

# SAF SU VE SAF ALKOL KULLANIMININ FİLM VE DAMLA ŞEKLİNDEKİ YOĞUŞMA ÜZERİNE ETKİSİ

## Tansel Koyun\*

Yrd. Doç. Dr.,  
Süleyman Demirel Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta  
tanselkoyun@sdu.edu.tr

## Ahmet Coşkun

Yrd. Doç. Dr.,  
Süleyman Demirel Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta  
ahmetcoskun@sdu.edu.tr

## ÖZ

Yoğuşma, birçok ısıtma ve soğutma prosesinde karşımıza çıkan bir prosestir. Bu çalışmada, saf su ve literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak saf alkol için yoğuşma deneyleri yapılmıştır. Yoğuşma deneyinde, bilinen bir deney cihazı üzerinde yüzey ısı transfer katsayısının, ısı akışının ve ısı transfer hızının, doyma sıcaklığı ve yüzey sıcaklığı arasındaki farka göre değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler film ve damla akışlı yoğuşma için ayrı ayrı yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre deneysel ve teorik olarak hesaplanan yüzey ısı transfer katsayıları tablolar halinde sunulmuştur. Bunun yanında, yüzey ısı transfer katsayısı, ısı akışı ile ısı transfer hızlarının doyma ve yüzey sıcaklıkları arasındaki farka göre değişimleri diyagramlar halinde gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Film yoğuşma, damla yoğuşma, ısı transfer (taşınım) katsayısı

# EFFECT OF PURE WATER AND PURE ALCOHOL ON FILMWISE AND DROPWISE CONDENSATION

## ABSTRACT

Condensation is a process which we come across with in many fields. In this study, the condensation experiments for pure water and pure alcohol as distinct from the studies in the literature were carried out. In the condensation test, the change of surface heat transfer coefficient, heat flux and heat transfer rate have been experimentally investigated with respect to the difference between the saturation temperature and the surface temperature for a known test device. The experiments have been conducted separately for a film and drops of condensation flow. According to the results obtained from the experiments, experimentally and theoretically calculated surface heat transfer coefficients have been presented in a tabulated form. In addition, the surface heat transfer coefficient, the heat flux and the heat transfer rate changes by the difference between saturation and surface temperatures have been presented in diagrams.

**Keywords:** Film condensation, drop condensation, heat transfer coefficient

\* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 29.04.2015  
Kabul tarihi : 08.10.2015

Koyun, T., Coşkun, A. 2015. "Saf Su ve Saf Alkol Kullanımının Film ve Damla Şeklindeki Yoğuşma Üzerine Etkisi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 670, s. 49-57.

## 1. GİRİŞ

Yoğuşma prosesi, esas olarak doymuş buharın sabit sıcaklık ve basınçta sıvı hale dönüşmesidir. Kaynama ve yoğuşma, buhar tesislerinde termal ve nükleer güç üretimi, soğutma, rafine etme, sıcak bir bölgeden daha soğuk bir bölgeye ısı transferi gibi sayısız uygulamalarda karşılaşılan önemli konulardır. Soğuk bir yüzey üzerinde buharın yoğuşması film veya damla teşekkülü şeklinde olabilir. Film şeklinde bir yoğuşma meydana geldiğinde yüzey, yoğuşmadan dolayı tamamen sıvı ile kaplanmaktadır. Yoğuşma, sıvı filmin dış tabakası üzerinde olup, yüzeye film içerisinden geçen ısı çoğunlukla iletimle ısı transferi şeklindedir. Uygun yapıli bir yüzey oluşturarak damla yoğuşmasını sağlamak mümkündür. Bu durum meydana geldiğinde yüzey tamamen sıvıyla doğal damlacıklarla kaplanır. Yoğuşmada ısı transfer miktarını belirleyen en önemli parametrelerden birisi yüzey ısı transfer katsayısıdır. Damla yoğuşma, ısı transfer katsayıları sıvı film olmamasından dolayı film yoğuşmadaki ısı transfer katsayılarından daha yüksektir [1]. Buna rağmen, günümüzde yaygın olarak film yoğuşma kullanılmaktadır. Bunun nedeni, damla yoğuşmada, yoğuşma yüzeyinin düşük yüzey enerjisine sahip olması ile açıklanabilir. Bu yüzden, teknik uygulamalarda damla yoğuşma çoğunlukla kullanılmamaktadır [2]. Ancak, yüzeyler yüksek ısı iletkenliğe sahip metal malzemeler ile kaplanırsa yoğuşma yüzeyleri yüksek enerjiye sahip olacaktır. Bu yüzden, damla yoğuşma kullanılması durumunda, yüzeyler yüksek yüzey enerjisine sahip malzemeler ile kaplanmalıdır.

Literatürde damla ve film yoğuşma ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Kananah vd. [3], damla yoğuşmanın gelecekteki teknik uygulamalarına izin verecek yatay bir kondenser tüp üzerinde stabil damla yoğuşması için plazma-iyon implantasyonunun kullanımını incelemiştir. Ayrıca bu tüpler üzerinde buharın yoğuşma ısı transfer katsayılarındaki artışı deneysel olarak saptamışlardır. Sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Rausch vd. nin [4] yaptığı çalışmada, düzeltilmiş Nusselt film teorisi kullanılarak yüzey ısı transfer katsayıları hesaplanmış olup, elde edilen sonuçların deneysel hesaplamalarla iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Ma vd. [5], farklı ağırlık yüzdeleri buhar-etanol karışımlarının yoğuşmalı ısı transferini deneysel olarak atmosferik basınçta incelemiştir. Sonuç olarak, ısı transfer katsayılarının, yoğuşmanın film ve damla yoğuşma olmasına, karışım bileşimine ve buhar-yüzey sıcaklık farklarına göre değiştiğini göstermişlerdir. Wang vd. [6] ise yaptıkları çalışmada, su-etanol karışımlarının Marangoni yoğuşmalı ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. İncelemeleri, büyük ve homojen olmayan sıcaklık gradyanlarına sahip dikey bir yüzey üzerinde yapmışlardır. Isı transfer katsayılarının, yoğuşmanın olduğu yüzeyde homojen olmayan sıcaklıklar için yüzey boyunca değiştiğini gözlemlemiştir. Sıcaklık

gradyanı ne kadar büyükse, ısı transfer katsayısı da o kadar büyük çıkmıştır. En büyük ısı transfer katsayısını etanol-buhar konsantrasyonu %1 olduğunda gözlemlemiştir. Yun vd. [7], yatay bakır ve paslanmaz çelik tüplerde ısı transfer katsayısını laminer film yoğuşma durumunda incelemiştir. Ölçülen yoğuşma ısı transfer katsayıları, (yoğuşma sıvı film kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne oranı  $\delta/Rp-v$  nispeten düşük olduğunda) teorik Nusselt Analizine göre hesaplanan sonuçlardan önemli oranda düşük çıkmıştır.

