

***Boru İçi Yoğuşma Korelasyonlarının Karşılaştırılması**

Mustafa ASKER, Oğuz Emrah TURGUT
mustafa.fikret@gmail.com, oeturgut@hotmail.com

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Bu makalede boru içi yoğuşma ısı transferi katsayısının hesaplanmasında kullanılan korelasyonların kesinliği tartışılmıştır. R134a, R717 ve R600a gazları, test akışkanları olarak kullanılmıştır. Değişik araştırmacılar tarafından elde edilen deneysel veriler makalede sözü edilen korelasyonlara uygulanarak optimum sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Korelasyonlar karşılaştırıldığında R134a gazı için makalede adı geçen her korelasyonun deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Diğer soğutucu akışkanlara göre farklı termodinamik özelliklere sahip olan R717, korelasyon karakteristiklerinin dışına çıkmış ve %300'lere varan hata oranlarına (%103 standart sapma) ulaşmıştır. R600a ise maksimum % 26.789 standart sapma değerlerine ulaşarak ortalama bir yaklaşımda bulunmuştur. Bütün bu verilerin ışığında akış rejimi bazlı korelasyonların diğerlerine göre daha başarılı olduğu ve bilim adamlarının akış rejimli denklemler üretmesi gerektiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Soğutucu akışkanlar, Boru içi yoğuşma, Cavallini korelasyonu

1. GİRİŞ

Yoğuşmalı ısı transferi iklimlendirme, ısı pompası uygulamaları, soğutma ve klima sistemlerinin tasarımında büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde değişik alternatif soğutucu akışkanlar soğutma sistemlerinde kullanılmaktadır. R134a, 90'lı yıllarda ozon tabakasına zararlı olduğu için birçok ülkede kullanımı yasaklanan R12 gazının yerine kullanılmak üzere üretilmiştir. Üretim amacına uygun olarak ozon tabakasına herhangi bir zararlı etkisi yoktur. R717 (Amonyak) soğutma sanayinde özellikle buz üretimine, soğuk depolama tesislerinde soğutucu akışkan olarak kullanılmaktadır. Zehirleyici etkisinden dolayı tiyatro, sinema ve okul gibi toplu yaşam ortamlarının soğutma sistemlerinde genellikle uygulanmaz. Küçük soğutma yükleri için pek elverişli değildir. Bundan dolayı iklimlendirme sistemlerinde genellikle kullanılmaz. R600a (izobütan) ise doğalgaz ve petrol rafinerisinden elde edilmektedir. Hidrokarbon özelliğinden dolayı doğayla barışıktır. Ev tipi buzdolaplarında, ticari soğutucularda ve poliüretan üretiminde şişirici olarak kullanılmaktadır.

Boru içinde yoğuşma genel olarak yatay ve dikey boru düzenlerinde meydana gelmektedir. Boru düzenlemelerinde meydana gelen ısı transferi

değerleri boru içindeki akış düzeninin ve yukarıda adı geçen soğutucu gazların birer fonksiyonudur. Yatay borulardaki local ısı transferi katsayılarını elde etmek için geçmişten günümüze bir çok korelasyon oluşturulmuştur. Bu korelasyonların çoğu akış rejimlerinin bir fonksiyonu olarak hazırlanmıştır. Akış rejimlerinin en iyi gözlemlendiği boru düzeni yatay borulardır. Yatay borularda meydana gelen yoğuşmalı ısı transferi ile ilgili birçok araştırmacı çeşitli çalışmalarda bulunmuştur.

Cavallini ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada boru içinde ve boru dışında yoğuşmalı ısı transferi ile ilgili kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Ayrıca sanayide yoğuşurucuların ısı tasarımları ile ilgili sonuçlar sunulmuştur [1].

El Hajal ve arkadaşları ise yatay borular için yeni akış düzeni haritası bazlı yoğuşmalı ısı transfer modeli geliştirmişlerdir [2,3]. Cavallini ve arkadaşları başka bir çalışmada ise lokal ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü değerlerini, farklı soğutucu akışkanlar için (R134a, R125, R410A, R236ea, R32) yatay boruda yoğuşma durumu içinde deneysel olarak incelemişlerdir [4]. Jung ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise yoğuşmalı ısı transfer katsayısı farklı soğutucu akışkanlar için R12, R22, R32, R123, R125, R134a ve R142b deneysel olarak hesaplanmış ve bununla ilgili korelasyonlar oluşturulmuştur [5].

