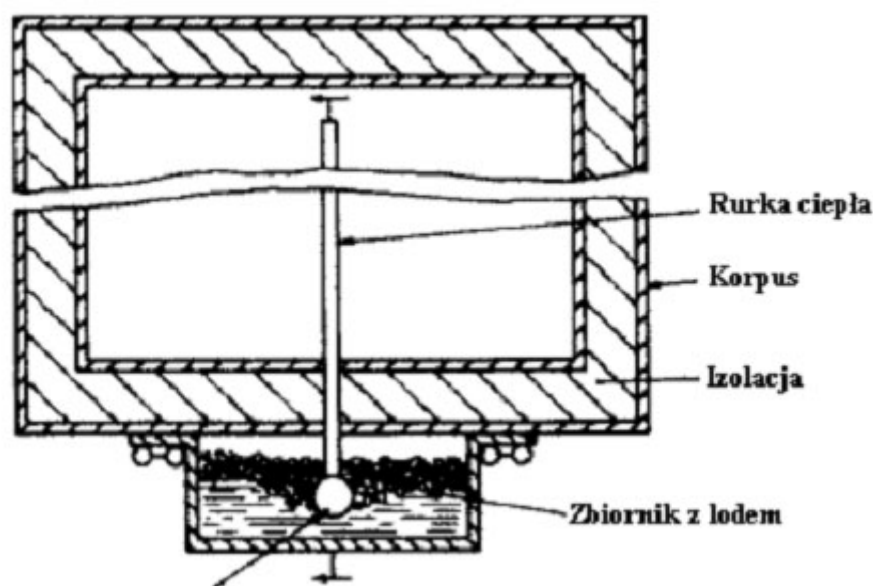


ODZYSK CIEPŁA W SYSTEMACH WENTYLACYJNYCH I KLIMATYZACYJNYCH OPARTY NA WYMIENNIKACH CIEPŁA TYPU RURKA CIEPŁA.

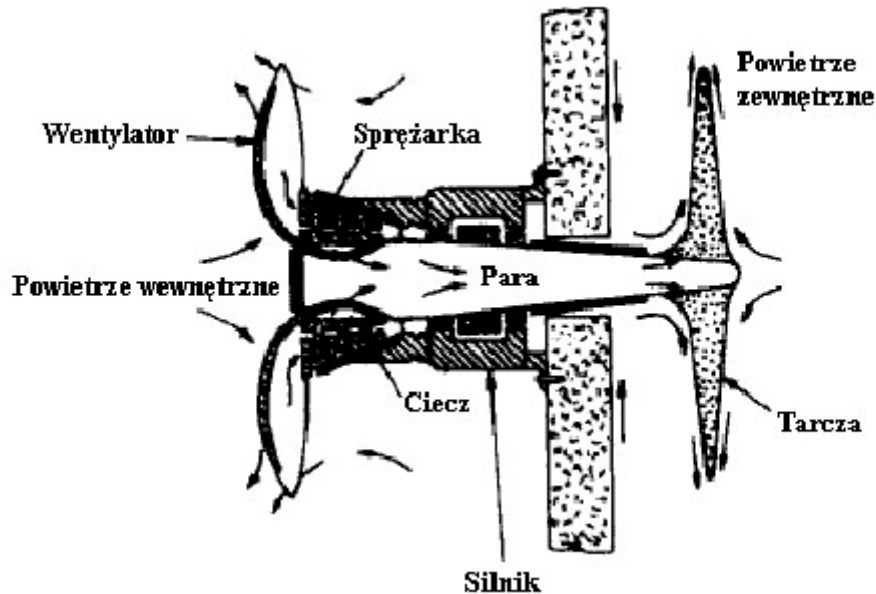
1. WSTĘP

Pierwsze informacje na temat rurek ciepła i ich wykorzystania w technice pojawiły się w latach czterdziestych ubiegłego wieku. Jako jeden z pierwszych koncepcję funkcjonowania rurek ciepła przedstawił R. S. Gaugler z General Motors, Ohio, USA. W wyniku przeprowadzanych badań 21 grudnia 1942 roku pojawił się pierwszy patent dotyczący wykorzystania rurek ciepła w systemach chłodniczych, który został opublikowany 6 czerwca 1944 roku.



Rys. 1. Urządzenie chłodnicze z rurką ciepła opatentowane przez R. S. Gaugler'a w 1944 roku. Źródło: David Anthony Reay, Peter A. Kew.: „Heat Pipes. Theory, Design and Application” Butterworth-Heinemann, 2006.

W przemyśle na szerszą skalę zaczęto wykorzystywać rurki ciepła dopiero w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku po tym, jak George Grover i jego współpracownicy z Los Alamos Scientific Laboratories opublikowali w roku 1964 opracowanie dotyczące rurek ciepła i ich wykorzystania w energetyce. George Grover pracował nad wykorzystaniem energii jądrowej do zasilania statków kosmicznych oraz nad efektywnymi systemami chłodzenia i wyrównywania temperatury w technologii kosmicznej, gdzie istniała konieczność równomiernego i szybkiego transportu ciepła. Od tego czasu rurki ciepła są szeroko stosowane w przemyśle, zaczynając od technologii kosmicznej poprzez elektronikę, przemysł spożywczy i chemiczny oraz szeroko w klimatyzacji, wentylacji, chłodnictwie, w inżynierii budowlanej i wszędzie tam gdzie jest potrzebny efektywny i szybki transport ciepła za pomocą pasywnych, trwałych i niezawodnych urządzeń jakimi niewątpliwie są rurki ciepła.



Rys. 2. Kompaktowe urządzenie klimatyzacyjne oparte na obrotowej rurce ciepła zaprojektowane przez NASA Źródło: David Anthony Reay, Peter A. Kew.: „Heat Pipes. Theory, Design and Application” Butterworth-Heinemann, 2006.

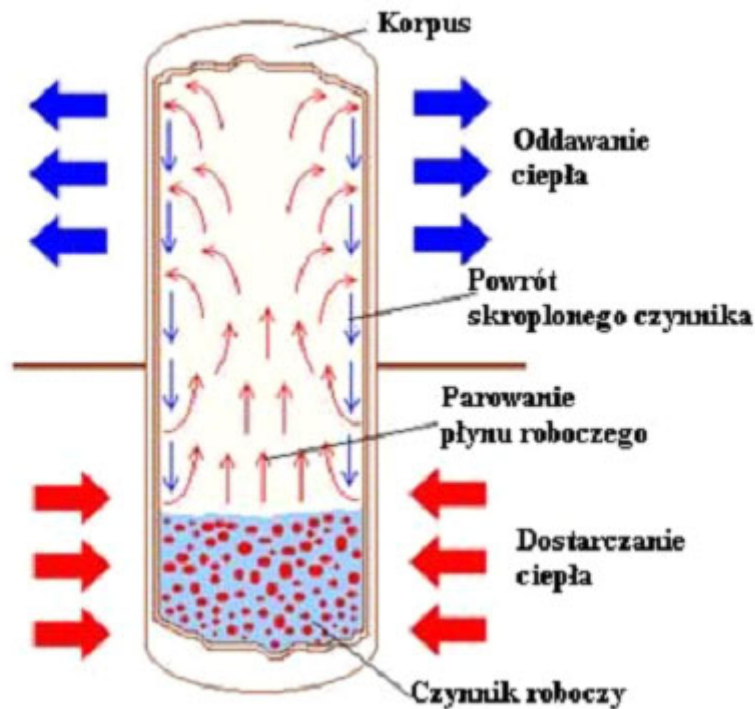
Wymiennik ciepła typu rurka ciepła (Heat Pipe) jest urządzeniem, które do przekazywania ciepła wykorzystuje dwufazowy, zamknięty i powtarzający się cykl z odparowaniem czynnika roboczego w parowniku, a następnie jego skropleniem w skraplaczu. Jedną z głównych zalet rurek ciepła jest ich wysoka efektywność, która umożliwia przekazywanie znacznych ilości ciepła, przy nawet niewielkiej różnicy temperatur. W konsekwencji jednoczesnego występowania parowania połączonego z konwekcją, zdolność w odbiorze ciepła i efektywność transportu ciepła w rurkach ciepła jest znacznie lepsza od nawet najlepszych przewodników ciepła. Rurki ciepła cechuje również szeroki zakres pracy od 2 K dla kriogenicznych rurek ciepła wykorzystujących jako płyn roboczy np. Hel, aż do temperatur rzędu 2000 K dla wysokotemperaturowych rurek ciepła wykorzystujących jako płyn roboczy ciekły metal np. Lit, Potas lub Srebro. To wszystko powoduje, że rurki ciepła są coraz szerzej stosowane w wielu gałęziach przemysłu.

