



DÜŞEY DÜZ BORULU YOĞUŞTURUCULARDA ISI TAŞINIM KATSAYISININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Gökhan ARSLAN* ve Nurdil ESKİN**

*İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
34437 Gümüşsuyu, İstanbul, arslango@itu.edu.tr

** İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
34437 Gümüşsuyu, İstanbul, eskinn@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 27.11.2012 Kabul Tarihi: 08.02.2013)

Özet: Bu çalışmada R134a soğutucu akışkan buharının iç yüzeyi düz ve düşey konumdaki boru içerisinde yoğuşması deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, saf R134a buharının iç yüzeyi düz ve sarmal mikro-kanatlı boru içerisinde yoğuşması esnasında gerçekleşen ısı geçişine olan etkisinin, test borusu eğim açısı, doyma basıncı, kütleli akı, gibi farklı parametrelere bağılı olarak deneysel ve teorik olarak incelendiği çalışmanın bir bölümünü oluşturmaktadır. Boru içerisinde yoğuşma birçok parametreye bağılıdır ve bu nedenle ısı geçiş karakteristiklerinin belirlenmesi, mevcut bağıntıların geçerliliğinin irdelenebilmesi için deneysel çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında ele alınan deneyler, 9.52 mm dış çapında ve 1 m. uzunluğundaki test borusunda yapılmıştır. Test borusu boyunca yoğuşan madde miktarını yüksek tutmak ve sıvı filminin laminar olarak akmasını sağlamak için deneyler 5.8-5.9 bar doyma basıncı, 30-40 kg/m²s kütleli akı değerleri arasında yapılmıştır. Bu sayede yoğuşma esnasında gerçekleşen ısı geçişine soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farkın ve kuruluk derecesinin etkileri net bir şekilde ortaya konabilmektedir. Deney verileri incelendiğinde, artan soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki fark ve kuruluk derecesi değişimine göre ortalama Nusselt sayısının azaldığı tespit edilmiştir. Test borusu boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi incelendiğinde ise, yerel Nusselt sayısının test borusu boyunca düştüğü belirlenmiştir. Çalışmada deneysel veriler literatürde sıkça kullanılan ısı taşınım katsayısı bağıntıları ile karşılaştırılmıştır. Bağıntılar arasında en iyi sonucu %14.8 ortalama mutlak sapma ile Akers vd, (1959) bağıntısı vermiştir. Deney verileri ayrıca klasik Nusselt yoğuşma modeli ile karşılaştırılmıştır. Bu model % 35 ortalama mutlak sapma göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: R134a, Yoğuşma, Isı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT INSIDE VERTICAL SMOOTH TUBE CONDENSERS

Abstract: In that study, condensation of R134a refrigerant vapor inside a smooth and vertical tube is investigated experimentally. Results presented in this paper is a part of experimental and theoretical studies about condensation of R134a vapor inside smooth and helical micro-fin tubes under different operating conditions such as inclination angle, saturation pressure and mass flux. Condensation of refrigerants inside smooth and helical micro-fin tubes is dependent on so many different parameters. For that reason, experimental studies are very important to determine heat transfer characteristics and to check the validity of correlations. Outside diameter of the test section that used in this study is 9.52 mm and its length is 1m. To condense more amount of matter and to provide laminar liquid film flow, experimental tests were carried out for the mass flux range of 30-40 kg/m²s with saturation pressure of 5.8-5.9 bar. In that way, effects of temperature difference between saturated vapor and tube wall, vapor quality change on condensation heat transfer can be exposed clearly. Obtained results showed that average Nusselt number decreases as temperature difference between saturated vapor and tube wall or vapor quality change increase. It is found that local Nusselt number decreases throughout the test tube. In addition to this, most widely used condensation heat transfer coefficient correlations for condensation in smooth tubes were analyzed through the experimental data. Best fit was obtained with Akers et. al. (1959) correlation with an absolute mean deviation of %14.8. Besides that, obtained experimental data was compared with classical Nusselt condensation model. This model predicted average Nusselt number with % 35 absolute mean deviation.

Keywords: R134a, Condensation, heat transfer coefficient, Nusselt number

SEMBOLLER

A	Isı geçiş alanı (m^2)
c_p	Özgül Isı (J/kgK)
d_i	Test borusu iç çapı (m)
dP/dz	Boru boyunca basınç kayıp gradyeni (Pa/m)
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
G	Kütleli akı (kg/m^2s)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{sb}	Doymuş sıvı buhar antalpi farkı
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
L	Test borusu uzunluğu (m)
l'	Karakteristik uzunluk, $\sqrt[3]{u_{soğ,s}^2/g}$
\dot{m}	Debi (kg/s)
Nu	Nusselt sayısı
\dot{Q}	Isı geçişi (W)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
z	Boru eksenine boyunca mesafe (m)
Δx	Giriş ve çıkış kurulum derecesi farkı
ΔT	Soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki fark ($^{\circ}C$)
μ	Dinamik viskozite (Pas)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
τ	Kayma gerilmesi (Pa)

