

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİNİKANALLARDA KAYNAMALI AKIŞTA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Ayşe CANDAN

**HAZİRAN 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Ayşe CANDAN Tarafından Hazırlanan**

**MİNİKANALLARDA KAYNAMALI AKIŞTA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16/ 05 /2017 gün ve 1702 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Orhan AYDIN

Üye : Prof. Dr. Tülin BALI

Üye : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN





Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Üretim teknolojisinin gelişimi ile elektro-mekanik sistemlerin boyutlarında ve performanslarında hızlı değişimler görülmektedir. Bu tür sistemlerde boyutların küçülmesi yüksek miktarda ısının açığa çıkmasına ve aşırı ısınma problemlerine yol açmaktadır. Bu kapsamda, minikanalarda kaynamalı akış yüksek ısı transfer katsayıları sunabilmesi sebebiyle ideal ısı transfer yöntemlerinden biridir. Gizli ısıdan faydalanılması sayesinde, düşük akış debilerinde bile, ısı etkili bir şekilde uzaklaştırılabilmektedir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, minikanalarda kaynamalı akışta ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, temel olarak, boyut oranının minikanalarda (kanal genişlik / kanal derinlik) kaynamalı akış karakteristikleri ve akış desenleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışmam sürecince her zaman güvenini ve desteğini gördüğüm danışman hocam Sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, deneylerin yapılmasında engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Doç. Dr. Mete AVCI'ya ve Yrd. Doç. Dr. Burak MARKAL'a teşekkür ederim. Bu süreçte yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM, Ayşenur ALTUNKAYA ve Fatma YILMAZ'a teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayşe CANDAN

Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Minikanallarda Kaynamalı Akışta Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 09/06/2017

Ayşe CANDAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kaynama	3
1.2.1. Kabarcık Oluşum Süreci.....	4
1.2.2. Havuz Kaynaması.....	6
1.2.3. Kaynamalı Akış ve Akış Desenleri.....	7
1.3. Kanal Boyutları Arasındaki Geçiş Kriterleri	10
1.4. Literatür Araştırması.....	12
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	19
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	20
2.1. Deney Düzenegi.....	20
2.2. Test Bölgesi	24
2.3. Ölçüm Cihazları.....	26
2.3.1. Debi Ölçümü.....	26
2.3.2. Basınç Ölçümü.....	27
2.3.3. Güç Kaynakları.....	27
2.3.4. Veri Toplama Sistemi	27
2.3.5. Akış Görüntüleme Sistemi.....	28
2.4. Deneysel Hesaplama Yöntemi.....	29
2.4.1. Isı Kaybı Kalibrasyonu	29
2.4.2. Tek Fazlı Akış ile Çalışmanın Doğruluğunun Kontrolü	30

2.4.3.	Kaynamalı Akışta Isı Transferi ve Basınç Düşümü	38
2.4.4.	Belirsizlik Analizi	41
3.	BULGULAR VE İRDELEME	43
3.1.	Kaynama Eğrileri.....	43
3.2.	Boyut Oranı ve Isı Akısının Etkisi.....	45
3.3.	Kütle Akısının Etkisi	54
4.	SONUÇLAR.....	58
5.	ÖNERİLER.....	59
6.	KAYNAKLAR	60

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MİNİKANALLARDA KAYNAMALI AKIŞTA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ

Ayşe CANDAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2017, 64 Sayfa

Bu tezde, minikanallarda kaynamalı akışta ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, aynı hidrolik çapa, fakat farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahip beş adet tek kanallı ısı alıcı kullanılmıştır. Kaynama mekanizmasının daha ayrıntılı anlaşılabilmesi için sıcaklık ve basınç ölçümleri ile eş zamanlı olarak akış görüntüleme çalışması yapılmıştır. Farklı kütle akıları, kuruluk dereceleri, ısı akıları ve genişlik/derinlik oranının (AR) ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geniş çalışma koşulları altında optimum AR değeri elde edilmiştir. Baskın ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama; baskın akış desenlerinin ise kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akış (*slug flow*) olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Minikanal, Kaynamalı akış, Isı transfer katsayısı, Genişlik/derinlik

Master Thesis

SUMMARY

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN FLOW BOILING
IN MINICHANNELS

Ayşe CANDAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2017, 64 Pages

In this thesis, flow boiling heat transfer in minichannels is investigated experimentally. In the study, five single-channel heat sinks having the same hydraulic diameter but different width and depth values are tested. In order to understand boiling mechanism in detail, flow visualization tests are conducted as well as the temperature and pressure measurements. The effects of different values of the mass flux, vapor quality, heat flux and width to depth (aspect ratio) on heat transfer coefficient and pressure drop are obtained. For a broad range of working parameters optimum value of aspect ratio is determined. It is disclosed that nucleate boiling is the dominant heat transfer mechanism while the dominant flow patterns are bubbly and slug flow.

Key Words: Mini channel, Flow boiling, Heat transfer coefficient, Channel width to depth ratio

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Kaynamalı akışla ilgili kanal boyutu kullanım alanı ilişkisi	2
Şekil 1.2.	Kabarcık oluşumu ve büyümesinin aşamaları	4
Şekil 1.3.	Kabarcık büyüme sürecinin şematik gösterimi (a) makro kanal, (b) mini/mikrokanallar	5
Şekil 1.4.	Kanal duvarları arasında sınırlandırılan bir kabarcığa etki eden kuvvetler	5
Şekil 1.5.	1 atm basınçta su için tipik kaynama eğrisi	6
Şekil 1.6.	Isıtılan bir boru içerisindeki kaynamalı akışta ısı transfer bölgeleri.....	8
Şekil 1.7.	Yatay bir borudaki iki faz akış desenleri	9
Şekil 2.1.	Deney düzeneğinin şematik resmi	22
Şekil 2.2.	Deney düzeneğinin fotoğrafı	23
Şekil 2.3.	Test bölgesinin kesit (a) ve montajlı (b) görünüşleri.....	25
Şekil 2.4.	Termoeleman deliklerinin konumları (a), minikanalın şematik gösterimi (b).....	26
Şekil 2.5.	Akış görüntüleme sistemi	28
Şekil 2.6.	Isı kaybı kalibrasyon eğrisi	29
Şekil 2.7.	Nu (a) ve f_{sp} (b) için deneysel veriler ile gelişmekte olan laminar akış korelasyonların karşılaştırılması.....	37
Şekil 2.8.	Kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma sıcaklığının iteratif çözüm ile elde edilmesi	39
Şekil 3.1.	Farklı AR değerleri (a) ve kütle akıları (b) için kaynama eğrileri.....	44
Şekil 3.2.	Farklı ısı akılarında $G = 70 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (a), $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b), $G = 230 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c) ve $G = 310 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (d) için yerel ısı transfer katsayısının AR ile değişimi	45
Şekil 3.3.	$G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $q = 160 \text{ W}$ ve $AR = 0.25$ için kanal girişinden 46.5 mm uzaklıktaki bir dizi akış görüntüleri.....	48
Şekil 3.4.	$AR=1'$ in $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $q = 160 \text{ W}$ koşulları için kanal girişinden 1.5 mm (a) ve 16.5 mm (b) uzaklıktaki akış desenleri	49
Şekil 3.5.	$AR=1'$ in $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $q = 160 \text{ W}$ koşulları için kanal girişinden 46.5 mm uzaklıktaki bir dizi akış desenleri	50
Şekil 3.6.	Farklı ısı akılarında $G = 70 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (a), $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b), $G = 230 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c) ve $G = 310 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (d) toplam basınç düşümü ile AR' nin değişimi.....	51
Şekil 3.7.	Farklı kütle akılarında $AR = 1$ için yerel ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi (b).....	55

Şekil 3.8. Farklı kütle akılarında $AR = 1$ için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve çıkış kuruluk derecesi ile değişimi (b)..... 56



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Taşınım türlerine göre ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri.....	2
Tablo 1.2. Kanalların boyutsal sınıflandırılması.....	10
Tablo 1.3. Minikanalarda kaynamalı akışta ısı transferi için yapılan deneysel çalışmaların özeti	17
Tablo 2.1. Suyun termofiziksel özellikleri.....	21
Tablo 2.2. Minikanalara ait geometrik parametreler	26
Tablo 2.3. Pompa ve akış ölçerin özellikleri.....	27
Tablo 2.4. Basınç ölçüm cihazlarının özellikleri	27
Tablo 2.5. Nusselt sayısı için literatürdeki korelasyonlar	35
Tablo 2.6. Fanning sürtünme faktörü için literatürdeki korelasyonlar	36
Tablo 2.7. Belirsizlik analizi	42

SEMBOLLER DİZİNİ

- A_{ch} : Kanal kesit alanı [m^2]
- A_p : Isı alıcının taban alanı [m^2]
- A_t : Minikanalın toplam ısıtma alanı [m^2]
- AR : Boyut oranı, $AR = W_{ch} / H_{ch}$
- C_p : Sabit basınçta özgül ısı [$kJ\ kg^{-1}K^{-1}$]
- Bo : Bond sayısı, $Bo = g(\rho_L - \rho_v)D_h^2 / \sigma$
- Co : Sınırlanma sayısı, $Co = \sigma^{0.5} / (D_h(g(\rho_L - \rho_v)))^{0.5}$
- D_h : Hidrolik çap [m]
- $Eö$: Eötvös sayısı, $Eö = g(\rho_L - \rho_v)D^2 / 8\sigma$
- f : Fanning sürtünme faktörü
- g : Yer çekimi ivmesi [$m\ s^{-2}$]
- G : Kütle akısı [$kg\ m^{-2}s^{-1}$]
- Gr : Graetz sayısı, $Gr = D_h\ Re\ Pr / L$
- h_{sp} : Tek faz ısı transfer katsayısı [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$]
- h_{tp} : İki faz ısı transfer katsayısı [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$]
- H_{ch} : Minikanal derinliği [m]
- i_{Lv} : Buharlaşma gizli ısı [$kJ\ kg^{-1}$]
- k_c : Bakırın ısı iletim katsayısı [$W\ m^{-1}K^{-1}$]
- k_f : Akışkanın iletim katsayısı [$W\ m^{-1}K^{-1}$]
- K_{c1}, K_{c2} : Kesit daralması kayıp katsayıları
- l_a : Termoeleman ile bakır bloğun üst yüzeyi arasındaki uzaklık [m]
- l_b : Isı alıcı tabanı ile kanal yüzeyi arasındaki uzaklık [m]
- L : Minikanal uzunluğu [m]
- L_{cap} : Kılcallık uzunluğu, $L_{cap} = (\sigma / (g(\rho_L - \rho_v)))^{0.5}$

L_{sp}	: Tek fazlı bölge uzunluğu [m]
\dot{m}	: kütleli debi [kg s^{-1}]
Nu	: Nusselt sayısı, $Nu = h_{sp} D_h / k_f$
P	: Basınç [Pa]
$P_{ch,i}$: Minikanal girişindeki basınç [Pa]
$P_{ch,o}$: Minikanal çıkışındaki basınç [Pa]
Pr	: Prandtl Sayısı, $Pr = \mu C_p / k_f$
q	: Isıl güç [W]
q''_{eff}	: Efektif ısı akısı [W m^{-2}]
q_{loss}	: Kayıp ısı [W]
q''_w	: Duvar ısı akısı [W m^{-2}]
Re	: Reynolds sayısı, $Re = GD_h / \mu$
T	: Sıcaklık [K]
T_m	: Termoelemanlardan okunan sıcaklıkların ortalaması [K]
T_{sat}	: Doyma sıcaklığı [K]
v	: Özgül hacim [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]
\dot{V}	: Hacimsel debi [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
W_{ch}	: Minikanal genişliği [m]
W_T	: Isı alıcı genişliği [m]
x	: Kuruluk derecesi
x_e	: Yerel kuruluk derecesi
x_{eo}	: Çıkış kuruluk derecesi

Yunan sembolleri

μ	: Viskozite [Ns m^{-2}]
ΔP_{sp}	: Tek fazlı akış bölgesindeki basınç düşümü [Pa]
ΔP_{tot}	: Toplam basınç düşümü [Pa]
ΔP_{c1}	: Kesit daralması basınç kayıpları (büyük hazne-küçük hazne) [Pa]

- ΔP_{c2} : Kesit daralması basınç kayıpları (küçük hazne-minikanal) [Pa]
 ΔP_{e1} : Kesit genişlemesi basınç değişimi (küçük hazne-büyük hazne) [Pa]
 ΔP_{e2} : Kesit genişlemesi basınç değişimi (minikanal-küçük hazne) [Pa]
 ΔT_{sat} : Kızma farkı [K]
 ΔT_{lm} : Logaritmik ortalama sıcaklık farkı [K]
 ρ : Yoğunluk [kg m^{-3}]
 σ : Yüzey gerilmesi [N m^{-1}]

Alt indisler

- ch : Minikanal
 $crit$: Kritik
 g,o : Yalnızca buhar
 i : Giriş
 L : Sıvı
 L,o : Yalnızca sıvı
 m : Ortalama
 $P1$: Büyük hazne
 $P2$: Küçük hazne
 tot : Toplam
 o : Çıkış
 sp : Tek faz
 th : Eşik değer
 tp : İki fazlı
 v : Buhar

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Uzay elektroniği, otomotiv, savunma sanayisi, bilgisayar teknolojileri ve benzeri alanlarda kullanılmakta olan elektro – mekanik sistemlerin boyutları giderek küçülmekte buna karşın, fonksiyonelliği ve dolayısıyla kapasitesi artmaktadır. Bu fiziksel ve işlevsel değişim, yüksek miktarda ısı akısı açığa çıkmasına veya diğer bir ifade ile yüksek ısı yoğunluğu problemlerine yol açmaktadır. Elektronik cihazların güvenli bir şekilde kullanımı, açığa çıkan bu ısının sistemden yeterli düzeyde uzaklaştırılması ile sağlanabilir. Doğal taşınım veya tek fazlı zorlanmış taşınım gibi klasik ısı kontrol yöntemleri, artan soğutma gereksinimleri karşısında yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, etkili soğutma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, mini/mikrokanallarda kaynamalı akış; yüzey sıcaklığındaki küçük değişimlere rağmen, yüksek ısı transfer katsayıları sağlayabilmesinden dolayı etkili bir ısı kontrol yöntemi olarak değerlendirilmektedir.

Özellikle son yirmi yıldır yakıt hücreleri, havacılık elektroniği ve hibrit araçlarda güç elektroniği gibi sistemlerin soğutulması amacıyla, minikanallı ısı alıcılarda kaynamalı akışla ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Kaynamalı akışta ısı transferinin tek fazlı akışa karşı avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Kaynamalı akışta, yüzey sıcaklıkları kanal boyunca çok az değişir. Bu nedenle termal gerilmeler azalır; böylelikle cihazların performansı ve dayanıklılığı önemli ölçüde artar.
- Tek fazlı akışla karşılaştırıldığında; aynı miktardaki ısı, kaynamalı akışta daha düşük akışkan debisi ile uzaklaştırılabilir. Bunun nedeni, buharlaşma gizli ısısından faydalanılmasıdır.
- Tek fazlı akışa kıyasla, kaynamalı akışta ısı transferinde düşük akış debilerinde yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmektedir. Bu sayede, kompakt bir soğutma sistemi için düşük pompalama gücü yeterli olmaktadır (Karayiannis ve Mahmoud, 2017).

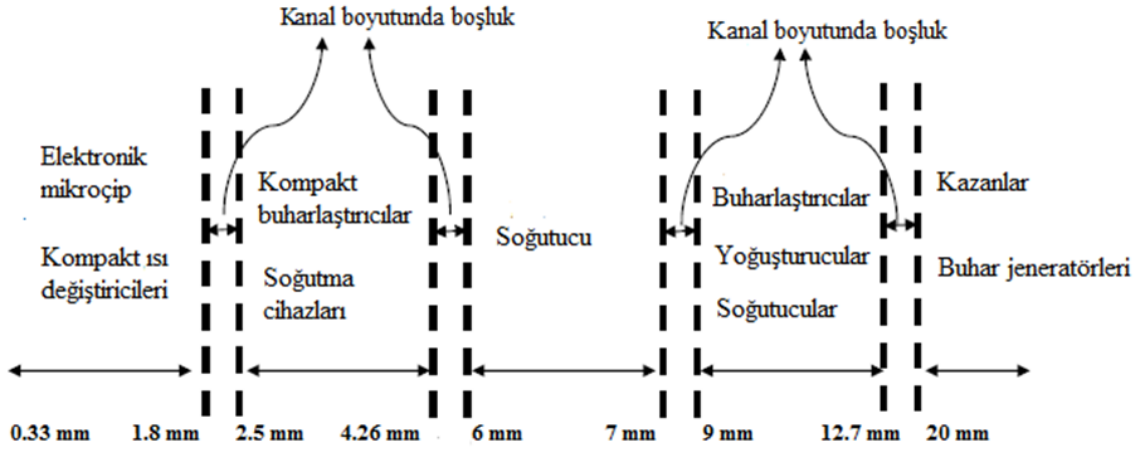
Faz değişimiyle ilgili olan kaynama mekanizması kaynaklarda (Çengel, 2011, Bergman vd., 2015) taşınımın bir türü olarak ifade edilmektedir. Kaynamanın etkinliğini

göstermesi açısından, taşınım türleriyle ilgili ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Taşınım türlerine göre ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri (Bergman vd., 2015).

Taşınım Türü		Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
Doğal taşınım	Gazlar	2-25
	Sıvılar	50-1000
Zorlanmış taşınım	Gazlar	25-250
	Sıvılar	50-20000
Faz değişimi	Kaynama ve yoğuşma	2500-100000

Kaynamalı akış, Tablo 1.1’de de görüldüğü gibi ısı transferi açısından yüksek potansiyele sahiptir. Bu nedenle, farklı disiplinlerde uygulama alanı bulmaktadır. Kanal çapına bağlı olarak kaynamalı akıştan faydalanılan sistemlerden bazıları şematik olarak Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Kaynamalı akışla ilgili kanal boyutu kullanım alanı ilişkisi (Sardeshpande ve Ranade, 2013).

Şekil 1.1’den de görüldüğü üzere, kanal çapı azaldıkça kullanım alanı modern teknolojik sistemlere kaymaktadır. Kanal çapındaki bu tarz bir değişim makro boyutlardan mini ve mikro boyutlara geçişi temsil etmektedir. Kaynamalı akışta, kanal içerisinde oluşan kabarcıkların hacminin sürekli değişmesi, kabarcıkların birleşmesi ve sıvı ve buhar fazı

arasındaki ara yüz etkileşimleri sebebiyle akışın fiziksel yapısı kanal kesiti değişimlerinden etkilenir. Bu etkinin düzeyi, azalan kanal boyutları ile daha belirgin hale gelir ve akış fiziği daha karmaşık bir hal alır. Sonuç olarak, mini/mikro boyutlu kanallarda kaynamalı akışın efektif bir şekilde uygulanabilmesi ve ısıl performansının artırılması için altta yatan fiziksel mekanizmanın kapsamlı deneysel çalışmalar yapılarak incelenmesi ve farklı geometrik tasarımlar altında performans analizlerinin yapılması oldukça önemlidir. Bu alanda yapılacak çalışmalar, elektromekanik sistemlerin yoğun olarak kullanıldığı sektörler tarafından yakından takip edilmektedir.

1.2. Kaynama

Kaynama, bir katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan buharlaşma olarak tanımlanmaktadır (Bergman vd., 2015). Katı yüzey sıcaklığı (T_w), sıvı basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığını (T_{sat}) aştığı zaman kaynama olayı gerçekleşir. Kaynamalı akış için (bir taşınım ısı transfer şekli olarak), birim yüzeyde geçen ısı akısı Newton'un soğuma kanunuyla belirlenir (Çengel, 2012).

$$q'' = h(T_w - T_{sat}) = h\Delta T_e \quad (1.1)$$

Burada; ΔT_e , sıcaklık aşımı veya kızma farkı olarak adlandırılır ve ısıtma yüzey sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki farkı temsil eder.

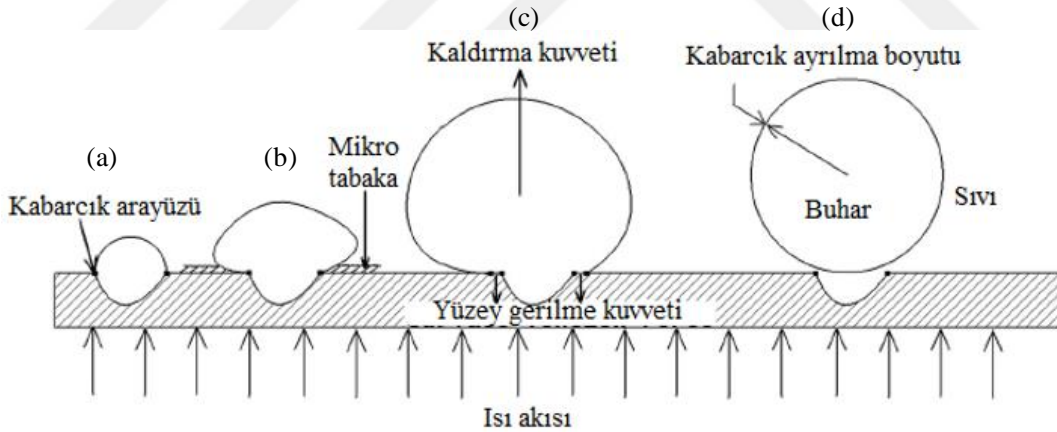
Kaynama, akışkanın yığın hareketine bağlı olarak, havuz kaynaması ve kaynamalı akış olmak üzere ikiye ayrılır. Havuz kaynamasında akışkan durgundur ve ısı aktarımında doğal taşınım etkindir. Kaynamalı akışta ise akışkan hareket halindedir. Sıvının yığın sıcaklığı açısından ise kaynama, aşırı soğutulmuş kaynama ve doymuş kaynama şeklinde sınıflandırılır. Aşırı soğutulmuş kaynamada sıvının sıcaklığı doyma sıcaklığından küçüktür ve yüzeyde oluşan kabarcıklar sıvının içerisinde yoğunlaşma eğilimindedir. Doymuş kaynamada ise oluşan kabarcıklar yok olmaz ve kabarcık yoğunluğu sürekli artmaktadır.

1.2.1. Kabarcık Oluşum Süreci

Kabarcığın çekirdeklenme, büyüme ve ısıtma yüzeyinden ayrılma döngüsü dört aşamada meydana gelir:

- Kabarcıklaşma odağı olarak adlandırılan yüzey boşluklarında kabarcığın oluşup büyümeye başlaması,
- kabarcık ara yüzünde mikro tabaka oluşumu,
- kaldırma kuvveti ve yüzey gerilme kuvveti nedeniyle kabarcığın şekillenmesi ve
- kuvvetler arasındaki denge nedeniyle kabarcığın ayrılma boyutuna erişip yüzeyden ayrılması (Gupta vd., 2016).

