$f = -0.0029109,$$

b) ciepło właściwe wodnego roztworu glikolu etylenowego c_{pg} [J/(kgK)]:

$$c_{pg} = a + b \cdot t_g + c \cdot \ln x_g + d \cdot t_g^2 + e \cdot (\ln x_g)^2 + f \cdot t_g \cdot \ln x_g \quad (5.2.2)$$

gdzie:

$$a = 1459.91,$$

$$b = -6.87241,$$

$$c = 1982.85,$$

$$d = 0.0040994,$$

$$e = -395.025,$$

$$f = -2.67602,$$

c) współczynnik przewodzenia ciepła wodnego roztworu glikolu etylenowego λ_g [W/(mK)]:

$$\lambda_g = a + b \cdot t_g + c \cdot x_g + d \cdot t_g^2 + e \cdot x_g^2 + f \cdot t_g \cdot x_g \quad (5.2.3)$$

gdzie:

$$a = 0.574805,$$

$$b = 0.00127142,$$

$$c = -0.0052795,$$

$$d = -3.70401 \cdot 10^{-6},$$

$$e = 2.13983 \cdot 10^{-5},$$

$$f = -8.17461 \cdot 10^{-6},$$

e) dynamiczny współczynnik lepkości wodnego roztworu glikolu etylenowego μ_g [Pas]:

$$\mu_g = e^{a + b \cdot t_g + c \cdot t_g^2 + d \cdot x_g^2 + e \cdot x_g^{2.5} + f \cdot x_g^3} \cdot 10^{-3} \quad (5.2.4)$$

gdzie:

$$a = 0.11300,$$

$$b = -0.05317,$$

$$c = 2.4214 \cdot 10^{-4},$$

$$d = 4.8396 \cdot 10^{-3},$$

$$e = -8.9981 \cdot 10^{-4},$$

$$f = 4.6023 \cdot 10^{-5}.$$

5.3. Właściwości wody

Zależności do obliczania właściwości wody w temperaturze od 0.01°C ÷ 100°C zostały opracowane wg danych tablicowych z literatury [ASHRAE Fundamentals, 2001] za pomocą programu komputerowego „TableCurve Windows v 1.11”:

a) ciepło właściwe wody c_{pw} [J/(kgK)]:

$$c_{pw} = \left(\frac{a + b \cdot t_w + c \cdot t_w^2}{1 + d \cdot t_w + e \cdot t_w^2} \right) \cdot 10^3 \quad (5.3.1)$$

gdzie:

$$a = 4.2201,$$

$$b = 0.17238,$$

$$c = -8.5049 \cdot 10^{-4},$$

$$d = 0.041756,$$

$$e = -2.103 \cdot 10^{-4},$$

b) gęstość wody ρ_w [kg/m³]:

$$\rho_w = 1000.36 - 0.0117935 \cdot t_w^{1.77729} \quad (5.3.2)$$

c) współczynnik przewodzenia ciepła wody λ_w [W/(mK)]:

$$\lambda_w = \frac{a + b \cdot t_w + c \cdot t_w^2 + d \cdot t_w^{2.5} + e \cdot t_w^3}{1000} \quad (5.3.3)$$

gdzie:

$$a = 561.01,$$

$$b = 1.8476,$$

$$c = 0.01628,$$

$$d = -4.2234 \cdot 10^{-3},$$

$$e = 1.929 \cdot 10^{-4},$$

d) dynamiczny współczynnik lepkości wody μ_w [Pas]:

$$\mu_w = \frac{a + b \cdot t_w^{1.5} + c \cdot t_w^2 \cdot \ln t_w + d \cdot t_w^{0.5} \cdot \ln t_w}{10^6} \quad (5.3.4)$$

gdzie:

$$a = 1755.83,$$

$$b = 3.13091,$$

$$c = -0.025171,$$

$$d = -74.8704,$$

e) entalpia właściwa wody i_w [J/kg]:

$$i_w = (0.034213 + 4.18823 \cdot t_w) \cdot 10^3 \quad (5.3.5)$$

5.4. Właściwości powietrza

Właściwości powietrza zostały wyznaczone w oparciu o zależności zaczerpnięte z literatury [Szczechowiak, 1984, Niezgoda-Żelasko, 1992]:

a) ciśnienie pary wodnej w powietrzu na linii nasycenia p_{wn} [Pa]:

- dla $100\text{ }^{\circ}\text{C} > t_p > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$p_{wn} = 610.7 \cdot 10^{\left(\frac{t_p}{31.6639 + 0.131305 \cdot t_p + 2.63247 \cdot 10^{-5} \cdot t_p^2} \right)} \quad (5.4.1)$$

- dla $0\text{ }^{\circ}\text{C} > t_p > -100\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$p_{wn} = 610.7 \cdot 10^{\left(\frac{t_p}{27.9541 + 0.103141 \cdot t_p + 9.30422 \cdot 10^{-6} \cdot t_p^2} \right)} \quad (5.4.2)$$

b) zawartość wilgoci w powietrzu x_p [kg/kg_{p.s.}]:

$$x_p = \frac{0.622 \cdot \phi_p \cdot p_{wn}}{p_a - \phi_p \cdot p_{wn}} \quad (5.4.3)$$

c) gęstość powietrza ρ_p [kg/m³]:

$$\rho_p = 0.01 \cdot p_a \cdot \frac{1 + x_p}{T_p \cdot (4.615 \cdot x_p + 2.871)} \quad (5.4.4)$$

d) ciepło właściwe powietrza c_{pp} [J/(kgK)]:

$$c_{pp} = 1860 \cdot x_p + 1006 \quad (5.4.5)$$

e) współczynnik przewodzenia ciepła dla powietrza λ_p [W/(mK)]:

$$\lambda_p = T_p \cdot 0.79282 \cdot 10^{-4} + 0.27024 \cdot 10^{-2} \quad (5.4.6)$$

f) dynamiczny współczynnik lepkości μ_p [Pas]:

$$\mu_p = T_p \cdot 4.85 \cdot 10^{-8} + 0.361 \cdot 10^{-5} \quad (5.4.7)$$

6. BADANIA PORÓWNAWCZE WYMIENNIKÓW CIEPŁA ZASILANYCH LODEM ZAWIESINOWYM ORAZ WODNYM ROZTWOREM GLIKOLU ETYLENOWEGO

6.1. Wyniki badań wymienników zasilanych lodem zawiesinowym

Głównym celem tej części badań eksperymentalnych jest wyznaczenie wydajności cieplnej oziębiaczy powietrza zasilanych lodem zawiesinowym oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego. Wyniki badań zostały wykorzystane do przeprowadzenia analizy porównawczej badanych wymienników ciepła. Badaniom poddano trzy wymienniki ożebrowane (WO2, WO3, WO4) oraz wymiennik płytowy (WO5).

Badania doświadczalne przeprowadzone zostały w warunkach, w których nie występowało wykraplanie pary wodnej na powierzchni wymiany ciepła.

Wydajność cieplną wymiennika zasilanego lodem zawiesinowym w warunkach ustalonych określano równocześnie dwoma metodami:

- pomiaru mocy nagrzewnicy niszczącej skutek ziębienia: \dot{Q}_{Np}
- bilansu energetycznego po stronie powietrza: $\dot{Q}_p = \dot{V}_p \cdot c_{pp} \cdot \rho_p \cdot (t_{p1} - t_{p2})$

Parametry powietrza i lodu zawiesinowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO2:

- temperatura powietrza na wlocie: 5.3 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 45 [%],
- prędkość czołowa powietrza: 1.5 ÷ 3.9 [m/s],
- temperatura lodu zawiesinowego na wlocie: - 5.0 [°C],
- strumień objętości lodu zawiesinowego: 0.1 ÷ 0.7 [l/s],
- udział masowy drobinek lodu: 13.75 [%],
- prędkość przepływu lodu zawiesinowego w rurach wymiennika: 0.5 ÷ 2.9 [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.1.1.

Parametry powietrza i lodu zawiesinowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO3:

- temperatura powietrza na wlocie: 3 [°C],

- wilgotność względna powietrza na wlocie: 45 [%],
- prędkość czołowa powietrza: $2.0 \div 3.9$ [m/s],
- temperatura lodu zawiesinowego na wlocie: - 5.0 [°C],
- strumień objętości lodu zawiesinowego: $0.1 \div 0.4$ [l/s],
- udział masowy drobinek lodu: 13.75 [%],
- prędkość przepływu lodu zawiesinowego w rurach wymiennika: $0.9 \div 3.3$ [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.1.2.

Parametry powietrza i lodu zawiesinowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO4:

- temperatura powietrza na wlocie: 12 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 25 [%],
- prędkość czołowa powietrza: $2.0 \div 3.9$ [m/s],
- temperatura lodu zawiesinowego na wlocie: - 5.0 [°C],
- strumień objętości lodu zawiesinowego: $0.2 \div 0.58$ [l/s],
- udział masowy drobinek lodu: 13.75 [%],
- prędkość przepływu lodu zawiesinowego w rurach wymiennika: $1.7 \div 4.8$ [m/s].

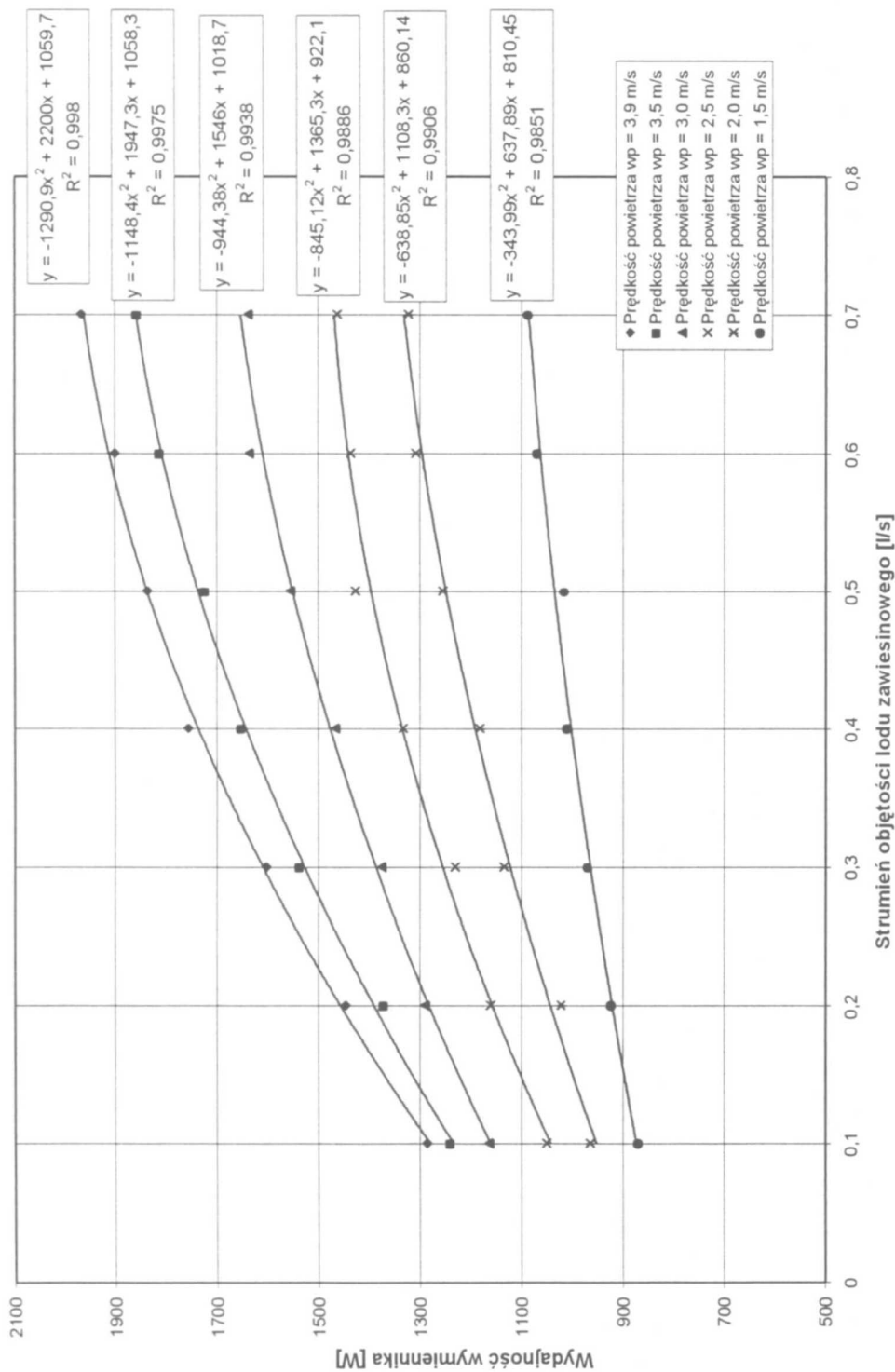
Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.1.3.

Parametry powietrza i lodu zawiesinowego podczas badania wymiennika płytowego, WO5:

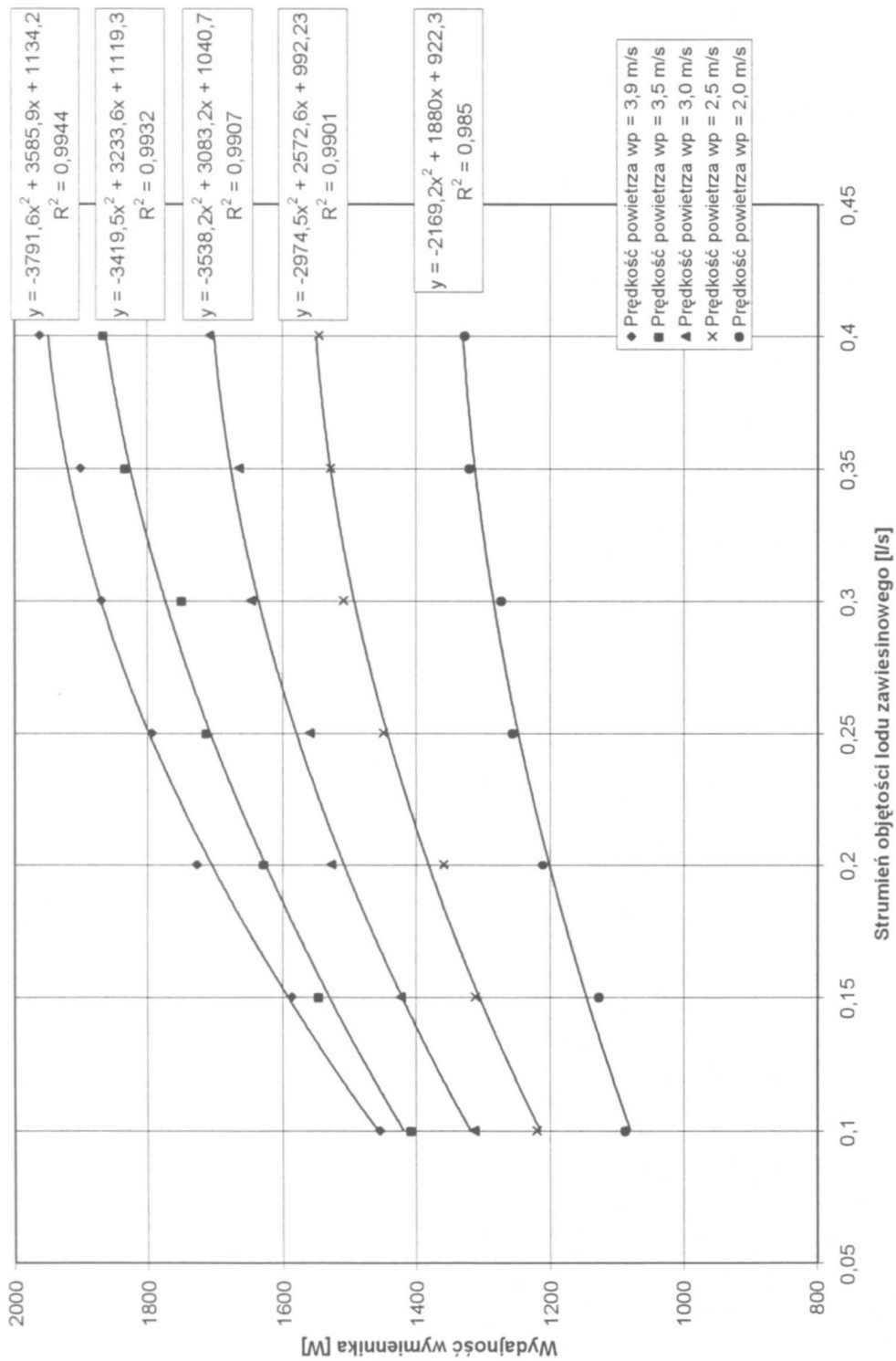
- temperatura powietrza na wlocie: 3 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 50 [%],
- prędkość czołowa powietrza: $2.0 \div 3.9$ [m/s],
- temperatura lodu zawiesinowego na wlocie: - 4.7 [°C],
- strumień objętości lodu zawiesinowego: $0.3 \div 0.83$ [l/s],
- udział masowy drobinek lodu: 9.12 [%],
- prędkość przepływu lodu zawiesinowego w rurach wymiennika: $0.02 \div 0.06$ [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.1.4.

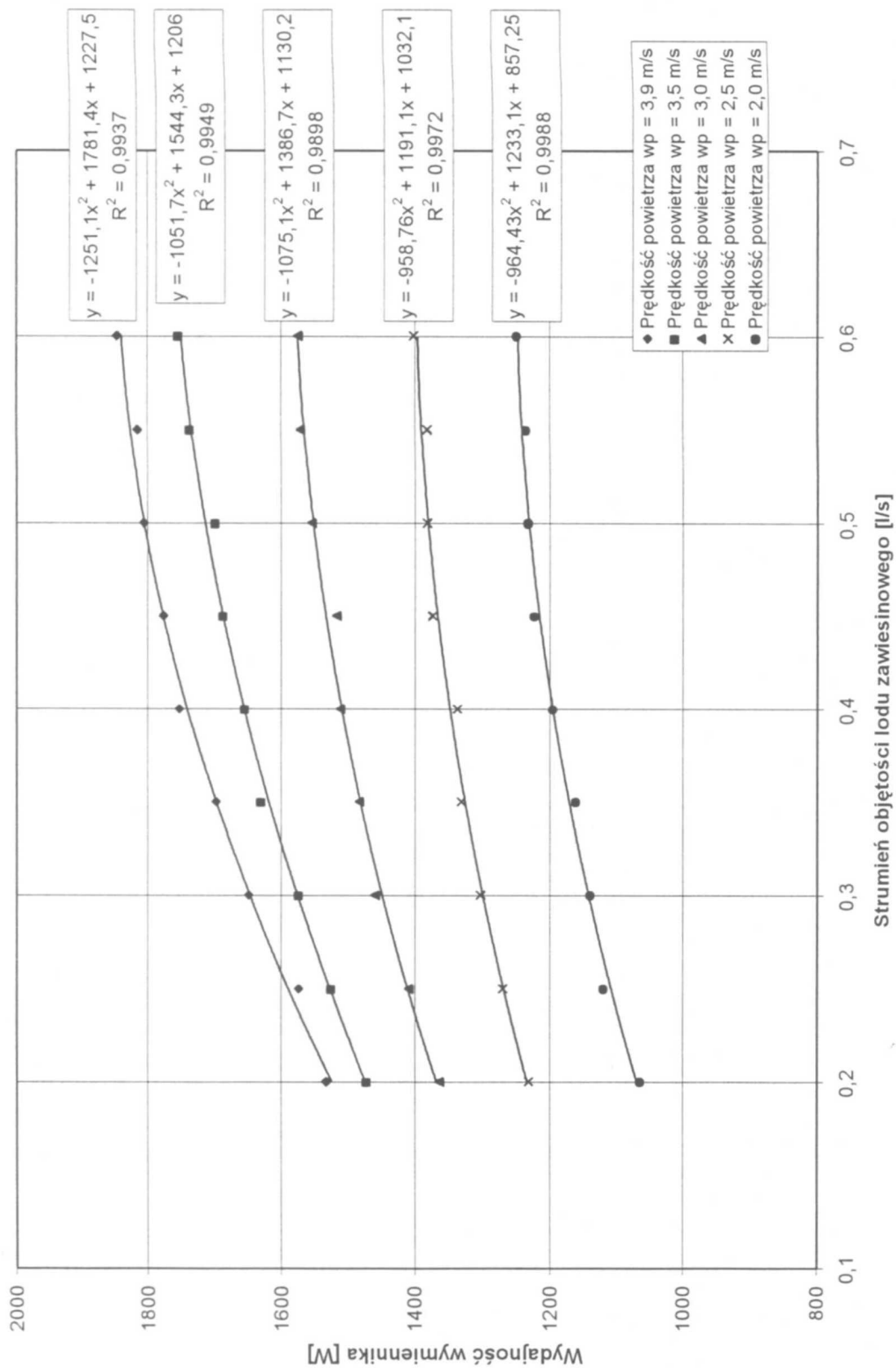
Na rysunkach 6.1.1 do 6.1.4 przedstawiono wyniki badań wymienników ciepła zasilanych lodem zawiesinowym. Wykresy przedstawiają zależność wydajności cieplnej wymiennika od strumienia objętości lodu zawiesinowego.



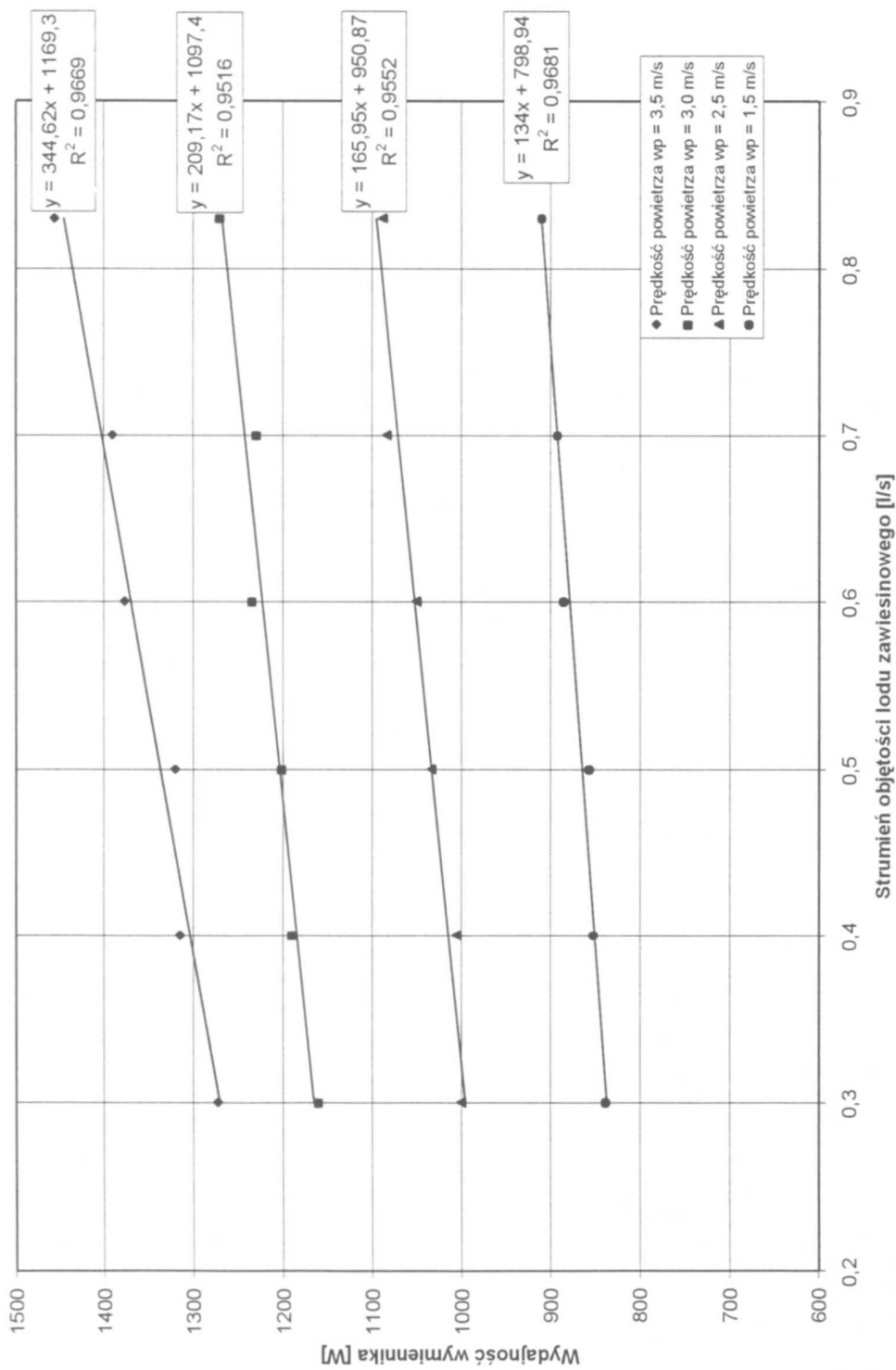
Rysunek 6.1.1. Wydajność cieplna wymiennika ozebranego WO2 w funkcji strumienia objętości lodu zawieszinowego dla różnych prędkości przepływu powietrza



Rysunek 6.1.2. Wydajność ciepła wymiennika ożebrowanego WO3 w funkcji strumienia objętości lodu zawieszinowego dla różnych prędkości przepływu powietrza



Rysunek 6.1.3. Wydajność cieplna wymiennika ozebrowanego WO4 w funkcji strumienia objętości lodu zawieszinowego dla różnych prędkości przepływu powietrza



Rysunek 6.1.4. Wydajność cieplna wymiennika płytowego WO5 w funkcji strumienia objętości lodu zawieszinowego dla różnych prędkości przepływu powietrza

6.2. Wyniki badań wymienników zasilanych wodnym roztworem glikolu etylenowego

Aby dało się porównać wymienniki zasilane różnymi chłodziwami (lód zawieszinowy powstały z wodnego roztworu alkoholu etylowego oraz wodny roztwór glikolu etylenowego) badania wykonano w możliwie zbliżonych warunkach. Dlatego badania wymienników zasilanych glikolem etylenowym zostały przeprowadzone w takich samych warunkach jak badania wymienników zasilanych lodem zawieszinowym. Badaniom poddano trzy wymienniki ożebrowane (WO2, WO3, WO4) oraz wymiennik płytowy (WO5).

Badania doświadczalne przeprowadzone zostały w warunkach, w których nie występowało wykraplanie pary wodnej na powierzchni wymiany ciepła.

