

Düşey dar kanallarda R134a akışkanının yoğuşmasının deneysel incelenmesi

Kemal BİLEN*, **A. Feridun ÖZGÜÇ**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Programı, 34469, Maslak, İstanbul

Özet

Herhangi bir ısıl sistemde faz değişimi olması halinde, olmaması haline göre daha fazla ısı geçişinin gerçekleşmesi, araştırmacıları bu alanda çalışma yapmaya sevk etmiştir. Bu husus göz önünde tutularak bu çalışmada; bir faz değişimi olan yoğuşma, deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında kurulan deney tesisatında; R134a soğutucu akışkanının, aralarında silindirik tüpün de bulunduğu 5 farklı düşey mini kanaldaki laminer yoğuşması incelenmiştir. Deneylerde kullanılan test üniteleri; silindirik tüp ile 4 adet çok-girişli kanallardır. Pratikte bundy boru olarak adlandırılan silindirik kanalın iç çapı 3.3 mm olup, üzeri bakır kaplı çelikten imal edilmiştir. Çok-girişli kanallar ise; farklı hidrolik çaplarda olmak üzere, 3-girişli, 5-girişli, 6-girişli ve 14-girişli olup alüminyumdan imal edilmiş kanallardır. Söz konusu bu çok-girişli kanalların hidrolik çapları sırasıyla, 4.74 mm, 3.6 mm, 1.53 mm ve 1.02 mm'dir. Böylece; kanal geometrisinin ve hidrolik çapının, R134a yoğuşmasında ısı geçişi ve basınç düşümü üzerindeki etkisi deneysel olarak tespit edilmiştir. Deneyler; farklı doyma sıcaklıkları ve farklı kütle akılar için tekrarlanmıştır. Böylece; düşey kanallardaki R134a soğutucu akışkanının yoğuşması, farklı doyma sıcaklıkları ve farklı kütle akılar için karşılaştırılabilmiştir. Ayrıca; bütün kanallardaki deneysel sonuçlardan hareketle, soğutucu akışkanların yoğuşması ile ilgili olarak literatürde yaygın bir şekilde yer alan korelasyonlara benzer bir korelasyon geliştirilmiştir. Yoğuşmada Nu sayısı için geliştirilen bu boyutsuz korelasyonun, literatürdeki korelasyonlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *R134a yoğuşması, ısı taşınım katsayısı, sürtünme faktörü, düşey silindirik tüp, çok-girişli kanallar.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Kemal BİLEN. bilenk@itu.edu.tr; Tel: (212) 293 13 00 dahili: 2549.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Programı'nda tamamlanmış olan "Dar kanallarda yoğuşma" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.07.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 01.11.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Experimental analysis of R134a condensation in vertical narrow channels

Extended abstract

In any thermal system, the fact that more heat is transferred in the occurrence of phase change is a motivation for the researchers to work on. Furthermore, it has become inevitable to build smaller (more compact) heating and cooling systems, while the technology is improving more and more. This resulted in the necessity of the occurrence of phase changes in smaller spaces. Therefore it is required to know the mechanisms of phase change in narrow spaces and to improve heat transfer. Taking these facts into consideration, this study is performed to investigate condensation, which is a frequently encountered phase change in thermal systems, in experimental aspect.

In the experimental study, laminar condensation of coolant R134a is investigated for five different vertical mini channels including the vertical cylindrical tube and the other four multi-port channels. The cylindrical channel with an inner diameter of 3.3 mm is made of steel coated with copper. The other four multi-port mini channels, which have 3 ports, 5 ports, 6 ports and 14 ports, are made of aluminum. The hydraulic diameters of these multi-port channels are 4.74 mm, 3.6 mm, 1.53 mm and 1.02 mm, respectively. In this way, the effects of channel configuration and hydraulic diameter on heat transfer and pressure drop for R134a condensation are determined experimentally. In the experimental investigation, the average values of thermal parameters and pressure drop are obtained along the test unit. The experiments are repeated for different saturation temperatures (therefore different saturation pressures) and for different mass fluxes. Condensation data are taken for refrigerant R134a at 32 °C and 42 °C saturation temperatures for all mini channels. Therefore, it has been possible to compare the condensation of coolant R134a in cylindrical and multi-port channels for different saturation temperatures and different mass fluxes.

The experimental setup established for this study consists of the following twelve main items: coolant pump, flowmeter to measure the flow rate of the coolant R134a, pre-heating section, heating section (superheater), condensation unit, a transparent Plexiglass heat exchanger covering the condensa-

tion unit, a rotameter to measure the flow rate of the cooling water, pre-cooling section, cooling section, a receiver, a thermostatic reservoir for cooling water supply and a data acquisition system. As shown in Figure 1, refrigerant R134a enters the test section at a known vapor quality. It is condensed in the test section against the cooling water flowing in the annulus. The two-phase mixture leaving the test section enters a post-condenser. The subcooled liquid is then passed through a receiver which is in a cooler and the coolant pump. The pump moves the liquid to the pre-heater and the electric post-heater (superheater) which fixes the test section inlet vapor quality. The flowmeter is placed between the pump and the pre-heater to measure refrigerant flow rate in liquid phase. The refrigerant flow rate can be independently controlled by the pump. The inlet vapor quality is determined by the heat input to the electric post heater which can be independently controlled. The test section saturation temperature is controlled by adjusting the cooling water flow rate.

The experimental results are investigated in two parts, thermal and hydrodynamic analysis. In the thermal analysis, graphs are obtained for the variation of average heat transfer coefficient with respect to average steam quality. As a result, it is shown that the average heat transfer coefficient increases when the average steam quality is increased. Also, graphs are obtained for the variation of average Nu number with respect to equivalent Re number. Similarly as a result, it is shown that the average Nu number increases when the equivalent Re number is increased. In the hydrodynamic analysis part, graphs are obtained for the variation of the pressure loss due to friction during condensation with respect to average steam quality. Also, other graphs are obtained for the two-phase friction coefficient during condensation with respect to equivalent Re number. As a result, mathematical relations are developed between f_{tp} and Re_{eq} for all mini channels. It is found that the two-phase friction coefficient decreases when the Re_{eq} number is increased similar to Moody chart.