Chen ve Utaka [8] yaptıkları çalışmada, Marangoni damla yoğuşmasında, su-etanol karışımının yoğuşma yüzeyinde sıcaklık gradyanıyla yatay yüzey üzerindeki damlaların ani hareketlerini incelemiştir. Damlaların ısı transfer yüzeyinde düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa doğru hareketleri gözlemlenmiştir. Ganzewesve ve van der Geld [9], polimer ısı değiştiricisinin kompakt plakalarındaki damla yoğuşmasında meydana gelen sıcaklık farklarını kızılötesi sıcaklık kaydedicilerle çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlarla yoğuşmadaki ısı dirençleri belirlenmiştir. Çalışmada, yoğuşmadaki ısı direnci azaltan karışım ve konveksiyon bulunmuştur. Izumi vd. [10], damla yoğuşmadaki ısı transferini etkileyen düşen damlaların davranışlarını incelemiştir. Küçük bir bölgede geniş bir şekilde ve sıklıkla düşen damlaların damla yoğuşmadaki ısı transferini arttırdığı görülmüştür. Yuvarlak bir şekilde kesilen oluklar üzerindeki damla yoğuşmanın ısı transfer karakteristikleri araştırılmıştır. Buhar, aşağı doğru hareket ederken, yüzey üzerinde olukta yoğuştuğunda, düşen damlaların yüzey sıcaklığı ve ısı akıları ölçülmüştür. Cheng vd. [11] yaptıkları çalışmada, paslanmaz çelik, pirinç, Ni kaplı çelik ve iyon kaplı pirinç tüp demetlerinin vakum şartlarında ısı transfer hızına olan etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak, damla yoğuşmada iyon kaplı tüplerin ısı transfer özellikleri bakımından daha etkin bir sonuç verdiğini belirlemiştir.

Bu çalışmada, bir yoğuşma deney cihazı üzerinde farklı iki akışkanın film ve damla yoğuşması sırasında yüzey ısı transfer katsayısı, ısı akısı ve ısı transfer hızlarının sıcaklık farkına göre değişimleri incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen verilere göre hesap yapılarak sonuçlar tablolar ve diyagramlar halinde sunulmuştur.

## 2. YÖNTEM

Çalışmada kullanılan deney cihazının şematik görünümü Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, bir ısıtıcı eleman akışkana  $t_1$  sıcaklığına kadar ısı vermektedir. Oluşan buhar, buhar çemberinden geçerek film yoğuşmalı kondenser ve damla yoğuşmalı kondensere ulaşmaktadır. Buhar çemberinin olduğu kapalı bölgenin basıncını sabit tutabilmek amacıyla bir basınç ayar valfi bulunmaktadır. Ayrıca oluşan buhar, önce soğutucuya, daha sonra seperatöre girmektedir. Seperatörde hava ile akışkan ayrışmaktadır. Ayrışan akışkan sisteme

geri kazandırılmaktadır. Bir su jeti vakum pompası devamlı çalışarak, seperatörün akışkan ve buhar olarak ayrıştırdığı buharı alarak hava çıkış valfine iletmekte ve havayı da atmosfere atmaktadır. Debi kontrolü su sayaçları üzerindeki vanalar ve ana kontrol valfi yardımıyla yapılmaktadır. Böylece, kondensere soğutma amacıyla giren suyun debisini ayarlayabilmek mümkündür. Şekilden de anlaşılacağı gibi,  $t_3$  ve  $t_6$  sıcaklıkları kondenserin soğutulması için gerekli olan suyun giriş sıcaklıklarıdır. Deney düzeneği şebeke suyu ile beslenmekte olduğundan bu sıcaklıklar şebeke suyu sıcaklığına eşit olacaktır.  $t_1$  sıcaklığı kaynamakta olan akışkanın sıcaklığıdır. Bu değer, mutlak basınca göre değişebilmektedir.  $t_2$  ve  $t_5$  sırasıyla, damla ve film yoğuşmanın olduğu kondenserin yüzey sıcaklıklarıdır.

$t_4$  ve  $t_7$  sırasıyla, damla ve film yoğuşmanın olduğu kondenserin ısısını verdiği besleme suyunun çıkış sıcaklıklarıdır. Kondenserlerde kullanılan su, kaynayan akışkan buharının yoğuşturulmasından sonra sistemden tahliye edilmektedir. Basınç göstergesi ise buhar çemberinin bulunduğu kapalı odacığın basıncını vermektedir. Tablolarda bahsedilen buhar basıncı yoğuşma odasındaki efektif basınçtır.

