

Arş. Gör. Dr. Özden AĞRA

## Abstract:

In this study, the experimental results of the condensing heat transfer coefficients of R600a, a hydrocarbon refrigerant, in a horizontal smooth copper tube with an inner diameter of 4mm and outer diameter of 6mm are presented at different vapor quality and different mass fluxes during condensation under annular flow conditions, by adjusting the desired vapor qualities at the test area. A specially-designed sight glass has been fitted to the inlet and outlet of the test tube to identify the flow type by naked eye after the inlet vapor quality of the refrigerant to be fed to the test area during the test is adjusted in the system. Thanks to a new method developed in the measuring system, the condensing heat transfer coefficients could be calculated by measuring the differential value ( $T_s-T_w$ ) directly from the data collection unit. The experimental findings have shown that the condensing heat transfer coefficients drops down with reduction in vapor quality and the coefficient rises with the increase in the mass flux at constant vapor quality. The condensing heat transfer coefficients obtained from the experimental study were seen to be consistent by  $\pm 20\%$  with the correlations developed by Shah and Dobson-Chato.

## Key Words:

Condensation, Heat transfer coefficient, Two phase flow, hydrocarbon refrigerant

# Alternatif Soğutucu Akışkanlardan İsobütan'ın Yatay Boru İçinde Yoğuşmada Isı Transferi Katsayısının Tespiti

## ÖZET

Bu çalışmada iç çapı 4mm dış çapı 6mm olan pürüzsüz düz bakır boru içerisinde hidrokarbon soğutucu akışkanlardan R600a'nın halka akış şartlarındaki yoğuşması sırasında taşınım katsayısının; istenen kuruluk derecesi test bölgesinin girişinde ayarlanarak farklı kuruluk dereceleri ve farklı kütlele akılardaki deneysel sonuçları verilmiştir. Deneyler sırasında test bölgesine gönderilecek olan soğutucu akışkanın giriş kuruluk derecesi sistemde ayarlandıktan sonra akım tipinin gözle tespit edilebilmesi için test borusu girişine özel dizayn edilmiş gözletleme camı yerleştirilmiştir. Ölçüm sisteminde geliştirilen bir yöntemle ( $T_s-T_w$ ) fark değerinin veri toplama ünitesinden doğrudan ölçülmesi sağlanarak taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen verilerle kuruluk derecesinin azalması ile taşınım katsayısının azaldığı ve sabit kuruluk derecesinde kütlele akının artması ile de taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen taşınım katsayılarının Shah ve Dobson-Chato'ın geliştirdiği korelasyonlarla  $\pm 20\%$  uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar sözcükler:** Yoğuşma, ısı transferi katsayısı, iki fazlı akış, hidrokarbon soğutucu akışkan.

## 1. Giriş

Bir soğutma çevriminde ısının düşük sıcaklıktaki bir ortamdan alınarak daha yüksek sıcaklıktaki başka bir ortama transferinde kullanılan çevrim akışkanlarına “soğutucu akışkan” denir. Soğutucu akışkanlar bu işlemi genellikle sıvı halden buhar haline ve buhar halinden sıvı hale dönüşerek gerçekleştirirler.

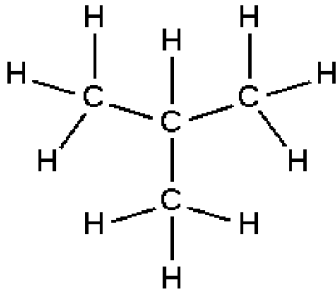
Ondokuzuncu yüzyılda soğutucu akışkan olarak su, hava, karbondioksit ve amonyak gibi doğal maddeler kullanılmıştır. Zamanla teknolojinin gelişimine bağlı olarak inorganik soğutucu akışkanların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunlar kloroflorokarbon ve hidrokloroflorokarbonlardır. Soğutma sisteminde en çok kullanılan yapay soğutucu akışkan maddeler ise R12, R22 ve R 502'dir. Yirminci yüzyılın sonlarında ise kloroflorokarbon içeren maddelerin çevreyi kirlettiği, ozon tabakasına zarar verdiği gündeme gelmiştir. Bundan sonra kloroflorokarbon içermeyen alternatif soğutucu akışkanlar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Montreal protokolünün imzalanmasından sonra, Kloroflorokarbonların (CFC) alternatifleri hakkında büyük çaplı bir tartışma başlamıştır. Bu tartışmanın gündemini, alternatif soğutkanların ozon tahrip potansiyeli, sera etkisi, yanıcılık ve zehirlilik gibi özellikleri oluşturmaktadır. Bu dört özelliğin herbiri için olumlu sonuç veren bir soğutkan olmadığından, en azından biri konusunda risk alınması gereklidir. Dolayısı ile alternatif soğutkanlar konusundaki tercihler, florlu hidrokarbonlar (HFC) veya amonyak, propan, bütan gibi doğal soğutkanların kullanımı olmak üzere iki yönde gelişmektedir[1].

1930'lu yıllarda düşük kapasiteli soğutma sistemlerinde ilk kez kullanılan hidrokarbonların, sera etkisinin yanıcılık özelliğinden daha fazla tepki gördüğü Avrupa ülkelerinde, HFC'lerin yerini almaya başladığı gözlenmektedir. Alternatif soğutucu akışkan olarak günümüzde hidrokarbonlara karşı ilgi artmaktadır. Bu çalışmada önce R600a soğutucu akışkanın tanıtılması ve yatay boru içinde yoğuşma ısı taşınım katsayısının deneysel olarak elde edilmesine yönelik yapılan deneysel çalışma anlatılmıştır.