Park ve Hrnjak, 8.1 mm çaplı tüplerde ve 35°C doyma sıcaklığında NH₃ üzerinde testler yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda, NH₃ bazlı yoğuşma ısı transferi ve basınç düşümü korelasyonları oluşturulmuştur. [16]

2. YÖNTEM VE METOD

Yatay borularda yoğuşmalı ısı transferi için bir çok korelasyon önerilmiştir. Bu korelasyonlar yerçekimi ve zorlanmış konvektif etkilerin dikkate alınmasıyla oluşturulmuştur. Yüksek kütleli hızlarda ($G > 400$ [kg/m²s]) ısı transferi karakteristiği zorlanmış taşınım belirlerken orta seviyedeki kütleli hızlarda ($100 < G < 400$) bu etki eşit derecededir. Düşük kütleli hızlarda ($G < 100$ [kg/m²s]) ise yerçekimine bağlı etkiler baskındır. Düz borular için oluşturulan korelasyonlar aşağıda verildiği gibidir.



2.1. Akers Korelasyonu

$0 < x < 1$ buhar kalitesi aralığı $G < 200$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$] kütleli hızları için oluşturulan korelasyon

$$\frac{hD}{k_L} = C \text{Re}_{TP}^n \text{Pr}_L^{1/3} \quad (1)$$

Denklemlerle hesaplanır. Burada Re_{TP} çift fazlı Reynolds sayısıdır ve denklem 2 ile verilmiştir.

$$\text{Re}_{TP} = \frac{G \left[(1-x) + x \sqrt{\rho_L / \rho_G} \right] D}{\mu_L} \quad (2)$$

C ise sabittir ve denklem 3 ifade edilmiştir [6].

$$C = 0.0265, \quad n = 0.8 \quad \text{Re}_{TP} > 50000 \quad (3)$$

$$C = 5.03, \quad n = 0.33 \quad \text{Re}_{TP} < 50000$$

2.2. Shah Korelasyonu

Zorlanmış taşınım temelli oluşturulan bu korelasyon Dittus-Boelter [7] denkleminin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır [8].

$$\frac{h}{h_{LO}} = (1-x)^{0.8} + \frac{3.8x^{0.76}(1-x)^{0.04}}{\text{Pr}^{0.38}} \quad (4)$$

2.3. Dobson ve Chato Korelasyonu

Bu korelasyon R12, R22 ve R134a veritabanları kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma şartları $x=0.1-0.9$ buhar kaliteleri, $D=3.14-7.04$ mm boru çapları arasında değişmektedir. Burada $G > 500$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$] iken ısı transferi katsayısı

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k_L} = 0.023 \text{Re}_L^{0.8} \text{Pr}_L^{0.4} \left[1 + \frac{2.22}{X_n^{0.89}} \right] \quad (5)$$

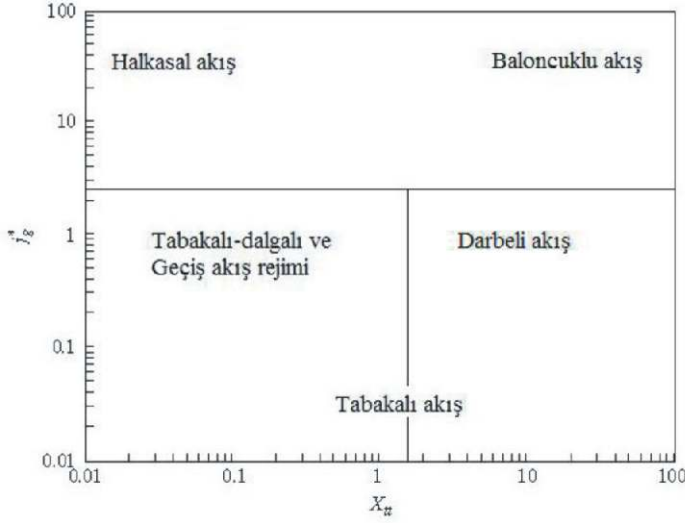
şeklinde. $G < 500$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$] Değiştirilmiş Froude sayısının (Fr^*) büyüklüğüne göre Nusselt sayısı değerleri değişmektedir. $Fr^* > 20$ iken denklem (5) kullanılmıştır, $Fr^* < 20$ durumunda ise (6) denklemi ile ifade edilmiştir [9].

