

Budowa, działanie i zastosowanie rurki ciepła

Część 1

1.1. Budowa i zasada działania „rurki ciepła”

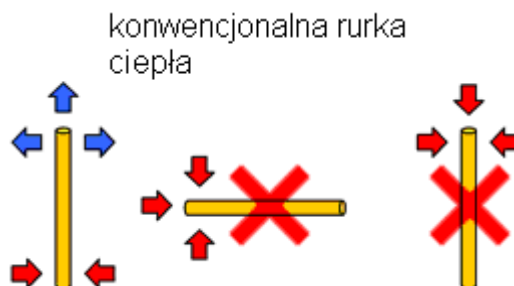
Rurka ciepła znana jest w technice od lat 40-tych ubiegłego wieku. Została ona wynaleziona w 1944 roku przez **Gaugler’a**, jednak nie była powszechnie stosowana aż do roku 1964, kiedy to **Grover** i jego koledzy z laboratorium w Los Alamos zastosowali ją w projektach dla NASA [1]. To właśnie Grover nazwał to urządzenie „**heat pipe**”, czyli rurka ciepła. W różnych publikacjach w Polsce oprócz nazwy „**rurka ciepła**” można spotkać się z nazwą „**rura ciepła**”.

Rurka ciepła jest to proste technicznie urządzenie, o niezwykle wysokiej efektywności, służące do transportu ciepła. Cechą charakterystyczną tego urządzenia jest to, że może ono odebrać strumień ciepła o dużej gęstości z ośrodka chłodzonego i przekazać go do górnego źródła ciepła. Posiada możliwość pracy w dużym zakresie temperatur, od temperatur kriogenicznych (-243°C) do temperatur wysokich rzędu 2000°C . W praktyce może przybierać szerokie zakresy wymiarów geometrycznych [3]:

- średnice od 0,0001 do 0,5 m;
- długości od 0,1 do 10 m.

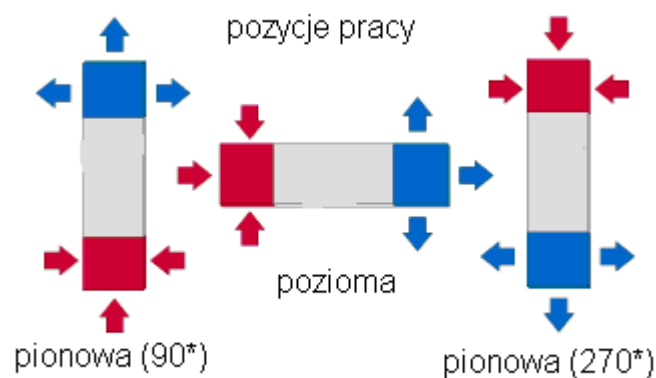
W zależności od budowy wewnętrznej, rurki ciepła można podzielić na [2]:

- **rurki grawitacyjne** (konwencjonalne) – ruch cieczy transportującej ciepło odbywa się pod wpływem sił grawitacyjnych,
- **rurki z knotem** (niekonwencjonalne) – ruch cieczy transportującej ciepło odbywa się pod wpływem sił kapilarnych, osmotycznych lub elektrostatycznych.

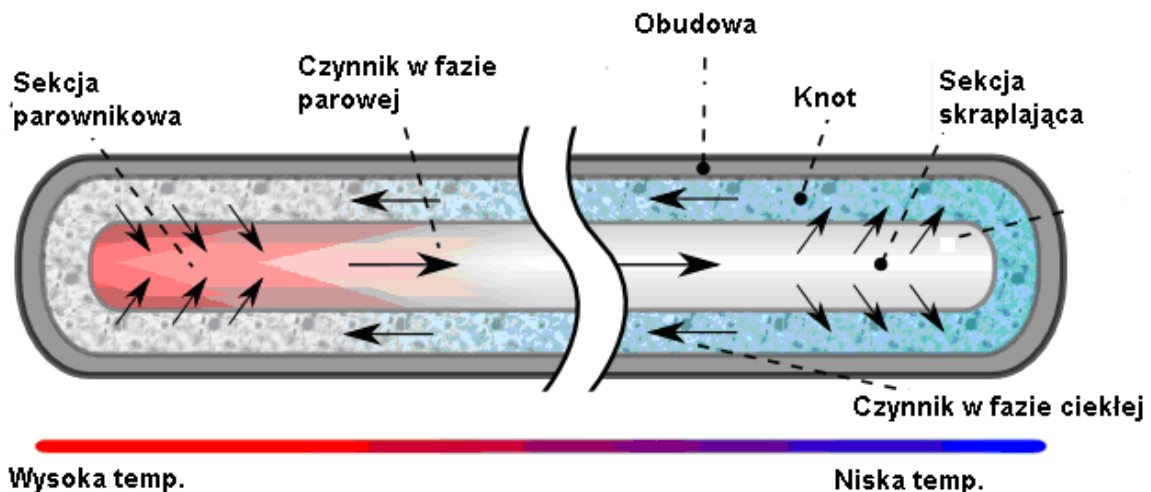


Rys. 1. Sposoby prawidłowego i nieprawidłowego montażu rurki ciepła w wykonaniu konwencjonalnym, wg [10].

Rurki ciepła mogą być zorientowane w pionie, w poziomie lub pod dowolnym kątem. Przyjmuje się, że dla rurek konwencjonalnych istnieje minimalny kąt, przy którym działają one jeszcze poprawnie i wynosi on 8° [2]. Na rysunkach 1 i 1 przedstawiony jest prawidłowy sposób montażu rurki ciepła w wykonaniu grawitacyjnym oraz niekonwencjonalnym (z knotem). Jak widać z obu rysunków, rurka konwencjonalna nie może pracować w pozycji poziomej, a także w pozycji odwróconej o 180° . Alternatywą dla rurki konwencjonalnej jest rurka z knotem, która może być montowana w każdej pozycji, w której nie ma zakłóceń w przepływie ciepła.



Rys. 2. Sposoby montażu rurki ciepła w wykonaniu niekonwencjonalnym (z knotem), wg [10].