## 3. KULLANILAN ISI TRANSFER DENKLEMLERİ

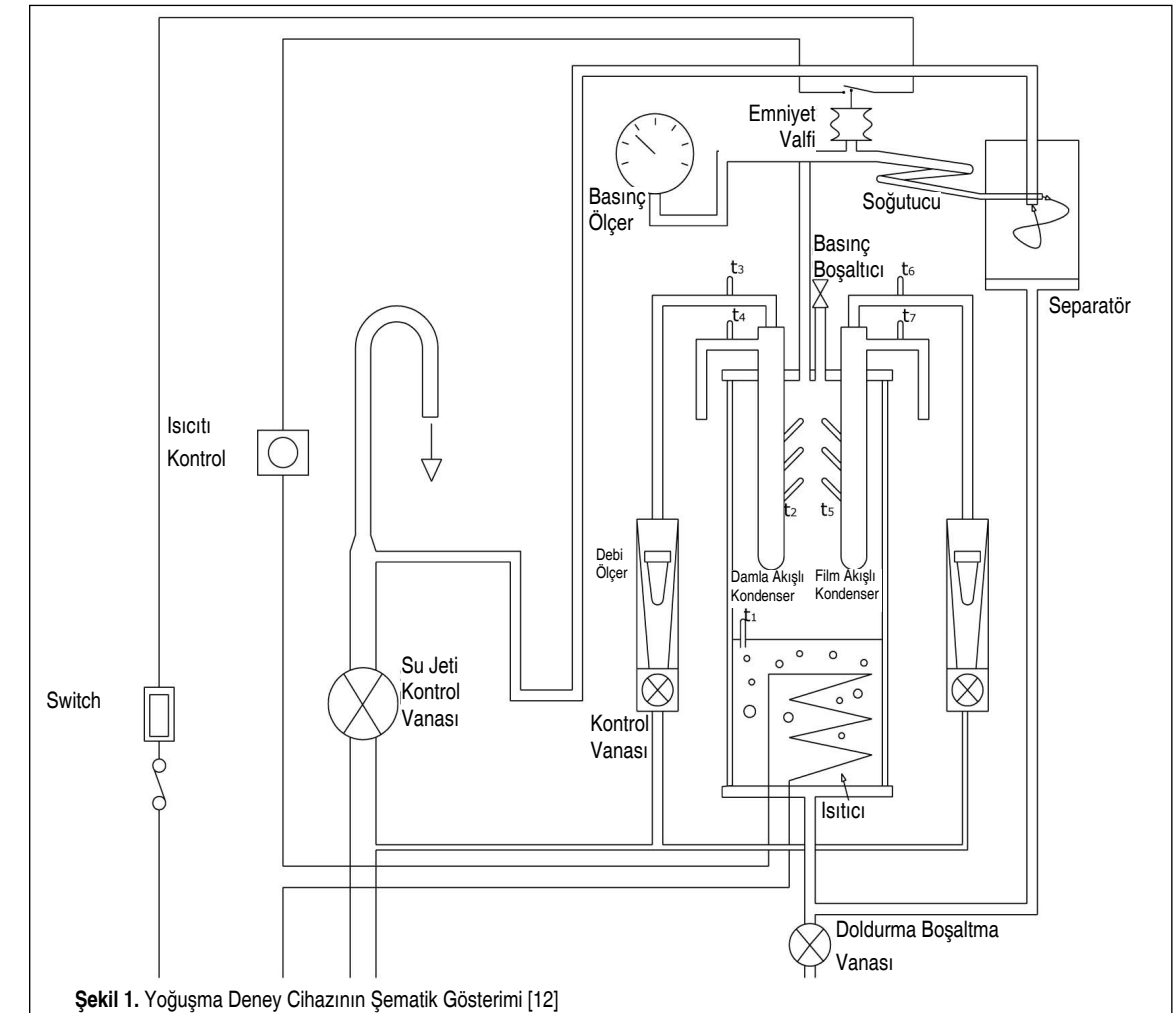
Damla ve film yoğuşmalı kondenserin deneysel verileri kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılmıştır. Damla ve film yoğuşmalı kondenselerde kondensere soğutma amaçlı giren suyun enerjisindeki artış (ısı transfer hızı),

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(t_4 - t_3) \quad (1)$$

denklemi ile bulunabilir. Burada  $\dot{m}$ , soğutma suyunun kütle sel debisi,  $c_p$ 'de suyun özgül ısıdır (4.185 kJ/kgK). Kondenserlerdeki ısı akısı ise

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2)$$

denklemi ile bulunabilir. Burada  $A$ , kondenselerin ısı transfer yüzey alanıdır. Her iki kondenser de dış çapı 12,7 mm, uzunluğu 90 mm ve cidar kalınlığı 0,71 mm olan tüpler şeklindedir. Bu değerlere göre, kondenser yüzey alanı  $37.10^{-4} \text{ m}^2$ 'dir. Sadece yoğuşmanın tipine göre bu kondenselerin malzeme-



Şekil 1. Yoğuşma Deney Cihazının Şematik Gösterimi [12]

leri farklıdır. Bu çalışmada deneyde elde edilen verilere göre, yüzey ısı taşınım katsayısı ise

$$h = \frac{\dot{q}}{\Delta t} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $\Delta t$ , akışkan buharı ile kondenser yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıdır. Kondenser cidarındaki sıcaklık düşüşü için düzeltme faktörü ise

$$\Delta t_d = \frac{\dot{Q}\delta}{kA} \quad (4)$$

$$\Delta t_d = \dot{q} \frac{\delta}{k} \quad (5)$$

formülünden hesaplanır. Burada (5) nolu denklemdeki  $\Delta t_d$  ise boru cidarındaki sıcaklık düşüştür.  $k$ , kondenserlerin ısı iletim katsayısı olup, film ve damla yoğuşma için ayrı ayrı alınacaktır. Bu deney setinde film yoğuşmalı kondenser malzemesi bakır, damla yoğuşmalı kondenser malzemesi ise altın kaplamadır. Buna göre, film yoğuşmalı kondenser için  $\delta$ , cidar kalınlığı (0,71 mm);  $k$ , bakır için ısı iletkenlik katsayısı (401 W/mK) alınarak düzeltilmiş buhar yüzey sıcaklık farkı  $\Delta t_d = 1,77 \cdot 10^{-6} \dot{q}$  olarak hesaplanır. Aynı şekilde damla akışlı kondenser için ise  $\delta$ , cidar kalınlığı (0,71 mm);  $k$ , altın kaplama için ısı iletkenlik katsayısı (318 W/mK) [13] alınarak düzeltilmiş buhar yüzey sıcaklık farkı  $\Delta t_d = 2,23 \cdot 10^{-6} \dot{q}$  olarak hesaplanır. Düzeltilmiş buhar yüzey sıcaklık farklarına göre, yüzey ile buhar arasındaki sıcaklık farkı damla akış için,

$$\Delta t = t_1 - t_2 - \Delta t_d \quad (6)$$

Film akış için ise

$$\Delta t = t_1 - t_3 - \Delta t_d \quad (7)$$

şeklinde düzenlenmekte ve (3) nolu denklemde yerine yazılarak deneysel olarak yüzey ısı taşınım katsayısı hesaplanmaktadır. Yukarıda verilen denklemlere göre hesaplanan sonuçlar tablolarda verilmiştir. Bu çalışmada, damla akışlı kondensere farklı olarak film akışlı kondenser için yüzey ısı taşınım katsayısı teorik olarak da hesaplanmış ve sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Film akışlı kondenser için ortalama yüzey ısı transfer (ısı taşınım) katsayısı teorik olarak aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır [14].