## 2. Alternatif Soğutucu Akışkan İsobütan (R600a)

R600a diğer adıyla anılan "2-methylpropane" kimyasal yapısı  $C_4H_{10}$  olan bir hidrokarbondur. Alternatif soğutkan arayışlarında en önemli parametre olarak kabul edilen ozon etkisi (ODP) ve sera etkisi (GWP) gibi özellikler R600a için sıfırdır.



Şekil 1. R600a soğutucu akışkanının kimyasal yapısı

İsobütan renksiz ve kokusuz bir gaz olmasına rağmen yanıcı bir gazdır. R600a, R12 ve R134a soğutucu akışkanlarına ait bazı özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Görüldüğü üzere R600a soğutkanının at-

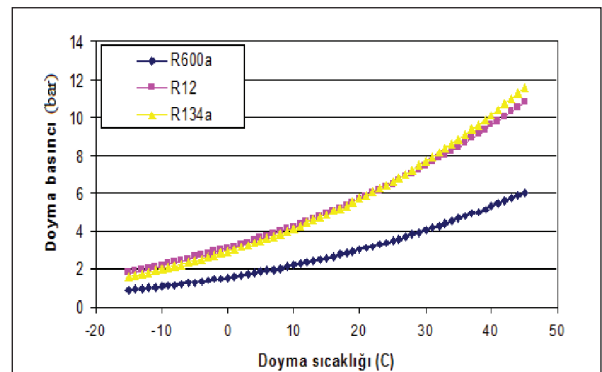
mosferdeki ömrü, ozon tabakasına etkisi ve sera etkisi değerleri gibi özellikleri diğer akışkanlara göre çok çok düşük değerlerde ve hatta sıfıra yakın değerlerdedir.

Çizelge 1. Soğutucu Akışkanların Özellikleri [1]

Soğutucu Akışkan	R12	R22	R134a	R600a
Molekül Formülü	$CCL_2F_2$	$CHF_2Cl$	$C_2H_2F_4$	$CH(CH_3)_3$
Atmosferdeki ömrü	130	15	16	<1
Ozon tabakasına etkisi	1	0,07	0	0
Sera etkisi	7300	1500	1200	8
Kritik Basınç (Bar)	41,1	49,9	40,7	36,5
Kritik sıcaklık (C)	112,0	96,145	101,2	135

Kritik basınç ve kritik sıcaklık değerleri, soğutucu akışkana ait kritik noktayı belirlemektedir. Soğutma sisteminde, kritik nokta üzerindeki sıcaklıklarda çalışılmaz. Bu nokta üzerinde iki fazlı bölge yoktur ve dolayısı ile yoğuşma ve buharlaşma gerçekleşmez. Çizelge 1'de özellikleri belirtilen diğer soğutucu akışkanlara göre R600a'nın kritik noktası; daha düşük basınçta daha yüksek sıcaklıkta bulunmaktadır. Çizelge 2'de ise yukarıda bazı özellikleri verilen akışkanların termodinamik özelliklerinin üç farklı sıcaklıktaki değerleri Refprop 7.0 programından alınarak gösterilmiştir.

Termodinamik bir özellik olan doyma basıncı, sistemde belirli sıcaklıkta oluşacak basıncı göstermektedir. Şekil 2'de R12, R134a, R600a soğutucu akışkanlarına ait çeşitli sıcaklıklardaki doyma basıncı değişimleri verilmektedir. Görüleceği üzere R600a,



Şekil 2. Doyma basıncının sıcaklığa göre değişimi

en düşük sistem basınçlarına sahiptir. Bu da İsobütan'ın diğer akışkanlara göre daha düşük kompresör gücü ihtiyacı ve dolayısı ile daha yüksek COP değerine sahip olduğunu göstermektedir.

Diğer bir fiziksel özellik olan buhar yoğunluğu açısından çizelgeyi incelersek buhar yoğunluğu düşük olan soğutucu akışkanların buhar hızı diğerlerine göre daha büyük olacağından yoğunlaşma esnasında sıvı filmi inceltici etki gösterir ve taşınım katsayısı değerini artırıcı yönde etki eder. Çizelge 2'den de görüleceği üzere R600a soğutucu akışkanının buhar yoğunluğu diğerlerine göre düşük olduğundan taşınım katsayısı açısından olumlu özellik gösterirken sürtünmeden dolayı meydana gelen basınç düşümü değeri diğerlerine göre daha fazla olacaktır.

Buharlaştırma gizli ısı, sözkonusu basınçtaki doymuş buhar ile doymuş sıvı entalpileri arasındaki farktır. Bu değer, belirli bir basınç ve sıcaklıktaki birim kütle soğutucu akışkan başına düşen maksimum yoğunlaşma ve buharlaşma ısılarını belirlemektedir. R600a'nın buharlaşma ısı R12'nin buharlaşma ısından yaklaşık olarak 2 kat daha fazladır. Soğutma kapasitesi, buharlaşma gizli ısı ve kütleli debi ile doğru orantılıdır. Bu durumda aynı soğutma kapasitesi için, soğutma sisteminde, R600a için R12'nin yaklaşık olarak yarısı kadar soğutucu akışkan debisi yeterli olacaktır.