Büyüme tamamlandıktan sonra kabarcık, sınır tabakayı parçalayarak ısıtılan yüzeyden ayrılır ve boşalan kısım daha soğuk sıvı ile dolar. Isıl sınır tabaka oluşmaya başladığında yeni bir çevrim başlayarak ilgili süreçler tekrarlanır. Isıl sınır tabakanın yeniden oluşması için geçen süre bekleme periyodu (*waiting period*) olarak adlandırılır (Gupta vd., 2016). Bu süreçler dizisi Şekil 1.2 ile şematize edilmiştir.

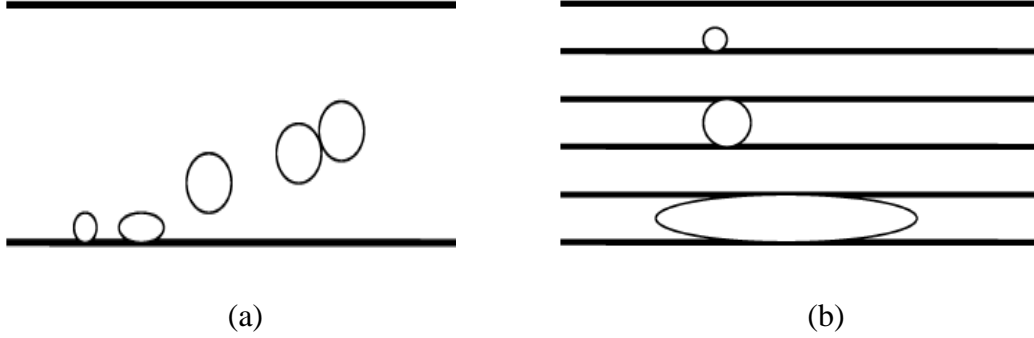


Şekil 1.2. Kabarcık oluşumu ve büyümesinin aşamaları (Gupta vd., 2016).

Konvansiyonel kanallarda yüzeyden ayrılan kabarcıklar, kabarcıklı akışın oluşumunu sağlar. Kabarcıklar kanal boyunca genel olarak büyüme ve birleşmeye devam ettikçe uzun kabarcıklı akış (*slug flow*) ve halkasal akış (*annular flow*) oluşur.

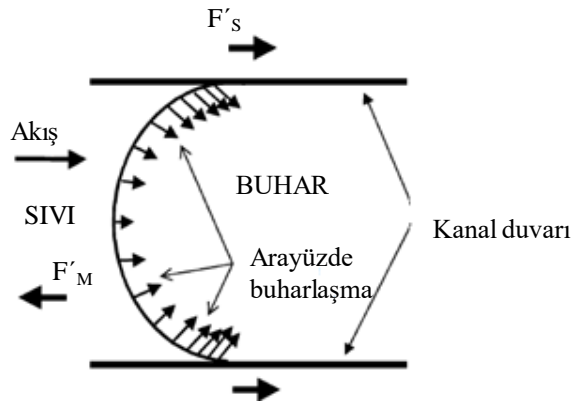
Makro ve mini/mikrokanallardaki kabarcık büyümesi karşılaştırmalı olarak Şekil 1.3'te verilmiştir (Kandlikar, 2006). Şekil 1.3a'da makro bir kanalda kabarcık büyümesi ve yüzeyden ayrılması gösterilmiştir. Burada kabarcık sadece kabarcıklaşmanın

başladığı duvar yüzeyi ile etkileşime girer. Mini/mikrokanallarda ise kabarcık, büyüyerek kanalı doldurur ve kanalın diğer duvarıyla da temasa geçer (Şekil 1.3b).



Şekil 1.3. Kabarcık büyüme sürecinin şematik gösterimi (a) makro kanal, (b) mini/mikrokanallar (Kandlikar, 2006).

Şekil 1.4'te kanal duvarları arasında sınırlandırılan bir kabarcığa etki eden kuvvetler gösterilmiştir. Bu kuvvetler; buharlaşma momentum kuvveti (F_M) ve yüzey gerilme kuvvetidir (F_S). Buharlaşma momentum kuvveti, akışa ters yönde etki eder ve yüksek ısı akısı değerlerinde yüzey gerilmesi ve atalet kuvvetlerini yenerek ters akışa yol açar. (Kandlikar, 2006).



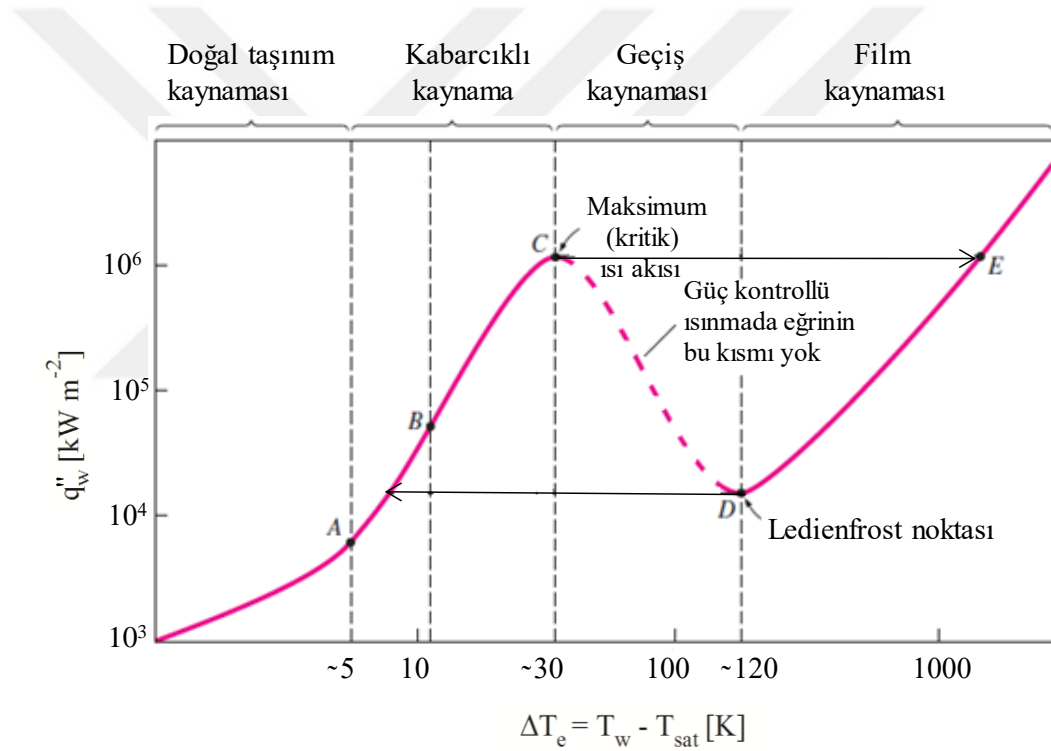
Şekil 1.4. Kanal duvarları arasında sınırlandırılan bir kabarcığa etki eden kuvvetler (Kandlikar, 2006).

Yukarıda ifade edilen kabarcık oluşumu ve dolayısıyla kaynama süreçleri; yüzey pürüzlülüğü, yüzeyin ıslanabilirliği, yüzeydeki oyukların boyutları, ısıtıcı yüzeyin

geometrisi, sıvı filminin kalınlığı, akışkanın yüzey gerilmesi ve viskozitesinden etkilenmektedir (Barber, 2009).

1.2.2. Havuz Kaynaması

Bir kap içerisinde bulunan sıvının kaynaması olayına havuz kaynaması denir. Havuz kaynamasında akışkanın yığın hareketi yoktur. Kaynamayla ilgili fiziksel mekanizmaların anlaşılabilmesi, havuz kaynaması türlerinin incelenmesini gerekli kılar. Şekil 1.5'te atmosferik basınçta suyun tipik bir havuz kaynaması eğrisi verilmiştir.



Şekil 1.5. 1 atm basınçta su için tipik kaynama eğrisi (Çengel, 2012).

Şekil 1.5'te görüldüğü gibi A noktasına kadar yüzey sıcaklığı ile doyma sıcaklığı arasındaki farkın çok küçük olması nedeniyle ısı transferi doğal taşınım ile gerçekleşir. A noktasında ısıtılan yüzey boyunca ayırık kabarcıklar oluşmaya başlar ve bu nokta kabarcıklı kaynamanın başlangıcı olarak bilinir. A-B bölgesinde kabarcıklaşma odaklarında ayırık kabarcıklar oluşur ve yüzeyden ayrılırlar. B-C bölgesinde ise kızma farkı arttıkça ayırık kabarcıklar artmaya devam eder. Kabarcık oluşumundaki artışın devam etmesi kabarcıkların

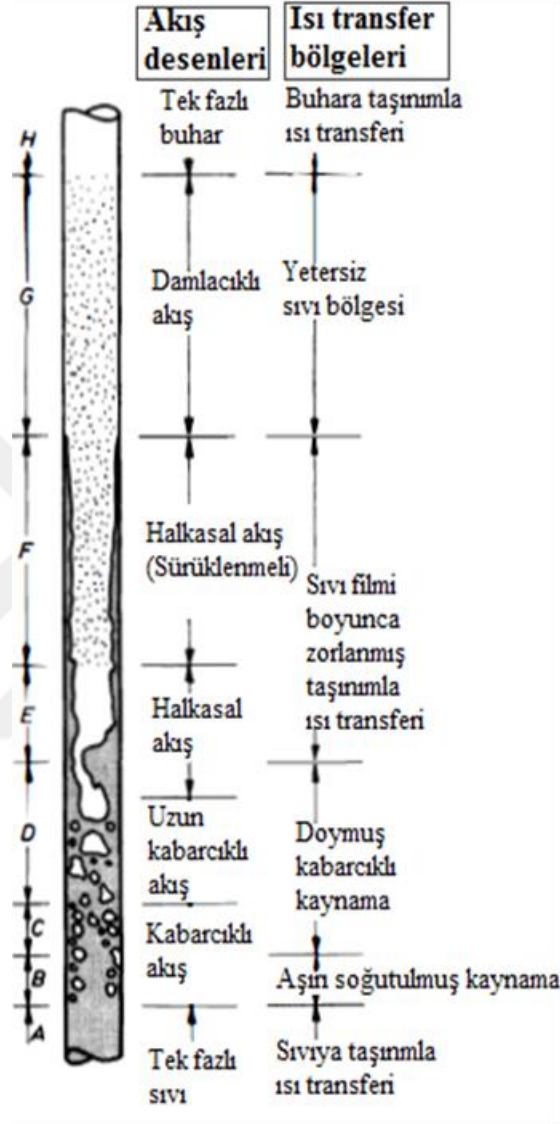
etkileşmesine ve birleşmesine neden olur. Kabarcık yoğunluğu o kadar fazlalaşır ki bir noktadan sonra artık sıvının, yüzeyi sürekli olarak ıslatmasını zorlaştırır. Şekil 1.5'te C ile gösterilen bu noktadaki ısı akısı kritik ısı akısı olarak adlandırılır. Güç kontrollü ısıtmada C noktasından sonra yüzey sıcaklığında sıcaklık sıçraması meydana gelmektedir (C noktasından E noktasına). C ve D noktaları arasında ise geçiş kaynaması (kararsız film kaynaması, kısmi film kaynaması) meydana gelir. Isıtılan yüzey üzerinde kararsız (kısmi) bir buhar filmi oluşur ve yüzey üzerinde herhangi bir noktadaki koşullar, film ve kabarcıklı kaynama düzenleri arasında gelip gider. Kaynama eğrisinin D noktasında yüzey tamamen bir buhar örtüsü ile kaplıdır. Yüzey sıcaklığında hızlı bir artış gözlemlenirken ısı akısı en düşük değerini alır ve bu nokta *Leidenfrost noktası* olarak adlandırılır. D noktasından sonra film kaynaması oluşur ve bu rejimde yüzey kararlı bir buhar filmi ile kaplanır. Yüzeyden sıvıya ısı geçişi, buhar üzerinden iletim ve ışıyım ile gerçekleşir (Naterer, 2002).

1.2.3. Kaynamalı Akış ve Akış Desenleri

Kaynamalı akış, bir kanal içerisinde akmakta olan akışkanın (yığın hareket) kaynamasını ifade etmektedir. Kanal içerisinde hem sıvı hem de buhar fazı vardır ve akışkan, ısıtılan kanal boyunca ilerledikçe faz oranlarında değişim meydana gelir. Buhar ve sıvı fazının kanal içerisindeki dağılımları akış desenleri olarak adlandırılır. Akış desenleri akışın fiziksel mekanizmasıyla yakından ilgilidir ve ısı transferini önemli derecede etkiler. Şekil 1.6'da, ısıtılan düşey bir konvansiyonel boru içerisinde, akış doğrultusu boyunca, kaynamalı akışta oluşan akış desenleri ve ısı transfer mekanizmaları verilmiştir.

Sıvı, ısıtılan kanala doyma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta girer. Bu nedenle A bölgesinde kaynama görülmez. Bu bölgede; akışkan, sadece sıvı fazında olup; ısı transferi, zorlanmış taşınım ile gerçekleşir. Bir sonraki bölgede ise (B bölgesi); duvar sıcaklığı, sıvının doyma sıcaklığını geçer ve duvara yakın bölgelerde kabarcık oluşumu başlar. Ancak, borunun iç bölgesinde akışkan sıcaklığı henüz doyma sıcaklığına ulaşmadığı için oluşan kabarcıklar sönümlenme eğilimindedir. Bu nedenle, B bölgesindeki ısı transfer mekanizması aşırı soğuk kabarcıklı kaynama olarak adlandırılır. C bölgesinde, akışkan yığın sıcaklığı doyma sıcaklığına erişir ve yüzey üzerinde oluşan buhar kabarcıkları yüzeyden ayrılır fakat sönümlenmez. Oluşan kabarcıklar birleşerek ve/veya büyüyerek daha büyük kabarcıkları/kabarcık öbeklerini oluşturur (D bölgesi). D bölgesi olarak ifade edilen bölgede, ana akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve kısmen halkasal akıştır. C ve D bölgelerinde

kabarcıklı akış ve *slug* akış aktif olarak görüldüğü için bu bölgelerdeki etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır.

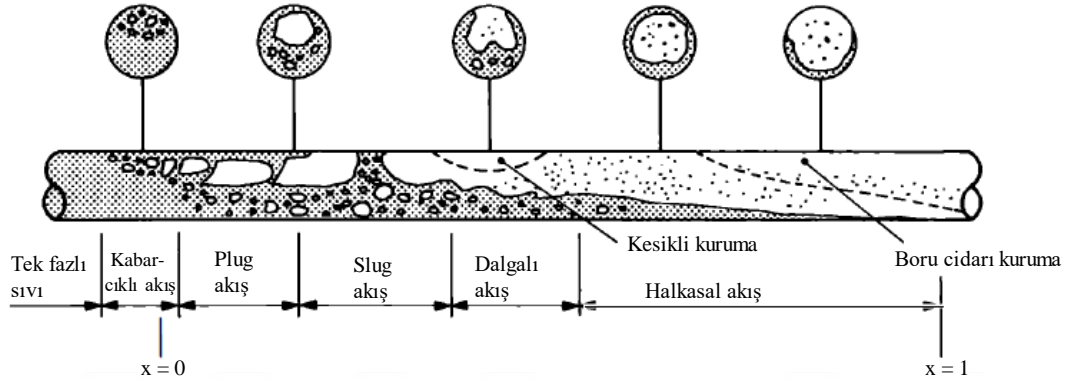


Şekil 1.6. Isıtılan bir boru içerisindeki kaynamalı akışta ısı transfer bölgeleri (Collier ve Thome, 1994).

E bölgesinde kanal merkezinde buharın kümeleştiği, çevrede ise sıvının ince bir film şekline dönüştüğü halkasal akış deseni meydana gelir. Buhar merkezinde artan hızlar, sıvının damlacıklar halinde sürüklenmesine sebep olur (F bölgesi). Bu bölgede, kabarcık oluşumu tamamen durduğu için ısı transferi iki fazlı zorlanmış taşınım ve buharlaşma şeklinde olur. Sıvının, film tabakasından buharlaşma ve sürüklenme sonucu azalması filmin tamamen

kurumasına yol açar. Bu bölge, G ile gösterilmiş olup; buhar içerisinde sıvının damlacıklar halinde bulunduğu damlacıklı akışı (*drop flow*) temsil etmektedir. Buhar içerisindeki sıvı miktarı gittikçe azalmaya devam eder ve bu bölgedeki sıvı damlacıkları H bölgesinde tamamen buhar fazına dönüşür (Collier ve Thome, 1994; Tong ve Tang, 1997).

Yatay ve düşey olarak konumlandırılmış konvansiyonel kanalların akış desenleri kısmen farklıdır. Bu fark, yerçekimi kuvvetinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu kuvvet nedeniyle buhar fazı üst bölgelerde toplanarak katmanlı/tabakalı bir görüntüye sebep olur. Şekil 1.7’de yatay konumlandırılmış konvansiyonel kanaldaki klasik akış desenleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.7. Yatay bir borudaki iki faz akış desenleri (Collier ve Thome, 1994).

Akış desenleri, kanal boyutlarının değişiminden etkilenir. Boyutlar küçüldükçe; kabarcık, akış pasajının kesiti ile kıyaslanabilir büyüklüğe erişir, yüzey gerilme kuvvetinin etkisi artar ve yer çekimi kuvvetinin etkisi azalır. Bu nedenle, yatay konumlandırmada bile simetrik faz dağılımı meydana gelir (katmanlaşma ortadan kalkar). Bunlara ek olarak, yapılan çalışmalarda gözlemlenen akış deseni sırası/türleri ve akış desenlerinin adlandırılması konusunda da kesin sınırlar söz konusu değildir. Ancak, mini/mikrokanallarda görülen genel akış desenleri Harirchian ve Garimella (2009) tarafından belirtildiği şekliyle verilebilir. Harirchian ve Garimella (2009) her biri 400 μm yüksekliğe ve 100 – 5850 μm arasındaki farklı genişlik değerlerine sahip paralel kanallardan oluşan ısı alıcılarda kaynamalı akış deneyleri yapmış ve beş farklı akış deseni tanımlamıştır. Bunlar; kabarcıklı akış, uzun kabarcıklı akış, çalkantılı akış (*churn flow*) iplikçikli – halkasal akış (*wispy – annular flow*) ve halkasal akıştır (*annular flow*).

1.3. Kanal Boyutları Arasındaki Geçiş Kriterleri

Literatür incelendiğinde, akış pasajlarının kesiti ile akış fiziği arasında bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, araştırmacıları çeşitli boyut sınıflandırmaları yapmaya ve/veya boyut geçişleri ile ilgili kriterler önermeye teşvik etmiştir. Mehendale vd. (2000) ve Kandlikar (2002) gibi bazı araştırmacılar ölçekler arasındaki geçişleri hidrolik çap üzerinden sayısal değerler sunarak tanımlamışlardır. İlgili sınıflandırmalar Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Kanalların boyutsal sınıflandırılması

Mehendale vd. (2000)		Kandlikar (2002)	
Mikrokanallar	$1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 100 \mu\text{m}$	Mikrokanallar	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$
Mezokanallar	$100 \mu\text{m} < D_h \leq 1 \text{ mm}$	Minikanallar	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$
Kompakt kanallar	$1 \text{ mm} < D_h \leq 6 \text{ mm}$	Konvansiyonel kanallar	$D_h > 3 \text{ mm}$
Konvansiyonel kanallar	$D_h > 6 \text{ mm}$		

Bir grup araştırmacı ise kabarcık sınırlanması ve bunun sebep olduğu fiziksel değişiklikleri dikkate alarak ölçek sınıflandırması yapmıştır. Örneğin, Kew ve Cornwell (1997), boyutlar arasındaki geçiş kapsamında sınırlama sayısı (Co) olarak adlandırılan boyutsuz bir parametre tanımlamıştır.

$$Co = \frac{1}{D_h} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}} \quad (1.2)$$

Burada; σ yüzey gerilme kuvvetini, g yerçekimi kuvvetini ρ_L ve ρ_V sırasıyla sıvı ve buharın yoğunluğunu ifade etmektedir. $Co > 0.5$ mikro ölçeği $Co < 0.5$ ise makro ölçeği ifade etmektedir.

Jacobi ve Thome (2002), makrodan mikro ölçeğe geçişte, kabarcık ayrılma çapını bir geçiş kriteri olarak seçmiştir. Makro ölçekli bir kanalda oluşan kabarcığın kanal boyutundan daha küçük olduğunu; mikro ölçekli kanalda ise kabarcıkların kanal boyutu ile sınırlandırıldığını belirtmişlerdir.

Li ve Wang (2003), kılcallık uzunluğu (L_{cap}) olarak ifade ettikleri boyutsuz bir parametre tanımlamıştır. Boru çapının (D), eşik (D_{th}) ve kritik değerlerini (D_{crit}) kılcallık uzunluğuna (L_{cap}) bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$L_{cap} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}} \quad (1.3)$$

$$D_{th} = 1.75L_{cap} \quad (1.4)$$

$$D_{crit} = 0.224L_{cap} \quad (1.5)$$

$D < D_{crit}$ için yüzey gerilme kuvvetlerinin etkin olduğunu; $D_{crit} < D < D_{th}$ için yüzey gerilme kuvvetleri ile yer çekimi kuvvetlerinin benzer etkiye sahip olduğunu; $D_{th} < D$ için ise yer çekimi kuvvetlerinin etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Cheng ve Wu (2006), geçiş kriteri olarak Bond sayısını (Bo) kullanmıştır.

$$Bo = \frac{g(\rho_L - \rho_V)D_h^2}{\sigma} \quad (1.6)$$

Burada; $Bo < 0.05$ mikro ölçeği, $0.05 < Bo < 3$ mini ölçeği, $Bo > 3$ ise makro ölçeği ifade etmektedir.

Brauner ve Ullman (2007) ise Eötvös boyutsuz sayısını kullanarak bir geçiş kriteri tanımlamıştır.

$$Eö = \frac{g(\rho_L - \rho_V)D_h^2}{8\sigma} \quad (1.7)$$

Makrodan mikro ölçeğe geçiş için kritik Eö sayısı 0.2'dir.

1.4. Literatür Araştırması

Etkili ısı kontrol yöntemleri arasında olan minikanalarda kaynamalı akışla ilgili çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Konu kapsamında yapılan belli başlı çalışmalar kronolojik olarak aşağıda verilmiştir.

Tran vd. (1996), 2.46 mm çapındaki dairesel bir kanalda ve 2.40 mm hidrolik çapa sahip dikdörtgen kesitli bir kanalda, R12 akışkanının kaynamalı akışını deneysel olarak incelemiştir. Düşük duvar kızma farklarında ($\Delta T_{\text{sat}} < 2.75 \text{ }^\circ\text{C}$) taşınım ile kaynamanın; diğer durumlarda ise kabarcıklı kaynamanın basınç ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Aynı hidrolik çapa sahip dikdörtgen ve dairesel kesitli kanallarda ısı transfer katsayıları arasında çok az bir fark olduğunu ifade etmişlerdir.