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k_L} = \frac{0.23 \text{Re}_{GO}^{0.12} \left[\frac{Ga_L \text{Pr}_L}{Ja_L} \right]^{0.25}}{1 + 1.1 X_n^{0.58}} + \left(1 - \frac{\theta_L}{\pi} \right) \left[0.0195 \text{Re}_L^{0.8} \text{Pr}_L^{0.4} \sqrt{1.376 + \frac{C_1}{X_n^{c_2}}} \right] \quad (6)$$

2.4. Cavallini Korelasyonu

R22, R32, R125, R410, R134a ve R407C akışkanlarının veritabanlarından oluşturulan bu korelasyonda $Pr < 0.75$, $D > 2$ mm. $(\rho_L / \rho_G) > 4$ sınırlamalarını içermektedir.

Diğer akış rejimleri için oluşturulan ısı transferi katsayıları değerleri tabakalı ve halkalı akış rejimlerinin interpolasyonu sonucu oluşmuş sayısal değerlerdir. Cavallini korelasyonu için hazırlanan yoğunlaşma ısı transferi rejimleri Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Cavallini Korelasyonu için hazırlanmış akış rejimi haritası

$$J_g^* = \frac{Gx}{\rho_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\Delta\rho gD}} > 2.5 \quad (7)$$

Olması durumunda halkasal akışın oluştuğunu ve bu rejim için Denklem (8) önerilmiştir.

$$h = \frac{\rho_L c_{pL} \sqrt{(\tau/\rho_L)}}{T^+} \quad (8)$$

Burada T^+ Denklem (9) ile tanımlanmıştır .

$$T^+ = \begin{cases} \delta^+ \text{Pr}_L & \delta^+ \leq 5 \\ 5 \left\{ \text{Pr}_L \ln \left[1 + \text{Pr}_L \left(\left(\delta^+ / 5 \right) - 1 \right) \right] \right\} & 5 < \delta^+ < 30 \\ 5 \left\{ \text{Pr}_L \ln(1 + 5 \text{Pr}_L) + 0.495 \ln(\delta^+ / 30) \right\} & \delta^+ \geq 30 \end{cases} \quad (9)$$

Tabakalı-Halkasal akış rejimi ($J_G < 2.5$ ve $X_{tt} < 1.6$) ısı transferi değerleri için ise

$$h = (h_{j_g=2.5} - h_{st})(J_G/2.5) + h_{st} \quad (10)$$

geçiş rejimi ısı transferi katsayıları önerilmiştir.

Darbeli akış ile gösterilen bölgedeki ısı transferi katsayıları değerleri ise ($J_G < 2.5$ ve $X_{tt} > 1.6$) Denklem (11) ile tanımlanmıştır [4].

$$h = h_{LO} + \frac{x(h_{1.6} - h_{LO})}{x_{1.6}} \quad (11)$$

2.5. Türbülanslı Sıvı Film Teorisi (Traviss Korelasyonu)

Von Karman sınır tabaka denklemlerinden oluşturulan bu korelasyonda boyutsuz sıcaklık Denklem (12) ile hesaplanmıştır.

$$T_i^+ = \int_0^{y_i^+} \frac{q/q_w}{1/\text{Pr}_L + \varepsilon/\nu_L} \quad (12)$$

Traviss ve arkadaşları tarafından boyutsuz sıcaklık (T^+) için denklem (13) ifade edilmiştir.

$$T^+ = \begin{cases} T_i^+ = 0.707 \text{Pr}_L \text{Re}_L^{0.5} & \text{Re}_L \leq 50 \\ 5 \text{Pr}_L + 5 \ln \left[1 + \text{Pr}_L (0.09636 \text{Re}_L^{0.585} - 1) \right] & 50 < \text{Re}_L \leq 1125 \\ 5 \text{Pr}_L + 5 \ln(1 + \text{Pr}_L) + 2.5 \ln 0.00313 \text{Re}_L^{0.812} & \text{Re}_L > 1125 \end{cases} \quad (13)$$

Soliman ve arkadaşları tarafından çift faz çarpanı (ϕ_v) için [10]

$$\phi_v = 1 + 2.85 X_u^{0.523} \quad (14)$$

değeri önerilmiş ve denklem (15) ile ifade edilmiştir [11].