Bir başka şekilde, soğutma sistemindeki soğutkan şarj miktarı, aynı buharlaşma sıcaklığında aynı evaporatör hacmini dolduracak soğutkan miktarı şeklinde tanımlanır.

Buna göre evaporatör hacmi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$V_{\text{evap.}} = \frac{m_r}{\rho} = \frac{m_{600a}}{\rho_{600a}} = \frac{m_{134a}}{\rho_{134a}} = \frac{m_{12}}{\rho_{12}} \quad (1)$$

$$m_{R600a}\rho_{R12} = m_{R12}\rho_{R600a} = m_{R134a}\rho_{R600a} \quad (2)$$

$$m_{R600a} = m_{R12} \frac{\rho_{R600a}}{\rho_{R12}} = m_{R134a} \frac{\rho_{R600a}}{\rho_{R134a}} \quad (3)$$

Bunu bir örnekle açıklarsak -10 C evaporasyon sıcaklığında sıvı R600a özgül kütlesi 606,77 kg/m<sup>3</sup> iken aynı sıcaklıkta R12 soğutkanının özgül kütlesi 1427,6 kg/m<sup>3</sup> ve R134a soğutkanının özgül kütlesi ise 1327,1 kg/m<sup>3</sup>'dir.

Bu değerler ile eşitlik 3,

$$m_{R600a} = 0,425 * m_{R12} = 0,457 * m_{R134a} \quad (4)$$

şeklini alır. Bu da bize soğutma çevriminde isobütan kullandığımızda R34a ve R22 soğutucu akışkanlarının yaklaşık yarısı kadar R600a kütlesinin yeterli olacağını göstermektedir.

Taşınım katsayısını etkileyen parametrelerden birisi de ısı geçişindeki aktarma özelliğini gösteren ısı iletim katsayısıdır ve bunun yüksek olması istenir. R600a'nın ısı iletim katsayısı soğutucu akışkanlara göre daha yüksektir.

İsobütan çevre ile dost, enerji verimliliğinde de

**Çizelge 2. Soğutucu akışkanların fiziksel ve termodinamik özellikleri[1]**

	T(C)	P(bar)	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	$\rho_b(\text{kg/m}^3)$	$h_{sb}(\text{kJ/kg})$	$C_{psıvı}(\text{kJ/kgK})$	$k_{sıvı}(\text{W/mK})$	$\mu_s * 10^{-6}$	$\mu_b * 10^{-6}$	$Pr_{sıvı}$	$\sigma (\text{N/m})$
R600a	35	4,6456	536,76	11,988	317,5	2,5178	0,085416	135,08	7,7693	3,9817	0,0089695
	40	5,3099	530	13,667	311,4	2,5535	0,085416	128,23	7,9126	3,9124	0,0084111
	45	6,0419	523,07	15,53	305,06	2,5907	0,085416	121,78	8,0616	3,8471	0,0078591
R12	35	8,4621	1273,8	47,906	133,08	1,0169	0,063745	171,62	12,237	2,7378	0,0073135
	40	9,5882	1254,3	54,416	129,74	1,0332	0,062054	162,51	12,476	2,7059	0,0067155
	45	10,821	1234	61,673	126,24	1,0514	0,060367	153,74	12,726	2,6776	0,0061286
R134a	35	8,8698	1167,5	43,416	168,18	1,4709	0,076847	174,33	12,286	3,3367	0,0067656
	40	10,166	1146,7	50,085	163,02	1,4984	0,074709	163,43	12,545	3,2779	0,0061268
	45	11,599	1125,1	57,657	157,58	1,5298	0,072568	153,04	12,821	3,2262	0,0055016

avantajlı ve R12 ve R134a gibi soğutucu akışkanlardan daha ucuz olmasına rağmen yanıcılık gibi olumsuz bir özelliğe sahiptir. Dolayısı ile bu soğutkanın kullanıldığı uygulamalarda potansiyel yangın, patlama tehlikelerini en az seviyeye indirmek ve kullanıcıları bilinçlendirmek gerekmektedir.

**Çizelge 3. İsobütanın patlama limitleri[1]**

Alt patlama sınırı (LEL)	1,5%	Yaklaşık 38gr/m <sup>3</sup>
Üst patlama sınırı (UEL)	8,5%	Yaklaşık 203 gr/m <sup>3</sup>
En düşük yanma sıcaklığı	460°C	

Çizelge 3’den de anlaşılacağı üzere isobütanın hava içersinde hacimsel oranı % 1,5 – 8,5 aralığına ulaştığı zaman patlama riski ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile alınacak emniyet tedbirlerinin önemi büyüktür. Soğutkanın kullanılacağı ekipmanın mümkün olduğu kadar havadar bir yerde olması gerekmektedir. Herhangi bir kaçak durumunda gazın belli yerlerde birikip patlama riski yaratacak bir ortam oluşturmaya engel olmak gerekir.

