

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA
AKIŞ KAYNAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Girayhan ARSLAN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

2019

Her hakkı saklıdır



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA AKIŞ KAYNAMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Girayhan ARSLAN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2019

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA AKIŞ KAYNAMA
KARAKTERSİTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY danışmanlığında, Girayhan ARSLAN tarafından hazırlanan bu çalışma 13/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kadir BAKIRCI *İmza* :

Üye : Prof. Dr. M. Akif CEVİZ *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY *İmza* :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından “Mikrokanallı Isı Alıcılarda Yüzey Pürüzlülüğünün Akış Kaynama Karakteristiklerine Etkilerinin Belirlenmesi” başlıklı ve 117M223 nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

13/09/2019

Girayhan ARSLAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA AKIŞ KAYNAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Girayhan ARSLAN

Erzurum Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

Mikrokanallarda kaynamalı akış ısı transferi açısından yüksek performans potansiyeline sahip olmasına karşın, kaynama prosesi sırasında görülen akış kararsızlıkları, basınç dalgalanmaları ve yüksek basınç düşümü mikrokanalların endüstriyel olarak yaygınlaşmasının önünde en büyük engellerden biridir. Kanal boyutlarının küçük olması kabarcıkların kanal içerisinde büyümesini engelleyerek akış doğrultusunda kanal boyutlarıyla sınırlandırılmış uzayan kabarcıkların oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum ise akış kaynama sırasında kabarcık oluşum dinamiğini, akış rejimlerini, ısı transfer karakteristiklerini ve basınç düşümünü önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu çalışmada, mikrokanallı ısı alıcılarda kanal yüksekliğinin kaynamalı akış ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kanal yüksekliğinin ($H=300\ \mu\text{m}$ ve $H=450\ \mu\text{m}$) yanısıra, farklı ısı akısı ve kütle akıların da kaynamalı akışta kabarcık oluşum dinamiği, ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkileri zamana bağlı değişimleri inceleyebilen mikro PIV sistem kullanılarak incelenmiştir.

2019, 57 sayfa

Anahtar Kelimeler: Akış kaynama, Isı transferi, Mikrokanal, PIV

ABSTRACT

MS. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW BOILING CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR MICROCHANNELS

Girayhan ARSLAN

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Eyüphan MANAY

Although boiling flow in microchannels has high performance potential in terms of heat transfer, flow instabilities, pressure fluctuations and high pressure drop during the boiling process are one of the major obstacles to the industrial expansion of microchannels. The small size of the channel prevents the growth of the bubbles in the channel and causes the formation of elongated bubbles limited by the channel dimensions in the flow direction. This significantly changes the bubble formation dynamics during flow boiling, flow regimes, heat transfer characteristics and pressure drop. In this study, the effects of channel height on the boiling flow heat transfer and pressure drop characteristics of microchannel heat sinks were investigated experimentally. In addition to the channel height ($H = 300 \mu\text{m}$ and $H = 450 \mu\text{m}$), the effects of different heat flux and mass fluxes on the bubble formation dynamics, heat transfer and pressure drop in the boiling flow were investigated using a micro PIV system.

2019, 57 page

Keywords: Flow boiling, Heat transfer, Microchannel, PIV

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü fedakârlığı gösteren bilgi ve tecrübesini esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY'a en samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan ve bana oldukça fazla zaman ayıran Sayın Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında bilgilerini benimle paylaşan değerli arkadaşlarım Makine Yüksek Mühendisi İbrahim ATEŞ ve Emre MANDEV'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamı "Mikrokanallı Isı Alıcılarda Yüzey Pürüzlülüğünün Akış Kaynama Karakteristiklerine Etkilerinin Belirlenmesi" başlıklı ve 117M223 nolu proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

"Mikrokanallı Isı Alıcılarda Yüzey Pürüzlülüğünün Akış Kaynama Karakteristiklerine Etkilerinin Belirlenmesi" başlıklı ve 117M223 nolu proje ile yüksek lisans proje bursiyeri olarak verdiği destekten dolayı da TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiğim aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Girayhan ARSLAN

Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Kaynama	2
1.2.1. Mikrokanallarda Kabarcık Oluşum Prosesi	3
1.2.2. Havuz Kaynama	5
1.2.3. Kaynamalı Akış ve Akış Desenleri	6
2. KAYNAK ÖZETLERİ	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM	18
3.1. Materyal	18
3.1.1. Deney Sisteminde Kullanılan Cihazlar ve Teknik Özellikleri.....	21
3.2. Yöntem.....	29
3.2.1. Deneysel Hesaplamalar	29
3.2.2. Kaynamalı Akış Şartlarında Isı Transferi ve Basınç Kaybı	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	35
4.1. Kaynama Eğrileri	35
4.2. Isı Taşınım Katsayısı.....	37
4.3. Basınç Düşümü	40
4.4. Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları.....	43
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A_{ch}	Kanal Kesit Alanı (m ²)
A_p	Isı Alıcı Taban Alanı (m ²)
A_t	Mikrokanalların Toplam Isı Transfer Alanı (m ²)
$C_{p,L}$	Akışkan Özgül Isısı (J/kg°C)
D_h	Hidrolik Çap (m)
f_{sp}	Fanning Sürtünme Faktörü
G	Kütle Akısı (kg/m ² s)
h	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² °C)
h_{tp}	Kaynamalı Akış Şartlarında Yerel Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² °C)
i_{Lv}	Buharlaşma Gizli Isısı (J/kg)
H	Mikrokanal Yüksekliği (m)
K_c	Kesit Daralması Kayıp Katsayısı
k_c	Bakır Blok Isı İletim Katsayısı (W/m°C)
k_f	Akışkanın Isı İletim Katsayısı (W/m°C)
l_a	Bakır Blok Üst Yüzey ve Termoeleman Arasındaki Uzaklık (m)
L	Mikrokanal Uzunluğu (m)
L_{sp}	Tekfazlı Bölge Uzunluğu (m)
\dot{m}	Kütlesel Debi (kg/s)
Nu	Nusselt Sayısı
P_0	Hazne Çıkış Basıncı (Pa)
$P_{ch,0}$	Mikrokanal Çıkış Basıncı (Pa)
q	Isı Akısı (W/m ²)
q_{loss}	Kayıp Isı (W)
q''_{eff}	Efektif Isı Akısı (W/m ²)
q''_w	Duvar Isı Akısı (W/m ²)
R	Isıl Direnç (W/°C)
$T_{yüzey}$	Katı Yüzey Sıcaklığı (°C)
T_{doyma}	Doyma Sıcaklığı (°C)

T_i	Kanal Giriş Sıcaklığı (°C)
T_o	Kanal Çıkış Sıcaklığı (°C)
T_m	Ortalama Sıcaklık Değeri (°C)
$T_{sat,0}$	Doyma Sıcaklığı (°C)
$T_{w,n}$	Mikrokanal Taban Yüzeyinin Ortalama Sıcaklığı (°C)
x	Kuruluk Derecesi
V	Gerlim (Volt)
v_L	Akışkanın Özgül Hacmi (m ³ /kg)
W_{ch}	Mikrokanal Genişliği (m)
\dot{V}	Hacimsel Debi (m ³ /s)
Ω	Direnç (Ohm)
$\Delta T_{aşım}$	Kızma Farkı (°C)
ΔT_{lm}	Ortalama Logaritmik Sıcaklık Farkı (°C)
ΔP_{sp}	Tek Fazlı Bölge Boyunca Oluşan Basınç Kaybı (Pa)
ΔP_{e1}	Kesit Genişlemesi Basınç Değişimi (Pa)
ΔP_{e2}	Kesit Genişlemesi Basınç Değişimi (Pa)
ΔP_{ch}	Kanal Boyunca Meydana Gelen Basınç Düşümü (Pa)

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
PIV	Particle Image Velocimetry

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Mikro Yapılı Sistemler: (a) Mikroakışkan Çip, (b) Mikro Basınç Sensörü.....	1
Şekil 1.2. Kabarcık Oluşum Süreci	4
Şekil 1.3. Kabarcık Oluşum Süreci (a) Makrokanal, (b) Mikrokanal	4
Şekil 1.4. Suyun 1 Atm Basınçtaki Kaynama Eğrisi	5
Şekil 1.5. Dikey Bir Kanaldaki Kaynamalı Akışta Isı Transfer Bölgeleri ve Akış Desenleri	7
Şekil 1.6. Yatay Bir Kanaldaki Kaynamalı Akışta Isı transfer Bölgeleri ve Akış Desenleri	8
Şekil 3.1. Deney Sistemi Şeması	8
Şekil 3.2. Deney Sistemi	9
Şekil 3.3. Test Bölgesi Detayları	20
Şekil 3.4. Hioki LR8402-20 Data Kartı	21
Şekil 3.5. WiseCircu WCR-P8 Sirkülatörlü Su Banyosu	22
Şekil 3.6. Hioki 3333 Power Hister Güç Analizörü	24
Şekil 3.7. Siemens Sitrans F C Mass 2100 DI 3-15 Kütleli Debimetre	25
Şekil 3.8. Longer WT3000-1JB Mikro Dişli.....	25
Şekil 3.9. Leica M165-FC Mikroskop.....	26
Şekil 3.10. Dantec Speed Sense Lab M310 Hızlı Kamera	27
Şekil 4.1. Farklı Kütle Akıları İçin Isı Akısının Kızma Farkıyla Değişimi (H=300 µm)	36
Şekil 4.2. Farklı Kütle Akıları İçin Isı Akısının Kızma Farkıyla Değişimi (H=450 µm)	36
Şekil 4.3. Farklı Kütle Akıları İçin Isı Taşınım Katsayısının Isı Akısıyla Değişimi (H=300 µm)	38
Şekil 4.4. Farklı Kütle Akıları İçin Isı Taşınım Katsayısının Isı Akısıyla Değişimi (H=450 µm)	38
Şekil 4.5. Farklı Kütle Akıları İçin Isı Taşınım Katsayısının Çıkış Kuruluk Derecesiyle Değişimi (H=300 µm).....	39
Şekil 4.6. Farklı Kütle Akıları İçin Isı Taşınım Katsayısının Çıkış Kuruluk Derecesiyle Değişimi (H=450 µm).....	39

Şekil 4.7. Farklı Kütle Akıları İçin Basınç Düşümünün Isı Akısıyla Değişimi (H=300 µm)	41
Şekil 4.8. Farklı Kütle Akıları İçin Basınç Düşümünün Isı Akısıyla Değişimi (H=450 µm)	41
Şekil 4.9. Farklı Kütle Akıları İçin Basınç Düşümünün Çıkış Kuruluk Derecesiyle Değişimi (H=300µm).....	42
Şekil 4.10. Farklı Kütle Akıları İçin Basınç Düşümünün Çıkış Kuruluk Derecesiyle Değişimi (H=450µm).....	42
Şekil 4.11. G=100 kg/m ² s ve q=65W İçin Bir Periyottaki Akış Desenleri.....	43
Şekil 4.12. Paralel Mikrokanallarda Aynı Anda Farklı Akış Koşullarının Varlığı.....	44
Şekil 4.13. G=300 kg/m ² s ve q=60W İçin Bir Periyottaki Akış Desenleri.....	45
Şekil 4.14. G=200 kg/m ² s ve q=70W İçin Bir Periyottaki Akış Desenleri.....	45
Şekil 4.15. G=300 kg/m ² s ve q=50W İçin İleri-Geri Yönlü Ara Yüz Hareketleri	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

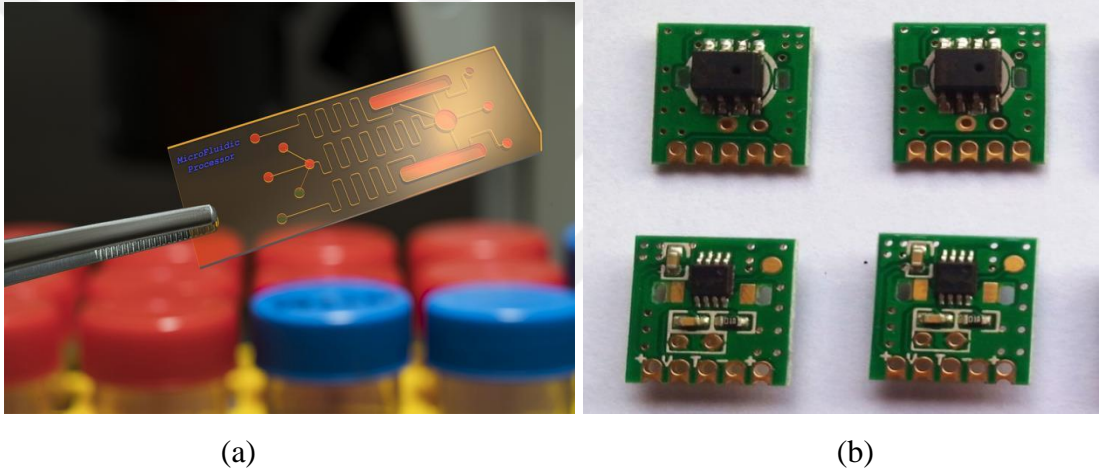
Çizelge 3.1. Hioki LR8402-20 Data Kartı Teknik Özellikleri	22
Çizelge 3.2. WiseCircu WCR-P8 Sirkülatörlü Su Banyosu Teknik Özellikleri	23
Çizelge 3.3. Hioki 3333 Power Hister Güç Analizörü Teknik Özellikleri.....	24
Çizelge 3.4. Siemens Sitrans F C Mass 2100 DI 3-15 Kütlesel Debimetre Teknik Özellikleri.....	25
Çizelge 3.5. Longer WT3000-1JB Mikro Dişli Pompa Teknik Özellikleri	26
Çizelge 3.6. Leica M165-FC Mikroskop Teknik Özellikleri	27
Çizelge 3.7. Dantec Speed Sense Lab M310 Hızlı Kamera Teknik Özellikleri.....	28



1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Günümüzde haberleşme, uzay endüstrisi, otomotiv, tıp, havacılık, bilgisayar teknolojileri ve benzeri alanlarda kullanılan sistemlerin boyutları giderek küçülmektedir. Mikro sistemler; üretim maliyetlerinin ve hammadde ihtiyacının azaltılması, yüksek performans ve kapasite, yer ve zaman açısından kazanç sağladıklarından dolayı birçok alanda tercih edilmektedir. Farklı uygulamalarda kullanılan bazı mikro yapıları sistemler Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Mikroakışkan Çip (a) (Anonim 2018), Mikro Basınç Sensörü (b) (Anonim 2017).