$$Nu = \frac{hD}{k_L} = 0.15 \frac{\phi_v \text{Pr}_L \text{Re}_L^{0.9}}{X_u T_i^+} \quad (15)$$

2.6. Tang Korelasyonu

R410, R134a ve R22 için hazırlanan korelasyon değiştirilmiş Froude sayısı $Fr^* > 7$ iken

$$Nu = 0.023 \text{Re}_L^{0.8} \text{Pr}_L^{0.4} \left[1 + 4.863 \left(-\ln(P_r) \frac{x}{1-x} \right)^{0.836} \right] \quad (16)$$

denklemleri ile elde edilir. Değiştirilmiş Froude sayısı

$$Fr = \begin{cases} 0.025 \text{Re}_L^{1.59} \left[\frac{1 + 1.09 X_u^{0.039}}{X_u} \right]^{1.5} \left[\frac{1}{\sqrt{Ga}} \right] & \text{Re}_L < 1250 \\ 1.26 \text{Re}_L^{1.04} \left[\frac{1 + 1.09 X_u^{0.039}}{X_u} \right]^{1.5} \left[\frac{1}{\sqrt{Ga}} \right] & \text{Re}_L > 1250 \end{cases} \quad (17)$$

ile elde edilebilir. Burada sıvı Reynolds sayısı (Re_L) denklem (18) ile ifade edilmiştir.

$$\text{Re}_L = \frac{G(1-x)D}{\mu_L} \quad (18)$$

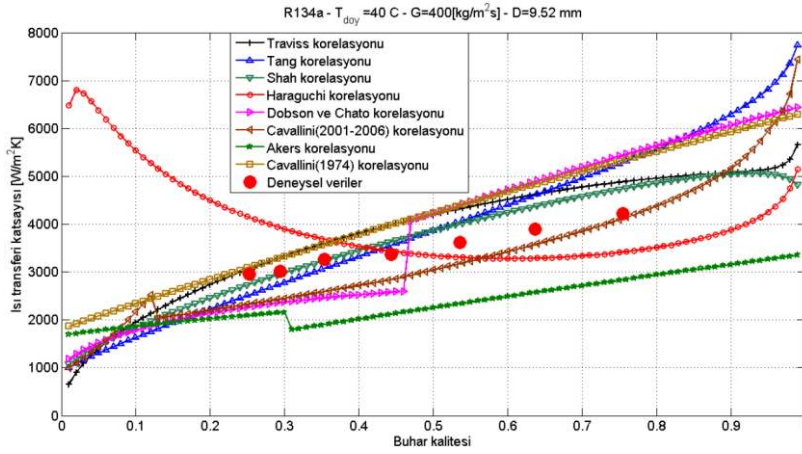
2.7. Cavallini-Zecchin Korelasyonu

Halkasal akış modeli uygulanarak oluşturulan korelasyon zorlanmış tasınım denklemleri temellidir. R12, R113 ve R22 akışkanlarının veritabanları ele alınarak denklem (19) ile verilen eşitliğini önerdi [13].

$$Nu = 0.0344 \text{Re}_L^{0.83} \left[1 + x \left(\left(\rho_L / \rho_v \right)^{0.5} - 1 \right) \right]^{0.82} \text{Pr}_L^{0.35} \quad (19)$$

3. TARTIŞMA

Şekil 2'de Cavallini ve arkadaşları [13] tarafından elde edilen deneysel veriler yukarıda verilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Bahsi geçen korelasyonlar benzer karakteristik gösterse de Shah [8] korelasyonu diğerlerine göre R134a için daha iyi bir performans göstermiştir. Şekil 3'te Şekil 2'deki ölçümler baz alınarak bir normalizasyon grafiği oluşturulmuştur. Hesaplanan değerlerin deneysel verilere oranını gösteren bu grafikte Shah[8] korelasyonu'nun üstünlüğü açıkça görülmektedir.