Wydajność ciepłą wymiennika zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego w warunkach ustalonych określano równocześnie czterema metodami:

- pomiaru mocy nagrzewnicy niszczącej skutek ziębienia: \dot{Q}_{Np}
- pomiaru mocy nagrzewnicy glikolu: \dot{Q}_{Ng}
- bilansu energetycznego po stronie powietrza: $\dot{Q}_p = \dot{V}_p \cdot c_{pp} \cdot \rho_p \cdot (t_{p1} - t_{p2})$
- bilansu energetycznego po stronie glikolu: $\dot{Q}_g = \dot{V}_g \cdot c_{pg} \cdot \rho_g \cdot (t_{g2} - t_{g1})$

Parametry powietrza i wodnego roztworu glikolu etylenowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO2:

- temperatura powietrza na wlocie: 5.3 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 45 [%],
- prędkość czołowa powietrza: 1.5 ÷ 3.9 [m/s],
- temperatura glikolu na wlocie: - 5.0 [°C],
- strumień objętości glikolu: 0.1 ÷ 0.7 [l/s],
- prędkość przepływu glikolu w rurach wymiennika: 0.5 ÷ 2.9 [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.2.1.

Parametry powietrza i wodnego roztworu glikolu etylenowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO3:

- temperatura powietrza na wlocie: 3 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 45 [%],
- prędkość czołowa powietrza: 2.0 ÷ 3.9 [m/s],

- temperatura glikolu na wlocie: - 5.0 [°C],
- strumień objętości glikolu: 0.1 ÷ 0.4 [l/s],
- prędkość przepływu glikolu w rurach wymiennika: 0.9 ÷ 3.3 [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.2.2.

Parametry powietrza i wodnego roztworu glikolu etylenowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO4:

- temperatura powietrza na wlocie: 12 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 25 [%],
- prędkość czołowa powietrza: 2.0 ÷ 3.9 [m/s],
- temperatura glikolu na wlocie: - 5.0 [°C],
- strumień objętości glikolu: 0.2 ÷ 0.58 [l/s],
- prędkość przepływu glikolu w rurach wymiennika: 1.7 ÷ 4.8 [m/s].

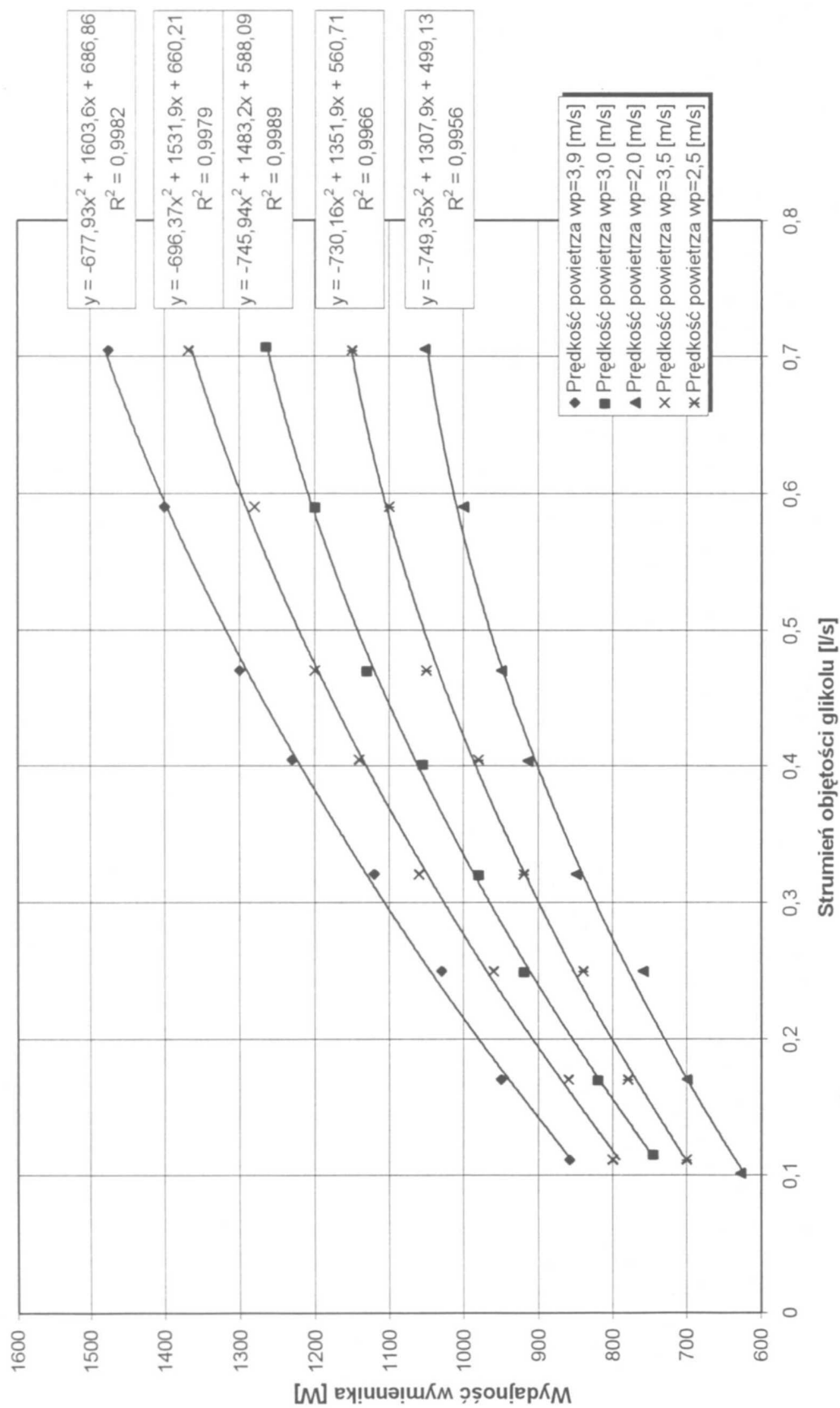
Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.2.3.

Parametry powietrza i wodnego roztworu glikolu etylenowego podczas badania wymiennika płytowego WO5:

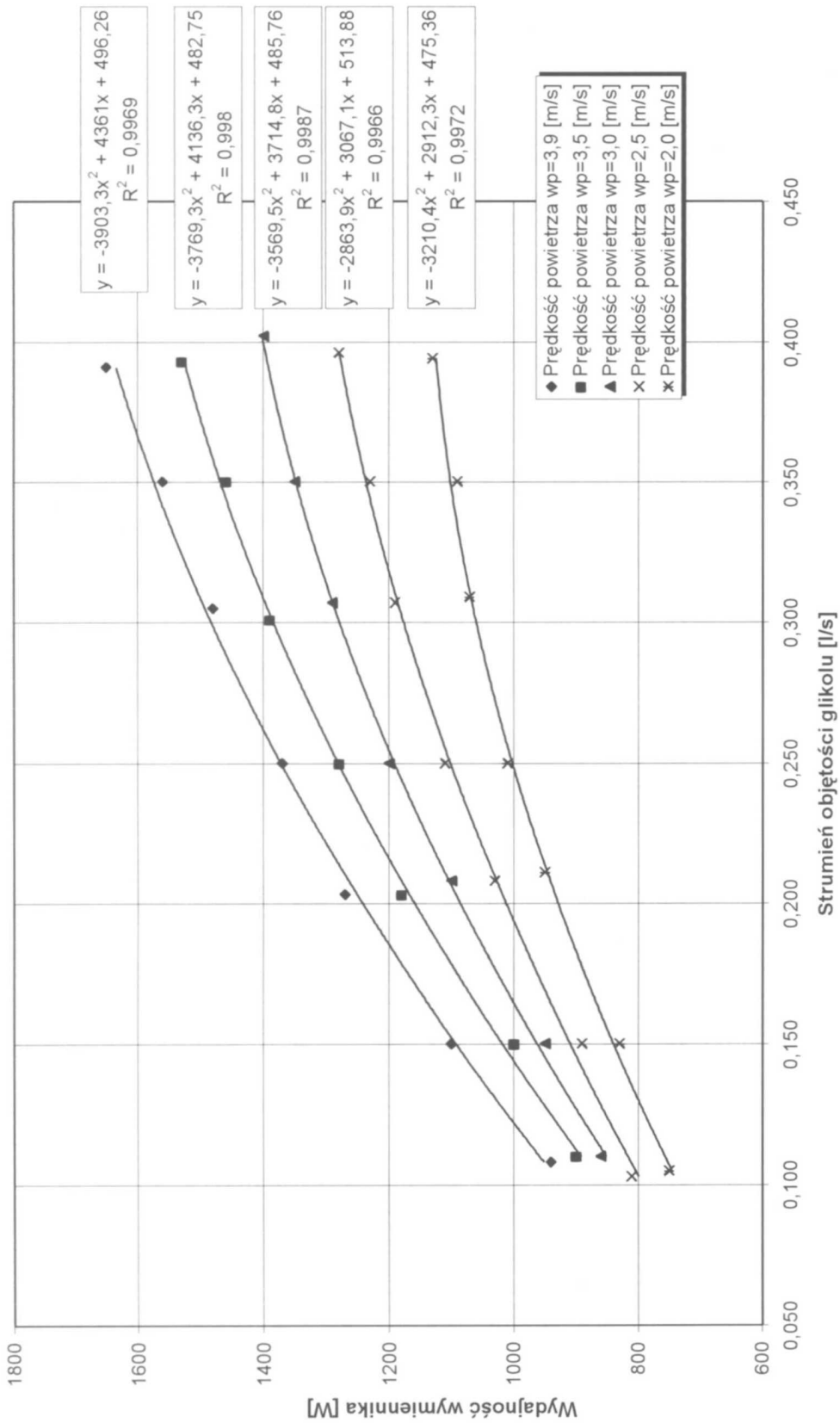
- temperatura powietrza na wlocie: 3 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 50 [%],
- prędkość czołowa powietrza: 2.0 ÷ 3.9 [m/s],
- temperatura glikolu na wlocie: - 4.7 [°C],
- strumień objętości glikolu: 0.3 ÷ 0.83 [l/s],
- prędkość przepływu glikolu w rurach wymiennika: 0.02 ÷ 0.06 [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 6.2.4.

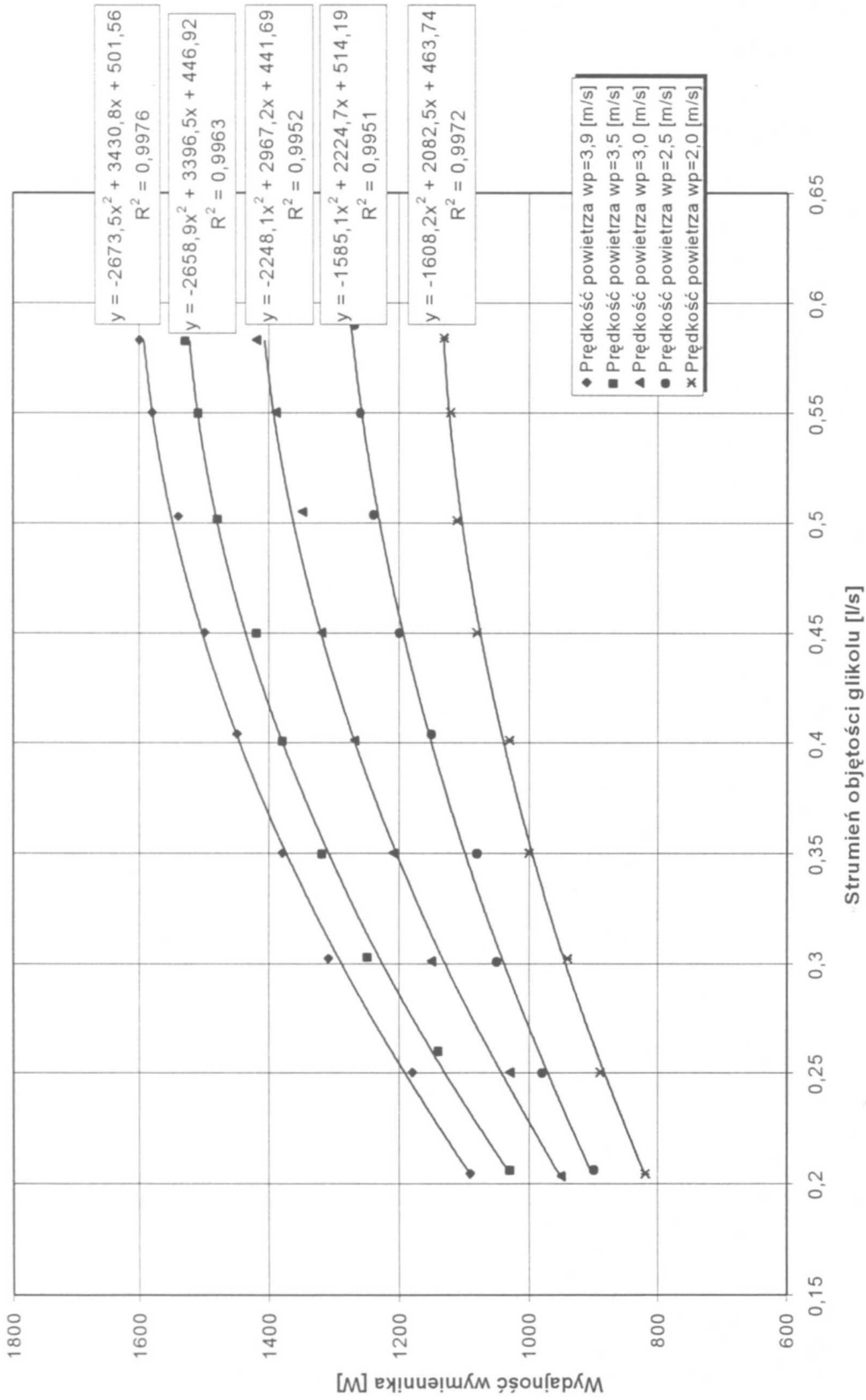
Na rysunkach 6.2.1 do 6.2.4 przedstawiono wyniki badań wymienników ciepła zasilanych wodnym roztworem glikolu etylenowego. Wykresy przedstawiają zależności wydajności wymienników od strumienia objętości glikolu.



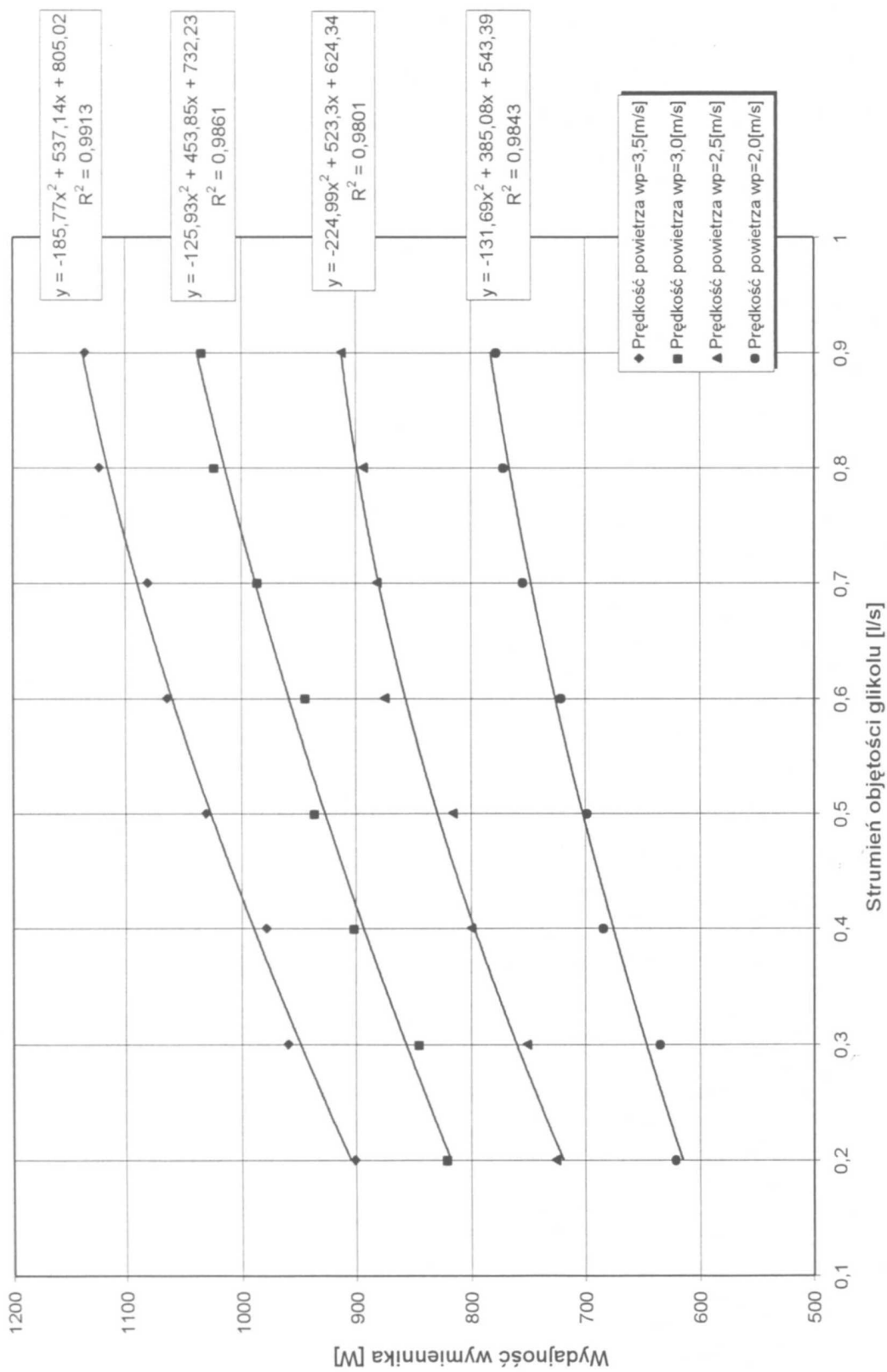
Rysunek 6.2.1. Wydajność ciepła wymiennika ozebrowanego WO2 w funkcji strumienia objętości glikolu dla różnych prędkości przepływu powietrza



Rysunek 6.2.2. Wydajność cieplna wymiennika ożebrowanego WO3 w funkcji strumienia objętości glikolu dla różnych prędkości przepływu powietrza



Rysunek 6.2.3. Wydajność cieplna wymiennika ożebrowanego WO4 w funkcji strumienia objętości glikolu dla różnych prędkości przepływu powietrza



Rysunek 6.2.4. Wydajność cieplna wymiennika phytowego WO5 w funkcji strumienia objętości glikolu dla różnych prędkości przepływu powietrza

6.3. Wskaźniki porównawcze

Wykorzystując wyniki badań jak również wyniki obliczeń dokonano porównania chłodziw na podstawie wskaźników, które zostały zdefiniowane następująco:

$$W_{S1} = \frac{\Delta i_{ch}}{\Delta i_w} \quad (6.3.1)$$

$$W_{S2} = \frac{\Delta p_{ch}}{\Delta p_w} \quad (6.3.2)$$

$$W_{S3} = \frac{\alpha_{lb}}{\alpha_g} \quad (6.3.3)$$

$$W_{S4} = \frac{\dot{Q}_{lb}}{\dot{Q}_g} \quad (6.3.4)$$

gdzie:

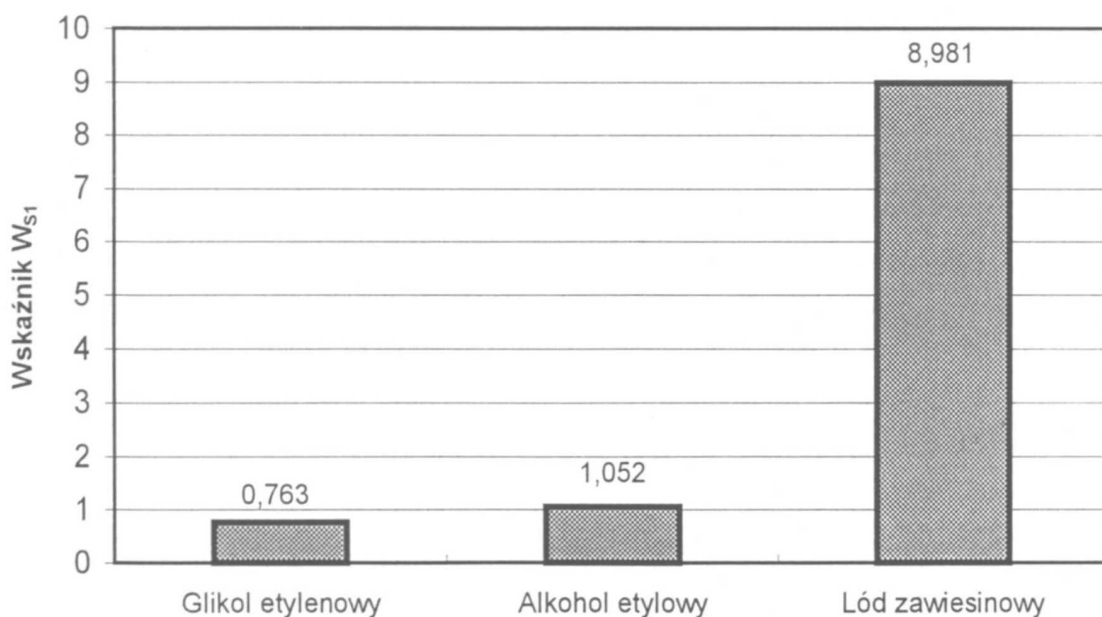
- Δi_{ch} [J/kg] – zmiana entalpii właściwej chłodziwa przy zmianie temperatury o 1K (od -6°C do -5°C),
- Δi_w [J/kg] – zmiana entalpii właściwej wody przy zmianie temperatury o 1K (od 0.01°C do 1°C),
- Δp_{ch} [Pa] – opór przepływu chłodziwa w temperaturze -5°C ,
- Δp_w [Pa] – opór przepływu wody w temperaturze 0.01°C ,
- α_{lb} [W/(m²·K)] – współczynnik przyjmowania ciepła od strony lodu zawieszinowego,
- α_g [W/(m²·K)] – współczynnik przyjmowania ciepła od strony wodnego roztworu glikolu etylenowego,
- \dot{Q}_{lb} [W] – wydajność cieplna wymiennika zasilanego lodem zawieszinowym,
- \dot{Q}_g [W] – wydajność cieplna wymiennika zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego,

Wskaźnik W_{S1} (równ. 6.3.1) pokazuje zdolność chłodziwa do magazynowania energii cieplnej, tzn. ile ciepła może pobrać chłodziwo przy zmianie temperatury chłodziwa o 1K (od -6°C do -5°C) w odniesieniu do wody (zmiana temperatury wody od 0.01°C do 1°C).

Wskaźnik ten został wyznaczony dla:

- lodu zawiesinowego przy stężeniu początkowym wodnego roztworu alkoholu równym 10% (dla -6°C $x_1 = 25.86\%$, dla -5°C $x_1 = 13.75\%$),
- 20% wodnego roztworu alkoholu etylowego bez drobinek lodu,
- wodnego roztworu glikolu etylenowego o stężeniu 47%.

Na rysunku 6.3.1 przedstawiono wartości wskaźnika W_{S1} dla wszystkich porównywanych chłodziw. Lód zawiesinowy charakteryzuje się 9 razy większą wartością tego wskaźnika w stosunku do wodnego roztworu alkoholu etylowego i 11.8 razy większą w stosunku do wodnego roztworu glikolu etylenowego.



Rysunek 6.3.1. Porównanie wskaźnika W_{S1} dla 47% wodnego roztworu glikolu etylenowego, 20% wodnego roztworu alkoholu etylowego oraz lodu zawiesinowego

Wskaźnik W_{S2} (równ. 6.3.2) wyraża opór przepływu chłodziwa podczas przepływu przez wymiennik w temperaturze -5°C w odniesieniu do oporu przepływu wody (przez ten sam wymiennik) w temperaturze 0.01°C .

Opory przepływu wyznaczono ze wzoru:

$$\Delta p_c = \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho + \lambda_T \cdot \frac{l_c \cdot \rho}{2 \cdot d_w} \cdot w^2 \quad (6.3.5)$$

gdzie:

$$\lambda_T = \frac{64}{\text{Re}} \quad (6.3.6)$$

dla przepływu laminarnego, gdy $\text{Re} < 3000$ [Hobler, 1986]

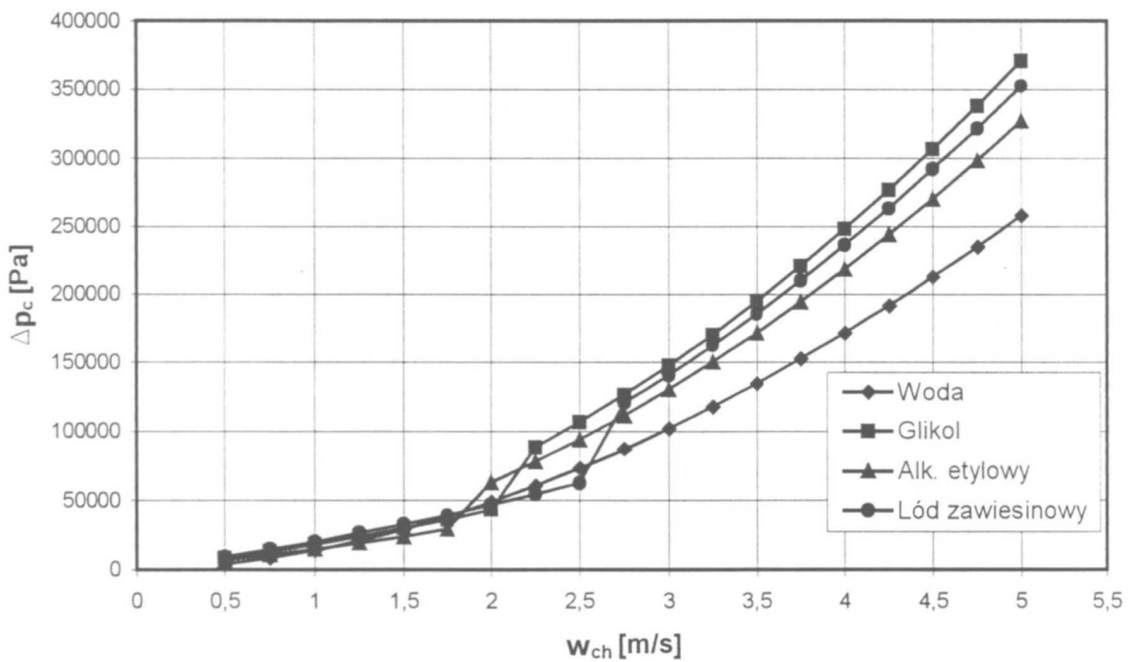
oraz:

$$\lambda_T = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (6.3.7)$$

dla przepływu burzliwego, gdy $3000 < \text{Re} < 100000$ [Hobler, 1986].