Kew ve Cornwell (1997), 1.39, 2.87 ve 3.67 mm çaplarındaki tüplerde R141b akışkanı için deneysel olarak elde ettikleri basınç düşümü ve ısı transfer katsayısı değerlerini kullanarak kaynamada ısı transfer katsayısı için geliştirilen bağıntıları incelemiştir. Mevcut kaynamalı akışta ısı transfer bağıntılarının $Co = 0.5$ ve daha büyük sınırlanmasına sayısına sahip dar kanallara uygulandığında iyi bir performans göstermediğini belirtmişlerdir.

Lee ve Lee (2001), düşük derinlik/genişlik oranlarına ($H_{\text{ch}}/W_{\text{ch}} = 0.02, 0.05$ ve 0.1) sahip dikdörtgen kesitli kanallarda iki faz ısı transfer katsayısı için bir korelasyon önermişlerdir. Isı transfer katsayısının kütle akısı ve kuruluk derecesi ile arttığını ve ısı akısının ise ısı transferi üzerinde daha az etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Yu vd. (2002), 2.98 mm çapındaki dairesel bir kanalda, su için, kaynamalı akışta ısı transferini, iki faz basınç düşümünü ve kritik ısı akısını incelemiştir. Isı transferinin ısı akısına bağlı olup, kütle akısından bağımsız olduğu belirtmişlerdir. Kaynamalı akışta ısı transfer katsayısı ve iki faz basınç düşümü için korelasyon geliştirmişlerdir.

Huo vd. (2004), 2.01 ve 4.26 mm çaplarındaki dikey dairesel kesitli kanallarda R134a akışkanı için kaynamada ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Düşük kuruluk derecelerinde yerel ısı transfer katsayısının ısı akısı ve sistem basıncı ile arttığını ve kabarcıklı kaynamanın etkin ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışma koşulları altında çapı 2.01 mm olan kanalda daha yüksek ısı transfer katsayıları elde etmişlerdir.

Balasubramanian ve Kandlikar (2005), hidrolik çapı 333 μm olan altı paralel dikdörtgen kesitli minikanalda deiyonize suyun kaynamalı akışını çalışmıştır. Akış desenleri, basınç düşümü dalgalanmaları ve akış kararsızlıklarını incelemiştir. Yüzey

sıcaklığındaki artış ile basınç düşümünün arttığını ve yüksek yüzey sıcaklıklarında gözlemlenen uzun kabarcıklı akışın ise bazı durumlarda ters akışa neden olduğunu belirtmişlerdir.

Saitoh vd. (2005), R134a akışkanını kullanarak farklı çaplardaki dairesel kanallarda (0.51, 1.12 ve 3.1 mm) kaynamalı akışta ısı transferi üzerinde boru çapının etkisini araştırmıştır. 3.1 mm çapa sahip kanalda ısı transfer katsayısının artan kütle akışı ve ısı akışı ile arttığını ve 0.51 mm çaplı kanalda ise kütle akışından belirgin bir şekilde etkilenmediğini belirtmişlerdir. Taşınımın kaynama etkisinin azalan kanal çapı ile azaldığını ifade etmişlerdir.

Choi vd. (2007), R-22, R-134a ve CO₂ akışkanları için 1.5 ve 3 mm çaplarındaki dairesel minikanallarda çalışmıştır. Akışkan özelliklerinin ve kanal çapının ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Isı transfer katsayısının düşük kuruluk derecelerinde ısı akışına oldukça bağlı olduğunu belirtmişlerdir. 1.5 mm çapındaki kanalda kabarcıklı kaynamanın daha etkin olduğunu ve düşük yüzey gerilmesi ve viskoziteye sahip olan CO₂'nin ısı transfer katsayısının diğer akışkanlara göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Elde edilen deneysel veriler ile yeni bir ısı transfer katsayısı bağıntısı geliştirmişlerdir.

Bertsch vd. (2008), kaynamalı akışta R-134a akışkanı için hidrolik çapı 1.09 mm olan on yedi kanallı paralel dikdörtgen kesitli kanalda çalışmıştır. Düşük kuruluk derecelerinde ısı transfer katsayısında ani bir artış olduğunu ve maksimum ısı transfer katsayısının kuruluk derecesinin 0.2 değerinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Doyma basıncının ısı transfer katsayısına etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ve artan kütle akışı ve ısı akışı ile ısı transfer katsayısının arttığını ifade etmişlerdir.

Singh vd. (2008), sabit hidrolik çapta (142 µm) boyut oranının (AR = 1.23, 1.44, 1.56, 1.73, 2.56, 3.60 ve 3.75) toplam basınç düşümü üzerindeki etkisini dikdörtgen kesitli kanallarda deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Basınç düşümünün AR = 1.56 değeri için minimum değerine ulaştığını belirtmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2009), yedi farklı mikrokanallı ısı alıcıda FC-72 akışkanının kaynamalı akışını incelemiştir. Kanalların her birinin derinliği 400 µm olup, genişlikleri ise 100 µm ve 5850 µm arasında değişmektedir. Kaynamalı akış rejimlerini; kanal boyutları, kütle akışı ve ısı akışının bir fonksiyonu olarak incelemişlerdir. 400 µm ve daha geniş kanallarda kabarcıklı kaynamanın hâkim olduğunu, daha dar kanallarda ise kabarcıklaşmanın bastırıldığını belirtmişlerdir. Görsel akış modellerine dayanarak akış rejimi haritaları geliştirmişlerdir.

Hamdar vd. (2010), hidrolik çapı 1 mm olan kare kesitli bir minikanalda HFC-152a akışkanı için kaynamalı akışta ısı transferini ve basınç düşümünü incelemiştir. Kabarcıklı kaynama rejiminin hâkim olduğunu belirtmişlerdir.

Kaew-On vd. (2011), hidrolik çapı 1.1 ve 1.2 mm olan paralel dikdörtgen kesitli minikanal ısı değiştiricilerinde (14 ve 8 kanaldan oluşan) R134a için kaynamalı akış deneyleri yapmıştır. Ortalama ısı transfer katsayısının ısı akısının bir fonksiyonu olup kütle akısından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışma koşullarında, yüzey alanı büyük kanalda kabarcık sayısının artışından dolayı daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edildiği sonucuna varmışlardır. Isı transfer katsayısı için yeni bir korelasyon önermişlerdir.

Ong ve Thome (2011), kanal sınırlaması, ısı akısı, akış deseni, doyma sıcaklığı, aşırı soğutma ve iş akışkanı özelliklerinin iki faz ısı transferi ve kritik ısı akısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. R134a, R236fa ve R245fa akışkanları için 1.03, 2.20 ve 3.04 mm çaplarındaki kanallarda çalışmışlardır. Yüksek kuruluk derecelerinde, kuruluk derecesi ile monoton olarak artan ısı transfer katsayısının halkasal akış desenine karşılık geldiğini ve küçük ölçekli kanallarda taşınım ile kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Tek dairesel kanallar, dikdörtgen çoklu kanallar ve ayrıklı akışlı dikdörtgen çoklu kanallar için sınırlanma sayısını (Co) içeren yeni bir kritik ısı akısı bağıntısı önermişlerdir.

Bang vd. (2011), 1.73 mm çapında dairesel kesitli minikanalda kaynamalı akışta ısı transferi üzerinde basıncın etkisini (2-16 bar) deneysel olarak incelemiştir. Basıncın ısı transfer katsayısını önemli derecede değiştirmedeğini ve taşınım ile kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir.

Soupremanien vd. (2011), Forane 365 HX akışkanı için aynı hidrolik çapta (1.4 mm) olan dikdörtgen kesitli tek kanallarda iki farklı (H_{ch}/W_{ch}) oranının kaynamalı akış üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Isı transfer karakteristiklerinin boyut oranından önemli ölçüde etkilendiğini açıklamışlardır. Yüksek ısı akılarında $H_{ch}/W_{ch} = 0.143$ olan kanalda kurumanın erken oluşmasından dolayı ısı transfer katsayısının daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. İki fazlı akışta basınç düşümünün ise $H_{ch}/W_{ch} = 0.43$ olan kanalda daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Liu vd. (2011), mini/mikrokanallarda deiyonize suyun kaynamalı akışında ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelemiştir. Hidrolik çapları 0.293 mm ve 1.2 mm olan paralel dikdörtgen kesitli kanallarda çalışmışlardır. Mini/mikrokanaldaki ısı transfer katsayısının artan ısı akısı ile arttığını ve artan kuruluk derecesi ile azaldığını belirtmişlerdir. Aynı ısı

akısı ve kütle akısında mikro kanaldaki ısı transfer katsayısının minikanala göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Wang vd. (2012), yüksek AR değerlerine sahip (20, 20 ve 10) dikdörtgen kesitli tek kanallarda, FC-72 ve etanol akışkanlarının kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Her iki akışkan için gözlemlenen akış rejimlerinin kabarcık sınırlanması, uzun kabarcıklı akış ve halkasal akış olduğunu belirtmişlerdir. Kritik ısı akısının (CHF) artan kütle akısı ile arttığını; etanolün CHF değerinin FC-72' ye göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Isı transfer katsayısını; ısı akısı, kütle akısı ve kuruluk derecesinin yanı sıra akışkan özellikleri ve kanal geometrisinin de etkilediğini belirtmişlerdir.

Wang ve Sefiane (2012), AR değerleri 20, 20 ve 10 olan üç farklı tek kanal için ısı akısı, kuruluk derecesi ve hidrolik çapın (517, 762 ve 1454 μm) kaynamalı akışta ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Taşınımın kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ve hidrolik çap azaldıkça yerel ısı transfer katsayısının arttığını belirtmişlerdir.

Wang vd. (2013) kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini ve kritik ısı akısının oluşumunu üç farklı minikanalda (U-şeklinde genişleyen, paralel ve genişleyen dikdörtgen kesitli) deneysel olarak incelemiştir. Keskin köşe etkisi ve genişleyen kanal sayesinde kanalda kabarcık oluşumunun daha aktif olduğunu ve kritik ısı akısının yüksek güç değerlerinde ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Genişleyen kanallarda düz kanala göre daha düşük basınç düşümleri elde etmişlerdir.

Fu vd. (2013), aynı hidrolik çaptaki (yaklaşık 1.12 mm) kanallarda H_{ch}/W_{ch} oranının (0.83, 0.99, 1.65, 2.47, 4.23 ve 6.06) kaynamalı akışta ısı transferi ve kritik ısı akısı üzerindeki etkisini incelemiştir. HFE-7100 dielektrik akışkanını kullanmışlar ve bakır tabanlı genişleyen mikro kanallarda çalışmışlardır. İki faz akış bölgesinde sabit kesitli kanallara göre genişleyen kanallarda ısı transfer katsayısı ve kritik ısı akısı değerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. $H_{ch}/W_{ch} = 0.99$ olan kanalda kritik ısı akısının maksimum değere ulaştığını açıklamışlardır. Literatürdeki korelasyonları modifiye edip H_{ch}/W_{ch} oranını dahil edilerek yeni bir ampirik korelasyon geliştirmişlerdir.

Charnay vd. (2014), dairesel bir minikanalda R245fa iş akışkanının kaynamalı akışında, kütle akısı, ısı akısı ve doyma sıcaklığının yerel ısı transfer katsayısına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Akış desenlerinin ısı transfer mekanizması üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmiş ve dört farklı akış deseni gözlemlemişlerdir: Aralıklı akış (*intermittent flow*), halkasal akış, kurumanın başladığı halkasal akış (*dry-out flow*) ve sisli

akış (*mist flow*). 60 °C ve 80 °C' deki doyma sıcaklıklarında hem kabarcıklı hem de taşınımla kaynamanın etkin olduğunu göstermişlerdir.

Lim vd. (2015), hidrolik çapı 500 µm olan dikdörtgen kesitli bir ısı alıcıda, deiyonize su için, ısı transfer katsayısını deneysel olarak belirlemiştir. Isı akısının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisinin, artan kütle akısı ile arttığını; bu sonuca dayalı olarak da kabarcıklı kaynamanın etkin ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Modifiye edilen Froude sayısını dikkate alarak, yeni bir korelasyon oluşturmuşlardır.

Keepaiboon ve Wongwises (2015), R-134a akışkanı için hidrolik çapı 0.68 mm olan dikdörtgen kesitli kanalda kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini ve akış desenlerini incelemiştir. Isı akısı, kütle akısı, doyma sıcaklığı ve akış desenlerinin ısı transfer katsayısını belirgin bir şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, altı farklı akış deseni elde etmişlerdir: kabarcıklı akış, kabarcıklı-uzun kabarcıklı akış, uzun kabarcıklı akış, boğumlu-halkasal akış (*throat-annular flow*), çalkantılı akış ve halkasal akış. Düşük ısı akılarında kabarcıklı kaynamanın; yüksek ısı akısı değerlerinde ise taşınımla kaynamanın etkin ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir.

Tablo 1.3. Minikanalarda kaynamalı akışta ısı transferi için yapılan deneysel çalışmaların özeti

Isı Transfer Mekanizması	Yazar	Akışkan	Geometri	D_h [mm]	Kanal Sayısı	q [kW/m ²]	G [kg/m ² s]	x [-]
Kabarcıklı kaynama	Tran vd. (1996)	R-12	Dairesel/ Dikdörtgen	2.46 ve 2.40	1	3.6-129	44-832	0-0.95
	Yu vd. (2002)	Deiyonize su	Dairesel	2.98	1	/	50-200	0.15-1.0
	Huo vd. (2004)	R-134a	Dairesel	2.01 ve 4.26	1	13-150	100-500	0-0.9
	Balasubramanian ve Kandlikar (2005)	Deiyonize su	Dikdörtgen	0.333	6	208-316	120	/
	Choi vd. (2007)	(a)	Dairesel	1.5 ve 3.0	1	10-40	200-600	0-1.0
	Kaew-On vd. (2010)	R-134a	Dikdörtgen	1.1 ve 1.2	14 ve 8	15-65	300-800	/
	Hamdar vd. (2010)	HFC-152a	Kare	1.0	1	10-60	200-1000	0-1.0
	Lim vd. (2015)	Deiyonize su	Dikdörtgen	0.5	1	160-400	200-600	0.02-0.18
	Keepaiboon ve Wongwises (2015)	R-134a	Dikdörtgen	0.68	1	7.63-49.46	600-1400	0.1
Taşınımla kaynama	Lee ve Lee (2001)	R-113	Dikdörtgen	0.784, 1.9 ve 3.63	1	3-15	50-200	0.15-0.75
	Ong ve Thome (2011)	(b)	Dairesel	1.03, 2.20 ve 3.04	1	4.8-221.5	200-1290	0-1.0
	Bang vd. (2011)	Deiyonize su	Dairesel	1.73	1	50-160	100	0-0.6

Tablo 1.3'ün devamı

Isı Transfer Mekanizması	Yazar	Akışkan	Geometri	D_h [mm]	Kanal Sayısı	q [kW/m²]	G [kg/m²s]	x [-]
Taşınım ve kaynama	Wang ve Sefiane (2012)	FC-72	Dikdörtgen	0.571, 0.762 ve 1.454	1	0-18.6	11.2-44.8	0-1.0
	Wang vd. (2012)	FC-72 ve etanol	Dikdörtgen	0.571, 0.762 ve 1.454	1	1.89-18.66	11.2-44.8	0-1.0
	Fu vd. (2013)	HFE-7100	Dikdörtgen	1.12	6	180-1140	39-180	0-1.0
Kabarcıklı ve taşınım ve kaynama	Cornwell ve Kew (1997)	R-141b	Dairesel	1.39, 2.87 ve 3.69	1	9.7-90	188-1480	0-0.95
	Saitoh vd. (2005)	R-134a	Dairesel	0.51, 1.12 ve 3.1	1	5-39	150-450	0.1-1.0
	Bertsch vd. (2008)	R-134a	Dikdörtgen	1.09	17	0-200	20-81	0-0.8
	Soupremanien vd. (2011)	Forane 365 HX	Dikdörtgen	1.4	1	25-62	200-400	0-0.6
	Liu vd. (2011)	Deiyonize su	Dikdörtgen	0.293 ve 1.2	61 ve 20	50-500	11.09-198.37	0-0.8
Charnay vd. (2015)	R-245fa	Dairesel	3.0	1	10-90	100-1500	0-1.0	

(a) R-22, R-134a ve CO₂

(b) R-134a, R-236fa ve R-245fa

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Mini/mikro boyutlu kanallardaki kaynamalı akışlarda kanallar içerisinde oluşan kabarcıklar, kanal kesitleri ile kıyaslanabilir boyutlara erişebilir. Kabarcık buyumesinin, oluşumunun ve/veya hareketinin kanal geometrisine bağlı olarak değişiminin ısı transferini ve akışı etkilemesi muhtemeldir. Bu sebeple, incelenmesi gerekli parametrelerden biri boyut oranı (AR) etkisidir. Literatür incelendiğinde, mikro kanallar için bu tür çalışmaların yapıldığı (Singh vd., 2008; Harirchian ve Garimella, 2009; Markal vd., 2016), ancak mini boyutlu kanallar ($D_h = 200 - 3000 \mu m$) için kapsamlı bir optimizasyon çalışmasının yapılmadığı görülmüştür. Bu tezin amacı, geniş çalışma koşulları altında, akış görüntüleri de yardımıyla, farklı boyut oranlarına sahip minikanallarda kaynamalı akışı incelemek ve boyut oranı (AR) etkisini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, aynı hidrolik çapa, fakat farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahip beş adet dikdörtgensel kesitli tek kanallı bakır ısı alıcı tasarlanmıştır. Isı alıcı boyunca beş farklı noktadan sıcaklık ölçümü alınmış ve diferansiyel basınç sensörü aracılığıyla da test bölgesi giriş ve çıkışı arasındaki toplam basınç düşümü belirlenmiştir. Sıcaklık ve basınç ölçümleriyle eş zamanlı olarak yapılan akış görüntüleme sayesinde akışın fiziksel mekanizması incelenmiştir. Farklı kütle akısı ve ısılı güç değerleri altında çalışılmış ve her bir koşul için yerel iki faz ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümü hesaplanmıştır. Geniş alışma koşulları altında optimum AR değeri belirlenmiş ve etkin ısı transfer mekanizması tanımlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, minikanalarda doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Her biri aynı hidrolik çapa, fakat farklı genişlik ve derinlik değerine sahip tek kanallı beş farklı mini ısı alıcı kullanılmıştır. İş akışkanı deiyonize sudur. Çalışılan kütle ve ısı akısı değerleri, sırasıyla, 70, 150, 230, 310 kg/m²s ve 85.1, 110.1, 135, 160.1, 185.1, 210 W'tır. Test bölgesi girişinde akışkan sıcaklığı 86 ± 2 °C'de ve deneyler süresince ortam sıcaklığı 23.5 ± 2 °C'de sabit tutulmuştur. Test bölgesinde, basınç düşümü ve sıcaklık ölçümleri ile eş zamanlı olarak yüksek hızlı kamera aracılığıyla akış görüntüleme çalışması yapılmıştır.

Bu bölümde, deney düzeneği ve test bölgesi ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları hakkında bilgi verilmiş, ısı kaybı kalibrasyonu ve deney düzeneğinin doğrulanması yapılmıştır. Son olarak, deneysel hesaplama prosedürü ve belirsizlik analizi verilmiştir.

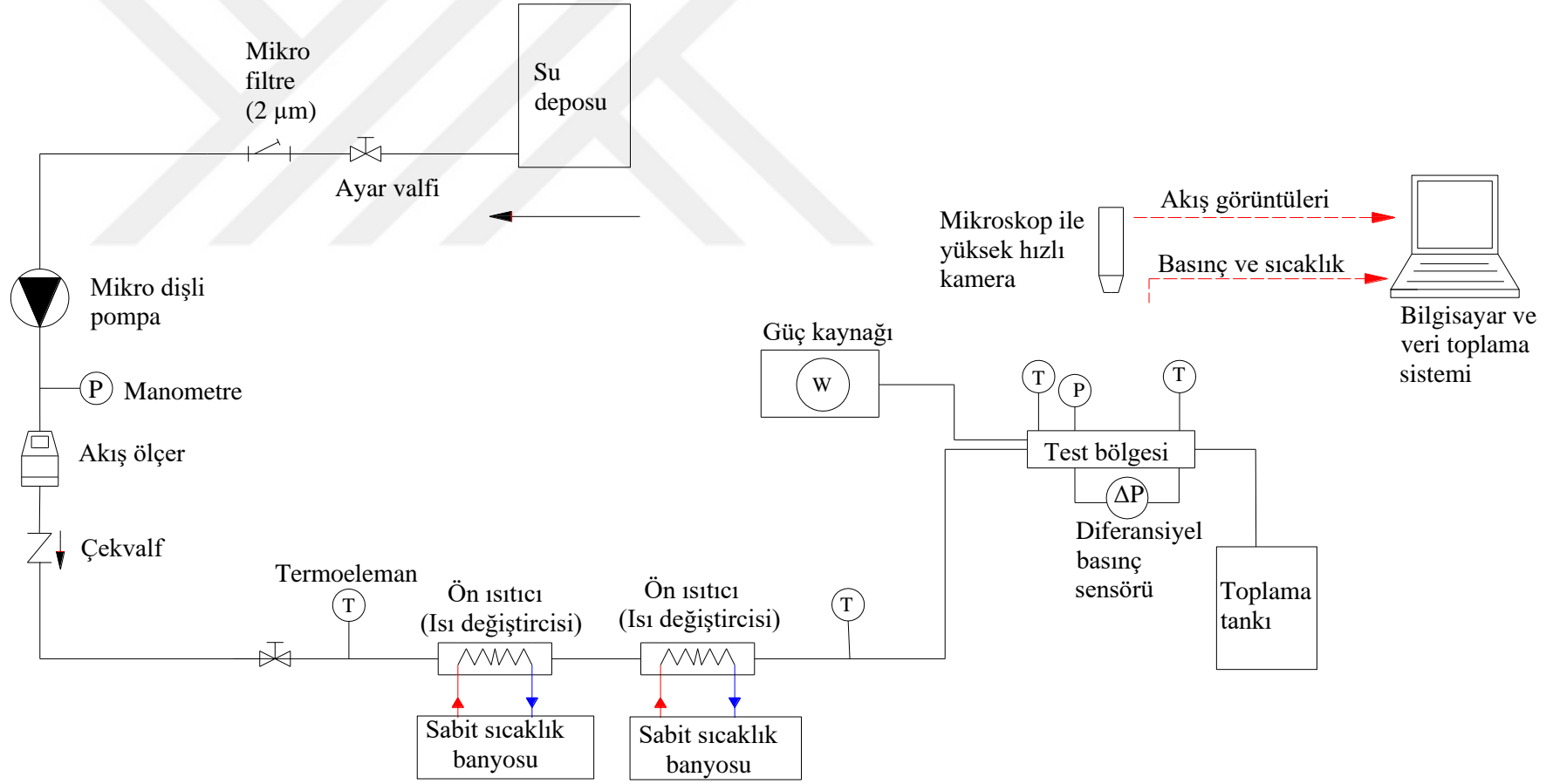
2.1. Deney Düzeneği

Deney düzeneğinin şematik resmi ve fotoğrafı, sırasıyla, Şekil 2.1 ve 2.2'de verilmiştir. Deney düzeneği dört bölümden oluşmaktadır: (1) Akış hattı, (2) test bölgesi, (3) görüntüleme sistemi ve (4) veri toplama sistemi. İş akışkanı (deiyonize su), 2.25 litre hacme sahip paslanmaz çelik silindirik depodan akış hattına bir mikro dişli pompa ile aktarılmaktadır. Akış hattı, bağlantı elemanları ve yüksek sıcaklığa dayanıklı teflon (Politetrafloroetilen, PTFE) borular kullanılarak oluşturulmuştur. Akışkan debisi iki farklı yöntemle kontrol edilmektedir: (1) Mikro dişli pompa ile bütünleşik çalışan pompa sürücüsünden ve (2) akış ölçer cihazından. Sistemde, aynı zamanda, mikro pompa ve akış ölçer cihazlarını korumak amacıyla su deposunun çıkışına bir mikro filtre (gözenek çapı 2 µm) yerleştirilmiştir. Mikro pompanın çıkışında ise sistem basıncını ölçmek için bir manometre bulunmaktadır. Sistemde bulunan iki adet mini paslanmaz çelik sıvı – sıvı ısı değiştiricisi (Exergy, Shell and Tube, 00268-02), test bölgesi girişindeki akışkan sıcaklığını istenilen değere ayarlamak ve deneyler süresince giriş sıcaklığını sabit tutmak amacıyla kullanılmıştır. Isı değiştiricilerin öncesindeki ve sonrasındaki akışkan sıcaklıkları K-tipi

termoelemanlar ile ölçülmüştür. Isı değiştiricilerinden test bölgesine kadar olan boru hattı boyunca ısı kaybını azaltmak ve böylece test bölgesi giriş sıcaklığını daha kolay sabitlemek amacıyla yalıtım uygulanmıştır. Test bölgesi AC güç kaynağından beslenen kartuş ısıtıcılar tarafından ısıtılmaktadır. Test bölgesindeki toplam basınç düşümü ve giriş basıncı, sırasıyla, diferansiyel basınç sensörü ve mutlak basınç sensörü ile ölçülmüştür. Herhangi bir deney esnasında, test bölgesindeki sıcaklık ve basınç değerleri kararlı hale geldikten sonra bir veri toplama sistemi ile kaydedilmektedir. Akış görüntüleme, mikroskop ve üzerine yerleştirilen yüksek hızlı kamera aracılığıyla yapılmaktadır. İş akışkanının 1 atm basınçtaki termofiziksel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Suyun termofiziksel özellikleri (Bergman vd., 2015).