Bunun yanı sıra yoğun fiziksel ve işlevsel kapasite, yüksek ısı üretimi ve ısı akısına neden olmaktadır. Elektronik ve mekanik sistemlerin sorunsuz bir şekilde kullanılabilmesi için, açığa çıkan ısının sistemden güvenli bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir (Markal 2016).

Bu noktada, mikrokanaallarda kaynamalı akış, iletim, doğal taşınım veya tek fazlı zorlanmış taşınım gibi klasik ısı transferi yöntemlerine nazaran daha yüksek ısı transfer performansı sağladığı için daha etkili bir yöntemdir.

Kaynama ile ısı transferinin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüze sıcaklıkları arasındaki değişim minimal düzeyde olduğu için, ısı gerilme azalır; böylece cihazın performansı ve kullanım süresi artar.
- Sistemdeki ısıyı uzaklaştırmak için yüksek akışkan debilerine ihtiyaç duyulmaz. Buharlaşıma gizli ısısından faydalanılarak ısı düşük debilerle sistemden uzaklaştırılır.
- Yüksek ısı transfer katsayılarına ulaşılır ve sistemin ısı transfer performansı artar (Karayiannis ve Mahmoud 2016; Candan 2017).

Mikro kanalların kullanım alanları göz önüne alındığında, kanal boyutları önemli bir rol oynamaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte her geçen gün, sistemlerde kullanılan mikro kanalların boyutları küçülmekte ve daha karmaşık bir hal almaktadır. Mikro kanallardaki kaynamalı akışın verimli bir şekilde incelenebilmesi ve kanal geometrik parametrelerinin ısı transferine etkisinin gözlemlenebilmesi için deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada farklı kanal yüksekliklerine sahip mikro kanalların akış kaynama karakteristiklerine etkisi detaylı olarak incelenecektir.

1.2. Kaynama

Günümüzde artan üretim imkânları ile birlikte gelişen elektronik cihazların boyutlarında fark edilebilir oranda küçülmeye gidilmiştir. Teknolojik sistemlerdeki bu küçülme, mikro ölçeklerde ısınma problemini ortaya çıkarmıştır. Isının mikro boyuttaki sistemlerden uzaklaştırılabilmesi için geleneksel tek fazlı ısı iletim yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Kaynamalı akış sırasında faz değişimi meydana geldiğinden yüzeyler üzerinden daha yüksek oranda ısı transfer edilmektedir. Yüksek ısı aktarımının gerektiği sistemlerde tek fazlı ısı transferi yerine kaynamalı akışta ısı transferi daha efektif olmaktadır (Manay 2017).

Kaynama, bir katı-sıvı ara yüzeyinde sıvının, doyma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktaki bir katı yüzeyle teması sonucu olan bir faz değiştirme işlemidir. Kaynama ile ısı transferi göz önüne alındığında ısı transferi bir katı yüzey ve bitişindeki hareketli akışkan yoluyla meydana geldiği için, taşınım yoluyla gerçekleşir. Katı yüzeyden akışkana olan kaynama ısı akısı Newton soğuma kanunu ile açıklanabilir (Çengel 2012).

$$q'' = h(T_{yüzey} - T_{doyma}) = h\Delta T_{aşım} \quad (1.1)$$

Burada; $\Delta T_{aşım}$ kızma farkını, $T_{yüzey}$, katı yüzey sıcaklığını, T_{doyma} , sıvı basıncına karşılık gelen doyma sıcaklığını temsil eder (Çengel 2012).

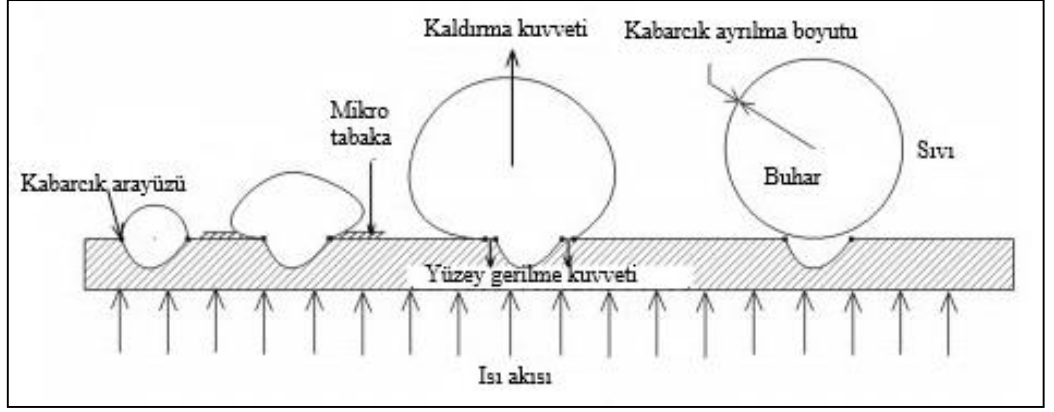
Kaynama akışkan hareketine bağlı olarak havuz kaynaması ve akış kaynaması olarak iki ana grupta incelenmektedir. Havuz kaynamasında akışkan hacmi hareketsizdir ve akışkan hareketi doğal taşınım ile meydana gelir. Kaynamalı akışta ise akışkan bir dış araçla, ısıtılan kanaldan harekete zorlanır. Akışkanın yığın sıcaklığı dikkate alındığında kaynama; aşırı soğutulmuş kaynama ve doymuş kaynama şeklinde gruplandırılır. Sıvı hacmin sıcaklığı doyma sıcaklığından düşükse aşırı soğuk, akışkan sıcaklığı doyma sıcaklığına eşitse doymuş kaynama olarak adlandırılır (Incropera vd 2001).

1.2.1. Mikrokanallarda Kabarcık Oluşum Prosesi

Bir sıvı içerisinde buhar kabarcığı oluşumuna kabarcık çekirdeklenmesi (*bubble nucleation*) adı verilmektedir (Gupta vd. 2016). Kabarcık oluşumu, bir katı-sıvı ara yüzeyinde (ısıtılmış bir kanal ve temas halindeki akışkan) kabarcıklaşma odaklarında meydana gelmektedir. Mikrokanallarda kabarcık oluşum süreci ve kanal boyutlarının kaynamalı akışa etkileri konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Burada, geçmişte yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

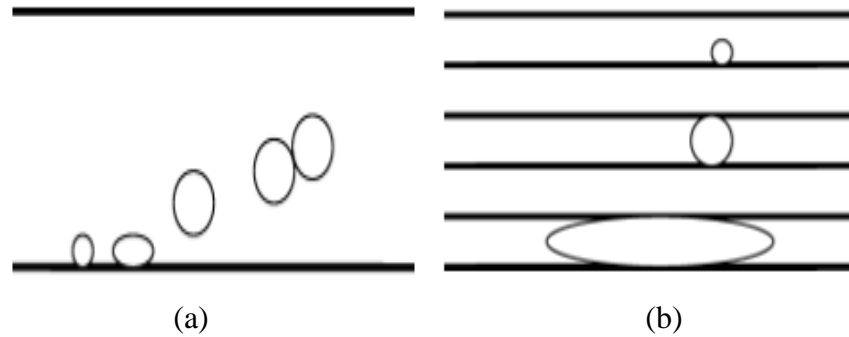
Gupta vd. (2016) yaptıkları çalışmada kabarcık oluşum sürecini incelemişlerdir. İlk olarak, kabarcık arayüzünde, kabarcık bir yarım küre formunda oluşur ve hacim kazanmaya başlar. Isı akısının artmasıyla birlikte sıvı-katı ara yüzeyinde bir mikro tabaka oluşur ve kabarcık kanal yüzeyinde genişler. Yüzey gerilim kuvveti ve kaldırma kuvveti etkilerinden dolayı oluşan kabarcık şekil almaya başlar. Son aşamada, kabarcığa etki eden kuvvetler arasındaki eşitlikten dolayı, kabarcık yüzeyden ayrılma boyutuna kadar büyür ve yüzeyden ayrılır. Ayrılma olayı gerçekleştikten sonra mikrokanallarda oluşan bu kabarcıklar birleşirler. Bu çevrim sürekli tekrarlanır ve sonuç olarak, kabarcıklı ve halkasal akış oluşur. Yukarıda bahsedilen kabarcık oluşum süreci Şekil 1.2’de verilmiştir.

1. GİRİŞ



Şekil 1.2. Kabarcık Oluşum Süreci (Gupta vd. 2016)

Havuz kaynama koşullarında, kabarcıklanma odaklarında başlayan kabarcıkların boyutları büyüme hızı ile ters orantılıdır. Kabarcık büyüdükçe, büyüme hızı azalır ve bir noktadan sonra kabarcıklar yüzeyden ayrılır. Yüzeyden ayrılan kabarcıklar birbirleri ile etkileşim gösterirler ve akış meydana getirirler. Isıtılmış yüzeyden ayrılan bu kabarcıkların fiziksel davranışları, kanal çaplarına bağlı olarak mikro ve makro ölçeklerde değişmektedir (Kandlikar 2006). Mikro ve makrokanallardaki kabarcıklanma süreci, kanal çaplarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Makro kanallarda, kabarcık temas halinde olduğu ısıtılmış duvar yüzeyi ile etkileşime girmektedir. Buna karşın, mikro ölçekli kanallarda kabarcık büyür ve bulunduğu kanalın şeklini almaya başlar. Ayrıca, kabarcık ısıtılmış diğer kanalların yüzeyine temas eder. Bu sayede, ısı transfer katsayısı artar. Makro ve minikanallardaki kabarcık oluşum süreci şekil 1.3’de verilmiştir.



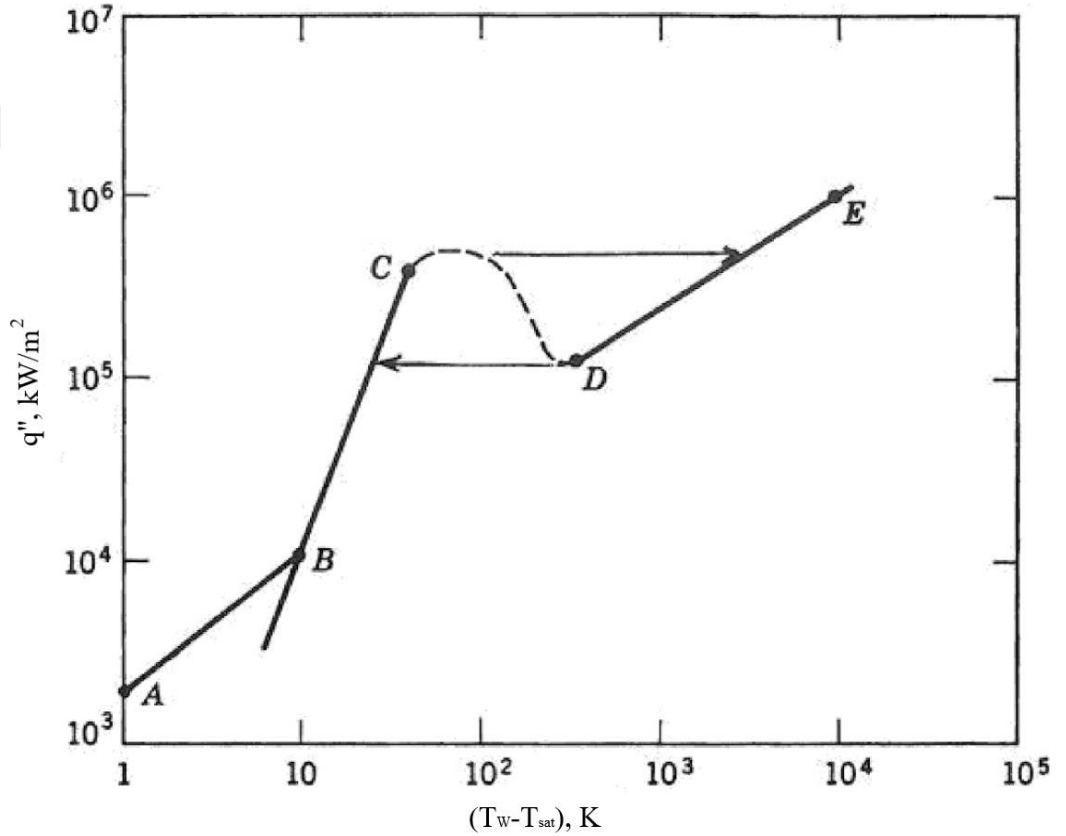
Şekil 1.3. Kabarcık oluşum süreci (a) makrokanal, (b) mikrokanal (Kandlikar 2006)

1.2.2 Havuz Kaynama

Hareketsiz bir akışkan hacminin, yüzeyleri ısıtılmış bir kap veya tank içerisinde kaynaması olayına havuz kaynama adı verilmektedir. Akışkan hacmi hareketsiz olduğundan dolayı, doğal taşınım ve kaldırma kuvveti etkileri ön plana çıkmaktadır. Havuz kaynama türleri şu şekilde sıralanabilir;

- doğal taşınım kaynaması,
- kabarcıklı kaynama,
- geçiş kaynaması
- film kaynaması

Yukarıda belirtilen havuz kaynama çeşitlerinin daha iyi kavranabilmesi için 1 atm basınçtaki suyun kaynama eğrisi Şekil 1.4’de verilmiştir.