Wartość współczynnika oporów miejscowych $\xi = 6.254$ określono dla wężownicy wymiennika WO3 (15 kolan $\phi 180^{\circ}$, 2 zmiany średnicy przepływu chłodziwa).

Na rysunku 6.3.2 przedstawiono porównanie oporów przepływu chłodziw przez ten sam wymiennik w funkcji prędkości przepływu. Największe opory przepływu uzyskano dla wodnego roztworu glikolu etylenowego, a najmniejsze dla wody (powyżej prędkości przepływu chłodziw równej 2.6m/s). Poszczególne chłodziwa, ze względu na swoje właściwości, przy różnych prędkościach przepływu zmieniają charakter przepływu z laminarnego na burzliwy. Woda, ze względu na małą lepkość, w całym zakresie rozpatrywanej prędkości znajduje się w obszarze przepływu burzliwego. W zakresie prędkości $2.0 \div 2.5\text{ m/s}$ lód zawieszinowy osiąga najniższe, a w zakresie prędkości $0.5 \div 1.8\text{ m/s}$ osiąga najwyższe wartości oporów przepływu.

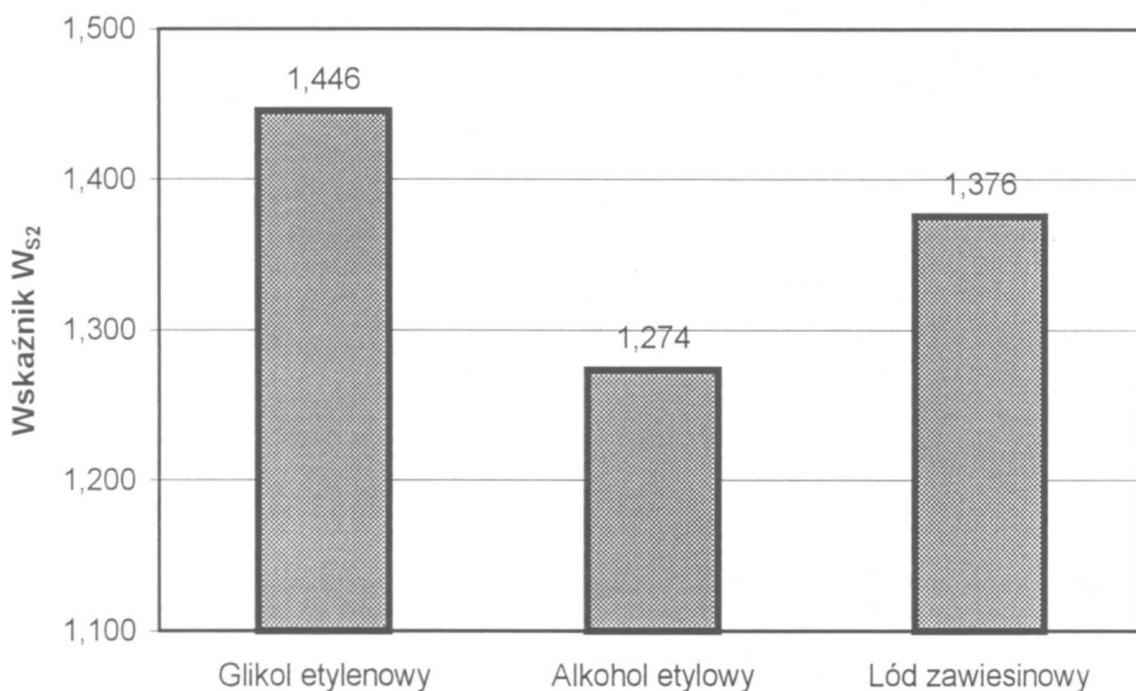


Rysunek 6.3.2. Porównanie oporów przepływu chłodziwa w funkcji prędkości przepływu dla wody, 47% wodnego roztworu glikolu etylenowego, 20% wodnego roztworu alkoholu etylowego oraz lodu zawieszinowego (udział drobinek lodu 13.75%)

W zakresie prędkości przepływu 0.5÷2.7 m/s średnia wartość wskaźnika W_{S2} dla lodu zawieszinowego wynosi 1.61 i jest ona wyższa od średniej wartości wskaźnika dla wodnego roztworu glikolu etylenowego ($W_{S2} = 1.43$) oraz wodnego roztworu alkoholu etylowego ($W_{S2} = 1.14$).

Szczególną uwagę zwrócono na wartość wskaźnika W_{S2} dla burzliwego zakresu przepływu chłodziw. Spośród porównywanych chłodziw najpóźniej zakres burzliwy osiąga lód zawieszinowy (powyżej prędkości 2.7 m/s) i dlatego przyjęto tę wartość jako dolną granicę rozpatrywanego zakresu prędkości przepływu.

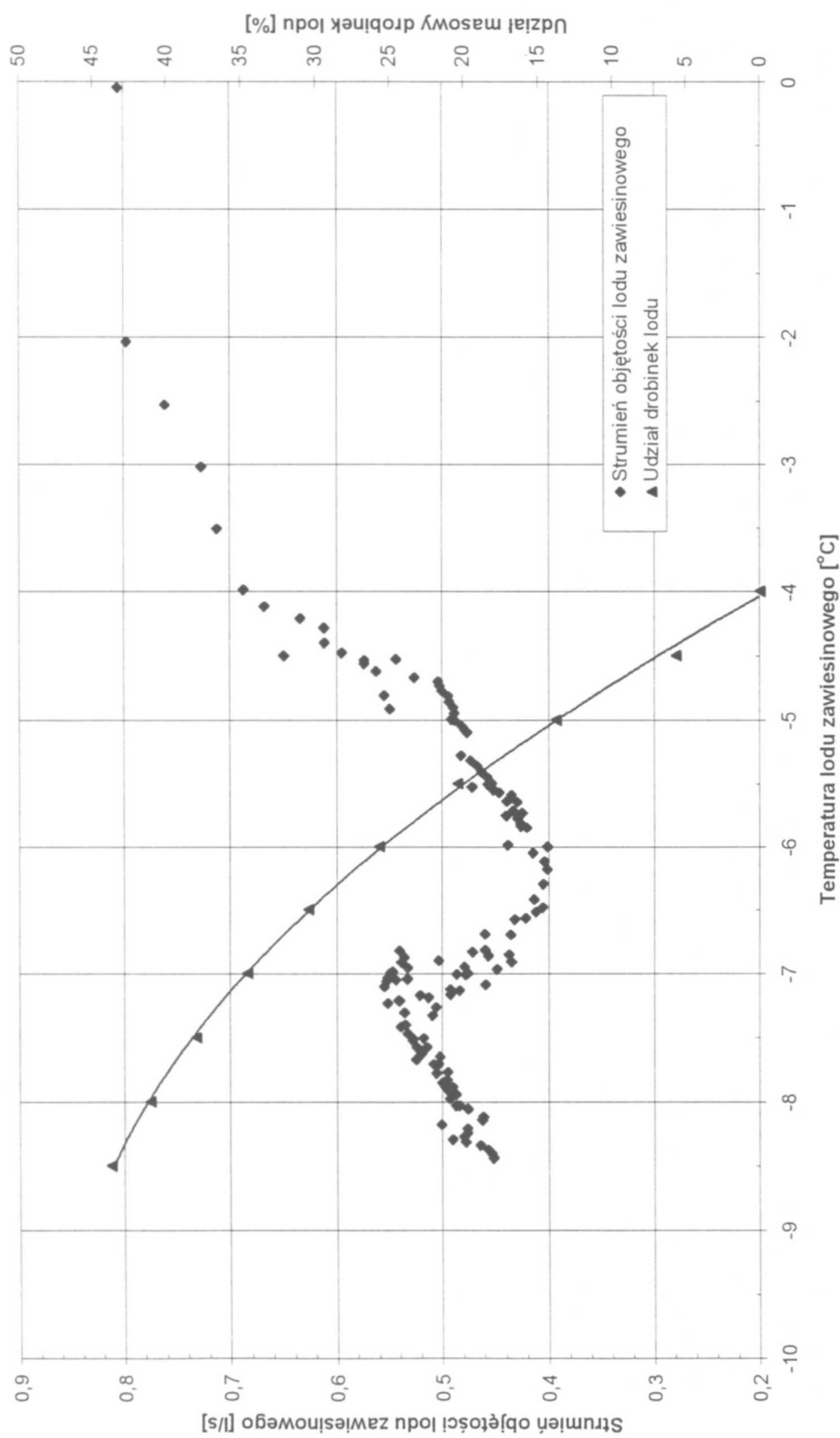
Rysunek 6.3.3 przedstawia porównanie średnich wartości wskaźnika W_{S2} dla porównywanych chłodziw w zakresie prędkości przepływu 2.7÷5.0 m/s. Najwyższą wartość wskaźnika (największe opory przepływu w odniesieniu do oporów wody) odnotowano dla wodnego roztworu glikolu etylenowego.



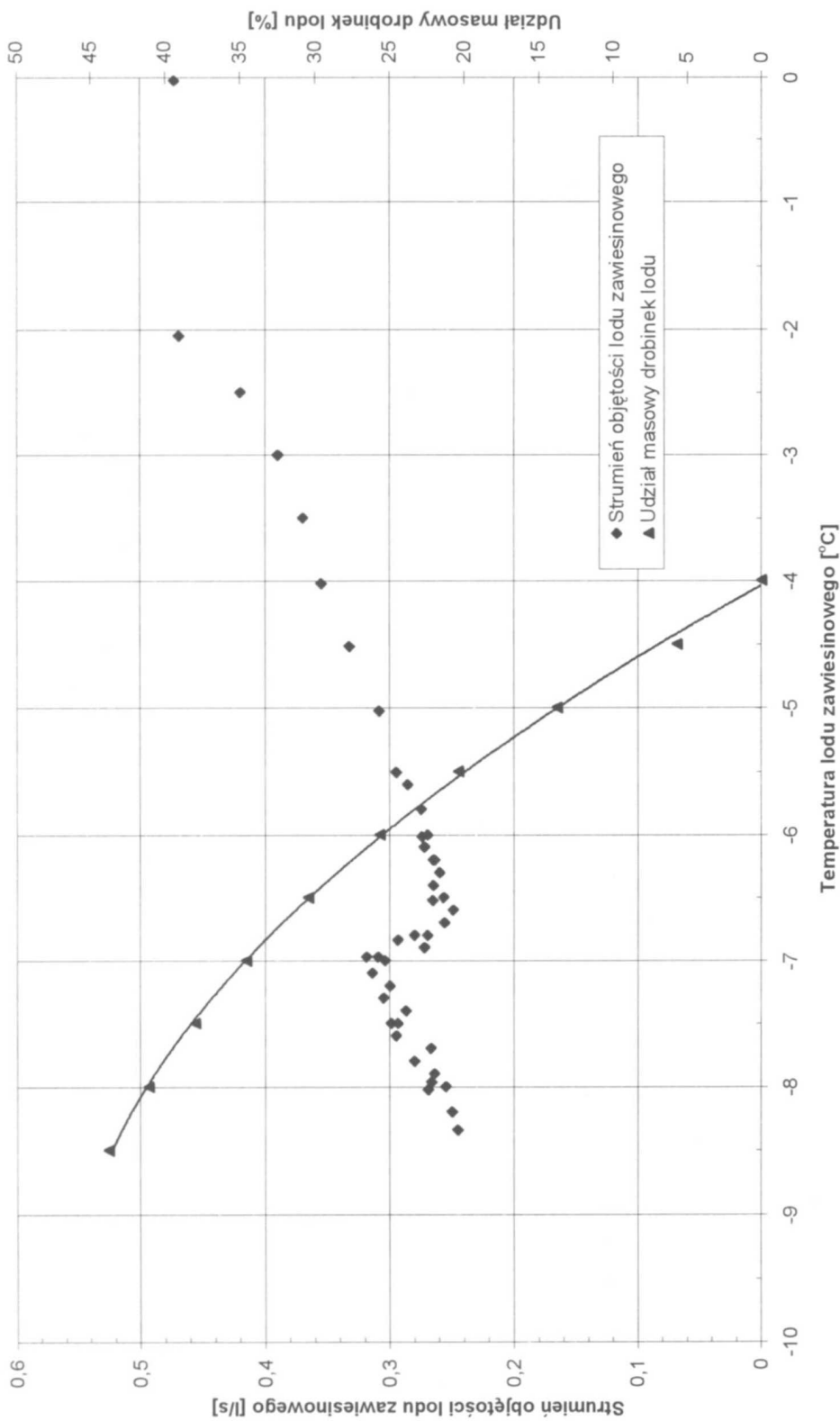
Rysunek 6.3.3. Porównanie wartości wskaźnika W_{S2} dla 47% wodnego roztworu glikolu etylenowego, 20% wodnego roztworu alkoholu etylowego oraz lodu zawieszinowego (prędkość przepływu chłodziw 2.7÷5.0 m/s)

Źródła literaturowe sygnalizują, że dla pewnego zakresu prędkości przepływu lodu zawieszinowego oraz dla określonego udziału drobinek lodu, chłodziwo to ma niższe opory przepływu niż woda [Paul, 1992÷1996, Egolf i inni, 1994÷1996, Dworzak, 2000, Kalinowski i inni, 2000]. Może to wynikać z faktu, że występuje spadek oporów przepływu wraz ze wzrostem udziału lodu (w pewnym zakresie zawartości lodu).

W warunkach, w których prowadzone były badania wymienników ciepła nie zauważono zjawiska zmniejszania się oporów przepływu lodu zawieszinowego wraz ze wzrostem udziału lodu. Aby sprawdzić istnienie powyższego zjawiska wytwornica lodu zawieszinowego pracowała bez odbioru ciepła w badanym wymienniku. W ten sposób można było stopniowo obniżać temperaturę mieszaniny do -8.5°C i podwyższać zawartość drobinek lodu aż do 44%. Dla tak działającej wytwornicy lodu zawieszinowego wykonano badania dwóch wymienników ożebrowanych: wymiennika WO2 oraz wymiennika WO3. Wyniki badań zamieszczono na rysunkach 6.3.4 oraz 6.3.5.



Rysunek 6.3.4. Zależność strumienia objętości lodu zawieszinowego w wymienniku ozebrowanym W/O2 oraz udziału masowego drobinek lodu w funkcji temperatury – zjawisko zmniejszania się oporów przepływu lodu zawieszinowego



Rysunek 6.3.5. Zależność strumienia objętości lodu zawieszinowego w wymienniku ożebrowanym WO3 oraz udziału masowego drobinek lodu w funkcji temperatury – zjawisko zmniejszania się oporów przepływu lodu zawieszinowego

Rysunki 6.3.4 oraz 6.3.5 przedstawiają zależność strumienia objętości lodu zawiesinowego przepływającego przez wymiennik w funkcji temperatury mieszaniny (zawartości drobinek lodu). Zaobserwowano, że zjawisko zmniejszania się oporów przepływu występuje dla zakresu temperatury $-6 \div -7^{\circ}\text{C}$, to jest dla udziału drobinek lodu $26 \div 35\%$ (rys. 6.3.4). To zmniejszenie oporów przepływu skutkuje wzrostem strumienia objętości lodu zawiesinowego przepływającego przez wymiennik. Wykonano badanie potwierdzające istnienie tego zjawiska dla wymiennika WO3 (rys. 6.3.5). W wymienniku WO2 zjawisko zmniejszania się oporów przepływu spowodowało podwyższenie prędkości przepływu lodu zawiesinowego w rurach wymiennika z 1.66 m/s do 2.32 m/s (wzrost o 28.4%). W wymienniku WO3 zjawisko zmniejszania się oporów przepływu poskutkowało podwyższeniem prędkości przepływu lodu zawiesinowego z 2.15 m/s do 2.65 m/s (wzrost o 18.9%). Różnica we wzroście prędkości przepływu lodu zawiesinowego w tych wymiennikach wynika z tego, że mają one różną konstrukcję. Wymiennik WO2 posiada dwa zasilania i węzownicę o długości $l_c = 3.2\text{m}$, a wymiennik WO3 ma jedno zasilanie i węzownicę o długości $l_c = 6.4\text{m}$. W związku z tym opory przepływu (a także prędkości przepływu) przez każdy z tych wymienników są różne i różnica ta wpływa na obserwowane zjawisko.

Wskaźnik W_{S3} (równ. 6.3.3) określa stosunek współczynników przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego do współczynnika przejmowania ciepła podczas przepływu wodnego roztworu glikolu etylenowego przez badane wymienniki ciepła. Wartości współczynników przejmowania ciepła podczas przepływu lodu zawiesinowego przez wymiennik zostały wyznaczone wzorami (rozdział 7.4) opracowanymi na podstawie badań doświadczalnych (równ. 7.4.3 oraz 7.4.7). Wartości współczynników przejmowania ciepła dla roztworu glikolu wyznaczono za pomocą odpowiednich zależności literaturowych dla rury prostej, które zostały skorygowane (korekta miała na celu uwzględnienie wpływu kolan). Dla laminarnego zakresu przepływu – wzór Schlündera [VDI, 1963] skorygowany przez Niezgodę [Niezgoda, 1992] na podstawie własnych badań doświadczalnych:

$$\alpha_g = 1.72 \cdot \frac{\lambda_g}{d_w} \cdot \sqrt[3]{3.66^3 + 1.61^3 \cdot \text{Re}_g \cdot \text{Pr}_g \cdot \frac{d_w}{l}} \quad (6.3.8)$$

Dla burzliwego zakresu przepływu - wzór Gnielińskiego [VDI, 1963], gdzie wobec braku wyników badań uwzględniających wpływ kolan na współczynnik przejmowania ciepła zastosowano poprawkę Michiejewa ϵ_R [Michiejew, 1956]:

$$\alpha_g = \frac{\lambda_g}{d_w} \cdot \frac{f \cdot (\text{Re}_g - 1000) \cdot \text{Pr}_g \cdot \left(1 + \left(\frac{d_w}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right)}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\text{Pr}_g^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \varepsilon_R \quad (6.3.9)$$

gdzie:

$$\varepsilon_R = 1 + 1.77 \cdot \frac{d_w}{R} \quad (6.3.10)$$

$$f = \frac{(1.82 \cdot \log \text{Re}_g - 1.64)^2}{8} \quad (6.3.11)$$

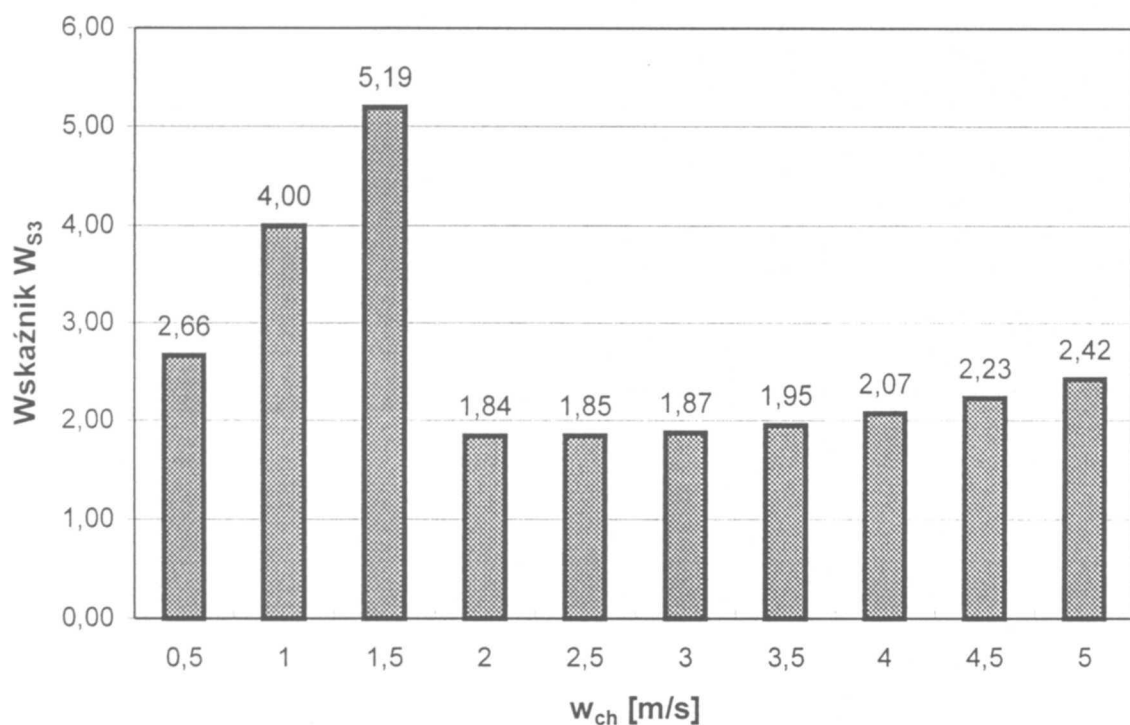
R [m]- promień krzywizny wygięcia rury.

Zależność na współczynnik przejmowania ciepła od strony glikolu dla wymiennika płytowego, przepływ laminarny - wzór Hausena [Becker, 1986]:

$$\alpha_g = \frac{\lambda_g}{d_h} \cdot \left(3.66 + \frac{0.0668 \cdot \text{Re}_g \cdot \text{Pr}_g \cdot \frac{d_h}{L_R}}{1 + 0.04 \cdot \left(\text{Re}_g \cdot \text{Pr}_g \cdot \frac{d_h}{L_R}\right)^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (6.3.12)$$

Na rysunku 6.3.6 przedstawiono wartości wskaźnika W_{S3} dla wymienników ożebrowanych. Wskaźnik ten określa, ile razy (dla wymienników ożebrowanych WO2, WO3, WO4) współczynnik przejmowania ciepła dla lodu zawiesinowego jest większy od współczynnika przejmowania ciepła dla roztworu glikolu etylenowego w zależności od prędkości chłodziwa. W trzech pierwszych kolumnach (rys. 6.3.6), przedstawiających prędkości przepływu chłodziwa od 0.5m/s do 1.5m/s, wartości wskaźnika W_{S3} są najwyższe. Jest to zakres laminarny dla glikolu, w którym obowiązuje wzór Schlündera. Powyższy zakres prędkości przepływu glikolu jest stosowany powszechnie w wymiennikach ciepła (bardzo rzadko stosuje się wyższą prędkość). W tym zakresie lód zawiesinowy ma zdecydowanie wyższe współczynniki przejmowania ciepła od roztworu glikolu ($2.7 < W_{S3} < 5.2$). Jest to spowodowane zrywaniem przez drobinki lodu warstwy przyściennej co znacznie wpływa na podniesienie współczynnika przejmowania ciepła. Dla wyższych prędkości przepływu chłodziw w rurach wymiennika wartości wskaźnika W_{S3} są niższe i znajdują się w przedziale

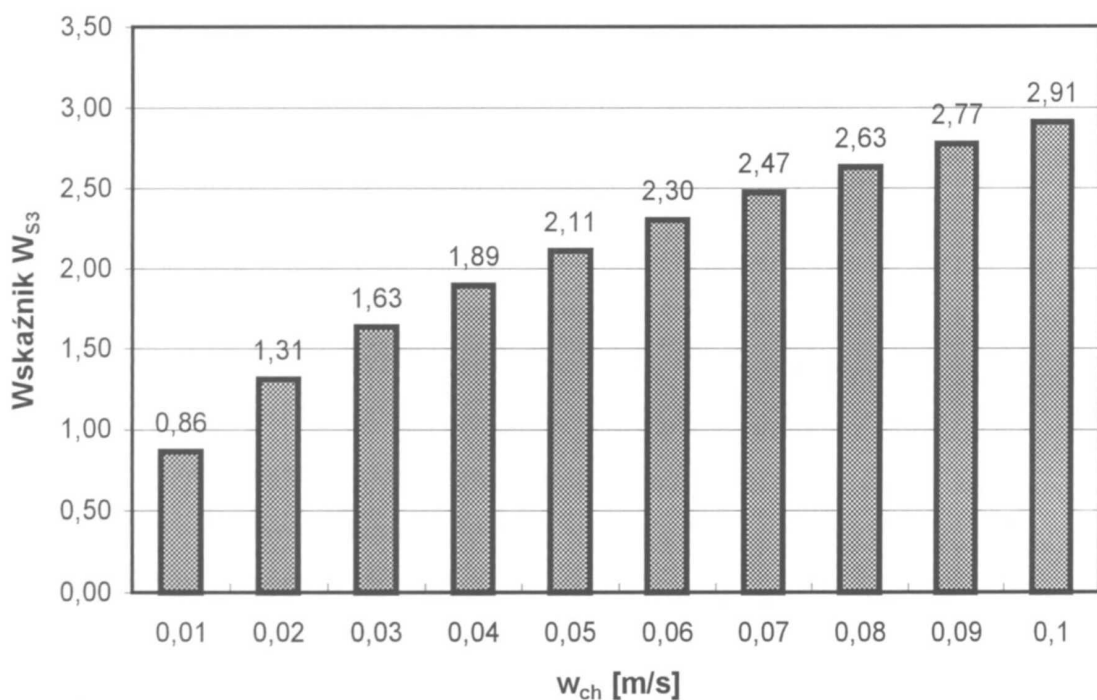
od 1.8 (dla prędkości chłodziw 2.0 m/s) do 2.4 (dla prędkości 5 m/s). W tym wyższym zakresie prędkości przepływu chłodziw roztwór glikolu znajduje się w zakresie burzliwym, co znacznie podnosi wartość jego współczynnika przejmowania ciepła.



Rysunek 6.3.6. Wartości wskaźnika W_{S3} dla różnych prędkości przepływu chłodziwa w rurach wymienników ożebrowanych

Na rysunku 6.3.7 przedstawiono wartości wskaźnika W_{S3} dla wymiennika płytowego, które określają, ile razy współczynniki przejmowania ciepła lodu zawiesinowego są większe od współczynników przejmowania ciepła glikolu etylenowego w zależności od prędkości chłodziw.

Z rysunku 6.3.7 wynika, że dla wymiennika płytowego (WO5) wskaźnik W_{S3} rośnie ze wzrostem prędkości przepływu chłodziwa i osiąga wartość najwyższą dla maksymalnej prędkości przepływu chłodziwa $w_{ch} = 0.1$ m/s. Ten monotoniczny charakter zmienności spowodowany jest tym, że w całym zakresie zmienności prędkości przepływu występuje wyłącznie przepływ laminarny.