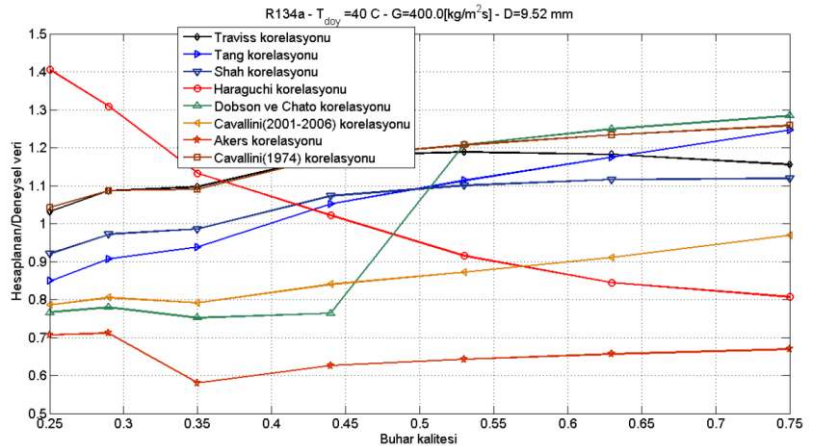
Şekil 2.R134a soğutucu akışkanı için korelasyonların karşılaştırılması

Soğutma sistemlerinde geçmişten günümüze önemli bir rol oynayan amonyak (NH_3) gazı zehirli bir gaz olmasına rağmen 0 ODP (Ozon tabakasını delme potansiyeli) ve 0 GWP (Küresel ısınma potansiyeli) özellikleri ile çevreye faydalı gazlar sınıfında yer almaktadır. Düşük sıcaklıkta gerçekleşen uygulamalarda özellikle CO_2/NH_3 kaskat sistemlerinde NH_3 yüksek sıcaklık tarafında yer almakta ve ısı bu gaz tarafından dışarı atılmaktadır. Dizayn mühendisleri için 40°C civarındaki yoğunlaşma sıcaklıkları kritik değerler taşımaktadır. Yukarıda verilen korelasyonlar genellikle R-12, R-22, R134a deneysel verileri baz alınarak oluşturulan denklemler oldukları için, amonyağın performansı birçok araştırmacı için soru işaretidir. Bunun yanında amonyağın termodinamik özelliklerinin diğer soğutucu akışkanlara göre çok daha farklı olduğu bilinmektedir. Tablo 1 bu makalede bahsi geçen soğutucu akışkanların bulunduğu şartlardaki termodinamik özelliklerini göstermektedir. Görüleceği üzere NH_3 'ün termodinamik davranışı diğerlerinden daha farklıdır. Bu farklılık sonucunda, bu gazın önerilen korelasyonlar sonucunda bize vereceği ısı transferi katsayısı değerleri merak konusudur.

Komandiwirya ve arkadaşları [15] tarafından yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler ile önerilen korelasyonlar Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Şekil 5 ise normalizasyon grafiğini vermektedir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, amonyağın termodinamik özelliklerinin göstermiş olduğu davranış korelasyon karakteristiklerine yansımıştır. Önerilen hiçbir korelasyon iyi bir tahminde bulunamamıştır. Çeşitli bilim insanları NH_3 bazlı korelasyonlar oluşturmuştur. Park ve Hrnjak [16] tarafından NH_3 için oluşturulan korelasyon sonucunda tatmin edici değerler elde edilmiştir.

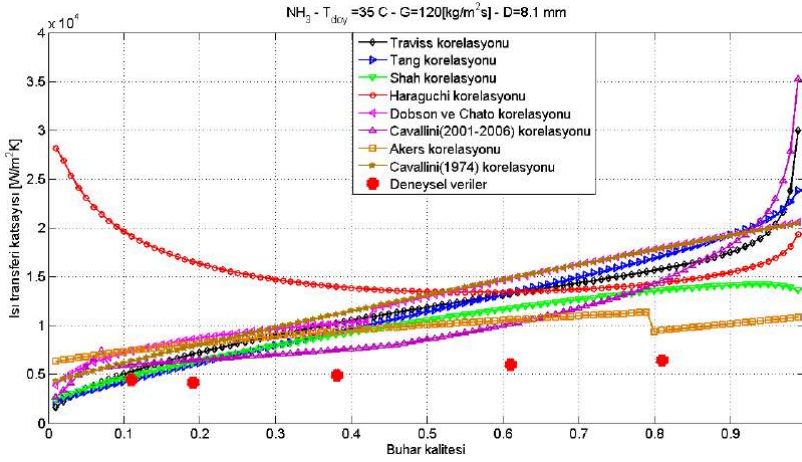
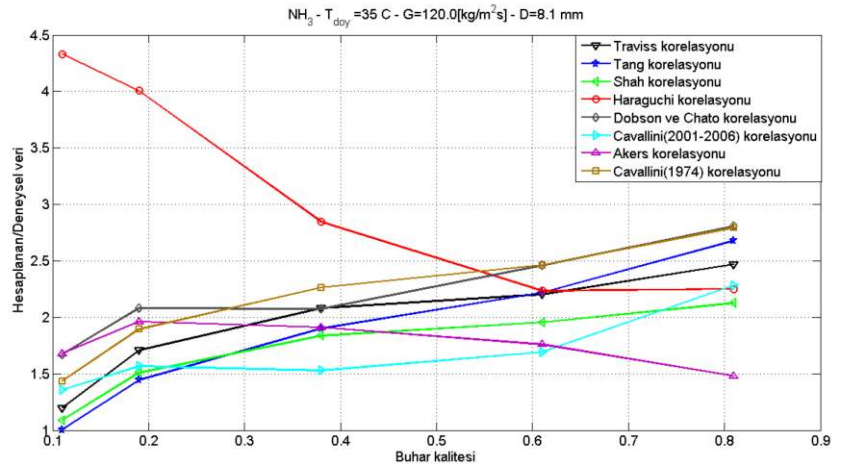
Hidrokarbon temelli soğutucu akışkanlara bir örnek olan R600a, Lee ve Son [17] tarafından test akışkanı olarak kullanılmıştır. Test edilen düzende elde edilen deneysel veriler alınmış ve Şekil 6'da önerilen korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır.