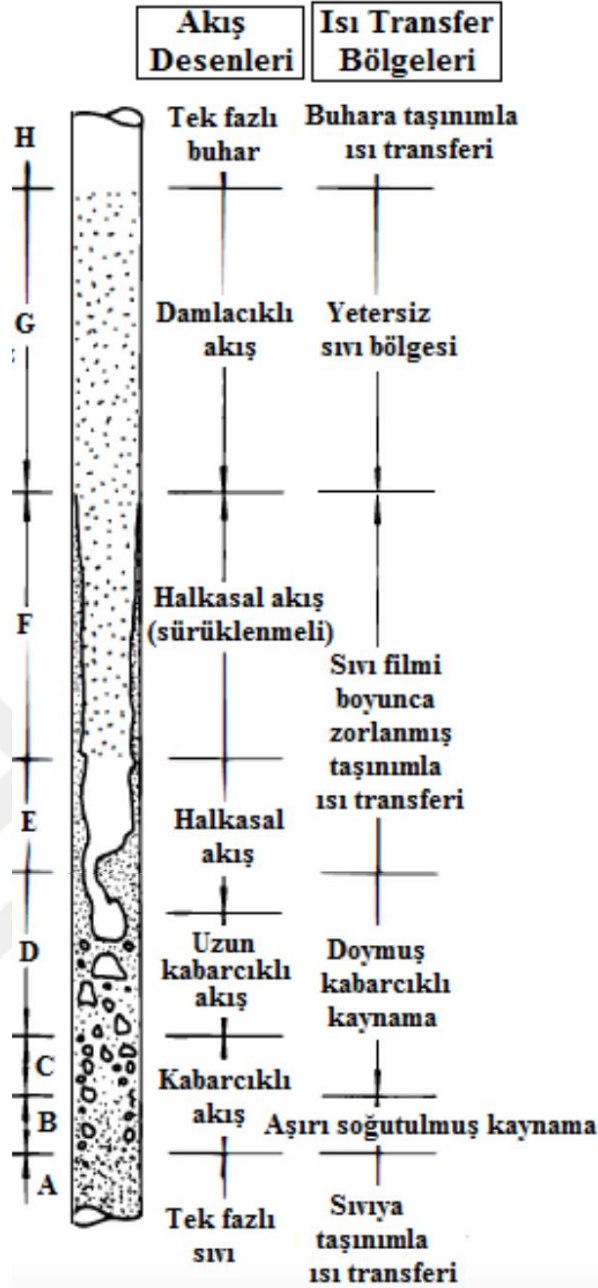
Şekil 1.4. Suyun 1 atm Basınçtaki Kaynama Eğrisi (Tong ve Tang 1997)

- A-B: Doğal taşınım kaynaması
- B-C: Kabarcıklı kaynama
- C-D: Geçiş kaynaması
- D-E: Film Kaynaması

A-B bölgesi arasında yüzeyden akışkana ısı transferi doğal taşınım yoluyla meydana gelmekte ve akışkan hacmin sıcaklığı giderek artmaktadır. B noktasına gelindiğinde ilk kabarcıklar oluşmaya başlar ve B-C aralığında kabarcık oluşumu devam eder. Kabarcıklar yüzeye doğru yükselir. Oluşan kabarcıklar sıvının kinetik enerjisi artırır ve ısı transfer hızının artmasına katkı sağlar. Bu bölgede sıcaklık arttıkça daha fazla sayıda kabarcık oluşur, bir süreden sonra oluşan kabarcıklar birbirleriyle etkileşim yapar ve birleşirler. Kabarcık yoğunluğunun çok fazla artması yüzey yakınlarında akışkan hareketini önler. Akışkan serbest yüzeyi yeteri kadar ısıtılmaz ve yüzey sıcaklığı aniden artar. Sıcaklık C noktasında en yüksek değerine ulaşır ve bu noktaya maksimum ısı akısı adı verilir. C-D bölgesinde yüzey kısmen buharla kaplanır. Bu bölgede koşullar, kabarcıklı ve film kaynaması arasında salınım yapmaktadır. C-D arasına sıcaklık atışına rağmen ısı akısı düşer ve D noktasına minimum ısı akısı değerine ulaşılır. Bu noktaya *Leidenfrost* noktası denir ve bu noktada yüzey tamamen buharla kaplanır. D noktasından sonra yüzey buharla örtülüdür ve ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşir (Tong ve Tang 1997; Markal 2016).

1.2.3. Kaynamalı Akış ve Akış Desenleri

Akışkan yığın hareketinin söz konusu olduğu kaynama türüne kaynamalı akış veya akış kaynaması adı verilmektedir. Kaynamalı akışta, akışkan bir pompa yardımıyla ısıtılmış mikrokanal içerisinde hareket ettirilir. Mikrokanal içerisinde sıvı ve buhar fazları birlikte bulunur. Buhar ve sıvı fazlarının bir arada olması sistemde farklı akış rejimleri ve desenleri oluşmasına neden olur. Kaynamalı akışın fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması için akış desenleri ile ısı transfer bölgeleri arasındaki ilişkinin açıklanması gerekmektedir. Kaynamalı akıştaki akış desenleri ve ısı transfer bölgeleri (dik kanal) Şekil 1.5' de verilmiştir.



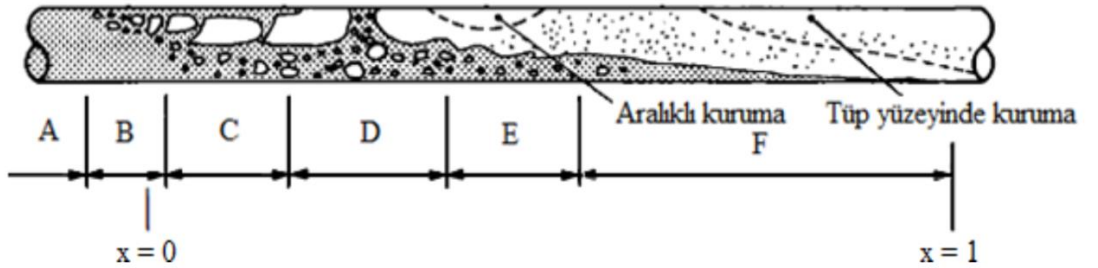
Şekil 1.5. Dikey bir kanaldaki kaynamalı akışta ısı transfer bölgeleri ve akış desenleri (Collier ve Thome 1994).

Akışkan test bölgesine doyma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta girdiği için A bölgesinde kaynama gerçekleşmez. A bölgesinde; akışkan tek fazlı sıvı halinde olduğundan dolayı ısı transferi taşınım yoluyla gerçekleşmektedir. B bölgesinde; duvar sıcaklığı artmaya başlar ve bir noktadan sonra sıvının doyma sıcaklığını geçer. Duvar ve akışkan arasındaki sıcaklık farkı, kabarcıklaşma odalarında kabarcık oluşumuna neden olur. C bölgesine gelindiğinde, sıvı sıcaklığı ve doyma sıcaklığı eşitlenir. Bu durum,

1. GİRİŞ

kabarcıklaşma odaklarında oluşan kabarcıkların yüzeyden ayrılmalarına neden olur. D bölgesinde kabarcıklar arasında etkileşim meydana gelir ve bu bölgede uzun kabarcıklı akış desenleri oluşur. E bölgesinde sıvı-buhar ara yüzeyinde buharlaşma meydana gelir. Buhar hızına bağlı olarak, akış kanal merkezinde toplanır ve akış deseni halkasal bir form almaya başlar. Bu bölgede zorlanmış taşınım ile ısı transferi etkileri hissedilmeye başlanır. F bölgesinde akışkanın kinetik hızı artmaya devam eder ve sıvı duvar yakınlıklarına, buhar ise merkeze doğru yönelim gösterir. G bölgesinde sıvı faz etkisini kaybetmeye başlar. Bu yüzden bu bölgeye yetersiz sıvı bölgesi adı verilmektedir. H bölgesine gelindiğinde, sıvı faz tamamen ortadan kalkar ve yerini buhar fazına bırakır (Markal 2016).

Akış rejimleri ve akış desenleri, yerçekimi etkilerinden dolayı dik ve yatay konvansiyonel kanallarda farklılıklar göstermektedir. Şekil 1.5'te düşey konumdaki bir kanalın akış deseni davranışı incelenmiştir. Şekil 1.6'da ise yatay bir mikrokanaldaki akış desenleri gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Yatay bir kanaldaki kaynamalı akışta ısı transfer bölgeleri ve akış desenleri (Collier ve Thome 1994).

Kanal boyutları arasındaki farklılıklar, akışın fiziksel mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. Mikrokanal çapı ile yerçekimi kuvvetinin etkileri arasında doğru bir orantı vardır. Kanal çapı küçüldükçe, yerçekimi kuvvetinin etkileri azalır. Bundan dolayı, akış daha homojen bir form alır ve katmanlaşma ortadan kalkar.

Akış deseni farklılıkları, akış türleri ve kanal boyutlarının akışın fiziksel mekanizmasına etkileri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Harirchian ve

1. GİRİŞ

Garimella (2009) aynı yükseklikte (400 μm) ve farklı genişlikteki (100-5850 μm) kanalları kullanarak yaptıkları deneylerde, beş farklı akış deseni belirlemişlerdir.

Bunlar:

- Kabarcıklı akış
- Uzun kabarcıklı akış
- Çalkantılı akış
- İplikçikli - halkasal akış
- Halkasal akış.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Qu ve Mudawar (2003), iki fazlı mikrokanallı ısı alıcılarda kritik ısı akısı değerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Deneylerde $215 \mu\text{m} \times 821 \mu\text{m}$ kesit alanına sahip 21 adet mikrokanal ve iş akışkanı olarak su kullanılmıştır. Kütleli akı değerleri $86\text{-}368 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve şirış sıcaklıkları $30\text{-}60^\circ\text{C}$ arasındadır. Kritik ısı akısına yaklaşıldığında akış kararsızlıklarının buhara neden olduğu ve küçük kütleli akılarda giriş sıcaklığının etkisini kaybettiği gözlemlenmiştir.

Hestroni vd.(2006), üç farklı hidrolik çaptaki paralel üçgen kesitli mikrokanallarda (220 , 130 ve $100 \mu\text{m}$) periyodik akış şartlarında su ve etanolün kaynama durumlarını incelemişlerdir. Çalışılan buhar kalitesi aralığı $0.01\text{-}0.008$ ve ısı akısı aralığı $120\text{-}270 \text{ kW/m}^2$ dir. İlk sıvı film kalınlığı artan ısı akışı ile azalmış ve sıvı film kalınlığı minimum değerine ulaştığında kritik ısı akısı görülmüştür.

Huh ve Kim (2006), akış kaynama karakteristiklerini dikdörtgen geometrili yatay bir kanalda, yüksek hızlı kamera kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Mikro ölçekli ısı transfer mekanizmalarının daha anlaşılır olması için kabarcık davranışları gözlemlenmiştir. Kütle akısının, ısı akısının ve buhar kalitesinin kaynamalı akış karakteristiklerine etkisi incelenmiştir.

Wojtan vd. (2006), soğutucu kütle hızı, ısıtılmış uzunluk, doyma sıcaklığı ve giriş soğutma sıvısının bir fonksiyonu olarak, $0,5$ ve $0,8 \text{ mm}$ iç çaplı, paslanmaz çelik kanallarda doymuş kritik ısı akısı değerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. İş akışkanı olarak R-134a ve R245fa kullanılmıştır. Deneylerde kritik ısı akısının, kütleli hıza, ısıtılmış uzunluğa ve mikrokanal hidrolik çapına bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Sıvı aşırı soğutma sıcaklığının kritik ısı akısı değerini etkilemediği belirtilmiştir.

Agostini vd. (2008), çapları $223 \mu\text{m}$ ve birbirine paralel 67 mikrokanal içirinde akan R236fa iş akışkanı için doymuş kaynama koşullarında kritik ısı akısı sonuçları elde etmişlerdir. Giriş aşırı soğutma ve doyma sıcaklığının kritik ısı akısına etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Kütleli akı değerinin artması kritik ısı değerini artırmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Barber vd. (2009), eş zamanlı ısıtma ve görselleştirme teknikleri kullanarak 727 μm çapındaki dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. Yüksek hızlı kameralar ile görüntüler elde edilirken sıcaklık profillerini kaydetmek için kızıl ötesi kamera kullanmışlardır. Mikrokanallarda kaynamalı akış şartlarında gözlemlenen akış rejim değişikliklerinin zamanın bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Harirchian ve Garimella (2009), yükseklikleri aynı (400 μm), genişlikleri 100-5850 μm arasında değişen mikrokanallarda kütle akısının ve kanal boyutlarının kaynamalı akışa etkilerini incelemişlerdir. İş akışkanı olarak FC-72 kullanmışlardır. Yüzey ısı akısı değeri sabit tutulduğunda, mikrokanal çapındaki azalmayla birlikte basınç düşümü gözlenmiştir. Kaynamada, dar kanallarda kabarcık oluşumunun sınırlandırıldığı buna karşın geniş kanallarda kabarcıklı kaynama etkileri tam olarak gözlemlenmiştir.

Kuo ve Peles (2009), akış kaynama düzensizlikleri üzerindeki basınç etkilerini 223 μm paralel mikrokanallarda, 86-520 kg/m^2 ısı akısı aralığında incelemişlerdir. İş akışkanı olarak deiyonize su kullanmışlardır. Kabarcık çekirdeklenme sürecinin başlatılması için kızma farklılıklarının oluşturulması gerektiğini ve kabarcık ayrılma çapının azalmasıyla birlikte kabarcık gelişimindeki düzensizliklerin azalacağını belirtmişlerdir.

Roday ve Jensen (2009), çapları 0,286-0,7 mm arasında değişen mikrokanallarda akış kaynama esnasında su ve R-123 akışkanlarının kritik ısı akısı değerlerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Kritik ısı akısı değerini etkileyen parametreleri kütleli akı, mikrokanal uzunluğu, kanal çapı, çıkıştaki basınç ve sıvının aşırı soğutulması olarak belirlenmiştir.

Celata vd. (2010), çapı 480 μm olan yatay ve dairesel kesitli mikrokanalda ısı transfer karakteristiklerini yüksek hızlı kamera yardımıyla deneysel olarak analiz etmişlerdir. 150 kW/m^2 ısı akısı ve 1500 kg/m^2 kütleli akı değeri aşıldığında halka/dairesel, tıkaç/dairesel ve halka/sisli akış rejimleri gözlemlenmiştir.

Krishnamurthy ve Peles (2010), hidrolik çapı 222 μm olan mikrokanallarda kabarcıklı kaynama şartlarında ısı transferini incelemişlerdir. Akış görselleştirme teknikleri kullanılarak çoklu ve halkalı akış formları elde edilmiştir. Artan ısı akısıyla beraber kabarcık ayrılma boyutu ve hızı artmıştır.