Kaynama noktası	°C	100
Buharlaşma entalpisi	kJ kg ⁻¹	2442.4
Isı iletim katsayısı	W m ⁻¹ K ⁻¹	0.610
Özgül ısı	J kg ⁻¹ K ⁻¹	4180
Yoğunluk	kg m ⁻³	997
Yüzey gerilmesi	N m ⁻¹	0.0721



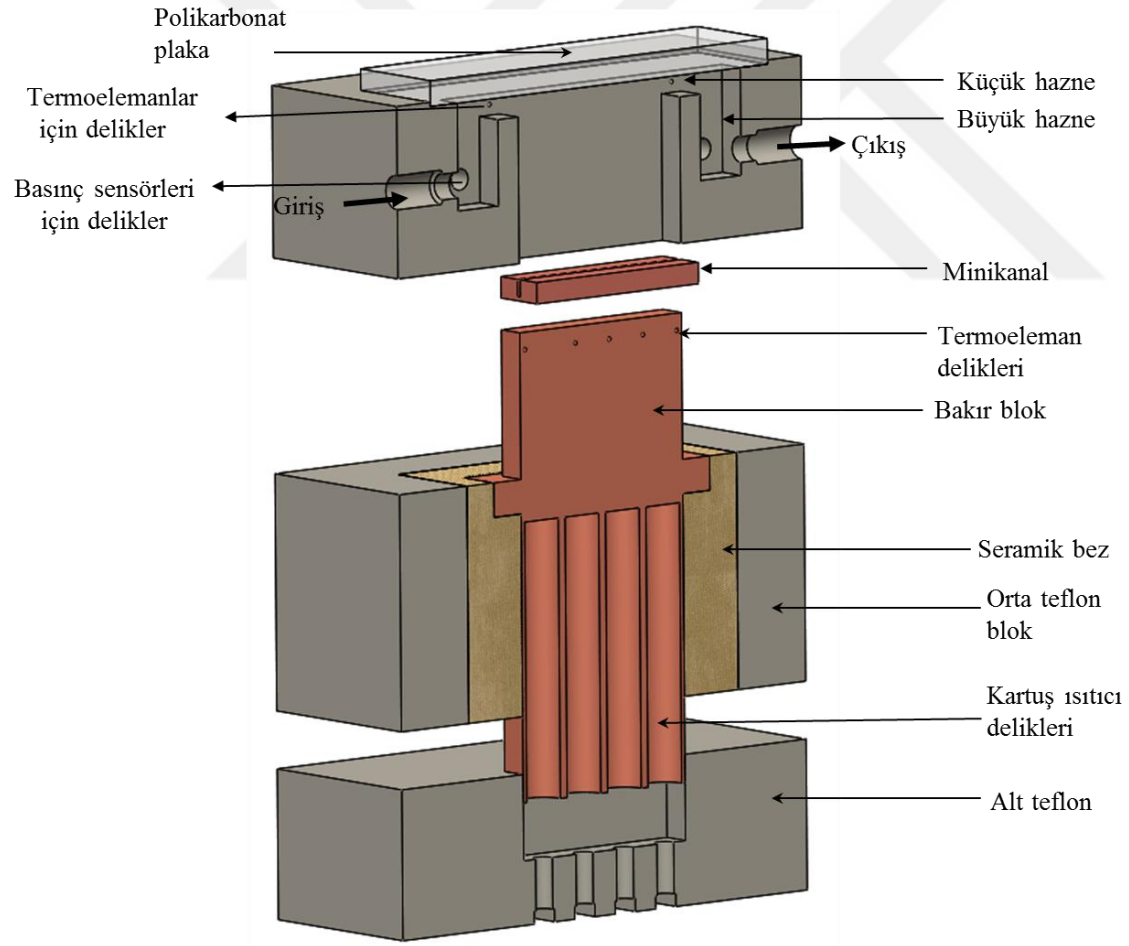
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik resmi



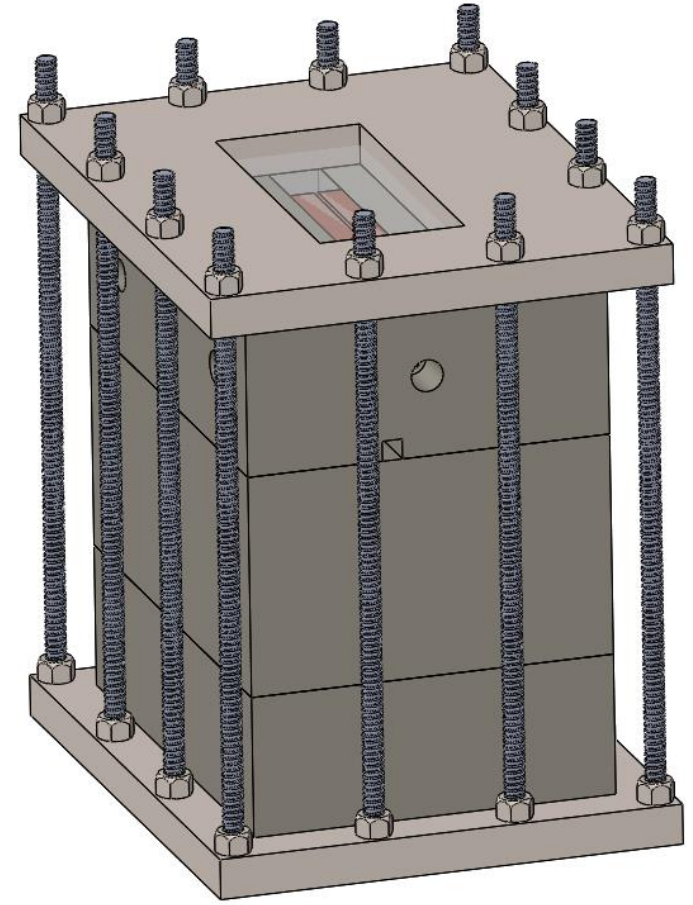
Şekil 2.2. Deney düzeneğinin fotoğrafı

2.2. Test Bölgesi

Test bölgesinin kesit ve montajlı görünüşleri, sırasıyla, Şekil 2.3 a ve b’de verilmiştir. Test bölgesinin dış gövdesi, ısı kaybını azaltmak amacıyla ısıl iletkenliği düşük (0.209-0.251 W/mK) olan teflon bloklardan oluşturulmuştur. İç bölgedeki ana parça bakır blok olup, içerisine kartuş ısıtıcılar ve termoelemanlar için kanallar açılmıştır. Bakır bloğun çevresi ısı kaybını azaltmak amacıyla seramik bezle sarılmıştır. Test parçaları olan minikanallar ise bakır bloğun üzerine yerleştirilmektedir. Her bir kanal 13.5 x 5 x 48 mm (genişlik x yükseklik x uzunluk) boyutlarındaki bakır test parçaları üzerine açılmıştır. Kanallar yüksek devirli (17.500 devir) CNC freze tezgâhında işlenmiştir. Açılan kanalların üzeri akış görüntüleme yapabilmek için şeffaf polikarbonat plaka (10 mm kalınlığında) ile kapatılmıştır. Isıtıcı yüzeyi (bakır bloğun üst yüzeyi) ile kanal yüzeyinin iki farklı parçadan oluşması nedeniyle meydana gelecek ısıl temas direncini azaltmak amacıyla yüzeyler arasında termal macun sürülmüştür. Bu kapsamda, ayrıca, test bölgesi iki metal levha arasında sıkıştırılmıştır. Minikanallara ait geometrik parametreler Tablo 2.2’de verilirken; termoeleman deliklerinin konumları ve minikanalın şematik gösterimi Şekil 2.4’te verilmiştir.



(a)

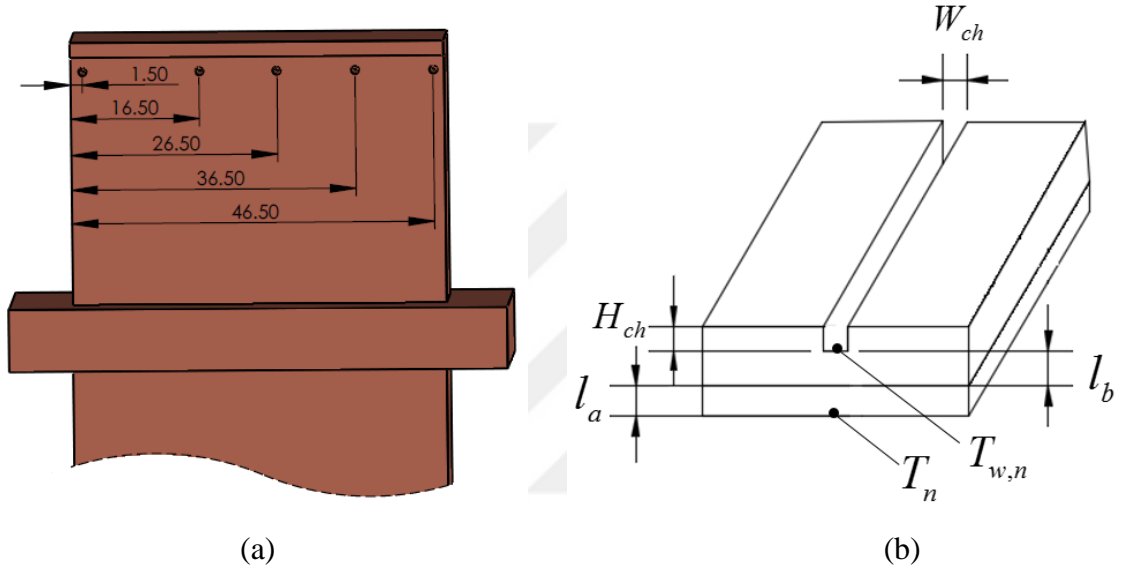


(b)

Şekil 2.3. Test bölgesinin kesit (a) ve montajlı (b) görünüşleri

Tablo 2.2. Minikanallara ait geometrik parametreler

No	Kanal genişliği (mm)	Kanal derinliği (mm)	Kanal kesit alanı (mm ²)	Kanal genişlik/derinlik oranı	Hidrolik çap (mm)
1	0.75	3.00	2.25	0.25	1.20
2	0.90	1.80	1.62	0.50	1.20
3	1.20	1.20	1.44	1.00	1.20
4	1.80	0.90	1.62	2.00	1.20
5	3.00	0.75	2.25	4.00	1.20



Şekil 2.4. Termoeleman deliklerinin konumları (a), minikanalın şematik gösterimi (b)

2.3. Ölçüm Cihazları

Deneylerde basınç ve sıcaklık değerleri ölçülmüş, akış görüntüleme yapılmıştır. Bu bölüm başlığı altında deneylerde kullanılan cihazlar tanıtılmıştır.

2.3.1. Debi Ölçümü

Sistem boyunca düşük debilerde akışkanın sürekliliğini sağlamak amacıyla deney düzeneğinde mikro dişli pompa kullanılmıştır. Manyetik tahrikli hassas dişli pompa dijital bir pompa sürücüsü (Cole Parmer TW-78008-10) ile çalışmaktadır. Ayrıca akışkan debisinin kontrolünü sağlamak için deney düzeneğinde bir akış ölçer de bulunmaktadır. Mikro pompanın ve akış ölçerin özellikleri, Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Pompa ve akış ölçerin özellikleri

Cihaz adı/modeli	Ölçüm aralığı	Çalışma sıcaklığı	Hassasiyeti
Mikro dişli pompa Cole Parmer SN-73003-14	4.6 – 460 ml/dk	0 – 121 °C	±2 %
Akış ölçer Cole Parmer TW-32709-52	20 – 200 ml/dk	0 – 55 °C	±1 %

2.3.2. Basınç Ölçümü

Deneyleerde kanal boyunca oluşan toplam basınç düşümü diferansiyel (fark) basınç sensörü ile ölçülmüştür. Kanal girişindeki mutlak basınç değerinin belirlenmesi için mutlak basınç sensörü kullanılmıştır. Pompa çıkışındaki sistem basıncı ise bir manometre ile ölçülmüştür. Tablo 2.4’te ilgili cihazların özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.4. Basınç ölçüm cihazlarının özellikleri

Cihaz adı/modeli	Ölçüm aralığı	Çıkış gerilimi	Hassasiyeti
Fark basınç sensörü Valcom 27D	0 – 100 mbar	0 – 5 VDC	±0.25%
Mutlak basınç sensörü Omega-PX209	0 – 2.1 bar	0 – 5 VDC	±0.25%
Manometre Omega DPG5600B-300G	0 – 20.7 bar	0 – 5 VDC	±0.25%

2.3.3. Güç Kaynakları

Deney düzeneğinde AC ve DC olmak üzere iki farklı güç kaynağı bulunmaktadır. Test bölgesinin ısıtılmasında kullanılan kartuş ısıtıcıların beslemesi AC güç kaynağından (Agilent 6812B) sağlanırken; test bölgesinde bulunan fark basınç sensörü ve mutlak basınç sensörünün çalışması ise DC güç kaynağı (GW-Instek GPD-4303S) ile sağlanmıştır.

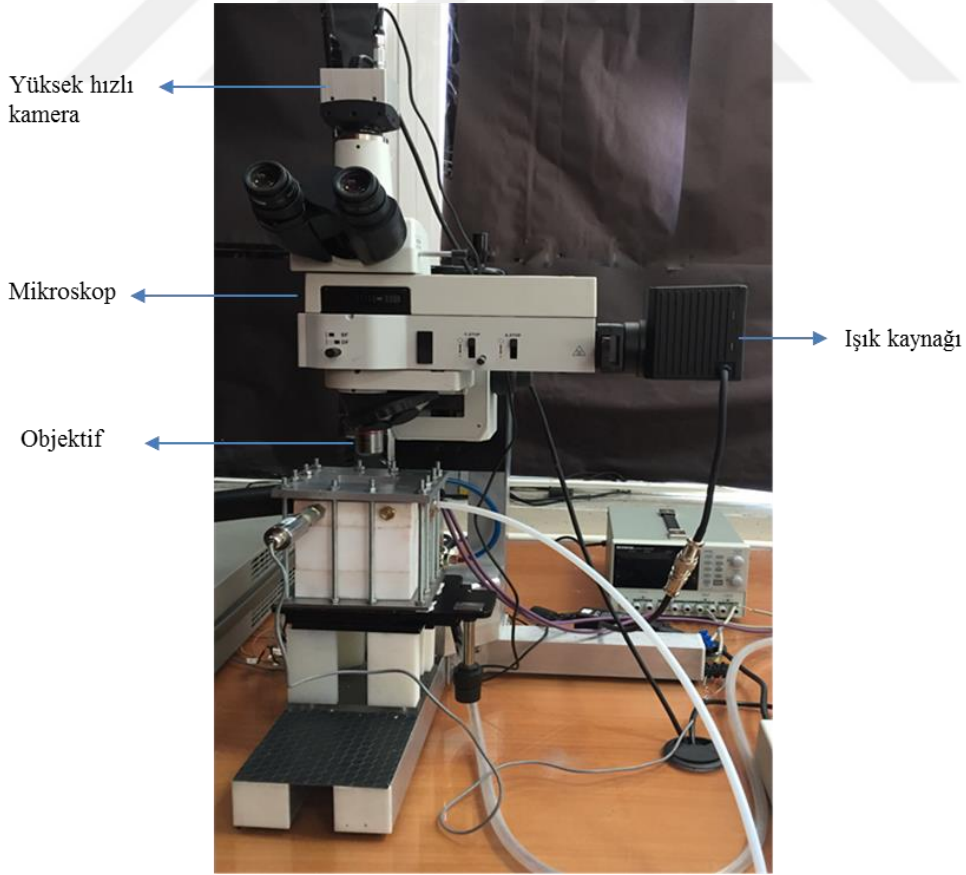
2.3.4. Veri Toplama Sistemi

Test bölgesindeki sıcaklık ve basınç ölçümleri için Keithley 2701 veri toplama cihazı ve Keithley 7700 model 20 kanallı bir veri kartı kullanılmıştır. Veri toplama işlemi,

EXCELINX ara yüz programı aracılığıyla bilgisayar üzerinden kontrol edilmiştir. Sistem kararlı hale geldiğinde veri kartında aktif olan kanallardan çıkışlar belirli bir aralık süresince okunmuştur. Sistem, genel olarak 20-30 dakikada sürekli rejime ulaşmıştır. Kanallar arası geçiş süresi 0.1 s olarak ayarlanmış ve her bir deneyde 60 veri alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri için ± 0.1 °C hassasiyetindeki K-tipi termoelemanlar kullanılmıştır.

2.3.5. Akış Görüntüleme Sistemi

Yapılan çalışmada, minikanallarda iki fazlı akış desenleri ve kabarcık oluşumu maksimum 298.851 görüntü/saniye hızına sahip yüksek hızlı bir kamerayla (Fastec Hi-Spec 4) görüntülenmiş ve alınan görüntüler kamera yazılımı aracılığıyla dijital ortama aktarılmıştır. Yüksek hızlı kamera, üzerinde 5X objektif (Nikon CFI TU Plan Fluor Epi 5X) bulunan bir mikroskoba (Nikon LV-IM) monte edilmiştir. Şekil 2.5'te akış görüntüleme sisteminin fotoğrafı verilmiştir.

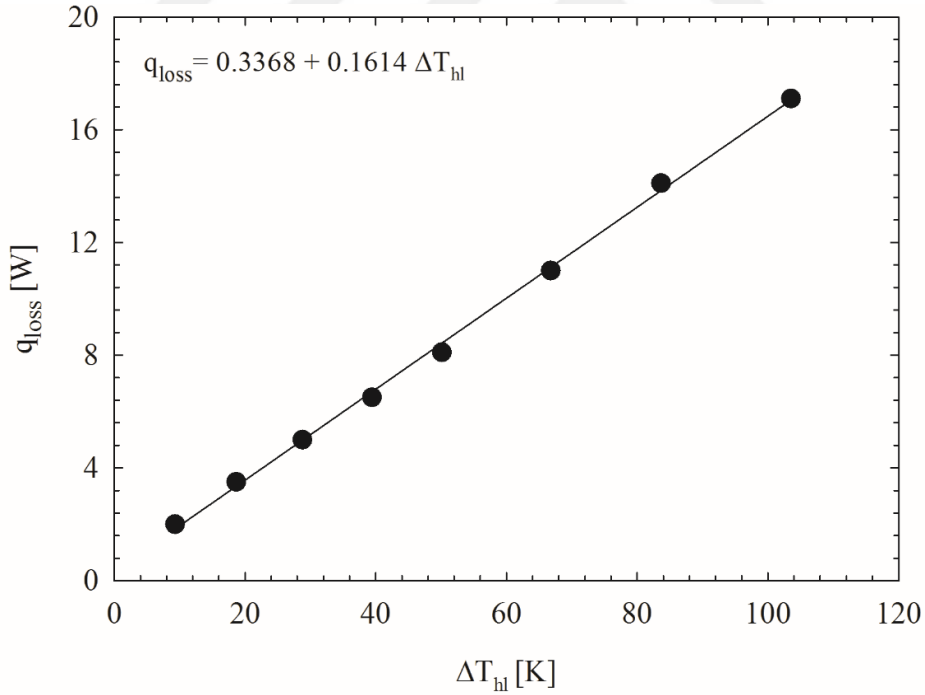


Şekil 2.5. Akış görüntüleme sistemi

2.4. Deneysel Hesaplama Yöntemi

2.4.1. Isı Kaybı Kalibrasyonu

Uygulanan net ısı gücü belirlemek için test bölgesinden çevreye olan ısı kayıplarının belirlenmesi gerekmektedir. Isı kaybını belirlemek için uygulanan yöntem şu şekildedir: Test bölgesine akışkan gönderilmeden önce ısıtıcılara sabit bir ısı gücü uygulanır. Sıcaklıklar kararlı duruma geldiğinde sıcaklıklarının aritmetik ortalaması ile ortam sıcaklığı arasındaki fark, ilgili ısı gücü değerine karşı kaydedilir. Bu işlem, ısı gücün artırılmasıyla tekrar edilir. Sıcaklık farkı ile ısı gücü arasında $q_{loss} = a\Delta T + b$ şeklinde lineer bir eğri uyumlanmıştır. Buradaki ısı gücü değeri, kayıp ısıyı ifade etmektedir. Isı kaybı deneyi, genişlik ve derinlik değerleri, sırasıyla, 0.75 ve 3.00 mm olan minikanalda yapılmıştır. Şekil 2.6'da ısı kaybı kalibrasyon eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.6. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi

Burada; ΔT_{hl} , bakır bloktaki termoelemanlardan okunan sıcaklıkların aritmetik ortalaması ile ortam sıcaklığı arasındaki farkı ifade etmektedir.