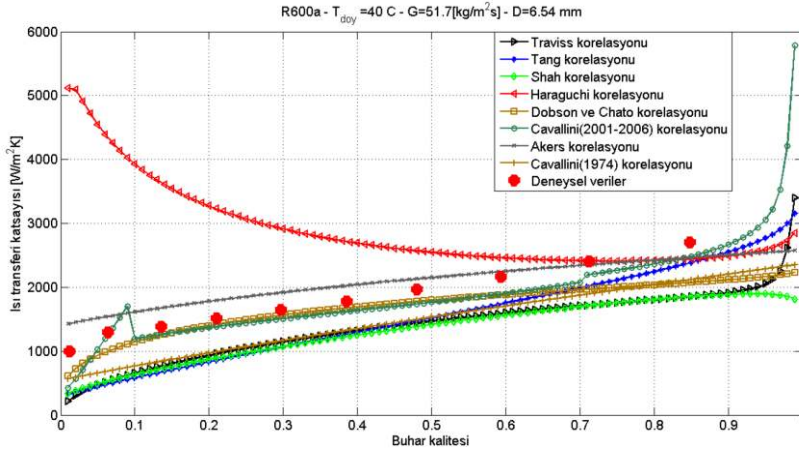
Şekil 3.R134a için normalizasyon gösterimi



Tablo1.Makalede adı geçen soğutucu akışkanların deney şartlarındaki termofiziksel özellikleri

	R134 (Doyma özel. 40 °C)		NH₃ (Doyma özel. 35 °C)		R600a (Doyma özel.40 °C)	
	Sıvı	Gaz	Sıvı	Gaz	Sıvı	Gaz
Yoğunluk(kg/m ³)	1146.7	50.075	587.4	10.4515	530.0	13.66
Entalpi(kj/kg)	256.41	419.43	366.07	1488.4	297.03	608.43
Öz ısı (kj/kgK)	1.498	1.145	4.8775	3.375	2.553	1.949
Viskozite(Pa.s)	163.4e-6	12.55e-6	119.55e-6	10.16e-6	128.2e-6	7.9e-6
Isı ilet. kat.(W/m.K)	74.7e-3	15.44e-3	458.3e-3	27.58e-3	83.7e-3	18.53e-3
Yüzey gerilimi(N/m)	6.13e-3		21.7e-3		8.41e-3	
Kritik basınç(MPa)	4.0593		11.33		3.64	
Doyma Basıncı(MPa)	1.0166		1.3512		0.53099	

Şekil 4.NH₃ için yapılan korelasyon karşılaştırılmasıŞekil 5.NH₃ için oluşturulan normalizasyon grafiği



Şekil 6.R600a için deneysel verilerin korelasyonlarla karşılaştırılması

Grafikte görüldüğü üzere önerilen bütün korelasyonlar R600a için benzer karakteristik göstermektedir. Fakat Akers korelasyonu[6] ve Cavallini korelasyonu[14] diğer korelasyonlara göre daha iyi bir tahmin değeri sunmuşlardır. Korelasyonların istatistiksel olarak incelenmesi Tablo 2' de sunulmuştur.