Mauro vd. (2010), 191 μm genişlik ve 756 μm derinliğe sahip 29 adet mikrokanaldan oluşan bakır bir ısı alıcı kullanmışlardır. Kritik ısı akışına, aşırı soğutmanın çok fazla bir etkisi olmadığı fakat kütleli akının doğrudan etki ettiği belirtilmiştir.

Park ve Thome (2010), düşük basınçlı soğutucularda (R134a, R236fa ve R245fa) bakır mikronallar kullanarak doymuş kritik ısı akısı değerlerini incelemişlerdir. Deneysel olarak 467 μm genişliğinde 20 adet ve 199 μm genişliğinde 29 adet mikrokanal kullanılmıştır. Kütleli hız değerlerinde bütün soğutucu akışkanların kritik ısı akısı değerlerinin aynı olduğu fakat kritik ısı akısı ve basınç düşümü dikkate alındığında R134a'nın diğer soğutucu akışkanlardan daha efektif olduğu söylenmiştir.

Balasubramanian vd. (2011), akış kaynama deneylerini düz ve genişleyen mikrokanallarda gerçekleştirmişlerdir. 25 mm \times 25 mm ölçülerinde bakır plaka üzerine genişliği 300 μm derinliği 1200 μm olan mikrokanallar yerleştirilmiştir. İki fazlı akış şartlarında genişleyen mikrokanallarda kütle debisinin artması basınç kayıplarının azalmasına neden olmuştur. Aynı çalışma şartlarında genişleyen mikrokanallardaki basınç kayıpları düz mikrokanallara göre %30 daha azdır.

Chen ve Garimella (2011), herbiri 100 μm genişlikte ve 389 μm derinlikte toplam 60 adet paralel mikrokanal kullanarak kaynamalı akış şartlarında basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Akışkan debisinde meydana gelen artış kritik ısı akısı değerini artırmıştır ve basınç düşümü artan ısı akısıyla beraber artış göstermiştir. Akış rejimindeki düzensizlikler ortalama ısı transferini artırmıştır.

Celata vd. (2012), yaptıkları çalışmada 0,48 mm çap ve 73 mm uzunluğa sahip bir mikrokanalda FC-72 akışkanı kullanarak akış kaynama karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Boru çapı azaldıkça, aralıklı akış rejiminin doymuş kaynamadan aşırı soğuk kaynamaya doğru yöneldiği gözlemlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Lagus ve Kulacki (2012), hidrolik çapı 451 μm olan 13 adet mikrokanal kullanarak kabarcık oluşumu ve iki fazlı ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Temel akış rejimi kabarcıklanma ve buhar tıkaç akışın genişlemesiyle meydana gelmiştir. Kabarcık büyümesinin zamanın 1/3 kuvvetine bağlı olduğu ifade edilmiş ve kabarcık gelişimi ve büyümesini Weber sayısı ile ilişkilendirilmiştir.

Park vd. (2012), çapları 61 μm ve 278 μm olan dikdörtgen geometrili mikrokanallarda kütle ve ısı akısı ilişkisini FC-72 iş akışkanı kullanarak incelemişlerdir. Isı akısı değerleri 0,6-45,1 kW/m^2 ve kütle akısı değerleri $G=188-1539 \text{ kg/m}^2\text{s}$ aralığındadır. Buhar kalitesi ve kütle akısının artmasıyla beraber basınç düşümü artmıştır. Basınç düşüşünün etkili nedenlerinden birinin sürtünme kuvvetleri olduğu belirtilmiştir.

Wang ve Sefiane (2012), üç farklı çaptaki mikrokanallarda (571, 762 ve 1454 μm) farklı en/boy oranları kullanarak kaynamalı akışta ısı transferi etkilerini incelemişlerdir. Temel akış rejimleri, halkalı akış ve tıkaç-halka akışıdır ve etkili ısı transfer mekanizması taşınım yoluyla ısı transferidir. Hidrolik çap ve yerel ısı transfer katsayısı arasında ters bir orantı vardır. Kütleli akı değerlerine ulaşılmasında hidrolik çap önemli bir rol oynamaktadır.

Balasubramanian vd. (2013), 300 μm genişlikte ve 1200 μm yükseklikteki mikrokanalları kullanarak farklı boyutlardaki (25 mm \times 25 mm ve 20 mm \times 10 mm) bakır gövdelerde akış kaynama karakteristiklerini gözlemlemişlerdir. Kütleli akı ve mikrokanal çıkışındaki kuruluk derecesinin basınç düşüşü ile doğru orantılı olarak değiştiği ortaya konulmuştur.

Morshed vd. (2013), alüminyum oksit (Al_2O_3) partiküllerinin suyun akış kaynama performansı üzerine etkisini 672 μm çaplı tek bir mikrokanalda deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarında, ısı transfer katsayısının normal yüzeylere oranla azaldığı fakat, nanopartiküllerin biriktiği yüzeylerde kritik ısı akısının %39 oranında artış gösterdiği ortaya konmuştur.

Zuhuan ve Wang (2013), 500 μm genişliğinde ve 150 μm derinliğe sahip mikrokanallar kullanmışlardır. Kabarcıklı kaynama şartlarında ısı transferi, konvektif

2. KAYNAK ÖZETLERİ

kaynama ve buharlaşma tarafından kontrol edilmektedir. Isı transfer katsayısı, ısı akısıyla birlikte önemli ölçüde artmıştır. Yarı dairesel ve halka şeklindeki akışlarda ısı transfer katsayıları ısı akısından bağımsızdır. Giriş alt soğutma değeri arttıkça ısı transferi azalmaktadır.

Kalani ve Kandlikar (2014), 162 µm derinliğe sahip bir mikrokanalda ve 10×10 mm² boyutlarında bakır çip üzerinde, suyun kaynamalı akışını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Maksimum ısı akısı 506 W/cm² olarak belirlenmiştir. Basınç düşümü plaka çipli manifold için 150 kPa, mikrokanal çipli konik yapıli manifold için 60 kPa olarak ölçülmüştür.

Law vd. (2014), eğik kanatli mikrokanallarda kaynamalı akış etkilerini 25×25 mm² lik toplam alana sahip bakır blok üzerine konumlandırılmış 40 adet mikrokanalda incelemiştir. Yapılan çalışmada uniform ısı akısı (6-12 W/cm²) ve kütleli akı (175 kg/m²-350 kg/m²) değeri dikkate alınarak basınç düşümü etkileri gözlemlenmiştir. Kütleli akı değeri arttıkça basınç düşümünün azaldığı belirtilmiştir.

Leao vd. (2014), 15 mm uzunluğa sahip 50 adet paralel mikrokanaldan oluşan bir ısı alıcısında, R407c iş akışkanı kullanarak kaynamalı akıştaki ısı transfer etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Sabit bir kuruluk derecesinde, ısı transferi kütleli akı ile birlikte artmıştır. Sistemin kuruluk derecesi 0,1 değeri aştığında, soğutma sıcaklık değeri etkisinin azaldığı belirtilmiştir.

Mahmoud vd. (2014), iş akışkanı R134a kullanarak paslanmaz çelikten yapılmış çapları aynı (0.52 mm) fakat dört farklı ısıtma uzunluğuna sahip (100, 150, 300 ve 450 mm) mikrotüplerde basınç düşümü deneyleri yapmıştır. Kütle akısı ve ısı akısındaki artışın basınç düşümünde artışa neden olduğu ve tüpün çapı büyüdükçe basınç düşümünün azaldığı görülmüştür.

Miner vd. (2014), mikrokanalların enine kesitini akış yönünde genişletmenin basınca etkilerini 31 adet farklı kanalda ve dört farklı genişleme açısında deneysel olarak incelemiştir. Mikrokanallardaki genişleme açısı ile basınç düşümü arasında ters bir orantı olduğu görülmüştür. Basınç düşümü etkilerinin ısı akısına olan bağılılığının düz kanallara nazaran daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Ritchey vd. (2014), homojen şekilde ısıtılmamış 35 adet mikrokanalda (genişlik 240 µm, derinlik 370 µm, kanatçık genişliği 110 µm) yerel ısı transfer ölçümleri yapmışlardır. İş akışkanı olarak FC-77 kullanılmıştır. Isı akısı uniform olmayan bir şekilde arttığında akış yönüne dik olarak konumlandırılmış ısıtıcılardan akışkana ısı transferi olmuştur. Sisteme uniform olmayan ısı girişi arttıkça yüzey sıcaklıkları artmıştır.

Tibiriça ve Ribatski (2014), mikrokanallarda akış kaynamasını yüksek hızlı akış görselleştirmelerini kullanarak incelemişlerdir. Araştırmada 0,4 mm çapında yatay bir mikrokanal kullanılmıştır. Mikrokanalda görülen temel akış şekilleri; kabarcıklı, tıkaç ve kuru buhar akışıdır. Bu rejimlerin bir arada görülmesinden dolayı çalakantılı akış olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu çalışmada kütleli akı ve yüzeyden kabarcık ayrılma çapı arasında ters orantı olduğu gözlemlenmiştir.

Wang vd. (2014), iki fazlı kaynamalı akışta basınç dalgalanmalarını ve akış kararsızlıklarını 571 µm, 762 µm, 1454 µm hidrolik çapa sahip mikrokanallarda deneysel olarak incelemişlerdir. Isı akısının kütle akısına oranının artması ve mikrokanallardaki hidrolik çap artışının, basınç dalgalanmalarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Kritik ısı akısı değerinin, akış şartlarına, termofiziksel özelliklere ve geometriye bağlı olduğu belirtilmiştir.

Yin vd. (2014), kabarcık sınırlandırması ve kabarcık büyümesi 120 mm ×30 mm boyutlarına bir bakır plaka üzerinde, 0,5 mm genişliğinde 1,0 mm yüksekliğinde mikrokanallar kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Kabarcığın yüzeyden ayrılma çapı mikrokanalın hidrolik çapından büyük ise kabarcık büyümesi sınırlandırılır. Serbest kabarcık büyümesi durumunda ise kabarcık büyüme hızı ısı akısıyla beraber artar.

Law ve Lee (2015), düz ve oblik kanatçıklı mikrokanallarda FC-72 dielektrik sıvı kullanarak akış kaynama deneyleri yapmışlardır. 25×25 mm den oluşan bakır bloklar üzerine 40 adet mikrokanal 27°C açılı bir şekilde paralel olarak yerleştirilmiştir. Deneylerde, kütle akısının artması kritik ısı akısının artmasına neden olmuştur. Oblik kanatçıklı mikrokanallarda kritik ısı akısı değerinin düz kanatçıklı mikrokanallardaki değerin 2,5-2,8 katı olduğu belirtilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Li vd (2015), 250 μm x 200 μm silikon mikrokanallarda iki fazlı kaynamalı akış şartlarında kritik ısı akısını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Kritik ısı akısı değeri $G=1350 \text{ kg/m}^2\text{s}$ için 1020 W/cm^2 olarak belirlenmiştir.

Lim vd. (2015), iki fazlı akış kaynama şartlarında, 500 μm çapındaki bir mikrokanalda ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelenmiştir. Isı akısının 100- 400 kW/m^2 arasında değiştiği belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, ısı transfer katsayısının kütle akısına ve buhar kalitesine bağlı olmadığını, ancak belirli bir dereceye kadar ısı akısına bağlı olduğunu göstermiştir.

Prajapati vd. (2015), 12 adet ve üç farklı konfigürasyona sahip mikronallarda (üniform, genişleyen ve kanatçıklı) kaynamalı akışta ısı transferini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Kütle akısı değerleri 100-350 $\text{kg/m}^2\text{s}$ ve ısı akısı değerleri 10–350 kW/m^2 arasındadır. Isı akısı ve soğutucu akışkan hızına bağlı olarak farklı akış rejimleri gözlenmiştir. Deneysel sonuçlar, kanatçıklı mikrokanalda ters akış rejimine rastlanmamıştır. Maksimum basınç düşümünde kanatçıklı mikrokanalda üniform kanada göre %3.5 artış, genişleyen mikrokanallara göre %3.5 artış gözlemlenmiştir.

Rao ve Peles (2015), hidrolik çapı 370 μm olan bir mikrokanalda, HFE 7000 akışkanı kullanılarak yüzey sıcaklığı ve ısı transfer katsayısının zamanla değişimini deneysel olarak incelemişlerdir. Isı transfer katsayısının periyodik olarak değiştiği ve kabarcık etkileşiminin ısı transfer katsayısını artırdığı belirtilmiştir. Isı transfer katsayısı kabarcıklanma odaklarında oluşan tek bir kabarcık için $19000 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken kabarcık etkileşimi ve birleşiminden sonra $19000 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak ölçülmüştür. Mikrokanalın sıvı faz ile ıslatılmasının kısa bir süreliğine ısı transfer katsayısını artırdığı belirtilmiştir.

Wang ve Peles (2015), aşırı soğuk kaynama şartlarında jet akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, 222 μm çapında bir adet mikrokanal kullanılmışlardır. Kaynama başlangıcında, kabarcıklı kaynamanın baskın geldiği gözlenmiştir. Isı transfer katsayısının ısı akısına bağlı olarak arttığı, kütle akısı ve jet etkilerinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

Buchling ve Kandlikar (2016), farklı genişliklere sahip kanallarda konik geometriler kullanımının ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Deneyleerde, iş akışkanı olarak etanol kullanılmıştır. % 6 eğime sahip konik geometrili mikrokanaal ve 80 mL/dk akış debisinde maximum ısı transferi elde edilmiştir. Isı akısının artmasıyla basınç düşümü arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneyleerde kritik ısı akısı değerine ulaşıldığında basınç kayıplarının maximum olduğu belirtilmiştir.

Markal vd. (2016), farklı en/boy oranına sahip mikrokanaallarda suyun, doymuş akış kaynama özelliklerine etkisini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmada, kritik en/boy oranı değeri 3,54 olarak belirlenmiştir. Isı transfer katsayısı bu noktaya kadar artmış daha sonra düşüşe geçmiştir.