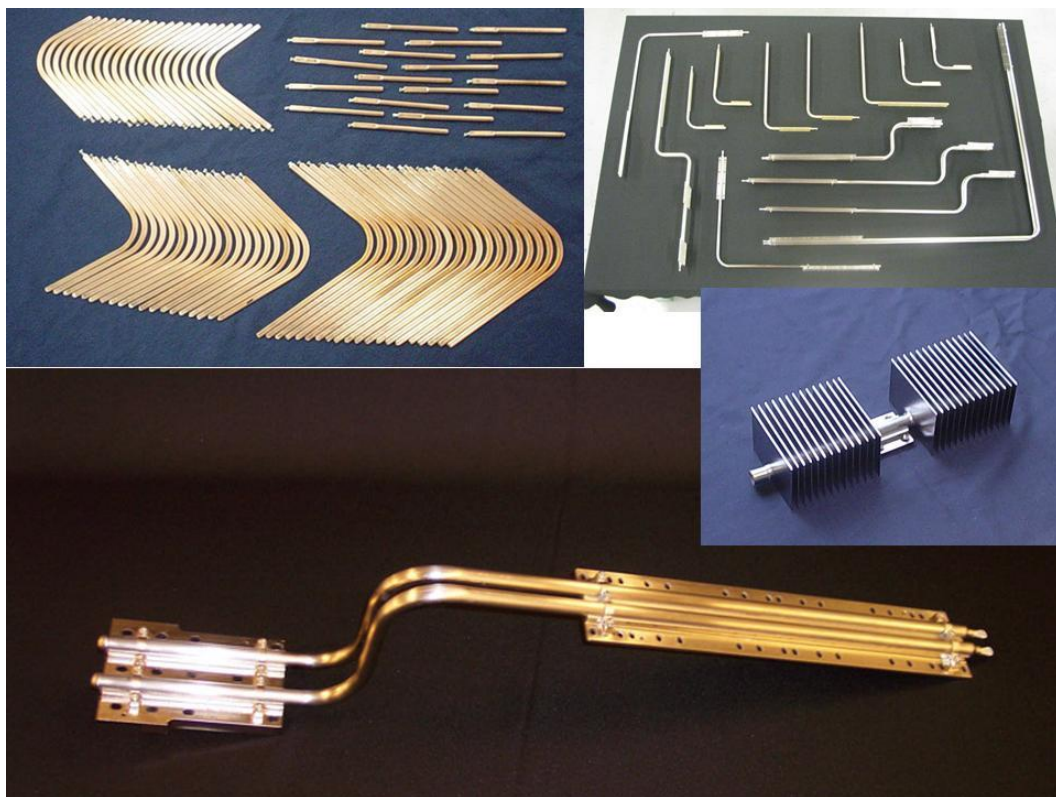


Rys. 3. Budowa i zasada działania konwencjonalnej rurki ciepła, wg [11].

W swojej konwencjonalnej formie rurka ciepła, to zamknięta z dwóch stron rura cienkościenna. Wykonana ona może być z miedzi lub aluminium. Płynem roboczym

wypełniającym rurkę jest zazwyczaj amoniak, alkohol etylowy lub rtęć. Przed wypełnieniem jej czynnikiem, w rurce wytwarzana jest próżnia. Wewnątrz rurki znajduje się materiał porowaty tzw. **knot**, który jest nasycony fazą ciekłą czynnika niskowrzącego. Pozostałą objętość rurki wypełnia jego faza parowa. Ciepło jest absorbowane z dolnego źródła w części zwanej sekcją parownikową, w której następuje odparowanie ciekłego czynnika. Wywołana w ten sposób różnica ciśnień prowadzi do tego, że czynnik w fazie parowej przemieszcza się do sekcji skraplającej, gdzie ulega skropleniu i oddaje ciepło do górnego źródła ciepła. W rurkach grawitacyjnych skroplona ciecz w postaci filmu powraca do sekcji parownikowej pod wpływem sił grawitacyjnych. Jeżeli rurka wyposażona jest w knot, to jego kapilarna struktura powoduje powrót czynnika do sekcji parownikowej i ponowne jego odparowanie (rurka może pracować nie tylko w pozycji pionowej). Procesy parowania i skraplania odbywają się tak długo, jak długo istnieje różnica temperatur między obydwoma końcami rurki.

Budowę typowej rurki ciepła przedstawia rysunek 3. Produkowane są one również w różnych kształtach w zależności od potrzeb i zastosowania (rys. 4). Interesujące są tzw. „płaskie – mini” rurki ciepła, wykorzystywane między innymi do schładzania podzespołów elektronicznych w komputerach (rys. 5).



Rys. 4. Przykładowe kształty rurek ciepła, wg [4].

1.1.1. Płyny robocze w rurkach ciepła

Zdolność rurki ciepła do transportu ciepła zależy przede wszystkim od termodynamicznych i termofizycznych właściwości płynu wypełniającego rurkę. Praca rurki jest możliwa w przedziale temperatur wyznaczonym z jednej strony punktem potrójnym, z drugiej punktem krytycznym zastosowanego czynnika [3].



a) Flat Mini Heat Pipes (FMHP)



b) Heat Pipe Spreader (HPS)

Rys. 5 Rurki ciepła typu „płaskie – mini”, wg [5].

Tabela 1. Płyny robocze stosowane w niskotemperaturowych rurkach ciepła, wg [6].

Płyn roboczy	Zakres stosowanych temperatur [°C]
Hel	-271 - -269
Azot	-203 - -160
Amoniak	-60 – 100
Propan – izobutan (30/70)	-20 – 100