Çevresel özelliklerinin yanı sıra R600a kullanan soğutma cihazlarındaki elektrik tüketimi diğer soğutucu akışkanlara göre daha azdır. R600a’nın kullanıldığı buzdolaplarında harcanan elektrik enerjisi. R134a ve R12’nin kullanıldığı buzdolaplarının enerji tüketimlerinden yaklaşık olarak %20 daha azdır. Günümüzdeki enerji darboğazı düşünülürse bu değer azımsanmayacak kadar önemlidir. Çizelge 4’de değişik soğutucu akışkanlarla çalışan buzdolaplarının ISO 7371’e (iç sıcaklık 5 °C ve çevre sıcaklığı 25 °C) göre enerji tüketim miktarı ölçümleri gösterilmiştir.

**Çizelge 4. Evsel buzdolaplarının enerji tüketimleri[3]**

Marka	Model	Soğutucu akışkan	Kapasite (Litre)	Enerji Tüketimi (kwh/gün)
UK	A	R12	129	0,75
UK	B	R12	160	0,71
Liebherr	KT1580	R600a	155	0,38
Siemens	KT15RSO	R600a	144	0,52

Sonuç olarak, hidrokarbonlar, her ne kadar yanıcı olmaları sebebi ile şüphe ile karşılanıyorsa da CFC-

12 soğutkanına nazaran çevreyle daha dost alternatif soğutucu akışkanlar arasında en kuvvetli aday olarak gözükmektedirler. Bugüne kadar yapılan kısıtlı sayıdaki çalışmalar neticesinde de isobütan, propan ve propan/isobütan karışımlarının düşük kapasiteli soğutma sistemleri için uygun hidrokarbon türü soğutkanlar olduğu görülmüş olup kullanımları gittikçe artmaktadır.

### 3. Deney Düzenegi

Tasarımı yapılmış olan bu deney düzenegi ile soğutucu akışkanın buhar kuruluk derecesi 1 ile 0,1 arasında ve kütlele akı 50 – 100 kg/m<sup>2</sup>s değerleri arasında değiştirilerek, değişik şartlar altında, yoğunlaşma ısı taşınım katsayısı deneysel olarak incelenmiştir[4].

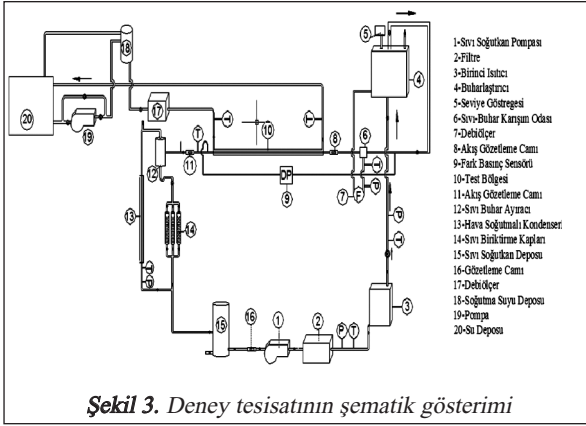
Deney düzeneginde yanıcı ve patlayıcı bir soğutucu akışkan olan R600a ile çalışma yapılacağından, cihazların standartlara uygun özellikte olmasına dikkat edilmiştir.

Deney tesisatı; Soğutucu akışkan pompası, ön ısıtıcı, buharlaştırıcı, karışım kabı, soğutucu akışkan debisi ölçmede kullanılan debiölçer, akış gözetleme camı, yoğunlaşma ünitesi ve yoğunlaşma ünitesini çevreleyen ve şeffaf malzemeden (plaxy-glass) yapılmış olan ısı değiştirici, sıvı-buhar ayırıcı, test ünitesinden yoğunlaşmadan çıkan buharın yoğunlaşmasını sağlayan kondenser, yoğunlaşan sıvının debisinin tesbiti için ölçekli kaplar, soğutma suyu debisini ölçmede kullanılan debi ölçer, soğutma suyunun test ünitesine pompanın salınımlarından etkilenmeden gidebilmesi için suyun biriktirildiği depo, soğutma suyunu test ünitesine basan pompa, soğutma suyu deposu olmak üzere yirmi parçadan meydana gelmektedir.

Deney düzeneginin şematik resmi Şekil 3’de gösterilmiştir.

#### 3.1 Deney Tesisatının Bölümleri

Kurulan deney tesisatı; soğutucu akışkan hattı, soğutma suyu hattı, ölçüm ve veri toplama grubu olarak temelde üç bölümden meydana gelir.



Şekil 3. Deney tesisatının şematik gösterimi

### 3.1.1. Soğutucu Akışkan Devresi

R600a soğutucu akışkanının düz ve pürüzsüz olan yatay boru içindeki yoğuşmasını incelemek için kurulan deney tesisatında soğutucu akışkan sıvı tankından itibaren aşağıdaki çevrimi izlemektedir:

Devir sayısı frekans konverteri ile değiştirilmek sureti ile debi değeri ayarlanabilen ve R600a soğutucu akışkanının patlayıcılık özelliğinden dolayı ex-proof özelliğe sahip Lewa – Ecodos marka diyaframlı dozaj pompası tarafından emilen sıvı akışkan, pompadan çıktıktan sonra birinci ısıtıcıya girmektedir. Birinci ısıtıcı da istenen sıcaklığa kadar ön ısıtma yapılmaktadır. Elektrikli ısıtıcının giriş ve çıkışına yerleştirilen basınç ve RTD sıcaklık ölçerler sayesinde soğutucu akışkanın ısıtıcıya giriş, çıkış sıcaklık ve basınç değerleri okunabilmektedir. Kullanılan bir DC çıkışlı varyak yardımı ile elektrikli ısıtıcıya verilecek güç kontrol edilebilmektedir. Birinci ısıtıcıdan sonra yerleştirilen bir çek valf ile ikinci ısıtıcıya giden sıvı soğutucu akışkanın akışın durması halinde yerçekimi etkisi ile geriye akışı engellenmiştir.