Yin ve Jia (2016), 667 µm hidrolik çapa sahip tek bir mikrokanaal kullanarak sınırlandırılmış kabarcık büyümesini, deneysel olarak incelemiştir. Hidrolik çapın azalması kabarcık büyüme kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Mikrokanaal içerisindeki boşlukların boyutlarındaki değişimin kabarcık oluşum etkileri ve kabarcık gelişim hızını doğrudan etkilediği belirtilmiştir.

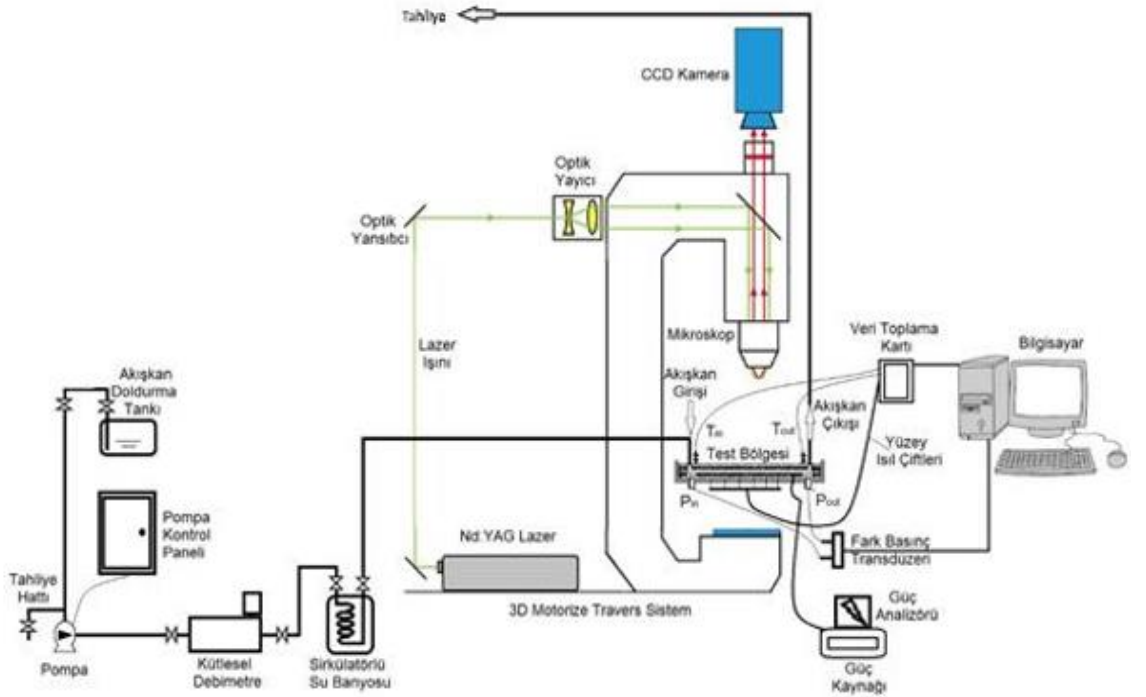
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında farklı yüksekliklerdeki (yükseklik $H=0.3$ mm ve $H=0.45$ mm) mikro kanalların akış kaynama karakteristiklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü deney sistemi şeması Şekil 3.1’de ve deney düzeneği resmi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu deney sistemi, Erzurum Teknik Üniversitesi, YÜTAM’da (Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) kurulmuştur.

Deney sistemi ekipmanları:

- Test bölgesi
- Akış sirkülasyon ünitesi
- Akış görüntüleme ünitesi
- Veri toplama ünitesi



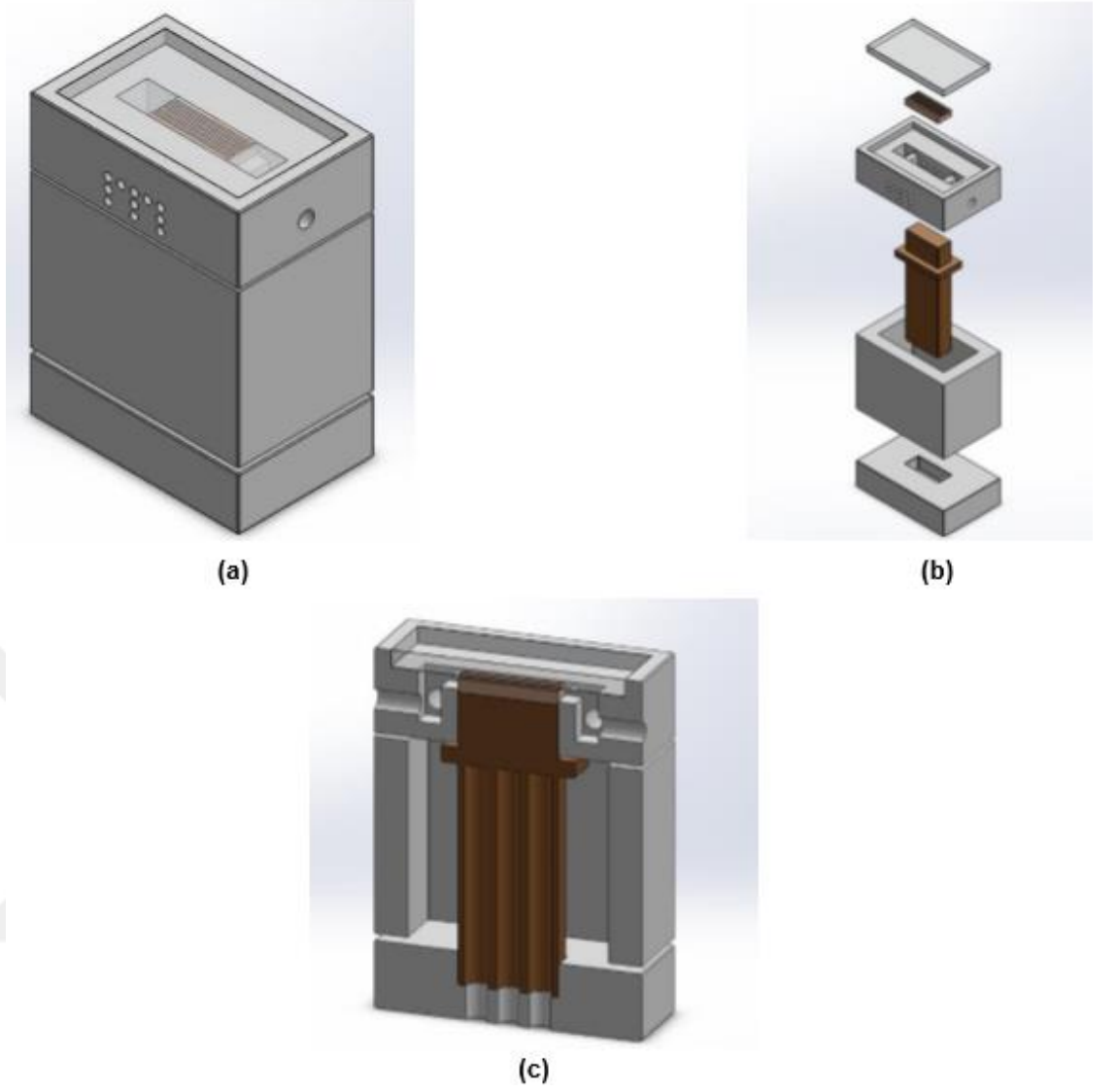
Şekil 3.1. Deney sistemi şeması



Şekil 3.2. Deney sistemi

Akışkan sirkülasyon ünitesi borular, mikrofiltre, sabit sıcaklık banyosu, debimetre ve pompadan oluşmaktadır. Sistemde akışkanı hareket ettirebilmek için bir adet dişli pompa kullanılmıştır. Sistemde, düşük akış hızlarında ve mikrokanal akış şartlarında çalışıldığı için, 0-10 l/h debi aralığında $\pm\%0.05$ hassasiyetle okuma yapabilen kütleli (coriolis) tip debimetre tercih edilmiştir.

Test bölgesinde, ısıtıcı kartuşlar mikrokanallara ısı akışı uygulamıştır. Bu bölgede ısıtıcı elemanlar haricinde, mikrokanal, termoelemanlar ve teflon malzemeler bulunmaktadır. Termoelemanlarla okunan sıcaklıklar bir veri kartı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılabilmektedir. Veri okuma için detayları deneysel ekipman bölümünde verilecek Hioki marka data kartı kullanılacaktır. Mikrokanallı ısı alıcı, ısıtıcılar, teflon malzeme ve yalıtım malzemesinden oluşan test bölgesi detayları Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Test bölgesi detayları

Deneylerde kullanılan mikrokanallar farklı hidrolik çaplarda ürettirilmiştir. Sıkıştırma blokları ve sızdırmazlık elemanları yardımıyla sistemin sızdırmazlığı sağlanmıştır. Test bölgesinin üst kısmında bulunan akışkanın giriş ve çıkıştaki sıcaklıklarını ölçmek için iki adet T-tipi ısı çifti kullanılmıştır. Ayrıca, giriş ve çıkış arasındaki diferansiyel basıncı ölçmek için basınç prizleri yerleştirilmiştir. Yüzey sıcaklıklarını ölçmede için kullanılan termoelemanlar için 22 adet delik açılmıştır.

Sisteme girecek akışkan sıcaklığını ayarlamak için sirkülatörlü su banyosu kullanılmıştır. Akışkan test bölgesinden çıktıktan sonra sistemden tahliye edilmektedir. Sistemde akışkan 30µm'lik filtreden geçerek debi ölçümü için kütleli debimetreye girmektedir. Daha sonra debimetreden çıkan akışkanın sıcaklığı su banyosunda ayarlanarak akışkan sisteme verilmektedir.

Kaynama süreci, çok hızlı gelişen bir fiziksel olaydır. Mikrokanal içerisinde kabarcık oluşum ve gelişim süreci ancak nanosaniye mertebelerinde incelenebilir. Bu tez çalışmasında, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM'da (Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) bulunan zamana bağlı analiz yapabilen ve üzerinde iki adet kamera (3600 fps, frame per second) bulunan mikro-PIV (Particle Image Velocimetry) cihazı kullanılmıştır.

3.1.1. Deney Sisteminde Kullanılan Cihazlar ve Teknik Özellikleri



Şekil 3.4. Hioki LR8402-20 Data Kartı (www.hioki.com)

Şekil 3.4'te gösterilen Hioki LR8402-20 Data Kartı kullanılarak deney bölgesi üzerinde farklı noktalardaki sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. 30 adet analog kanala sahip sistemde K tipi thermocouple kullanılmıştır. Data kartından elde edilen veriler bilgisayar yazılımı kullanılarak anlık olarak kaydedilebilmektedir. Nem, basınç, sıcaklık gibi parametrelerin ölçülebildiği sistem ± 100 V DC gerilim değerleri arasında çalışabilmektedir (Ceylan 2018).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.1. Hioki LR8402-20 Data Kartı Teknik Özellikleri (www.hioki.com)

Analog Giriş	30 kanal (U1-1'den U2-15'e) veya ek giriş birimleri ile 60 kanala kadar
Entegre Pulse Girişi	8 kanal (P1-P8)
Dijital Giriş	8 kanal (L1-L8)
Gerilim	± 10 mV ila ± 100 V, 1-5 V f.s. Maks. çözünürlük: 500 nV, (Kanallar arasında ve her
Sıcaklık: Termokupullar	-200 °C ila 2000 °C (sensöre bağlıdır), Termokupullar (K, J, E, T, N, R, S, B, W,) Maks. çözünürlük 0.01 °C,
Sıcaklık: Pt 100, Jpt 100 Sensör	-200 °C ila 800 °C, Maks. çözünürlük 0.01 °C,
Direnç	0 Ω ila 200 Ω f.s. Maks. Çözünürlük 0.5 m Ω , (Kanallar
Nem	% 5.0 ila 95.0 rh, çözünürlük % 0.1 rh, (Kanallar arasında veya her kanaldan
Maks. İzole Giriş Kanalları Arasındaki Anma Gerilimi	300 V DC
Maks. İzin Verilen Giriş	± 100 V DC
İzole Terminallerden Toprağa Maks. Nominal Gerilim	300 V AC, DC
Kayıt Aralıkları	100 ms ile 1 saat
Dijital Filtreler	Kapalı / 50 Hz / 60 Hz arasından seçim yapılabilir (kesme frekansı otomatik
Diğer fonksiyonlar	Dalga formu verilerini CF kartına veya USB belleğe gerçek zamanlı olarak kaydetme, sayısal değer hesaplamaları, dalga şekli hesaplamaları
Boyutlar ve Kütle	272 mm (10.71 inç) G \times 182,4 mm (7.18 inç) Y \times 66,5 mm (2,62 inç) D, 1,8 kg (63,5 ons), (Pil Paketi 370 g



Şekil 3.5. WiseCircu WCR-P8 Sirkülatörlü Su Banyosu (www.witec.de)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Deney sistemi girişindeki akışkan sıcaklığı Şekil 3.5’te verilen WiseCircu WCR-P8 Sirkülatörlü Su Banyosu kullanılarak ayarlanmaktadır. Akışkan sisteme girmeden önce su banyosu içerisindeki serpantinden geçirilerek istenilen sıcaklığa getirilmektedir. Sistemde kullanılan serpantin 2 m uzunluk ve 10 mm dış çapa sahip bakır borudan imal edilmiştir (Ceylan 2018).