2. KONSTRUKCJA I MECHANIZM FUNKCJONOWANIA RURKI CIEPŁA

Ze względu na konstrukcję i mechanizm funkcjonowania, wymienniki ciepła typu rurka ciepła możemy podzielić na dwie kategorie:

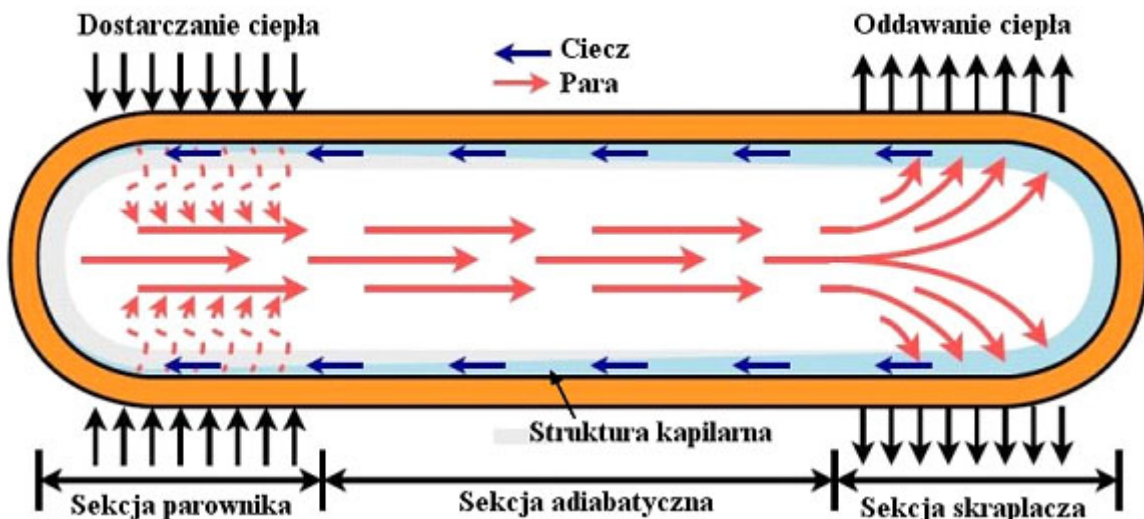
1. Konwencjonalne rurki grawitacyjne tzw. termosyfony
2. Rurki ciepła ze strukturą kapilarną (niekonwencjonalne)

Ad. 1 Mechanizm funkcjonowania grawitacyjnych rurek ciepła opiera się na cyrkulacji płynu roboczego na skutek sił grawitacji. Rurka ta może pracować tylko w pozycji pionowej z sekcją dostarczania ciepła w dolnej części i sekcją oddawania ciepła w części górnej. Rurki te nie są wyposażone w strukturę kapilarną. Rurkę grawitacyjną przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Grawitacyjna rurka ciepła (termosyfon) Źródło: opracowanie własne

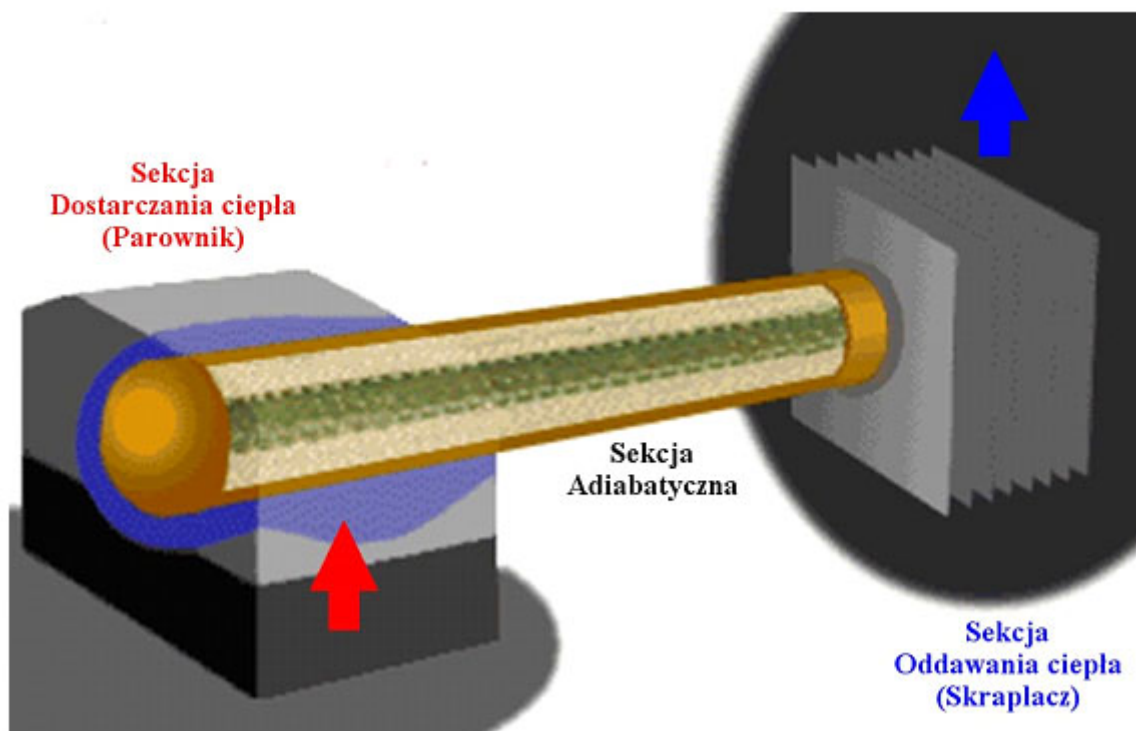
Ad. 2. Mechanizm funkcjonowania rurek ciepła ze strukturą kapilarną, polega na cyrkulacji i zawracaniu płynu roboczego pod wpływem sił kapilarnych, osmotycznych lub elektrostatycznych. W wyniku czego rurki ciepła ze strukturą kapilarną mogą pracować w każdej pozycji ustawienia, nawet poziomo. Rurkę ciepła ze strukturą kapilarną (knotem) przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Rurka ciepła ze strukturą kapilarną Źródło: opracowanie własne

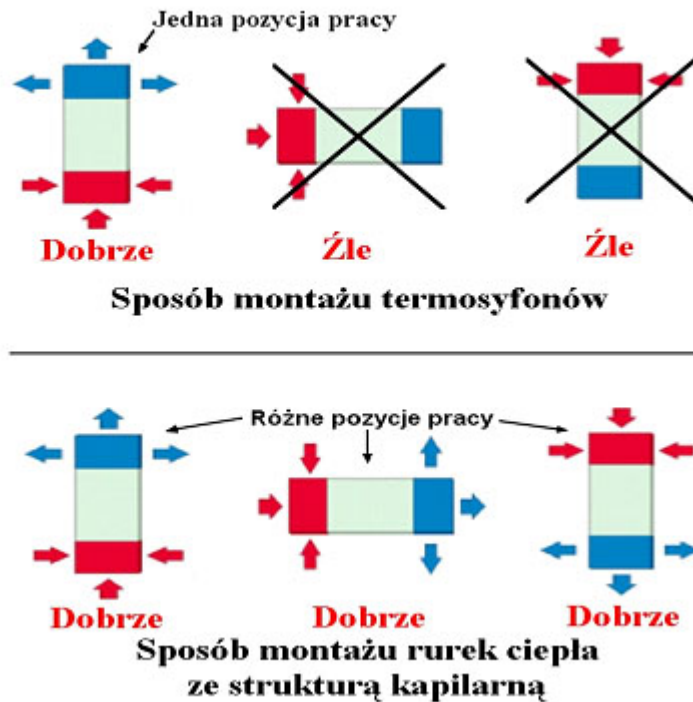
Niekonwencjonalna rurka ciepła zbudowana jest ze szczelnie zamkniętego naczynia (korpusu), dobraneo tak, aby wytrzymało ciśnienie panujące wewnątrz rurki. Korpus pokryty jest wewnątrz porowatą strukturą, która odpowiada za cyrkulację płynu roboczego. Naczynie na

początku jest opróżniane (wytwarza się próżnię), a następnie wypełnia się je odpowiednią ilością płynu roboczego, aby w pełni nawilżyć knot i umożliwić zakładane parametry pracy rurki ciepła. Podczas pracy rurki ciepła, odbywa się zamknięty, dwufazowy cykl ze skraplaniem płynu roboczego w sekcji oddawania ciepła przez rurkę ciepła i z odparowaniem płynu roboczego w sekcji pobierania ciepła przez rurkę ciepła. Płyn roboczy wewnątrz rurki ciepła pozostaje w warunkach nasycenia w momencie gdy temperatura pracy rurki ciepła zawiera się między punktem potrójnym, a stanem krytycznym.



Rys. 5. Rurka ciepła ze strukturą kapilarną. Źródło: opracowanie własne

Jak pokazuje rysunek 5 rurki ciepła składają się z trzech odrębnych obszarów: parownik czyli obszar dostarczania ciepła, skraplacz czyli obszar odbierania ciepła i adiabatyczny obszar między nimi. Ciepło dostarczone do sekcji parownika powoduje, że roboczy płyn w parowniku odparowuje. Odpowiednia temperatura i odpowiednio wysokie ciśnienie w tym obszarze powoduje wytworzenie strumienia pary w kierunku przeciwnego, chłodniejszego końca rurki ciepła (sekcji skraplającej), gdzie następnie para skrapla się, oddając swoje utajone ciepło parowania. Następnie kapilarne siły w porowatej strukturze transportują ciecz z powrotem do parownika. Rurki ciepła ze strukturą kapilarną i termosyfony funkcjonują zarówno jako zamknięty, dwufazowy cykl, jak również wykorzystują utajone ciepło parowania, by transportować ciepło przy bardzo małych różnicach temperatury. Działanie termosyfonów polega całkowicie na grawitacyjnych siłach w celu zawrócenia ciekłej fazy roboczego płynu z sekcji skraplacza do sekcji parownika, natomiast rurki ciepła ze strukturą kapilarną wykorzystują pewien rodzaj porowatej, włoskowatej kapilarnej struktury, by umożliwić przepływ cieczy od skraplacza do parownika. W wyniku kapilarnego pompowania występującego w knocie, rurki ciepła ze strukturą porowatą mogą zostać użyte w dowolnym położeniu (rys. 6). Siły kapilarne powodują mikrogravitacje otoczenia, gdzie kapilarna struktura musi pompować płyn przeciw grawitacji z sekcji skraplacza do sekcji parownika. Cechą odróżniającą termosyfony od rurek ciepła ze strukturą kapilarną jest występowanie w tych drugich charakterystycznej zależności miejscowego, grawitacyjnego pola, umożliwiającego przepływ cieczy od skraplacza do parownika.