**Tablo 1.** Saf Alkol İçin Sıcaklık Farkına ( $\Delta t$ ) Göre Hesaplanan Deneysel ve Teorik h Değerleri

Deney No	Saf Alkol (Film Şeklinde Yoğuşma)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Deneysel Yüzey Isı Transfer Katsayısı (kW/m <sup>2</sup> K)	1,732	2,14	2,337	2,705	2,864	2,718	2,544	2,653
Sıcaklık Farkı, ( $\Delta t$ ) (K)	16,650	19,920	22,510	24,080	25,470	27,470	29,570	30,360
Teorik Yüzey Isı Transfer Katsayısı (kW/m <sup>2</sup> K)	2,055	1,959	1,895	1,861	1,832	1,795	1,759	1,746

$$h_{ort} = 0,943 \left[ \frac{k_f^3 \rho_f (\rho_f - \rho_g) h_{fg} g}{L \mu_f (t_{buhar} - t_{yüzey})} \right]^{1/4} \quad (8)$$

Denklemler,  $L$  uzunluklu düşey düz bir plaka üzerinde laminar film yoğuşma için ortalama ısı transfer katsayısını veren ifadedir. Yapılan deney setinde düşey boruların boru çapı sıvı film kalınlığına göre büyük olduğu için, boru dış yüzeylerinde laminar film yoğuşma için de bu denklem kullanılabilir. Burada  $k_f$ , kaynamakta olan akışkanın ısı iletim katsayısı;  $\rho_f$ , doymuş sıvı yoğunluğu;  $\rho_g$ , doymuş gaz yoğunluğu;  $h_{fg}$ , doymamış sıvının entalpisi;  $g$ , yerçekimi ivmesi;  $L$ , kondenser uzunluğu;  $\mu_f$ , dinamik viskozite;  $t_{buhar}$ , kaynayan sıvının doyma sıcaklığı;  $t_{yüzey}$ , kondenser yüzey sıcaklığıdır.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Saf su ve saf alkol için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar film ve damla akışlı yoğuşma için Tablo 1-6'da gösterilmektedir.

Tablolarda verilen sonuçlara göre, ısı akısının ve ısı taşınım katsayısının yüzey-buhar sıcaklık farkına göre değişimleri diyagramlar halinde gösterilmektedir.

Şekil 2 ve Şekil 3'te, saf su için ısı akısının sıcaklık farkına göre değişimi sırasıyla, film ve damla yoğuşma için verilmiştir. Film ve damla yoğuşma için sıcaklık farkı 4-18°C arasında değişmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, sıcaklık farkı arttıkça, saf suyun ısı akısı her iki durum için de artmaktadır.

Şekil 4 ve Şekil 5'te, saf alkol için ısı akısının sıcaklık farkına göre değişimi film ve damla akış için sırasıyla gösterilmektedir. Alkol için yapılan deneylerde sıcaklık farkı 16-43 °C arasında değişmektedir. Saf suya göre sıcaklık farkı değerleri daha büyüktür. Şekil 4'te, saf alkol için ısı akısının sıcaklık farkına göre değişimi film akış için artan yönde lineer bir değişim göstermektedir. Şekil 5'te ise bu değişim, damla akış için farklılık göstermektedir. Başlangıçta, film akışına göre daha büyük bir ısı akısına sahip olan saf alkol, belli bir sıcaklık farkına kadar düşmekte, daha sonra artışa geçmektedir. Saf alkol için film ve damla akışta aynı ısı akısı değerine getiren sıcaklık farkı değeri film akışta daha küçüktür.

Saf su için film ve damla akışa göre ısı taşınım katsayısının sıcaklık farkına göre değişimi Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, sıcaklık farkı arttıkça,

**Tablo 2.** Saf Su İçin Sıcaklık Farkına ( $\Delta t$ ) Göre Hesaplanan Deneysel ve Teorik h Değerleri

Deney No	Saf Su (Film Şeklinde Yoğuşma)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Yüzey Isı Transfer Katsayısı (kW/m <sup>2</sup> K)	12,33	13,25	12,59	14,14	13,55	13,68	12,6	11,72
Sıcaklık farkı, ( $\Delta t$ ) (K)	4,991	7,817	10,86	12,1	14,06	15,04	16,34	17,83
Teorik Yüzey Isı Transfer Katsayısı (kW/m <sup>2</sup> K)	13,85	12,32	11,33	10,97	10,54	10,35	10,12	9,881

**Tablo 3.** Saf Alkol İçin Damla Akış Durumunda Deneysel Veriler ve Hesap Sonuçları

Ortam Sıcaklığı: 20 °C Atmosfer Basıncı: 0,99 bar	Saf Alkol (Damla Şeklinde Yoğuşma)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Buhar Basıncı, $P_{buhar}$ (kPa)	0	0	0	0	0	0	0	0
Doyma Sıcaklığı, $t_1$ (°C)	72	72	72	72	72	72	72	72
Yüzey Sıcaklığı, $t_2$ (°C)	46	41,9	39,1	35,8	34,2	32,7	31,4	30,2
Su Giriş Sıcaklığı, $t_3$ (°C)	12,8	12,7	12,8	13	13,3	13,6	13,7	13,3
Su Çıkış Sıcaklığı, $t_4$ (°C)	24,6	17,6	16,3	16	16,2	16,2	16	15,3
Su Geçiş Debisi, $\dot{m}$ (g/s)	4	7	10	15	20	25	30	35
Isı Transfer Yüzey Alanı, A (m <sup>2</sup> )	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>
Isı Transfer Hızı, $\dot{Q}$ (kW)	0,1975	0,1435	0,1465	0,1883	0,2427	0,272	0,2888	0,293
Isı Akısı, $\dot{q}$ (kW/m <sup>2</sup> )	53,39	38,8	39,59	50,9	65,6	73,52	78,04	79,18
Düzeltilmiş Buhar-Yüzey Sıcaklık Farkı, $\Delta t_d = 2,23 \cdot 10^{-6} \dot{q}$ (K)	0,1191	0,0865	0,08828	0,1135	0,1463	0,164	0,174	0,1766
Sıcaklık Farkı, $\Delta t$ (K)	25,88	30,01	32,81	36,09	37,65	39,14	40,43	41,62
Yüzey Isı Transfer Katsayısı, h (kW/m <sup>2</sup> K)	2,063	1,293	1,207	1,41	1,742	1,879	1,931	1,902