As a result, a simple dimensionless correlation is developed for Nu number in refrigerant condensation which is in good agreement with the correlations in literature.

Keywords: R134a condensation, heat convective coefficient, friction factor, vertical cylindrical tube, multi-port channels.

Giriş

Endüstriyel sistemlerde buhar, yoğuşma sıcaklığından daha düşük sıcaklıktaki bir yüzey ile temas ettiğinde buharın bıraktığı gizli ısı söz konusu yüzeye geçer ve buhar sıvı fazına geçerek yoğuşma gerçekleşir. Bu yoğuşma olayı yüzeyin yapısına bağlı olarak iki ayrı türde gerçekleşir. Bunlardan birincisi, yoğuşma yüzeyinin tümünün bir sıvı filmi ile kaplandığı ve bu sıvı filmi- nin yerçekimi etkisi altında aktığı film tipi yoğuşmadır. Bu yoğuşma türünden farklı olarak, yüzey ıslanmayı engelleyecek bir yapıya sahip ise bu durumda ikinci bir yoğuşma türü olan damlacıklı yoğuşma meydana gelecektir. Bu nedenle, yoğuşma türüne bağlı olarak yoğuşma halinde ısı geçiş mekanizmasının bilinmesi pratikteki birçok uygulama açısından önemlidir.

Bilindiği gibi yoğuşma ile ilgili çalışmalara, Nusselt tarafından 1916 yılında yapılan teorik bir çalışma temel teşkil etmektedir (Carey, 1992). Bu çalışmada; eş sıcaklıklı düşey bir düzlemsel yüzey üzerinde sabit fiziksel özelliklere sahip saf bir buharın laminer film yoğuşması incelenmiştir. Nusselt tarafından yapılan bu öncü çalışmadan günümüze kadar yoğuşma ile ilgili birçok teorik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmaları; yoğuşmanın teorisinin incelendiği temel çalışmalar, silindirik kanallardaki yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düzlemsel yüzeylerdeki yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düzlemsel kanallardaki yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, düşey kanatçıklar üzerinde oluşan yoğuşmanın incelendiği çalışmalar, geçici rejimde yoğuşmanın incelendiği çalışmalar ve çok-girişli kanallarda meydana gelen yoğuşmanın incelendiği çalışmalar olmak üzere temelde yedi kısma ayırmak mümkündür.

Rohsenow (1956) tarafından yapılan teorik bir çalışmada Nusselt'in incelemesinden farklı olarak; oluşan sıvı filmine her aşamada T_d sıcaklığındaki akışkanın ilavesi dikkate alındığında sıvı filmi içerisinde lineer olmayan gerçek ve yeni bir sıcaklık dağılımı alınması gerektiği ifade edilmiştir. Bu çalışma sonucunda; literatürde temel bir bağıntı kabul edilen $h'_{sb} = h_{sb} + 0.68c_p \Delta T$

şeklinde yeni bir buharlaşma gizli ısı bulunmuştur.

Rohsenow vd. (1956) tarafından yapılan teorik bir çalışmada, doyma sıcaklığındaki hareketli ve saf bir buhar ortamında bulunan eşsıcaklıklı düşey düzlemsel bir yüzey üzerinde meydana gelen laminer ve türbülanslı film yoğuşmasında, sıvı-buhar ara yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmesinin yoğuşmaya etkisi incelenmiştir.

Rohsenow (1970) tarafından yapılan bir çalışmada; çeşitli geometrilere sahip cisimler üzerinde, taban sıcaklığı sabit düşey kap içerisinde ve yatay boru demetleri üzerinde meydana gelen film tipi yoğuşma teorik olarak incelenmiş ve her bir cisme ait denklemler verilmiştir. Bu çalışmada, yaklaşık 3.2 mm ve daha küçük çaptaki düşey silindir içerisinde meydana gelen yoğuşmada eğrilik yarıçapının göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Literatürde, silindirik tüplerdeki yoğuşmanın incelendiği hem deneysel hem de teorik çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bunlar; buharın yerçekimi ivmesi yönünde akması durumundaki yoğuşmanın incelendiği, buharın yerçekimi ivmesinin tersi yönünde akması durumundaki yoğuşmanın (*reflux condensation*) incelendiği, saf buharın yoğuşmasının incelendiği, buharla birlikte yoğuşmayan bir gazın varlığında gerçekleşen yoğuşmanın incelendiği ve yoğuşma yüzeyinde bir sıvı akışkanın yerçekimi ivmesi yönünde akması durumundaki yoğuşmanın incelendiği çalışmalar olarak sınıflandırılabilir.

Chou ve Chen (1999) tarafından yapılan teorik bir çalışmada; eşsıcaklıklı bir akışkan içerisine daldırılan düşey bir silindir içerisinde, yerçekimi ivmesinin tersi yönde akmakta olan saf buharın yoğuşması için genel bir analitik model geliştirilmiştir.

Kim ve No (2000) tarafından yapılan deneysel çalışmada; 46 mm çapında düşey bir tüp içerisinde yüksek basınçlı (7.5 MPa) buharın türbülanslı film yoğuşması incelenmiştir.

Du ve Wang (2003) tarafından yapılan teorik bir çalışmada; sıvı-buhar ara yüzeyinde dalgaların olması halinde, değişik çaplardaki düşey mini kanallardaki film yoğuşması incelenmiştir.

Literatürde, çok-girişli kanallardaki yoğuşmayı ve yine çok-girişli kanallardaki iki fazlı adyabatik akışı konu alan çalışmalar da yer almaktadır. Buna göre; Yang ve Webb (1996a) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada; 4-girişli, dikdörtgen kesitli, içerisinde mikro kanatçıklar olan ($D_h=1.564$ mm) ve olmayan ($D_h=2.637$ mm) yatay kanallarda R-12 soğutucu akışkanının zorlanmış taşınım yoluyla yoğuşması incelenmiştir. Yine, Yang ve Webb (1996b) tarafından yapılan ve aynı deney tesisatının kullanıldığı bir çalışmada; R-12 soğutucu akışkanının, yukarıda bahsedilen kanallardaki iki fazlı akışı ve tek fazlı (sıvı) akışı halinde adyabatik şartlar altında basınç düşümü incelenmiştir.