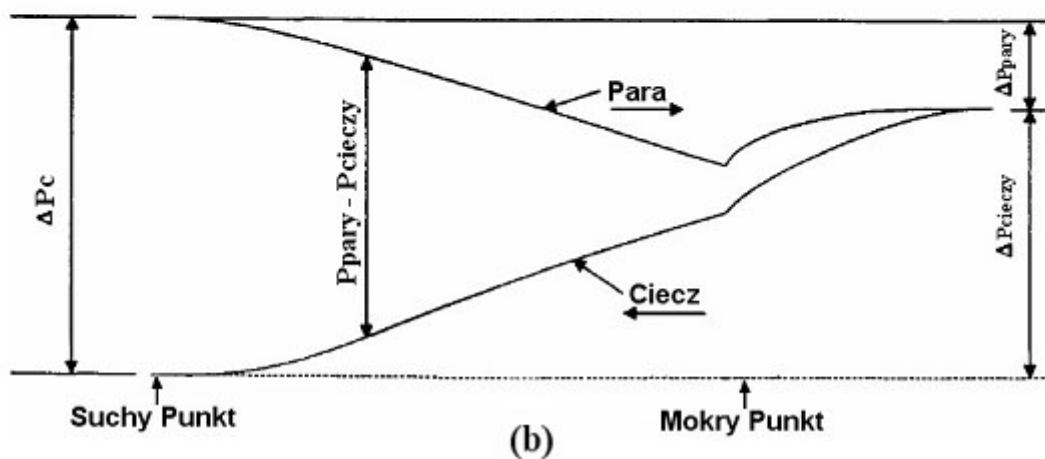
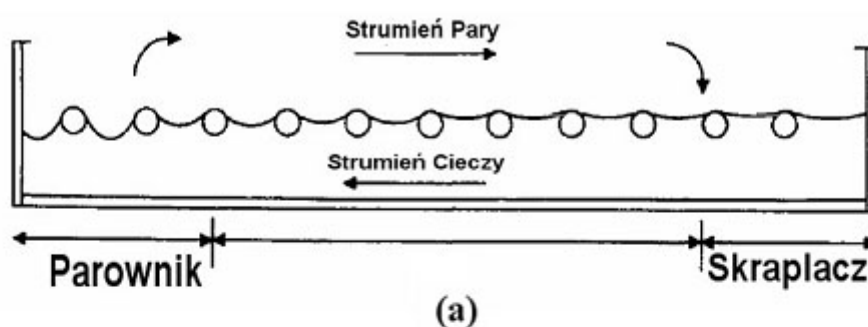


Rys. 6. Sposób ustawienia rurek ciepła. Źródło: opracowanie własne

Pomimo, że funkcjonowanie rurki ciepła jest silnie uzależnione od kształtu urządzenia, roboczego płynu i struktury kapilarnej, to podstawowe zjawisko, które rządzi działaniem rurki ciepła wynika z różnicy w kapilarnym ciśnieniu na powierzchni międzyfazowej ciecz-para w obszarze parownika i skraplacza. Parowanie występujące w sekcji dostarczania ciepła rurki ciepła wywołuje powstawanie menisku cieczy na strukturze kapilarnej, natomiast kondensacja pojawiająca się w sekcji oddawania ciepła wywołuje zalewanie knotu. Połączony proces parowania i proces kondensacji doprowadza do zmiany promienia krzywizny menisku wzdłuż osi długości rurki ciepła jak pokazuje rysunek 7a. Punkt, w którym promień krzywizny menisku jest w maksimum, nazywany jest "suchym" punktem i zwykle występuje w parowniku w punkcie najdalszym od obszaru skraplacza. "Mokry" punkt występuje w tym punkcie, gdzie ciśnienie pary i ciśnienie cieczy są w przybliżeniu sobie równe lub, gdzie promień krzywizny menisku osiąga minimum. Punkt ten może być usytuowany gdzieś w skraplaczu lub adiabatycznej sekcji, ale zazwyczaj znajduje się blisko końca sekcji skraplacza jak najdalej od sekcji parownika. Rysunek 7b ilustruje relację między ciśnieniem statycznym płynu i ciśnieniem statycznym pary podczas pracy rurki ciepła. Jak pokazano, gradient kapilarnego ciśnienia na powierzchni międzyfazowej ciecz-para równa się różnicy ciśnienia między fazami cieczy i pary w danej osiowej pozycji. Dla rurek ciepła, by zadziałały właściwie, ostateczna różnica kapilarnego ciśnienia między mokrym i suchym punktem, pokazanymi na rysunku 7b, musi być większa niż zsumowanie wszystkich strat ciśnienia występujących na drodze cieczy i strumienia pary. Związek ten nazwany jest kapilarnym ograniczeniem. Do innych ograniczeń rurek ciepła należą:

- siły lepkości - praca rurki ciepła poniżej wymaganego zakresu temperatur powoduje, że siły lepkości powstrzymują przepływ pary w rurkach ciepła. Dobór innego płynu roboczego, którego lepkość będzie odpowiednia dla wymaganego zakresu temperatur, spowoduje rozwiązanie tego problemu.

- prędkość dźwięku - najczęściej, podczas uruchamiania rurki ciepła dochodzi do zjawiska, w którym para płynu roboczego opuszczająca parownik osiąga prędkość dźwięku, co z kolei zakłóca prawidłową pracę rurki ciepła. Wzrost prędkości pary płynu roboczego spowodowany jest najczęściej zbyt dużą mocą cieplną dostarczaną do obszaru parownika rurki ciepła.
- zatopienie - zatopienie części skraplacza rurki ciepła, spowodowane brakiem powrotu skroplonego płynu roboczego do obszaru parownika. Przyczyną tego zjawiska jest zbyt duża prędkość pary opuszczającej parownik.
- siła kapilarna - wrzenie strumienia cieczy powracającej do obszaru parownika, spowodowane zbyt małą wartością siły kapilarnej. Mała wartość siły kapilarnej i wrzenie strumienia cieczy powracającej do obszaru parownika spowodowane są zbyt dużą mocą cieplną dostarczaną do parownika rurki ciepła.
- wysychanie - wysychanie rurki ciepła spowodowane jest zbyt dużą wartością promieniowego strumienia ciepła, który z kolei powoduje wrzenie strumienia cieczy [2].



Rys. 7. Tworzenie się menisku na knocie Źródło: Adrian Ł.: „Budowa i zasada działania rurki ciepła”, Czasopismo: „Chłodnictwo i Klimatyzacja”, nr 3/2010. ISSN 1425-9796

Płyn roboczy
 Zdolność rurki ciepła do transportu ciepła uzależniona jest przede wszystkim od termodynamicznych i termofizycznych właściwości płynu roboczego wypełniającego rurkę. Ponieważ podstawą do funkcjonowania rurki ciepła jest odparowanie i kondensacja roboczego płynu, wybór odpowiedniego płynu jest bardzo ważnym czynnikiem w projektowaniu i produkcji rurek ciepła. Musimy do tego przywiązać szczególną uwagę, aby zapewnić, że zakres temperatury obsługiwanej przez płyn roboczy jest adekwatny do zakresu stosowania rurki ciepła oraz właściwości chemiczne płynu roboczego nie kolidują z materiałem korpusu.

Najbardziej popularne zastosowania obejmują użycie rurek ciepła z roboczym płynem mającym temperaturę wrzenia między 250 i 375 K; jednakże zarówno kriogeniczne rurki ciepła (te operujące w zakresie temperatury 2 do 100 K) jak i rurki ciepła z ciekłym metalem (te operujące w zakresie temperatury 750 do 2000 K) zostają udoskonalane i używane z powodzeniem w wielu gałęziach przemysłu. Tabela 1 ilustruje typowe zakresy działania rurek ciepła w zależności od temperatury pracy rurek ciepła jak i rodzaju, i typu płynów roboczych wypełniających rurkę ciepła [3]. Wybór odpowiedniego płynu roboczego ma zasadniczy wpływ na długoterminowe, bezawaryjne i prawidłowe funkcjonowanie rurki ciepła. Zastosowany płyn roboczy powinien charakteryzować się wysokim ciepłem utajonym odparowania, wysokim napięciem powierzchniowym, małą lepkością oraz powinien być termostabilny w całym zakresie stosowalności danej rurki ciepła. Zachodząca reakcja chemiczna wewnątrz rurki ciepła przy odparowaniu płynu roboczego może powodować powstawanie niekondensujących gazów, które mogą znacząco pogarszać wydajność rurki ciepła. [4].

Oprócz termodynamicznych i termofizycznych własności roboczego płynu, musimy rozważyć również takie czynniki jak kompatybilność z materiałem korpusu, wpływ płynu roboczego na otoczenie w razie rozszczelnienia korpusu rurki ciepła, jak i zdolność roboczego płynu do zwilżania tak knota, jak i ścianki rurki ciepła.

Tabela 1.