Alt İndisler

ara	Ara yüzey
b	Buhar
c	Cidar
ζ	Çıkış
d	Doyma
duy	Duyulur
g	Giriş
giz	Gizli
ort	Ortalama
s	Sıvı
$soğ$	Soğutucu akışkan-R134a
su	Su
t	Toplam

GİRİŞ

Boru içerisinde yoğuşma soğutma ve iklimlendirme başta olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada karşılaşılan bir fiziksel olaydır. Yoğuşma esnasında karmaşık yapıya sahip farklı akış türleri art arda gerçekleşmektedir. Isı geçişine bağlı yoğuşma oranı ise bu akış türlerine bağlı olarak değişmektedir. Bir sistemin optimum tasarımı; çalışma limitlerinin tespit edilmesi ve güvenlik kontrolü, doğru kabullerle hazırlanmış teorik modeller ile bu modellerde kullanılacak geniş kullanım aralığında düşük sapma oranına sahip ampirik bağıntılara bağlıdır. Yoğuşmanın karmaşık yapısı matematiksel modelleri akış türüne göre sınırlandırmayı gerektirmektedir. Bunun yanı sıra çeşitli parametre aralığı için geliştirilmiş çok sayıda ısı taşınım katsayısı bağıntısı da mevcuttur. Daha gerçekçi teorik modellerin oluşturulabilmesi ve geniş bir aralıkta kullanılabilen ısı taşınım katsayısı bağıntılarının geliştirilmesi, yoğuşma da ki ısı geçiş mekanizmalarının

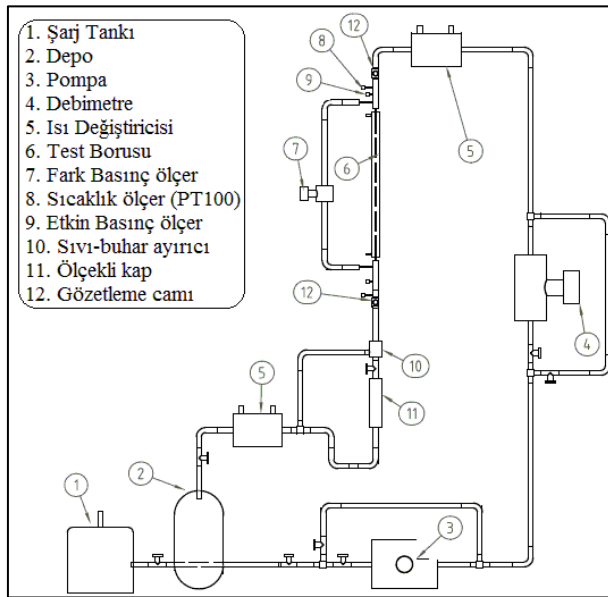
ve hidrodinamiğinin anlaşılabilmesi ve irdelenebilmesi için deneysel çalışmalar gerekmektedir. Bu durum araştırmacıları ağırlıklı olarak deneysel çalışmalara odaklamıştır. Cavallini vd, (2001) yatay konumda düz boru içerisinde R134a başta olmak üzere birçok soğutucu akışkanın yoğuşması esnasında gerçekleşen ısı geçişini ve basınç kaybını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada düşük kütleli akı ($G=100 kg/m^2s$) değerlerinde soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farkın deneysel ısı taşınım katsayısının değişiminde çok etkili olduğu vurgulanmıştır. Jung vd, (2003) bir önceki araştırmacının çalışmasına benzer olarak R134a başta olmak üzere çeşitli soğutucu akışkanların yatay konumdaki düz boru içerisinde yoğuşmasını deneysel olarak araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar bir önceki araştırma ile paralellik göstermiş ve çalışmada Dobson ve Chato (1998) bağıntısı yeniden düzenlenmiştir. Al-Shammari vd, (2004) su buharının düşey boru içerisinde yoğuşmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Test borusu boyunca ısı akısı değişimi tespit edilmiştir. Test borusunun alt kısımlarına doğru çekilen ısı miktarı azalmıştır. Bunun nedeni olarak, artan sıvı film kalınlığına bağlı olarak sıvı filmi ısı direncinin artması gösterilmiştir. Oh ve Revankar (2005) düşey boru içerisinde su buharının tamamen yoğuşmasını sağlayacak bir deney düzeneği kurmuşlardır. Yapılan deneylerde artan sistem basıncına bağlı olarak yoğuşma ısı geçiş miktarı artmış, yoğuşma ısı taşınım katsayısı ise düşmüştür. Soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farkın artışına göre yoğuşma ısı taşınım katsayısı düşmüştür. Deney verileri Nusselt (1916) düşey düz plaka yoğuşma modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar %15 oranında sapma göstermiştir. Dalkılıç vd, (2009) R134a soğutucu akışkanının düşey boru içerisinde yoğuşmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Yoğuşma ısı taşınım katsayısının boru boyunca düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca düşük doyma basıncında elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri yüksek doyma basıncında elde edilen değerlere göre yüksek çıkmıştır. Valladares (2003) literatürde yer alan yoğuşma ısı taşınım katsayısı bağıntılarını özetlemiştir. Literatürde yer alan deney verileri ile bağıntılar karşılaştırıldığında Dobson vd, (1994), Dobson ve Chato (1998), Cavallini vd, (2001) bağıntılarının farklı soğutucu akışkanlar ve sınır şartları altında en hassas sonuçları verdiği vurgulanmıştır.