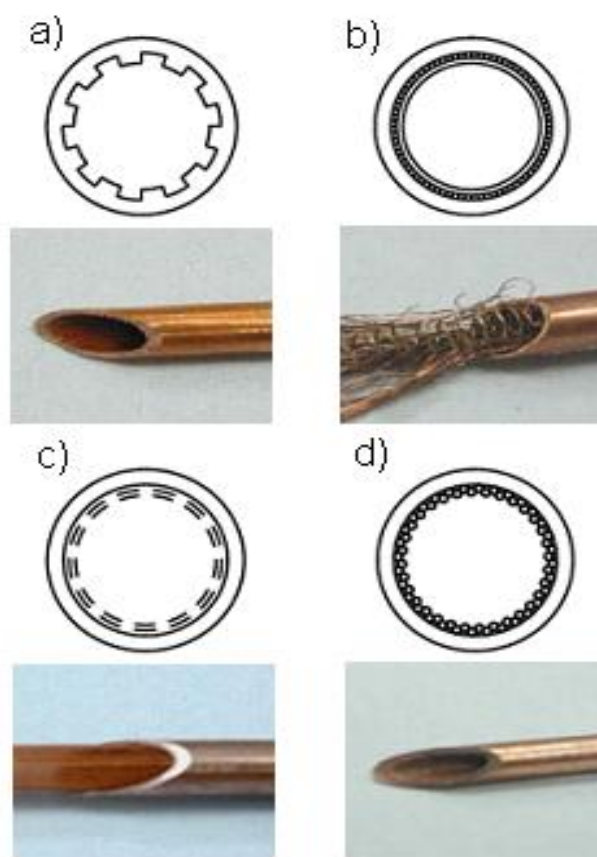
W zależności od rodzaju i zastosowania, do rurki ciepła dobiera się odpowiedni czynnik. Rurki projektowane są również do pracy z substancjami kriogenicznymi, w których temperatury dochodzą do -271°C aż po ciekłe metale. Z tego względu urządzenia te można

podzielić w zależności od czynnika z jakim pracują na [1]:

- rurki z czynnikiem kriogenicznym (tlen, azot, wodór);
- rurki pracujące w warunkach umiarkowanych (woda, freony, amoniak);
- rurki napełnione ciekłymi metalami (srebro, lit, sód, potas).

W tabeli 1 podano kilka rodzajów płynów roboczych stosowanych w niskotemperaturowych rurkach ciepła oraz zakres temperatur ich stosowania.

1.1.2. Knot – budowa i struktura

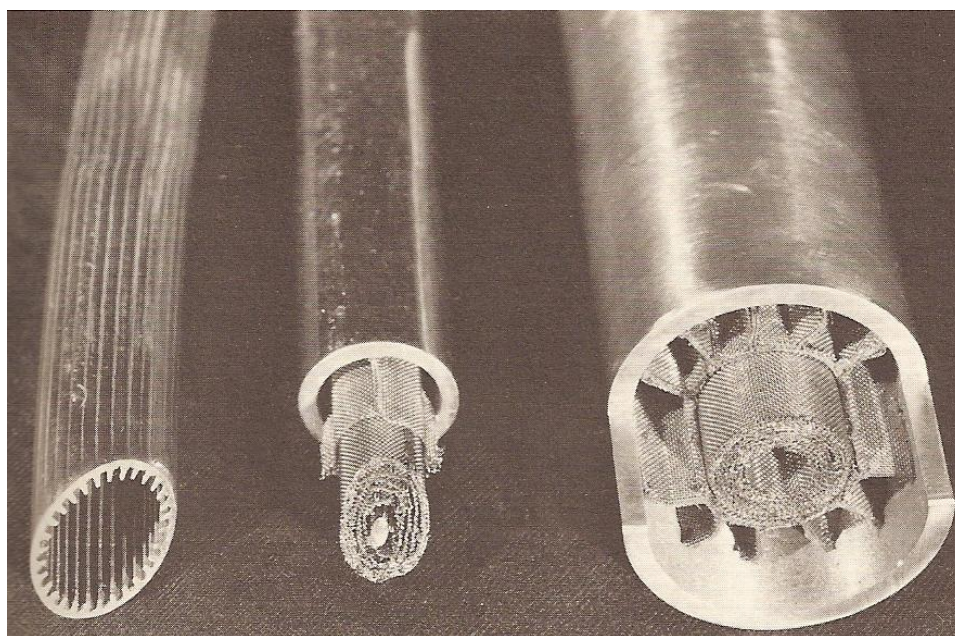


Rys. 6. Przekrój poprzeczny rurki ciepła z widoczną strukturą kłót, wg [9]:
a) kłót w formie żłobionych osiowo rowków;
b) kłót „zwijany”,
c) kłót w formie sita;
d) kłót zbudowany ze sproszkowanego pyłu metalowego.

Przeznaczeniem kłót jest:

- zapewnienie możliwości powrotu skroplonego czynnika;
- wytworzenie na powierzchni rozdziału pomiędzy powierzchnią porów kłót i skroplonego czynnika wymaganej wartości ciśnienia „kapilarnego”, potrzebnego do przepompowania go do sekcji parowania rurki ciepła.

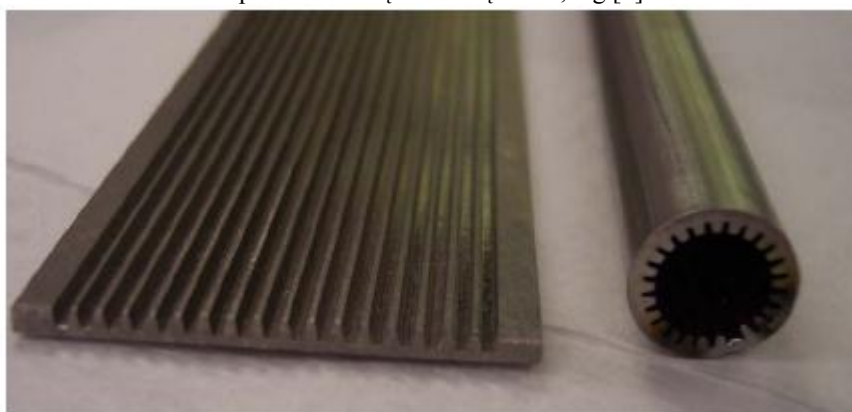
Knoty stosowane w rurkach ciepła można podzielić na dwie klasy: o strukturze jednorodnej i strukturze kompozytowej, czyli zbudowanej z dwóch lub więcej materiałów. Rysunek 6 przedstawia kilka rodzajów knotów stosowanych w jednorodnych rurkach ciepła. Na rysunku 6a widoczny jest knot wykonany w formie żłobionych osiowo rowków. Ten typ stosowany jest w rurkach kriogenicznych, przeznaczonych do temperatur umiarkowanych i pracujących z ciekłymi metalami. Na rysunku 6c widoczny jest knot wykonany w formie sita. Z kolei rysunek 6d przedstawia knot zbudowany ze sproszkowanego pyłu metalowego. Knoty te charakteryzują się bardzo małymi porami. Na rysunkach 7a i 7b widoczne są różne rodzaje rurek ciepła oraz ich knoty, natomiast rysunek 7c pokazuje w jaki sposób zbudowana jest rurka ciepła z knotem wykonanym w formie osiowo żłobionych rowków. Prefabrykatem jest prostokątny arkusz płyty miedzianej wzdłuż której wyfrezowane są odpowiednie rowki. Następnie arkusz ten jest zwijany w kształcie walca, a miejsce połączenia krawędzi zostaje odpowiednio zespolone.