İkinci ısıtıcıya (buharlaştırıcı) giren soğutucu sıvı akışkana tekrar ısı verilerek istenen sıcaklık ve basınçta soğutucu akışkan yaş buharının elde edilmesi amaçlanmıştır. Elektrikli ısıtıcıya bağlanmış olan iki adet DC çıkışlı varyak yardımı ile verilecek ısı miktarı buharlaştırıcıdaki sıvı seviyesi sabit kalacak şekilde hassas olarak ayarlanabilmekte ve böylece sürekli olarak istenilen buhar debisi elde edilebilmektedir. İkinci ısıtıcı (buharlaştırıcı) kabın üzerine yerleştirilen manyetik seviye göstergesi ile kap içersin-

deki sıvı yüksekliği izlenebilmektedir. Yoğunluk farkı nedeniyle kabın alt kısmında sıvı, üst kısmında da buhar fazı oluşmaktadır. Verilen ısı ile buhar haline gelen soğutucu akışkan kabın üst kısmından çıkarken kabın orta seviyesinden çıkan sıvı soğutucu akışkan da Coriolis prensibine göre çalışan, Danfoss marka ve Mass 2100-DI 3 mm serisi debimetreye gider. Giriş çıkış çapları 3 mm olan bu debimetre 0–250 kg/h aralığında %0,1 hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Akışkan debimetre’den geçtikten sonra test bölgesi ile aynı hatta yerleştirilmiş karışım kabına gelir. İstenen kuruluk derecesini elde etmek üzere ısıtıcı kabın (buharlaştırıcı) üzerinden çıkan buhar ile debimetreden ayarlanarak gönderilen sıvı karışım odasında buluşur. Karışım odası çıkışına yerleştirilen gözetleme camı sayesinde test bölgesi girişinde soğutucu akışkanın akış modeli izlenebilmektedir. Gözetleme camından çıkan istenen kuruluk derecesindeki soğutucu akışkan test bölgesine girer. Test bölgesi içiçe geçmiş iki borudan oluşmaktadır. İçteki bakır borudan soğutucu akışkan geçerken dış tarafından soğutma suyu geçmektedir. Test ünitesinin giriş ve çıkışı arasında, tesisat üzerinde önceden kalibrasyonu yapılmış olan, Smar marka diferansiyel basınç ölçer yerleştirilmiştir. Yoğuşan soğutucu akışkan test bölgesinden çıktıktan sonra yeni bir gözetleme camından daha geçer. Dolayısı ile test bölgesinden çıkan soğutucu akışkanın sahip olduğu kuruluk derecesindeki akış tipi tekrar izlenebilir. Gözetleme camından çıkan sıvı-buhar karışımının sıvı-sı ile buharını birbirinden ayırmak için tesisata bir ayırıcı yerleştirilmiştir. Bu sayede sıvının kabın alt kısmında buharın ise kabın üst kısmında toplanması sağlanmış oldu. Test bölgesinde yoğuşan ve buharından ayrılan sıvı soğutucu akışkan ayırıştırma kabının alt kısmında, yoğuşan miktarın belirlenmesi için tesisata yerleştirilen ölçekli kaplara gider. Yerleştirilen ölçekli kaplar, iki farklı çapta olduğundan daha hassas ölçüm yapılabilmektedir. Ölçekli kapların giriş ve çıkışında bulunan küresel vanalar yardımı ile ölçekli kaplar doldurulup boşaltılabilmektedir. Ölçekli kaplarda, sıvı miktarı ölçüldükten sonra yoğuşan sıvı tekrar sıvı tankına gitmektedir. Ayırıştırma kabının üst kısmından ikinci kondensere gelen buhar burada yoğuşarak sıvı tankına gider.

### 3.1.2 Soğutma Suyu Devresi

Soğutma suyu devresi test bölgesinde meydana gelen yoğuşma esnasında çekilmesi gereken ısıyı deney borusundan uzaklaştırmak için gerekli olan soğutma suyunu sağlamaktır. Şebekeden alınan soğutma suyu test borusunda istenen sıcaklığa ulaşması için ilk olarak 2 kW gücündeki fişek tipi bir ısıtıcıdan geçerek su deposuna gelir. Su deposu 70 lt'dir. Suyun tesisattaki hareketi santrifüj bir pompa ile sağlanmaktadır. Pompadan çıkan su hattı iki kola ayrılır. Hattın bir kolu test borusuna gönderilmek üzere tesisatın üst kısmına monte edilen bir kaba, ikinci kol ise depoya geri dönmektedir. Test bölgesine gönderilecek suyun debisi deponun çeşitli aralıklarına yerleştirilen tahliye muslukları ile istenilen değere ayarlanabilmektedir. Bu amaçla ayrıca kap çıkışına bir vana yerleştirilmiştir. Geçmesine izin verilen su bir su debimetresinden geçtikten sonra test bölgesine girmektedir. Suyun debisini ölçmek için tesisatta Hornsberg marka türbin tipi debimetre kullanılmış olup ölçüm aralığı 2-10 lt/dak'dır. Test borusunun giriş ve çıkışına suyun sıcaklığını ölçmek için 2 adet RTD yerleştirilmiştir. Suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları bilindiğinde yoğuşma için gerekli olan ısı miktarı hesaplanabileceğinden bu iki sıcaklık ölçümü hassas olarak gerçekleştirilmiştir. Test bölgesinden çıkan ısınmış su laboratuarda mevcut olan havuza geri gönderilmektedir.