Burada sunulan deneysel çalışmada ise; aralarında silindirik kanalın da bulunduğu 5 farklı düşey kanaldaki R134a akışkanının yoğuşması deneysel olarak incelenmiştir. Böylece; düşey kanallardaki R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasında, Nu sayısı için literatürde yer alan korelasyonlara benzer bir boyutsuz korelasyon geliştirilmiştir.

Çalışma temelde; ısı analiz ve hidrodinamik analiz olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Buna göre çalışmanın ısı analiz kısmında; çeşitli giriş şartlarında her bir ünite için ortalama ısı taşınım katsayısı dolayısıyla ortalama Nu_i sayısı belirlenmiştir. Soğutucu akışkan buharı, yoğuşma ünitelerine çeşitli doyma sıcaklıklarında ve çeşitli kuruluk derecelerinde gönderilmiştir. Böylece; ortalama ısı taşınım katsayısının, doyma sıcaklığı ve kuruluk derecesi ile değişimi elde edilmiştir. Çalışmanın hidrodinamik analiz kısmında ise; yoğuşma ünitesi boyunca gerçekleşen basınç değişimi ve sürtünme faktörünün tespiti amaçlanmıştır. Böylece, farklı yapıdaki yoğuşma ünitelerinin basınç düşümü üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Isıl analiz kısmına benzer olarak hidrodinamik analizde; basınç düşümünün doyma basıncı, girişteki kuruluk derecesi, ortalama kuruluk derecesi ve akışkan kütleli

akısına bağlı değişimi incelenmiştir. Basınç düşümü sonuçlarından hareketle, iki fazlı akışa ait sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısına doyma sıcaklığının etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla bir deney tesisatı kurulmuştur. Söz konusu tesisatta ilkönce, alüminyumdan imal edilmiş çok-girişli düşey kanallardaki R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasını konu alan deneyler yapılmıştır. Bu kanallar sırasıyla, 3-girişli, 5-girişli, 6-girişli, ve 14-girişli kanallardır. Deneylerde daha sonra, bu kanallarla yaklaşık aynı uzunluğa sahip ve üzeri bakır kaplı çelikten imal edilmiş olan düşey silindirik yoğuşma ünitesinde R134a akışkanının yoğuşması incelenmiştir.

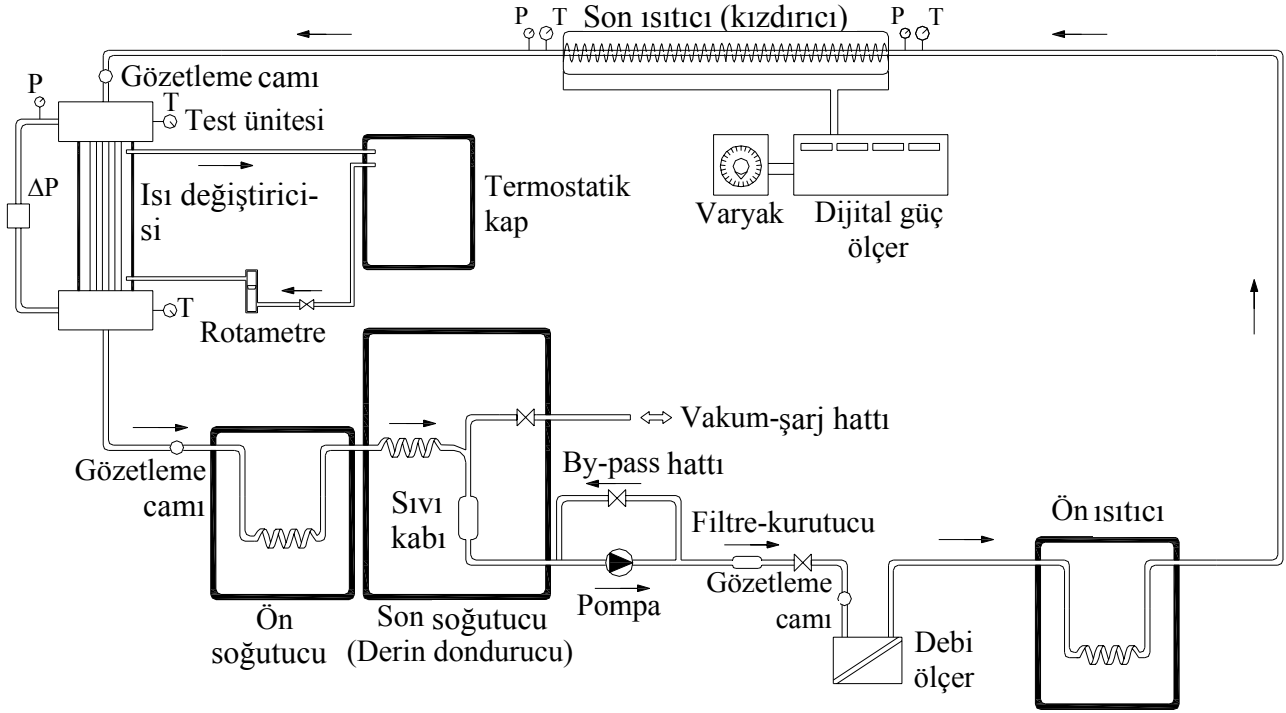
Özet olarak; R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasının deneysel olarak incelendiği bu çalışma ile;