Zakresy stosowania rurek ciepła dla różnych płynów roboczych. Źródło: Adrian Ł.: „Budowa i zasada działania rurki ciepła”, Czasopismo: „Chłodnictwo i Klimatyzacja”, nr 3/2010. ISSN 1425-9796

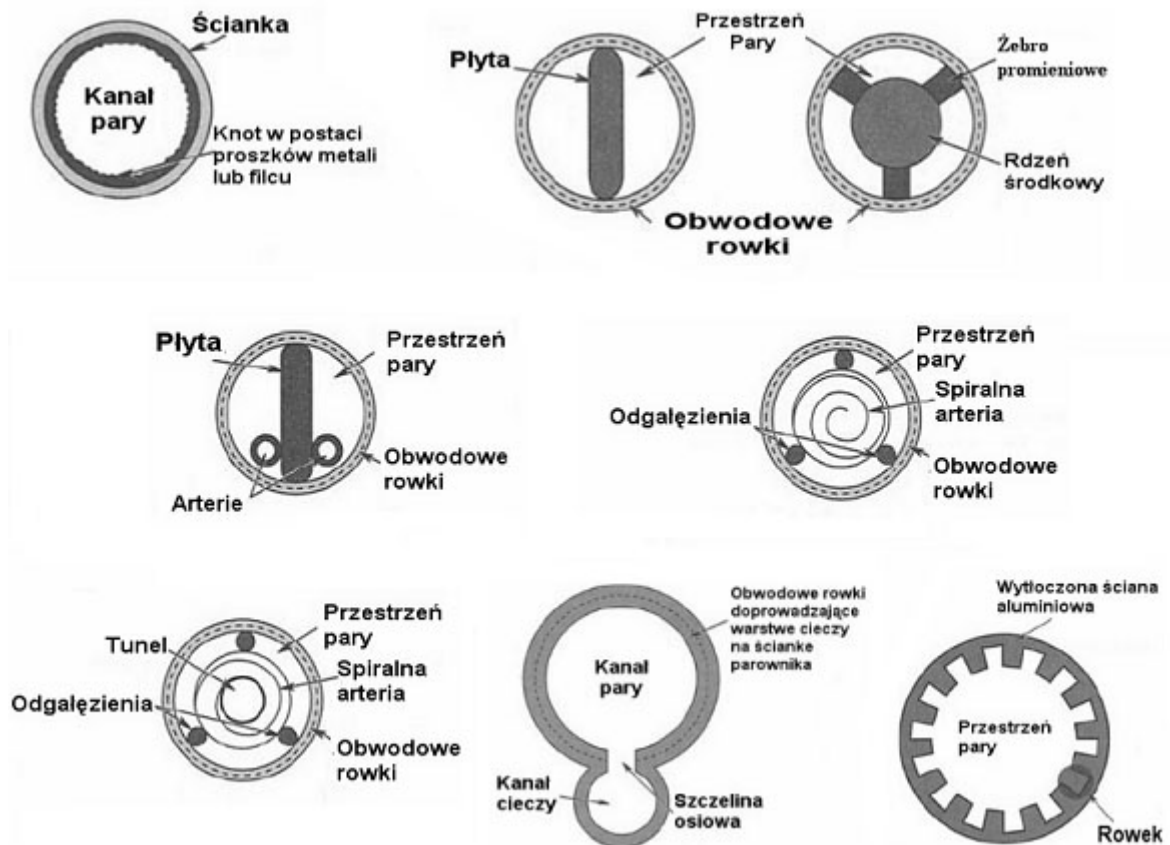
Płyn roboczy	Temperatura Punktu Potrójnego przy ciśnieniu atmosferycznym [K]	Temperatura wrzenia przy ciśnieniu atmosferycznym [K]	Temperatura Punktu Krytycznego [K]	Zakres stosowania [K]
Hel	1.0	4.21	5,2	2 - 4
Wodór	13.8	20.38	33,0	14 - 31
Neon	24.4	27.09	44,1	27 - 37
Azot	63.1	77.35	126,2	70 - 103
Argon	83.9	87.29	150,9	84 - 116
Tlen	54.7	90.18	154,8	73 - 119
Metan	90.6	111.4	191,2	91 - 150
Krypton	115.8	119.7	209,5	116 - 160
Etan	89.9	184.6	305,5	150 - 240
Freon 22	113.1	232.2	369,2	193 - 297
Amoniak	195.5	239.9	405,6	213 - 373
Pentan	143.1	309.2	469,7	253 - 393
Aceton	180.0	329.4	508,2	273 - 393
Metanol	175.1	337.8	513,2	283 - 403
Etanol	158.7	351.5	516,3	273 - 403
Heptan	182.5	371.5	540,3	273 - 423
Woda	273.1	373.1	647,3	303 - 473
Toluen	178.1	383.7	593,9	323 - 473
Naftalen	353.4	490,0	748,4	408 - 478
Dauterm	285.1	527,0	38,4	423 - 668
Rtęć	234.2	630.1	1750,2	523 - 923
Siarka	385.9	717.8	1314,2	530 - 947
Cez	301.6	943.0	1938,0	723 - 1173
Rubid	312.7	959.2	2093,0	800 - 1275
Potas	336.4	1032,0	2250,0	773 - 1273
Sód	371,0	1151,0	2500,0	873 - 1473
Lit	453.7	1615,0	3800,0	1273 - 2073

Struktura

kapilarna

Wybór odpowiedniej struktury kapilarnej do rurek ciepła zależy od szeregu czynników.

Podstawowym wymaganiem jest konieczność wytworzenia odpowiedniego ciśnienia kapilarnego, dzięki czemu możliwy jest bezproblemowy przepływ płynu roboczego od sekcji oddawania ciepła (skraplacza) do sekcji pobierania ciepła (parownika) [2]. Porowata struktura ma dwie funkcje w działaniu rurki ciepła. Jedną z nich jest nośnik, dzięki któremu zapewniony jest mechanizm, przez który roboczy płyn jest zawracany od skraplacza do parownika. Porowata struktura zapewnia również, że roboczy płyn jest równomiernie rozprowadzany na powierzchni sekcji parownika w celu prawidłowego odbioru ciepła od omywającego tą część rury ciepłego powietrza lub cieczy. Przepuszczalność struktury kapilarnej jest kolejną ważną cechą, która wzrasta wraz ze wzrostem rozmiarów porów (kanalików) struktury kapilarnej. Kolejną istotną cechą jest odpowiednia grubość kanalików wypełnienia (porów), przy czym wymiana ciepła rośnie wraz z grubością kanalików [4]. Aby zapewnić niski opór strumienia, przez który płyn może zostać zawrócony od skraplacza do parownika, pożądana jest otwarta, porowata struktura z wysoką przemakalnością. Jednakże, aby zwiększyć włoskowatość, mała wielkość pora jest konieczna. Rozwiązanie tej ewidentnej dychotomii może zostać osiągnięte przez użycie niejednorodnego knota zrobionego z kilku różnych materiałów lub poprzez złożoną porowatą strukturę [3]. Inną ważną cechą struktury kapilarnej jest jej współpraca i niekolidowanie z zastosowanym płynem roboczym. Kilka wybranych przykładów struktur kapilarnych przedstawia rysunek 8.

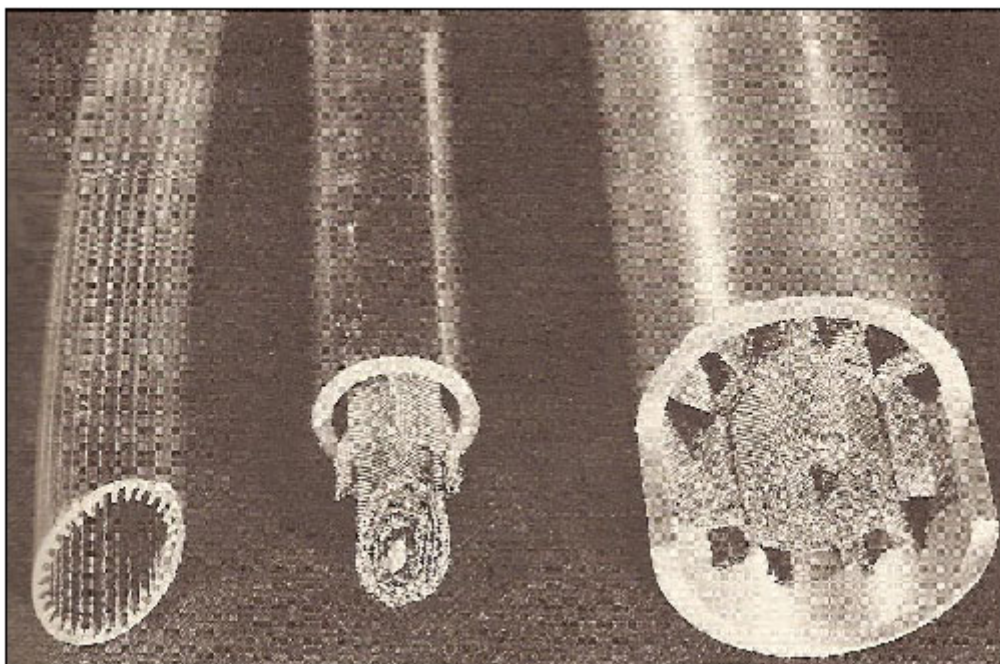


Rys. 8. Przykłady struktur kapilarnych. Źródło: R. C. Prager, M. Nikitkin, B. Cullimore.: „Heat Pipes”. Spacecraft thermal control handbook. Aerospace Corporation 2002.