**Tablo 4.** Saf Alkol İçin Film Akış Durumunda Deneysel Veriler ve Hesap Sonuçları

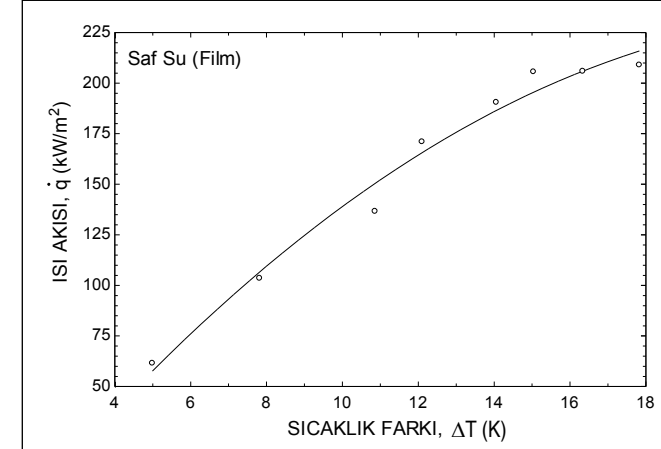
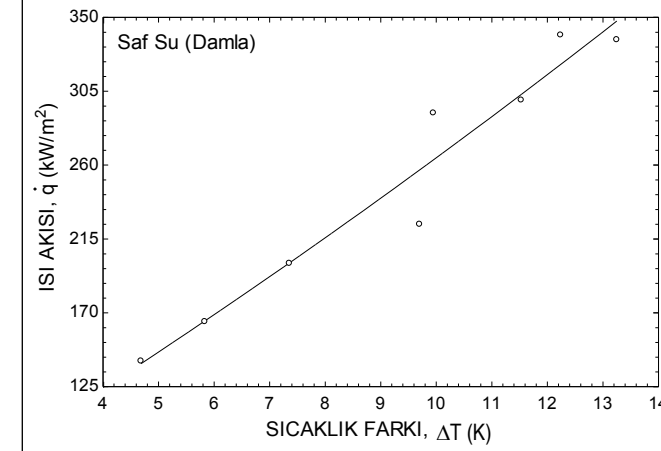
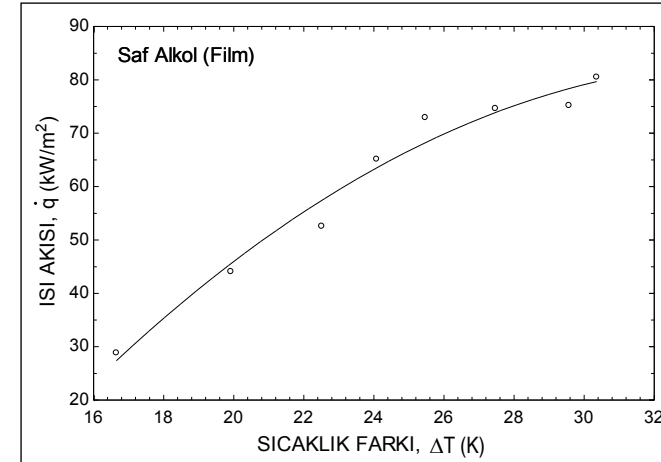
Ortam Sıcaklığı: 20 °C Atmosfer Basıncı: 0,99 bar	Saf Alkol (Film Şeklinde Yoğuşma)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Buhar Basıncı, $P_{buhar}$ (kPa)	0	0	0	0	0	0	0	0
Doyma Sıcaklığı, $t_1$ (°C)	72	72	72	72	72	72	72	72
Yüzey Sıcaklığı, $t_2$ (°C)	55,3	52	49,4	47,8	46,4	44,4	42,3	41,5
Su Giriş Sıcaklığı, $t_3$ (°C)	15	14,8	14,6	14,2	14,2	14,2	14,1	14
Su Çıkış Sıcaklığı, $t_4$ (°C)	40,5	34,3	30,1	28,6	27,1	25,2	23,6	22,9
Su Geçiş Debisi, $\dot{m}$ (g/s)	1	2	3	4	5	6	7	8
Isı Transfer Yüzey Alanı, A (m <sup>2</sup> )	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>	37.10 <sup>-4</sup>
Isı transfer hızı, $\dot{Q}$ (kW)	0,1067	0,1632	0,1946	0,2411	0,2699	0,2762	0,2783	0,298
Isı akısı, $\dot{q}$ (kW/m <sup>2</sup> )	28,84	44,11	52,6	65,15	72,95	74,65	75,22	80,53
Düzeltilmiş Buhar-Yüzey Sıcaklık Farkı, $\Delta t_d = 1,77 \cdot 10^{-6} \dot{q}$ (K)	0,05105	0,07808	0,09309	0,1153	0,1291	0,1321	0,1331	0,1425
Sıcaklık Farkı, $\Delta t$ (K)	16,65	19,92	22,51	24,08	25,47	27,47	29,57	30,36
Yüzey Isı Transfer Katsayısı, h (kW/m <sup>2</sup> K)	1,732	2,214	2,337	2,705	2,864	2,718	2,544	2,653