Literatürde soğutucu akışkan R-134a ile düşey borularda yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde çalışmaların ağırlıklı olarak $100-600 kg/m^2s$ kütleli akı değerlerinde olduğu, deneysel çalışmaların cidar ile buhar sıcaklık farkının düşük kütleli akı değerlerinde ve yüksek yoğuşma basınçlarında odaklanmadığı görülmektedir. Yine bu çalışmalar incelendiğinde yatay konumdaki yoğuşurucu çalışmalarının daha geniş parametre aralığında incelendiği de belirtilebilir. Bu çalışma düşük kütleli akı değerlerinde düşey borularda yoğuşmanın ısı geçişi ve iki fazlı akış hidrodinamiği açısından deneysel olarak irdelenmesini hedeflemektedir. Bu çalışmada iç yüzeyi düz düşey boru içerisinde R134a soğutucu akışkan buharının yoğuşması

esnasında gerçekleşen ısı geçişi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler 5.8–5.9 bar doyma basıncı, 30–40 kg/m²s kütleli akı değerlerinde yapılmıştır. Ayrıca Akers vd, (1959), Tandon vd, (1995), Fujii (1995), Jung (2003), Shah (1979), Dobson vd, (1994), Cavallini ve Zecchin (1971), Traviss vd, (1973) yoğuşma ısı taşınım katsayısı bağıntıları ile deney verileri karşılaştırılmış, bağıntıların geçerlilik aralıkları irdelenmiştir. Bunlara ek olarak klasik Nusselt yoğuşma modeli deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu modelde ara yüzey kayma gerilmesi ihmal edilmektedir. Ara yüzey kayma gerilmesinin yoğuşma ile gerçekleşen ısı geçişine etkisini vurgulamak için aynı model sabit ara yüzey kayma gerilmesi sınır şartında çözdürülmüştür.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Düşey konumdaki düz boru içerisinde R134a buharının yoğuşması esnasında gerçekleşen ısı geçişini deneysel olarak incelemek için bir deney tesisatı kurulmuştur. Bu tesisat R134a soğutucu akışkanının dolaştırıldığı sızdırmaz ve kapalı bir çevrimden oluşmaktadır. Deney tesisatının şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: Deney tesisatının şematik gösterimi

Deneyler esnasında sıvı seviyesini ve sistem basıncını belli bir değerde tutmak için sürekli soğutulan depodan bir pompa kullanılarak sıvı R134a sistemde dolaştırılmaktadır. Sıvı R134a buharlaştırıcıda buhar haline geçmekte ve buhar test borusunda belli bir miktar yoğuşturulmaktadır. Test borusu çıkışına yerleştirilen sıvı-buhar ayırıcı vasıtasıyla yoğuşan sıvı bir ölçekli kaba yönlendirilmekte, bu ölçekli kaptaki biriken sıvı miktarı ölçülerek test borusu çıkışında elde edilen kuruluk derecesi de tespit edilebilmektedir. Sıvı-buhar ayırıcıdan çıkan buhar yoğuşturucuda soğutulmuş depoya gönderilmektedir. Bu çevrimde gerekli olan ısıtma ve soğutma işlemleri su sirkülasyon banyoları kullanılarak yapılmaktadır.

Test borusu iç içe geçmiş iki bakır borudan oluşmaktadır. İç boru 9.52 mm dış çapında ve 1 mm et kalınlığında olup içerisinde R134a dolaştırılmaktadır. Dış boru ise 16 mm iç çapında olup içerisinde soğuk su dolaştırılmaktadır. Test borusu giriş ve çıkışında R134a'nın basınç ve sıcaklığı ile su sıcaklıkları ölçülmektedir. Ayrıca gözetleme camları ile R134a soğutucu akışkanının test borusu giriş ve çıkışındaki buhar veya sıvı-buhar karışımı olma hali takip edilmektedir. İç borunun dış yüzeyine karşılıklı 2 tane olmak üzere 20 cm aralıklarla toplam 12 adet K-tipi ısılı çift yerleştirilmiştir. Test borusundan çekilen toplam ısı miktarı soğutma suyundaki sıcaklık artışına göre hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{su} c_{p,su} (T_{su,\zeta} - T_{su,g}) \quad (1)$$