Çizelge 3.2. WiseCircu WCR-P8 Sirkülatörlü Su Banyosu Teknik Özellikleri (www.witeg.de)

Boyut (G×D×Y)	Etkili Boşluk (mm)	180×143×150
	Banyo (mm)	180×310×150
	Dış (mm)	262×468×630
Kapasite		8 L
Isıtıcı		1 kW
Soğutma Kapasitesi	10 °C	1.5 kW
	0 °C	1.2 kW
	-20 °C	490 W
Dondurucu		245 W
Sıcaklık	Aralık	-20 °C ila 120 °C
	Doğruluk	±0.1 °C
	Üniformluk	-10 °C’de ±0.2 °C
	Sensör	PT100
Kontrol		Jog-Shuttle Anahtarı ile Dijital
Zamanlayıcı		99 sa 59 dk (Gecikme ve Sürekli)
Malzeme	İç	Paslanmaz Çelik
	Dış	Toz Boyalı Çelik
	İzolasyon	Polistiren (20 mm)
Pompa		15 L / dk
Kompresör Kontrolü		Kompresörün Aşırı Yüklenmesini Önlemek İçin
Soğutucu Akışkan		CFC’siz (404A) Soğutma
Güvenlik Ekipmanları		Hararet ve Aşırı Akım Koruyucu, Düşük Seviye
Güç tüketimi		1,6 kW
Bürüt Ağırlık		54 kg



Şekil 3.6. Hioki 3333 Power Hister Güç Analizörü (www.hioki.com)

Test bölgesinde sabit ısı akısı şartları manuel kontrollü güç kaynağı vasıtasıyla sağlanmaktadır. Sistemde güç kaynağı ile bütünleşik çalışabilen Hioki 3333 Power Hister Güç Analizörü (wattmetre) kullanılmaktadır. Bu güç analizörü aracılığıyla akım, gerilim değerleri ve sisteme verilen güç hassas bir biçimde kontrol edilebilmektedir (Mandev 2017).

Çizelge 3.3. Hioki 3333 Power Hister Güç Analizörü Teknik Özellikleri (www.hioki.com)

Ölçüm hatları	Tek fazlı 2 telli
Ölçüm öğeleri	Gerilim, Akım, Aktif güç, Görünen güç, Güç
Ölçüm aralığı	[Gerilim] 200 V AC (300 V Maks.) [Akım] 50/200/500 mA, 2/5/20 A AC (30 A Maks.) [Güç] 10.000 W ila 4.000 kW (Voltaj ve Akım)
Giriş Direnci	[Gerilim] 2.4 MΩ, [Akım] 7 mΩ veya daha az (doğrudan giriş)
Temel Doğruluk	[1 yıl garantili, Voltaj, Akım, Aktif güç] ±% 0,1 rdg. ±% 0.1 f.s. (45 Hz ila 66 Hz, 20 A veya daha az giriş akımı) [3 yıl garantili, Voltaj, Akım, Aktif güç] ±% 0,1 rdg. ±%
Yenileme Hızı	5 defa / sn
Frekans	45 Hz ila 5 kHz
Fonksiyonlar	Ölçeklendirme (VT, CT oranı ayarları), Ortalama
Arayüzler	RS-232C, GP-IB
Güç kaynağı	00 ila 240 V AC, 50/60 Hz, 20 VA maks.
Boyutlar ve kütle	160 mm (6,30 inç) G × 100 mm (3,94 inç) D × 227 mm (8,9 inç) Y, 1,9 kg (67,0 ons)



Şekil 3.7. Siemens Sitrans F C Mass 2100 DI 3-15 Kütlesel Debimetre (w3.siemens.com)

Test bölgesindeki akışkan debisinin sağlıklı bir biçimde belirlenebilmesi için Şekil 3.7’de verilen Siemens Sitrans F C Mass 2100 DI 3-15 kütlesel debimetre kullanılmıştır. Bu debimetre vasıtasıyla deney parametrelerinden biri olan Reynold sayısı istenilen değere getirilebilmektedir.

Çizelge 3.4. Siemens Sitrans F C Mass 2100 DI 3-15 Kütlesel Debimetre Teknik Özellikleri (w3.siemens.com)

Ölçüm Aralığı	0 ila 5600 kg/saat (0 ila 12345 lb/h)
Nominal Boyutu	DI 3'ten DI 15'e (1/8" ila 5/8")
Doğruluk	Debinin % 0,1'inden küçük
Nominal Basınç	Maks 410 bar (Maks 5946 psi)
Sıcaklık	-50 ila 180 °C arası (-58 ila 356 °F)



Şekil 3.8. Longer WT3000-1JB Mikro Dişli Pompa (www.longerpump.com)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Deney aşamasında akışkan sürekliliği, Longer marka frekans kontrollü mikro dişli pompa kullanılarak sağlanmaktadır. Mikro dişli pompa ile akışkan debisi hassas bir biçimde ayarlanabilmektedir. Akışkan debisindeki sapmalar yok denecek kadar azdır. Debi, pompa kontrol ünitesi sayesinde manuel olarak ayarlanabilmektedir (Mandev 2017).

Çizelge 3.5. Longer WT3000-1JB Mikro Dişli Pompa Teknik Özellikleri (www.longerpump.com)

Hız	300-3000 rpm
Hız Doğruluğu	±% 1.0
Hız Çözünürlüğü	1,0 rpm
Akışkan Debisi (ml/dk)	171.1 ~ 1714.3
Akışkan Sıcaklığı	-45 ~ 120
İletişim Arayüzü	RS485
Sıvıdaki Partikül Çapı	≤ 10µm
Maks. Çıkış Basıncı	MS204 için 1.4 MPa; MS209 için 0.9MPa; MS213
Sıvı Sıcaklığı	PEFE dişli ile -45 ila 50 °C; PEEK dişli ile -45
Akışkanlar Viskozitesi	≤ 200 cts
Harici Kontrol	Start/Stop kontrolü, hız kontrolü (0,5-5 V, 1-10 V, 4-20 mA, 1-10 kHz opsiyonel)
Güç Kaynağı	AC 220 / 110V ±% 20, 50Hz / 60Hz
Güç Tüketim	≤ 150 W
Çalışma Koşulu	Sıcaklık 0 ila 40 °C, Bağlı nem oranı < % 90
Kütlesi	5,1 kg
IP Derecesi	IP31
Boyutları (U×G×Y)	290×207×180 (mm)



Şekil 3.9. Leica M165-FC Mikroskop (www.leica-microsystems.com)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.6. Leica M165-FC Mikroskop Teknik Özellikleri

(www.leica-microsystems.com)

Yakınlaştırma	16.5:1
Standart Optik Verileri (1×objektif /10×oküler) - Yakınlaştırma Aralığı - Çözüm - Çalışma Mesafesi - Nesne Alanı	7.3× – 120× Maks. 453 lp/mm Ø 31.5mm – 1.92mm
Maksimum değerler (optik kombinasyona dayalı) - Büyütme - Çözünürlük - Görünür Yapısal Genişlik - Sayısal Diyafram - Nesne Alanı	960× 906 lp/mm 551 nm Ø 63 mm
Çalışma Mesafeleri	135 mm (0.5× planachromat) 112 mm (0.8× planachromat) 67 mm (0.63× planapochromat)
Özgül Yüzey Direnci	2×1,011 Ω/mm ² Deşarj süresi <
İnterpupiller Mesafe	50 mm –



Şekil 3.10. Dantec Speed Sense Lab M310 Hızlı Kamera (www.phantomhighspeed.com)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Kaynama çok hızlı gelişen bir fiziksel olduğundan dolayı mikrokanal içerisinde kabarcık oluşum ve gelişim prosesinin nanosaniye mertebelerinde incelenmesi gereklidir. Bunun için sistemde saniyede 3600 adet görüntü alabilen 2 adet Dantec Speed Sense Lab M310 yüksek hızlı kamera kullanılmıştır (Şekil 3.10). Elde edilen görüntüler PIV (Particle Image Velocimetry) ölçümlerinde kullanılan Dynamic Studio yazılımı ile işlenerek uygun çıktılara dönüştürülmüştür.

Çizelge 3.7. Dantec Speed Sense Lab M310 Hızlı Kamera Teknik Özellikleri
(www.phantomhighspeed.com)

Maksimum Çözünürlük	1280×800
Sensör Mpx	1 Mpx
Maksimum Çözünürlükte Maksimum FPS	3200 fps
Çıktı (Gpx/s)	3.2 Gpx/s
Sensör Boyutu	25.6 mm × 16.0 mm
Piksel Alanı	20 µm
Piksel Derinliği	12 bit
Minimum Poz	1 µs
İnterframe Zamanı	500 ns
ISO 12232 SAT	2000 D* Color 2000 T* Color 6400 D* Mono 16000 T Mono

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Deneysel Hesaplamalar

Mikrokanallarda kaynamalı akış şartlarında ısı güç, hacimsel debi, sıcaklık ve basınç olmak üzere dört temel etkeninin ölçülmesi gerekmektedir. Bahsedilen etkenlerin ölçümüne ait hesaplamalar ve yöntemler aşağıda verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda akışkanın mikrokanal giriş ve çıkışındaki sıcaklığının, aritmetik ortalaması dikkate alınmıştır. Isı alıcının birim kesit alanından geçen kütleli debi (kütle akısı, G),

$$G = \frac{\dot{V}}{A_{ch}} \quad (3.1)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Burada; \dot{V} , akışkanın hacimsel debisini, ρ_L , sıvı yoğunluğunu ve, A_{ch} kanalın kesit alanını ifade etmektedir. Isı alıcı taban yüzeyine uygulanan efektif ısı akısı (q''_{eff}) aşağıda verilmiştir.

$$q''_{eff} = \frac{\dot{q} - \dot{q}_{loss}}{A_p} \quad (3.2)$$

Burada; \dot{q} , ısıtıcılar tarafından sisteme uygulanan ısı gücü, \dot{q}_{loss} , ısı kaybını ve A_p , ısı alıcı taban alanını göstermektedir. Isı alıcı taban alanının (A_p) belirlenmesinde aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$A_p = LxW_T \quad (3.3)$$

Burada; L , kanal uzunluğunu ve W_T , ısı alıcının genişliğini ifade etmektedir. Mikrokanal taban yüzeyinin ortalama sıcaklığı ($T_{w,m}$), tek boyutlu ısı iletimi kabülü yapılarak hesaplanmaktadır.

$$T_{w,m} = T_m - q''_{eff} \left(\frac{l_a}{k_c} + \frac{l_b}{k_c} + R''_{t,c} \right) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki formülde; T_m , termoelemanlar vasıtasıyla belirlenen ortalama sıcaklık değerlerini, l_a , bakır blok üst yüzey ve termoeleman arasındaki uzaklığı, l_b , bakır bloğun ısı iletim katsayısını, l_b , mikrokanal taban yüzeyi ile ısı alıcın tabanı arasındaki uzaklığı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

ve $R''_{t,c}$, ısıtıcı yüzey ile kanal taban yüzeyi arasındaki ısı direnci göstermektedir. Duvar ısı akısı (q''_w) değeri, kanatçık analiz yöntemi kullanılarak,

$$q''_w = \frac{\dot{q} - \dot{q}_{loss}}{A_t} \quad (3.5)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. A_t , mikrokanalların toplam ısı transfer alanını teşkil etmektedir.

$$A_t = L(W_{ch} + 2H_{ch}) \quad (3.6)$$

W_{ch} , mikrokanal genişliği ve H_{ch} , mikrokanal yüksekliğidir. Tek fazlı kaynamalı akış şartlarında ortalama ısı taşınım katsayısının (h_{sp}) ve boyutsuz Nusselt sayısının hesaplanması aşağıda verilmiştir.

$$h_{sp} = \frac{q''_w}{\Delta T_{lm}} \quad (3.7)$$

$$Nu = \frac{h_{sp} D_h}{k_f} \quad (3.8)$$

Burada; ΔT_{lm} , ortalama logaritmik sıcaklık farkını, D_h , hidrolik çapı ve k_f , mikrokanal içerisindeki akışkanın ısı iletim katsayısını göstermektedir. Ortalama logaritmik sıcaklık farkı (ΔT_{lm}), aşağıda verilmiştir.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_0}{\ln(\Delta T_i / \Delta T_0)} \quad (3.9)$$

$$\Delta T_i = T_{w,m} - T_i \quad (3.10)$$

$$\Delta T_0 = T_{w,m} - T_0 \quad (3.11)$$

Burada; T_i , kanal giriş ve T_0 , kanal çıkış sıcaklıklarını göstermektedir. Kanal boyunca meydana gelen basınç düşümü (ΔP_{ch}), toplam basınç düşümünden, kesit

daralmalarından dolayı meydana gelen basınç kayıpları çıkartılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta P_{ch} = \Delta P_{tot} - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{e1}) \quad (3.12)$$

$$\Delta P_{c1} = \frac{v_{L,i}}{2} (G_{p2,i}^2 - G_{p1,i}^2) + \frac{K_{C1}v_{L,i}}{2} G_{p2,i}^2 \quad (3.13)$$

$$\Delta P_{c2} = \frac{v_{L,i}}{2} (G^2 - G_{p2,i}^2 + \left(\frac{K_{C2}v_{L,i}}{2}\right) G^2) \quad (3.14)$$

Burada; ΔP_{tot} , büyük haznelerde meydana gelen toplam basınç düşümünü, ΔP_{c1} , kesit daralmasına bağlı olarak büyük haznedeki küçük hazneye olan basınç kayıplarını, ΔP_{c2} , küçük haznedeki mikrokanala olan basınç kayıplarını ifade etmektedir. K_{C1} ve K_{C2} kesit daralması kayıp katsayılarını ifade etmektedir.

$$K_{C1} = 0,6740 + 1,2501\beta_{p2} + 0,3417\beta_{p2}^2 - 0,8358\beta_{p2}^3 \quad (3.15)$$

$$K_{C2} = 0,6740 + 1,2501\beta + 0,3417\beta^2 - 0,8358\beta^3 \quad (3.16)$$

$$\beta_{p2} = \frac{H_{P2}}{w_{P2}} \quad (3.17)$$

$$\beta = \frac{W_{ch}}{H_{ch}} \text{ ve ya } \frac{H_{ch}}{W_{ch}} \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.18)$$

Burada; küçük haznenin yüksekliği ve genişliği, sırasıyla H_{P2} ve w_{P2} ile gösterilmektedir. W_{ch} , mikrokanalın genişliğini ve H_{ch} , mikrokanal yüksekliğini ifade etmektedir. Mikrokanal çıkış bölgesinde kesit alanının genişlemesinden dolayı meydana gelen basınç kazanımları aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$\Delta P_{e2} = \frac{v_{L,0}}{2} (G_{p2,0}^2 - G^2 + \left(\frac{K_{e2}v_{L,0}}{2}\right) G^2) \quad (3.19)$$

$$\Delta P_{e1} = \frac{v_{L,0}}{2} (G_{p1,0}^2 - G_{p2,0}^2 + \left(\frac{K_{e1}v_{L,0}}{2}\right) G_{p2,0}^2) \quad (3.20)$$

$$K_{e2} = \left(1 - \frac{A_{ch}}{A_{p2}}\right)^2 \quad (3.21)$$

$$K_{e1} = \left(1 - \frac{A_{p2}}{A_{p1}}\right)^2 \quad (3.22)$$

Burada; mikrokanal kesit alanına bağlı olarak, ΔP_{e2} , mikrokanaldan küçük hazneye olan basınç kazanımını ve ΔP_{e1} , küçük haznedeki büyük hazneye olan basınç kazanımını ifade etmektedir. Kesit genişlemesi kazanım katsayıları K_{e2} ve K_{e1} olarak belirtilmiştir. Fanning sürtünme faktörü (f_{sp}),

$$f_{sp} = \frac{\Delta P_{ch} D_h}{2G^2 L v_L} \quad (3.23)$$

Şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, v_L , akışkanın özgül hacmini ifade etmektedir.