Rysunek 6.3.7. Wartości wskaźnika W_{S3} dla różnych funkcji prędkości przepływu chłodziw w wymienniku płytowym

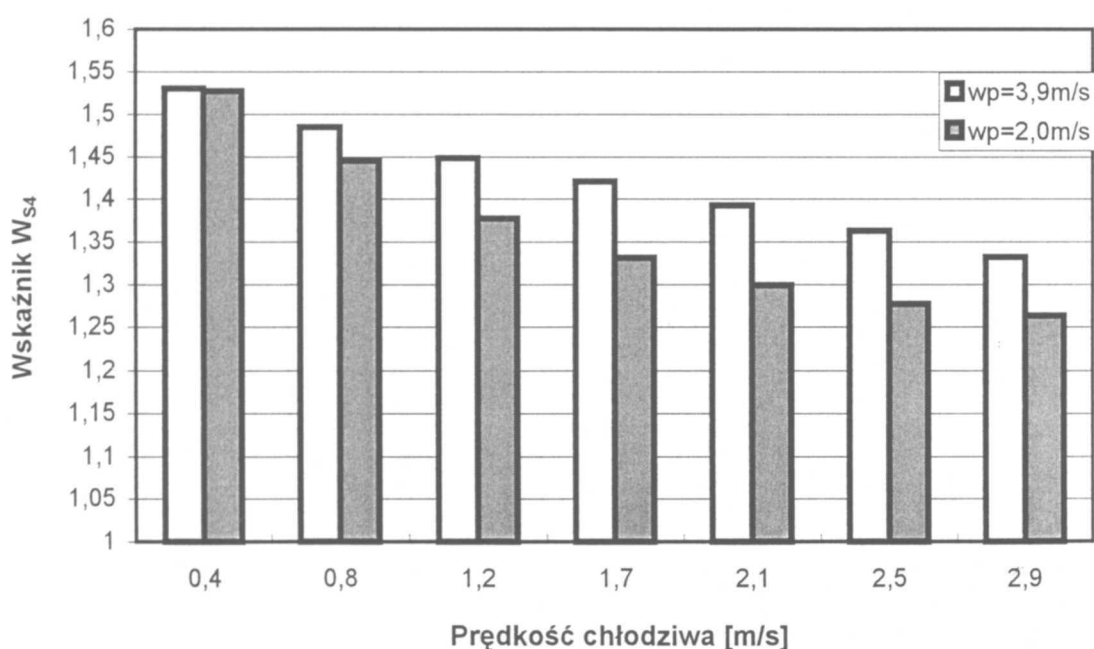
Za pomocą **wskaźnika W_{S4}** (równ. 6.3.4) można porównać wydajność wymiennika zasilanego lodem zawieszinowym z wydajnością wymiennika zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego. Obie wydajności cieplne wymiennika zostały wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych (rozdział 6.1 oraz 6.2).

Wykresy na rysunkach 6.3.8 do 6.3.11 przedstawiają wartości wskaźnika W_{S4} w zależności od prędkości przepływu chłodziwa dla wymiennika ożebrowanego WO2 (rys. 6.3.8), wymiennika ożebrowanego WO3 (rys. 6.3.9), wymiennika ożebrowanego WO4 (rys. 6.3.10) oraz wymiennika płytowego (rys. 6.3.11).

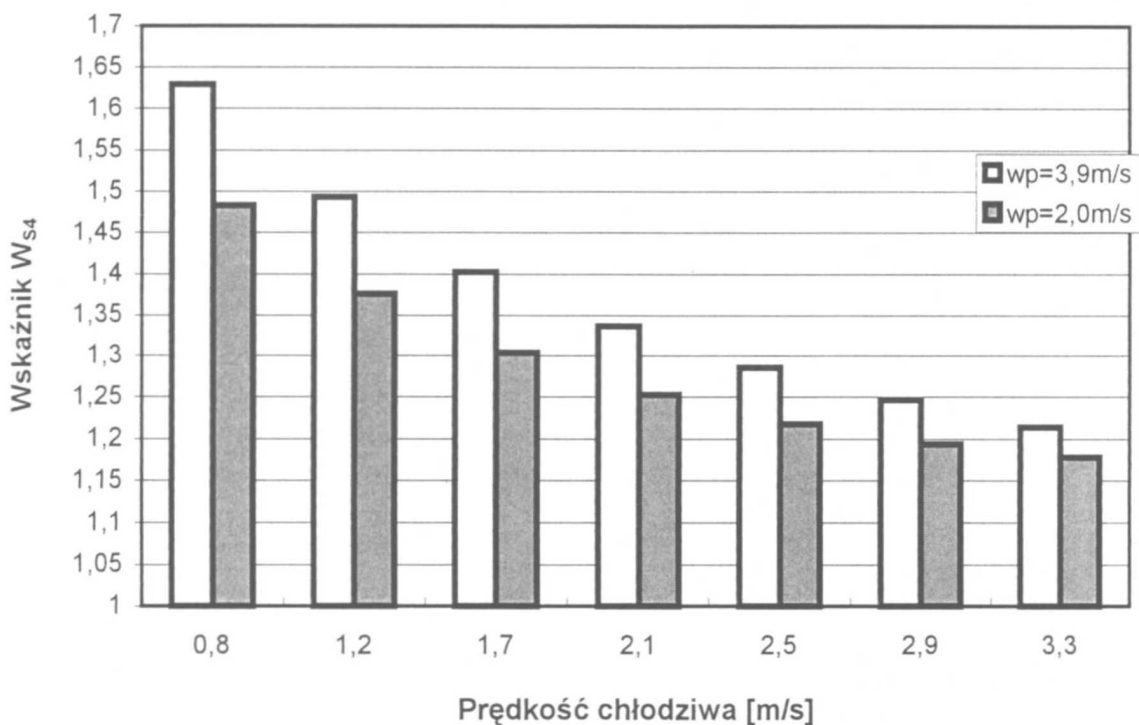
Na wydajność wymienników ożebrowanych w rozpatrywanym zakresie prędkości przepływu chłodziwa duży wpływ ma odbiór ciepła po stronie powietrza. Dla prędkości przepływu powietrza przez wymienniki równej 3.9 m/s oraz 2.0 m/s widoczne są różnice w wartościach wskaźnika W_{S4} . Różnice te pokazują wpływ wymiany ciepła po stronie powietrza na wydajność cieplną wymiennika ciecz-powietrze. Chcąc podnieść wydajność cieplną wymiennika nie wystarczy zmieniać jedynie parametry po stronie cieczy.

Wartości wskaźnika W_{S4} są największe (1.65÷1.40) dla niskich prędkości przepływu chłodziw (0.4÷1.2 m/s) w wymiennikach WO2, WO3 (rys. 6.3.8, 6.3.9). Dla tak niskich

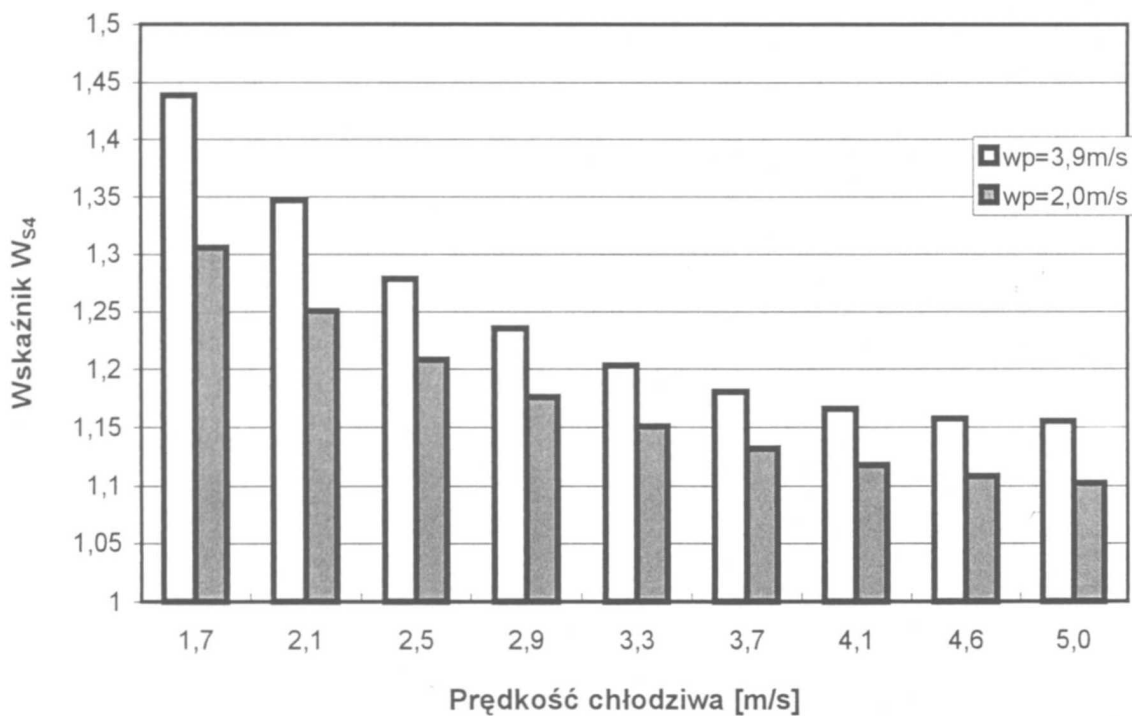
prędkości przepływu chłodziwa decydujący wpływ na wydajność wymiennika może mieć fakt, iż lód zawieszony, na skutek zachodzącej przemiany fazowej (topnienie drobinek lodu) w badanych wymiennikach, zachowuje prawie stałą temperaturę. W zakresie prędkości przepływu chłodziw 1.7÷3.3 m/s wskaźnik W_{S4} osiąga wartości 1.43÷1.17, w zależności od warunków pracy wymiennika (patrz rys. 6.2.8, 6.2.9, 6.2.10). Dla wymiennika WO4, który posiada o połowę mniejszą powierzchnię wymiany ciepła niż wymienniki WO2 i WO3, przy prędkości przepływu chłodziw dochodzącej nawet do 5 m/s nie zauważa się dużego wzrostu wydajności cieplnej wymiennika zasilanego lodem zawieszonym w odniesieniu do wymiennika zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego. Wydajność cieplna wymiennika WO4 zasilanego lodem zawieszonym jest o 10÷16% większa w stosunku do tego samego wymiennika zasilanego glikolem etylenowym. (rys. 6.3.11). Przy tej prędkości przepływu chłodziw wydajność cieplna wymiennika zasilanego lodem zawieszonym w bardzo ograniczony sposób zależy od długości przepływu chłodziwa. Przy takim samym polu powierzchni wymiennika, takiej samej prędkości przepływu chłodziwa, ale przy dwukrotnie większej długości przepływu wzrost wydajności cieplnej wymiennika zasilanego lodem zawieszonym nie przekracza 15%.



Rysunek 6.3.8. Wartości wskaźnika W_{S4} w funkcji prędkości przepływu chłodziwa dla wymiennika ożebrowanego WO2

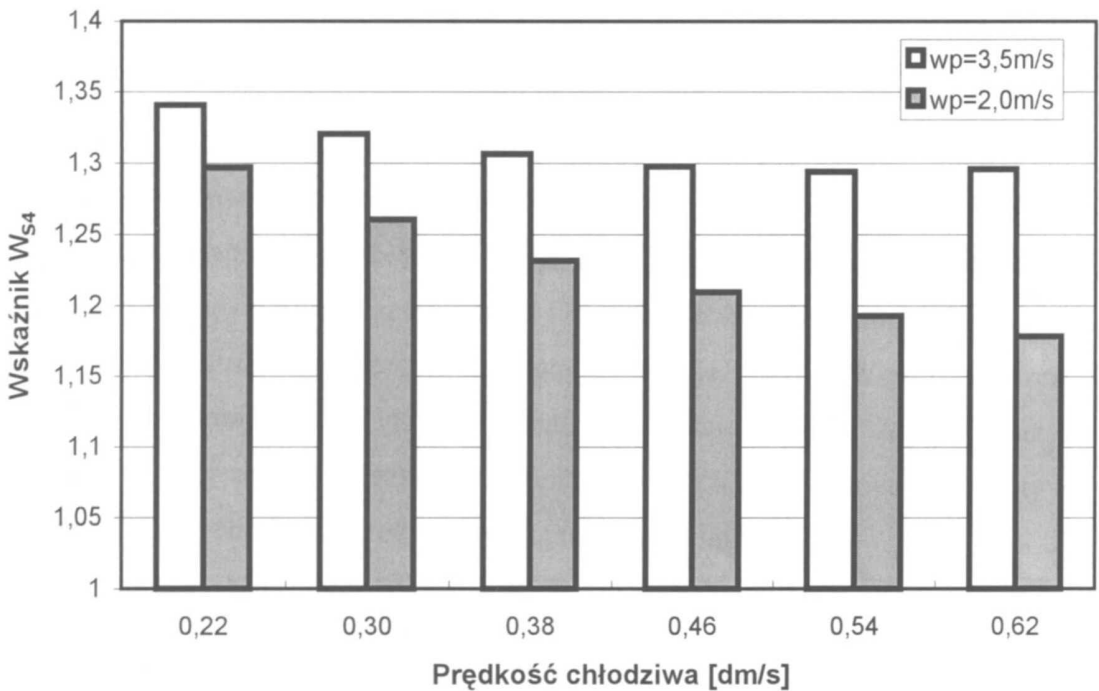


Rysunek 6.3.9. Wartości wskaźnika W_{S4} w funkcji prędkości przepływu chłodziwa dla wymiennika ożebrowanego WO3



Rysunek 6.3.10. Wartości wskaźnika W_{S4} w funkcji prędkości przepływu chłodziwa dla wymiennika ożebrowanego WO4

Na rysunku 6.3.11 przedstawiono wartości wskaźnika W_{S4} w zależności od prędkości chłodziwa dla wymiennika płytowego. Na wydajność wymiennika płytowego, w rozpatrywanym zakresie prędkości przepływu chłodziwa, również decydujący wpływ ma odbiór ciepła po stronie powietrza. Dla współczynnika przejmowania ciepła po stronie powietrza odpowiadającego prędkości powietrza 3.5 m/s wartość wskaźnika W_{S4} osiąga wartość 1.29÷1.34, co oznacza wzrost wydajności wymiennika panelowego zasilanego lodem zawiesinowym o 29÷34% w stosunku do tego samego wymiennika zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego.



Rysunek 6.3.11. Wartości wskaźnika W_{S4} w funkcji prędkości przepływu chłodziwa dla wymiennika płytowego

6.4. Analiza kosztów

Wobec zróżnicowania pośrednich systemów chłodniczych zasilanych lodem zawieszonym, wodnym roztworem glikolu etylenowego i solanką pod względem konstrukcyjnym, aplikacji oraz osiąganych wydajności chłodniczych (instalacje z lodem zawieszonym najczęściej pracują także w nocy gromadząc duży zapas „zimna”) trudno porównać koszty tych systemów. Dlatego do porównania kosztów przyjęto instalacje zasilane różnymi chłodziwami, które mają spełniać takie same funkcje (taka sama wymagana wydajność chłodnicza). Do porównania systemów pośredniego chłodzenia pod względem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych posłużą dwa poniższe przykłady [Dworzak, 2000]:

Przykład 1.

Producent soków owocowych schładza 660 000 litrów soków od temperatury 21°C do 4°C w ciągu tygodnia. Zapotrzebowanie na „zimno” nie jest jednakowe każdego dnia. Od poniedziałku do środy do schłodzenia jest po 172 000 litrów soków na dzień, a w czwartek i piątek po 72 000 litrów. W soboty i niedziele zakład nie pracuje. Wymagana, szczytowa wydajność chłodnicza wynosi 312 kW. Analizie poddano układ z solanką oraz lodem zawieszonym, przy założeniu jednakowej funkcji tych urządzeń. Porównano koszty dwóch układów spełniających wyżej określone wymagania technologiczne:

- układ z solanką o temperaturze wejściowej -2°C i wyjściowej 2°C,
- układ z lodem zawieszonym o temperaturze wejściowej -5°C i wyjściowej 0°C (pracujący 20 godzin na dobę).

Porównanie kosztów w pośrednich systemach chłodzenia wykorzystujących solankę oraz lód zawieszony jako chłodziwo przedstawiono w tabeli 6.4.1.

Tabela 6.4.1. Porównanie kosztów pośrednich systemów chłodzenia, wykorzystujących solankę oraz lód zawieszinowy jako chłodziwo [Dworzak, 2000]

Wydajności i koszty systemów	Warianty rozwiązań	
	Układ solankowy	Układ z lodem zawieszinowym
Wymagana wydajność w dzień [kW]	173	55
Wymagana wydajność w nocy [kW]	0	50
Koszty inwestycyjne [Euro]	108 000	168 000
Koszty eksploatacyjne [Euro]	44 807	24 064
Cena „zimna” [Euro/kWh]*	0.181	0.147

* zawiera amortyzację systemu

Przykład 2.

Zakład spożywczy przerabia żywiec zwierzęcy na przetwory mięsne [Dworzak, 2000]. Wymagana wydajność chłodnicza wynosi 385 kW. Analizie kosztowej poddano dwa układy z różnymi czynnikami pośredniczącymi:

- wodnym roztworem glikolu etylenowego,
- lodem zawieszinowym o temperaturze wejściowej -2°C i wyjściowej 2°C oraz początkowej zawartości lodu wynoszącej 45%.

Porównanie kosztów w pośrednich systemach chłodzenia wykorzystujących wodny roztwór glikolu etylenowego oraz lód zawieszinowy jako chłodziwo przedstawiono w tabeli 6.4.2.

Tabela 6.4.2. Porównanie kosztów pośrednich systemów chłodzenia wykorzystujących wodny roztwór glikolu etylenowego oraz lód zawieszinowy jako chłodziwo [Dworzak, 2000]

Koszty systemów	Warianty rozwiązań	
	Układ z roztworem glikolu	Układ z lodem zawieszinowym
Koszty inwestycyjne [Euro]	390 000	435 000
Wydatki na energię [Euro/rok]	44 807	24 064
Ogólne roczne wydatki [Euro/rok]	109 044	89 467
Cena „zimna” [Euro/kWh]	0.115	0.094

W pierwszym przykładzie koszty inwestycyjne są dla układu z lodem zawieszonym o 36% wyższe niż dla układu z solanką. Roczne koszty eksploatacyjne dla układu z lodem zawieszonym, w porównaniu do układu solankowego, są niższe o 46%. Także cena produkcji „zimna” jest niższa w układzie z lodem zawieszonym o 19%. Ponadto koszty energii elektrycznej, którą zasilana jest wytwornica lodu nocą są niższe o 30%.

W drugim przykładzie koszty inwestycyjne są dla układu z lodem zawieszonym o 10% wyższe niż dla układu z wodnym roztworem glikolu etylenowego. Roczne koszty eksploatacyjne dla układu z lodem zawieszonym, w porównaniu do układu z wodnym roztworem glikolu etylenowego, są niższe o 18%, a wydatki na energię są niższe o 45%. Także cena produkcji „zimna” jest niższa o 18% w układzie z lodem zawieszonym.

Powyższe relacje kosztów systemów pośredniego chłodzenia wskazują, że droższy przy zakupie system wykorzystujący lód zawieszony jako chłodziwo okazuje się tańszy w eksploatacji. Zwrot różnicy w kosztach inwestycyjnych, między układami z tradycyjnie stosowanymi chłodziwami, a układem z lodem zawieszonym zakończy się po drugim roku eksploatacji. Od tego momentu (biorąc pod uwagę koszty inwestycyjne i dwuletnie koszty eksploatacyjne) system z lodem zawieszonym będzie tańszy od pozostałych układów. W niektórych działających na świecie systemach (systemy Maxim ICE dla dużych wydajności), wykorzystujących lód zawieszony, podaje się czas zwrotu różnicy w kosztach inwestycyjnych 1.1 roku przy rocznych kosztach eksploatacyjnych dla układu z lodem zawieszonym niższych o 63% w porównaniu do układu z tradycyjnie stosowanym chłodziwem [Kirby i inni, 1998].

6.5. Wnioski wynikające z porównania chłodziw

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych wymienników ciepła zasilanych lodem binarnym (zawiesinowym) oraz wodnym roztworem glikolu etylenowego (w określonym zakresie zmienności parametrów wejściowych mediów), a także wykonanych obliczeń można wysnuć następujące wnioski:

1. Lód zawiesinowy charakteryzuje się lepszą zdolnością magazynowania „zimna”, która jest prawie 12 razy wyższa od 47% wodnego roztworu glikolu etylenowego i 9 razy wyższa od 20% wodnego roztworu alkoholu etylowego. Te duże zdolności lodu zawiesinowego do magazynowania energii mogą zostać wykorzystane na przykład do uniknięcia deficytu „zimna” oraz zapewnienia stałego poziomu jego dostaw podczas obciążenia szczytowego (dzień). Cały potrzebny zapas „zimna” można zgromadzić w nocy, kiedy popyt na energię jest niski. Pozwoli to obniżyć wydajność wytwornicy lodu zawiesinowego (zmniejszy koszty inwestycyjne). Dodatkowym atutem jest to, że w wielu krajach cena energii elektrycznej (niezbędnej do zasilania wytwornicy) w nocy jest niższa.
2. Lód zawiesinowy powstały z 10% wodnego roztworu alkoholu etylowego w odniesieniu do 47% wodnego roztworu glikolu etylenowego ma (przy -5°C) niższe o około 5% opory przepływu w zakresie prędkości przepływu $2.8\div 5.0$ m/s, (przy Re_{lb} z przedziału $3100\div 5500$), niższe do 42% opory przepływu w zakresie prędkości przepływu $2.0\div 2.8$ m/s (przy Re_{lb} z przedziału $2300\div 3100$) i tylko o 10÷12% wyższe opory przepływu w zakresie prędkości przepływu chłodziw $0.5\div 2.0$ m/s (przy Re_{lb} z przedziału $500\div 2300$). W zakresie prędkości przepływu $2.0\div 2.5$ m/s (przy Re_{lb} z przedziału $2300\div 2800$) lód zawiesinowy ma najniższe, w grupie porównywanych chłodziw, opory przepływu (woda, wodny roztwór glikolu etylenowego oraz wodny roztwór alkoholu etylowego). Dodatkowo dla obniżenia oporów przepływu przy projektowaniu wymienników i rurociągów lodu zawiesinowego można wykorzystać, potwierdzone badaniami w pracy, zjawisko zmniejszania się oporów przepływu lodu zawiesinowego. W warunkach badań zjawisko to wystąpiło w zakresie zawartości drobinek lodu 25÷35%, przy określonej średnicy rur i prędkości przepływu chłodziwa. Wykorzystanie tego zjawiska pozwoli, w specjalnie zaprojektowanych instalacjach na lód zawiesinowy, stosować pompy obiegowe o mniejszych wydajnościach (niższe koszty).
3. Współczynniki przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego mają znacznie wyższe wartości w porównaniu do współczynników przejmowania ciepła od strony wodnego

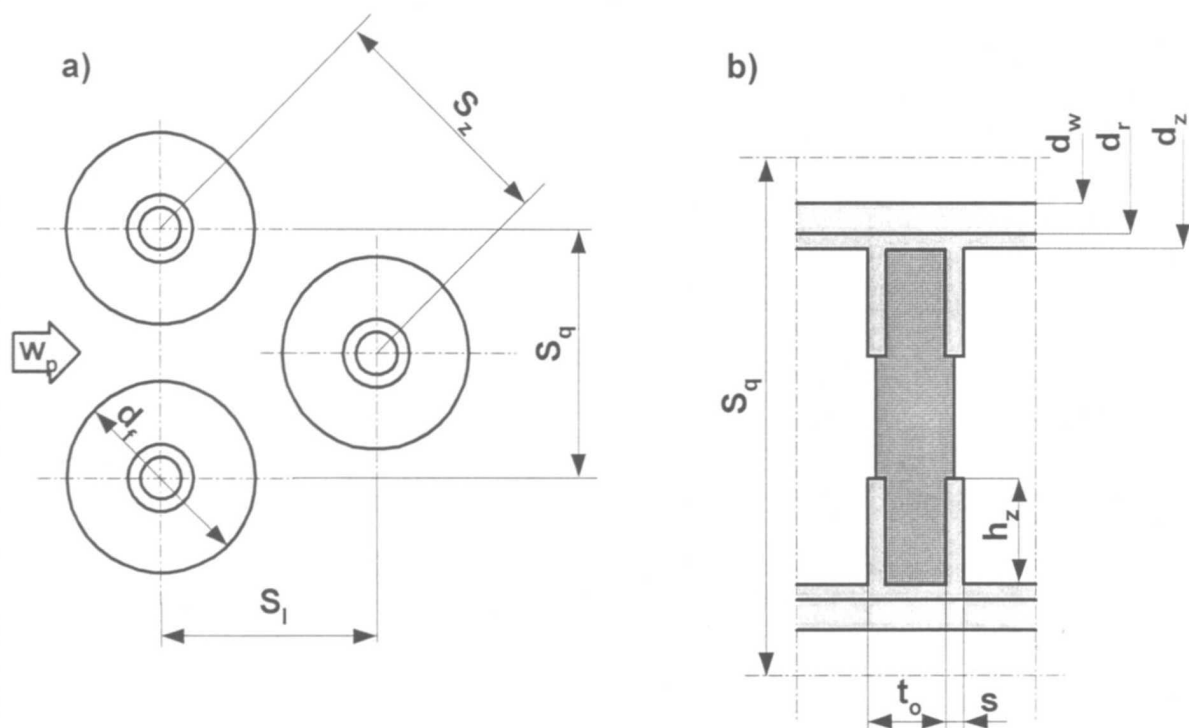
roztworu glikolu etylenowego zarówno dla wymienników wężownicowych, w których są one większe 1.8÷5.2 razy jak i dla wymiennika panelowego, w którym są one większe 1.3÷2.9 razy. Jednak na wydajność wymiennika ma wpływ także współczynnik przejmowania ciepła po drugiej stronie przegrody. W przypadku (tak jak w pracy), gdy wymienniki pełnią rolę oziębiaczy powietrza, wartości współczynników przejmowania ciepła od strony powietrza odgrywają zasadniczą rolę.