Rys. 7a. Przekroje poprzeczne różnych rodzajów rurek ciepła z przedstawioną strukturą knota, wg [1].



Rys. 7b. Przekroje poprzeczne różnych rodzajów rurek ciepła z przedstawioną strukturą knota, wg [4].



Rys. 7c. Rozwinięcie rurki ciepła z osiowo żłobionymi rowkami, wg [4].

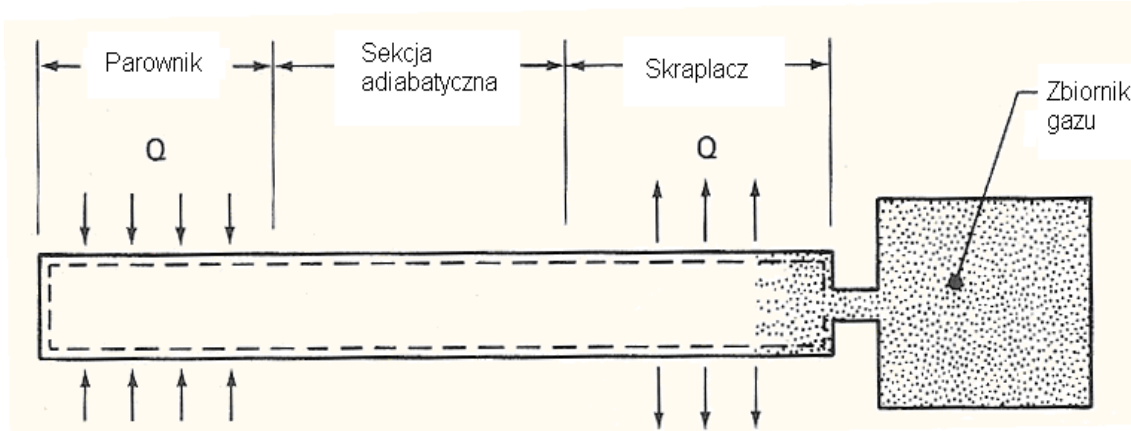
1.2. Sposoby „regulacji” wydajności rurki ciepła

Jeżeli w rurce ciepła zapas płynu roboczego jest wystarczający, ale nie nadmierny, wówczas ciepło może być transportowane już przy niewielkiej różnicy temperatur. Rurka nie ma wtedy szczególnego zakresu temperatur pracy, a jej regulacja odbywa się przez warunki jakie panują w obrębie dolnego i górnego źródła ciepła. Jednak w niektórych przypadkach pożądane jest utrzymywanie stałych wartości strumienia oddawanego ciepła, nawet podczas wahań zewnętrznych warunków termicznych. Generalnie kontrola wydajności rurki ciepła może odbywać się na trzy sposoby [1], a są to:

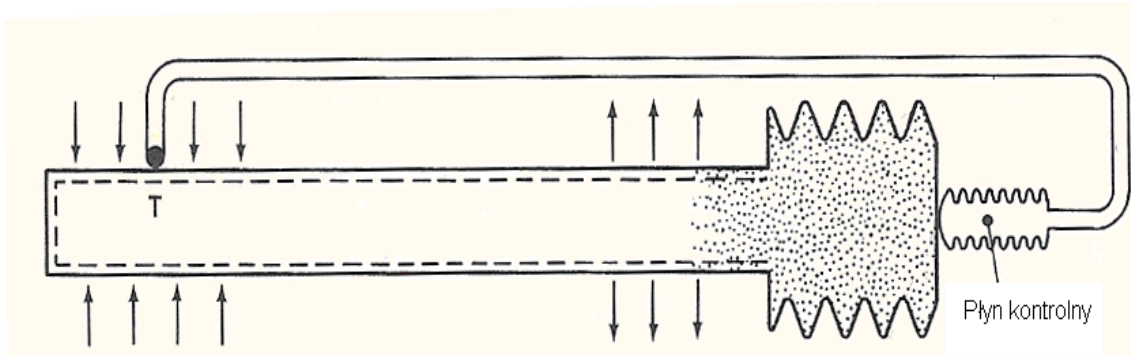
- blokowanie skraplania przez zastosowanie gazu nie skraplającego się;
- zalewanie sekcji skraplacza przez nadmiar ciekłego czynnika;

- kontrolowanie przepływu pary przez jej dławienie.

1.2.1. Rurka ciepła z gazem nie skraplającym się



Rys. 8. Schemat ideowy rurki ciepła o regulowanej wydajności za pomocą gazu nie skraplającego się, wg [1].



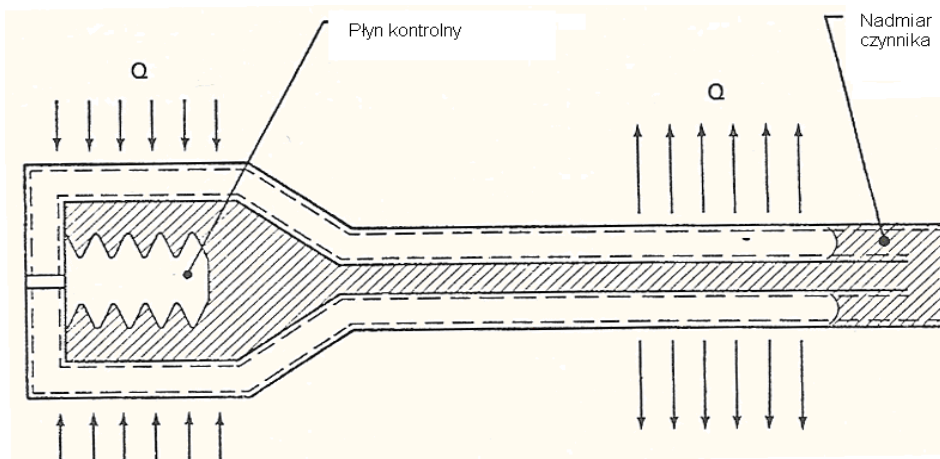
Rys. 9. Schemat rurki ciepła z płynem kontrolnym (sprężenie zwrotne), wg [1].