3.2.2. Kaynamalı Akış Şartlarında Isı Transferi ve Basınç Düşümü

Kaynamalı akış şartlarında yerel ısı taşınım katsayısı (h_{tp}), ısı akısı, yüzey ve yerel doyma sıcaklıkları dikkate alınarak,

$$h_{tp} = \frac{q''_w}{(T_{w,n} - T_{sat,n})} \quad (3.24)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada, q''_w , duvarı ısı akısı değerini belirtmektedir ve eşitlik (3.5)' te belirtildiği gibi hesaplanmaktadır. $T_{w,n}$, mikrokanal taban yüzeyinin ortalama sıcaklığını ve $T_{sat,n}$, yerel doyma sıcaklığını belirtmektedir. Mikrokanal taban yüzeyinin ortalama sıcaklığı ($T_{w,n}$),

$$T_{w,n} = T_n - q''_{eff} \left(\frac{l_a}{k_a} + \frac{l_b}{k_b} + R''_{t,c} \right) \quad (3.25)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, T_n , inci termoelemandan okunan sıcaklık değerini göstermektedir. İş akışkanı mikrokanal içerisine aşırı soğutulmuş şekilde girmektedir. İş akışkanının sıcaklığı doyma sıcaklığından küçük olduğu için mikrokanal içerisinde farklı faz formları gözlemlenebilmektedir. Kuruluk derecesin sıfır olduğu noktada tek fazlı ve doymuş sıvı-buhar bölgeleri ayrılmaktadır. Tek fazlı akışta bölge uzunluğu(L_{sp}),

$$L_{sp} = \frac{\dot{m}C_{p,L}(T_{sat,0}-T_i)}{q''_{eff}W_T} \quad (3.26)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada, \dot{m} , kütleli debiyi, $T_{sat,0}$, kuruluk derecesinin sıfıra eşit olduğu durumdaki doyma basıncını ve $C_{p,L}$, akışkanın özgül ısısını ifade etmektedir.

Tek fazlı bölge boyunca oluşan basınç kaybı(ΔP_{sp}),

$$\Delta P_{sp} = \frac{2f_{sp}G^2L_{sp}v_L}{D_h} \quad (3.27)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Kuruluk derecesinin sıfıra eşit olduğu durumdaki basınç($P_{w,xe=0}$),

$$P_{w,xe=0} = P_{ch,i} - \Delta P_{sp} \quad (3.28)$$

formülü ile belirlenmektedir. Burada, $P_{ch,i}$, kanal girişindeki basınç değerini ifade etmektedir. $P_{w,n}$, doymuş kaynama bölgesindeki yerel basıncı belirtmektedir ve

$$P_{w,n} = P_{w,xe=0} - \left(\frac{P_{w,xe=0} - P_{ch,0}}{L - L_{sp}} \right) (L_n - L_{sp}) \quad (3.29)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Yukarıdaki eşitlikte, L_n , mikrokanal girişi ile doyma basıncının hesaplanacağı nokta arası uzunluğu ve $P_{ch,0}$, kanal çıkışındaki basınç değerini göstermektedir. Yapılan hesaplamalarda, Mahmoud (2014), Markal(2016) ve Candan (2017) çalışmalarından yararlanılmıştır. Yerel kuruluk derecesi($x_{e,n}$),

$$x_{e,n} = \frac{\left(\frac{q''_w A_t L_n}{L} - \dot{m}c_{p,L}(T_{sat,n} - T_i) \right)}{\dot{m}i_{Lv}} \quad (3.30)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, i_{Lv} , buharlaşma gizli ısısını belirtmektedir. Mikrokanal çıkışında kuruluk derecesi ($x_{e,o}$),

$$x_{e,o} = \frac{(q''_w A_t - \dot{m} c_{p,L} (T_{sat,0} - T_i))}{\dot{m} i_{Lv}} \quad (3.31)$$

eşitliği ile belirtilir. Burada, $T_{sat,0}$, doyma sıcaklığının çıkıştaki basınca göre belirlenen değerini ifade etmektedir. Mikrokanal kesitinin daralması ve genişlemesi basınç kayıplarına veya kazanımlarına neden olmaktadır. Kanal girişindeki basınç ($P_{ch,i}$), bu etkiler göz önüne alınarak,

$$P_{ch,i} = P_i - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}) \quad (3.32)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. ΔP_{c1} ve ΔP_{c2} değerlerinin hesaplanmasına ilişkin formüller eşitlik (3.13) ve (3.14)'te verilmiştir. Hazne çıkışındaki basınç (P_0) ve mikrokanal çıkışındaki basınç ($P_{ch,0}$) değerlerinin belirlenmesinde aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$P_0 = P_i - \Delta P_{tot} \quad (3.33)$$

$$P_{ch,0} = P_0 + \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} \quad (3.34)$$

Mikrokanaldan küçük hazneye ve küçük haznedeki büyük hazneye olan basınç kazanımları sırasıyla ΔP_{e1} ve ΔP_{e2} aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_{e2} = \frac{v_{L,0} + x_{e,0} v_{Lg,0}}{2} (G_{p2,0}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} (v_{L,0} + x_{e,0} v_{Lg,0})}{2} G^2 \quad (3.35)$$

$$\Delta P_{e1} = \frac{v_{L,0} + x_{e,0} v_{Lg,0}}{2} (G_{p1,0}^2 - G_{p2,0}^2) + \frac{K_{e1} (v_{L,0} + x_{e,0} v_{Lg,0})}{2} G_{p2,0}^2 \quad (3.36)$$

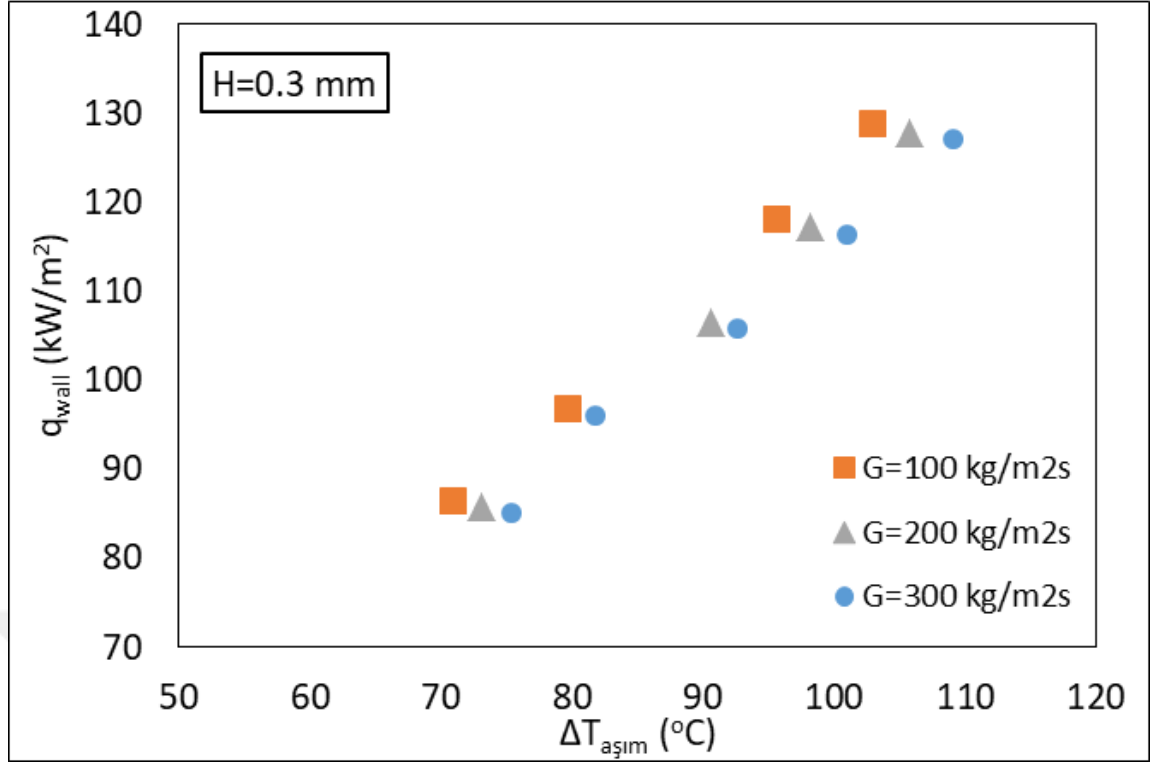
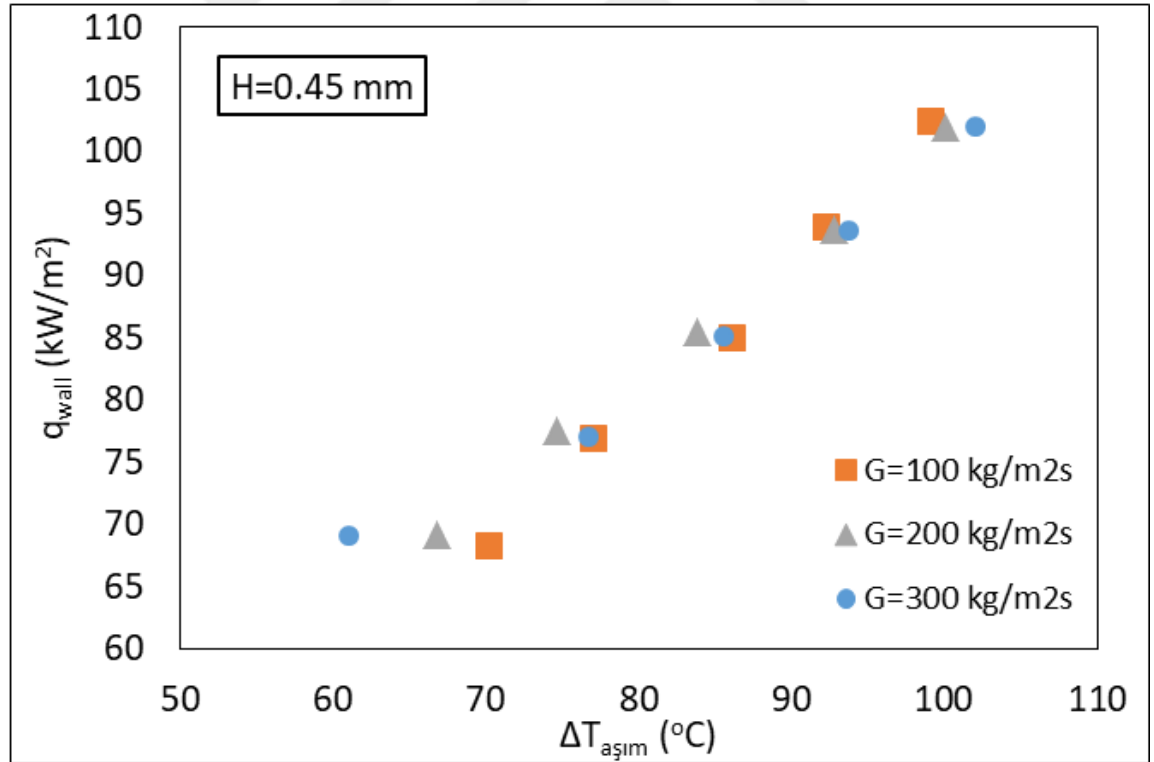
Literatürdeki çalışmalarda, kesit daralması veya genişlemesinin basınca etkisi bulunmaktadır. Collier ve Thome (1994), Lee ve Garimella (2008) ve Markal (2016).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada mikrokanallı ısı alıcılarda kanal yüksekliğinin kaynamalı akış ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü deney düzeneğinin şematiği materyal ve yöntem bölümünde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu deney düzeneği, Erzurum Teknik Üniversitesi, YÜTAM'da (YüksekTeknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) kurulmuştur. Farklı ısı akısı ve kütle akısı şartlarında gerçekleştirilen deneyler kaynamalı akış ısı transferi ve basınç düşümü açısından değerlendirilmiş, kaynama süreçleri parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği ile elde edilmiştir. Genişliği $w=300 \mu\text{m}$ olan dikdörtgen kesitli mikrokanalların yüksekliğinin ($H=300 \mu\text{m}$ ve $450 \mu\text{m}$) kaynama karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.1. Kaynama Eğrileri

Bütün kütleli akı değerleri için kaynama eğrilerinin eğimleri benzer bir davranış göstermiştir. Şekil 4.1 ve 4.2'deki kaynama eğrileri incelendiğinde, belli bir ısı akısında kütleli akıdaki artışla beraber kızma farkı değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum ısı transferinde taşınım kaynamasının etkin mekanizma olduğunu göstermektedir (Balasubramanian et al 2013; Markal et al 2016). Ayrıca artan ısı akısıyla bütün kütleli akı durumları için kızma farkında artış meydana gelmektedir. Kanal yüksekliğinin $450 \mu\text{m}$ 'den $300 \mu\text{m}$ 'ye düşürülmesi sabit bir ısı akısında kızdırma farkının %3,9 ile %9,3 oranında azalmasına neden olmuştur.