4. Wydajności cieplne wymienników były większe w przypadku zasilania ich lodem zawieszinowym. Dla wymienników ożebrowanych ich wydajności cieplne były 11÷64% większe w porównaniu z wydajnościami wymienników zasilanych wodnym roztworem glikolu etylenowego. Dla wymiennika panelowego jego wydajność cieplna była 17÷36% większa w porównaniu do wydajności tego samego wymiennika zasilanego wodnym roztworem glikolu etylenowego. Ze względu na to systemy chłodnicze z lodem zawieszinowym mogą być stosowane wszędzie tam, gdzie jest zbyt mało miejsca aby pomieścić duże (gabarytowo) wymienniki na przykład oziębiacze powietrza w kopalniach.
5. Z uwagi na różnice w pośrednich systemach chłodzenia wykorzystujących lód zawieszinowy, wodny roztwór glikolu etylenowego i solankę trudno jest porównać te systemy pod względem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. W większości przypadków systemy z lodem zawieszinowym charakteryzują się wyższymi kosztami inwestycyjnymi. Biorąc jednak pod uwagę sumę kosztów inwestycyjnych oraz kosztów eksploatacyjnych, systemy z lodem zawieszinowym mają niższe łączne koszty całkowite już po kilku latach użytkowania.

7. OPRACOWANIE ZALEŻNOŚCI NA WSPÓŁCZYNNIK PRZEJMOWANIA CIEPŁA OD STRONY LODU ZAWIESINOWEGO

7.1. Wyznaczanie prędkości przepływu powietrza przez wymiennik

Prędkość przepływu powietrza w wymiennikach ożebrowanych została wyznaczona dzięki znajomości prędkości przepływu powietrza w kanale przed wymiennikiem. Do wyznaczenia prędkości przepływu wykorzystano równanie ciągłości: $w \cdot A = const$, czyli znajomość pól przekrojów poprzecznych przepływu powietrza przed A_{cz} i w wymienniku A_o oraz prędkości powietrza przed wymiennikiem (rys. 7.1.1). Oba przekroje zostały podzielone na jednakową ilość jednostkowych (powtarzalnych) pól powierzchni (rys. 7.1.1 b).



Rysunek 7.1.1. Wyznaczanie prędkości przepływu powietrza w najmniejszym przekroju:

- rozmisszczenie rur w wymienniku ożebrowanym,
- sposób podziału powierzchni wymiennika na jednostkową powierzchnię czołową i swobodną.

Prędkość przepływu powietrza przez wymiennik jest równa (równ. 7.1.1) większej wartości z w_1 (równ. 7.1.2) i w_2 (równ. 7.1.3).

$$w_o = \max(w_1, w_2) \quad (7.1.1)$$

$$w_1 = w_{cz} \cdot \frac{S_q \cdot t_o}{(S_q - d_z) \cdot t_o - (d_f - d_z) \cdot s} \quad (7.1.2)$$

$$w_2 = w_{cz} \cdot \frac{0.5 \cdot S_q \cdot t_o}{(S_z - d_z) \cdot t_o - (d_f - d_z) \cdot s} \quad (7.1.3)$$

gdzie:

$$S_z = \sqrt{0.25 \cdot S_q^2 + S_l^2} \quad (7.1.4)$$

W wymienniku płytowym (panelowym) do wyznaczania prędkości przepływu powietrza również wykorzystano równanie ciągłości: $w \cdot A = const$. Dzięki temu równaniu prędkość przepływu powietrza przez wymiennik wyznacza się wzorem:

$$w_o = w_{cz} \cdot \frac{A_{cz}}{A_o} \quad (7.1.5)$$

gdzie:

$\frac{A_{cz}}{A_o}$ - iloraz pól przekrojów poprzecznych przepływu powietrza przed (A_{cz}) i w

wymienniku (A_o).

7.2. Wyznaczanie średnich współczynników przejmowania ciepła

Wyznaczanie zależności na średnie współczynniki przejmowania ciepła od strony lodu zawieszinowego α_{lb} przeprowadzone zostało na podstawie znajomości zależności na współczynniki przejmowania ciepła od strony powietrza α_p dla badanych wymienników.

Metoda ta oparta jest na wykorzystaniu wyników badań doświadczalnych (i wyznaczonego z nich współczynnika przenikania ciepła k dla każdego wymiennika), przeprowadzonych według określonego planu eksperymentu.

Dla wężownicowych wymienników rurowych skorzystano z zależności na współczynnik przejmowania ciepła od strony powietrza dla wymienników ożebrowanych opracowanych przez Niezgodę [Niezgoda, 1992]:

$$\text{Nu}_p = 0.48 \cdot \text{Re}_p^{0.625} \cdot \text{Pr}_p^{\frac{1}{3}} \quad (7.2.1)$$

gdzie:

$$\text{Nu}_p = \frac{\alpha_p \cdot d_{hp}}{\lambda_p} \quad (7.2.2)$$

$$d_{hp} = \left(1 + \frac{d_f - d_z}{t_o} \cdot \left(1 + \frac{d_f - d_z}{2 \cdot d_z} \right) \right) \cdot d_z \quad (7.2.3)$$

Ograniczenia w stosowaniu wzoru 7.2.1 [Niezgoda, 1992]:

$$0.009 < d_z < 0.029$$

$$0.37 < h_z/d_z < 0.029$$

$$1.70 < h_z/t_o < 3.7$$

$$5.0 < d_{hp}/d_z < 12$$

$$1.7 < S_q/d_z < 3.8$$

$$1.0 < S_l/d_z < 2.5$$

$$3.0 < n_{rr}$$

Dla wymienników płytowych skorzystano z zależności na współczynnik przejmowania ciepła od strony powietrza podany przez Denisa [Denis, 2002]:

$$\alpha_p = 0.0343 \cdot \frac{\lambda_p}{d_{hp}} \cdot \text{Re}_p^{0.8} \cdot \text{Pr}_p^{0.333} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_{hp}}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \quad (7.2.4)$$

gdzie:

d_{hp} [m] – średnica hydrauliczna.

Współczynnik przenikania ciepła k można (znając powierzchnię wymiany ciepła oraz średnią różnicę temperatur) wyznaczyć z równania Pecleta:

$$k_w = \frac{\dot{Q}}{F_w \cdot \Delta T_m} \quad (7.2.5)$$

gdzie:

$$\Delta T_m = \frac{t_{p1} - t_{p2}}{\ln \left(\frac{t_{p1} - t_{lb}}{t_{p2} - t_{lb}} \right)} \quad (7.2.6)$$

Oprócz tego należy jeszcze znać powierzchnię wewnętrzną i zewnętrzną wymienników tzn. powierzchnię styku z oboma mediami:

$$F_{mal} = \pi \cdot l_c \cdot \left(\frac{d_z + d_r}{2} \right) \quad (7.2.7)$$

$$F_{ms} = \pi \cdot l_c \cdot \left(\frac{d_r + d_w}{2} \right) \quad (7.2.8)$$

$$F_w = \pi \cdot l_c \cdot d_w \quad (7.2.9)$$

$$F_{zeb} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot (d_f^2 - d_z^2)}{4} \cdot \frac{l_c}{t_o} \quad (7.2.10)$$

$$F_k = \frac{l_c}{t_o} \cdot \pi \cdot d_z \cdot (t_o - s) + \frac{l_c}{t_o} \cdot \pi \cdot d_f \cdot s \quad (7.2.11)$$

$$F_z = F_k + F_{zeb} \quad (7.2.12)$$

gdzie:

F_k, F_w, F_z, F_{zeb} [m²] – odpowiednio: powierzchnia między żebrami, wewnętrzna, zewnętrzna, żeber,

l_c [m] – całkowita długość rur wężownicy,

h_z [m] – wysokość żebra.

Ostatecznie, po uwzględnieniu sprawności żeber i wszystkich wymaganych pól powierzchni, współczynnik przenikania ciepła odniesiony do powierzchni wewnętrznej wężownicy jest opisany wzorem:

$$k_w = \frac{1}{\frac{F_w}{F_z \cdot \alpha_{pz}} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} \cdot \frac{F_w}{F_{ms}} + \frac{\delta_{al}}{\lambda_{al}} \cdot \frac{F_w}{F_{mal}} + \frac{1}{\alpha_{lb}}} \quad (7.2.13)$$

gdzie:

$$m_z = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_p}{s_{al} \cdot \lambda_{al}}} \quad (7.2.14)$$

$$\alpha_{pz} = \alpha_p \cdot \left(\frac{F_k + F_{zeb} \cdot \varepsilon_z}{F_z} \right) \quad (7.2.15)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\tanh(m_z \cdot h_z)}{m_z \cdot h_z} \quad (7.2.16)$$

a zastępcza wysokość żebra wg Schmidta [Nieżgoda, 1992]:

$$h_z = \frac{d_f - d_z}{2} \cdot \left(1 + 0.35 \cdot \ln \frac{d_f}{d_z} \right) \quad (7.2.17)$$

W wymienniku płytowym kanały cieczowe znajdują się w pewnej odległości od siebie, równej B/n_k (B - szerokość płyty, n_k - liczba kanałów). Powierzchnię pomiędzy kanałami można traktować jak żebro proste o wysokości równej:

$$h_z = 0.5 \left(\frac{B}{n_k} - d_k \right) \quad (7.2.18)$$

Dla wymiennika płytowego:

$$m_z = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\delta_z \lambda_s}} \quad (7.2.19)$$

gdzie:

d_k – średnica kanału w płaszczyźnie płyty,

$\delta_z = 2 \cdot \delta_s$,

δ_s – grubość ścianki.

7.3. Wyniki badań eksperymentalnych wymienników ciepła zasilanych lodem zawiesinowym

Głównym celem tej części badań eksperymentalnych było wyznaczenie charakterystyk cieplnych wymienników zasilanych lodem zawiesinowym w różnych warunkach pracy. Wyniki badań zostały wykorzystane do wyznaczenia zależności na współczynnik przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego.

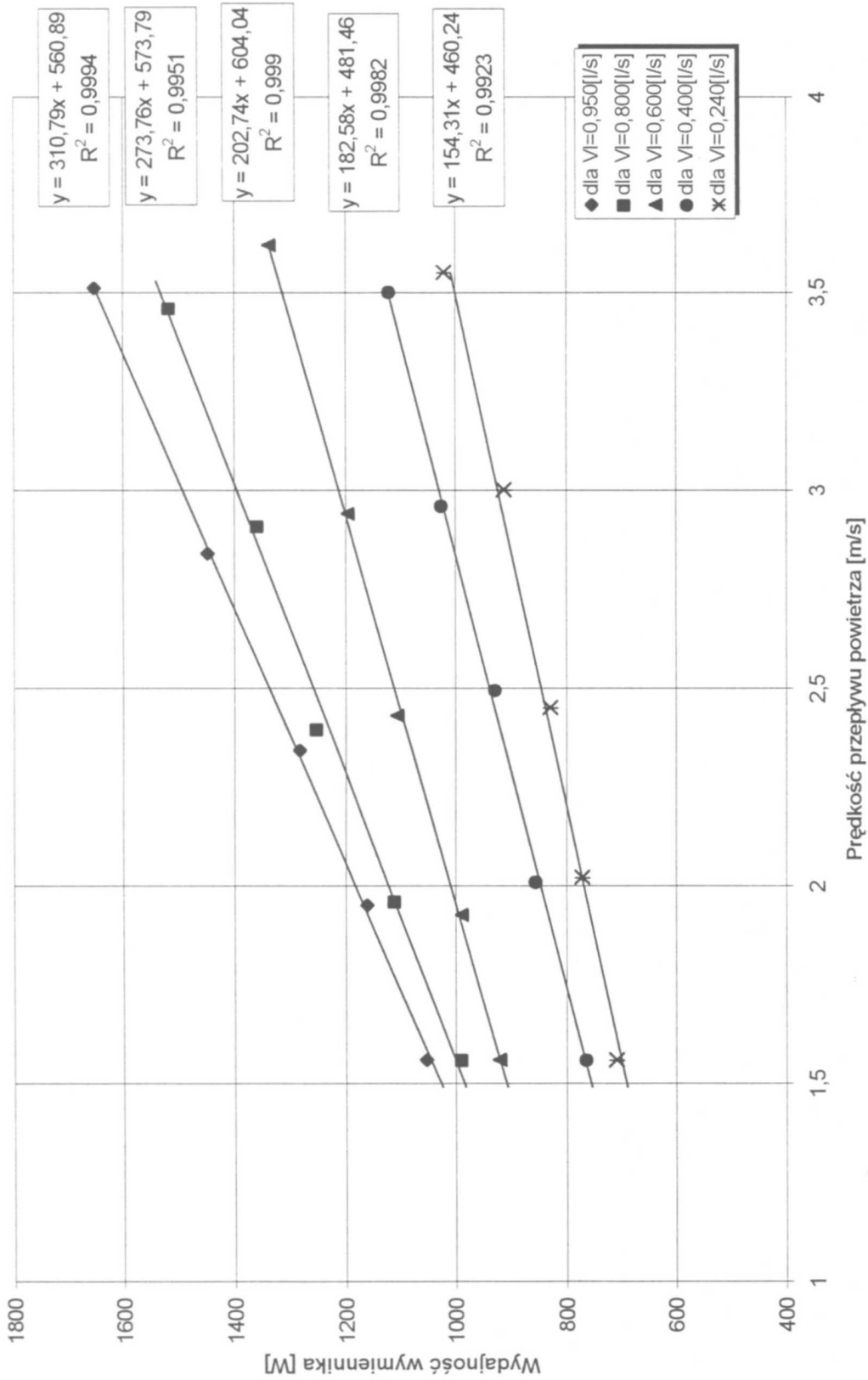
Badania doświadczalne przeprowadzone zostały w identyczny sposób jak przedstawiono w rozdziale 6.1. Do wyznaczenia zależności na współczynnik przejmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego wykorzystano także wyniki badań wymiennika ożebrowanego WO1 (rys. 7.3.1). Parametry powietrza i lodu zawiesinowego podczas badań wymienników ożebrowanych WO2, WO3, WO4 oraz wymiennika płytowego WO5 zamieszczono w rozdziale 6.1.

Parametry powietrza i lodu zawiesinowego podczas badania wymiennika ożebrowanego WO1:

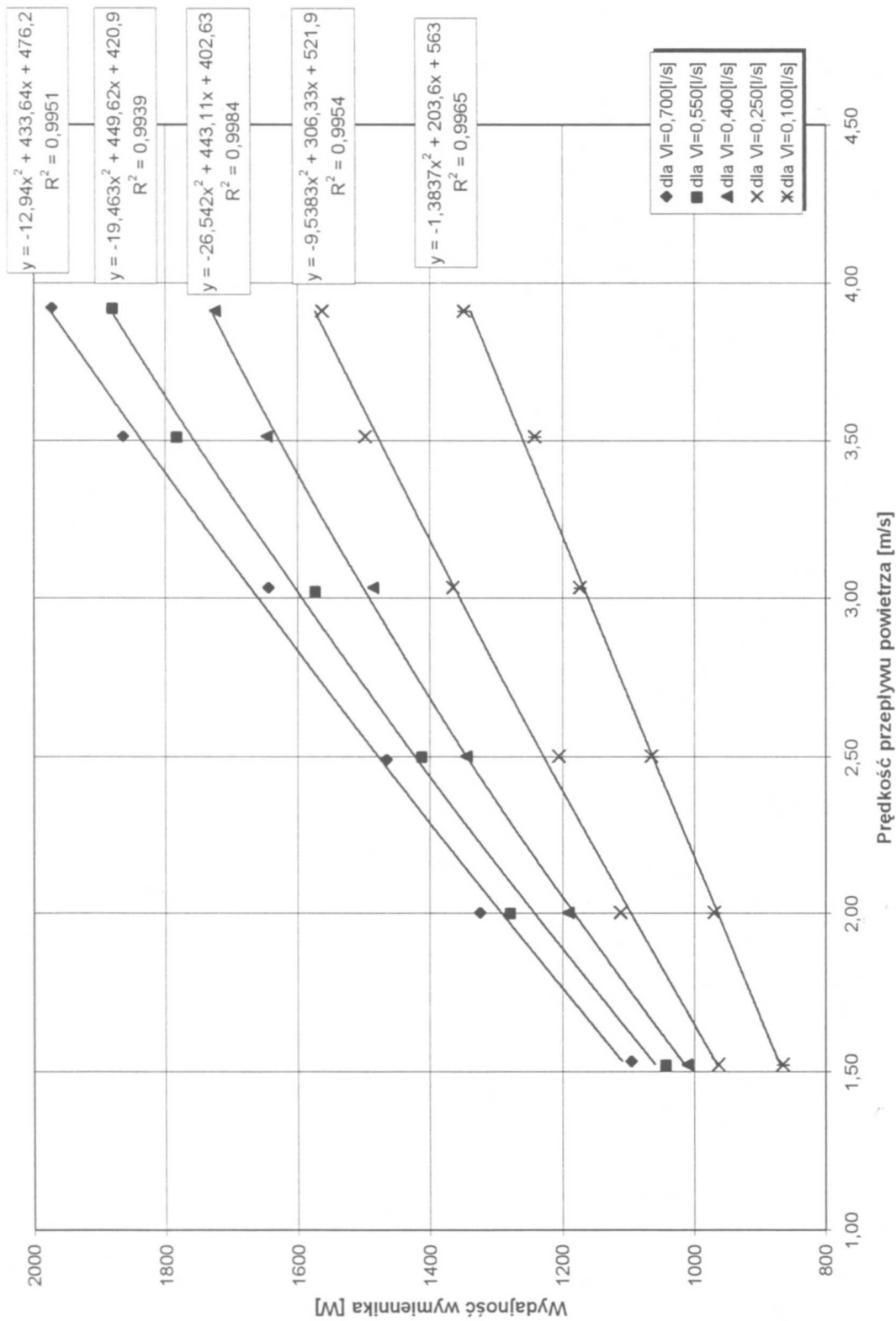
- temperatura powietrza na wlocie: 0 [°C],
- wilgotność względna powietrza na wlocie: 70 [%],
- prędkość czołowa powietrza: 1.5 ÷ 3.5 [m/s],
- temperatura lodu zawiesinowego na wlocie: - 4.7 [°C],
- strumień objętości lodu zawiesinowego: 0.23 ÷ 0.95 [l/s],
- udział masowy drobinek lodu: 9.12 [%],
- prędkość przepływu lodu zawiesinowego w rurach wymiennika: 0.25 ÷ 1.0 [m/s].

Wyniki badań tego wymiennika przedstawiono na rysunku 7.3.1.

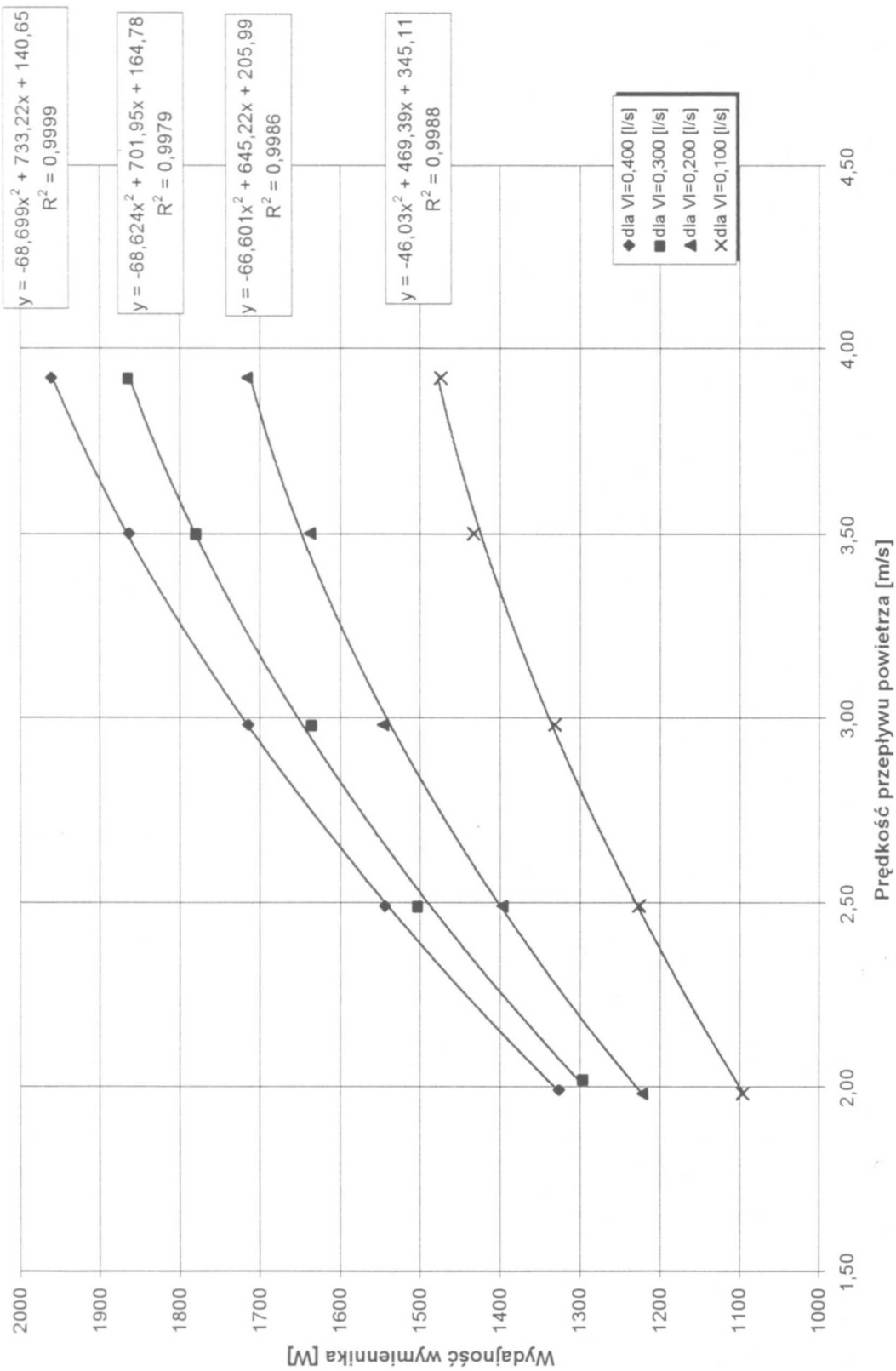
Na rysunkach 7.3.1 do 7.3.5 przedstawiono wyniki badań wymienników ciepła zasilanych lodem zawiesinowym. Wyniki badań wymienników ożebrowanych: WO1, WO2, WO3, WO4 przedstawione są na rysunkach 7.3.1÷7.3.4, a wyniki badań wymiennika płytowego przedstawione są na rysunku 7.3.5. Wykresy przedstawiają zależności wydajności cieplnej wymienników od prędkości powietrza.



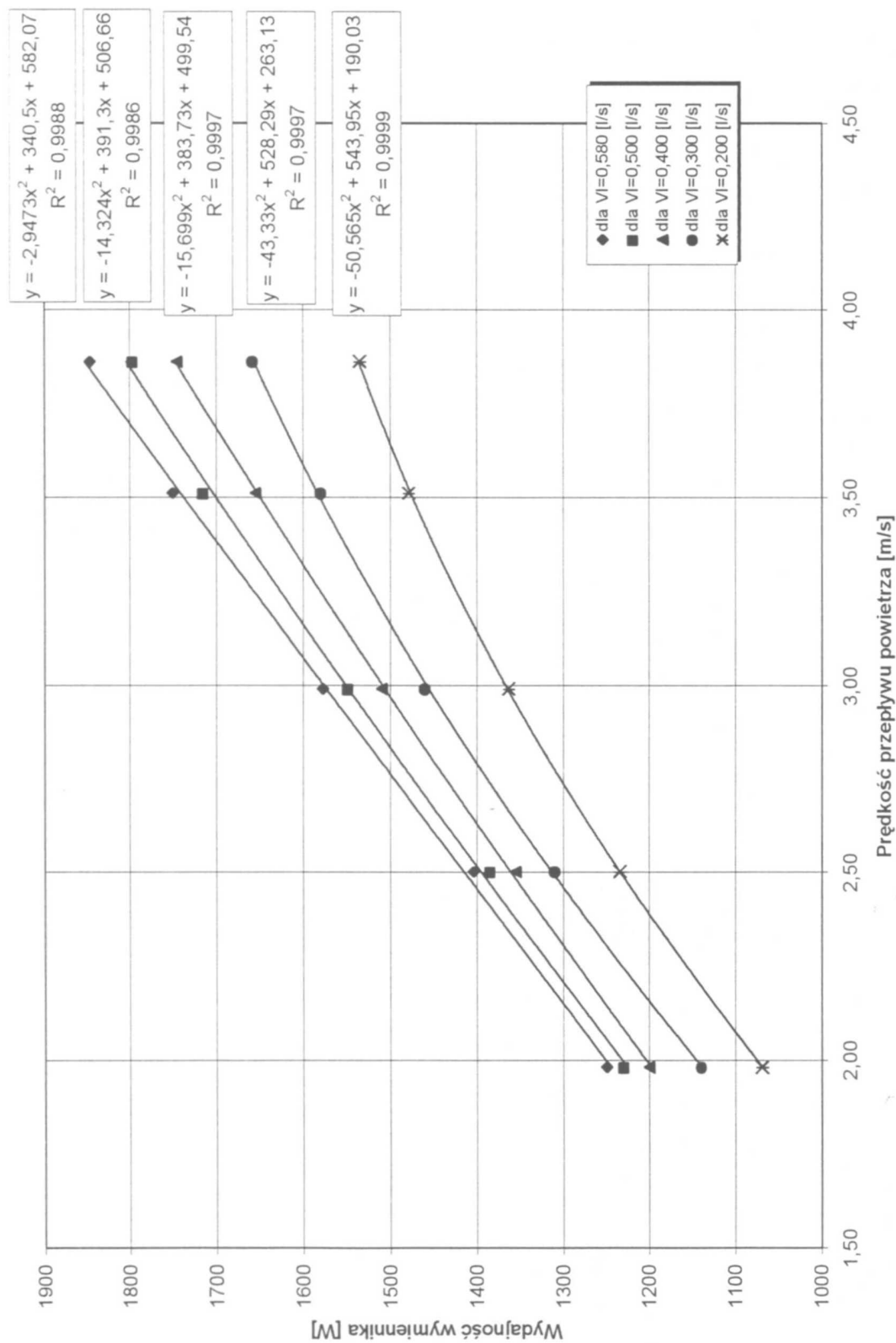
Rysunek 7.3.1. Wydajność wymiennika ożebrowanego WO1 w funkcji prędkości przepływu powietrza dla różnych strumieni objętości lodu zawieszinowego