Veri toplama işlemi, tesisattaki ölçüm aletlerinden alınan sıcaklık, basınç, debi ölçümleri ile elektriksel ölçüm verilerinin analiz edilmek üzere, elektronik kartlar ve bir yazılım programı ile bilgisayar ortamına aktarılmasını kapsamaktadır.

### 3.2 Deneysel Ölçümler, Ölçüm Elemanları ve Veri Toplama

Veri toplama işlemi, tesisattaki ölçüm aletlerinden alınan sıcaklık, basınç, debi ölçümleri ile elektriksel ölçüm verilerinin analiz edilmek üzere, elektronik kartlar ve bir yazılım programı ile bilgisayar ortamına aktarılmasını kapsamaktadır. Kurulan deney düzeneğinde veri toplama ünitesi olarak, 20'şer girişe sahip 2 adet elektronik kartın bulunduğu model bir veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama ünitesi

tesindeki 2 adet elektronik karta sıcaklık ölçümü için 18 adet termokupl, 8 adet RTD (elektriksel direnç termometresi) ve basınç ölçümü için de 5 adet basınç transmitteri bağlanmış bulunmaktadır. Test ünitesi üzerindeki sıcaklık ölçümleri için T tipi termoelemanlar kullanıldı. Çalışmada termoelemanların yüzey sıcaklığı ile buhar sıcaklığı farkını direkt olarak veri toplama ünitesinde gösterecek şekilde test ünitesine montajı yapıldı. Bunun için termoelemanların bir ucu test ünitesi üzerine lehimlenirken diğer ucu ise sıvı buhar ayırıcı içine yerleştirilen bakır borunun içine yerleştirildi. Bu iki uç arasındaki bir bölgeden iki konstant uç veri toplama ünitesine bağlandı. Bu sayede volt cinsinden sıcaklık farkı doğrudan okundu ve oluşturulan denklemler yardımı ile sıcaklığa dönüşümü yapıldı.

### 3.3. Deneysel Veriler ile Soğutucu Akışkan İçin Hesap Yöntemi

Deneylerden elde edilen sonuçların hesaplamalarda kullanımı, aşağıda sistematik bir şekilde açıklanmıştır. Isıl hesaplamalar kapsamında sırasıyla; buharlaştırıcıdan çıkan buhar miktarının tespiti, akışkanın test ünitesine girişteki kuruluk derecesinin tespiti, test ünitesinde yoğuşmayı sağlayan akışkan olan su tarafındaki taşınım katsayısının tespiti, test borusunun iç kısmına ait taşınım katsayısı, akışkanın test ünitesinden çıkıştaki kuruluk derecesinin tespiti ve yoğuşan soğutucu akışkan debisinin tespiti yapılmıştır.

#### 3.3.1 Buharlaştırıcıdan Çıkan Buhar Miktarının Tespiti

Buharlaştırıcıya basıncı ve sıcaklığı ölçülerek doymuş sıvı halinde gönderilen akışkan buradan buharlaşarak çıkmaktadır. Ayrıca buharlaştırıcıya verilen güç  $Q$  bilinmektedir. Sürekli rejim halinde çalışan buharlaştırıcıya termodinamiğin birinci yasası uygulanırsa;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (5)$$

yazılabilir. Buharlaştırıcıya giren ve buharlaştırıcıdan çıkan akışkanın sıcaklıkları hassas olarak ölçüldüğü için giren sıvı akışkanın ve çıkan buhar halin-

deki akışkanın entalpileri sıcaklığa bağlı olarak tespit edilir ve verilen  $\dot{Q}$ 'nun miktarı kullanılarak buharlaştırıcıdan çıkan buhar miktarı bulunur.

Soğutucu akışkan ısıtıcıdan itibaren karışım odasına kadar 50 cm uzunluğunda bir borudan geçmektedir. Bu borunun belirlenen ısı kaybı 2 Watt'tır. Eşitlik 6 yardımı ile test bölgesinin girişindeki entalpi değeri elde edilir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{R600a}(h_g - h_c) \quad (6)$$

### 3.3.2 Test Ünitesine Girişteki Kuruluk Derecesinin Tespiti

Buharlaştırıcıdan karışım odasına gelip oradan test ünitesine giren buharın eşitlik 6 ile belirlenen entalpisi kullanılarak test bölgesinin girişindeki kuruluk derecesi tespit edildi:

$$h_{TBgiren} = x.h_{buhar} + (1-x)h_{sıvı} \quad (7)$$

Test bölgesine girişteki sıcaklık belli olduğundan  $h_{buhar}$  ve  $h_{sıvı}$  değerleri bilinmektedir. Belirlenen kuruluk derecesi, test bölgesine %100 buhar girmesi halinde geçerlidir. Karışım odasında ısıtıcıdan gelen buhara belli miktarda sıvı ilave ediliyorsa düzenek üzerine yerleştirilmiş olan debimetre yardımı ile eklenen sıvı miktarı hassas olarak okunur ve test ünitesine giren buharın kuruluk derecesi;

$$x = \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_b + \dot{m}_s} \quad (8)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanır.