Test borusu girişinde kızgın buhar olmasına karşın cidar sıcaklığının doyma sıcaklığından düşük olmasından dolayı yoğuşmanın bu noktada başladığı kabul edilmiştir. Yoğuşmanın başladığı bu noktada kuruluk derecesi birdir ve yoğuşmadan dolayı test borusu çıkışında sıvı buhar karışımı birlikte akmaktadır. Test borusu boyunca elde edilen kuruluk derecesi değişimi ise test borusu çıkışındaki kuruluk derecesinin girişteki değerden çıkarılması ile elde edilmiştir. Test borusundan çekilen toplam ısının bir bölümü kızgın buharın doymuş buhar haline gelmesi için kullanılmaktadır. Test borusundan çekilen gizli ısı ise toplam çekilen ısıdan duyulur ısı miktarının çıkarılması ile elde edilmektedir.

$$\dot{Q}_{duy} = \dot{m}_{soğ} c_{p,soğ} (T_{soğ,g} - T_{soğ,d}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{giz} = \dot{Q}_t - \dot{Q}_{duy} \quad (3)$$

Test borusu boyunca yerel Nusselt sayısı Eş. (4) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Nu = \left(\frac{\nu}{k_{soğ}} \right) \frac{\dot{Q}_{giz}}{A(T_{soğ,d} - T_{c,iç})} \quad (4)$$

Bu çalışmada, test borusundan çekilen toplam ısı hem soğutucu akışkanın faz değiştirmesinde hem de kızgın buharın doyma noktasına gelmesinde kullanılmaktadır. Esas olarak yoğuşma ile gerçekleşen ısı geçişi incelendiği için test borusundan çekilen gizli ısı miktarı esas alınmıştır ve duyulur ısı miktarı mümkün olduğunca düşük tutulmuştur. İncelenen bütün deneylerde duyulur ısı miktarının toplam ısı miktarının %10 undan daha düşük olmasına dikkat edilmiştir. Test borusu boyunca yerel ısı taşınım katsayısına bağlı yerel Nusselt sayısı sabit ısı akışı kabulü yapılarak elde edilmiş ve Eş. (5) kullanılarak test borusu boyunca ortalama Nusselt sayısı hesaplanmıştır.

$$Nu_{ort} = \frac{\int_0^L Nu(z) dz}{L} \quad (5)$$

Bu hesaplamalarda Nusselt sayısı değerleri ayrık veriler olduğu için sayısal integral işlemi uygulanmıştır.

Deneysel boyunca soğutucu akışkan R134a debisi Koriolis tip debimetre ile soğutma suyu debisi ise türbin tip debimetre ile ölçülmüştür. Test borusu giriş ve çıkışında R134a sıcaklığı PT100 direnç termometresi kullanılarak, diğer sıcaklık ölçümleri ise ısı çift kullanılarak yapılmıştır.

Deney tesisatında kullanılan cihazlara ve bazı hesaplanan değerlere ait belirsizlikler Tablo 1’de verilmiştir. Genel olarak yoğuşma Nusselt sayısındaki belirsizlik \pm %7-%18 arasında değişmektedir. Test borusundan çekilen ısı miktarı arttırıldıkça belirsizlikler de azalmaktadır.

Tablo 1: Deneysel Belirsizlikler

Ölçülen Değerler	\pm
PT100 direnç termometresi	0.05 °C
Isıl çift	0.05 °C
Basınç	0.5 %
Koriolis Debimetre	0.25 %
Türbin debimetre	1 %
Q	10-20 %
Δx	8-20 %
Nu	7-18 %

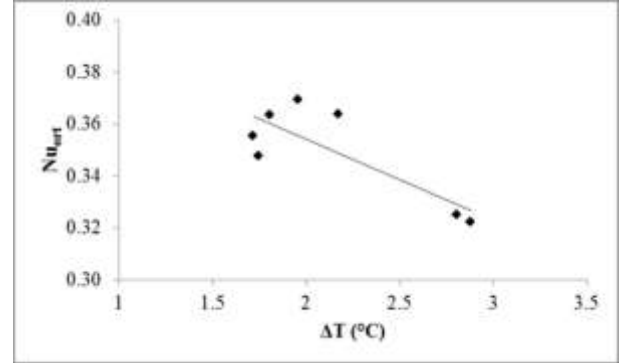
DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Düşey boru içerisinde R134a soğutucu akışkanının yoğuşması esnasında gerçekleşen ısı taşınım katsayısı ve buna bağlı Nusselt sayısı deneysel olarak araştırılmıştır. Yoğuşma ile gerçekleşen ısı geçişine doyma basıncı veya sıcaklığı, kütle akı gibi başka parametrelerin etkileri de söz konusudur. Bu deneysel çalışmada ise öncelikli olarak soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farkın ve kuruluk derecesindeki değişimin yoğuşma Nusselt sayısına etkisi incelenmiştir. Belirtilen bu parametrelerin etkisini irdeleyebilmek için sabit doyma basıncı ve kütle akı değerlerinde mümkün olduğunca ölçüm aralığını geniş tutmak istenilmiştir. Bunun içinde soğutucu akışkan buhar debisi düşük tutularak 1 m. uzunluğundaki test borusunda yoğuşan madde miktarı artırılmıştır. Ayrıca sıvı filminin laminar olarak akması, sıvı filmi içerisinde iletme oranla taşınım ile gerçekleşen ısı geçişinin etkisini azaltacağı için soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ve cidar sıcaklığı arasındaki farkın yoğuşma Nusselt sayısı üzerindeki etkisi daha net ifade edilebilecektir.