2.4.2. Tek Fazlı Akış ile Çalışmanın Doğruluğunun Kontrolü

Kaynamalı akış deneylerine başlamadan önce, deneysel kurulum ve prosedürü doğrulamak amacıyla tek fazlı akış deneyleri yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen Nusselt sayısı ve Fanning sürtünme faktörü (f_{sp}) değerleri literatürdeki ilgili korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Tek fazlı akış deneyleri, sabit ısı gücü (29.5 W) ve sabit giriş sıcaklığında (28 ± 1 °C) ve altı farklı kütle akısında (465.4, 517.1, 568.8, 620.5, 672.3 ve 724 kg/m²s) yapılmıştır. Sistem sürekli rejime ulaştığında termoelemanlardan neredeyse aynı sıcaklık değerleri (± 0.5 °C) ölçülmüştür. Ayrıca, hidrodinamik giriş uzunluğu kanalın uzunluğundan daha büyük olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, sabit yüzey sıcaklığı sınır koşulu ve laminer akışta ısı olarak gelişmekte olan bölge ile ilgili bağıntılar dikkate alınmıştır. Tablo 2.5'te Nusselt sayısı ve Tablo 2.6'da Fanning sürtünme faktörü için literatürdeki ilgili bağıntılarla yapılan karşılaştırma verilmiştir. Nu ve f_{sp} değeri aşağıdaki hesaplama yöntemi ile belirlenmiştir. Tek fazlı akış deneylerinde takip edilen hesaplama prosedürü aşağıda verilmiştir:

Kütle akısı (G),

$$G = \frac{\dot{V} \rho_L}{A_{ch}} \quad (2.1)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, \dot{V} , akışkanın hacimsel debisi; ρ_L , sıvı yoğunluğu ve A_{ch} , kanalın kesit alanıdır.

Efektif ısı akısı (q''_{eff}) ve ısı alıcının taban alanı (A_p) sırasıyla, aşağıda verilmiştir;

$$q''_{eff} = \frac{q - q_{loss}}{A_p} \quad (2.2)$$

$$A_p = L \times W_T \quad (2.3)$$

Burada, q , ısıtıcılar tarafından uygulanan ısı gücü; q_{loss} , kayıp ısıyı; L , kanal uzunluğunu ve W_T , ısı alıcının genişliğini ifade etmektedir.

Minikanalın taban yüzey sıcaklığı doğrudan ölçülemediğinden, bir boyutlu ısı iletimi kabulü yapılarak taban yüzeyinin ortalama sıcaklığı,

$$T_{w,m} = T_m - q''_{eff} \left(\frac{l_a}{k_c} + \frac{l_b}{k_c} + R''_{t,c} \right) \quad (2.4)$$

şeklinde hesaplanır. Burada; k_c , bakırın ısı iletim katsayısı; $R''_{t,c}$, bakır – bakır ara yüzeyindeki ısıl temas direnci; l_a , termoeleman ile bakır bloğun üst yüzeyi arasındaki uzaklık; l_b , ısı alıcı tabanı ile kanal taban yüzeyi arasındaki uzaklık ve T_m ise termoelemanlardan okunan sıcaklıkların ortalama değeridir. Isıtıcı yüzey ile kanalın taban yüzeyi arasındaki ısıl temas direncinin belirlenmesi için Çengel (2012) referansından yararlanılmıştır.

Duvar ısı akısı (q''_w),

$$q''_w = \frac{q - q_{loss}}{A_t} \quad (2.5)$$

eşitliği ile belirlenir. A_t , kanalın toplam ısıtma alanıdır.

$$A_t = L(W_{ch} + 2H_{ch}) \quad (2.6)$$

W_{ch} ve H_{ch} sırasıyla, kanalın genişliği ve yüksekliğidir.

Tek fazlı akışta ortalama ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı aşağıdaki gibi belirlenir:

$$h_{sp} = \frac{q''_w}{\Delta T_{lm}} \quad (2.7)$$

$$Nu = \frac{h_{sp} D_h}{k_f} \quad (2.8)$$

Burada, k_f , akışkanın ısı iletim katsayısıdır. ΔT_{lm} ise logaritmik ortalama sıcaklık farkı olup, açık formu aşağıda verilmiştir:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\ln(\Delta T_i / \Delta T_o)} \quad (2.9)$$

$$\Delta T_i = T_{w,m} - T_i \quad (2.10)$$

$$\Delta T_o = T_{w,m} - T_o \quad (2.11)$$

Burada, T_i ve T_o kanalın giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır.

Kanal boyunca oluşan basınç düşümü değeri (P_{ch}), büyük ve küçük haznelerdeki kesit değişimi sebebiyle meydana gelen basınç kayıpları ve kazanımları çıkartılarak aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\Delta P_{ch} = \Delta P_{tot} - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{e1}) \quad (2.12)$$

$$\Delta P_{c1} = \frac{v_{L,i}}{2} (G_{P2,i}^2 - G_{P1,i}^2) + \frac{K_{c1} v_{L,i}}{2} G_{P2,i}^2 \quad (2.13)$$

$$\Delta P_{c2} = \frac{v_{L,i}}{2} (G^2 - G_{P2,i}^2) + \frac{K_{c2} v_{L,i}}{2} G^2 \quad (2.14)$$

Burada, P_{tot} , büyük haznelerden ölçülen toplam basınç düşümünü; ΔP_{c1} ve ΔP_{c2} sırasıyla büyük haznedeki küçük hazneye ve küçük haznedeki minikanala girişte kesit daralması nedeniyle oluşan basınç kayıplarını ifade etmektedir. K_{c1} ve K_{c2} kesit daralması kayıp katsayıları olup aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$K_{c1} = 0.6740 + 1.2501\beta_{P2} + 0.3417\beta_{P2}^2 - 0.8358\beta_{P2}^3 \quad (2.15)$$

$$K_{c2} = 0.6740 + 1.2501\beta + 0.3417\beta^2 - 0.8358\beta^3 \quad (2.16)$$

$$\beta_{P2} = \frac{H_{P2}}{W_{P2}} \quad (2.17)$$

$$\beta = \frac{W_{ch}}{H_{ch}} \quad \text{veya} \quad \frac{H_{ch}}{W_{ch}} \quad 0 < \beta < 1 \quad (2.18)$$

Burada, W_{P2} ve H_{P2} , sırasıyla küçük haznenin genişliği ve yüksekliğini; W_{ch} ve H_{ch} minikanalın genişliği ve derinliğini ifade etmektedir. Minikanal çıkışındaki kesit genişlemesi nedeniyle meydana gelen basınç kazanımları ise aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\Delta P_{e2} = \frac{v_{L,o}}{2} (G_{P2,o}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} v_{L,o}}{2} G^2 \quad (2.19)$$

$$\Delta P_{e1} = \frac{v_{L,o}}{2} (G_{P1,o}^2 - G_{P2,o}^2) + \frac{K_{e1} v_{L,o}}{2} G_{P2,o}^2 \quad (2.20)$$

$$K_{e2} = \left(1 - \frac{A_{ch}}{A_{P2}}\right)^2 \quad (2.21)$$

$$K_{e1} = \left(1 - \frac{A_{P2}}{A_{P1}}\right)^2 \quad (2.22)$$

Burada, ΔP_{e2} ve ΔP_{e1} sırasıyla, minikanaldan küçük hazneye ve küçük haznedeki büyük hazneye kesit genişlemesinden dolayı oluşan basınç kazanımlarını, K_{e2} ve K_{e1} ise kesit genişlemesi kazanım katsayılarını ifade etmektedir.

Deneysel Fanning sürtünme faktörü ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$f_{sp} = \frac{\Delta P_{ch} D_h}{2G^2 L v_L} \quad (2.23)$$

Burada, v_L akışkanın özgül hacmidir. İlgili denklemlerde yer alan akışkan özellikleri kanal giriş ve çıkışındaki akışkan sıcaklıklarının aritmetik ortalaması dikkate alınarak hesaplanmıştır.

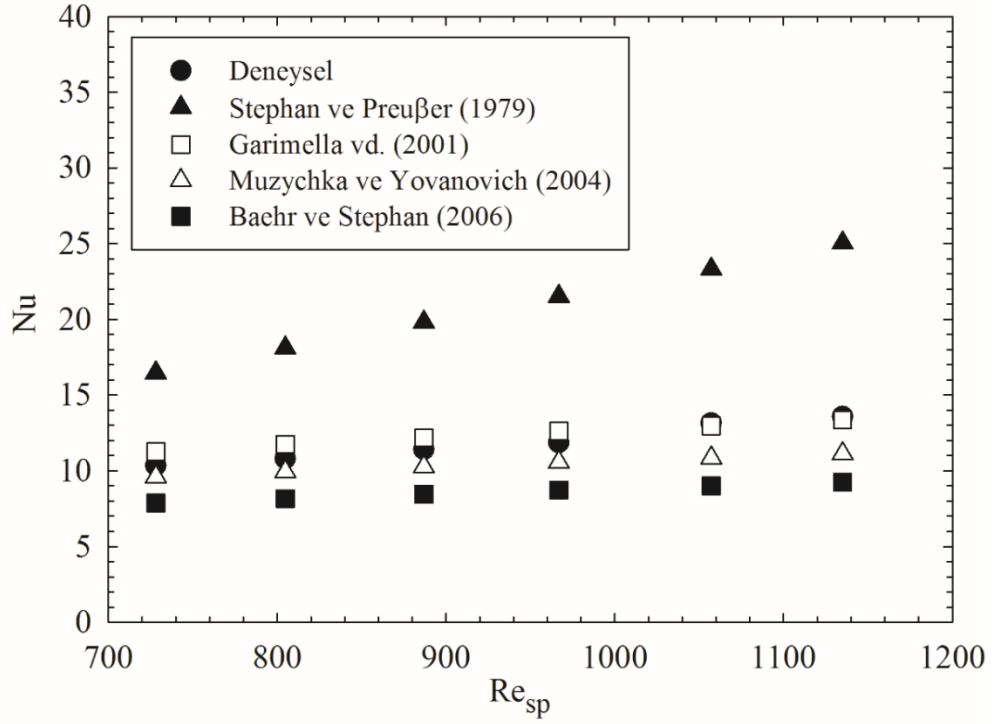


Tablo 2.5. Nusselt sayısı için literatürdeki korelasyonlar

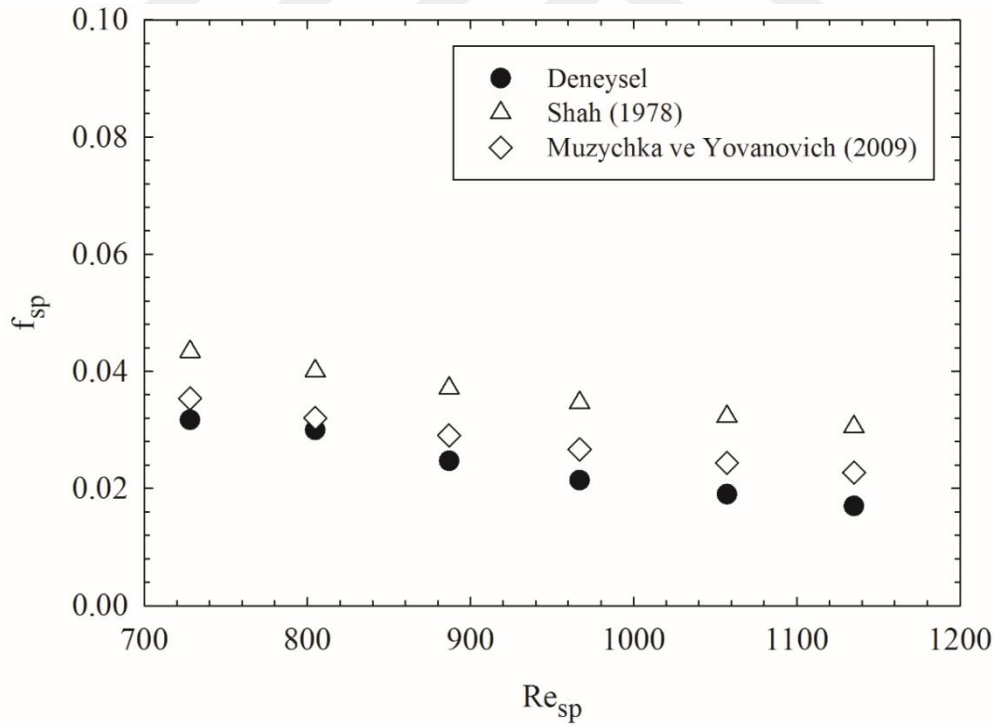
Araştırmacılar	Korelasyon
Stephan ve Preußer (1979)	$Nu = 3.657 + \frac{0.0677(\text{Re Pr } D/L)^{1.33}}{1 + 0.1\text{Pr}(\text{Re } D/L)^{0.3}}, \quad 0.7 < \text{Pr} < 7 \text{ veya } \text{Re Pr } D/L < 33 \text{ için } \text{Pr} > 7$
Garimella vd. (2001)	$Nu_{fd} = 8.235 (1 - 2.0421\alpha + 3.0853\alpha^2 - 2.4765\alpha^3 + 1.0578\alpha^4 - 0.1861\alpha^5)$ $Nu = \left(Nu_{fd}^3 + \left\{ \frac{0.468(D_h/L)\text{Re Pr}}{1 + 0.165[(D_h/L)\text{Re Pr}]^{2/3}} \right\}^3 \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.25}$
Muzychka ve Yovanovich (2004)	$Nu_{\sqrt{A}} = \left[\left(\frac{C_4 f(\text{Pr})}{\sqrt{z^*}} \right)^m + \left(\left\{ C_2 C_3 \left(\frac{f_{fd} \text{Re}_{\sqrt{A}}}{z^*} \right)^{1/3} \right\}^5 + \left\{ C_1 \left(\frac{f_{fd} \text{Re}_{\sqrt{A}}}{8\sqrt{\pi}\alpha^\gamma} \right) \right\}^5 \right)^{m/5} \right]^{1/m}$ $f(\text{Pr}) = \frac{0.564}{\left[1 + (1.664 \text{Pr}^{1/6})^{9/2} \right]^{2/9}}, \quad \text{Re}_{\sqrt{A}} = \frac{G\sqrt{A}}{\mu_{sp}}, \quad z^* = \frac{L}{\sqrt{A} \text{Re}_{\sqrt{A}} \text{Pr}}, \quad A = W_{ch} H_{ch}, \quad \alpha = \frac{\ell_{kisa}}{\ell_{uzun}}, \quad m = 2.27 + 1.65 \text{Pr}^{1/3}$ $C_1 = 3.24, \quad C_2 = 3/2, \quad C_3 = 0.409 \text{ ve } C_4 = 2, \quad \gamma = 1/10 \text{ Üst sınır, } \gamma = -3/10 \text{ Alt sınır}$
Baehr ve Stephan (2006)	$\overline{Nu} = \frac{\frac{3.66}{\tanh[2.264Gz^{-1/3} + 1.7Gz^{-2/3}] + 0.0499Gz \tanh(Gz^{-1})}}{\tanh(2.432 \text{Pr}^{1/6} Gz^{-1/6})} \quad Gz = \frac{D_h \text{Re Pr}}{L}, \quad \text{Pr} \geq 0.1$

Tablo 2.6. Fanning sürtünme faktörü için literatürdeki korelasyonlar

Araştırmacılar	Korelasyon
Shah (1978)	<p>Tam gelişmiş akış</p> $f_{fd} = \frac{24}{\text{Re}} (1 - 1.3553\alpha + 1.9467\alpha^2 - 1.7012\alpha^3 + 0.9564\alpha^4 - 0.2537\alpha^5)$ <p>Gelişmekte olan akış</p> $f_{sp} = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{3.44}{\sqrt{x^+}} + \frac{(f_{fd} \text{Re}) + K(\infty)/4(x^+) - 3.44/\sqrt{x^+}}{1 + C(x^+)^{-2}} \right], \quad x^+ = \frac{L}{D_h \text{Re}} \quad \text{Re} = \frac{GD_h}{\mu_{sp}}$
Muzychka ve Yovanovich (2009)	<p>Tam gelişmiş akış</p> $f_{fd} \text{Re}_{\sqrt{A}} = \frac{12}{\sqrt{\alpha}(1+\alpha) \left[1 - \frac{192\alpha}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\alpha}\right) \right]}$ <p>Gelişmekte olan akış</p> $f_{sp} = \frac{1}{\text{Re}_{\sqrt{A}}} \left[\left(\frac{3.44}{\sqrt{L^+}} \right)^2 + \left(\frac{12}{\sqrt{\alpha}(1+\alpha) \left[1 - \frac{192\alpha}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\alpha}\right) \right]} \right)^2 \right]^{1/2}$ $L^+ = 0.0822\alpha(1+\alpha)^2 \left[1 - \frac{192\alpha}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\alpha}\right) \right]^2$



(a)



(b)

Şekil 2.7. Nu (a) ve f_{sp} (b) için deneysel veriler ile gelişmekte olan laminar akış korelasyonlarının karşılaştırılması

2.4.3. Kaynamalı Akışta Isı Transferi ve Basınç Düşümü

Kaynamalı akışta yerel ısı transfer katsayısı,

$$h_{tp} = \frac{q_w''}{(T_{w,n} - T_{sat,n})} \quad (2.24)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, duvar ısı akısı, q_w'' , Eşitlik (2.5)'te belirtildiği gibi hesaplanır. Kanalın yerel taban yüzeyi ($T_{w,n}$), beşinci termoelemanına karşılık gelen sıcaklık (T_n) değerine bağlı olarak Eşitlik (2.4)'e benzer şekilde hesaplanır.

Yerel taban yüzeyi sıcaklığı,

$$T_{w,n} = T_n - q_{eff}'' \left(\frac{l_a}{k_c} + \frac{l_b}{k_c} + R_{t,c}'' \right) \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, yerel doyma sıcaklığı ($T_{sat,n}$) ise yerel doyma basıncının ($P_{w,n}$) hesaplanmasıyla belirlenebilir. İlgili işlem adımları aşağıda ifade edilmiştir:

İş akışkanı minikanal içerisine doyma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta girer. Kaynamalı akışta doyma sıcaklığı basınca bağlıdır. Tek fazlı bölge ve doymuş sıvı-buhar karışım bölgesi kuruluk derecesinin sıfır olduğu konumda ayrılır. Bu değere kadar su, tek fazlı sıvı halinde; bu noktadan itibaren ise iki fazlı doymuş karışım halindedir. Tek fazlı akış bölge uzunluğu ve basınç düşümü aşağıdaki gibi belirlenir:

Tek fazlı bölge uzunluğu,

$$L_{sp} = \frac{\dot{m} C_{p,L} (T_{sat,0} - T_i)}{q_{eff}'' W_T} \quad (2.26)$$

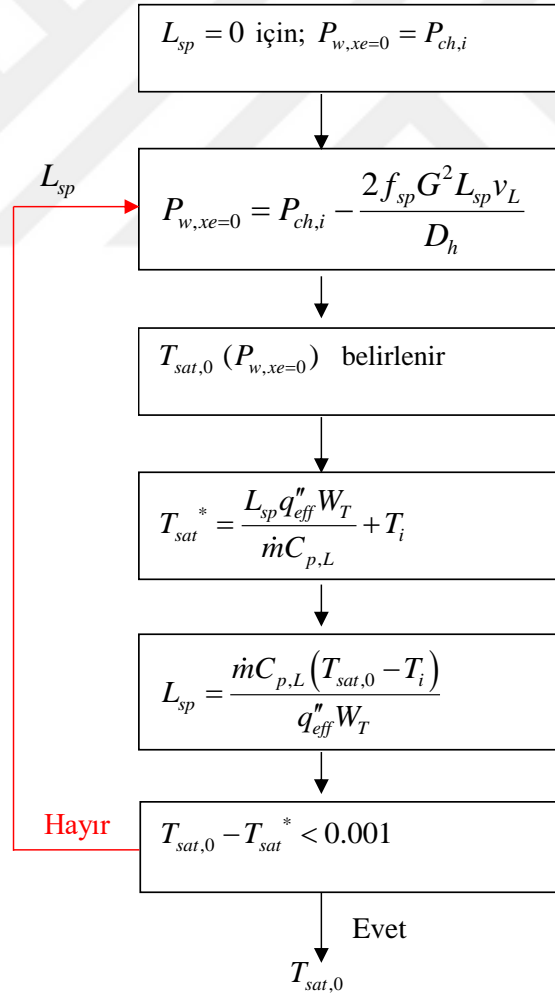
şeklinde tanımlanır. Tek fazlı akış bölgesindeki basınç düşümü (ΔP_{sp}):

$$\Delta P_{sp} = \frac{2 f_{sp} G^2 L_{sp} \nu_L}{D_h} \quad (2.27)$$

$$P_{w,xe=0} = P_{ch,i} - \Delta P_{sp} \quad (2.28)$$

Burada, $P_{w,xe=0}$, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki basıncı; $T_{sat,0}$, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma sıcaklığını; $P_{ch,i}$, kanal giriş basıncını; \dot{m} , kütleli debiyi ve $C_{p,L}$, sıvının özgül ısısını ifade etmektedir.

Deneyle süresince tek fazlı sıvı akışı bölgesinde gelişmekte olan akış söz konusu olup, f_{sp} için Tablo 2.6'da verilen ve Muzychka ve Yovanovich (2009) tarafından önerilen bağıntı kullanılmıştır. Kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığı ise Eşitlik (2.26) ve (2.28)'in iteratif olarak çözümü ile elde edilir ve çözüm için aşağıdaki işlem adımları uygulanır.



Şekil 2.8. Kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma sıcaklığının iteratif çözüm ile elde edilmesi

Doymuş kaynama bölgesindeki yerel basınç ($P_{w,n}$),

$$P_{w,n} = P_{w,xe=0} - \left(\frac{P_{w,xe=0} - P_{ch,o}}{L - L_{sp}} \right) (L_n - L_{sp}) \quad (2.29)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, L_n , yerel doyma basıncının hesaplanacağı konum ile kanal girişi arasındaki uzunluğu ve $P_{ch,o}$ ise kanal çıkış basıncını ifade etmektedir. Yukarıda verilen hesaplama prosedürü, Qu ve Siu-Ho (2009), Mirmanto (2014), Mahmoud vd. (2014) ve Markal (2016) gibi araştırmacıların çalışmalarından yararlanılarak oluşturulmuştur.