### 3.3.3 Su Tarafına Transfer Olan Isı Miktarı

Test borusunun dışı izole edilmiştir. Dolayısıyla bu bölgede yoğunlaşan buharın ısısı halka içersinde akmakta olan suya transfer edilir. Test bölgesindeki enerji dengesi yazılırsa;

$$Q_{TestBölgesi} = \dot{m}_{su} C_{p_{su}} (T_{su-ç} - T_{su-g}) = \dot{m}_{R600a}(h_g - h_c) \quad (9)$$

şeklinde ifade edilir.

Test bölgesinden çıkan ve kısmen yoğunlaşan soğutkının çıkış entalpi değeri 9 eşitliği ile tesbit edilir. Çıkışa yerleştirilen RTD yardımı ile sıcaklığı ölçülen akışkanın çıkıştaki sıvı ve buhar halindeki entalpeleri tespit edilerek test bölgesinden çıkan buharın kuruluk değeri;

$$h_{TBçıkkan} = x.h_{buhar} + (1-x)h_{sıvı} \quad (10)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Ayırıcı kabında buharından ayrılan sıvı akışkan deney düzeneğine yerleştirilen ölçekli kaplara gelir. Ölçekli kaplarda belirlenen yoğunlaşan akışkan miktarı kullanılarak test ünitesinin çıkışındaki kuruluk derecesi ikinci bir işlemle tekrar tespit edilir.

$$t*(1-x)*\dot{m}_{R600a} = \dot{m}_{ölçülen} \quad (11)$$

Deneyler sonucunda yapılan değerlendirmede 10 ve 11 eşitlikleri ile hesaplanan test bölgesindeki kuruluk derecelerinin birbirleri ile örtüştüğü görülmüştür.

### 3.3.4 Test Ünitesi İçerisindeki Isı Taşınım Katsayısının Tespiti

Test ünitesi içersindeki ısı taşınım katsayısı;

$$Q = h_i A_i (T_{doyma} - T_{duvar}) \quad (12)$$

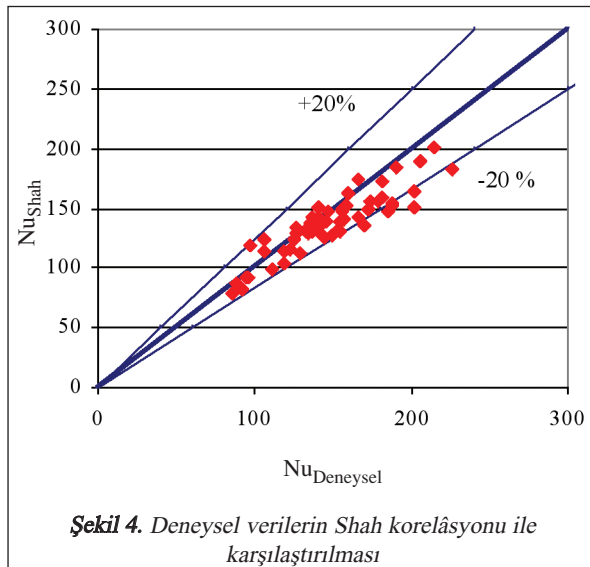
bağıntısı ile elde edilir. Ölçüm sisteminde geliştirilen yöntemle ( $T_{doyma} - T_{duvar}$ ) sıcaklık farkı doğrudan veri toplama ünitesinde mikrovolt cinsinden okunabildiği için yoğunlaşma sonucunda iç kısımdaki taşınım katsayısı doğrudan hesaplanabildi. Yüzey sıcaklığı ile boru içersindeki buharın sıcaklık farkını ölçülebilmek için termokupların bir ucu test borusu üzerine yerleştirildi diğer uçları ise sisteme yerleştirilen sıvı buhar ayırıcı içersine kaynakla monte edilmiş olan bir bakır boru içine yerleştirildi. Bu bakır boru test bölgesinden çıkan buhar ile direkt temas ettiğiinden deney sırasında boru içindeki buhar sıcaklığı bu noktadan ölçüldü. Termokupların yerleştirildiği bu boru içersine bir de referans RTD yerleştirildi. Bakır boru içersine yerleştirilen termokupların hepsinin buhar sıcaklığını çabuk algılayabilmeleri için termokupların ucuna ısı iletimini çabuklaştıran bir sıvı madde

sürüldü. Dolayısı ile termokupların bir ucu buhar sıcaklığını diğer ucu da test borusu yüzey sıcaklığı hissedip aradaki farkı veri toplama ünitesine mikrovolt cinsinden vermeleri sağladı. Sonuç olarak taşınım katsayısının hesaplanmasında eşitlik 12'de ( $T_{\text{doyma}} - T_{\text{duvar}}$ ) ifadesinin yerine doğrudan fark değeri yazılabildi. Test bölgesinden transfer edilen ısı miktarı da bilindiğinden ısı taşınım katsayısı doğrudan bulunabildi.