Na rysunku 8 przedstawiono schemat ideowy rurki ciepła z zasobnikiem gazu nie skraplającego się. Gaz ten zmieniając swą objętość może zmniejszać lub zwiększać czynną powierzchnię sekcji skraplającej rurki. Objętość gazu nie skraplającego się może być kontrolowana przez „samą rurkę” (kontrola przez ciśnienie pary czynnika) lub przez zastosowanie systemu sprzężenia zwrotnego z płynem kontrolnym (rys. 9).

1.2.2. Rurka ciepła kontrolowana nadmiarem ciekłego czynnika zalewającego skraplacz

Podczas pracy rurki ciepła, nadmiar fazy ciekłej płynu niskowrzącego jest „omiatany” przez parę w sekcji skraplacza, co przyczynia się do zmniejszenia jej czynnej długości.

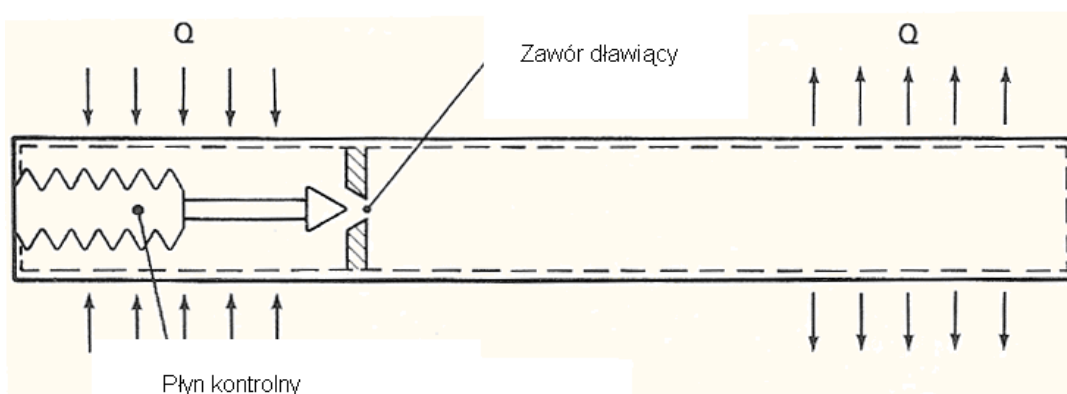
System taki pokazano na rysunku 10. Zwiększenie strumienia ciepła \dot{Q} dopływającego do rurki ponad wartość zadaną, powoduje rozszerzanie płynu kontrolującego, a tym samym zalanie sekcji skraplania przez nadmiar czynnika.



Rys. 10. Rurka ciepła kontrolowana nadmiarem cieplego czynnika zalewającego skraplacz, wg [1].

1.2.3. Rurka ciepła kontrolowana za pomocą zaworu dławiącego

Zasada działania rurki ciepła z dławieniem pary opiera się na zjawisku dławienia przepływu pary pomiędzy sekcją parowania i sekcją skraplania. Przyczynia się to do powstania różnicy ciśnień między tymi dwiema sekcjami, co automatycznie przekłada się na różnicę temperatur.

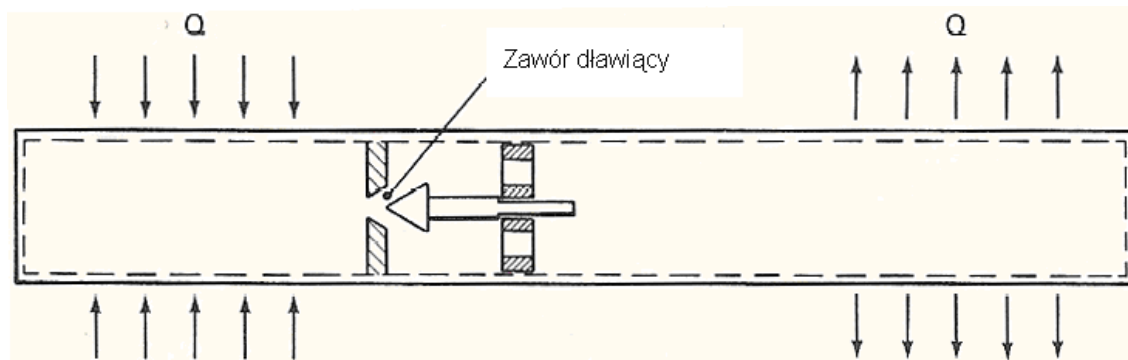


Rys. 11. Rurka ciepła z zaworem dławiącym i płynem kontrolującym, wg [1].

Na rysunku 11 przedstawiono schemat ideowy rurki ciepła, w której zastosowano zawór dławiący. Ciepło zaabsorbowane z dolnego źródła ciepła powoduje podwyższenie temperatury sekcji parownika, co przekłada się na podgrzanie płynu kontrolującego, a tym samym na zamknięcie się zaworu dławiącego. Jeżeli temperatura się obniży, to zawór ten

zostanie otwarty. Zaletą tego rozwiązania w porównaniu do przedstawionych w punktach 1.2.1 i 1.2.2 jest to, że nie wyłącza z pracy żadnej części sekcji skraplającej rurki ciepła.

Rysunek 12 pokazuje schemat ideowy rozwiązania, w którym zawór dławiący jest sterowany warunkami panującymi w części skraplającej. Przepływ pary z sekcji parownikowej do sekcji skraplającej jest nieograniczony, natomiast przepływ w drugą stronę powoduje zamykanie zaworu dławiącego.