Yerel kuruluk derecesi ($x_{e,n}$) ve çıkış kuruluk derecesi ($x_{e,o}$) sırasıyla,

$$x_{e,n} = \frac{\left(\frac{q_w'' A_t L_n}{L} - \dot{m} c_{p,L} (T_{sat,n} - T_i) \right)}{\dot{m} i_{Lv}} \quad (2.30)$$

$$x_{e,o} = \frac{\left(q_w'' A_t - \dot{m} c_{p,L} (T_{sat,o} - T_i) \right)}{\dot{m} i_{Lv}} \quad (2.31)$$

şeklinde belirlenir. Burada, i_{Lv} , buharlaşma gizli ısısını ve $T_{sat,o}$ ise çıkış basıncına göre belirlenen doyma sıcaklığını ifade etmektedir.

Test bölgesindeki toplam basınç düşümü büyük haznelardan ölçülmektedir. Kanalin giriş ve çıkış basınç değerleri ise haznelerdeki kesit değişimi sebebiyle meydana gelen basınç kayıpları ve kazanımlarının belirlenmesiyle elde edilebilir. Kanal giriş basıncı aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$P_{ch,i} = P_i - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}) \quad (2.32)$$

Burada, ΔP_{c1} ve ΔP_{c2} kesit daralması basınç kayıpları olup, sırasıyla Eşitlik (2.13) ve (2.14)'te verilmiştir.

Çıkış hazne basıncı (P_o) ve minikanal çıkışındaki basınç değeri ($P_{ch,o}$) ise aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$P_o = P_i - \Delta P_{tot} \quad (2.33)$$

$$P_{ch,o} = P_o + \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} \quad (2.34)$$

$$\Delta P_{e2} = \frac{v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o}}{2} (G_{P2,o}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} (v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o})}{2} G^2 \quad (2.35)$$

$$\Delta P_{e1} = \frac{v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o}}{2} (G_{P1,o}^2 - G_{P2,o}^2) + \frac{K_{e1} (v_{L,o} + x_{e,o} v_{Lg,o})}{2} G_{P2,o}^2 \quad (2.36)$$

Burada, ΔP_{e1} ve ΔP_{e2} , sırasıyla, minikanaldan küçük hazneye ve küçük haznedeki büyük hazneye kesit genişlemesinden dolayı oluşan basınç kazanımlarını, K_{e2} ve K_{e1} ise kesit genişlemesi kazanım katsayıları olup sırasıyla Eşitlik (2.21) ve (2.22)'de belirtilmiştir. Kesit daralması basınç kayıpları ile kesit genişlemesi basınç kazanımlarının belirlenmesine yönelik bu tür yaklaşımlar literatürdeki çalışmalarda yer almaktadır (Blevins (1984), Collier ve Thome (1994), Qu ve Mudawar (2003), Qu vd. (2006), Lee ve Garimella (2008) ve Qu ve Siu-Ho (2009), Markal (2016)).

2.4.4. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulguların değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, deneysel belirsizlikler, Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen yöntemle göre yapılmıştır. Bu yöntem kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

R bağımsız değişkenlerin (sıcaklık, basınç vb.) bir fonksiyonu olan herhangi bir deneysel parametre olmak üzere,

$$R = R(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n) \quad (2.37)$$

şeklinde yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik değerleri; $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ şeklinde tanımlanırsa, R için toplam belirsizlik aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial e_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial e_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial e_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

Tablo 2.7’de belirsizlik analizi yöntemi ile belirlenen belirsizlik değerleri verilmiştir.

Tablo 2.7. Belirsizlik analizi

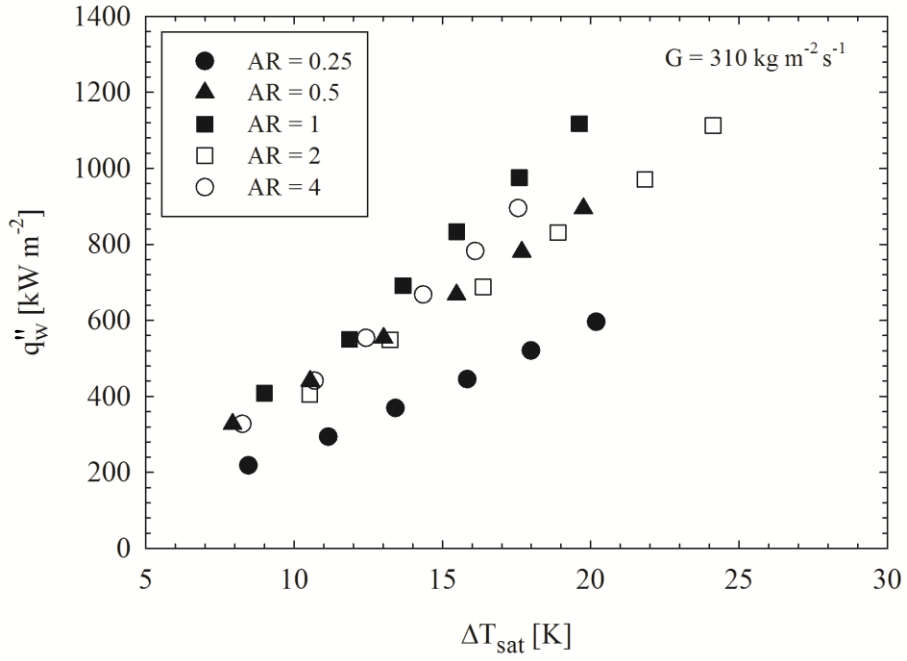
	Parametreler	Belirsizlik değeri
İki fazlı akış	Kütle akısı, G	$\pm 2.11 \%$
	Duvar ısı akısı, q_w''	$\pm 0.20 - 0.32 \%$
	Efektif ısı akısı, q_{eff}''	$\pm 0.13\%$
	Çıkış kuruluk derecesi, x_{eo}	$\pm 2.06 - 7.15 \%$
	Isı transfer katsayısı, h_{ip}	$\pm 1.02 - 3.59 \%$
Tek fazlı akış	Nusselt sayısı, Nu	$\pm 3.36 - 3.64 \%$
	Fanning sürtünme faktörü, f_{sp}	$\pm 4.13 - 4.14 \%$

3. BULGULAR VE İRDELEME

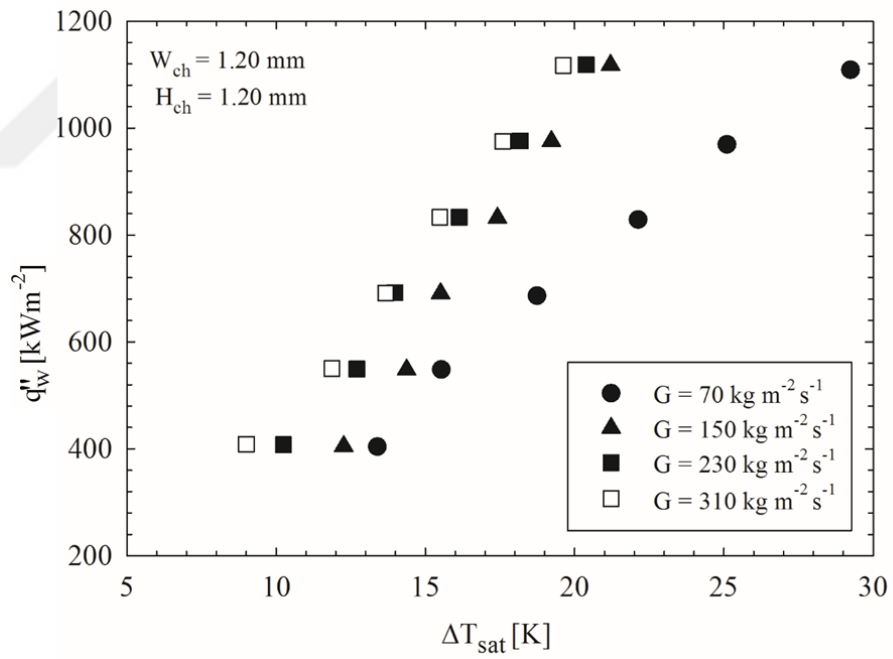
Bu çalışmada, minikanallarda deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahip beş adet dikdörtgen kesitli tek minikanalda çalışılmıştır. Kütle akısı değerleri, 70, 150, 230 ve 310 kg m⁻² s⁻¹ olup; ısı güç değerleri ise 85.1 – 210 W aralığındadır. Isı transfer katsayısı ve kuruluk derecesi hesaplanırken, en yüksek doymuş kaynama bölgesine karşılık gelen beşinci termoelemanın konumu (kanal girişinden 46.5 mm uzaklıkta) dikkate alınmıştır. Akışın fiziksel mekanizması akış desenleri/görüntüleri aracılığıyla irdelenmiştir.

3.1. Kaynama Eğrileri

Şekil 3.1a'da, $G = 310 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ için tüm AR değerlerini içeren kaynama eğrileri verilmiştir. Duvar kızma farkı ($\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$) artan duvar ısı akısı ile artmaktadır. Bu artış, belirgin ve düzenli bir karaktere sahiptir. Doymuş kaynamalı akış koşulları göz önüne alındığında; bu olay, kaynamanın tipik bir davranışıdır. Ancak, kaynama eğrileri üzerinde AR'nin düzenli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu sonuç, akış fiziğinin karmaşık yapısını doğrulamaktadır. Şekil 3.1b'de ise AR=1 için farklı kütle akılarının kaynama eğrileri üzerindeki etkisi verilmiştir. Verilen bir ısı güç değerinde, kızma farkı artan kütle akısı ile azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur. Öyle ki, Dang vd. (2017) kütle akısı arttırıldığında, aynı duvar kızma farkına ulaşmak için daha yüksek ısı akılarının uygulanması gerektiğini ifade etmiştir. Benzer şekilde, Megahed (2012) kütle akısındaki azalmanın daha yüksek duvar kızma farkına neden olduğunu belirtmiştir. Ayrıca Şekil 3.1b'den, kurumanın ve/veya kritik ısı akısının (CHF) bir göstergesi olan sıcaklık gezintisinin/sıçramasının en düşük kütle akısında gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, Dang vd.'nin (2017) açıklamaları ile tutarlıdır. Dang vd. (2017) aynı ısı akısı koşulları altında kurumanın ilk olarak en düşük kütle akısında meydana geldiğini belirtmiştir.



(a)

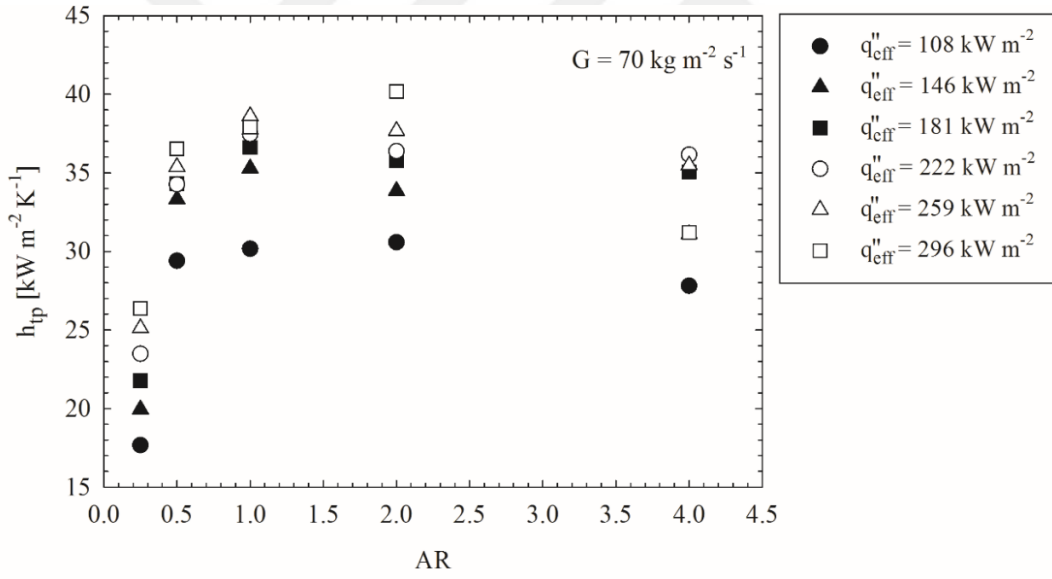


(b)

Şekil 3.1. Farklı AR değerleri (a) ve kütle akıları (b) için kaynama eğrileri

3.2. Boyut Oranı ve Isı Akısının Etkisi

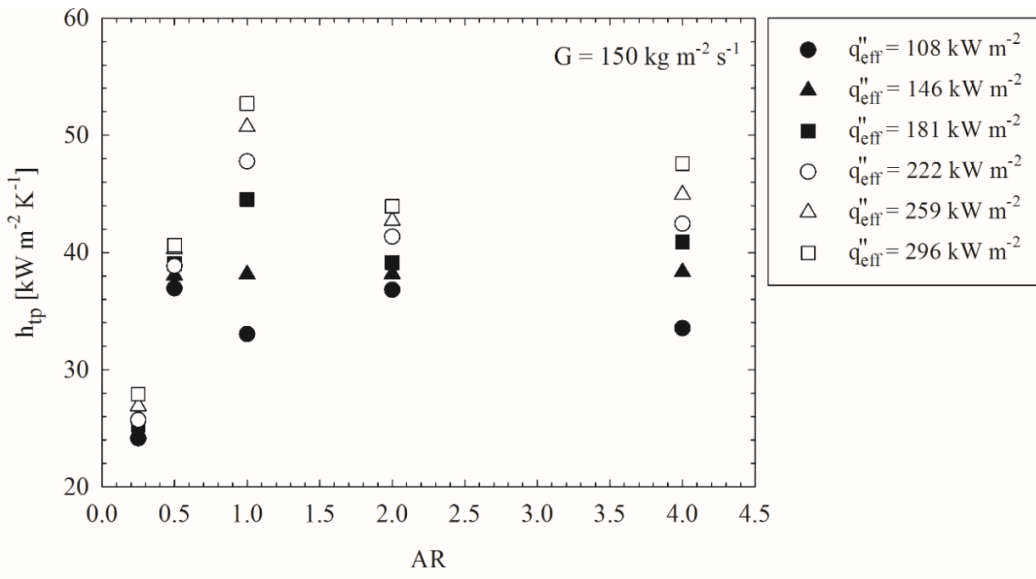
Şekil 3.2a, b, c ve d'de, test edilen tüm kütle akıları için, yerel iki faz ısı transfer katsayısının boyut oranı (AR) ile değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, ısı transfer katsayısı boyut oranı ile monotonik bir artış veya azalış göstermemektedir. Genel olarak, en iyi performansı $AR=1$ (kare kesitli kanal) sergilerken; en kötü performansı ise AR değeri 0.25 olan kanal göstermiştir. Literatürde, minikanalarda AR etkisiyle ilgili olarak, elde edilen sonuçların karşılaştırılabileceği bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak sonuçlar, Fu vd.'nin (2013) bulgularıyla uyumludur. Fu vd. (2013), genişleyen çoklu kanallarda HFE-7100 akışkanının kaynamalı akışında ısı transferini incelemiştir. Verilen bir duvar kızma farkı için, duvar ısı akısı ve CHF'nin $AR=0.99$ 'da en yüksek değere sahip olduğunu belirtmişlerdir.



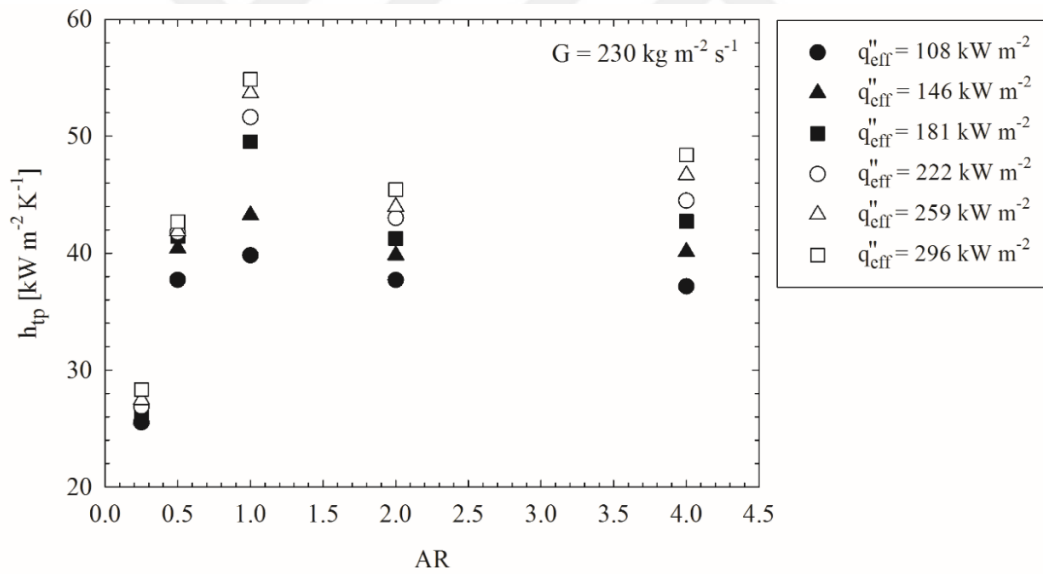
(a)

Şekil 3.2. Farklı ısı akılarında $G = 70 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (a), $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b), $G = 230 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c) ve $G = 310 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (d) için yerel ısı transfer katsayısının AR ile değişimi

Şekil 3.2'nin devamı

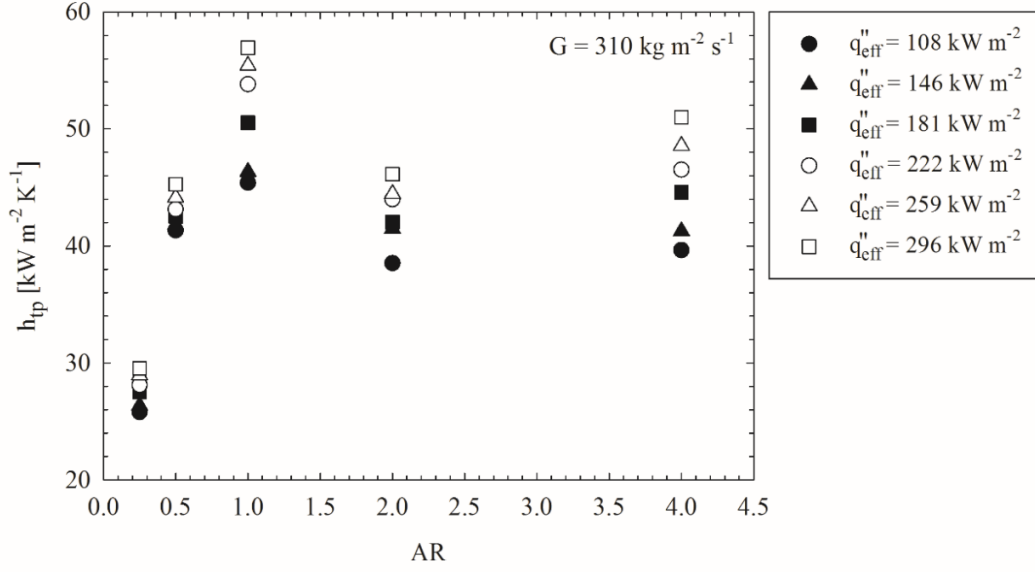


(b)



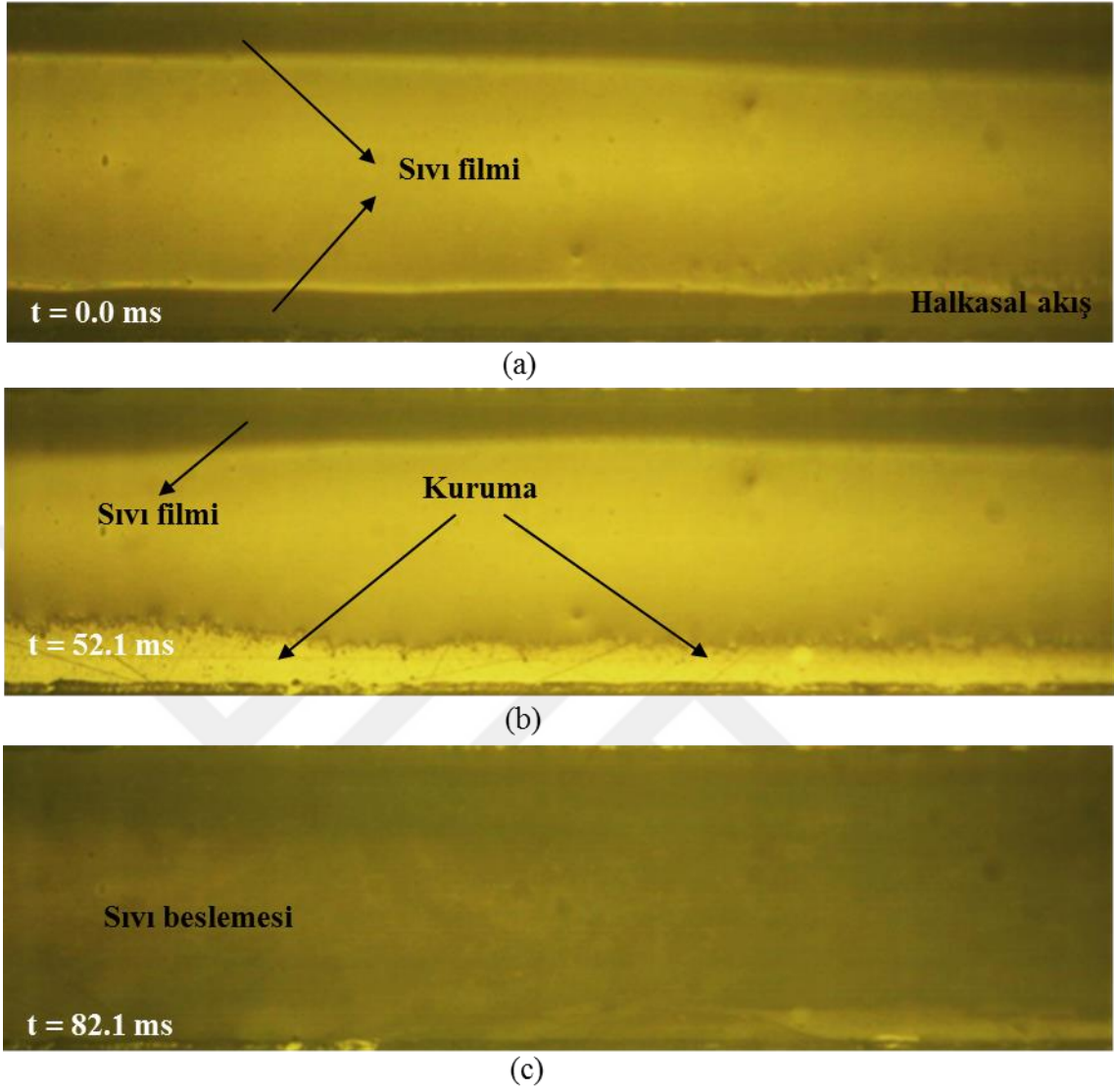
(c)