**Tablo 5.** Saf Su İçin Damla Akış Durumunda Deneysel Veriler ve Hesap Sonuçları

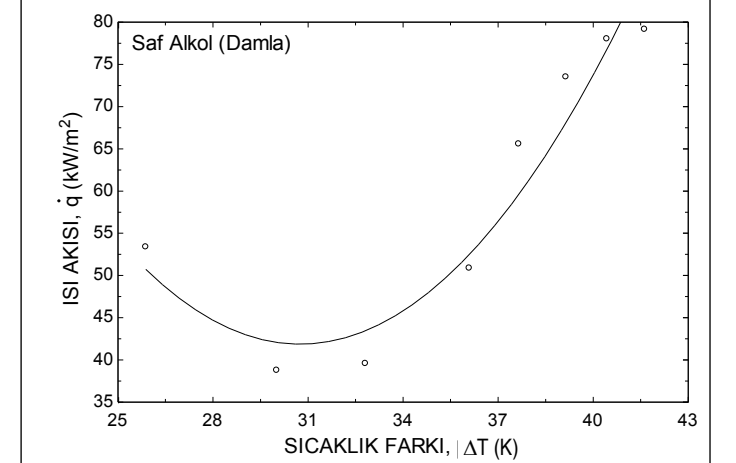
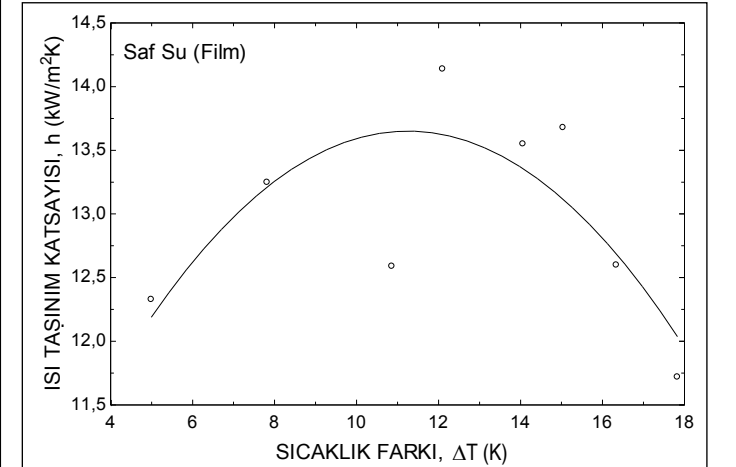
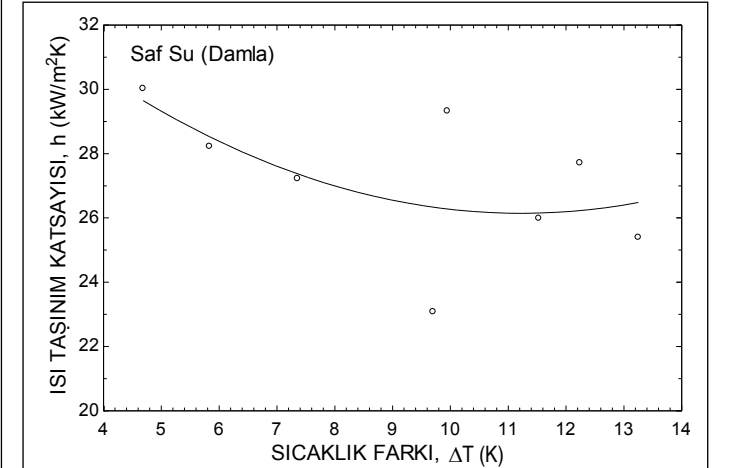
Ortam Sıcaklığı: 20 °C Atmosfer Basıncı: 0,99 bar	Saf Su (Damla şeklinde yoğuşma)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8
Buhar Basıncı, $P_{\text{buhar}}$ (kPa)	0	0	0	0	0	0	0	0
Doyma Sıcaklığı, $t_1$ (°C)	97	97	97	97	97	97	97	97
Yüzey Sıcaklığı, $t_2$ (°C)	92	90,8	89,2	86,8	86,4	84,8	84	83
Su Giriş Sıcaklığı, $t_3$ (°C)	13,9	13,7	13,2	13,6	13,4	13,6	14	13,9
Su Çıkış Sıcaklığı, $t_4$ (°C)	45	34,5	30,9	26,8	26,3	24,2	24	22,4
Su Geçiş Debisi, $\dot{m}$ (g/s)	4	7	10	15	20	25	30	35
Isı Transfer Yüzey Alanı, A (m <sup>2</sup> )	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$
Isı Transfer Hızı, $\dot{Q}$ (kW)	0,5206	0,6093	0,7407	0,8286	1,08	1,109	1,256	1,245
Isı Akısı, $\dot{q}$ (kW/m <sup>2</sup> )	140,7	164,7	200,2	224	291,8	299,7	339,3	336,5
Düzeltilmiş Buhar-Yüzey Sıcaklık Farkı, $\Delta t_d = 2,23 \cdot 10^{-6} \dot{q}$ (K)	0,3138	0,3672	0,4464	0,4994	0,6508	0,6684	0,7567	0,7504
Sıcaklık Farkı, $\Delta t$ (K)	4,686	5,833	7,354	9,701	9,949	11,53	12,24	13,25
Yüzey Isı Transfer Katsayısı, h (kW/m <sup>2</sup> K)	30,03	28,23	27,23	23,09	29,33	25,99	27,72	25,4

**Tablo 6.** Saf Su İçin Film Akış Durumunda Deneysel Veriler ve Hesap Sonuçları

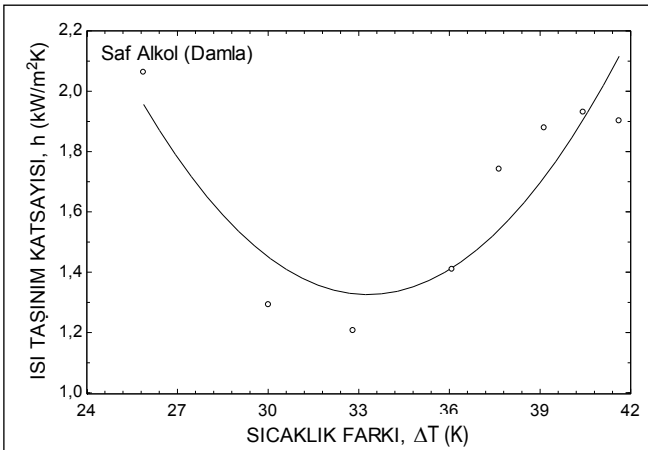
Ortam Sıcaklığı: 20 °C Atmosfer Basıncı: 0,99 bar	Saf Su (Film Şeklinde Yoğuşma)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8
Buhar Basıncı, $P_{\text{buhar}}$ (kPa)	0	0	0	0	0	0	0	0
Doyma Sıcaklığı, $t_1$ (°C)	97	97	97	97	97	97	97	97
Yüzey Sıcaklığı, $t_5$ (°C)	91,9	89	85,9	84,6	82,6	81,6	80,3	78,8
Su Giriş Sıcaklığı, $t_6$ (°C)	14,4	14,4	14,1	13,7	13,9	14,2	14,4	14,6
Su Çıkış Sıcaklığı, $t_7$ (°C)	68,8	60,2	54,4	51,5	47,6	44,5	40,4	37,7
Su Geçiş Debisi, $\dot{m}$ (g/s)	1	2	3	4	5	6	7	8
Isı Transfer Yüzey Alanı, A (m <sup>2</sup> )	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$	$37 \cdot 10^{-4}$
Isı Transfer Hızı, $\dot{Q}$ (kW)	0,2277	0,3833	0,506	0,6328	0,7052	0,7608	0,7617	0,7734
Isı Akısı, $\dot{q}$ (kW/m <sup>2</sup> )	61,53	103,6	136,7	171	190,6	205,6	205,9	209
Düzeltilmiş Buhar-Yüzey Sıcaklık Farkı, $\Delta t_d = 1,77 \cdot 10^{-6} \dot{q}$ (K)	0,1089	0,1834	0,242	0,3027	0,3373	0,364	0,3644	0,37
Sıcaklık Farkı, $\Delta t$ (K)	4,991	7,817	10,86	12,1	14,06	15,04	16,34	17,83
Yüzey Isı Transfer Katsayısı, h (kW/m <sup>2</sup> K)	12,33	13,25	12,59	14,14	13,55	13,68	12,6	11,72