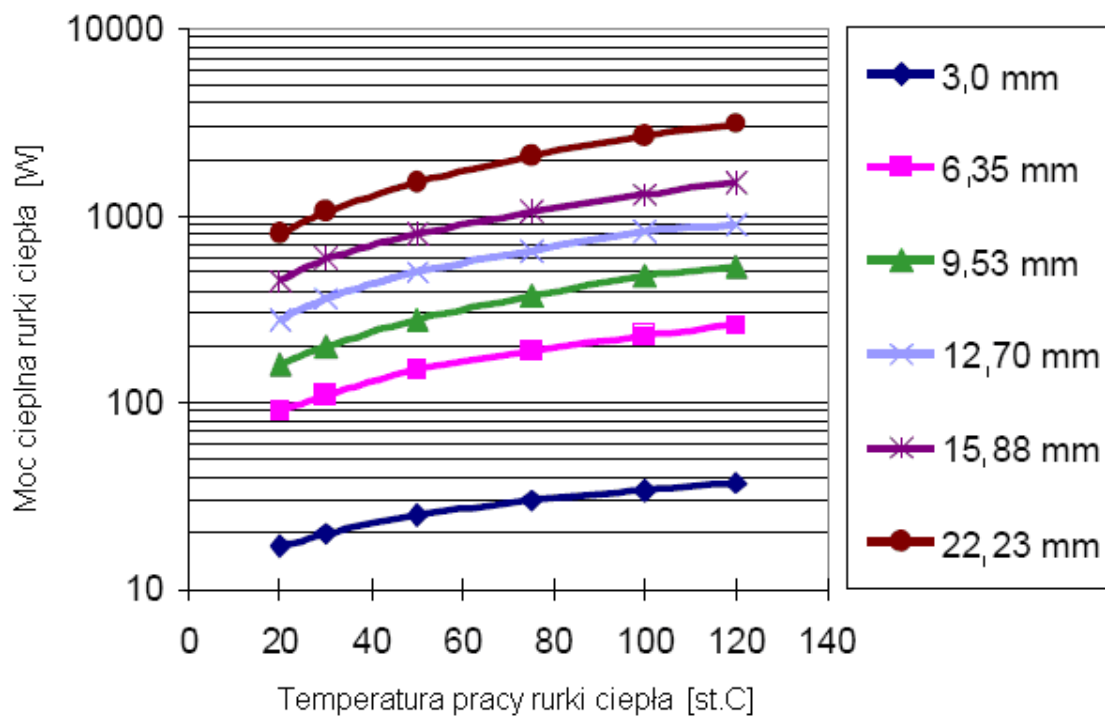
Rys. 12. Rurka ciepła z zaworem dławiącym, wg [1].

2. Zasady doboru rurek ciepła

Rurki ciepła znalazły wiele zastosowań jako elementy grzejne lub chłodzące. Niezależnie od funkcji jaką pełnią, muszą one być dobrane w sposób zapewniający ich optymalną pracę. Dobierając rurkę należy kierować się podanymi niżej zasadami [2].

1. Zbadać i wyznaczyć następujące parametry pracy:
 - a) obciążenie cieplne i geometrię źródła ciepła;
 - b) możliwości ujścia ciepła, orientacyjny dystans między źródłami ciepła;
 - c) profil temperatury górnego i dolnego źródła ciepła oraz otoczenia;
 - d) warunki otoczenia (np. istnienie czynników powodujących korozję).
2. Wybrać materiał rurki ciepła, strukturę knota i płyn roboczy:
 - a) wybrać płyn roboczy odpowiedni dla danego zastosowania;
 - b) wybrać materiał, z którego ma być zbudowana rurka ciepła, kompatybilny z zastosowanym płynem roboczym;
 - c) dobrać strukturę knota w zależności od orientacji pracy rurki.
3. Dobrać odpowiednią długość, rozmiar oraz kształt rurki ciepła.

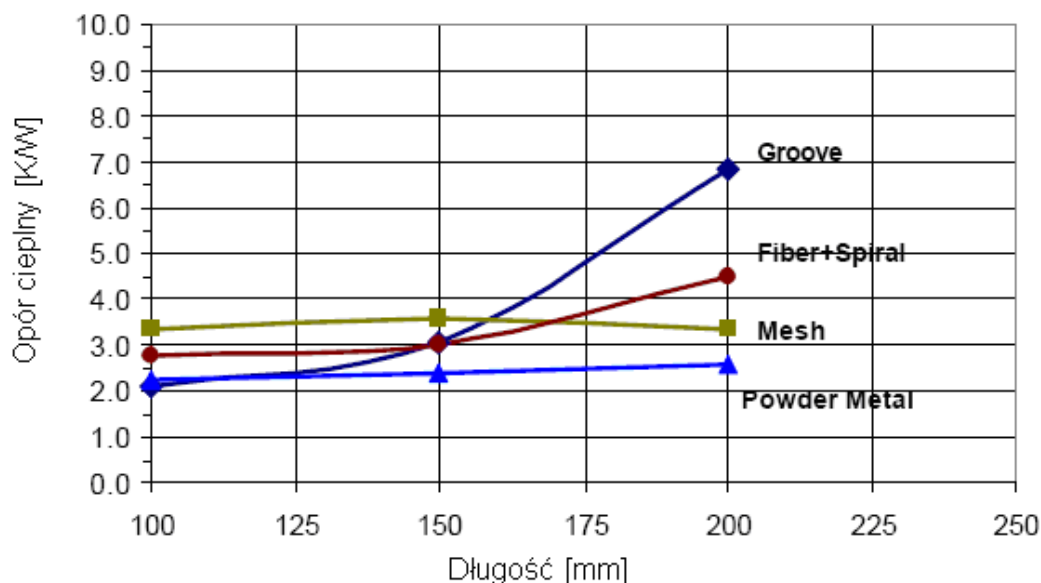
Większość producentów rurek ciepła udostępnia gotowe charakterystyki, dzięki którym można w łatwy sposób dobrać wstępnie urządzenie. Na rysunku 13 przedstawiono taką charakterystykę sporządzoną przez firmę Enerton [8], producenta rurek ciepła ze Stanów Zjednoczonych. Rurki te wykonane są z miedzi, napełnione wodą i pracują w pozycji pionowej. Największe moce uzyskiwane są z rurek o średnicy 22,23 mm. Zakres temperatury pracy wyznaczony jest przez właściwości fizyczne płynu roboczego, w tym przypadku wody i wynosi od 20 do 120°C.