- R134a akışkanının düşey kanallarda yoğuşması halinde test ünitesi boyunca ortalama ısı taşınım katsayısının tespiti,
- test ünitesindeki ortalama kuruluk derecesinin ve doyma sıcaklığının ortalama ısı taşınım katsayısına etkisinin tespiti,
- test ünitesindeki ortalama Nu_i sayısının tespiti,
- test ünitesi boyunca meydana gelen ortalama basınç düşümünün tespiti,
- yoğuşma esnasındaki sürtünme katsayısının tespiti,
- böylece; biri silindirik diğerleri çok-girişli 5 farklı yoğuşma ünitesinin, hem ısı açıdan hem de basınç düşümü açısından R134a akışkanının yoğuşmasına etkisinin belirlenmesi,
- pratikte kullanılan ısıtma ve soğutma sistemlerinde yer alan yoğuşurucuların boyutlarının küçültülmesinin üstünlüklerinin ve sakıncalarının belirlenmesi,
- R134a soğutucu akışkanının yoğuşmasında Nu_i sayısı için literatürde yer alan korelasyonlara benzer bir korelasyonun geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Deneysel inceleme

Deney tesisatı

Deneysel çalışma kapsamında hazırlanmış olan ve temelde on iki ana bölümden oluşan deney tesisatı, Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney tesisatının şematik gösterimi

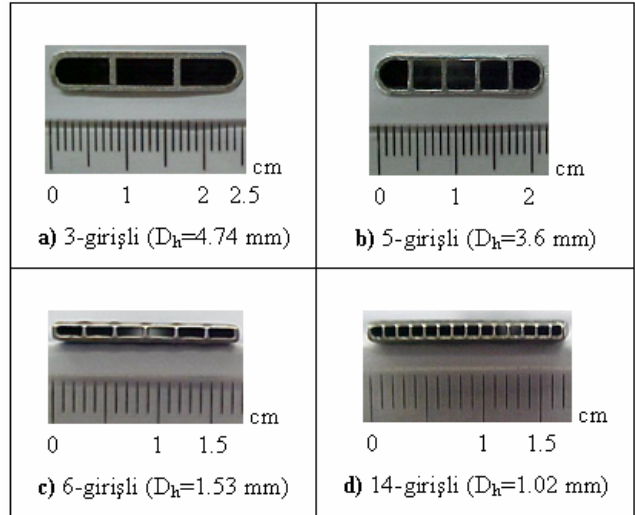
Deney tesisatını oluşturan on iki ana bölüm; soğutucu akışkan pompası, soğutucu akışkan debisini ölçmede kullanılan debiölçer, ön ısıtıcı, son ısıtıcı, yoğuşma ünitesi, yoğuşma ünitesini çevreleyen ve şeffaf bir malzemeden yapılmış olan ısı değiştirici, soğutma suyu debisini ölçmede kullanılan rotametre, ön soğutucu, son soğutucu, sıvı toplama kabı, soğutma suyunun temini için kullanılan termostatik kap ve veri toplama sistemi şeklindedir.

Test ünitesi

Deney tesisatında yer alan test ünitesinde, farklı geometriye sahip 5 kanal test edilmiştir. Buna göre deneysel çalışmanın birinci aşamasında, alüminyumdan imal edilmiş, 3, 5, 6 ve 14-girişli mini kanallardaki faz değişimi incelenmiştir. Bu çok-girişli mini kanallara ait resimler Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu kanallara ait diğer geometrik bilgiler ise Şekil 3’te görülmektedir.

Deneyisel çalışmanın ikinci aşamasında ise çok-girişli yoğuşma üniteleri yerine, yaklaşık olarak bu kanallarla aynı uzunluğa sahip ve klasik soğutma sistemlerinde yoğuşturucu olarak kullanılan silindirik bir yoğuşma ünitesi kurulmuştur. Pratikte bundy boru olarak adlandırılan bu boru;

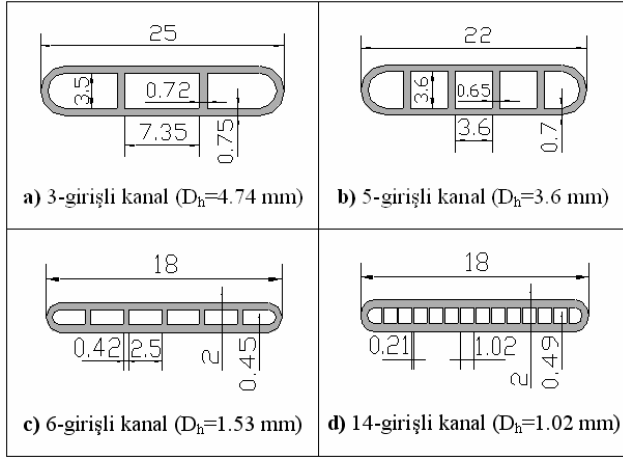
3.3 mm iç çapında ve 4.7 mm dış çapında olup üzeri bakır kaplı çelikten imal edilmiştir. Söz konusu bu silindirik test ünitesinde de diğer üniteler ile aynı şartlar altında ölçümler yapılmıştır. Böylece bu farklı yoğuşma üniteleri, ısıl performans ve basınç düşümü açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Çok-girişli yoğuşma üniteleri

Faz değişiminin zorlanmış taşınım yoluyla gerçekleştiği test ünitesinde yer alan kanal,

şeffaf bir malzemeden imal edilmiş olan bir ısı değiştiricisi ile soğutulmaktadır. Söz konusu ısı değiştirici; su soğutmalı ve paralel ve zıt yönlü bir ısı değiştiricisidir. Bu ısı değiştiricileri çok-girişli kanallar için dikdörtgen şeklinde, silindirik test ünitesi için ise daireseldir.