Korpus

W swojej konwencjonalnej budowie rurka ciepła, to zamknięta z dwóch stron rura cienkościenna z

przewagą jej długości nad średnicą. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie rurki ciepła wymagają trzech głównych komponentów: korpusu, który może zostać zbudowany z szerokiej gamy materiałów, m.in. ze szkła, ceramiki lub metalu; porowatej struktury, która może zostać wytworzona np. z utkanego włókna szklanego, spiekanych proszków metalu, ekranów, siatek drutu lub bruzd; i roboczego płynu, który może urozmaicać się od azotu lub helu dla niskiej temperatury pracy rurek ciepła (kriogeniczne rurki ciepła) do litu, potasu lub sodu (ciekły metal) dla wysokiej temperatury pracy rurek ciepła. Każdy z tych trzech komponentów jest jednakowo ważny i musi zostać starannie dobrany wobec typu materiału, termodynamicznych i termofizycznych własności jak i zgodności materiałowych.



Rys. 9. Przykłady korpusu i struktury kapilarnej rurek ciepła źródło: Przemysław Jakóbowski „Budowa, działanie i zastosowanie rurki ciepła”

Korpus rurki ciepła zapewnia bezpieczeństwo i strukturalną stabilność. Jako taki, musi zostać wytworzony z materiału, który jest po pierwsze zgodny z zarówno roboczym płynem (Tabela 2), jak i porowatą strukturą, po drugie wystarczająco mocny by stawiać opór ciśnieniu związanemu z temperaturami nasycenia spotykanymi podczas normalnego funkcjonowania rurki ciepła i po trzecie ma wystarczająco wysoki współczynnik przewodnictwa cieplnego, by umożliwić efektywne przekazywanie ciepła, albo do albo z wnętrza rurki ciepła. Oprócz tych cech, które głównie są związane z wewnętrznymi procesami, materiał korpusu musi być odporny na korozję będącą skutkiem interakcji z otoczeniem oraz płynem roboczym. Dodatkowo korpus rurki ciepła musi być wystarczająco podatny strukturalnie, by zostać wytworzony do odpowiedniej wielkości i kształtu [3].

Tabela 2.

Kompatybilność płynu roboczego z materiałem korpusu

źródło: Myer Kutz: „Energy and Power”. Mechanical Engineers’ Handbook Third Edition. John Wiley & Sons, INC, 2006.

+ Kompatybilne; - Niekompatybilne

	Aluminium	Mosiądz	Miedź	Żelazo	Nikiel	Niob	Stal nierdzewna	Tantal	Tytan	Wolfram
Aceton	+	+	+		+		+			
Amoniak	+		-	+	+		+			
Cez						+			+	
Dauterm			+		+		+			
Heptan	+									
Ołów					-	-	-	+	-	+
Lit					-	+	-	+	-	+
Rtęć				-	-	-	+	-	-	
Metanol	-	+	+	+	+		+			
Srebro					-	-	-	+	-	+
Sód					+	+	+		-	
Woda	-		+		+		+		+	

3. MOŻLIWOŚCI APLIKACYJNE WYMIENNIKÓW CIEPŁA TYPU RURKA CIEPŁA W KLIMATYZACJI I WENTYLACJI

Rurki ciepła ze względu na swoją wysoką efektywność, trwałość i możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, począwszy od chłodnictwa i klimatyzacji (w przemyśle spożywczym, w przechowywaniu żywności, w wymiennikach klimatyzacyjnych i wentylacyjnych), poprzez przemysł chemiczny i metalurgiczny, aż po przemysł elektroniczny (chłodzenie urządzeń elektronicznych). Rurki ciepła z powodzeniem wykorzystywane są również w technologiach kosmicznych (chłodzenie silników i elektroniki statków kosmicznych i satelitów kosmicznych), kriochirurgii, w chłodzeniu cylindrów silników oraz łopatek turbin, w elementach kolektorów słonecznych, w instalacjach zabezpieczających przed pokryciem lodem i śniegiem dróg przejazdowych, oraz do utrzymywania odpowiednio niskiej temperatury gruntu na terenach wiecznej zmarzliny zabezpieczając przed zniszczeniem znajdującą się tam infrastrukturę (np. rurociąg Trans-Alaska). Aplikacje wykorzystujące rurki ciepła można przedstawić w postaci kilku szerokich grup, z których każda opisuje własności rurek ciepła. Te grupy to:

- odseparowanie źródła i odbioru ciepła

- wyrównywanie temperatury
- przemiana strumienia ciepła
- regulacja i kontrola temperatury [1].

Analizując pierwszą własność czyli odseparowanie źródła i odbioru ciepła można wywnioskować, że wysoka efektywność przewodności cieplnej rurki ciepła umożliwiła przewodzenie ciepła z wysoką sprawnością na znaczne odległości. W wielu zastosowaniach, gdzie jest wymagane chłodzenie danego elementu, niepożądane jest rozpraszanie ciepła przez odbiornik ciepła przylegający bezpośrednio do elementu. Jako przykład można podać zastosowanie rurki ciepła do odbioru ciepła z elektronicznego urządzenia wysokiej mocy, w którego wnętrzu bezpośrednio znajdują się komponenty zawierające inne wrażliwe na wysoką temperaturę elementy. Zastosowanie w tym przypadku wymienników ciepła typu rurka ciepła pozwala połączyć element wytwarzający ciepło z oddalonym odbiornikiem ciepła, umieszczonym na zewnątrz urządzenia, a izolacja termiczna pomiędzy sekcją parownika i skraplacza czyli w części adiabatycznej zmniejsza do minimum straty ciepła od pośrednich sekcji rurki ciepła. Większość aplikacji rurek ciepła do regulacji termicznej i wyrównywania temperatury w elektronice jest przede wszystkim skierowana na rozdzielanie źródła i odbioru ciepła.

Druga własność z listy powyżej, czyli wyrównywanie temperatury, jest ściśle powiązana z opisanym powyżej odseparowaniem źródła od odbioru ciepła. Wnioskując z mechanizmu funkcjonowania, rurka ciepła z zasady dąży do wyrównania temperatury. Własność ta może zostać użyta do zmniejszenia różnicy temperatur pomiędzy nierówno ogrzаныmi obszarami danego ciała czy urządzenia. Urządzeniem takim może być na przykład satelita, którego część zewnętrznej powłoki jest zwrócona ku słońcu i ogrzewa się, natomiast jego druga część znajdująca się w cieniu jest chłodniejsza, a wymagane jest wyrównanie temperatury na całej jego powłoce w celu uniknięcia przegrzania i deformacji części satelity wystawionej na promieniowanie słoneczne.

Własność trzecia, czyli przemiana strumienia ciepła znalazła zastosowanie w technologii reaktorów. Dla przykładu, w termoelektrycznych generatorach jest wykorzystywana przemiana względnie małego strumienia ciepła generowanego np. w radioaktywnych izotopach, do wystarczająco dużego strumienia ciepła potrzebnego do efektywnej pracy tych generatorów [8]. Czwarta grupa aplikacji, czyli regulacja i kontrola temperatury, wykorzystuje rurki ciepła o zmiennej przewodności (Variable Conductance Heat Pipe - VCHP). Na początku rurki ciepła o zmiennej przewodności były wykorzystywane głównie w statkach kosmicznych, natomiast teraz stały się powszechnie stosowane w wielu aplikacjach do regulacji temperatury, od podzespołów elektronicznych do pieców i piekarników. Tak jak wszystkie urządzenia rurki ciepła muszą spełniać wymagane kryteria zanim zostaną wykorzystane w przemyśle. Z pewnością do wszelkich zastosowań w przemyśle i inżynierii budowlanej rurka ciepła musi być niezawodna i bezpieczna, ekonomicznie uzasadniona oraz łatwa w montażu i demontażu. Oczywiście są to tylko podstawowe kryteria, które rurki ciepła muszą spełnić, aby być z powodzeniem wykorzystywane [8].

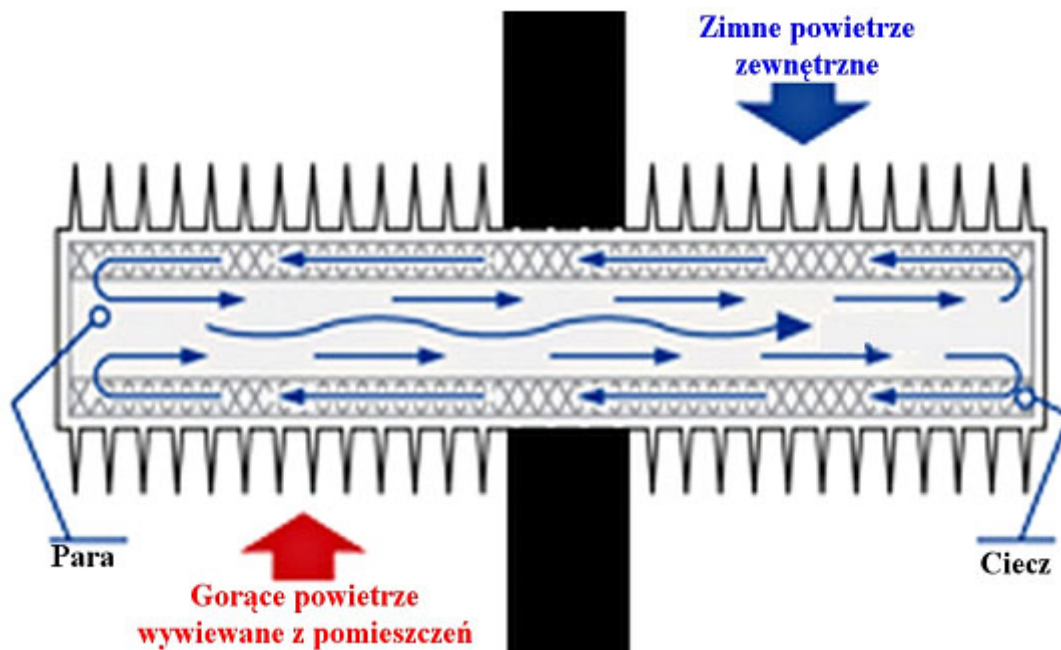
3.1. Rurki ciepła jako efektywne wymienniki ciepła w systemach klimatyzacyjnych i wentylacyjnych