Ortalama Mutlak Sapma(O.M.S), Ortalama Sapma (O.S) ve Standart Sapma (S.S) değerleri makalede adı geçen soğutucu akışkanlar ve korelasyonlara uygulanmıştır. N deneysel veri adedi olmak üzere bu denklemler aşağıda tanımlanmıştır.

$$S.S. = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_{\text{tah min},i} - h_{\text{deneysel},i}}{h_{\text{deneysel},i}} \right)^2 \right]} \times \frac{100}{N} \quad (20)$$

$$O.M.S = \left[\sum_{i=1}^N \left| \frac{h_{\text{tah min},i} - h_{\text{deneysel},i}}{h_{\text{deneysel},i}} \right| \right] \times \frac{100}{N} \quad (21)$$

$$O.S = \left[\sum_{i=1}^N \frac{h_{\text{tah min},i} - h_{\text{deneysel},i}}{h_{\text{deneysel},i}} \right] \times \frac{100}{N} \quad (22)$$

Tablo 2.Denklemelerin istatistiksel analizi

Korelasyon	%	R134a	R717	R600a
Traviss korelasyonu	S.S	5.39712	46.1171	17.8631
	O.M.S.	13.1344	93.2009	48.1996
	O.S	13.1344	93.2009	-21.7837
Tang korelasyonu	S.S	5.38113	46.0753	21.6642
	O.M.S	12.7391	84.9230	57.8559
	O.S	4.00583	84.9230	-14.4939
Shah korelasyonu	S.S	3.20432	35.4805	17.9358
	O.M.S	7.56903	70.2787	49.1712
	O.S	4.09557	70.2787	-23.2801
Haraguchi korelasyonu	S.S	8.40307	103.2118	26.7890
	O.M.S	18.57643	213.3572	81.6029
	O.S	6.20704	213.3572	81.6029
Dobson ve Chato korelasyonu	S.S	9.10924	57.1537	16.7727
	O.M.S	23.9959	121.8553	43.4546
	O.S	-2.82005	121.8553	-0.6579
Cavallini(2001) korelasyonu	S.S	6.03750	33.8027	12.1624
	O.M.S	14.6613	68.5955	49.3167
	O.S	-14.6613	68.5955	4.2384
Akers korelasyonu	S.S	13.09974	34.7830	13.6070
	O.M.S	34.39712	75.8556	47.6270
	O.S	-34.39712	75.8556	24.5674
Cavallini(1974) korelasyonu	S.S	6.59016	56.3657	19.5560
	O.M.S	15.63426	116.9789	49.8136
	O.S	15.63426	116.9789	-13.8650

4. SONUÇLAR

Bu makalede, düz borular için oluşturulan yoğuşma ısı transferi korelasyonları R134a, R717 ve R600a test akışkanları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda R134a soğutucu akışkanı için bahsi geçen korelasyonların deneysel verilere yaklaşık sonuçlar verdiği görülmüştür.

R717, genelden farklı termofiziksel özelliklerinin sonucu olarak, uygulanan korelasyonlara cevap verememiş ve beklenen standartı yakalayamamıştır. Korelasyonlar R600a soğutucu akışkanına uygulanmış ve R134a için elde edilen sonuçlar yakalanamasa bile deneysel verilere belli oranda yaklaşabilmiştir. İstatistiksel analiz sonucunda R134a için Shah korelasyonu[8] diğer korelasyonuna göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

R717 ve R600a soğutucu akışkanları için Cavallini korelasyonunun[14] üstünlüğü göze çarpmaktadır. Oluşturulan yeni nesil korelasyonlar akış rejimi bazlı ve her soğutucu akışkan için özel olarak hazırlanmaktadır[16],[18]. Yazarların gelecek çalışmaları, akış rejimi bazlı korelasyonların değişik şartlardaki uygulamalarının araştırılması üzerine olacaktır.*