Şekil 3. Yoğuşma ünitelerine ait geometrik bilgiler (boyutlar mm cinsindedir)

DeneySEL verilerin kullanımı

Isıl analiz

DeneySEL verilerin ısıl analizinde; akışkanın test ünitesine girişteki kuruluk derecesi, test ünitesinden çekilen ısı miktarı, test ünitesi içinde kuruluk derecesinde meydana gelen değişim, soğutucu akışkan tarafındaki ortalama ısı taşınım katsayısı ve soğutucu akışkan tarafındaki ortalama Nu_i sayısı sırasıyla aşağıdaki bağıntılar yardımıyla tespit edilmiştir. Deneylerde, akışkanın test ünitesine iki fazlı girip test ünitesinden yine iki fazlı olarak çıkması temin edilmiştir.

$$x_g = \frac{1}{h_{sb}} \left[\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - c_p (T_d - T_g) \right] \quad (1)$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s c_{p,s} (T_{s,\zeta} - T_{s,g}) \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{1}{h_{sb}} \left[\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} - c_p (T_g - T_d) \right] \quad (3)$$

$$\bar{h}_i = \frac{1}{A_i} \left[\frac{T_d - \bar{T}_s}{U_d A_d \Delta T_{lm}} - \frac{t_d}{k_{al} \bar{A}} - \frac{1}{\bar{h}_d A_d} \right]^{-1} \quad (4)$$

Silindirik ünite için ortalama ısı taşınım katsayısı ise, çok-girişli kanallardan farklı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\bar{h}_{i,s} = \frac{1}{A_i} \left[\frac{T_d - \bar{T}_s}{U_d \pi D_d L \Delta T_{lm}} - \frac{\ln(D_d / D_i)}{2\pi k_b L} - \frac{1}{\bar{h}_d \pi D_d L} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\overline{Nu}_i = \frac{\bar{h}_i D_h}{k_s} \quad (6)$$

Hidrodinamik analiz

Düşey konumlandırılan test ünitelerinde yoğuşma esnasında meydana gelen toplam basınç değişimi sırasıyla; girişteki basınç düşümü, sürtünmelerden kaynaklanan basınç düşümü, yerçekimi nedeniyle meydana gelen basınç yükselmesi, yoğuşmadan kaynaklanan basınç yükselmesi ve çıkıştaki basınç yükselmesi terimlerinin toplamı şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta P_T = \Delta P_g + \Delta P_s + \Delta P_G + \Delta P_y + \Delta P_\zeta \quad (7)$$

Yerçekiminden kaynaklanan basınç yükselmesi kaynaklarda (Ma vd., 2004) aşağıdaki gibi verilir.

$$\Delta P_G = -[\alpha \rho_b + (1 - \alpha) \rho_s] g L \quad (8)$$

Yoğuşmadan kaynaklanan basınç yükselmesi ise yine aynı kaynakta (Ma vd., 2004) şu şekilde verilmektedir:

$$\Delta P_y = G^2 \Delta \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_b} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_s} \right] \quad (9)$$

Ayrıca, girişteki basınç düşümü ve çıkıştaki basınç yükselmesini ifade eden terimler ise; giriş ve çıkıştaki geçiş elemanlarının deneylerde yalıtılmış olması nedeniyle, kaynaklarda (Collier, 1981) iki fazlı adyabatik akış için (ve ayrılmış akış modeli için) verilen bağıntılardan yararlanılarak hesaplanmıştır.

Bu durumda, iki fazlı akışa ait sürtünme katsayısı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$f_{tp} = \frac{\Delta P_s}{Re_{eş}^2 \mu_s^2 / 2\rho_s} \frac{D_h^3}{4L} \quad (10)$$

Belirsizlik analizi

Deneylerde hataya neden olan bağımsız değişkenler; son ısıtıcı gücü olan \dot{Q} , son ısıtıcıya giriş ve son ısıtıcıdan çıkış (doyma) sıcaklıkları olan T_g ve T_d , soğutucu akışkan kütleli debisi olan \dot{m} , suyun test ünitesine giriş ve test ünitesinden çıkış sıcaklıkları olan $T_{s,g}$ ve $T_{s,ç}$, soğutma suyu kütleli debisi olan \dot{m}_s ve sürtünme kaynaklı basınç düşümü olan ΔP_s (fark basınçölçer ile aynı belirsizliğe sahip olduğu kabulü ile) şeklinde seçilmiştir.

Bu durumda; yoğuşma esnasındaki ortalama ısı taşınım katsayısı h_i , iç taraftaki ortalama Nu_i sayısı ve yoğuşma esnasındaki sürtünme katsayısı f_{tp} için oluşabilecek belirsizlikler sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir:

$$w_{h_i} = \pm \left[\left(\frac{A_i/A_d}{\left[A_d \left(\frac{1}{U_d A_d} - \frac{t_d}{k_{al} A} - \frac{1}{\bar{h}_d A_d} \right) \right]^2} \right)^2 \left[\left(\frac{w_{U_d}}{U_d^2} \right)^2 + \left(\frac{w_{h_d}}{\bar{h}_d^2} \right)^2 \right] \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$w_{Nu_i} = \pm \left[\left(\frac{D_h}{k_s} w_{h_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$w_{f_{tp}} = \pm \left[\left(\frac{D_h \rho_s}{2L G_{eş}^2} \right)^2 \left[w_{\Delta P_s}^2 + \left(-\frac{2\Delta P_s}{\dot{m}} w_{\dot{m}} \right)^2 \right] \right]^{1/2} \quad (13)$$

Yukarıdaki bağıntılardan yararlanılarak bütün deneyler için bağımlı değişkenlere ilişkin belirsizlik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu belirsizlik değerlerinin değişim aralığı her bir test ünitesi için Tablo 1’de gösterilmiştir. Girişteki kuruluk derecesi, toplam ısı geçiş katsayısı ve su tarafındaki ortalama ısı taşınım katsayısına ilişkin belirsizlikler de benzer şekilde hesaplanmıştır.

Deneysel sonuçlar

Deneysel çalışmanın ısıl analiz kısmından elde edilen ve ortalama ısı taşınım katsayısı-ortalama kuruluk derecesi değişimini gösteren grafik Şekil 4’te gösterilmiştir. Ortalama Nu sayısının $Re_{eş}$ sayısı ile değişimini gösteren grafikler ise Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiştir.