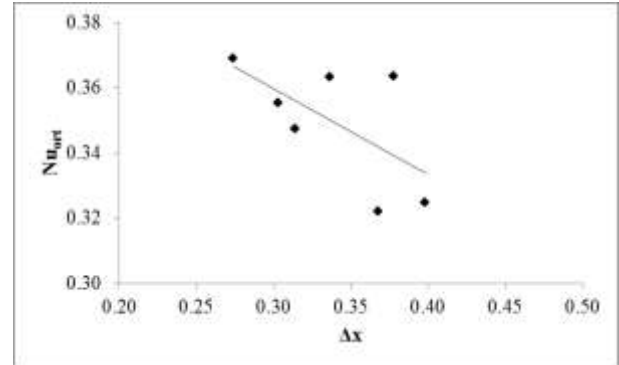
Ölçülen sıcaklık, basınç ve debi değerlerine göre ısı taşınım katsayısının soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki fark ve kuruluk derecesi farkına göre değişimi incelenmiştir. Şekil 2’de soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farkın ortalama Nusselt sayısına etkisi gösterilmiştir.

Düşük sıcaklık farklarında elde edilen Nusselt sayısı daha yüksek çıkmıştır. Soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki fark arttıkça çekilen ısı miktarı artmakta, buna bağlı olarak daha fazla soğutucu akışkan yoğuşturulabilmektedir. Bu durum ısı direnci

artırmaktadır ve ortalama Nusselt sayısının düşmesine sebep olmaktadır. Şekil 3’de ise ortalama Nusselt sayısının kuruluk derecesi değişimine göre değişimi verilmiştir.



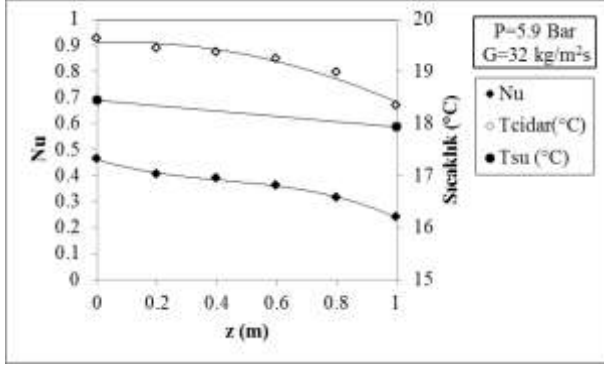
Şekil 2: Soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farkın ortalama Nusselt sayısına etkisi



Şekil 3: Kuruluk derecesi değişiminin ortalama Nusselt sayısına etkisi

Burada da artan kuruluk derecesi değişimine bağlı olarak ortalama Nusselt sayısının düştüğü görülmektedir. Düşey boru içerisinde baskın olarak gerçekleşen akış türü halkasal akıştır. Halkasal akışta, boru iç cidarı tamamen sıvı filmi ile kaplanırken boru merkezinden ise buhar akmaktadır. Bu akış türünde buharın sıvı filmine temas etmemektedir. Yoğuşma ise buharın sıvı filmine temas etmesi ile gerçekleşmektedir. Özellikle düşük kütle akı değerlerinde sıvı film kalınlığı her ne kadar boru çapına oranla çok küçük olsa da geçen ısı miktarında etkili olmaktadır. Düşük soğutucu akışkan kütle akı değerlerinde yoğuşan sıvı filmi Reynolds sayısı da düşük olmaktadır ve sıvı filmi laminar olarak akmaktadır. Sıcak buhardan soğuk cidara doğru gerçekleşen ısı geçişinde oluşan ısı direncin 4 temel bileşeni vardır. Bunlar sırasıyla buhar faz içinde gerçekleşen ısı geçişinden dolayı oluşan direnç, ara yüzeyde kütle alış-verişi ile gerçekleşen ısı geçişinden dolayı oluşan direnç, sıvı filmi içerisinde iletim ve taşınım ile gerçekleşen ısı geçişinden dolayı oluşan direnç ile cidardan iletimle geçen ısı geçişinden dolayı oluşan dirençtir. Bu ısı geçişi olayında en büyük sıcaklık farkı sıvı filmi içerisinde, ara yüzey ve cidar arasında gözlemlenmektedir. Bu nedenle ısı geçişini karakterize eden ısı direnci sıvı filminden dolayı oluşan dirençtir. Sıvı filminin laminar halde akması ısı geçişinde iletimin taşınım oranla baskın olmasına yol açmaktadır. Bu da

artan soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak ısıl direnci artırmaktadır ve ortalama Nusselt sayısını azaltmaktadır. Şekil 4’de Nusselt sayısının, cidar sıcaklığının boru boyunca değişimi ile birlikte soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları verilmiştir.