Odzysk

ciepła

Do najbardziej rozpowszechnionych urządzeń do odzysku ciepła w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych można zaliczyć wymienniki krzyżowe, wymienniki obrotowe i przeciwprądowe oraz układy z medium pośredniczącym. Do tych ostatnich ze względu na zasadę działania zaliczają się wymienniki zbudowane na bazie rurek ciepła. Najczęściej są one stosowane w wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń z dużą zawartością wilgoci [9]. Wynika to z faktu, iż wymienniki z rurkami ciepła charakteryzują się niską temperaturą szronienia oraz możliwością łatwego dostępu

do nich i czyszczenia. Niewątpliwym atutem tych wymienników jest również całkowite wyeliminowanie zanieczyszczeń krzyżowych za pomocą całkowitego odizolowania powietrza usuwanego od świeżego [8].



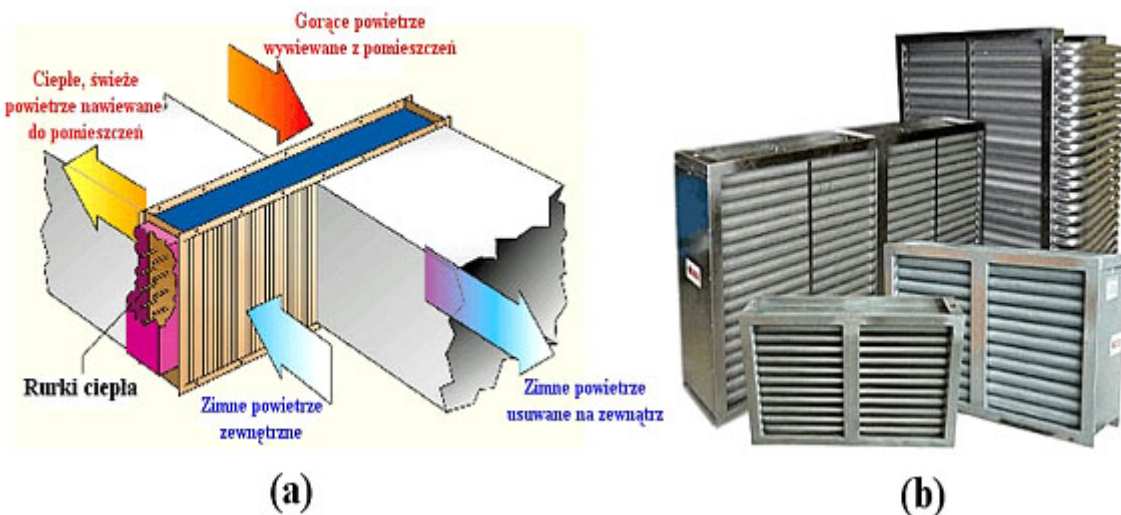
Rys. 10. Zasada działania odzysku ciepła z powietrza usuwanego za pomocą rurki ciepła na przykładzie zimy źródło: opracowanie własne

Systemy wykorzystujące rurki ciepła do odzysku ciepła z powietrza usuwanego z pomieszczeń, charakteryzują się wysoką sprawnością w całym zakresie temperatur bez względu na to czy pracują w porze letniej czy zimowej. Spowodowane jest to między innymi tym, że wymienniki z rurkami ciepła nie potrzebują energochłonnych systemów do odszraniania w warunkach niskich temperatur zewnętrznych i kontaktu z zimnym powietrzem zewnętrznym. Do regulacji wydajności odzysku ciepła stosuje się obejścia przepływu powietrza, tzw. „by-passy”. Mechanizm funkcjonowania układu odzysku ciepła z powietrza usuwanego z pomieszczeń na przykładzie zimy pokazano na rysunku 10. Podczas pory zimowej ogrzane, zużyte powietrze wywiewane z pomieszczeń przepływa przez jedną część wymiennika typu rurka ciepła z ożebrowaną powierzchnią i ogrzewa go oddając mu ciepło. Powoduje to parowanie płynu roboczego wewnątrz rurki ciepła i odbiór znacznych ilości ciepła z powietrza usuwanego z pomieszczeń. Odparowany czynnik przedostaje się do naprzeciwległej sekcji rurki ciepła i skrapla się, oddając ciepło do zimnego, świeżego powietrza nawiewanego z zewnątrz, które opływa również ożebrowaną tą część rurki ciepła. Przepływ powietrza za pomocą szeregu przepustnic i tzw. „by-passu” może być realizowany jako:

- całkowity przepływ przez wymiennik, by-pass zamknięty, całkowity odzysk ciepła
- całkowity przepływ przez by-pass, w przypadku działania układu przeciwarzamrozeniowego lub gdy odzysk ciepła nie występuje
- częściowy przepływ przez wymiennik i przez by-pass, w przypadku regulacji temperatury powietrza nawiewanego oraz w czasie odszraniania wymiennika [8].

Wymienniki do odzysku ciepła z powietrza usuwanego, których budowa oparta jest na rurkach ciepła osiągają większą sprawność odzysku ciepła od tradycyjnych wymienników do odzysku ciepła. Odzysk ciepła na tak wysokim poziomie pozwala zaoszczędzić energię, co przekłada się bezpośrednio na koszty użytkowania urządzenia i całego budynku. Zagadnienia odzysku ciepła w

układach wentylacji i klimatyzacji, szczególnie w nowoczesnym budownictwie nie tylko pasywnym, są niezwykle ważne i mają istotny wpływ na całkowity bilans energetyczny budynku.



Rys. 11. Wymiennik do odzysku ciepła z rurkami ciepła, (a) – schemat działania, (b) – wygląd rzeczywisty źródło: www.plantengineering.com oraz www.air2energy.com.au

Do czołowych producentów wymienników ciepła, bazujących na zasadzie działania rurek ciepła należą IVP – Szwecja, Comiter – Włochy, Delta Air – Francja, Thermacore Europe – Wielka Brytania. W Polsce centrale nawiewno-wywiewne wyposażone w wymienniki ciepła typu rurka ciepła produkowane są przez firmę Klimor. Wymienniki do odzysku ciepła tej firmy zbudowane są z miedzianych rur $\square 16 \times 0,8$ mm oraz z aluminiowych lamel, zamkniętych w obudowie z blachy ocynkowanej pokrytej dodatkowo farbą antykorozyjną [9].