Şekil 3.2'nin devamı

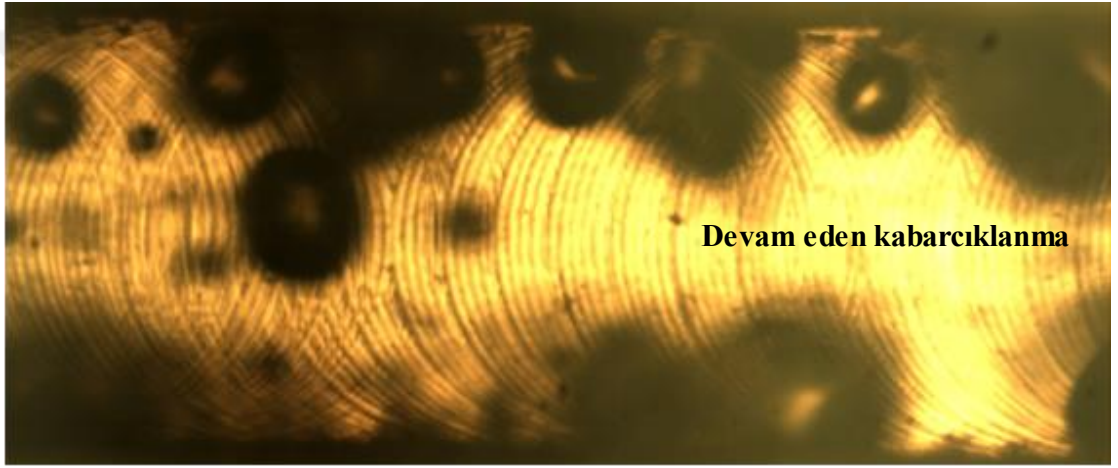
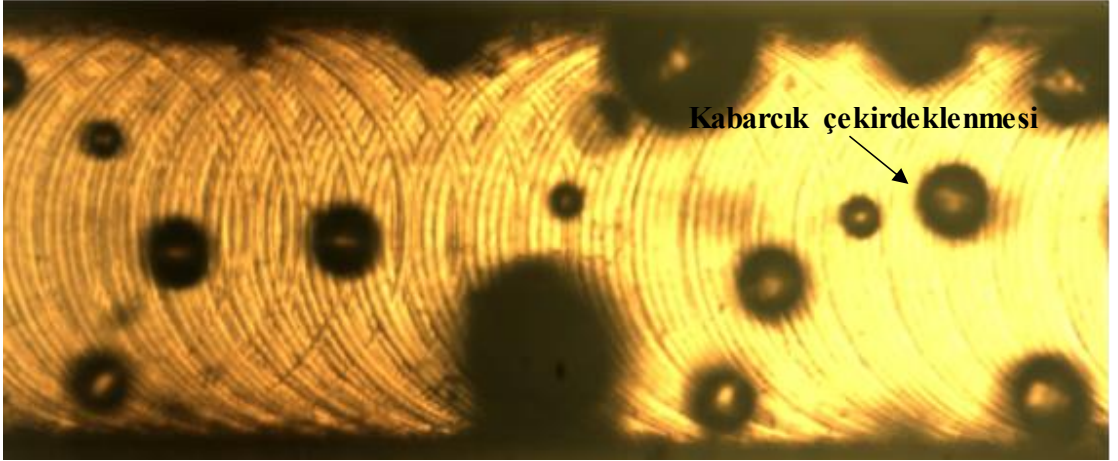


(d)

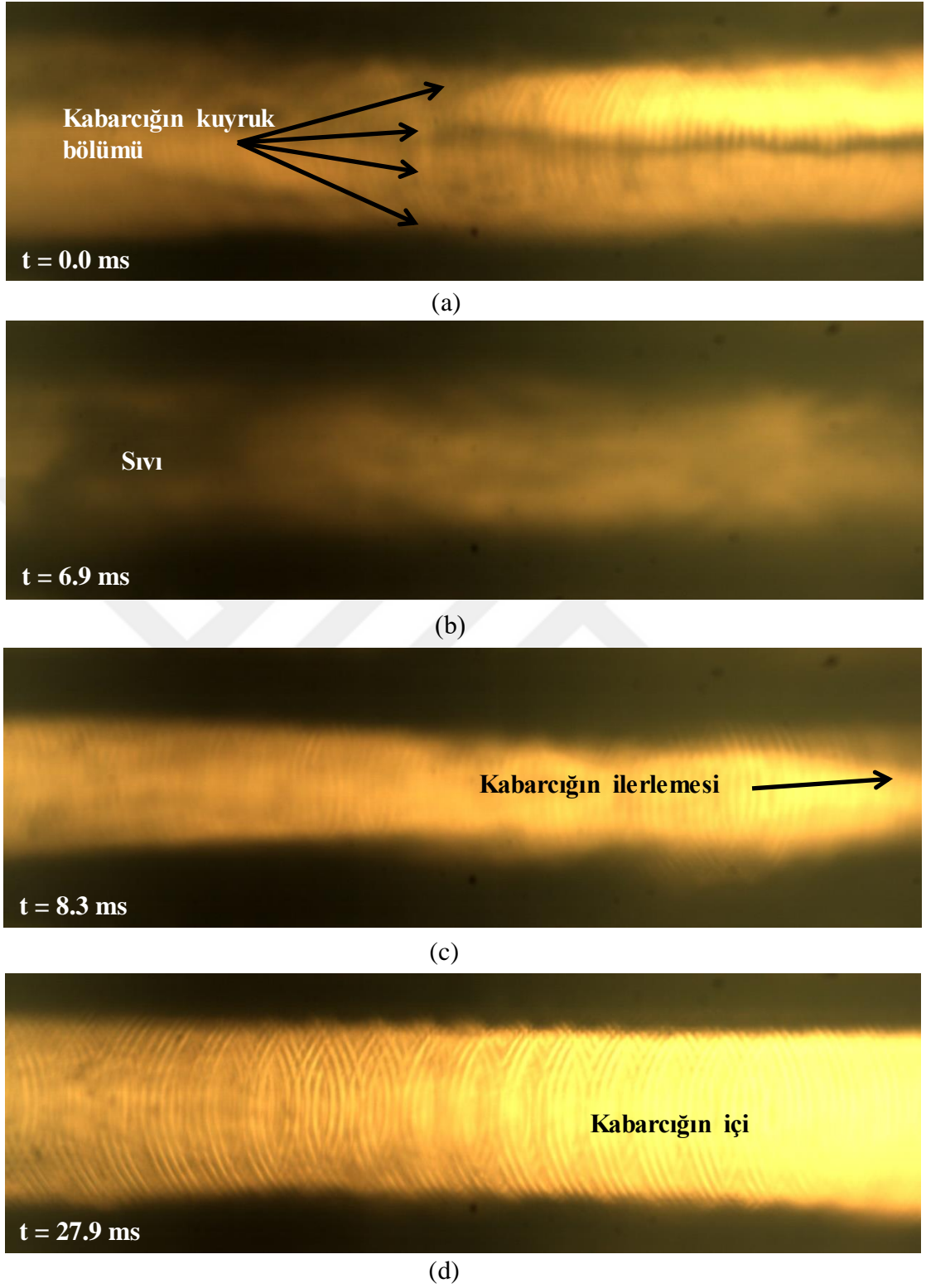
Isı transfer katsayısının en düşük değerlerinin $AR = 0.25$ durumunda oluşmasının muhtemel nedeni yerel kurumanın erken başlamasıdır. Bu durumun daha iyi anlaşılması için akış görüntülerinden yararlanılabilir. Şekil 3.3'te kanal girişinden 46.5 mm uzaklıkta, $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $q = 160 \text{ W}$ koşullarında, $AR = 0.25$ ' e ait üç farklı ardışık akış görüntüsü verilmiştir. İlk görüntü referans olarak kabul edilmiş ve zamanı 0.0 ms olarak alınmıştır. Fotoğraflardan da görüldüğü üzere ilgili konumda sanki-halkasal akış deseni baskındır. Ancak, sonrasında sıvı filmi buharlaşır ve kuruma meydana gelir. Ardından besleme sıvısı kanal duvarını süpürür. Sonuç olarak, kaynamalı akış esnasında kuru noktaların meydana gelmesi ısı uzaklaştırma prosesinde yetersizliğe ve dolayısıyla ısı transferinin kötüleşmesine yol açar. Diğer taraftan, $AR=1$ için, aynı çalışma koşullarına ($G=150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $q=160 \text{ W}$) rağmen durum oldukça farklıdır. Kabarcıklı akış etkili bir şekilde kanalın büyük bir kısmı boyunca oluşmaktadır. Şekil 3.4a ve b, sırasıyla, kanal girişinden 1.5 mm ve 16.5 mm uzaklıkta alınan akış görüntülerini göstermektedir ve bu görüntüler bir önceki ifadeyi doğrulamaktadır. Kanal girişinden 46.5 mm uzaklıktaki noktada ise halkasal akış koşulları henüz oluşmamıştır. *Slug* akışta olduğu gibi tek kabarcıkların hızlı geçişi meydana gelmektedir. İlgili olay, Şekil 3.5'te verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, verilen koşullar altında, $AR=1$ için herhangi bir kuruma söz konusu değildir.



Şekil 3.3. $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $q = 160 \text{ W}$ ve $AR = 0.25$ için kanal girişinden 46.5 mm uzaklıktaki bir dizi akış görüntüsü



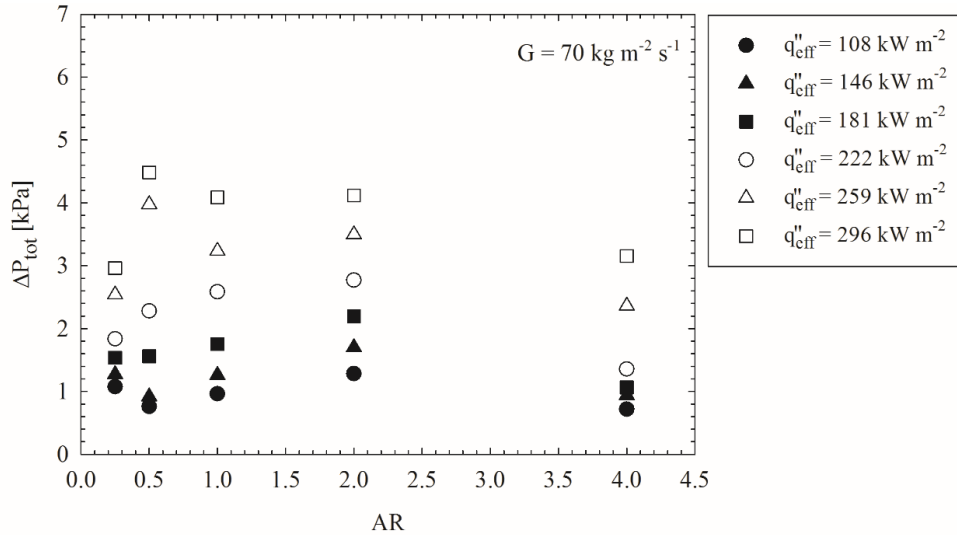
Şekil 3.4. $AR=1$ ' in $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $q = 160 \text{ W}$ koşulları için kanal girişinden 1.5 mm (a) ve 16.5 mm (b) uzaklıktaki akış desenleri



Şekil 3.5. $AR=1$ ' in $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $q = 160 \text{ W}$ koşulları için kanal girişinden 46.5 mm uzaklıktaki bir dizi akış deseni

Boyut oranına ek olarak, ısı akısının ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi, tüm kanallar için eş zamanlı olarak, Şekil 3.2’de görülmektedir. Isı transfer katsayısı incelenen bütün kütle akısı değerlerinde artan ısı akısı ile artmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatür ile (Harirchian ve Garimella, 2008; Soupremanien vd., 2011) uyumludur ve Tran vd. (1996) gibi bazı araştırmacılar bu tür bir eğilimin kabarcıklı kaynamanın baskınlığının bir göstergesi olduğunu belirtmiştir. Bu durum bir sonraki alt başlıkta ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

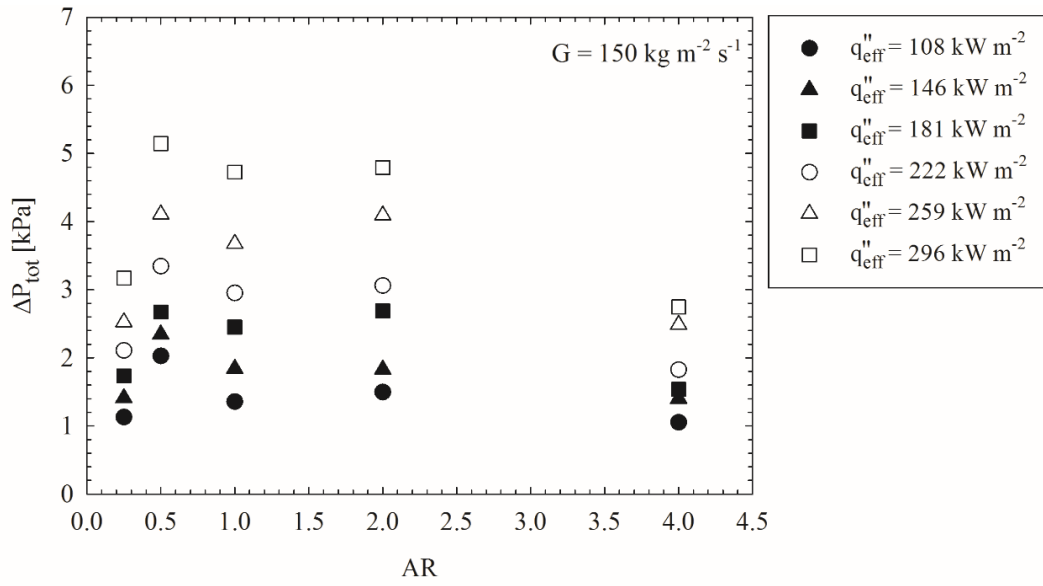
Basınç düşümü için elde edilen sonuçlar ise ısı transfer katsayısına kıyasla daha karmaşıktır. Toplam basınç düşümünün farklı ısı akıları için boyut oranına bağlı değişimi Şekil 3.6’da sunulmuştur. Genel karakter olarak, toplam basınç düşümü ısı akısının artışıyla artış eğilimi sergilerken AR’nin artışıyla düzensiz bir davranış göstermektedir. Elde edilen sonuçlar kaynamalı akıdaki güçlü termo-hidrokinamik-geometrik birlikteliği göstermektedir. Akış görüntüleme sonuçlarında görüldüğü gibi akış desenleri ve dolayısıyla akış fiziği sadece milisaniye mertebelerinde değişmektedir. Bu değişime rağmen, kanalların basınç değerleri arasındaki fark belirgin düzeylerde değildir. Ayrıca, incelenen bütün AR değerleri için toplam basınç düşümü önemli ölçüde ısı akısına bağlıdır ve artan ısı akısı ile artmaktadır. Benzer eğilimler, Harirchian ve Garimella (2008) tarafından da elde edilmiştir. Bunun sebebini buharın ivmelenmesi ve sürtünme basınç düşümü bileşeni olarak açıklamışlardır.



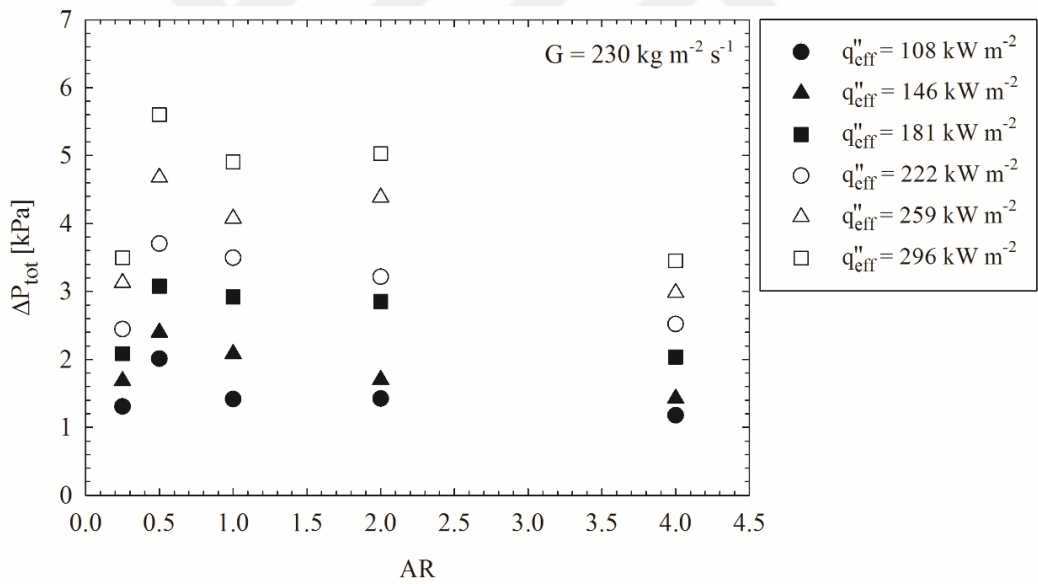
(a)

Şekil 3.6. Farklı ısı akılarında $G = 70 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (a), $G = 150 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b), $G = 230 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c) ve $G = 310 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (d) toplam basınç düşümü ile AR'nin değişimi

Şekil 3.6'nın devamı

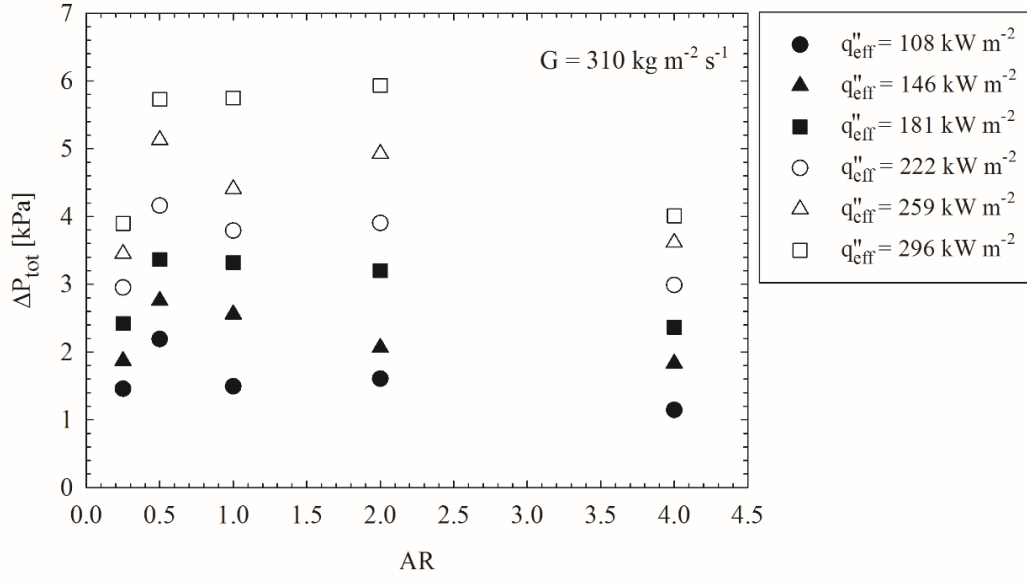


(b)



(c)

Şekil 3.6'nın devamı

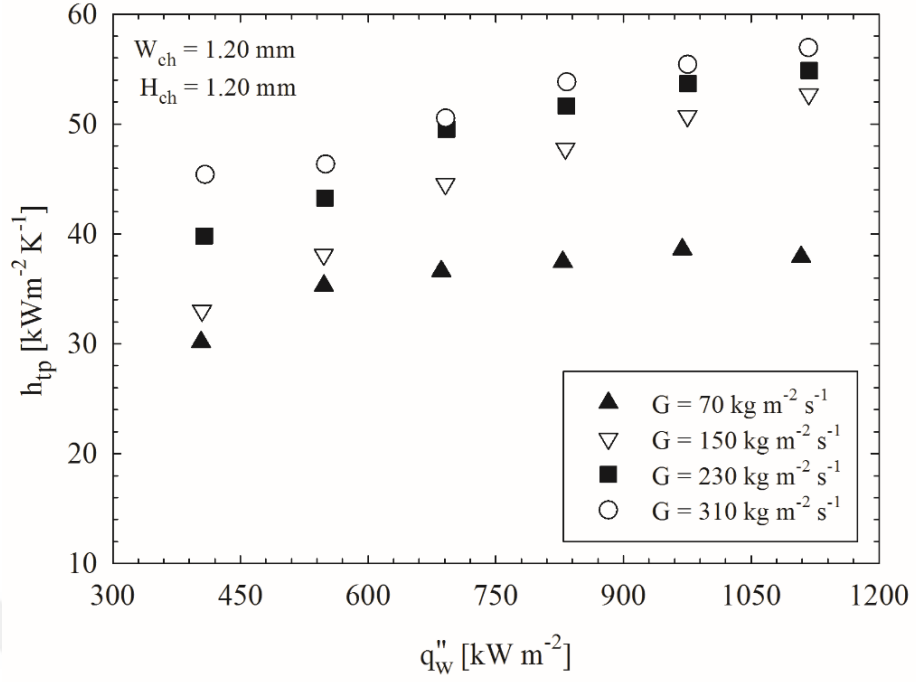


(d)

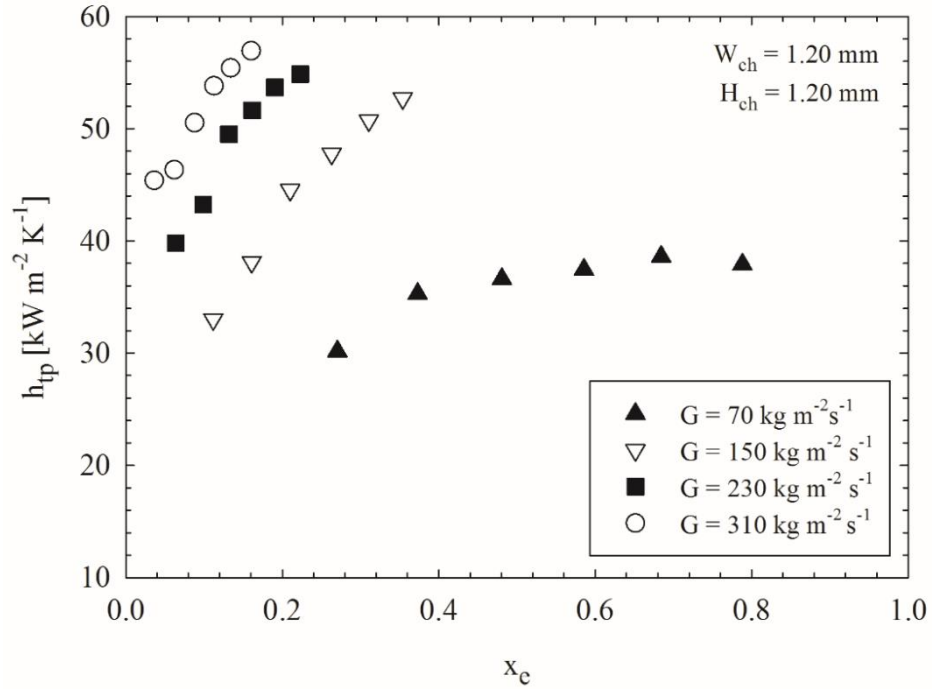
Kaynamalı akışta bir diğer önemli konu ise mini ölçekten mikro ölçeğe geçiş ile ilgilidir ki bu, birçok çalışmanın (Ong ve Thome, 2011a; Ong ve Thome, 2011b; Wang ve Wang, 2014) konusudur. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, Markal vd. (2016), tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Markal vd. (2016)'nin çalışmasında, hidrolik çap 100 mikro metre olarak sabittir ve silikon ısı alıcı paralel dikdörtgenel kanallar içermektedir. İlgili çalışmada, boyut oranının ısı transferi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Genel karakter olarak, yerel iki faz ısı transfer katsayısı artan boyut oranı ($AR=3.54$ 'e kadar) ile artmaktadır. Taşınım ile kaynama baskın ısı transfer mekanizmasıdır, kabarcıklı kaynama bastırılmıştır ve akış sanki periyodik karaktere sahiptir. Belirtilen çalışmanın aksine, bu çalışmada, baskın ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır ve akış desenleri oldukça farklıdır. Bu temel farklılıkların altında yatan sebep sınırlanma/sınırlandırma etkileridir. Bu çalışmada, kanallar çoklu kabarcık oluşumuna imkân verecek kadar geniştir veya bir diğer ifade ile, birçok kabarcığın eş zamanlı olarak kabarcık gelişim döngüsünü tamamlayabileceği kadar yeterli hacim mevcuttur. Bu durum belirgin bir şekilde akış fiziğini etkilemektedir.