Şekil 4: Nusselt sayısı ile sıcaklıkların test borusu boyunca değişimi

Görüldüğü gibi test borusu boyunca cidar sıcaklığı azalmaktadır. Test borusu ters akışlı olduğu için soğutma suyu test borusu girişine doğru hareket ederken soğutucu akışkandan ısı çekerek ısınmaktadır. Bunun yanı sıra yerel Nusselt sayısının test borusu boyunca azaldığı görülmektedir. Test borusu boyunca yoğuşan madde miktarı ve buna bağlı olarak sıvı film kalınlığını artırmaktadır. Artan kalınlığa bağlı olarak artan ısıl dirençten ötürü yerel Nusselt sayısında düşüş olmaktadır.

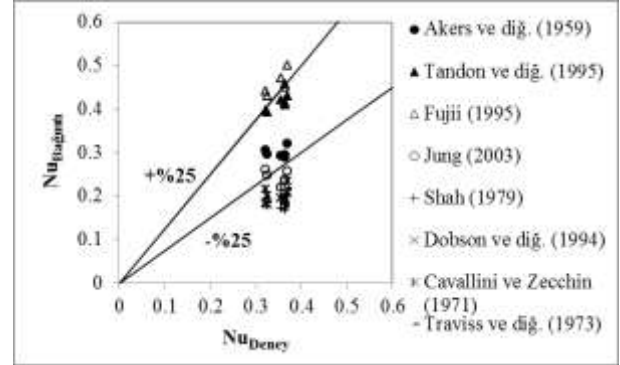
ISI TAŞINIM KATSAYISI BAĞINTILARININ VE KLASİK NUSSOLT YOĞUŞMA MODELİNİN İNCELENMESİ

Çalışma kapsamında üzerinde durulan bir diğer husus ise literatür de yaygın kullanılan bazı ısı taşınım katsayısı bağıntılarının deney verilerini ne ölçüde tahmin ettiğinin araştırılmasıdır. Akers vd, (1959), Tandon vd, (1995), Fujii (1995), Jung (2003), Shah (1979), Dobson vd, (1994), Cavallini ve Zecchin (1971), Traviss vd, (1973) tarafından geliştirilmiş bağıntılardan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Şekil 5’de $\pm\%25$ hata aralığında bağıntıların sapma oranları gösterilmektedir. Bunun yanı sıra bağıntıların tutarlılığını karşılaştırmak için ortalama sapma (ϵ_{os}), ortalama mutlak sapma (ϵ_{oms}) ve standart sapma (ϵ_{st}) değerleri de hesaplanmıştır. Bütün bağıntılardan elde edilen sonuçlar Tablo 2’de detaylı olarak verilmiştir.

Deney verileri ile kıyaslama sonucu yapılan incelemede % 14.8 ortalama mutlak sapma ile en iyi sonucu Akers vd, (1959) bağıntısı vermektedir. Bu bağıntı eşdeğer sıvı filmi akışı kabulü ile oluşturulmuş bir bağıntı olup, bu kabule göre halkasal akışta yer alan buhar çekirdeği, sıvı buhar ara yüzeyinde aynı kayma gerilmesi oluşturacak bir sıvı akışı ile değiştirilebilir. Ara yüzey kayma gerilmesi artan kütleli akıya bağlı olarak

artmaktadır. Bu bağıntının iyi sonuçlar vermesi kütleli akının ve buna bağlı olarak ara yüzey kayma gerilmesinin düşük olması ile açıklanabilir.



Şekil 5: Isı taşınım katsayısı bağıntılarının deney verileri ile karşılaştırılması

Tablo 2: Isı taşınım katsayısı bağıntı sonuçları

	ϵ_{oms} (%)	ϵ_{os} (%)	ϵ_{st} (%)
1. Akers (1959)	14.8	14.8	5.9
2. Tandon vd,(1995)	16.4	16.4	4.1
3. Fujii (1995)	29.6	29.6	5.5
4. Jung (2003)	31.5	31.5	7.6
5. Cavallini-Zecchin(1971)	42.3	42.3	5.8
6. Traviss vd, (1973)	46.0	46.0	5.0
7. Dobson vd,(1994)	46.2	46.2	1.9
8. Shah (1979)	49.4	49.4	4.9