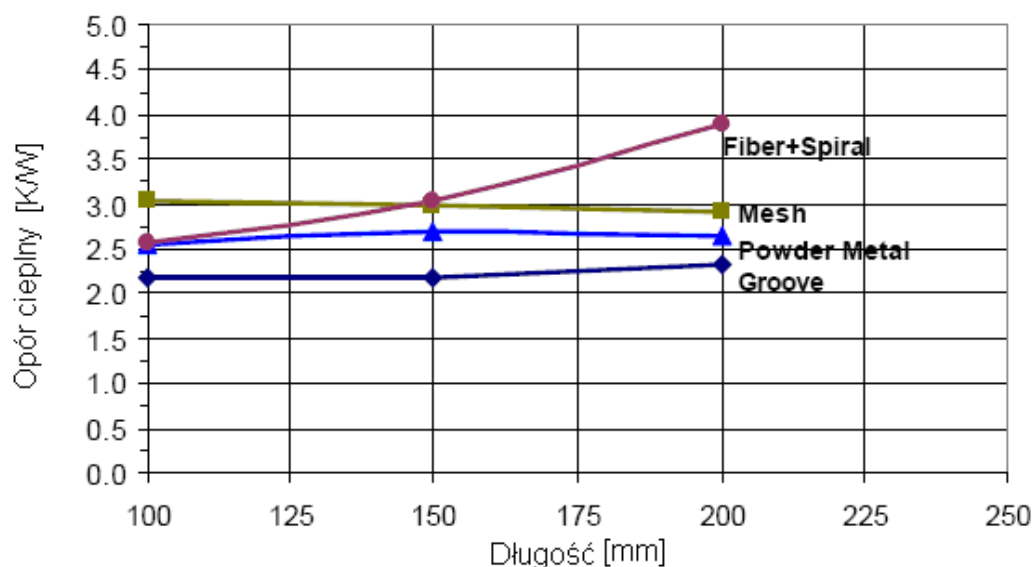
Rys. 13. Charakterystyka rurek ciepła firmy Enerton, wg [8].

Producent podaje również charakterystyki rurek, z których można odczytać, jak zmienia się opór cieplny rurki w zależności od jej długości, przy dwóch pozycjach pracy (poziomej i pionowej) z różnymi rodzajami knota (rys. 14). Rurka ciepła z knotem rowkowym (groove) ma najmniejszą kapilarność (prędkość z jaką płyn roboczy przemieszcza się ze skraplacza do parownika poprzez knot) spośród czterech, lecz pracuje najlepiej pod działaniem sił grawitacji, gdzie skraplacz jest umiejscowiony nad parownikiem [8].

a)

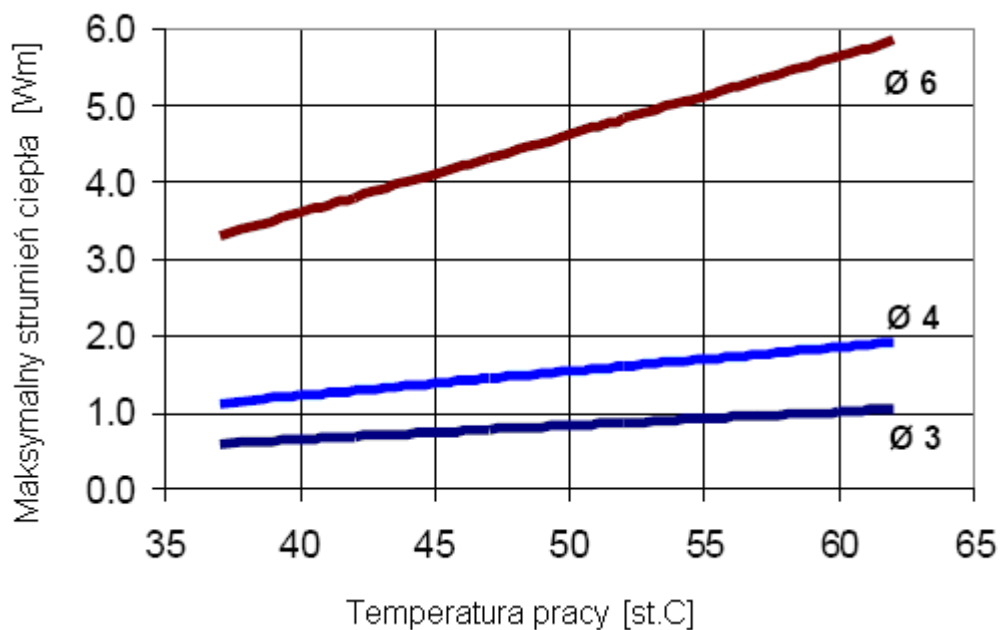


b)