**Şekil 2.** Saf Su İçin Isı Akısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Film Yoğuşma)**Şekil 3.** Saf Su İçin Isı Akısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Damla Yoğuşma)**Şekil 4.** Saf Alkol İçin Isı Akısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Film Yoğuşma)

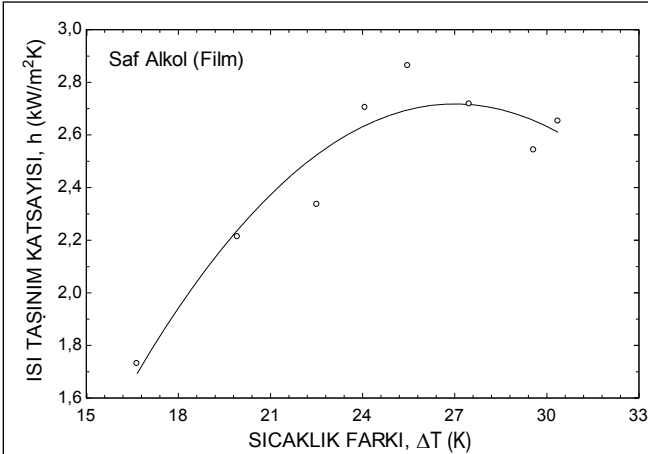
ısı taşınım katsayısında artış, belirli bir değerden sonra düşüş görülmektedir. Şekil 7'de ise sıcaklık farkının artışıyla ısı taşınım katsayısının sabit değerlere doğru yaklaştığı görülmektedir. Şekil 6 ve Şekil 7'de, damla akış için daha yüksek ısı taşınım katsayısı değerlerinin elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 5.** Saf Alkol İçin Isı Akısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Damla Yoğuşma)**Şekil 6.** Saf Su İçin Isı Taşınım Katsayısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Film Yoğuşma)**Şekil 7.** Saf Su İçin Isı Taşınım Katsayısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Damla Yoğuşma)

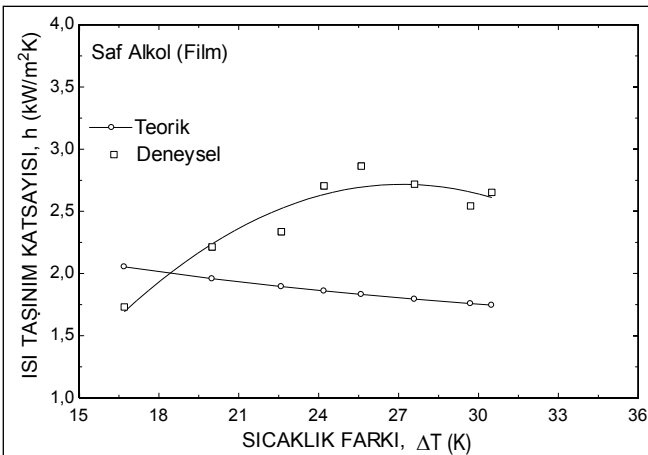
Şekil 8 ve Şekil 9'da, saf alkol için ısı taşınım katsayısının sıcaklık farkına göre değişimi sırasıyla, film ve damla yoğuşma için gösterilmektedir. Film yoğuşmada ısı taşınım katsayısının



Şekil 8. Saf Alkol İçin Isı Taşınım Katsayısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Damla Yoğuşma)

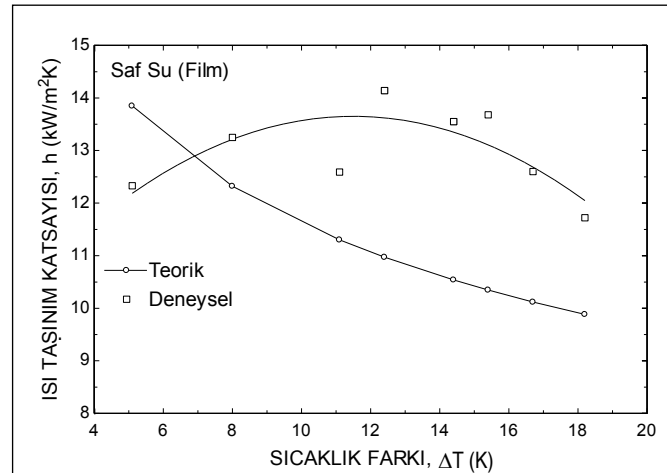


Şekil 9. Saf Alkol İçin Isı Taşınım Katsayısının Sıcaklık Farkına Göre Değişimi (Film Yoğuşma)



Şekil 10. Saf Alkol İçin Isı Taşınım Katsayısının Deneysel ve Nusselt Teorisine Göre Değişimi (Film Yoğuşma)

damla yoğuşmaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, deneylerde kullanılan tüp malzemelerinin ve



Şekil 11. Saf Su İçin Isı Taşınım Katsayısının Deneysel ve Nusselt Teorisine Göre Değişimi (Film Yoğuşma)

kullanılan akışkanın cinsinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 10 ve Şekil 11’de, saf alkol ve saf su için film şeklindeki yoğuşmada, deneysel sonuçlarla ve Nusselt teorisine göre elde edilen ısı taşınım katsayıları arasındaki kıyaslama gösterilmektedir. Vemurive Kim [15] yaptıkları çalışmada, yoğuşmada ısı transfer hızını artırmak ve damla yoğuşmayı daha çok teşvik etmek için farklı yüzey kaplama tekniklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, yapılan deneylerde bakır alaşım (%99.9 Cu, %0.1 P) üzerine “n-octadecyl” yüzey kaplama üzerindeki damla yoğuşmanın mükemmel olduğunu ve “stearicacid” yüzey kaplamada ise sadece 10 saat sürekli damla yoğuşma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca deneylere göre elde edilen taşınım ısı transfer katsayısı değerinin, Nusselt modelinden elde edilen taşınım ısı katsayısından daha iyi sonuçlar verdiğini grafikler halinde göstermişlerdir. Yun vd. [16], R134a soğutucu akışkanının farklı doyma sıcaklıklarında yatay tüplerde film yoğuşmasını incelemişlerdir. Test yapılan kalaylı bakır tüpün yoğuşma ısı transfer katsayısı değerlerinin, sırasıyla 20°C ve 30°C’deki doyma sıcaklıklarında Nusselt analiziyle elde edilen değerlerden %20 ve %18 daha küçük olduğunu grafikler halinde göstermişlerdir. Bu çalışmada ise film akışta, saf alkol ve saf su için deneysel ve teorik olarak ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Şekil 10 ve Şekil 11’den de görüldüğü üzere, her iki durumda da deneylere göre elde edilen taşınım ısı transfer katsayısı değerlerinin Nusselt bağıntısıyla hesaplanan değerlerden daha iyi olduğu görülmüştür.