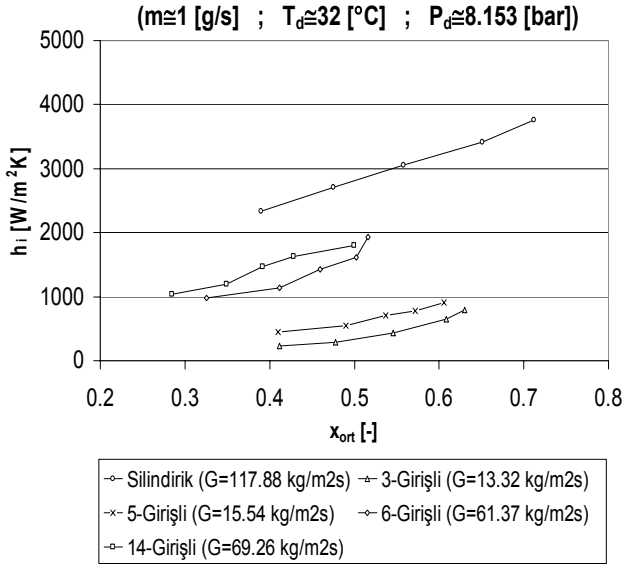
Basınç düşümüne ilişkin deneysel sonuçlardan hareketle elde edilen; sürtünme kaynaklı basınç düşümünün ortalama kuruluk derecesi ile değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. İki fazlı akışa ait sürtünme katsayısının $Re_{eş}$ sayısı ile değişimini gösteren grafikler ise Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmiştir.

Nu sayısı için korelasyon oluşturma

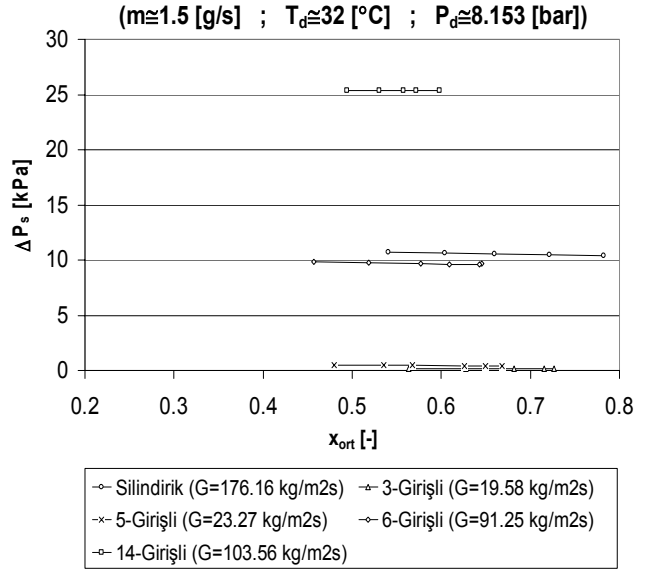
Soğutucu akışkanların yoğuşması ile ilgili olarak literatürde yer alan önemli korelasyonlar arasında; Cavallini ve Zecchin (Kakaç, 1991) ve Shah (1979) tarafından geliştirilen korelasyonlar gösterilebilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar; yukarıda bahsedilen korelasyonlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların, bu korelasyonlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 1. Hesaplanan parametreler için belirsizlik analizi sonuçları

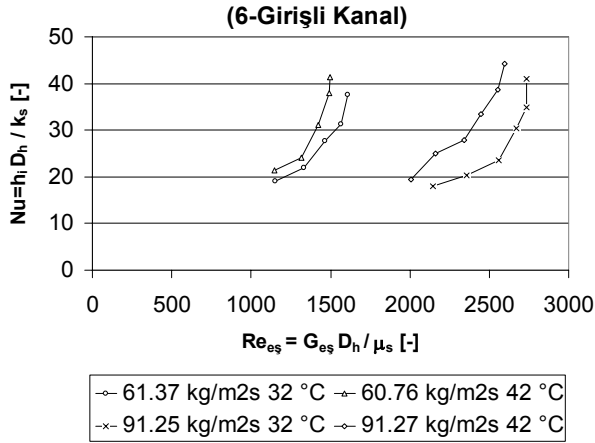
	3-G Kanal	5-G Kanal	6-G Kanal	14-G Kanal	Silindirik Kanal
$\pm w_{x_g}$ (%)	1.01 ~ 2.27	1.00 ~ 2.26	1.32 ~ 2.21	1.29 ~ 2.24	1.01 ~ 2.23
$\pm w_{U_d}$ (%)	3.52 ~ 10.56	3.54 ~ 6.49	3.57 ~ 6.86	3.57 ~ 5.74	3.69 ~ 8.40
$\pm w_{h_d}$ (%)	4.55 ~ 11.53	4.60 ~ 8.25	4.65 ~ 8.68	4.65 ~ 7.65	4.61 ~ 9.92
$\pm w_{h_i}$ (%)	6.13 ~ 24.09	6.79 ~ 16.14	8.76 ~ 16.35	8.51 ~ 14.10	9.18 ~ 20.09
$\pm w_{Nu_i}$ (%)	6.13 ~ 24.09	6.79 ~ 16.14	8.76 ~ 16.35	8.51 ~ 14.10	9.18 ~ 20.09
$\pm w_{f_{tp}}$ (%)	13.60 ~ 21.45	5.47 ~ 9.27	2.80 ~ 4.18	2.53 ~ 3.87	2.11 ~ 4.09



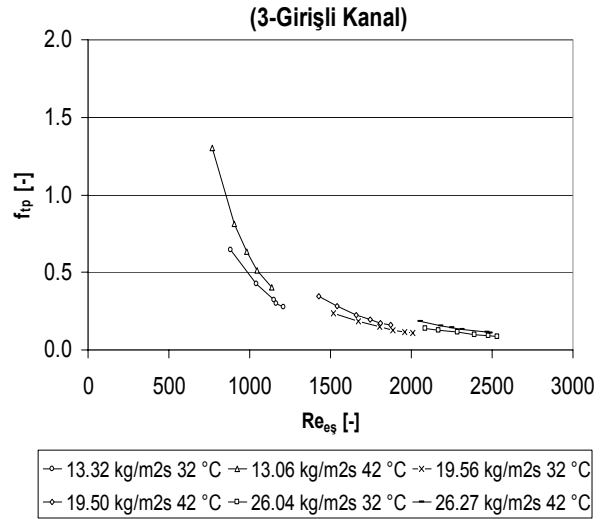
Şekil 4. Tüm kanallar için $\bar{h}_i - x_{ort}$ değişimi