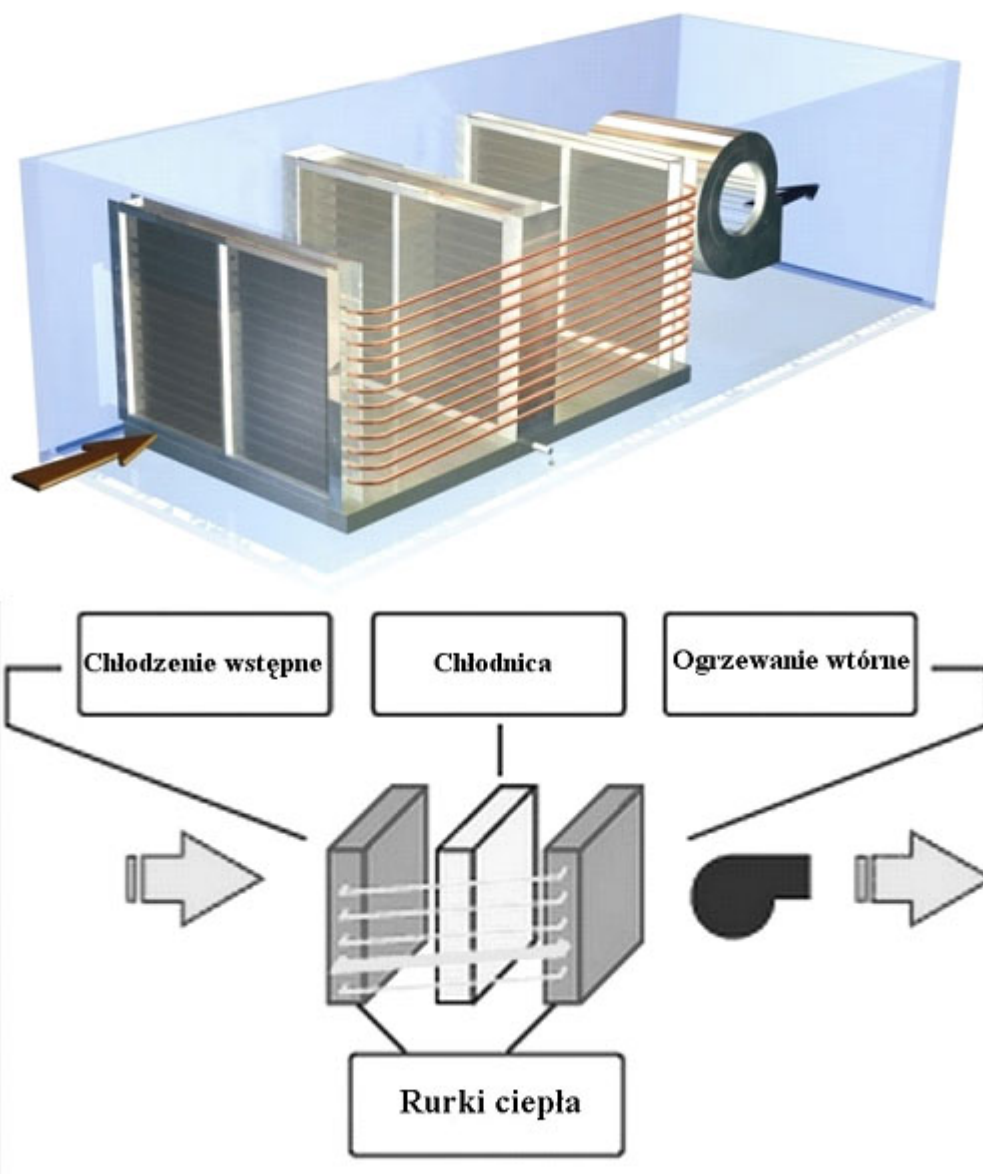
Chłodzenie i osuszanie powietrza

Rurki ciepła stosowane są również w systemach klimatyzacyjnych i wentylacyjnych do pasywnego osuszania powietrza. Zastosowanie takie pokazuje rysunek 12.

Wykorzystanie wymienników ciepła typu rurka ciepła w układach osuszania powietrza systemów klimatyzacyjnych znacząco poprawia sprawność energetyczną tych systemów. Zastosowanie rurek ciepła do procesu osuszania umożliwia wyeliminowanie nagrzewnic wtórnych niezbędnych w tradycyjnych systemach w celu uzyskania określonych parametrów powietrza nawiewanego do pomieszczeń.

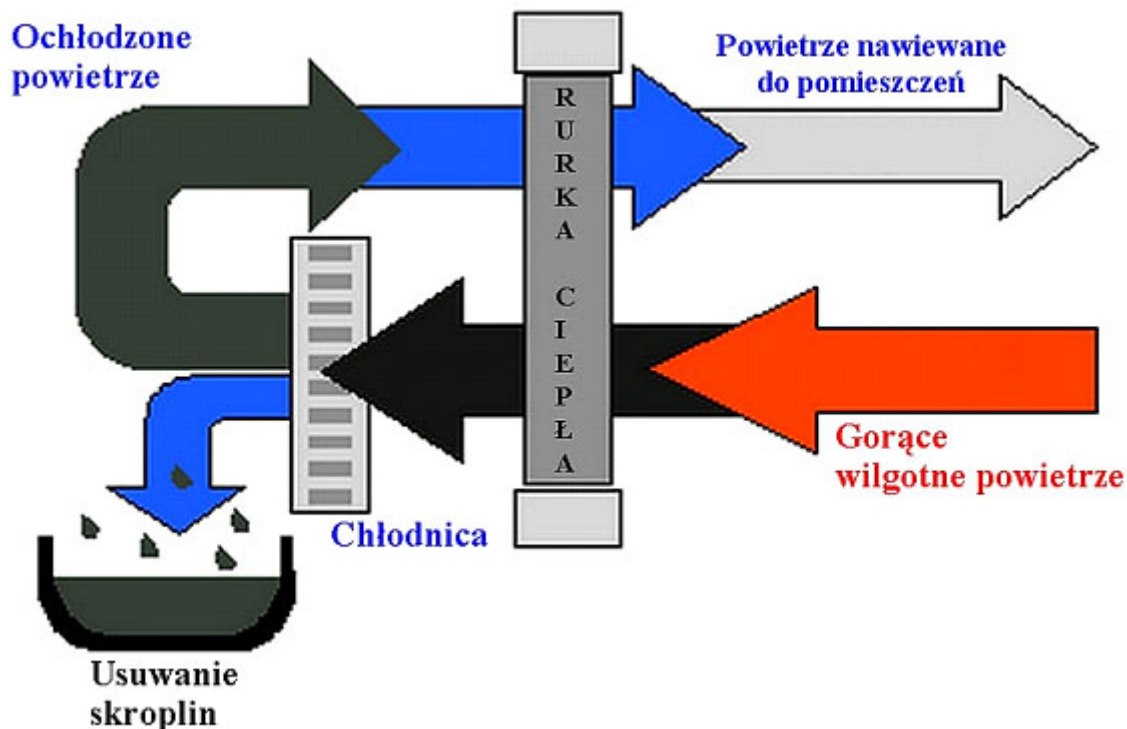
Układ do osuszania powietrza w systemach klimatyzacyjnych bazujący na rurkach ciepła można podzielić na dwie części, pierwsza to chłodzenie wstępne, natomiast druga to ogrzewanie wtórne. Pierwsza część jest usytuowana w strumieniu ciepłego, świeżego powietrza zewnętrznego. Ciepłe powietrze zewnętrzne przepływa przez część chłodzenia wstępnego, omywając sekcję parownikową rurki ciepła i powodując parowanie płynu roboczego wewnątrz rurki ciepła. Odparowany czynnik przedostaje się do górnej części rurki ciepła i skrapla się, oddając ciepło do części ogrzewania wtórnego. Sekcję pierwszą nazywa się sekcją chłodzenia wstępnego, ponieważ część ciepła zostaje odebrana z ciepłego powietrza zewnętrznego jeszcze przed właściwą chłodnicą. Następnie powietrze przepływa już przez właściwą chłodnicę o temperaturze powierzchni niższej od temperatury punktu rosy powietrza nawiewanego. W wyniku czego z powietrza zostaje wykroplona wilgoć. Uzyskane w ten sposób osuszone powietrze jest często za zimne aby nawiewać je do pomieszczeń, więc kierowane jest na sekcję ogrzewania wtórnego rurki ciepła, gdzie zostaje

ogrzone do wymaganej temperatury za pomocą ciepła pobranego wcześniej w sekcji chłodzenia wstępnego. Schemat tego procesu przedstawiony jest na rysunku 13.



Rys. 12. Wykorzystanie rurek ciepła do osuszania powietrza źródło: www.spc coils.co.uk

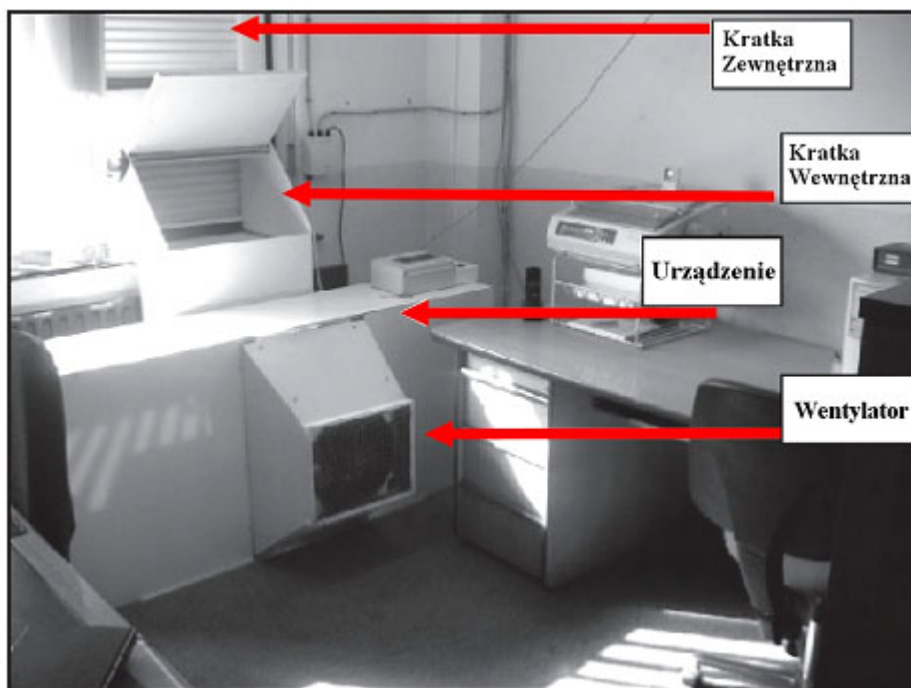
Cały proces, czyli chłodzenie wstępne i późniejsze dogrzewanie jest całkowicie pasywny i odbywa się bez żadnych dodatkowych źródeł energii i zdolny jest usunąć 50-100% więcej wilgoci niż standardowe systemy klimatyzacji. Dlatego wymienniki ciepła typu rurka ciepła są szeroko stosowane w centralach klimatyzacyjnych przystosowanych do pracy w środowiskach o dużej zawartości wilgoci takich jak hale basenowe, czy hale produkcyjne z procesami technologicznymi powodującymi powstawanie dużej ilości wilgoci [8].