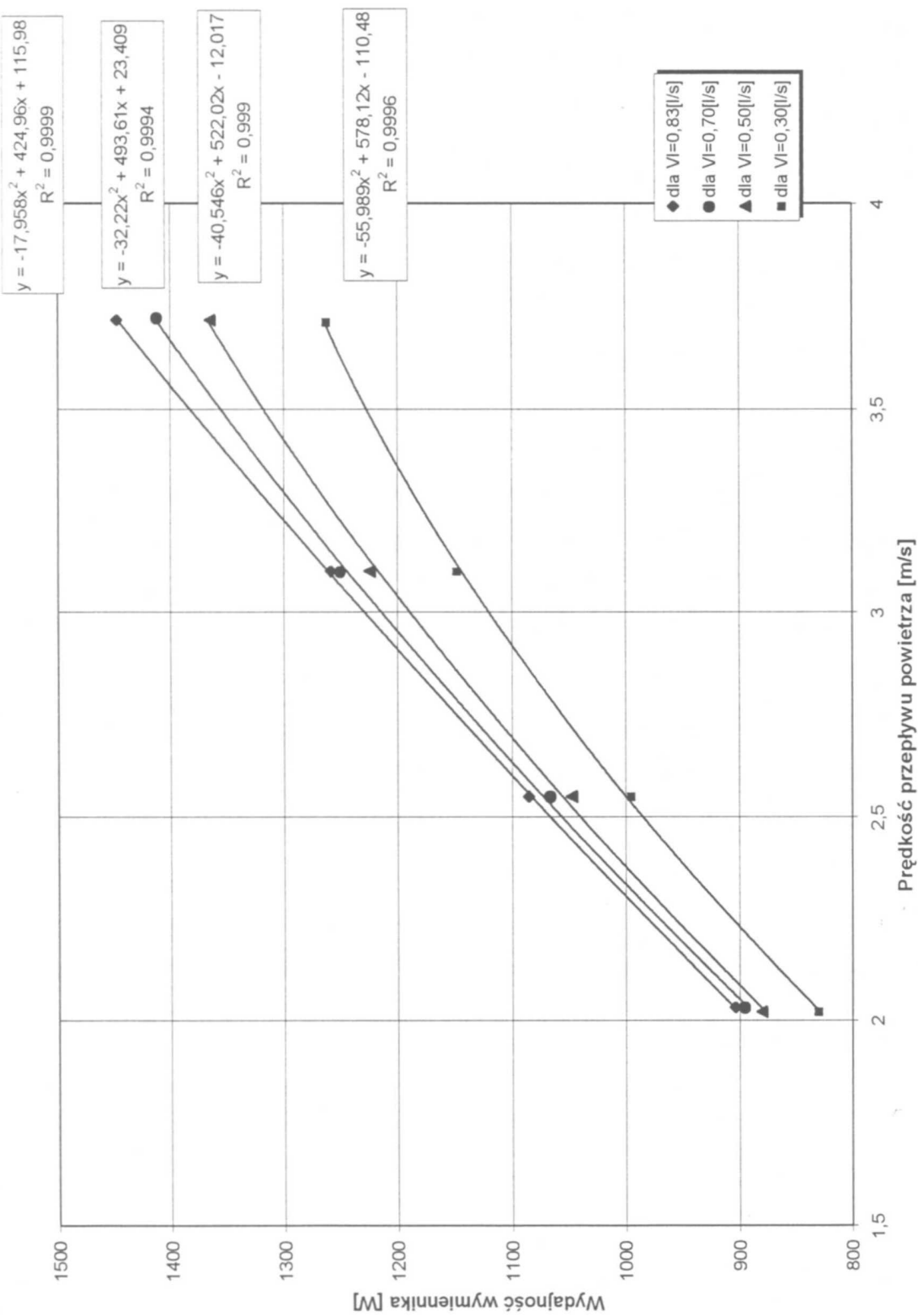
Rysunek 7.3.2. Wydajność wymiennika ozebrowanego W02 w funkcji prędkości przepływu powietrza dla różnych strumieni objętości lodu zawieszinowego



Rysunek 7.3.3. Wydajność wymiennika ozebrowanego WO3 w funkcji prędkości przepływu powietrza dla różnych strumieni objętości lodu zawieszinowego



Rysunek 7.3.4. Wydajność wymiennika ozebowanego WO4 w funkcji prędkości przepływu powietrza dla różnych strumieni objętości lodu zawieszinowego



Rysunek 7.3.5. Wydajność wymiennika płytowego WO5 w funkcji prędkości przepływu powietrza dla różnych strumieni objętości lodu zawieszinowego

7.4. Opracowanie zależności na współczynnik przyjmowania ciepła

Na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 7.3 oraz zależności zamieszczonych w rozdziałach 7.1 oraz 7.2 wyznaczono średnie współczynniki przyjmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego dla każdego z badanych wymienników. Wyniki badań współczynnika przyjmowania ciepła (w zależności od liczby Reynoldsa) trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4) przedstawiono na jednym wykresie (rys. 7.4.1). Te wyniki badań doświadczalnych zostały porównane z wynikami obliczeń współczynnika przyjmowania ciepła wybranymi wzorami z literatury (rozdział 2.5). Wybrano takie zależności z literatury, że współczynniki przyjmowania ciepła nimi obliczone są najbardziej zbliżone do współczynników przyjmowania ciepła wyznaczonych z badań doświadczalnych. Wobec uzyskanych rozbieżności pomiędzy współczynnikami przyjmowania ciepła z badań i współczynnikami przyjmowania ciepła z obliczeń, postanowiono wyznaczyć własną zależność w oparciu o przyjętą z literatury postać wzoru. Najmniejsze różnice pomiędzy wynikami badań i obliczeń uzyskano dla wzoru Harady (równ. 2.5.7), Christensena i Kauffelda (równ. 2.5.19) oraz Snoeka i Bellamy'ego (równ. 2.5.27). Zdecydowano nie przyjmować postaci wzoru Harady, ponieważ przedmiotem jego badań była mieszanina cieczy z drobinkami szklanymi lub drobinkami żywicy. Ponadto zależność Harady została wyznaczona dla zakresu liczby Reynoldsa od 8000÷50000. W badaniach zakres liczby Reynoldsa zmieniał się w zakresie 500÷5500 (dla trzech wymienników ożebrowanych). Zdecydowano również nie przyjmować postaci wzoru Snoeka i Bellamy'ego ponieważ przedmiotem jego badań był 8÷10% roztwór glikolu etylenowego.

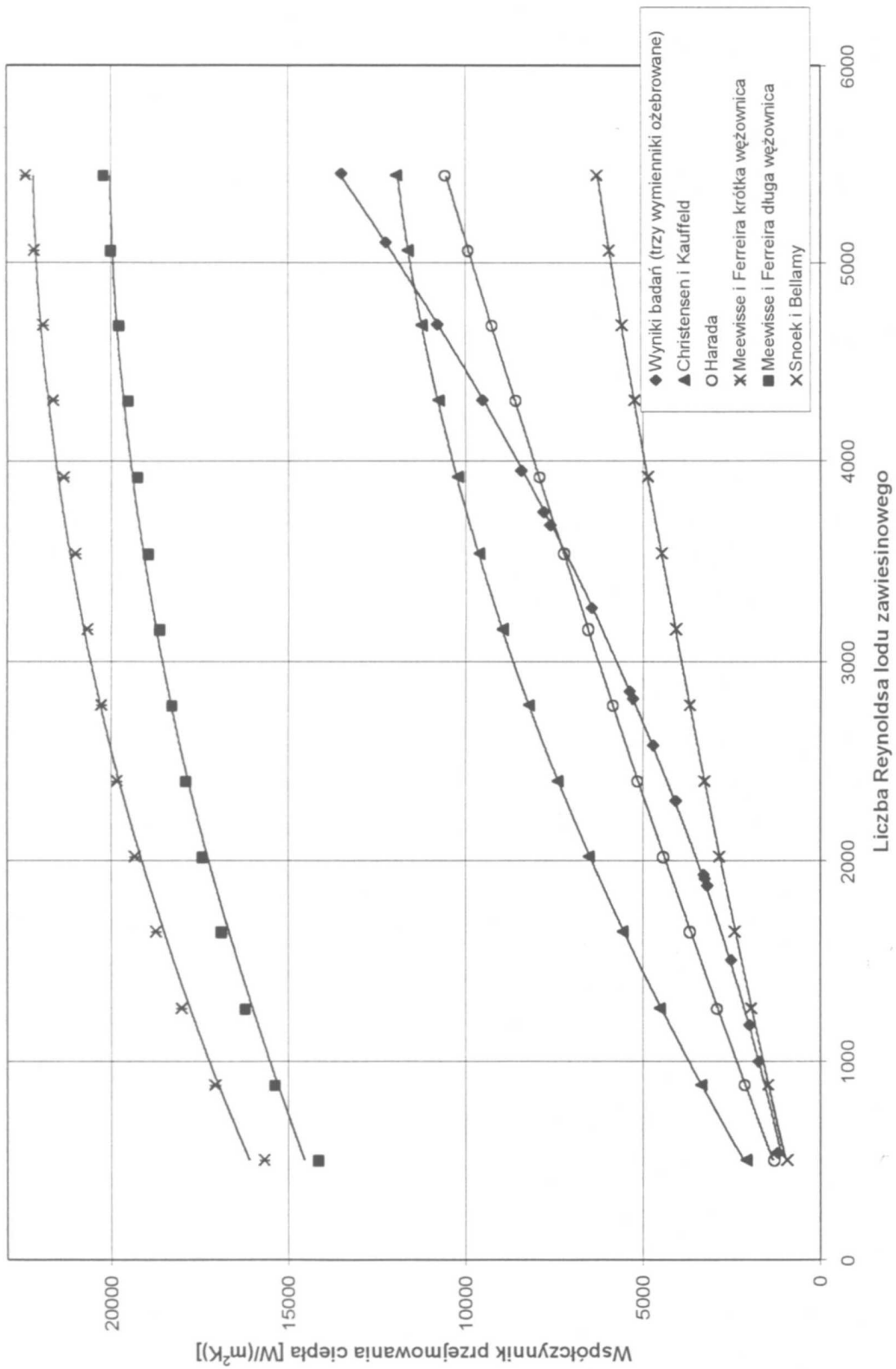
Do wyznaczenia zależności na współczynnik przyjmowania ciepła od strony lodu zawiesinowego przyjęto ostatecznie postać wzoru Christensena i Kauffelda (wzór 7.4.1), którzy badali 10% wodny roztwór alkoholu etylowego (taki sam jak w pracy) [Ayel, i inni 2003]:

$$\frac{Nu_{lb}}{Nu_{lbr}} = A + B \cdot x_l + C \cdot Re_{lb}^D \left(\frac{30-x_l}{30} \right) \cdot x_l^E \frac{Re_{lb}}{10000} \quad (7.4.1)$$

gdzie A, B, C, D, E – stałe,

a Liczba Nusselta dla roztworu alkoholu jest wyrażona wzorem Hoffmana [Ayel, i inni 2003]:

$$Nu_{lbr} = 0.0237 \cdot Re_{lbr}^{0.81} \cdot Pr_{lbr}^{0.39} \quad (7.4.2)$$



Rysunek 7.4.1. Porównanie wyników obliczeń wybranymi wzorami na współczynnik przejmowania ciepła lodu zawieszinowego z wynikami badań trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4)

Wzór Christensena i Kauffelda obowiązuje dla zawartości drobinek lodu poniżej 30% oraz w zakresie prędkości przepływu lodu zawiesinowego 0.7÷2.5m/s ($780 < Re < 2800$ przy temperaturze lodu zawiesinowego -5°C) [Ayel, i inni 2003].

Pomimo tego, że zakres stosowania zależności Christensena i Kauffelda odpowiada zakresowi badań widoczne są różnice w wartościach współczynników przyjmowania ciepła obliczonych tym wzorem i uzyskanych z badań (rys 7.4.1). Różnice te wynikają z tego, że wzór Christensena i Kauffelda dotyczy przepływu przez proste rury poziome, a w badaniach przepływ lodu zawiesinowego realizowany był w węzownicy zawierającej kolana $\phi 180^{\circ}$ usytuowane zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej.

Stałe A, B, C, D, E w opracowanej zależności znaleziono dzięki programowi komputerowemu „TableCurve”. Wzór 7.4.3 przedstawia wyznaczoną zależność dla trzech wymienników ożebrowanych WO2, WO3, WO4:

$$\frac{Nu_{lb}}{Nu_{lbr}} = 0.286 + 0.02189 \cdot x_l + 2.44 \cdot 10^{-4} \cdot Re_{lb}^{1.4576} \left(\frac{30-x_l}{30} \right) \cdot x_l^{0.7895} \cdot \frac{Re_{lb}}{10000} \quad (7.4.3)$$

Na rysunkach 7.4.2÷7.4.6 pokazano porównanie wartości współczynników przyjmowania ciepła dla lodu zawiesinowego, wyznaczonych z badań trzech wymienników ożebrowanych, ze współczynnikami przyjmowania ciepła uzyskanymi z obliczeń, z wykorzystaniem wyznaczonej zależności (wzór 7.4.3) dla różnego obciążenia cieplnego po stronie powietrza (prędkości powietrza od 2.0 m/s do 3.9m/s).

Można zauważyć bardzo dobrą zgodność wartości obliczonych i otrzymanych w wyniku badań doświadczalnych. Wniosek ten potwierdza analiza statystyczna wyników porównania, przeprowadzona na podstawie takich wielkości jak:

- różnica procentowa wartości obliczonych i zmierzonych (błąd względny):

$$\delta\alpha = \frac{\alpha_{obl} - \alpha_{bad}}{\alpha_{bad}} 100\% \quad (7.4.4)$$

- średni błąd względny:

$$\overline{\delta\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta\alpha_i \quad (7.4.5)$$

- średni moduł błędu względnego:

$$\overline{|\delta\alpha|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta\alpha_i| \quad (7.4.6)$$

Uzyskano następującą zgodność wyników badań i obliczeń:

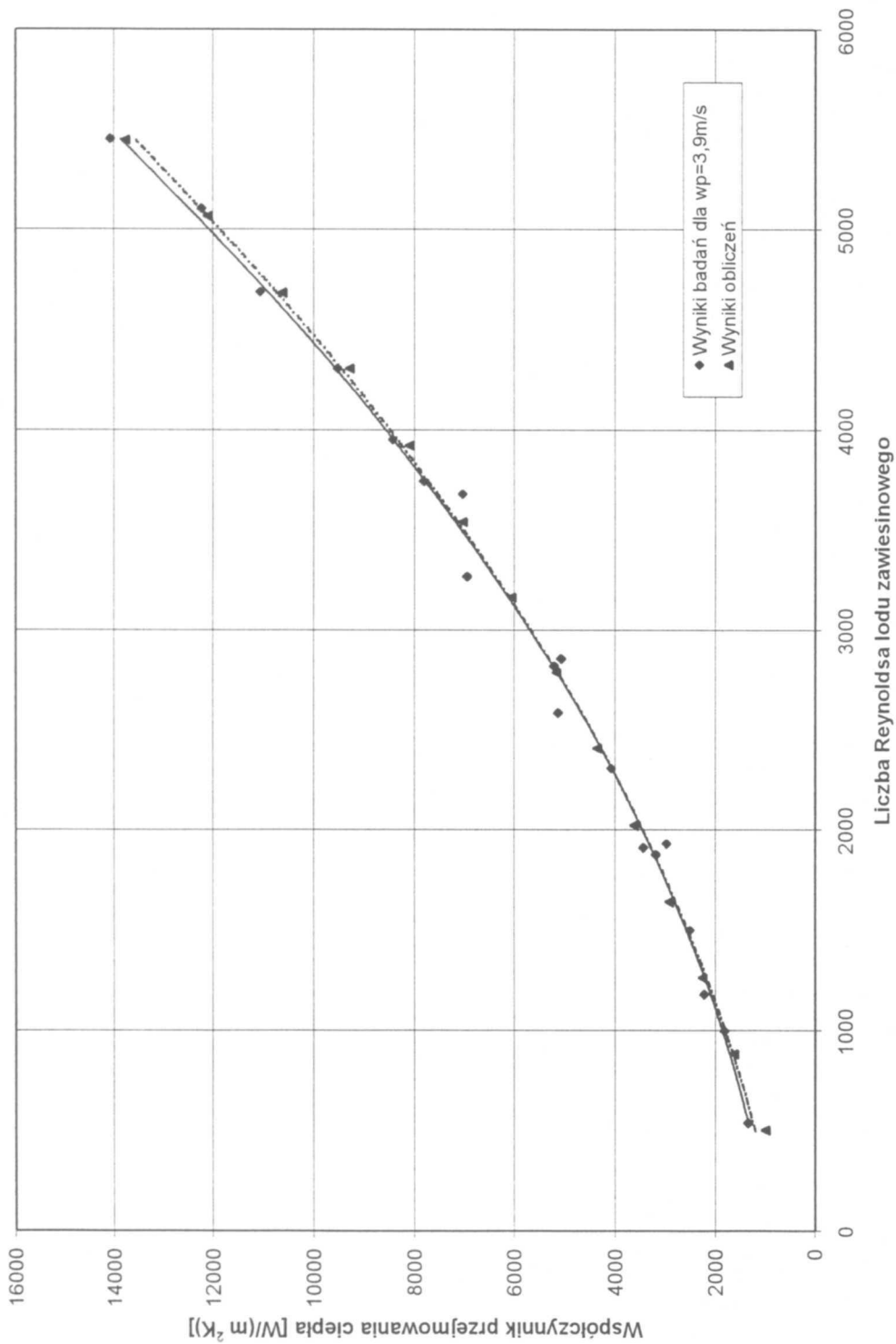
- przy prędkości powietrza 3.9 m/s oraz 3.5 m/s (rys. 7.4.2 i 7.4.3) dla 95% porównywanych wyników błąd względny nie przekracza $\pm 8\%$,
- przy prędkości powietrza 3.0 m/s (rys. 7.4.4) dla 84% porównywanych wyników błąd względny nie przekracza $\pm 8\%$,
- przy prędkości powietrza 2.5 m/s (rys. 7.4.5) dla 78% porównywanych wyników błąd względny nie przekracza $\pm 8\%$,
- przy prędkości powietrza 2.0 m/s (rys. 7.4.6) dla 78% porównywanych wyników błąd względny nie przekracza $\pm 13\%$.

W badanym obszarze ($n = 95$), dla rozważanych wymienników ożebrowanych, średni błąd względny wynosi $\overline{\delta\alpha} = 1.98\%$, a średnia wartość modułu błędu względnego $\overline{|\delta\alpha|} = 6.75\%$.

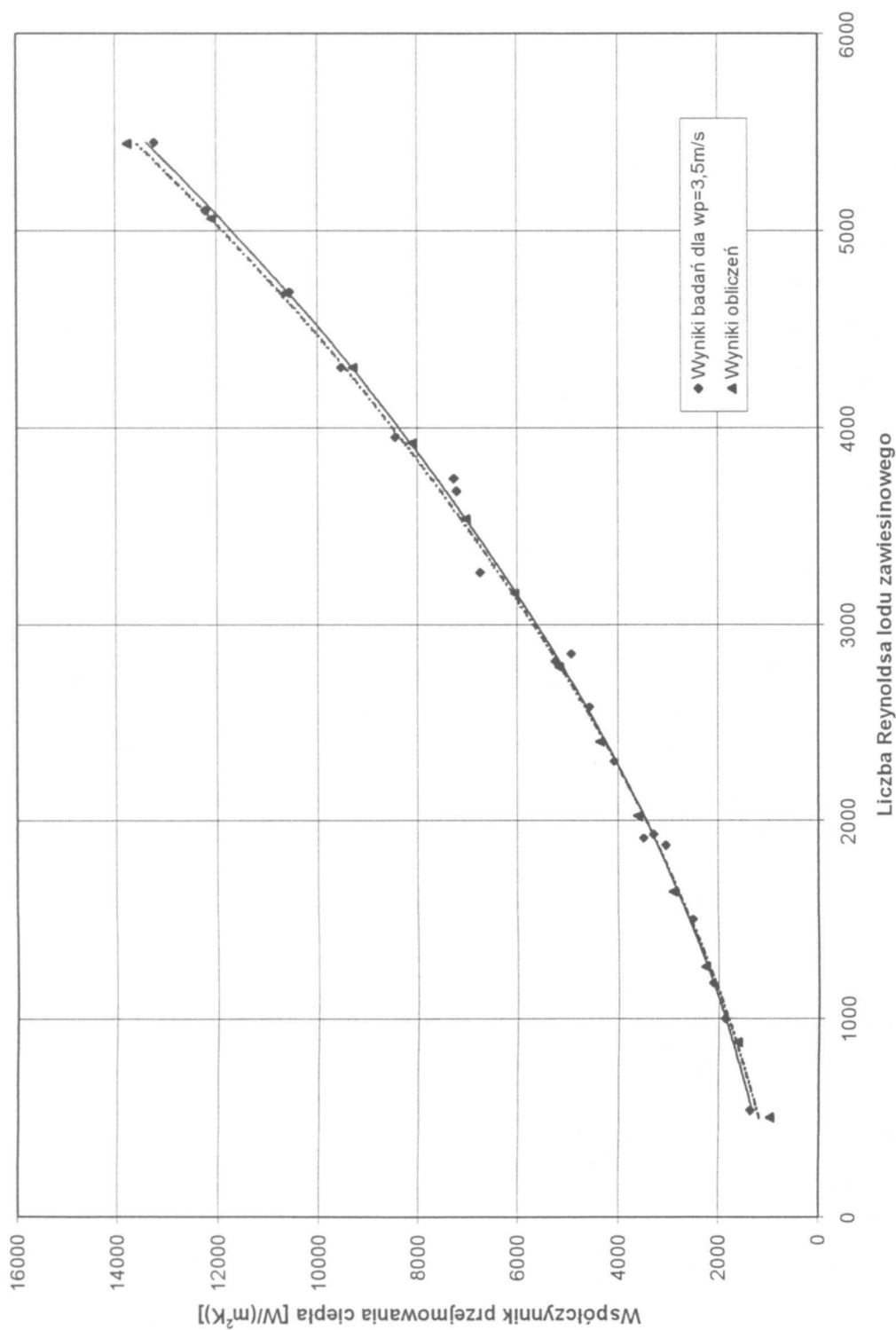
Rysunek 7.4.7 przedstawia porównanie współczynników przejmowania ciepła dla lodu zawieszinowego, wyznaczonych z badań doświadczalnych wymiennika z ośmioma zasilaniami (WO1), ze współczynnikami przejmowania ciepła uzyskanymi z obliczeń z wykorzystaniem wyznaczonej zależności (wzór 7.4.3). Ze względu na niskie prędkości przepływu lodu zawieszinowego wyniki badań tego wymiennika były bardzo zbliżone do siebie dla różnego obciążenia cieplnego po stronie powietrza i dlatego zostały one uśrednione (błąd uśrednienia nie przekracza 6.5% w całym zakresie prędkości przepływu powietrza).

Wymiennik z ośmioma zasilaniami został zbadany dla innego, niższego niż pozostałe wymienniki ożebrowane, udziału masowego drobinek lodu, które wynosiło 9.12%.

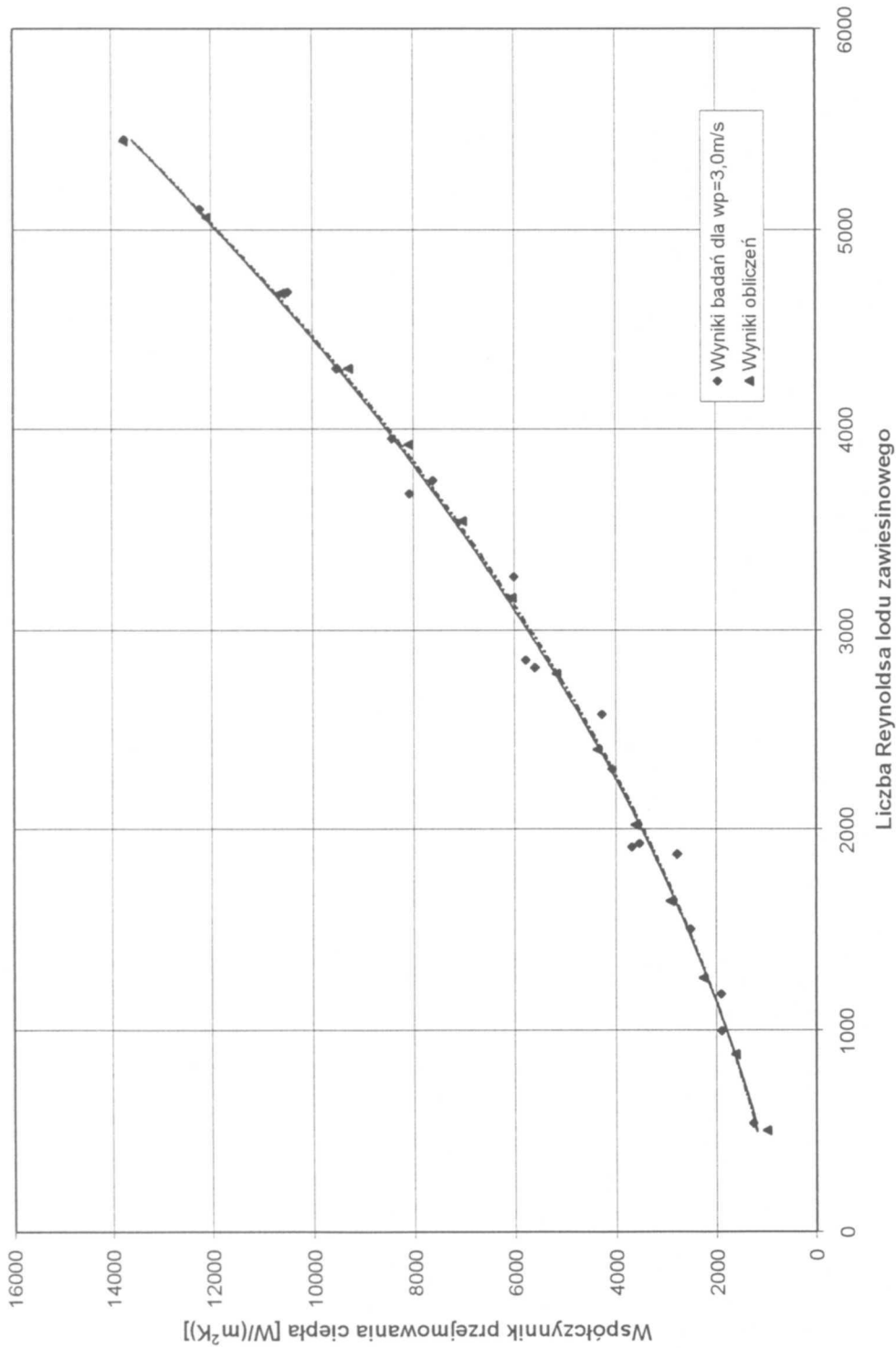
W zakresie niskich wartości liczby Reynoldsa (niskich prędkości przepływu) lodu zawieszinowego uzyskano dobrą zgodność badań z obliczeniami, jednak generalnie wartości współczynników przejmowania ciepła dla lodu zawieszinowego obliczone wyznaczoną zależnością (wzór 7.4.3) są wyższe niż wyniki badań (88% porównywanych wyników nie przekracza 13.5% błędu względnego a 100% porównywanych wyników nie przekracza 15% błędu względnego). Niższe wartości współczynników przejmowania ciepła uzyskane z badań w stosunku do wartości otrzymanych z obliczeń mogą być spowodowane rozwarstwianiem się lodu zawieszinowego na skutek niskich prędkości przepływu chłodziwa w wymienniku WO1.