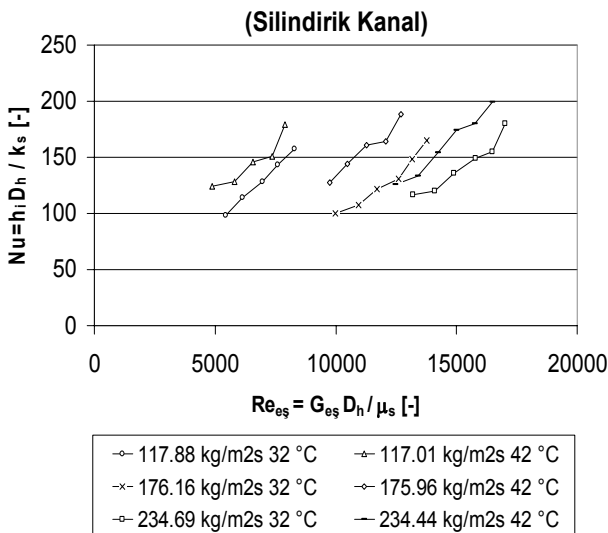
Şekil 7. Tüm kanallar için $\Delta P_s - x_{ort}$ değişimi



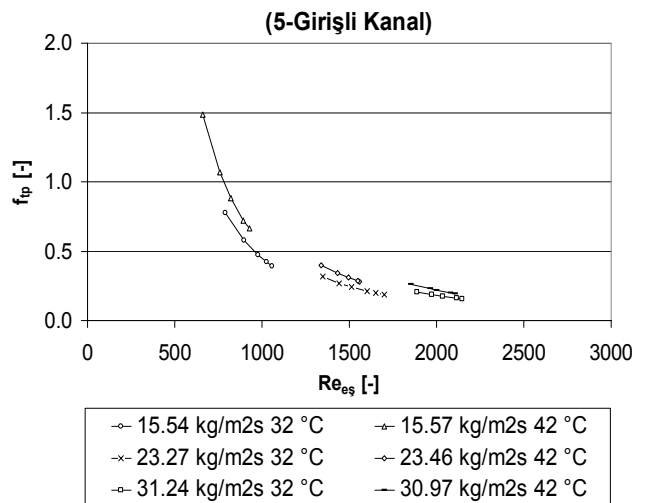
Şekil 5. 6-G kanal için $\bar{Nu}_i - Re_{es}$ değişimi



Şekil 8. 3-G kanal için $f_{ip} - Re_{es}$ değişimi



Şekil 6. Silindirik kanal için $\bar{Nu}_i - Re_{es}$ değişimi



Şekil 9. 5-G kanal için $f_{ip} - Re_{es}$ değişimi

Buna göre; Cavallini ve Zecchin (Kakaç, 1991) tarafından geliştirilen korelasyonun yerel değerleri temsil eden formu Denklem 14'te gösterilmiştir.

$$Nu = \frac{h D_h}{k_s} = 0.05 Re_{es}^{0.8} Pr_s^{0.33} \quad (14)$$

Burada;

$$Re_{es} = \frac{G_{es} D_h}{\mu_s} \quad \text{ve} \quad G_{es} = G \left[(1-x) + x \left(\frac{\rho_s}{\rho_b} \right)^{1/2} \right] \quad (15)$$

şeklinde. Shah (1979) tarafından geliştirilen korelasyonun yerel değerleri temsil eden formu ise Denklem 16'da gösterilmiştir.

$$Nu = Nu_s \left[(1-x)^{0.8} + \frac{3.8x^{0.76}(1-x)^{0.04}}{p_r^{0.38}} \right] \quad (16)$$

Burada;

$$Nu_s = 0.023 Re_s^{0.8} Pr_s^{0.4} \quad \text{ve} \quad Re_s = \frac{G D_h}{\mu_s} \quad (17)$$

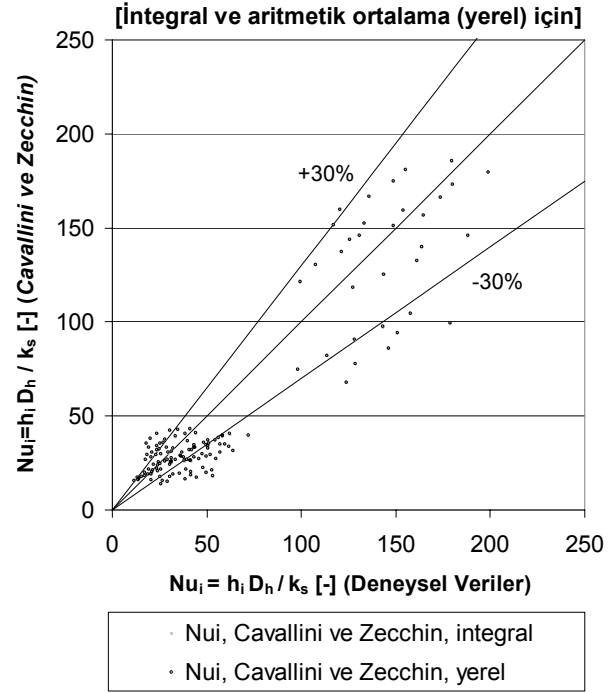
şeklinde. Denklem 16'daki p_r ise, indirgenmiş basıncı göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen korelasyon ise Denklem 18'de gösterilmiştir.

$$\overline{Nu}_i = \frac{\overline{h}_i D_h}{k_s} = 0.1211 Re_{es}^{0.7073} Pr_s^{1/3} \quad (18)$$