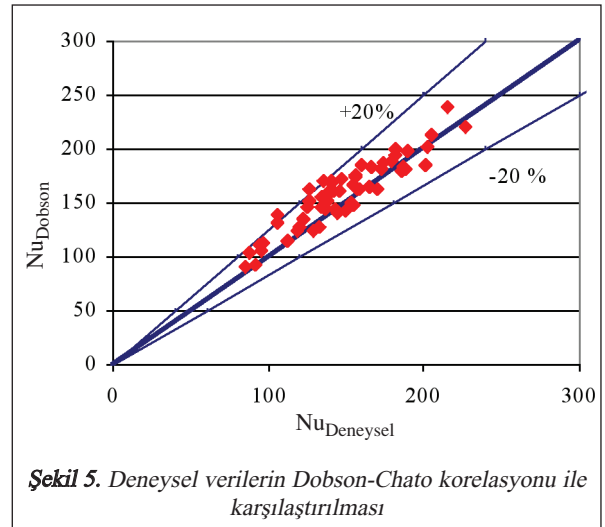
#### 4. Sonuçlar

Literatürde soğutucu akışkanların yatay dairesel kesitli pürüzsüz borularda yoğuşma esnasındaki ısı taşınım katsayısının hesaplanmasına yönelik teorik ve deneysel birçok çalışma mevcuttur. Montreal protokolünün imzalanmasından sonra ozon tahribatına neden olmayan alternatif akışkan arayışlarının başladığından çalışmanın başında belirtmiştik. Literatürde yaptığımız araştırma sonucunda bu çalışmanın konusunu oluşturan alternatif akışkan R600a soğutucu akışkanı ile ilgili çok az yayın bulunduğunu tesbit ettik. Ve bu yayınların sadece iç çap 8 mm ve 10,92 mm olan u şeklindeki düz boru ve çapı 2,46 mm olan serpantin tipi boru içinde meydana gelen yoğuşmanın incelenmesinden ibaret olduğu görüldü[5-8].

Sonuç olarak R600a akışkanının yatay düz boru içinde yoğuşmasının deneysel olarak incelendiği bu çalışmada elde edilen taşınım katsayısı değerleri literatürde geliştirilen korelasyonlarla [9–10] mukayese



edildi ve bu korelasyonlarla uyumlu sonuçların elde edildiği görüldü.



#### Semboller

- A Kesit alanı, [m<sup>2</sup>]
- C<sub>p</sub> Sabit basınçta özgül ısı, [kJ/kg.K]
- d Boru çapı, [m]
- Δx Kuruluk derecesindeki değişim, [-]
- G Kütleli akı, [kg/m<sup>2</sup>.s]
- g Yerçekimi ivmesi [m/s<sup>2</sup>]
- h Isı taşınım katsayısı, [W/m<sup>2</sup>K]
- h<sub>sb</sub> Buharlaştırma gizli ısı, [kJ/kg]
- k Isı iletim katsayısı, [W/m.K]
- L Test borusunun uzunluğu, [m]
- m Soğutucu akışkan kütleli debisi, [kg/s]
- m Soğutma suyu kütleli debisi, [kg/s]
- Nu Nusselt sayısı, [-]
- P Basınç, [Pa]
- Pr Prandtl sayısı, [-]
- Q Isıl güç, [W]
- Q<sub>s</sub> Suyun çektiği ısı güç, [W]
- P<sub>kr</sub> Kritik basınç
- Re Reynolds sayısı, [-]
- T Sıcaklık, [°C, K]
- v Özgül hacim, [m<sup>3</sup>/kg]
- V Hacim, [m<sup>3</sup>]
- x Kuruluk derecesi, [-]

#### Yunan Harfleri

- μ Dinamik viskozite, [Pa.s]
- ν Kinematik viskozite, [m<sup>2</sup>/s]



- $\rho$  Yoğunluk, [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma$  Yüzey gerilmesi, [N/m]  
 $\tau$  Kayma gerilmesi, [N/m<sup>2</sup>]

### İndisler

- b Buhar  
s Sıvı

### Referanslar

- [1] Refprop 7.0, NIST Standart Reference Data Program.
- [2] Leonardi E., Maclaine-cross I.L.(1997), “Why hydrocarbons save energy” AIRAHA Journal Vol. 51, pp. 33-37.
- [3] Maclaine I. L. -cross E. Leonardi , “Comparative Performance of Hydrocarbon Refrigerants”, AIRAH Journal, June 1997, Volume 51 No. 6, pp. 33–37.
- [4] O., Agra, “Condensation of refrigerants in a horizontal tube in annular flow regime”, Phd thesis Yildiz Technical University, 2007.
- [5] Lee Ho-Saeng, Yoon Jung-In, Kim Jae-Dol, Bansal P.K. (2006), “Condensing heat transfer and pressure drop characteristics of hydrocarbon refrigerants” International Journal of Heat and Mass Transfer 46, pp.1922–1927.
- [6] Lee Ho-Saeng, Yoon Jung-In, Kim Jae-Dol, Bansal P.K. (2006), “Characteristics of condensing and evaporating heat transfer using hydrocarbon refrigerants” Applied Thermal Engineering 26, pp.1054–1062.
- [7] Shah M.M (1979), “A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes”, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.22, pp.547–556.
- [8] Dobson, M.K. ve Chato, J.C. (1993), “Experimental Evaluation of Internal Condensation of Refrigerants R-134a and R12”ACRC Technical Report 38.