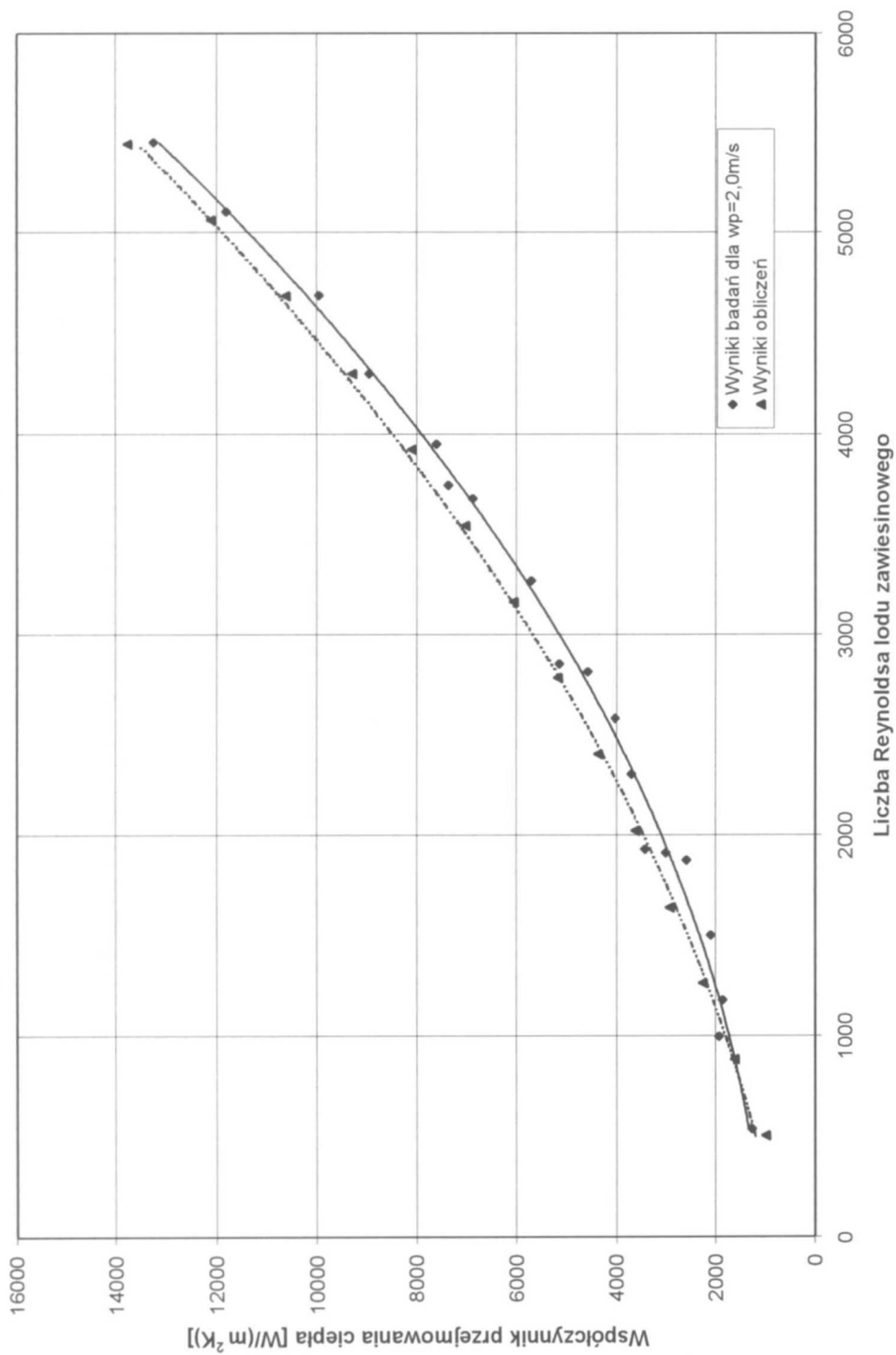
Rysunek 7.4.2. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych ($w_p = 3,9 \text{ m/s}$) trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4)



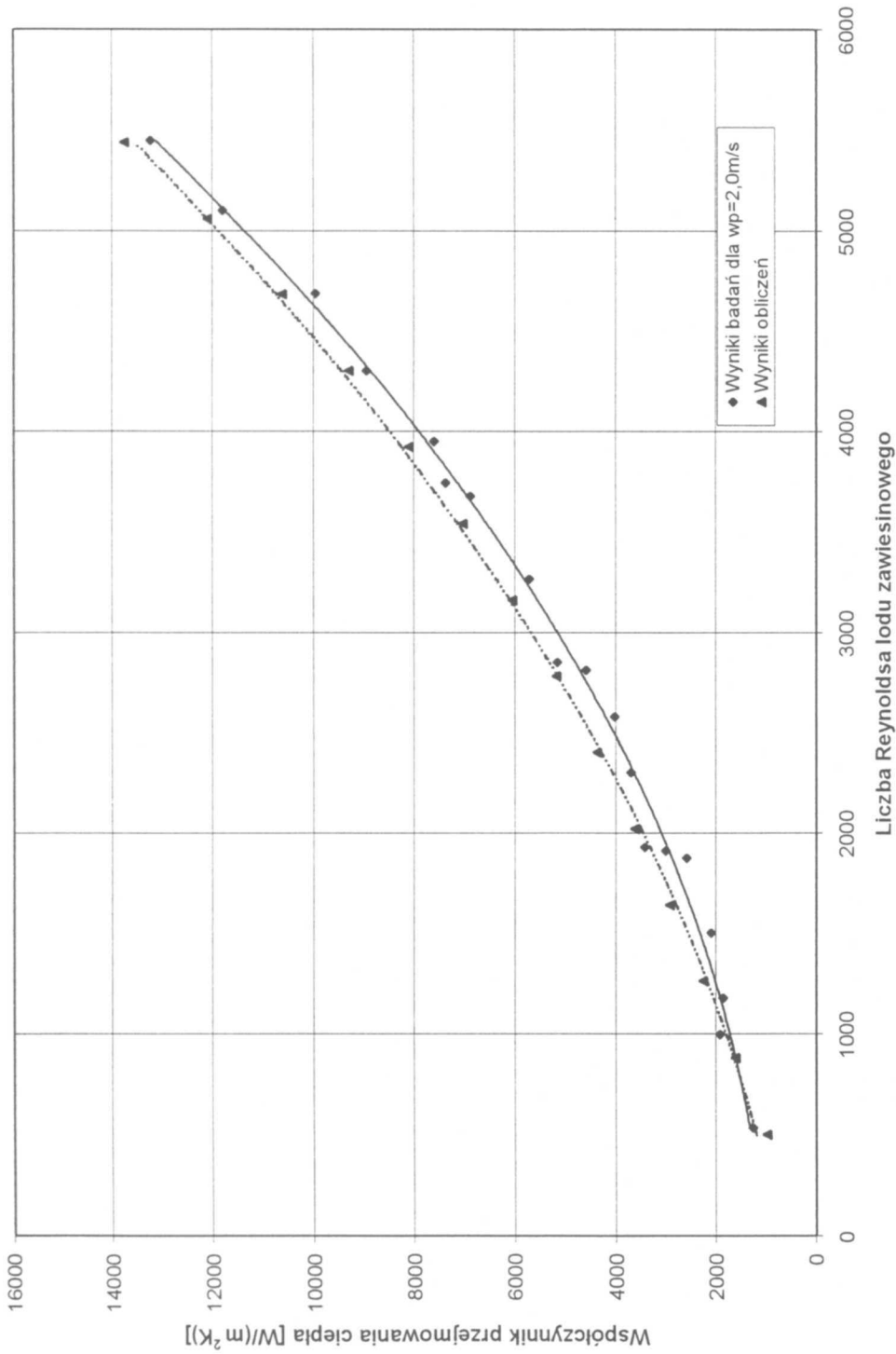
Rysunek 7.4.3. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych ($w_p=3,5m/s$) trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4)



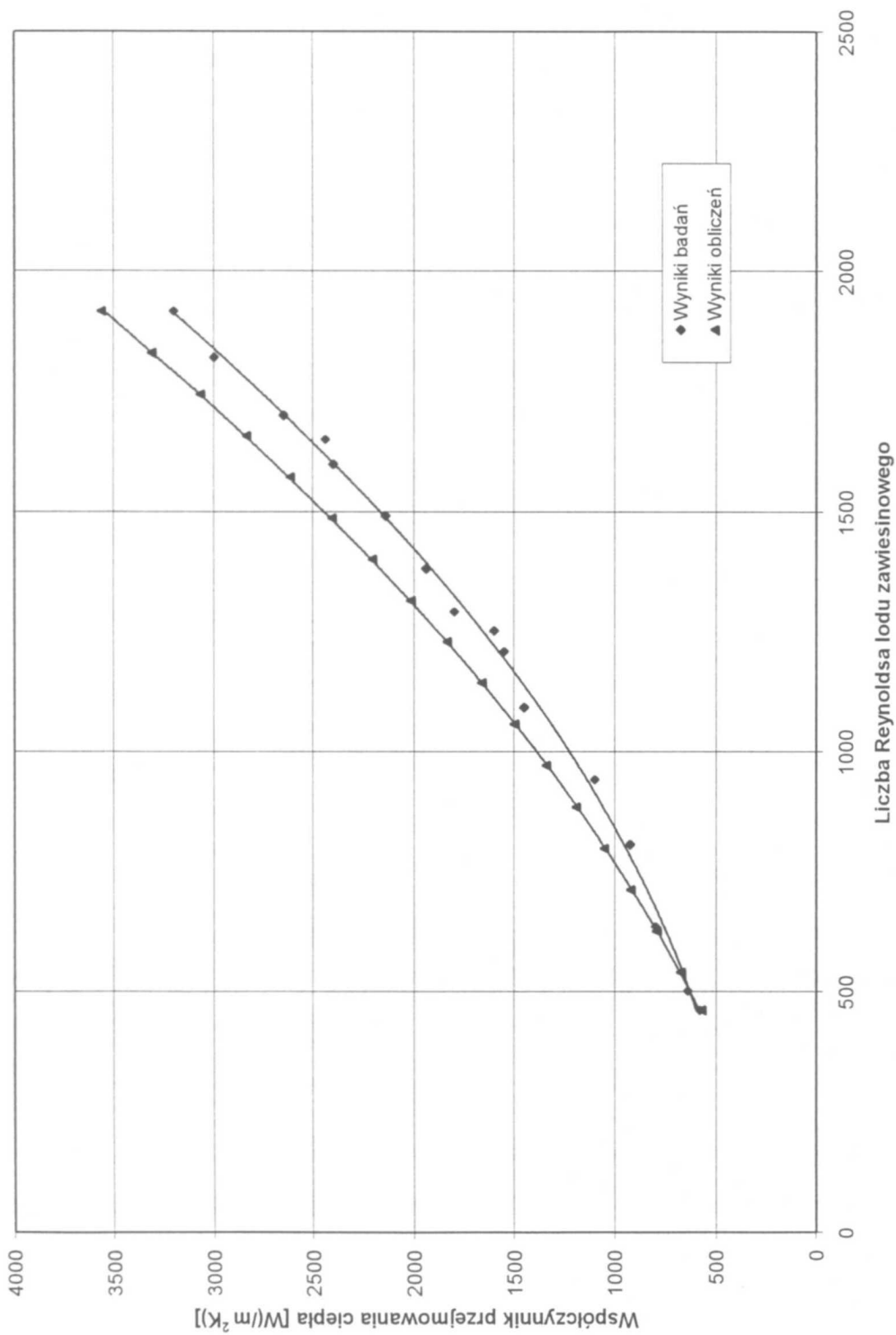
Rysunek 7.4.4. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych ($w_p = 3,0 \text{ m/s}$) trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4)



Rysunek 7.4.6. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych ($w_p=2,0\text{m/s}$) trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4)



Rysunek 7.4.6. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych ($w_p=2,0\text{m/s}$) trzech wymienników ożebrowanych (WO2, WO3, WO4)



Rysunek 7.4.7. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych wymiennika ożebrowanego z osmioma zasilaniami (WO1)

W całym badanym obszarze ($n = 16$), dla wymiennika WO1, średni błąd względny nie przekracza $\overline{\delta\alpha} = 10.25\%$, a średnia wartość modułu błędu względnego $|\overline{\delta\alpha}| = 10.75\%$.

Porównanie współczynników przejmowania ciepła lodu zawieszinowego, wyznaczonych z badań doświadczalnych wymiennika płytowego ze współczynnikami przejmowania ciepła uzyskanymi z obliczeń z wykorzystaniem wyznaczonej zależności (wzór 7.4.3) przedstawiono na rysunku 7.4.8. Wyniki badań tego wymiennika zostały uśrednione dla różnego obciążenia cieplnego po stronie powietrza (różnica procentowa nie przekracza 8% w całym zakresie prędkości przepływu powietrza). Z rysunku 7.4.8 widać, że wartości obliczone wzorem 7.4.3 nie odpowiadają wartościom uzyskanym z badań wymiennika płytowego. Przyczyną złego dopasowania współczynnika przejmowania ciepła uzyskanego z obliczeń i badań może być niska prędkość przepływu lodu zawieszinowego ($0.02 \div 0.06$ m/s), która może powodować rozwarstwianie chłodziwa i utratę jednorodności jego składu. Innymi przyczynami powyższych rozbieżności mogą być takie cechy wymiennika jak:

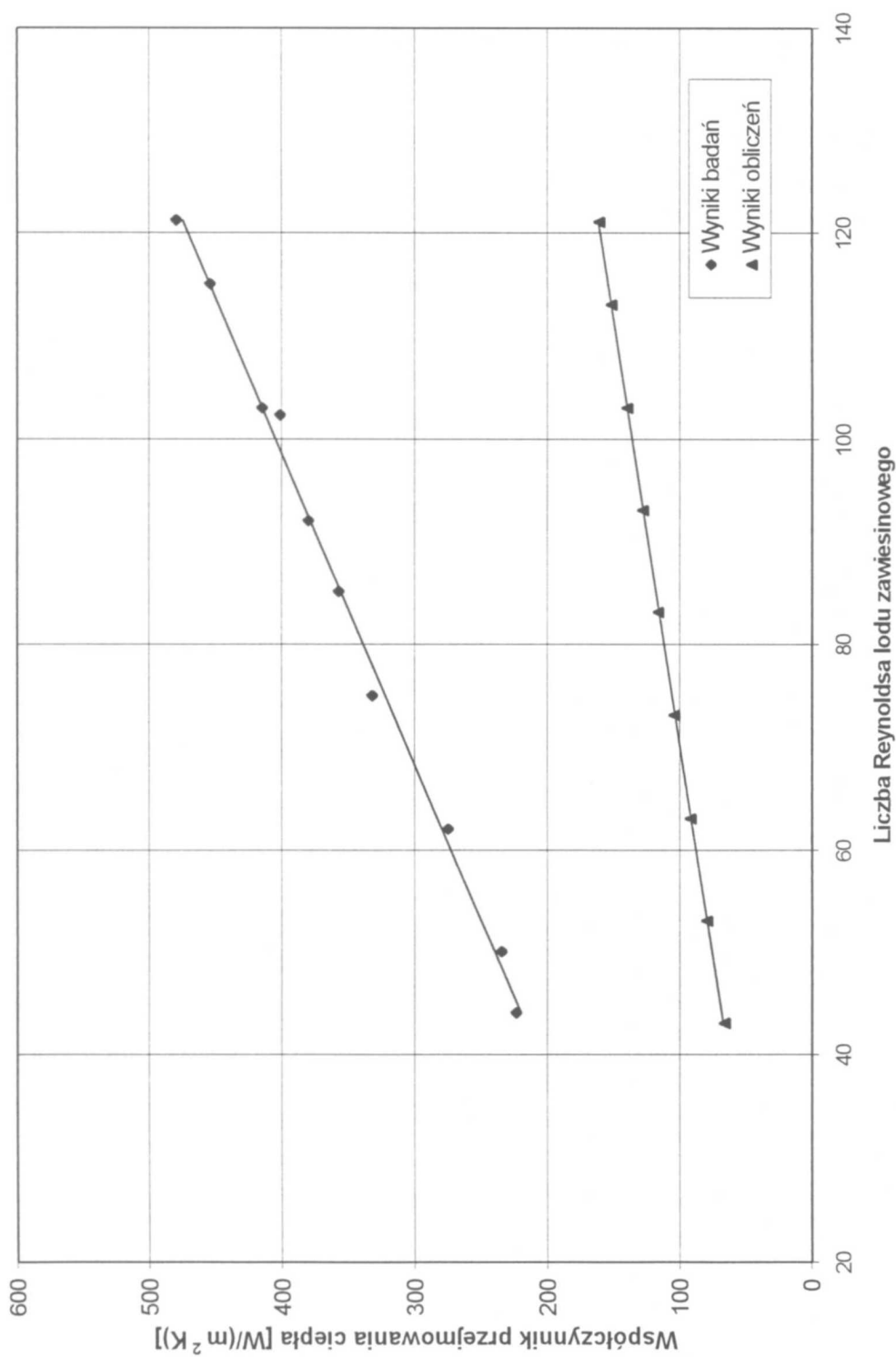
- inna konstrukcja wymiennika płytowego niż węzownicowych wymienników ożebrowanych, dla których zależność 7.4.3 została wyznaczona,
- inny kształt przekroju poprzecznego przepływu chłodziwa w wymienniku (wymiennik płytowy – przekrój sześciokątny, wymienniki ożebrowane – przekrój kołowy).

Zmieniając jedną stałą (stała A wzór 7.4.1) w równaniu 7.3.3 z $A = 0.286$ na $A = 1.286$ otrzymuje się zależność dla wymiennika płytowego:

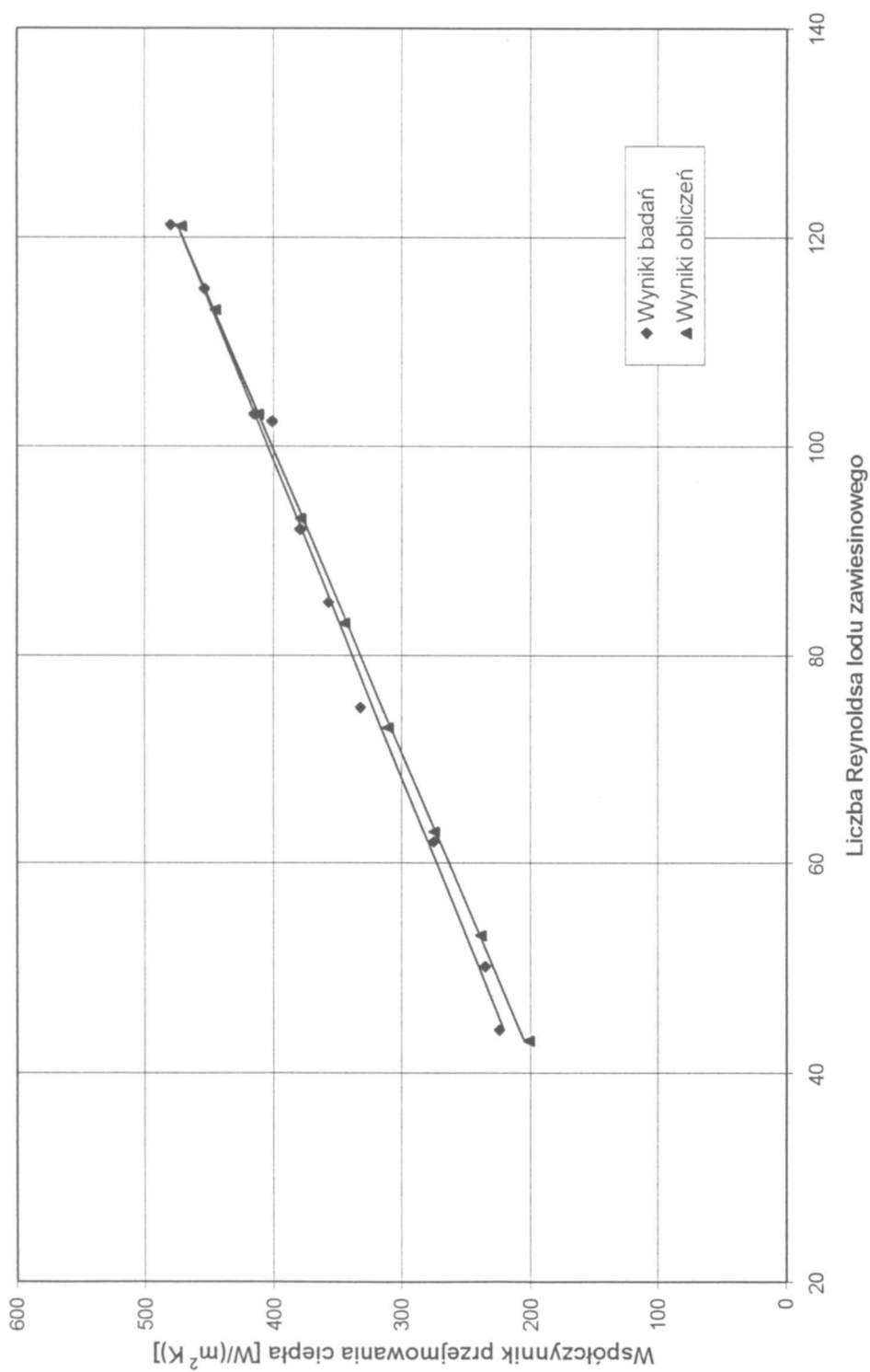
$$\frac{Nu_{lb}}{Nu_{lbr}} = 1.286 + 0.02189 \cdot x_l + 2.44 \cdot 10^{-4} \cdot Re_{lb}^{1.4576} \cdot \left(\frac{30-x_l}{30}\right) \cdot x_l^{0.7895} \cdot \frac{Re_{lb}}{10000} \quad (7.4.7)$$

Wartości współczynników przejmowania ciepła obliczone zależnością 7.4.7 są bardzo zbliżone do współczynników przejmowania ciepła uzyskanych z badań dla wymiennika płytowego (90% porównywanych wyników nie przekracza 5% błędu względnego). W całym badanym obszarze ($n = 10$), dla wymiennika płytowego, średni błąd względny wynosi $\overline{\delta\alpha} = -2.07\%$, a średnia wartość modułu błędu względnego $|\overline{\delta\alpha}| = 2.46\%$.

Rysunek 7.4.9 przedstawia porównanie współczynników przejmowania ciepła lodu zawieszinowego, wyznaczonych z badań doświadczalnych dla wymiennika płytowego ze współczynnikami przejmowania ciepła uzyskanymi z obliczeń z wykorzystaniem wyznaczonej zależności dla wymiennika płytowego (wzór 7.4.7).



Rysunek 7.4.8. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.3) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych wymiennika płytowego



Rysunek 7.4.9. Porównanie wyników obliczeń (wzór 7.4.7) współczynnika przejmowania ciepła z wynikami badań doświadczalnych wymiennika pływowego

8. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Wyniki przeprowadzonych badań chłodnic powietrza zasilanych lodem binarnym (zawiesinowym) wskazują jednoznacznie, że celowe i uzasadnione jest, w pewnych warunkach, zastosowanie lodu zawiesinowego jako chłodziwa.

Warunkami uzasadniającymi zastosowanie systemów z lodem zawiesinowym mogą być:

- umiejscowienie systemu chłodniczego w obrębie dużych aglomeracji, gdzie występują duże skupiska ludzkie (brak narażenia na utratę życia ludzi i zagrożenia skażeniem środowiska),
- zastosowanie w miejscach o ograniczonej przestrzeni, na przykład w systemach klimatyzacyjnych kopalń (ze względu na duże wartości współczynników przejmowania ciepła można zmniejszyć powierzchnię wymiany ciepła a tym samym wymiary gabarytowe wymiennika),
- stosowanie w układach chłodniczych, w których możliwa jest praca nocna i nagromadzenie zapasu „zimna”,
- wymagana temperatura czynnika roboczego w układach chłodniczych na poziomie -5°C .

Pośrednie układy chłodzenia stosuje się w uzasadnionych przypadkach, na przykład jeśli jest wymagany wysoki stopień bezpieczeństwa związany z wyeliminowaniem trujących lub wybuchowych czynników z otoczenia ludzi lub chłodzonych produktów, transport „zimna” odbywa się na większe odległości oraz jeżeli wymagają tego względy ekologiczne. W układach z czynnikiem pośredniczącym stosuje się ograniczoną ilość czynnika ziębniczego, który w tym rozwiązaniu używany jest jedynie do produkcji „zimna”. Czynnikiem ziębniczym jest w większości przypadków szkodliwy dla atmosfery związek z grupy freonów. Przy wycieku takiego czynnika z instalacji występuje mniejsza lub większa, w zależności od stosowanego czynnika oraz jego ilości w instalacji, degradacja atmosfery (efekt cieplarniany oraz powiększanie się dziury ozonowej). Stosując powyższe kryterium można też zauważyć, że badany w pracy lód zawiesinowy zawiera 10% alkoholu, czyli mniej niż wodny roztwór glikolu etylenowego (który zawiera 47% alkoholu), nie stanowi więc przy awarii i wycieku czynnika zagrożenia dla otoczenia.

Główny cel pracy, którym była ocena przydatności lodu zawiesinowego jako chłodziwa do stosowania w pośrednich układach chłodzenia, został osiągnięty. Na podstawie wyników badań doświadczalnych przeprowadzona została analiza porównawcza tej cieczy z

innymi, tradycyjnymi chłodziwami. Badaniom poddane zostało pięć wymienników ciepła (oziębiaczy powietrza) o różnej konstrukcji: cztery wymienniki ożebrowane i wymiennik płytowy. W badaniach jako płyny chłodzące użyte zostały: lód binarny i wodny roztwór glikolu etylenowego.