## 5. SONUÇ

Deneylerin tümü, saf alkol ve saf su için film ve damla şeklindeki yoğuşmada ısı taşınım katsayısı ve ısı akısının değişimini incelemek üzere yapılmıştır. Film akış için deneysel olarak hesaplanan ısı akısı ve ısı taşınım katsayısı literatürde yaygın olarak kullanılan Nusselt bağıntısıyla hesaplanmıştır. Bu çalışmada, sonuçlardan da görüldüğü üzere, saf su film akış için

olan ısı akısı değeri yine saf su damla akış için olan ısı akısı değerinden daha az değere sahiptir. Aynı şekilde, saf su için film ve damla akışa göre deneysel olarak ölçülen sonuçlardan elde edilen ve hesaplanan ısı taşınım katsayısı değerlerine bakılırsa, damla akıştaki değerlerin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, literatür bilgilerini de doğrulamaktadır. Deneyin literatürde karşılaşılmayan bir akışkan olan saf alkol ile yapılması durumunda, film ve damla akış için hesaplanan ısı akısının sıcaklık farkına göre değişimi Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterilmiştir. Aynı şekilde, saf alkol için film ve damla akışa göre deneysel olarak ölçülen sonuçlardan elde edilen ve hesaplanan ısı taşınım katsayısı değerlerine bakılırsa, film akışta sıcaklık farkına göre önce artış göstermekte, belirli bir değerden sonra azalmaya başlamaktadır. Damla akışta ise ısı taşınım katsayısı, belirli bir sıcaklık farkına kadar azalmakta, daha sonra yükselmektedir. Saf alkol için film akışlı yoğuşmada damla yoğuşmaya göre daha yüksek ısı taşınım katsayısı değerleri elde edilmiştir. Saf su için ise damla yoğuşmada film yoğuşmaya göre daha yüksek ısı taşınım katsayısı değerleri elde edilmiştir.

## SEMBOLLER

$\dot{Q}$	Isı transfer hızı (kW)
$\dot{m}$	Kütleli debi (g/s)
$c_p$	Özgül ısı (kJ/kgK)
$\dot{q}$	Isı akısı (kW/m <sup>2</sup> )
$\Delta t$	Sıcaklık farkı (K)
$h$	Yüzey ısı transfer katsayısı (kW/m <sup>2</sup> K)
$\delta$	Cidar kalınlığı (mm)
$k$	Isı iletim katsayısı (W/mK)
$t$	Sıcaklık (K)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$h_{fg}$	Doymamış sıvının entalpis (kJ/kg)
$g$	Yerçekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )
$L$	Boru uzunluğu (m)
$\mu$	Dinamik viskozite (Ns/m <sup>2</sup> )
$P$	Basınç (kPa)

## Alt İndisler

d	Düzeltilmiş
ort	Ortalama
f	Doymuş sıvı
g	Doymuş buhar
1	Doyma
2,5	Yüzey
3,6	Su girişi
4,7	Su çıkışı

## KAYNAKÇA

1. <http://www.che.boun.edu.tr/che302/>, son erişim tarihi: 22.09.2015
2. Koch, G., Kraft, K., Leipertz, A. 1998. “Parameter Study on the Performance of Dropwise Condensation,” Rev. Gen. Therm., vol. 37, p. 539-548.
3. Kananeh, A. B., Rausch, M. H., Fröba, A. P., Leipertz, A. 2006. “Experimental Study of Dropwise Condensation on Plasma-Ion Implanted Stainless Steel Tubes,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, p. 5018-5026.
4. Rausch, M. H., Fröba, A. P., Leipertz, A. 2008. “Dropwise Condensation Heat Transfer on Ion Implanted Aluminum Surface,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 51, p. 1061-1070.
5. Ma, X., Jan, Z., Xu, W., Wang, M., Wang, S. 2012. “Effect of Surface Free Energy Difference on Steam-Etanol Mixture Condensation Heat Transfer,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, p. 531-537.
6. Wang, J., Yan, J., Hu, S., Liu, J. 2009. “Marangoni Condensation Heat Transfer of Water-Ethanol Mixtures on a Vertical Surface with Temperature Gradients,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52, p. 2324-2334.
7. Yun, R., Heo, J., Kim, Y. 2006. “Effect of Surface Roughness and Tube Materials on the Filmwise Condensation Heat Transfer Coefficient at Low Heat Transfer Rates,” International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 33, p. 445-450.
8. Chen, Z., Utaka, Y. 2011. “Characteristics of Condensate Drop Movement with Application of Bulk Surface Temperature Gradient in Marangoni Dropwise Condensation,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 54, p. 5049-5059.
9. Ganzevles, F. L. A., van der Geld, C. W. M. 2002. “Temperatures and the Condensate Heat Resistance in Dropwise Condensation of Multicomponent Mixtures with Inert Gases,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, p. 3233-3243.
10. Izumi, M., Kumagai, S., Shimada, R., Yamakawa, N. 2004. “Heat Transfer Enhancement of Dropwise Condensation on a Vertical Surface with Round Shaped Grooves,” Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 28, p. 243-248.
11. Cheng, S., Sun, F., Shi, Y. 2012. “Experimental Study of Condensation Heat Transfer Characteristics of Horizontal Tube Bundles in Vacuum States,” Journal of Hydrodynamics, vol. 24, p. 628-634.
12. <http://www.p-a-hilton.co.uk>, son erişim tarihi: 16.01.2014
13. <http://tr.wikipedia.org>, son erişim tarihi: 19.01.2015.
14. Altınışık, K. 2003. Uygulamalarla Isı Transferi, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, s. 587.
15. Vemuri, S., Kim, K. J. 2006. “An Experimental and Theoretical Study on the Concept of Dropwise Condensation,” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, p. 649-657.
16. Yun, R., Heo, J., Kim, Y. 2009. “Film Condensation Heat Transfer Characteristics of R134a on Horizontal Stainless-Steel Integral-Fin Tubes at Low Transfer Rate,” International Journal of Refrigeration, vol. 32, p. 865-873.