Sıvı filmi yoğuşması ile ilgili en önemli çalışmalardan biri, Nusselt (1916) tarafından saf, doymuş buharın soğuk yüzeye temas etmesi sonucu yoğuşmasının analitik olarak incelenmesidir. Bu analitik çözümlemede, sıvı filmi çok ince olduğu için sıcaklık gradyanı sıvı filmi boyunca doğrusal olarak değiştiği kabul edilmiştir. Yoğuşma esnasında levhaya geçen ısı yüzeye dik olacak şekilde sadece iletimle geçmektedir. Yoğuşan sıvı filminin fiziksel özellikleri ortalama film sıcaklığında alınmıştır. Yoğuşmanın gerçekleştiği yüzey pürüzsüz ve temizdir. Sıvı filmi her zaman viskoz hareketle ilerlemektedir. Bir başka deyişle sıvı filmi laminar olarak akmaktadır. Sıvı ve buhar arasında oluşan ara yüzey düzdür ve dalgalanmalar ihmal edilmiştir. Levha yüzey sıcaklığı sabittir. Bu analiz sonucu elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır.

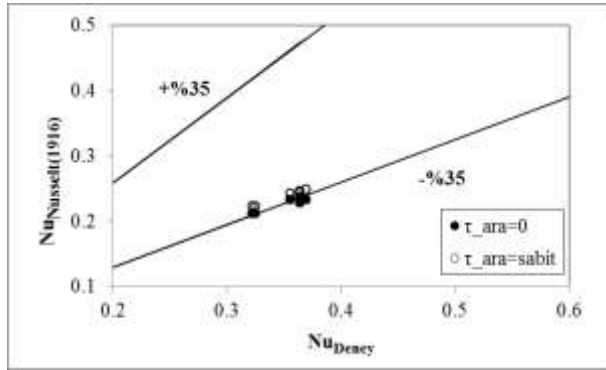
$$h_{ort} = 0.943 \left[\frac{\mu_{soğ,s}(T_{soğ,d}-T_{soğ,c})L}{k_{soğ,s}^3 h_{sb} \rho_{soğ,s} (\rho_{soğ,s} - \rho_{soğ,b}) g} \right]^{-0.25} \quad (6)$$

Bu bağıntının pratik uygulamalarda sıkça kullanılması sebebi ara yüzey kayma gerilmesinin ihmal edilmesinden ötürü analitik işlemlerin basitleşmesidir. Fakat boru içi yoğuşma da dış akıştan farklı olarak sıvı-buhar ara yüzeyi ısı geçişinde önemli olmaktadır. Bu nedenle ara yüzey kayma gerilmesinin ihmal edilmesi

elde edilen sonuçlarda hataya sebebiyet verebilmektedir. Nusselt (1916) dış akış modelinde belirtilen kabuller doğrultusunda ara yüzey kayma gerilmesi de göz önüne alınarak bu model yeniden düzenlenmiştir. Nusselt (1916) ve daha sonra bu konu üzerinde çalışan araştırmacılar boru içi akışta ara yüzey kayma gerilmesini ifade etmek için basınç kaybını kullanmıştır. Kayma gerilmelerinden ötürü boru çeperine etki eden kuvvetler kesit alanına etki eden basınç kuvvetlerine eşit alınmıştır. Bu sayede boru boyunca ara yüzey kayma gerilmesi Eş. (7) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\tau_{ara} = \frac{d_i dP}{4 dz} \quad (7)$$

Boru boyunca ara yüzey kayma gerilmesinin ve buna bağlı olarak basınç gradyeninin çok fazla değişmediği kabul edilerek, basınç kaybı test borusu girişinde doymuş buhar verileri kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 6: Klasik Nusselt yoğuşma model sonuçları

Deney verileri ile kıyaslandığında klasik Nusselt yoğuşma modelinin % 35 ortalama mutlak sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı model için sabit ara yüzey kayma gerilmesi kullanıldığında ise elde edilen sonuçların % 32 ortalama mutlak sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Ara yüzey kayma gerilmesinin modele tanıtılması elde edilen sonuçlarda bir iyileşmeye yol açmıştır. Özellikle boru çapının küçük olması ve sıvı buhar ara yüzeyinde meydana gelen kütle alışı verisi yoğuşma ile gerçekleşen ısı geçişinde çok önemli rol oynamaktadır.

DEĞERLENDİRME

Boru içi yoğuşma, üzerinde deneysel ve teorik birçok çalışmanın yapılmakta olduğu bir konudur. Yoğuşmanın teorik olarak karmaşık bir yapıya sahip olması, deneysel çalışmanın önemini artırmaktadır. Farklı çalışma şartları altında, boru içi yoğuşma esnasında gerçekleşen ısı geçişine etki eden parametreler araştırılmaktadır. Bu çalışmada düşey düz boru içerisinde R134a soğutucu akışkan buharının yoğuşması incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aynı doyma basıncı ile kütle akışı yapılan deneylerde artan soğutucu akışkan doyma sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki farka veya kuruluk derecesi değişimine göre ortalama Nusselt sayısı azalmaktadır. Test borusu boyunca yerel Nusselt sayısının artan sıvı film kalınlığına bağlı olarak düştüğü

tespit edilmiştir. Isı taşınım katsayısı bağıntıları deney verileri ile kıyaslandığında en iyi sonuçlar Akers vd, (1959) bağıntısından elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 108M262 no'lu 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından BAP 33551 no'lu proje ile destek verilmiştir. Yazarlar, destek veren kurum ve kuruluşlara teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Akers, W.W., Deans H.A., Crosser O. K., 1959, Condensing Heat Transfer within Horizontal Tubes, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, Vol. 55, No.29, pp. 171-176.