SEMOLLER

C_p	= Öz ısı [J/kgK]	X_{tt}	= Martinelli parametresi [-]
D, d	= Boru çapı [m]	ρ	= Yoğunluk [kg/m ³]
Fr	= Froude sayısı [-]	μ	= Viskozite [Pa.s]
g	= Yerçekimi ivmesi [m/s ²]	δ^+	= Cavallini parametresi
G	= Kütle hızı [kg/m ² s]	Φ_v	= Çift faz çarpanı [-]
G_a	= Galileo sayısı [-]	u	= Kinematik viskozite [m ² /s]
h_f, h_c	= Film ve konvektif ısı transferi katsayısı [W/m ² K]		
Ja	= Jacob sayısı		
k	= Isı iletim katsayısı [W/mK]		
Nu	= Nusselt sayısı [-]		
Pr	= Prandtl sayısı [-]		
q	= Isı akısı [W/m ²]		
Re	= Reynolds sayısı [-]		
Ti^+	= Boyutsuz sıcaklık [-]		
x	= Buhar kalitesi [-]		

Alt indisler

G, v	: Gaz faz
f, L	: Sıvı faz
LO	: Sadece sıvı faz
GO	: Sadece gaz faz
TP	: Çift fazlı

KAYNAKLAR

- [1] Cavallini, A., Censi, G., Del Col, D., Doretti, L., Longo, G.A., Rossetto, L., Zilio., C., Condensation inside and outside smooth and enhanced tubes - a review of recent research International Journal of Refrigeration 26 (2003) 373 392
- [2] El Hajal, J., Thome, J.R., Cavallini, A., (2003). Condensation in horizontal tubes, part I: two-phase flow pattern map. International journal of heat and mass transfer 46, 3349 3363.
- [3] Thome, J.R., El Hajal, J., Cavallini, A., (2003). Condensation in horizontal tubes, part II: new heat transfer model based on flow regimes. International journal of heat and mass transfer 46, 3365 3387.
- [4] Cavallini A., Censi, G., Del Col D, Doretti L, Longo GA, 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 24, 73 - 87.
- [5] Dobson MK, Chato J.C., Hinde DK., Wang SP., 2003. Flow condensation heat transfer coefficients of pure refrigerants International journal of refrigeration 26, 4 - 11.
- [6] Akers, W. W., Deans, H. A., and Crosser, O. K. (1959). Condensation heat transfer within horizontal tube. Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 55, 171 176.
- [7] Dittus, E.J. and Boelter, L.M. K., 1930, Publications on Engineering, Univ. California, Berkeley, Vol. 2, pp 443.
- [8] Shah MM (1979) A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. Int J. Heat Mass Trans 22(4):547 556
- [9] Dobson, M. K., and Chato, J. C. (1998). Condensation in smooth horizontal tubes. J. Heat Transfer, 120, 193 213.
- [10] Soliman, H. M., Schuster, J. R., and Berenson, P. J. (1968). A general heat transfer correlation for annular flow condensation, J. Heat Transfer, 90, 267 276.
- [11] Traviss, D. P., Rohsenow, W. M., and Baron, A. B. (1973). Forced convective condensation in tubes: A heat transfer correlation for condenser design. ASHRAE Trans., 79 (1), 157 165.
- [12] Tang, L., M.M. Ohadi, A.T. Johnson, (2000) . Flow condensation in smooth and microfin tubes with HCFC-22, HFC- 134a, and HFC-410 refrigerants. part II: Design equations, Journal of Enhanced Heat Transfer 7 311 325.
- [13] Cavallini, A. and Zecchin, R. (1974). Dimensionless Correlation for Heat Transfer in Forced Convection Condensation. Proc. 5th Int. Heat Transfer Conference 3:309 - 313.
- [14] Cavallini, A., Censi, G., Del Col, D., Doretti, L., Longo, G.A. and Rossetto, L., (2001). Experimental investigation and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236a) in a horizontal smooth tubes. International Journal of Refrigeration, 24, 73-87
- [15] Komandiwirya, H.B., Hrnjak, P.S., Newell, T.A., (2005). An experimental investigation of pressure drop and heat transfer in an in-tube condensation system of ammonia with and without miscible oil in smooth and enhanced tubes, ACRC CR-54. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [16] Park, C.Y. and Hrnjak, P., 2008. NH₃ in tube condensation heat transfer and pressure drop in smooth tube . International Journal of Refrigeration, 31, 643-651
- [17] Lee, H.S. and Son, C.H., 2010. Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of R290, R600a, R134a and R22 in horizontal tubes. Heat and Mass Transfer, 46, 571-584
- [18] Iqbal, O. and Bansal, P., 2012. In tube condensation heat transfer of CO₂ at low temperatures in a horizontal smooth tubes. International Journal of Refrigeration, 35, 270-277