W pracy wykazano (na podstawie wyników badań doświadczalnych, a także wykonanych obliczeń cieplno-przepływowych), że lód binarny (zawiesinowy) może z powodzeniem zastępować wodny roztwór glikolu etylenowego w pośrednich systemach chłodzenia.

Lód zawiesinowy w porównaniu z wodnym roztworem glikolu etylenowego, w warunkach, w których wykonane zostały badania, charakteryzuje się:

- lepszą zdolnością magazynowania „zimna” (prawie 12 razy wyższa),
- niższymi (przy temperaturze chłodziw -5°C) do 42% oporami przepływu w zakresie prędkości przepływu $2.0\div 2.8$ m/s, niższymi o 5% oporami przepływu w zakresie prędkości chłodziw $2.7\div 5.0$ m/s (istnieje również możliwość wykorzystania, potwierzonego badaniami w pracy, zjawiska zmniejszania się oporów przepływu lodu binarnego w zakresie zawartości drobinek lodu $25\div 35\%$, przy której różnice w oporach przepływu są jeszcze większe na korzyść lodu),
- większymi wartościami współczynników przyjmowania ciepła (dla wymienników ożebrowanych 1.8 \div 5.2 razy większe, dla wymiennika panelowego 1.3 \div 2.9 razy większe) z czego wynikają wyższe osiągnięte wydajności cieplne wymiennika – dla wymienników ożebrowanych 1.11 \div 1.64 razy większa, dla wymiennika panelowego 1.17 \div 1.36 razy większa,
- niższymi kosztami eksploatacyjnymi.

Ponieważ próby zastosowania publikowanych w literaturze zależności na współczynnik przyjmowania ciepła po stronie lodu zawiesinowego nie dały zadowalających rezultatów, opracowano dwie własne zależności służące do obliczania współczynnika przyjmowania ciepła:

- dla wężownicowych wymienników ożebrowanych,
- dla wymiennika płytowego.

Porównując wartości współczynników przyjmowania ciepła, otrzymane z badań ze współczynnikami przyjmowania ciepła wyznaczonymi z wykorzystaniem opracowanego wzoru, uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń i badań. Dla trzech wymienników ożebrowanych (wymienniki: z dwoma zasilaniami, z jednym zasilaniem i krótką wężownicą

oraz z jednym zasilaniem i długą węzownicą) średni błąd względny wynosi 6.15%, a różnica procentowa dla 81% wyników badań i obliczeń nie przekracza wartości $\pm 8\%$. Dla wymiennika ozebrowanego z ośmioma zasilaniami średni błąd względny jest mniejszy niż 9%, a różnica procentowa dla 70% wyników obliczeń osiąga mniejsze wartości niż $\pm 9.9\%$.

Dla wymiennika płytowego średni błąd względny nie jest większy niż 2.42%, a różnica procentowa dla 90% wyników obliczeń nie przekracza wartości $\pm 5\%$.

Podsumowując rezultaty pracy trzeba zaznaczyć, że weryfikacja zaproponowanego równania kryterialnego została przeprowadzona w ograniczonym zakresie zmienności udziału masowego drobinek lodu i wskazane jest prowadzenie dalszych badań w celu potwierdzenia jego słuszności dla szerszego zakresu zmienności warunków pracy i innych konstrukcji oziębiaczy. Ograniczenie zakresu badań doświadczalnych spowodowane było możliwościami stanowiska badawczego jak również dużą czasochłonnością i wysokimi kosztami badań. Wskazane jest także doświadczalne potwierdzenie czy, i jeśli tak, to w jakich warunkach (prędkość przepływu, udział masowy drobinek lodu) zjawisko zmniejszania oporów przepływu osiąga ekstremum.

W odróżnieniu od spotykanych w literaturze zależności na współczynniki przejmowania ciepła, przedstawione w pracy wzory pozwalają na wyznaczenie średnich wartości współczynników z uwzględnieniem wpływu kolan węzownic i kolektorów zasilających (w wymiennikach płytowych) na intensywność wymiany ciepła po stronie lodu zawiesinowego. Mogą być one wykorzystane w obliczeniach cieplnych wymienników o podobnej konstrukcji: węzownicowych i płytowych oziębiaczy powietrza oraz oziębiaczy cieczy, stosowanych w chłodnictwie i klimatyzacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Akyurt M., Zaki G., Habbeebullah B., „Freezing phenomena in ice-water systems”, *Energy Conversion and Management* 43/2002.
2. Aoyama S., Inaba H., „Melting characteristics of ice water slurry by warm air bubbling”, *International Journal Thermal Science* 40/2001.
3. Apsimon R., „Presentation of the SCT Module Cooling System to the Atlas Cooling Review Committee 18/19 Sept. 1997”, sprawozdanie z projektu badawczego, praca niepublikowana.
4. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., „HVAC Applications 1999”, „HVAC Systems and equipment 2000”, „Fundamentals 2001”, „Refrigeration 2002”.
5. Ayel V., Lottin O., Peerhossaini H., „Rheology, flow behavior and heat transfers of ice slurries: a review of the state of the art”, *International Journal of Refrigeration* 2003/26.
6. Basu S., „Wall effect in laminar flow on non-Newtonian fluid through a packed bed”, *Chemical Engineering Journal* 81/2001.
7. Becker M., „Heat Transfer-A Modern Approach”, Plenum Press, New York-London 1986.
8. Beegs C., „Developments in Ice Thermal Storage”, *RAC Journal, Partners in Europe Issue*, 1993.
9. Beitz W., Küttner K.-H., „Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau”, Auflage, Springer – Verlag, Heidelberg 1983.
10. Bel O., Beron R., Lallemand A., „Détermination des propriétés thermophysique d'un mélange frigoporteur solide-liquide utilisé dans une boucle de refroidissement”, 19 ième congrès international du froid, La Haye, Pas-Bas, August 1995.
11. Bel O., Lallemand A., „Etude d'un fluide frigoporteur diphasique, caracteristiques thermophysiques intrinseques d'un coulis de glace”, *International Journal of Refrigeration* 22/1999.
12. Bellas J., Chaer I., Tassou S. A., „Heat transfer and pressure drop of ice slurry in plate heat exchangers”, *Applied Thermal Engineering* 22/2002.
13. Bitterlich B., Lutz Ch., Roosen A., „Rheological characterization of water-based slurries for the tape casting process”, *Ceramics International* 28/2002.
14. Bonca Z., Butrymowicz D., Dambek D., Depta A., Targański W., „Czynniki człodnicze i nośniki ciepła - poradnik”, IPPU MASTA 1998.
15. Böhme G., „Strömungsmechanik nicht-newtonscher Fluide”, B. G. Teubner, Stuttgart 1981.
16. Braun J., Beer H., „Ice formation for turbulent flow curved rectangular channels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 38/1995.
17. Brühlmeier J., „Binäreis – Wie ist der Stand der Entwicklung?”, *Schriftenreihe des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik*, Zürich 17/1995.
18. Caso C., Gastaldo F., „Measurements of Thermal Properties of Hybrid Stave Prototypes”, *ATLAS Pixel Mechanics CERN* 07.11.1997.
19. Chen P., Dong Chen X., Free K.W., „An experimental study on the spatial uniformity of solute inclusion in ice formed from falling film flows on a sub-cooled surface”, *Journal of Food Engineering* 39/1999.
20. Chen P., Dong Chen X., Free W. K., „Solute inclusion in ice formed from sucrose solutions on a sub-cooled surface an experimental study”, *Journal of Food Engineering* 38/1998.

21. Clodic D., Sauer F., „Vademecum odzysku czynników chłodniczych”, IPPU MASTA, Gdańsk, 1999.
22. Denis P., „Analiza teoretyczno-doświadczalna chłodzenia powietrza wilgotnego w wymienniku płytowym”, rozprawa doktorska, Kraków 2002.
23. Denis P., Zalewski W., Mika Ł., „Badanie współczynnika przenikania ciepła w płytowym oziębiaczu powietrza”, *Chłodnictwo* 7/2003.
24. Dworzak Z., „Binarny led”, *Chłodilnyj Biznes*, 3/2000.
25. Dworzak Z., „Binarni led”, *Chladici Technika* 4/2000.
26. Egolf P. W., „Kältenspeicherungseigenschaften und Strömungsverhalten von Binärem Eis”, a report from Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, praca niepublikowana, 1994.
27. Egolf P. W., Brühlmeier J., Özvegyi F., Abächerli F., Renold P., „Kältespeicherungseigenschaften und Strömungsverhalten von binärem Eis”, 1996, sprawozdanie z projektu badawczego, praca niepublikowana.
28. Egolf P. W., Brühlmeier J., Özvegyi F., Abächerli F., Renold P., „Stoffwerte von Flo-Ice”, *Ki Luft- und Kältetechnik* 7/1996.
29. Egolf P. W., Brühlmeier J., Özvegyi F., Abächerli F., Renold P., „Stromungs dynamik von Flo-Ice”, *Ki Luft- und Kältetechnik* 9/1996.
30. Egolf P. W., Özvegyi F., „Flüssigeis – ein neuer Kälteträger”, Tagung Energie – und Umwelt, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1995.
31. Egolf P., Sari O., Meili F., Vuarnoz D., „Pressure drop and heat transfer in a cylindrical heat exchanger with ice slurry flow”, 3rd workshop on ice slurries of the IIR, Lucerne, Switzerland 2001.
32. Erell E., Schirmer W., Vieweg R., „Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten”, VEB Leipzig 1967.
33. Fisher T., „Kohlendioxid als Tieftemperatur-Kälteträger”, *Die Kälte und Klimatechnik* 11/1997.
34. Fukusako S., Yamada M., „Melting heat transfer inside ducts and over external bodies”, *Experimental Thermal and Fluid Science* 19/1999.
35. Gladis P.S., „EPRI International Conference on Sustainable Thermal Energy Storage” proceedings, Mineapolis, Minnesota 1997.
36. Graham T., Tokunaga T., Goldstein V., „Application of crystal ice generation in district heating and cooling”, Proceedings of the 80th Annual Conference of the IDHCA, Virginia Beach, VA 1989.
37. Grigull U., Sander H., „Wärmeleitung”, Serie Wärme – und stoffübertragung, Zweite Auflage, Springer – Verlag, Heidelberg 1990.
38. Guilpart J., Fournaison L., Ben Lakhdar M. A., „Calculation method of ice slurries thermophysical properties – application to water/ethanol mixture”, Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, Australia 1999.
39. Hegglin A., „Supermarkt – Kühlung – in welche Technologie investieren”, *Ki-Luft – und Kältetechnik* 5/1997.
40. Hillerns F., „Thermophysical Properties and Corrosion Behavior of Secondary Coolants”, proceedings based on a presentation given at 2001 Ashrae Winter Meeting, Atlanta, GA, January 28-31.
41. Hirata T., Nagasaka K., Ishikawa M., „Crystal ice formation of solution and its removal phenomena at cooled horizontal solid surface”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43/2000.
42. Hobler T. „Ruch ciepła i wymienniki”, WNT Warszawa 1986.
43. Idelchik I. E., „Handbook of hydraulic resistance – 3rd edition”, CRC Press 1994.

44. Incropera F. P., DeWitt D. P., „Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, 1990.
45. E. Jahn, D. Lausen and J. Paul, “Cooling of Mines with Vacuum Ice”, Proceedings of the FRIGAIR'96 Conference, Johannesburg, South Africa 1996.
46. Kalinowski K., Paliwoda A., Bonca Z., Butrymowicz D., Targański W., „Amoniakalne urządzenia chłodnicze, podstawy teoretyczne, budowa, działanie”, IPPU MASTA, Gdańsk, 2000.
47. Kang Ch., Yano S., Okada M., „Non-uniform melting in packed beds of fine ice slurry”, International Journal of Refrigeration 24/2001.
48. Kauffeld M., „Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser – die gewerblichen Kältemittel der Zukunft?”, Die Kälte und Klimatechnik 5/1995.
49. Kauffeld M., „Instalacje chłodzenia pośredniego”, Chłodnictwo & Klimatyzacja 5/1999.
50. Kauffeld M., „Neue NH₃ – Technologie - NH₃ mit CO₂ als Kälteträger”, Die Kälte und Klimatechnik 11/1995.
51. Kawanami T., Fukusako S., Yamada M., Itoh K., „Experiments on melting of slush ice in a horizontal cylindrical capsule”, International Journal of Heat and Mass Transfer 42/1999.
52. Kawanami T., Yamada M., Fukusako S., „Melting characteristics of fine particle ice slurry at the return bend of flow path”, 3rd workshop on ice slurries of the IIR, Lucerne, Switzerland 2001.
53. Kawashima T., Sasaki M., Takahaschi H., „Experimental Study of Snow-water Mixture Flows in Horizontal Pipes”, Hydrotransport 12/1993.
54. Kim B. S., Shin H. T., Lee Y. P., Jurng J., „Study on ice slurry production by water spray”, International Journal of Refrigeration 24/2001.
55. Kirby P., Nelson P. E., „Optimizing district cooling performance utilizing ice slurry”, Proceedings from Idea Conference in Williamsburg, Virginia, October 1998.
56. Knodel B. D., France D. M., „Ice-water slurry flow in a circular pipe”, Communications in Heat and Mass Transfer 15/1988.
57. Knodel B. D., France D. M., „Pressure drop in ice-water slurries for thermal storage applications”, Experimental Heat Transfer 1/1987.
58. Knodel B. D., France D. M., Choi U. S., Wambsganss M. W., „Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries”, Applied Thermal Engineering 20/2000.
59. Koboyashi A., Yoshihito S., „A method for making large agglomerated ice crystals for a freeze concentration”, Journal of Food Engineering 27/1996.
60. Kristiansen H., Apsimon R., „Binary Ice, a Novel Technique for Performance Phase Change Cooling”, sprawozdanie z projektu badawczego, praca niepublikowana 1996.
61. Kühnl-Kinel J., „Study on the possibility of using the Binary Ice system for CMS and ATLAS experiments at CERN”, Geneva, June 1996.
62. Landolt-Börnstein, „Tabellenwerke”, Fünfte, Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 1923-1943.
63. Lax E., d'Ans J., „Taschenbuch für Chemiker und Physiker”, Springer – Verlag, Heidelberg 1943.
64. Logos C., Nguyen Q. D., „Effect of particle size on the flow properties of a South Australian coal-water slurry”, Powder Technology 88/1996.
65. Lottin O., Epiard C., „Dependence of the thermodynamic properties of ice slurries on the characteristics marketed antifreezes”, International Journal of Refrigeration 24/2001.
66. Liu K. V., Choi U. S., Kasza K. E., „Measurements of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flows of particulate slurries”, Argonne National Laboratory Report, ANL-88-15, Argonne, IL 1988.

67. Lu S. S., Inada T., Yabe A., Zhang X., Grandum S., „Microscale study of poly(vinyl alcohol) as an effective additive for inhibiting recrystallization in ice slurries”, *International Journal of Refrigeration* 25/2002.
68. Lugo R., Fournasion L., Chourot J. M., Guilpart J., „An excess function method to model the thermophysical properties of one-phase secondary refrigerants”, *International Journal of Refrigeration* 25/2002.
69. Malter L., „Binary Ice-Generation and Applications of Pumpable Ice Slurries for Indirect Cooling”, *Applications for Natural Refrigerants Proceedings, Denmark Aarhus* 1996.
70. Matras Z., „Transport hydrauliczny reologicznie złożonych cieczy nienewtonowskich w przewodach”, Kraków PANDI 2001.
71. Matsumoto K., Shiokawa Y., Okada M., Kawagoe T., Kang Ch., „Ice storage system using water-oil mixture, discussion about influence of additive on ice formation process”, *International Journal of Refrigeration* 25/2002.
72. Matthys E. F., „An experimental study of convective heat transfer, friction and rheology for non-Newtonian fluids: polymer solutions, suspensions of fibers and suspension of particulates”, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology 1985.
73. Melinder A., „Thermophysical Properties of Liquid Secondary Refrigerants”, IIR, Paryż 1997.
74. Michiejew M. A., „Osnowy ciepłopieredaczy”, II izd., Moskwa – Leningrad 1956.
75. Mika Ł., Zalewski W., „Lód binarny - alternatywny czynnik chłodzący”, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 4/2001.
76. Mika Ł., Zalewski W., „Ocena możliwości zastosowania lodu binarnego (zawiesinowego) w pośrednich układach chłodzenia”, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna Energetyków „Chłodnictwo przemysłowe ‘2001’”, Wisła 28-30 listopada 2001.
77. Mika Ł., Zalewski W., „Właściwości fizyczne i termodynamiczne lodu binarnego (zawiesinowego)”, artykuł przesłany do redakcji *Techniki Chłodniczej i Klimatyzacyjnej* 2002.
78. Mikielawicz J., „Wyznaczanie współczynników przejmowania ciepła metodą Wilsona”, *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna*, 10/2001.
79. Niezgoda B., „Minimalizacja kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wymienników ciepła o rozwiniętych powierzchniach wymiany ciepła”, rozprawa doktorska, Kraków 1992.
80. Niezgoda-Żelasko B., „Modelowanie procesów wymiany ciepła w chłodnicach powietrza zasilanych lodem binarnym”, *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna* 05/2003.
81. Orzechowski Z., „Przepływy dwufazowe jednowymiarowe, ustalone, adiabatyczne”, PWN, Warszawa 1990.
82. Oschner E., „Erste Flo-Ice Anlage bei Migros bewährt sich”, *HeizungKlima* 10/1995.
83. Oschner E., „News und Trends in der Lebensmittelkühlung”, *Schriftenreihe des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik*, Zürich 16/1994.
84. Özvegyi F., „Vergleich von Kälteübertragungsmitteln”, *Die Kälte*, Juni 1970.
85. Paliwoda A., „Naturalne czynniki chłodnicze, własności termodynamiczne i użytkowe, zastosowania, część - 4 woda (R718)”, *Technika chłodnicza i klimatyzacyjna* 7 i 8/1997.
86. Partskhaladze E., Filin S., „Analiza warunków wymiany ciepła w skrobakowych wytwornicach lodu i krystalizatorach”, *Chłodnictwo* 12/2002.
87. Paul J., „Wasser als Kältemittel”, *Luft-und Kältetechnik* 5/1994.
88. Paul J., „Binary Ice - Technologies for the Production of Pumpable Ice-Slurries”, *proceedings of the Institute of Refrigeration, Sesion: 1992-1993*.

89. Paul J., „Wasser als Kälte – und Kühlmittel”, Proceedings of the International Conference on CFC's and Halonnes, Berlin 1992.
90. Paul J., „Water as Alternative Refrigerant”, proceedings of the International Conference New Applications of Natural Working Fluids in Refrigeration and Air-Conditioning, Hannover, Germany, May 1994.
91. Paul J., Schmidt H. G., „Kälteerzeugung mit NH₃ – Kälteverteilung mit FLO-ICE”, DIE KÄLTE und Klimatechnik 9/1994.
92. Peng X. F., Peterson G. P., Wang B. X., „Flow boiling of binary mixtures in microchanneled plates”, International Journal of Heat and Mass Transfer 39/1996.
93. Perry H., „Chemical Engineer's Handbook”, Third edition, Mc Graw – Hill, New York 1950.
94. Petrescu S., Ciubotaru C., Fehete I., „Heat transfer at solid melting in solutions”, Chemical Engineering Journal 83/2001.
95. Petukhov B. S., „Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties”, Advances in Heat Transfer, Academic Press New York 1970.
96. Podberezskij A., Żurawskij G., „Tieploobmien pri teczenii ldowodjannoju smiesi”, Chłodilnaja Technika 3/1989.
97. Pohorecki R., Wroński S., „Kinetyka i termodynamika procesów inżynierii chemicznej”, WNT Warszawa 1979.
98. Pozzo A., „Binary Ice Machine (with Talin)”, proceedings from CERN Genova project Atlas 1997.
99. Praca zbiorowa, „Poradnik fizykochemiczny”, WNT Warszawa 1974.
100. Rao B. K., „Heat transfer to non-Newtonian flows over a cylinder in cross flow”, International Journal of Heat and Fluid Flow 21/2000.
101. Raźniejawić K., „Tablice cieplne z wykresami”, WNT Warszawa 1966.
102. Renold P., Abächerli F., „Fließkurven und Widerstandsgesetze eines neuen Zwei-Phasen-Kälte-trägers”, Diplomarbeit am ZTL, HLK-95-13, 1995.
103. Rozenblit R., Simkhis M., Hetsroni G., Barnea D., Taitel Y., „Heat transfer in horizontal solid-liquid pipe flow”, International Journal of Multiphase Flow 26/2000.
104. Royon L., Perrot P., Colinart P., Guiffant G., „Transport of cold thermal energy with a new secondary biphasic refrigerant: the stabilized ice slurry”, Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, Australia 1999.
105. Sasaki M., Kawashima T., Takahaschi H., „Flow Characteristic of Snow-water mixture Flows in Horizontal Pipes”, proceedings of 2nd International Conference of Snow Engineering, 1992.
106. Sasaki M., Kawashima T., Takahaschi H., „Slip Velocities of Solid-liquid Mixture Flows in Horizontal Pipes”, proceedings of experiment: Two-phase Flow Modeling and Experimentation, 1995.
107. Sasaki M., Takeuchi T., „Eddy Viscosity of Solid-liquid Flow With Nearly Equal Density in Horizontal Pipe”, Hydrotransport 14/1999.
108. Sasaki M., Takeuchi T., Takahaschi H., „Coefficients of Wall Friction in Snow-Water Mixtures”, proceedings of the International Conference on Multiphase Flow, ICMF'2001, New Orleans, L.A., U.S.A., May 27 – June 1, 2001.
109. Schowalter W. R., „Mechanics of non-Newtonian Fluid”, Pergamon Press 1978.
110. Sedahmed G. H., El-Kayar A. M., Farag H. A., Noseir S. A., „Liquid-solid mass transfer in packed beds of Rasching rings with upward two-phase (gas-liquid) flow”, The Chemical Engineering Journal 62/1996.
111. Sei T., Gonda T., Arima Y., „Growth rate and morphology of ice crystals growing in a solution of trehalose and water”, Journal of Crystal Growth 240/2002.

112. Shah R. K., London A. L., „Laminar Flow Forced in Ducts, Advanced in Heat Transfer”, Academic Press, New York 1978.
113. Shirai Y., Wakisaka M., Miyawaki O., Sakaahita S., „Effect of seed ice on formation of tube ice with high purity for a freeze wastewater treatment system with a bubble-flow circulator”, *Water Resistant* 33/1999.
114. Shirai Y., Wakisaka M., Miyawaki O., Sakashita S., „Conditions of producing an ice layer with high purity for freeze wastewater treatment”, *Journal of Food Engineering* 38/1998.
115. Skelland A. H. P., „Non-Newtonian flow and heat transfer”, New York 1967.
116. Snoek C., Bellamy J., „Heat transfer measurements of ice slurry in tube flow, *Exp. Heat Transfer*”, *Fluid Mech Thermo* 1997.
117. Sprenger E., Hönnmann W., „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik”, Ausgabe, R. Oldenbourg Verlag, München 84/1983.
118. Stamatiou E., Kawaji M., Lee B., Goldstein V., „Experimental investigation of slurry flow and heat transfer in a plate-type heat exchanger”, 3rd workshop on ice slurries of the IIR, Lucerne, Switzerland 2001.
119. Stohler F., „News und Trends in der Lebensmittelkühlung”, *HeizungKlima* 12/1994.
120. Stutz B., Reghem P., „Friction losses of two-phase flow liquid-solid”, 3rd workshop on ice slurries of the IIR, Lucerne, Switzerland 2001.
121. Sugawara M., Irvine T. F., „The effect of concentration gradient on the melting of a horizontal ice plate from above”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43/2000.
122. Szczechowiak E., „Określenie parametrów powietrza wilgotnego w obliczeniach komputerowych aparatów chłodniczych i procesów klimatyzacyjnych”, XVIII Dni Chłodnictwa, 11-12 czerwca 1984r. Poznań.
123. Tanino M., Kozawa Y., „Ice-water two-phase flow behavior in ice heat storage systems”, *International Journal of Refrigeration* 24/2001.
124. Timmermans J., „The Physico-chemical Constants of Binary Systems in Concentrated Solutions”, New York, London 1959.
125. Tränkler J., Rommel W., Sakai S., „Refrigerator and deep-freezer recycling not only a task for recovering CFCs”, *Gtz Proklima Yearbook* 1997-1999.
126. Ulbert J., Mitschka P., „Beiträge zur Verfahrenstechnik, Strömungsvorgänge und Wärmeübergang”, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1967.
127. Ullman F., „Enzyklopädie der technischen Chemie”, Verlag Urban und Schwarzenberg, München 1950.
128. Ure Z., „Alternative Technology”, *RAC Journal, Partners in Europe Issue*, 1996.
129. Ure Z., „Benefits that Flow From Secondary Systems”, *Refrigeration and Air Conditioning*, 7/2000.
130. Ure Z., „Slurry Ice Based Cooling Systems”, *Airah Journal Australian Refrigeration and Air Conditioning & Heating*, September 2001 Volume 55 No. 9.
131. Ure Z., „Slurry Ice Cooling Has Great Potential, According to Study”, *RAC Magazine*, October 1996.
132. Vaessen R. J. C., Himawan C., Witkamp G. J., „Scale formation of ice from electrolyte solutions on a scraped surface heat exchanger plate”, *Journal of Crystal Growth* 237-239/2002.
133. VDI – Wärmeatlas, VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf 1963.
134. Wakisaka M., Shirai Y., Sakashita S., „Ice crystallization in a pilot-scale freeze wastewater treatment system”, *Chemical Engineering and Processing* 40/2001.

135. Wantanabe K., Mizoguchi M., „Ice configuration near growing ice lens in a freezing porous medium consisting of micro glass particles”, *Journal of Crystal Growth* 213/2000.
136. Wetzler J., „Binäreis im Allgäuer Brauhaus”, *Kälte Klima Aktuell* 5/1999.
137. Wroński S., Pohorecki R., Siwiński J., „Przykłady obliczeń z termodynamiki i kinetyki procesów inżynierii chemicznej”, WNT Warszawa 1979.
138. Yamada M., Fukusako S., Kawanami T., Watanabe C., „Melting heat transfer characteristics of a horizontal ice cylinder immersed in quiescent saline water”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40/1997.
139. Yamada M., Fukusako S., Morizane H., Kim M. H., Schneider W., „Melting characteristics along a bundle of horizontal heated cylinders immersed in a liquid ice layer”, *Experimental Thermal and Fluid Science* 12/1996.
140. Zahorski S., „Mechanika przepływów lepkosprężystych”, PWN Warszawa 1978.