Al-Shammari S.B., Webb D.R., Heggs P., 2004, Condensation of Steam with and without the Presence of Non-condensable Gases in a Vertical Tube, *Desalination*, Vol. 169, pp. 151-160.

Cavallini A., Censi G., Del Col D., Doretti L., Longo G.A., Rossetto L., 2001, Experimental Investigation on Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of New HFC Refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a Horizontal Smooth Tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24 pp. 73-87.

Cavallini A., Zecchin R., 1971, A Dimensionless Correlation for Heat Transfer in Forced Convection Condensation, *Proceedings of the XIIIth International Congress of Refrigeration*, Vol. 2, pp. 193-200.

Dalkilic A.S., Yıldız S., Wongwises S., 2009, Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Coefficient During Downward Laminar Flow Condensation of HFC-134a in a Vertical Smooth Tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp.142-150.

Dobson, M. K., Chato, J. C., 1998, Condensation in Smooth Horizontal Tubes, *Journal of Heat Transfer*, vol. 120, pp. 193-213.

Dobson, M. K., Chato, J. C., Wattlelet, J. P., and Gaibel, J. A., 1994, Heat Transfer and Flow Regimes During Condensation in Horizontal Tubes, *ACRC Technical Report 57*, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Fujii, T., 1995, Enhancement to Condensing Heat Transfer—New Developments, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 2, pp. 127-137.

Jung D., Song K., Cho Y., Kim S., 2003, Flow Condensation Heat Transfer Coefficients of Pure Refrigerants, *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 26, pp.4-11.

Nusselt W., 1916, Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes, *Zeitschr Ver. Deutsh. Ing.* Vol. 60 pp. 541–546.

Oh S., Revankar S. T., 2005, Complete Condensation in a Vertical Tube Passive Condenser, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 593-602.

Shah M. M., 1979, A General Correlation for Heat Transfer During Film Condensation Inside Pipes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp. 547-556.

Tandon, T. N., Varma, H. K., Gupta, C. P., 1995, Heat Transfer During Forced Convection Condensation Inside Horizontal Tube, *International Journal of Refrigeration*. Vol. 18, No. 3, pp. 210–214.

Traviss, D.P., Rohsenow W.M., Baron A.B., 1973, Forced-Convection Condensation Inside Tubes: A Heat Transfer Equation for Condenser Design, *ASHRAE Transactions*, Vol.79, No.2, 31-39.

Valladares O. G., 2003, Review of In-tube Condensation Heat Transfer Correlations for Smooth and Micro-fin Tubes, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, No.14, pp. 6-24.



Gökhan ARSLAN, 1981 Erzincan doğumludur. 2004 yılında Marmara Üniversitesi, Makina Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2007 yılında İTÜ Makina Mühendisliği bölümü, Isı-Akışkan programı kapsamında yüksek lisansını tamamladı. Aynı bölümde 2013 yılında doktor unvanı alan araştırmacı İTÜ Makina Mühendisliği bölümü, Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim dalı bünyesinde Doktor Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarını sürdürmektedir. Isı boruları, iki fazlı akışlar, ısı değiştiricileri, yenilenebilir enerji kaynakları başlıca çalışma konularıdır.



Nurdil ESKİN, Boğaziçi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden önce lisans daha sonra da yüksek lisans diplomalarını alarak 1981 yılında mezun olmuştur. 1982-1990 yılları arasında Parsons-Brinkerhoff TSB şirketinde İstanbul Metro ve Tüp Geçit Avan Projesi başta olmak üzere, metro ve raylı taşıma sistemlerinde havalandırma, iklimlendirme, drenaj ve yangın güvenliği konularında çalışmıştır. Bilim doktoru derecesini İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği programında 1990 yılında almıştır. 1990-1992 yılları arasında öğretim görevlisi, 1992-1997 yılları arasında Yardımcı Doçent ve 1997 yılında Doçent, 2004 yılından itibaren de Profesör olarak İ.T.Ü. Makina Fakültesinde görev yapmaktadır. İki-Fazlı Akışlar ve Uygulamaları, Kabarcıklı ve Dolaşım Akışkan Yataklı Kazanlar, Isı Tekniği Uygulamaları, Dizel Motorlarda Yanma ve Soğutma ve Binalarda Enerji Verimliliği konularında çalışmaktadır.