3.3. Kütle Akısının Etkisi

Şekil 3.7a ve b’de $AR = 1$ için farklı kütle akılarında ısı transfer katsayısının sırasıyla duvar ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Daha önceki bölümde belirtildiği üzere ısı transfer katsayısı artan ısı akısı ve kütle akısı ile artmaktadır. Benzer şekilde ısı transfer katsayısı yerel kuruluk derecesine bağlı olup, artan kuruluk derecesi ile artar. Tran vd. (1996), ısı transfer katsayısının ısı akısının bir fonksiyonu olup, kütle akısından bağımsız olmasını kabarcıklı kaynamanın baskınlığı ile açıklamıştır. Benzer şekilde, Lazarek ve Black (1982), ısı transfer katsayısının ısı akısına kuvvetle, kuruluk derecesine ise ihmal edilebilir düzeyde bağlı olmasını kabarcıklı kaynamanın baskınlığının göstergesi olarak yorumlamıştır. Ancak, yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar tam olarak bu ifadelerle örtüşmemektedir. Tibiriçá ve Ribatski’nin (2014) belirttiği gibi bu tür görüşler baskın ısı transfer mekanizmasının anlaşılması için tek başına yeterli değildir. Yukarıda belirtilen çalışmalarla hem fikir olarak baskın ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır; ancak, sonuçlar akış görüntüleri ile desteklenmiştir. Birçok durumda, kabarcık çekirdeklenmesi kanalların büyük bir bölümünde aktiftir ve baskın akış deseni kabarcıklı kaynama ile ilişkili olan kabarcıklı / *slug* akıştır. Ayrıca, kütle akısındaki artış, CHF oluşumunu geciktirdiği için burada önemli bir parametredir. Verilen bir ısı akısı değerinde, yüksek akış debileri kuruma riskini azaltır ve kanalın iç duvarlarının daha uzun süre ıslanmasını ve/veya yeniden ıslanmasını sağlar. Düşük kütle akılarında ise tersi bir durum söz konusudur. Şekil 3.7 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, ısı transferinin ilk olarak en düşük kütle akısı durumunda kötüleştiği görülmektedir. Bu davranış, ilgili yüzeydeki kurumanın bir sonucudur.



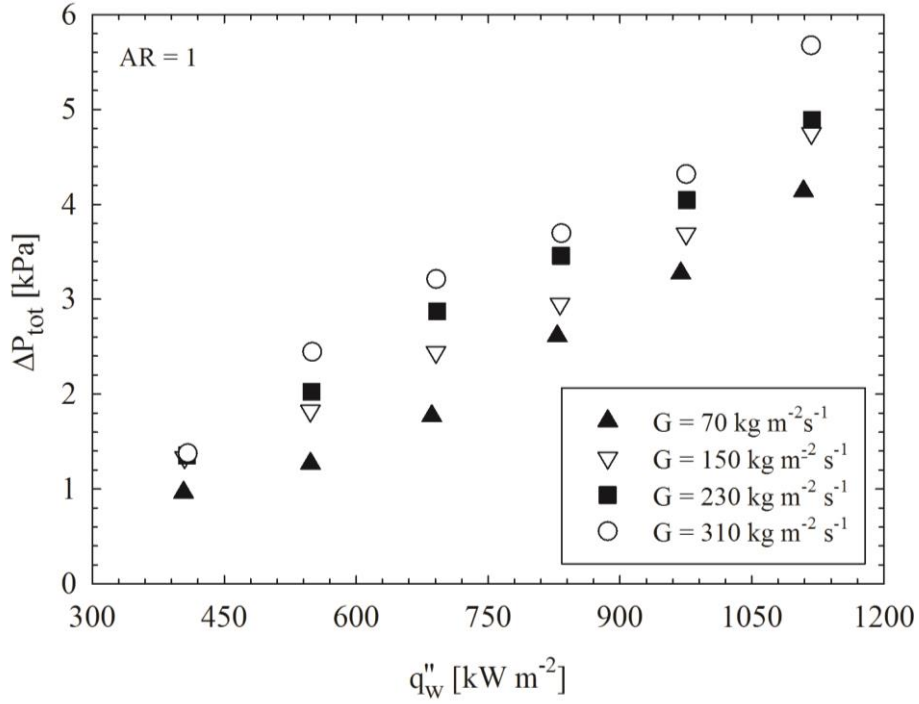
(a)



(b)

Şekil 3.7. Farklı kütle akılarında $AR = 1$ için yerel ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi (b)

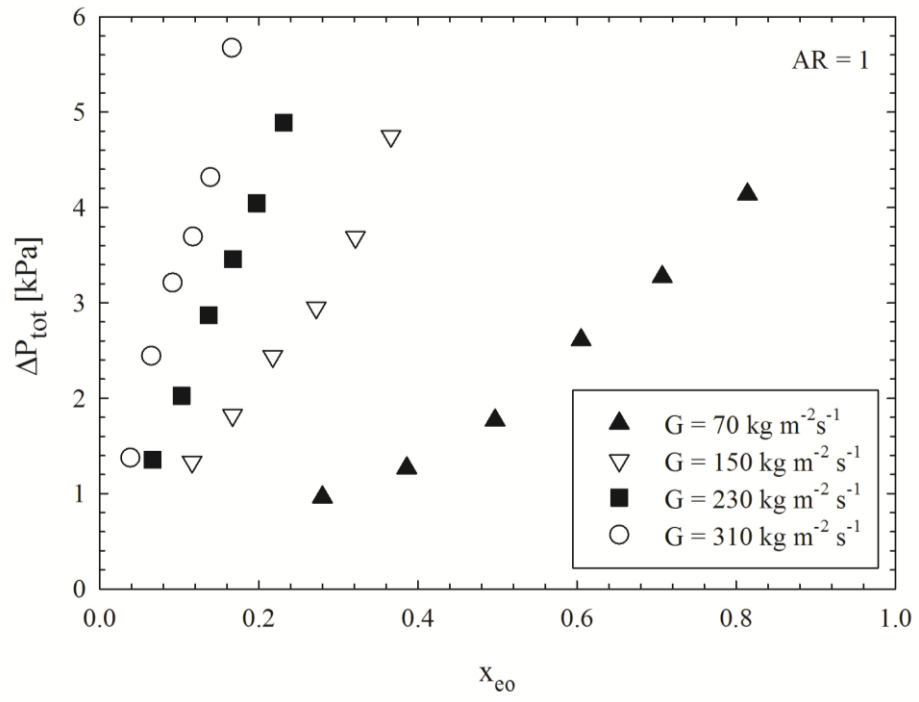
Şekil 3.8a ve b’de farklı kütle akılarında $AR = 1$ için toplam basınç düşümünün sırasıyla duvar ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Toplam basınç düşümünün artan ısı akısı ile arttığı görülmektedir. Harirchian ve Garimella (2008) tarafından belirtildiği gibi bu durumun nedeni buharın ivmelenmesi ve sürtünme basınç düşümü bileşenidir. Benzer şekilde, toplam basınç düşümü, artan kütle akısı ile de artmaktadır. Benzer eğilimler Soupremanien vd. (2011) tarafından da rapor edilmiştir. Burada en muhtemel faktör sürtünme basınç düşümü bileşenidir. Toplam basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesi ile doğrusal olarak artması yine Soupremanien vd. (2011) tarafından elde edilen sonuçlarla uyumludur.



(a)

Şekil 3.8. Farklı kütle akılarında $AR = 1$ için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve çıkış kuruluk derecesi ile değişimi (b)

Şekil 3.8'in devamı



(b)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı genişlik ve derinlik değerine sahip beş adet tekli minikanallarda deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir:

1. Yerel iki faz ısı transfer katsayısı, AR ile monotonik bir artma veya azalma göstermemektedir. Genel olarak ısı transferi için en iyi performans $AR = 1$; en kötü performans ise $AR=0.25$ için elde edilmiştir.
2. Isı transfer katsayısı, artan ısı akısı, kütle akısı ve kuruluk derecesi ile artmaktadır.
3. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Markal vd.' nin (2016) mikrokanallar için yaptıkları çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmanın aksine, bu çalışmada, baskın ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır ve akış desenleri mikrokanallara göre oldukça farklıdır. Bu temel farklılığın nedeni ise sınırlanma etkileridir.
4. Baskın akış desenleri, kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akıştır.
5. Duvar kızma farkı, bütün kütle akısı değerleri için artan ısı akısı ile artmaktadır. Verilen bir ısı akısı değerinde ise kızma farkı artan kütle akısı ile azalmaktadır.
6. Toplam basınç düşümü artan ısı akısı, kütle akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile artmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan çalışmanın konu üzerinde çalışan araştırmacılara yön vermesi açısından aşağıda bazı önerilere yer verilmiştir:

1. Minikanallarda aynı çalışma koşulları altında tek ve paralel ısı alıcıların ısı performansları karşılaştırılabilir.
2. Çalışma kapsamında iş akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Mevcut geometri ve çalışma koşulları için farklı akışkanlarla deneyler yapılarak akışkan özelliklerinin doymuş kaynamalı akış karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenebilir.
3. Minikanallarda baskın ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama olduğu görülmektedir. Dolayısıyla kanal boyunca aktif kabarcıklı akışın oluşumu için farklı kanal kesit geometrilerinde deneysel çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Baehr, H. D. ve Stephan, K., 2006. Heat Transfer, 2nd ed., Springer, Berlin.
- Balasubramanian, P. ve Kandlikar, S.G., 2005. Experimental Study of Flow Patterns, Pressure Drop, and Flow Instabilities in Parallel Rectangular Minichannels, Heat Transfer Engineering, 26, 3, 20–27.
- Bang, K.H., Kim, K.K., Lee, S.K. ve Lee, B.W., 2011. Pressure effect on flow boiling heat transfer of water in minichannels, International Journal of Thermal Sciences, 50, 3, 280-286.
- Barber, J.C., 2009. Hydrodynamics, Heat Transfer and Flow Boiling Instabilities in Microchannels, Doctoral Thesis.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. ve Dewitt, D.P., 2015. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Yedinci Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Bertsch, S. S., Groll, E. A. ve Garimella, S. V., 2008. Refrigerant flow boiling heat transfer in parallel microchannels as a function of local vapor quality, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 19-20, 4775-4787.
- Blevins, R.D. 1984. Applied Fluid Dynamics Handbooks. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Çengel, Y.A., 2012. Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım, Üçüncü Baskı, İzmir Güven Kitapevi, İzmir.
- Charnay, R., Revellin, R. ve Bonjour, J., 2014. Flow boiling characteristics of R-245fa in a minichannel at medium saturation temperatures, Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 184-194.
- Cheng, P. ve Wu, H.Y., 2006. Mesoscale and Microscale Phase-Change Heat Transfer, Advances in Heat Transfer, 39, 461-563.
- Choi, K., Pamitran, A. S., Oh, C. ve Oh, J., 2007. Boiling heat transfer of R-22, R-134a and CO₂ in horizontal smooth minichannels, International Journal of Refrigeration, 30, 8, 1336-1346.
- Collier, J. G. ve Thome, J. R., 1994. Convective Boiling and Condensation, Third Edition, Oxford University Press, USA.
- Dang, C., Jia, L., Xu, M. ve Peng, Q., 2017. Experimental study on flow boiling characteristics of pure refrigerant (R134a) and zeotropic mixture (R407C) in a rectangular micro-channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 104, 351-361.

- Fu, B., Lee, C. ve Pan C., 2013. The effect of aspect ratio on flow boiling heat transfer of HFE-7100 in a microchannel heat sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, 58, 1-2, 53-61.
- Garimella, S., Dowling, W. J., Der Veen, M. V. ve Killion, J. D., 2001. The Effect of Simultaneously Developing Flow on Heat Transfer in Rectangular Tubes, Heat Transfer Engineering, 22, 6, 12-25.
- Gupta, M. K., Sharma, D. S. ve Lakhera, V. J., 2016. Vapor Bubble Formation, Forces, and Induced Vibration: A Review, Applied Mechanics Reviews, 68, 3, 1-12.
- Hamdar, M., Zoughaib, A. ve Clodic, D., 2010. Flow boiling heat transfer and pressure drop of pure HFC-152a in a horizontal mini-channel, International Journal of Refrigeration, 33, 3, 566-577.
- Harirchian, H. S. ve Garimella, S. V., 2009. Effects of channel dimension, heat flux, and mass flux on flow boiling regimes in microchannels, International Journal of Multiphase Flow, 35, 4, 349-362.
- Harirchian, T. ve Garimella, S. V., 2008. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 15-16, 3724–3735.
- Huo, X., Chen, L., Tian, Y.S. ve Karayiannis, T.G., 2004. Flow boiling and flow regimes in small diameter tubes, Applied Thermal Engineering, 24, 1225–1239.
- Jacobi, A. M. ve Thome, J. R., 2002. Heat Transfer Model for Evaporation of Elongated Bubble Flows in Microchannels, Journal of Heat Transfer, 124, 1131-1136.
- Kaew-On, J., Sakamatapan, K. ve Wongwises, S., 2011. Flow boiling heat transfer of R134a in the multiport minichannel heat exchangers, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 2, 364–374.
- Kandlikar, S. G., 2000. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 26, 2-4, 389-407.
- Kandlikar, S. G., 2006. Effect of Liquid-Vapor Phase Distribution on the Heat Transfer Mechanisms during Flow Boiling in Minichannels and Microchannels, Heat Transfer Engineering, 27, 1, 4-13.
- Karayiannis, T. G. ve Mahmoud, M.M., 2017. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications, Applied Thermal Engineering, 115, 1372-1397.
- Keepaiboon, C. ve Wongwises, S., 2015. Two-phase flow patterns and heat transfer characteristics of R134a refrigerant during flow boiling in a single rectangular micro-channel, Experimental Thermal and Fluid Science, 66, 36–45.

- Kew, P. A. ve Cornwell, K., 1997. Correlations for the Prediction of Boiling Heat Transfer in Small Diameter Channels, Applied Thermal Engineering, 17, 8-10, 705-715.
- Kline, S. J. ve McClintock, F. A., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical Engineering, 73, 3-8, 1953.
- Lazarek, G. M. ve Black, S. H., 1982. Evaporative Heat Transfer, Pressure Drop and Critical Heat Flux in a Small Vertical Tube with R-113, International Journal of Heat and Mass Transfer, 25, 7, 945-960.
- Lee, H. J. ve Lee, S. Y., 2001. Heat transfer correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios, International Journal of Multiphase Flow, 27, 12, 2043-2062.
- Lee, P.S. ve Garimella S.V., 2008. Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Silicon Microchannel Arrays, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 3-4, 789-806.
- Li, J. M. ve Wang, B. X., 2003. Size Effect on Two-Phase Regime for Condensation in Micro/Mini Tubes, Heat Transfer-Asian Research, 32, 1, 65-71.
- Lim, T. W., You, S. S., Choi, J. H. ve Kim, H. S., 2015. Experimental investigation of heat transfer in two phase flow boiling, Experimental Heat Transfer, 28, 1, 23-36.
- Liu, D., Weng, X. ve Xu, X., 2011. Experimental study on the heat transfer coefficient of water flow boiling in mini/microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 7, 1392-1397.
- Mahmoud, M.M., Karayiannis, T.G. ve Kenning, D.B.R., 2014. Flow Boiling Pressure Drop of R134a in Microchannels Tubes: Experimental Results and Assessment of Correlations, Heat Transfer Engineering, 35, 2, 178-192.
- Markal, B., 2016. Mikrokanallarda Kaynamalı Akışın Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Markal, B., Aydın, O. ve Avcı, M., 2016. Effect of aspect ratio on saturated flow boiling in microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 90, 130-143.
- Megahed, A., 2012. Local flow boiling heat transfer characteristics in silicon microchannel heat sinks using liquid crystal thermography, International Journal of Multiphase Flow, 39, 55-65.
- Mehendale, S.S, Jacobi A.M. ve Shah R.K, 2000. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design, Applied Mechanics Reviews, 23, 7, 175-193.
- Mirmanto, M., 2014. Heat Transfer Coefficient Calculated Using a Linear Pressure Gradient Assumption and Measurement for Flow Boiling in Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 79, 269-278.

- Muzychka, Y. S. ve Yovanovich, M. M., 2004. Laminar Forced Convection Heat Transfer in the Combined Entry Region of Non-Circular Ducts, ASME Journal of Heat Transfer 126, 1, 54-61.
- Muzychka, Y. S. ve Yovanovich, M. M., 2009. Pressure Drop in Laminar Developing Flow in Noncircular Ducts: A Scaling and Modeling Approach, Journal of Fluids Engineering, 131, 11, 1-11.
- Naterer, G. F., 2002. Heat Transfer in Single and Multiphase Systems, CRC Press, Florida.
- Ong, C. L. ve Thome, J.R., 2011a. Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part1-Two-phase flow patterns and film thickness measurements, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 1, 37-47.
- Ong, C. L. ve Thome, J.R., 2011b. Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part2-Flow boiling heat transfer and critical heat flux, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 6, 873–886.
- Qu, W. ve Mudawar, I., 2003. Measurement and Prediction of Pressure Drop in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 13, 2737-2753.
- Qu, W. ve Siu-Ho, A., 2009. Experimental Study of Saturated Flow Boiling Heat Transfer in an Array of Staggered Micro-Pin-Fins, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 7-8, 1853-1863.
- Qu, W., Mudawar I., Lee, S.Y. ve Wereley, S.T., 2006. Experimental and Computational Investigation of Flow Development and Pressure Drop in a Rectangular Microchannel, Journal of Electronic Packaging, 128, 1-9.
- Saitoh, S., Daiguji, H. ve Hihara, E., 2005. Effect of tube diameter on boiling heat transfer of R-134a in horizontal small-diameter tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 23-24, 4973–4984.
- Sardeshpande, M. V. ve Ranade, V., 2013. Two-phase flow boiling in small channels: A brief review, Sadhana Indian Academy of Sciences, 38, 6, 1083-1126.
- Shah, R.K., 1978. Correlation for Laminar Hydrodynamic Entry Length Solutions for Circular and Noncircular Duct, Journal of Fluids Engineering, 100, 2, 177-179.
- Singh, S. G., Kulkarni, A., Duttgupta S. P., Puranik, B.P. ve Agrawal, A., 2008. Impact of aspect ratio on flow boiling of water in rectangular microchannels, Experimental Thermal and Fluid Science, 33, 1, 153–160.
- Soupremanien, U., Person, S. L., Favre-Marinet, M. ve Bultel, Y., 2011. Influence of the aspect ratio on boiling flows in rectangular mini-channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 35, 5, 797–809.

- Stephan, K. ve Preußer, P., 1979. Wärmeübergang und maximale wärmestromdichte beim behälter-sieden binärer und ternärer flüssigkeitsgemische, Chem. Ing. Tech., 51, 37.
- Tibirică, C. B. ve Ribatski, G., 2014. Flow patterns and bubble departure fundamental characteristics during flow boiling in microscale channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 152-165.
- Tong, L. S. ve Tang, Y. S., 1997. Boiling Heat Transfer and Two Phase Flow, Second Edition, Taylor and Francis, Washington.
- Tran, T. N., Wambsganss M. W. ve France, D. M., 1996. Small Circular and Rectangular Channel Boiling with Two Refrigerants, International Journal of Multiphase Flow, 22, 3, 485-498.
- Ulman, A. ve Brauner, N., 2007. The prediction of flow pattern maps in minichannels, Multiphase Science and Technology, 19, 1, 49-73.
- Wang, H., Wu, H., Wang, S. K., Hung, T. ve Yang R., 2013. A study of mini-channel thermal module design for achieving high stability and high capability in electronic cooling, Applied Thermal Engineering, 51, 1-2, 1144-1153.
- Wang, Y. ve Sefiane, K., 2012. Effects of heat flux, vapour quality, channel hydraulic diameter on flow boiling heat transfer in variable aspect ratio micro-channels using transparent heating, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 9-10, 2235-2243.
- Wang, Y. ve Wang Z., 2014. An overview of liquid vapor phase change, flow and heat transfer in mini- and micro-channels, International Journal of Thermal Sciences, 86, 227-245.
- Wang, Y., Sefiane, K. ve Harmand, S., 2012. Flow boiling in high-aspect ratio mini- and micro-channels with FC-72 and ethanol: Experimental results and heat transfer correlation assessments, Experimental Thermal and Fluid Science, 36, 93-106.
- Yu, W., France, D. M., Wambsganss, M. W. ve Hull, J. R., 2002. Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube, International Journal of Multiphase Flow, 28, 6, 927-941.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe CANDAN, 1991 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimi bu ilde tamamladı. 2009 yılında KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2014 yılında bu bölümden mezun olup, aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2015 yılından itibaren KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