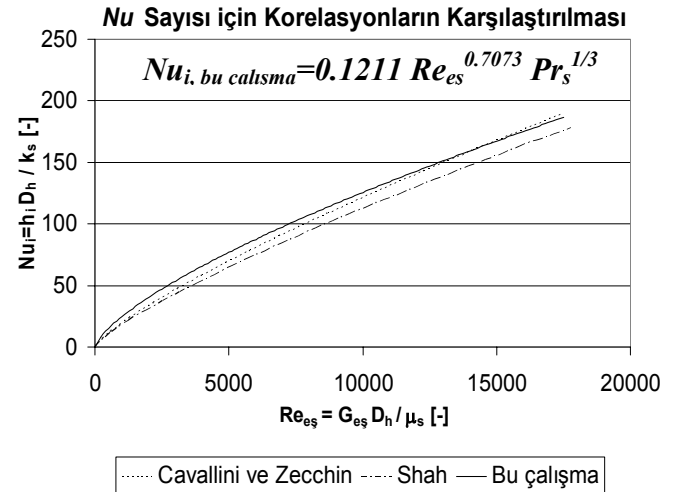
Bu çalışmada test edilen tüm kanallardan elde edilen deneysel verilerin, Cavallini ve Zecchin (Kakaç, 1991) tarafından geliştirilen korelasyon ile karşılaştırılması sonucu Şekil 10'da gösterilen dağılım elde edilmiştir. Şekil 10'da; bu korelasyonun hem yerel değerleri ifade eden formu ile hem de yoğuşmanın gerçekleştiği kuruluk derecesi aralığında bu korelasyonun integralinin alınmasıyla elde edilen integral formu ile karşılaştırma yapılmıştır.

Bu çalışmadaki bütün deneysel sonuçlardan hareketle Nu sayısı için elde edilen korelasyonun

literatürdeki korelasyonlar ile karşılaştırması ise Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 10. Deneysel verilerin Cavallini ve Zecchin korelasyonu ile karşılaştırılması



Şekil 11. Korelasyonların karşılaştırılması

Sonuçlar ve değerlendirme

Çeşitli geometrilere sahip düşey kanallar içerisinde gerçekleşen R134a yoğuşmasının deneysel incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlardan hareketle şu değerlendirmelere rahatlıkla varılabilmektedir:

- Şekil 4, silindirik ünite hariç tutularak incelendiği zaman; aynı kütleli debi için en büyük ısı taşınım katsayısının, hidrolik çapı en düşük olan 14-girişli kanalda elde edildiği görülmektedir. Bu durum, ısı geçişi açısından kompaktlığın önemini bir kez daha göstermektedir.
- Yine Şekil 4 incelendiği zaman, ortalama kuruluk derecesinin azalması ile ortalama ısı taşınım katsayısının belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir.
- $\overline{Nu}_i - Re_{es}$ değişimini gösteren grafikler incelendiğinde bütün kanallar için geçerli olmak üzere; Re_{es} sayısı artarken ortalama Nu sayısının da arttığı görülür.
- Yine, $\overline{Nu}_i - Re_{es}$ değişimini gösteren grafikler incelendiğinde yine bütün kanallar için geçerli olmak üzere; aynı kütleli akı için, yoğunlaşma sıcaklığı artarken ortalama Nu sayısının da arttığı görülebilir.
- Şekil 7 incelendiği zaman, kanal içerisindeki ortalama kuruluk derecesinin azalması ile basınç düşümünün az da olsa arttığı görülmektedir.
- Şekil 8 ve Şekil 9 incelendiği zaman doğal olarak, Re_{es} sayısının azalması ile f_{ip} 'nin, Moody diyagramındaki benzer olarak arttığı görülmektedir.
- Yine Şekil 8 ve Şekil 9 incelendiği zaman, doyma sıcaklığının artması ile sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir.
- Korelasyonların karşılaştırıldığı Şekil 11 incelendiğinde, bu çalışmadaki bütün kanallara ait deneysel sonuçlardan elde edilen korelasyonun, Cavallini ve Zecchin ile Shah tarafından geliştirilen korelasyonlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.
- Ortalamanın çok üzerinde yer alan birkaç değer hariç tutularak Tablo 1 incelendiğinde; ortalama belirsizlik değerlerinin, yaklaşık olarak $\pm \% 10-12$ arasında olduğu görülür.

Kaynaklar

Carey, V. P., (1992). *Liquid-Vapor Phase Change Phenomena*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C.

- Chou, G.-H. ve Chen, J.-C., (1999). A General Modeling for Heat Transfer During Reflux Condensation Inside Vertical Tubes Surrounded by Isothermal Fluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**, 2299-2311.
- Collier, J. G., (1981). *Convective Boiling and Condensation*, Second Edition, McGraw-Hill Inc. Great Britain.
- Du, X.-Z. ve Wang, B.-X., (2003). Study on Transport Phenomena for Flow Film Condensation in Vertical Mini-Tube with Interfacial Waves, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 2095-2101.
- Kakaç, S., (1991). *Boilers, Evaporators, and Condensers*, John Wiley & Sons Inc., United States of America.
- Kim, S. J. ve No, H. C., (2000). Turbulent Film Condensation of High Pressure Steam in a Vertical Tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**, 4031-4042.
- Ma, X., Briggs, A. ve Rose, J. W., (2004). Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics for Condensation of R113 in a Vertical Micro-Finned Tube with Wire Insert, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **31**, 5, 619-627.
- Rohsenow, W. M., (1956). Heat Transfer and Temperature Distribution in Laminar-Film Condensation, *Transactions of the ASME*, November, 1645-1648.
- Rohsenow, W. M., Webber, J. H. ve Ling, A. T., (1956). Effect of Vapor Velocity on Laminar and Turbulent-Film Condensation, *Transactions of the ASME*, November, 1637-1644.
- Rohsenow, W. M., (1970). Film Condensation, *Applied Mechanics Reviews*, **23**, 487-496.
- Shah, M. M., (1979). A General Correlation for Heat Transfer During Film Condensation Inside Pipes, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, **22**, 547-556.
- Yang, C.-Y. ve Webb, R. L., (1996a). Condensation of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro-Fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **39**, 4, 791-800.
- Yang, C.-Y. ve Webb, R. L., (1996b). Friction Pressure Drop of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and without Micro-Fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **39**, 4, 801-809.