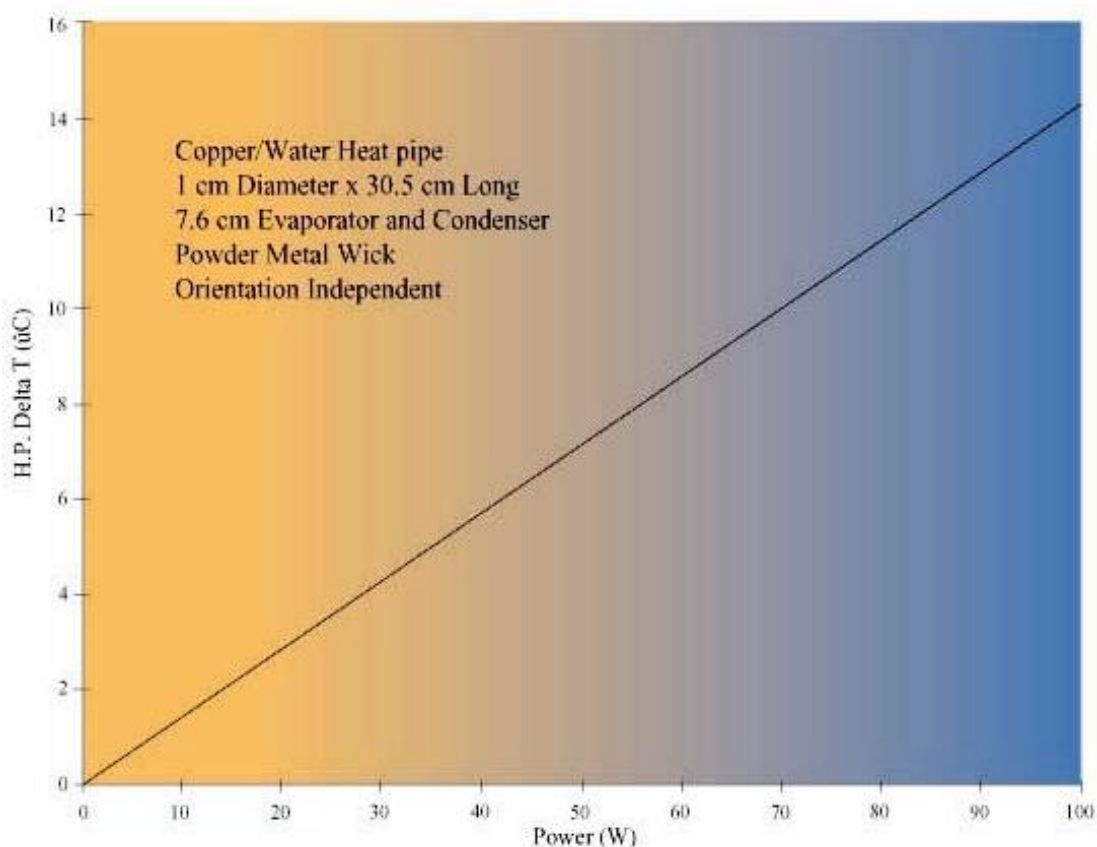


Rys. 14. Charakterystyka rurek ciepła przedstawiająca ich opór termiczny w zależności od długości i rodzaju knota, wg [8]: a) pozycja pracy pozioma, b) pozycja pracy pionowa.

Prędkość przepływu pary z parownika do skraplacza jest zależna od różnicy ciśnień między nimi. Nie bez znaczenia jest średnica i długość rurki. W rurkach o większej średnicy przekrój poprzeczny jest również większy, dzięki czemu może być transportowany większy strumień pary z parownika do skraplacza niż w rurce o mniejszej średnicy. Rysunek 15 ilustruje porównanie rurek ciepła o różnych średnicach i ich możliwości transportu ciepła. Długość rurki ma również wpływ na jej wydajność; im jest ona dłuższa, tym transportuje mniej ciepła [8].



Rys. 15. Wydajność ciepła rurek ciepła w zależności od ich średnicy, wg [8].



Rys. 16. Przykładowa charakterystyka rurki ciepła przedstawiająca zmianę jej wydajności w zależności od różnicy temperatur między sekcją skraplacza i parownika, wg [7].

Możliwe jest również obliczenie parametrów i wymiarów rurek ciepła, jednak jest to

zadanie bardzo skomplikowane, a w polskiej literaturze brak jest informacji na ten temat oraz odpowiednich algorytmów obliczeniowych. Dobór rurki do określonych celów może zostać przeprowadzony w oparciu o gotowe charakterystyki produkowanych rurek podane przez producentów. Najlepszą do tego celu jest charakterystyka, w której przedstawiona jest zmiana wydajności rurki ciepła w zależności od różnicy temperatur pomiędzy jej sekcją skraplacza i parownika. Przykład takiej charakterystyki przedstawiony jest na rysunku 16. Została ona sporządzona dla rurki wykonanej z miedzi napełnionej wodą jako płynem roboczym o średnicy 1 cm i długości 30,5 cm. Sekcje skraplacza i parownika mają długość po 7,6 cm każda.

Niezwykle ważnym elementem przy doborze rurek ciepła są ograniczenia dotyczące limitu transportu ciepła. Rurki mogą być projektowane i dobierane w zakresie wydajności od kilku watów do kilkunastu kilowatów, w zależności od potrzeb danego zastosowania. Maksymalna wydajność cieplna rurki ograniczona jest przez kilka czynników [2], a są to:

- szybkość z jaką rozchodzi się para z parownika do skraplacza ogranicza prędkość dźwięku;
- zjawisko unoszenia – tarcie pomiędzy płynem roboczym i parą, która przemieszcza się w przeciwnym kierunku;
- kapilarność (inaczej włoskowatość) – prędkość z jaką płyn roboczy przemieszcza się ze skraplacza do parownika poprzez knot;
- szybkość parowania – szybkość z jaką płyn roboczy osiąga temperaturę wrzenia.

3. Podsumowanie

Ogromną zaletą rurek ciepła jest brak w nich podzespołów ruchomych (np. pomp) potrzebnych do pracy rurki, które mogłyby ulec awarii. Dlatego urządzenie to jest praktycznie bezawaryjne, pod warunkiem, że nie zostanie uszkodzone mechanicznie. Jedynym zagrożeniem może być np. korozja materiału, z którego została wykonana rurka ciepła, jeżeli pracuje w niekorzystnych warunkach zewnętrznych. Drugą z zalet jest niski koszt użytkowania rurek ciepła, bowiem do ich pracy nie musi być dostarczona energia elektryczna. Nie wymagają obsługi bieżącej, ani skomplikowanego serwisu w trakcie użytkowania.

Z powyższych powodów rurki ciepła znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach życia, jak również w technice, gdzie bardzo dobrze sprawdzają się jako regulatory temperatury i systemy wydajnego chłodzenia. Można je spotkać w komputerach, projektach budowlanych, a nawet w przestrzeni kosmicznej. Oczywiście do każdego z tych zastosowań

należy dobrać odpowiednią rurkę ciepła, aby mogła efektywnie spełniać swoją funkcję użytkową i pracować bez zakłóceń.

Cdn

Bibliografia do części 1 artykułu:

- [1] Chi S. W.: *Heat pipe theory and practice*. Washington: Hemisphere Publ. Corp., 1976
- [2] Jakóbowski P.: *Studium projektowe wraz z oceną techniczną wykorzystania rurki ciepła do podgrzewania gruntu w niskotemperaturowych komorach chłodniczych*. Praca Dyplomowa Magisterska, Politechnika Gdańska, Wydz. Mechaniczny, 2007
- [3] Denys M., Królicki Z.: *Rury ciepła z mieszaniną zeotropową węglowodorów nasyconych a odzysk energii odpadowej*. „Chłodnictwo”, 2002, nr 11
- [4] www.1-act.com
- [5] www.cheresources.com
- [6] www.chlodnictwo.euro-media.pl
- [7] www.electronics-cooling.com
- [8] www.enertron-inc.com
- [9] www.ocmodshop.com
- [10] www.tsheatronics.co.jp
- [11] www.wikipedia.org