Rys. 13. Schemat wykorzystania rurki ciepła do osuszania powietrza źródło: www.smud.apogee.net

Rurki ciepła zastosowane w pasywnym systemie chłodzenia powietrza odciążającym systemy klimatyzacyjne

System ten bazuje na wykorzystaniu rurek ciepła do przekazywania ciepła pomiędzy powietrzem, a materiałami zmiennofazowymi (Phase Change Materiale, PCM). Podczas nocy chłodne powietrze zewnętrzne jest używane do „zamrażania” materiałów zmiennofazowych (PCM), natomiast podczas dnia ciepło jest odbierane z powietrza w pomieszczeniu, co powoduje „roztapianie” materiałów zmiennofazowych (PCM). Cykl ten jest powtarzany w systemie dobowym. Decydującym procesem jest tutaj transfer ciepła pomiędzy powietrzem, a materiałami zmiennofazowymi. Współczynniki wnikania i przewodzenia ciepła muszą być wysokie, ze względu na małe różnice temperatur pomiędzy powietrzem, a „PCM” (Zazwyczaj różnica ta nie przekracza 60C). Głównym problemem w tego typu urządzeniach jest uzyskanie wymaganego transferu ciepła do, ale także od materiałów zmiennofazowych, a wynika to z faktu, iż materiały zmiennofazowe zasadniczo zachowują się jak ciało stałe i transfer ciepła poprzez przewodzenie jest praktycznie jedynym rozwiązaniem. Ponadto z powodu zapachów i zagrożeń dla zdrowia bezpośredni kontakt pomiędzy powietrzem, a materiałami zmiennofazowymi jest niepożądany. Użycie rurek ciepła jako elementów pośrednich do efektywnego transportu ciepła pomiędzy powietrzem a „PCM” z konwekcją wymuszoną po stronie powietrza pozwala na zamknięcie i odizolowanie materiałów zmiennofazowych od powietrza [8].



Rys. 14. Pasywny system chłodzenia z rurkami ciepła źródło: Adrian Ł.: „Wybrane aplikacje rurek ciepła w klimatyzacji i inżynierii budowlanej”, Czasopismo „Chłodnictwo i Klimatyzacja”, nr 6/2010. ISSN 1425-9796.

Pojedynczy moduł urządzenia pasywnego chłodzenia powietrza składa się z pojemnika z materiałem zmiennofazowym (PCM), w którym osadzony jest jeden koniec rurki ciepła, natomiast jej drugi koniec jest omywany powietrzem. Obydwa końce rurki ciepła posiadają rozwiniętą powierzchnię wymiany ciepła poprzez uźbrowanie. Kierunek przepływu ciepła zmienia się w przypadku dnia i nocy, więc rurka ciepła jest zaprojektowana na dwustronne działanie. Moduły są zainstalowane w wolnostojącym urządzeniu, które można umieścić zarówno w nowych jak i istniejących budynkach. Siedem modułów zainstalowanych w urządzeniu, daje utajoną wydajność chłodzenia na poziomie 4 kWh, tzn. około 500W w 8h. Urządzenie jest wyposażone w wentylator, który umieszczony jest centralnie i przetłacza powietrze przez rurki ciepła. W nocy powietrze dostarczane jest do rurek ciepła poprzez kanał wentylacyjny wyposażony w automatycznie zamykaną przepustnicę odcinającą dopływ powietrza zewnętrznego. Podczas dnia przepustnica ta jest zamknięta i powietrze wyciągane jest bezpośrednio z pomieszczenia również poprzez automatycznie zamykaną przepustnicę. Gorące powietrze z pomieszczenia po ochłodzeniu się na rurkach ciepła wraca do pomieszczenia. Omawiane urządzenie przedstawione jest na rysunku 14 [8]. Badania omawianego urządzenia zostały przeprowadzone w „EcoHouse” na Uniwersytecie Nottingham i w „Building Product Design Ltd” w Pinxton. Na uniwersytecie Nottingham zamontowano urządzenie w nieużytkowanym pomieszczeniu o kubaturze 16m³. Użytkowanie pomieszczenia zostało zasymulowane poprzez użycie kontrolowanych źródeł ciepła. Ocena działania urządzenia została przeprowadzona przy dość ekstremalnych warunkach z zyskami ciepła powyżej 50 W/m². Natomiast pomieszczenie w Pinxton było użytkowanym pomieszczeniem biurowym o kubaturze 26m³ i obrazowało realne robocze środowisko biurowe. W pomieszczeniu znajdował się jeden zestaw komputerowy, jedna lampa biurowa oraz trzy 60W lampy punktowe. Pomieszczenie posiadało okno na stronę południową i pracował w nim jeden człowiek. Badania wykazały, że system jest zdolny do utrzymania komfortowej temperatury w pomieszczeniu i szybko reaguje na zmiany zysków ciepła. W szczególności wysoka pojemność cieplna materiałów zmiennofazowych (PCM) i efektywny transfer ciepła w urządzeniu pozwoliły utrzymywać temperaturę na stałym, zadowalającym poziomie, tak jak w systemach klimatyzacyjnych. Jest to

bardzo imponujące biorąc pod uwagę fakt, że jest to system zasadniczo pasywny, gdyż jedyną zewnętrzną energią dostarczaną do urządzenia jest energia, którą zużywa wentylator. Aczkolwiek zyski w postaci chłodnego powietrza są znacząco wyższe od energii zużywanej przez wentylator. Rezultaty badań dowodzą, że system działa i oferuje znacznie większe korzyści niż inne pasywne systemy wspomagania klimatyzacji. Badania w użytkowanym pomieszczeniu w Pinxton również dostarczyły subiektywnych opinii użytkowników. Użytkownicy czuli poprawę ogólnej świeżości powietrza w pomieszczeniu i potwierdzili utrzymywanie temperatury przez system w komfortowym zakresie w ciągu całego dnia, nie odczuwając przy tym żadnego dyskomfortu związanego z pracą urządzenia [8].

Zalety stosowania rurek ciepła w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych Wymienniki ciepła bazujące na mechanizmach funkcjonowania rurek ciepła posiadają wiele zalet umożliwiających wykorzystanie ich do obróbki powietrza w systemach wentylacji i klimatyzacji. Do głównych ich zalet należą:

- wysoka sprawność uzyskana bez dodatkowych źródeł zasilania
- brak elementów ruchomych, czego skutkiem jest mała awaryjność i wysoka trwałość
- całkowicie wyeliminowane zanieczyszczenia krzyżowe przy odzysku ciepła dzięki pełnemu odizolowaniu powietrza nawiewanego od usuwanego
- duża różnorodność kształtów i wielkości przyczyniająca się do możliwości stosowania ich również w urządzeniach kompaktowych i mobilnych
- pełna odwracalność wymienników ciepła
- możliwość łatwego dostępu i czyszczenia [8].

3.2. Pozostałe aplikacje rurek ciepła

Rurki ciepła dzięki swojej wysokiej efektywności oraz możliwości stosowania w szerokim zakresie temperatur znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Oprócz aplikacji opisanych w poprzednich rozdziałach należą do nich:

- produkcja, montaż i magazynowanie komponentów elektronicznych
- produkcja i magazynowanie leków i substancji chemicznych
- produkcja i magazynowanie wyrobów cukierniczych
- sale operacyjne w szpitalach
- centrale telefoniczne i stacje przekaźnikowe
- technologie kosmiczne.

Dowolność kształtu i wielkości oraz wysoka efektywność rurek ciepła przyczyniły się do wykorzystywania ich w systemach chłodniczych i grzewczych na całym świecie. Na uwagę zasługują:

- chłodzenie oleju w silnikach motocyklowych za pomocą prętowych rurek ciepła (Japonia)
- panele ogrzewania podłogowego w łazienkach (Japonia)
- chłodzenie urządzeń do odwiertów (Rosja)
- chłodzenie łopatek turbin gazowych (Czechy)
- chłodzenie procesów półautomatycznego spawania (Rosja)
- zapobieganie oblodzenia stawów rybnych i ozdobnych zbiorników wodnych (Rumunia)
- chłodzenie łożysk w pompach wody (Wielka Brytania)
- chłodzenie elektrod w akceleratorach cząstek (Wielka Brytania) [8].

Literatura:

[1] David Anthony Reay, Peter A. Kew.: „Heat Pipes. Theory, Design and Application” Butterworth-Heinemann, 2006.

[2] Adrian Ł.: „Budowa i zasada działania rurki ciepła”, Czasopismo: „Chłodnictwo i

Klimatyzacja”, nr 3/2010. ISSN 1425-9796

- [3] OCHTERBECK J.M.: „Heat Pipes”. Heat Transfer Handbook. John Wiley & Sons, INC, 2003.
- [4] Andrzej Jedlikowski, Maciej Skrzycki, Maciej Besler „Wpływ struktur porowatych oraz cieczy roboczych na sprawność rur cieplnych w wentylacji i klimatyzacji”.
- [5] R. C. Prager, M. Nikitkin, B. Cullimore.: „Heat Pipes”. Spacecraft thermal control handbook. Aerospace Corporation 2002.
- [6] Przemysław Jakóbowski „Budowa, działanie i zastosowanie rurki ciepła”
- [7] Myer Kutz: „Energy and Power”. Mechanical Engineers' Handbook Third Edition. John Wiley & Sons, INC, 2006.
- [8] Adrian Ł.: „Wybrane aplikacje rurek ciepła w klimatyzacji i inżynierii budowlanej”, Czasopismo „Chłodnictwo i Klimatyzacja”, nr 6/2010. ISSN 1425-9796
- [9] Materiały informacyjne firmy „Klimor”
- [10] www.plantengineering.com
- [11] www.air2energy.com.au
- [12] www.spcoops.co.uk
- [13] www.smud.apogee.net
- [14] www.heatpipe.com