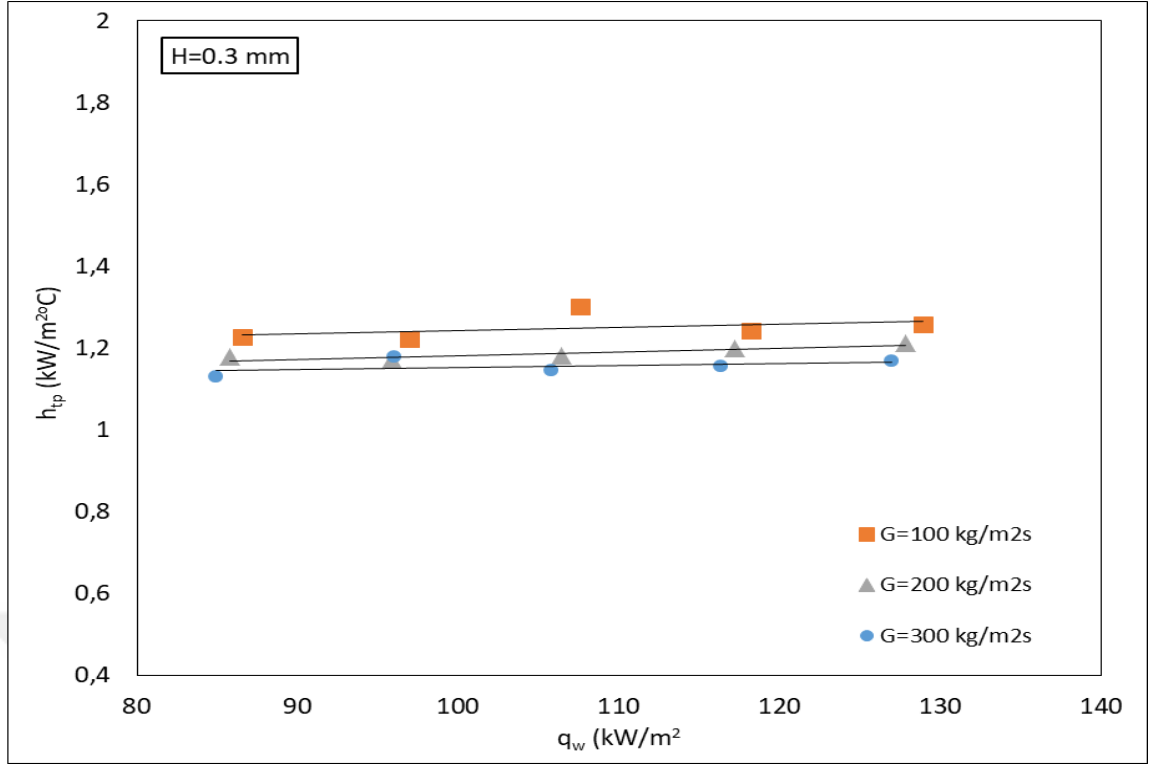
Şekil 4.1. Farklı kütle akıları için ısı akısının kızma farkıyla değişimi ($H=300$ μm)Şekil 4.2. Farklı kütle akıları için ısı akısının kızma farkıyla değişimi ($H=450$ μm)

4.2. Isı Taşınım Katsayısı

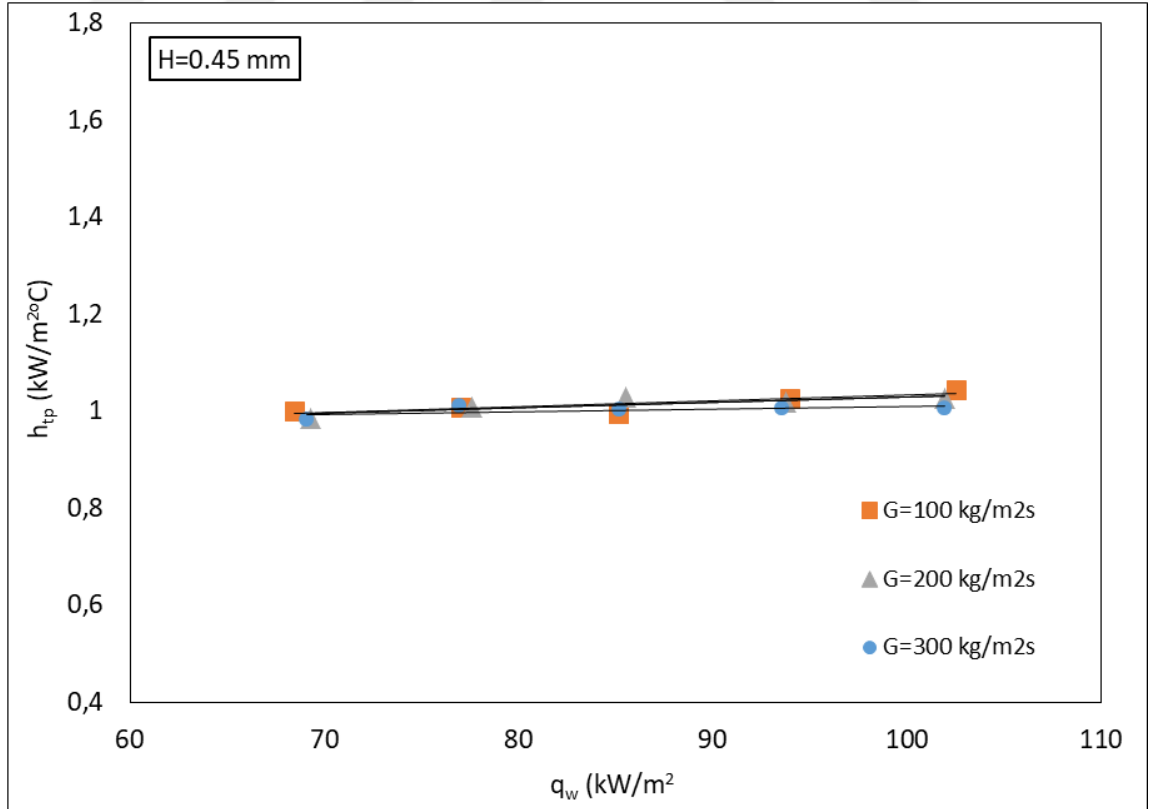
Şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da farklı kütle akısı durumları için hem 300 µm hem de 450 µm yüksekliğindeki ısı alıcılar için ısı taşınım katsayısının değişimi sunulmuştur. Şekillerden de görüldüğü üzere ısı taşınım katsayısının artan kütle akı ile azaldığı, artan ısı akısı ile arttığı görülmüştür. Zhuan ve Wang (2013) bu durumu artan kuruluk derecesi ile beraber kanal içerisinde görülen kısmi kuruma ile ilişkilendirirken, Qu ve Mudawar (2003) bu durumu taşınım kaynamasının bir göstergesi olduğunu ifade etmişlerdir. Kaynamalı akışlar kabarcıklı kaynama ve taşınım kaynama olmak üzere başlıca iki baskın ısı transfer mekanizması vardır. İki mekanizma, genel olarak, sırasıyla, kabarcık oluşumu ve ince sıvı filmi buharlaşması ile karakterize edilir. Yüksek kızma farkları nedeniyle, kanalın herhangi bir noktasında hızlı kabarcık büyümesi gerçekleşir.

Mikrokanallarda kanal boyutları küçük olduğundan kanal içinde kabarcık sınırlandırılır ve hem kanal girişine hem de kanal çıkışına doğru uzamaya başlar. Buharlaşma momentum kuvvetinin etkisiyle kabarcığın kanal girişine doğru uzaması kabarcıklaşmayı bastırır ve kanala giren sıvıya karşı direnç oluşturur. Bu durum, giriş basıncında artışa neden olur. Daha sonra, artan giriş basıncı, sıvı ataleti ve komşu kanallar arasındaki etkileşimin birleşik etkileri nedeniyle, uzun kabarcık, kanal çıkışına doğru itilir. Sıvı tamamen kanalı doldurur ve akış yolunu süpürür. Bu olay, sanki-periyodik bir biçimde tekrar eder. Kanal sıvı ile dolunca hızlı kabarcık büyümesi ile aniden uzun bir kabarcık oluşur. Bu aşamada akış deseni halkasal akış formundadır. Kanalın iç bölgesinde buhar; kanal duvarları ile buhar bölgesi arasında ise sıvı filmi vardır. Sıvı filmi hızlı bir şekilde buharlaşmaya başlar ve sırasıyla kısmî ve tam kuruma meydana gelir. Sonra, kanal tekrar sıvı ile dolar. Ana akış desenleri, uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır. Belirtilen olgular, genel karakteri temsil etmektedir. Isı akısı ve kütle akısı değerlerine ve kanallar arası etkileşime göre çalkantılı akış veya sisli akış görülebilmekte; ayrıca, bir periyot içindeki olayların süreleri değişebilmektedir.

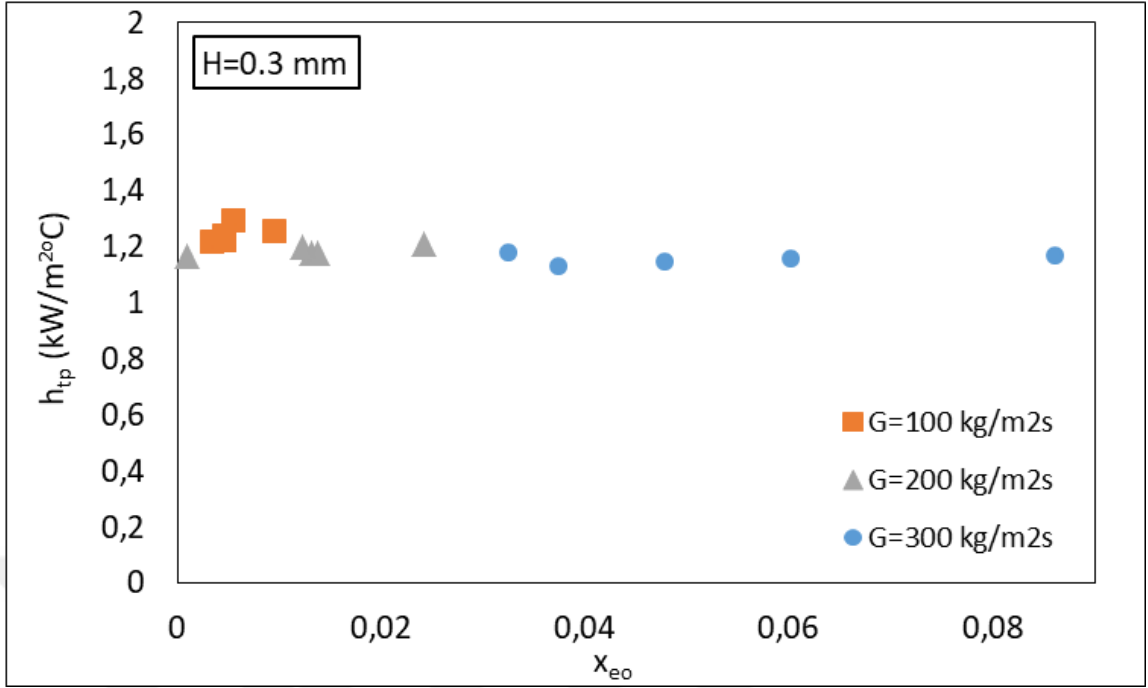
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



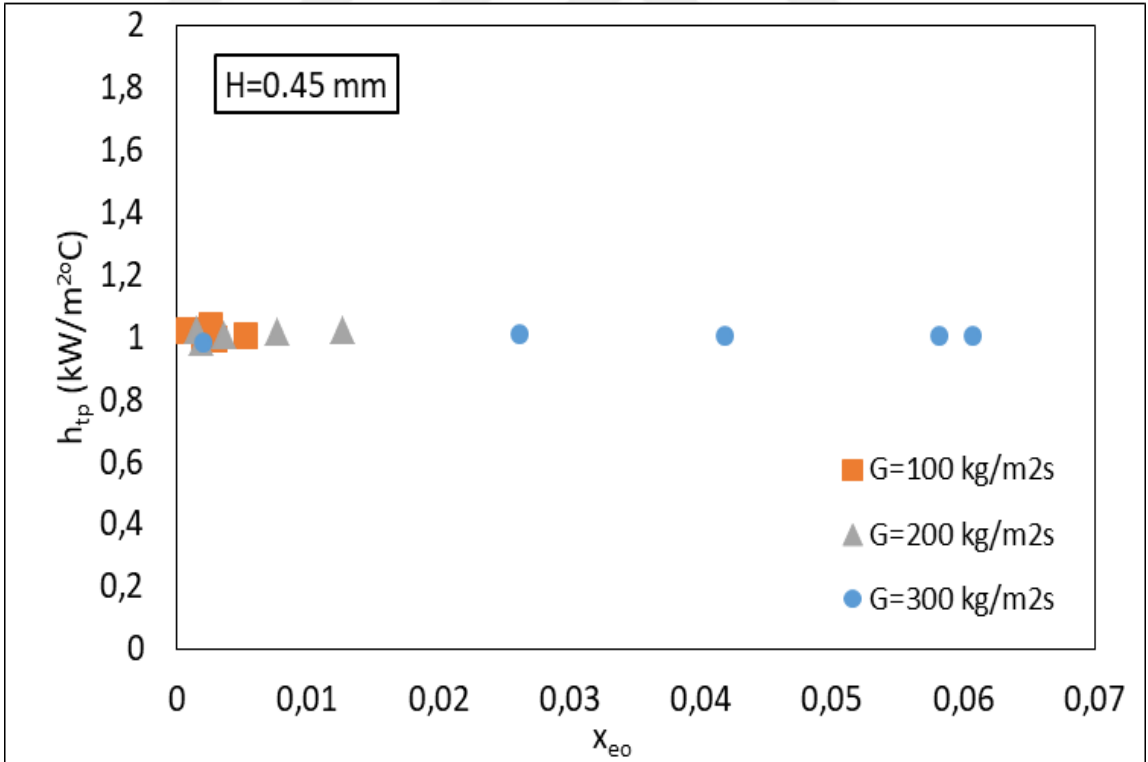
Şekil 4.3. Farklı kütle akıları için ısı taşınım katsayısının ısı akısıyla değişimi ($H=300$ μ m)



Şekil 4.4. Farklı kütle akıları için ısı taşınım katsayısının ısı akısıyla değişimi ($H=450$ μ m)



Şekil 4.5. Farklı kütle akıları için ısı taşınım katsayısının çıkış kuruluk derecesiyle değişimi (H=300 µm)



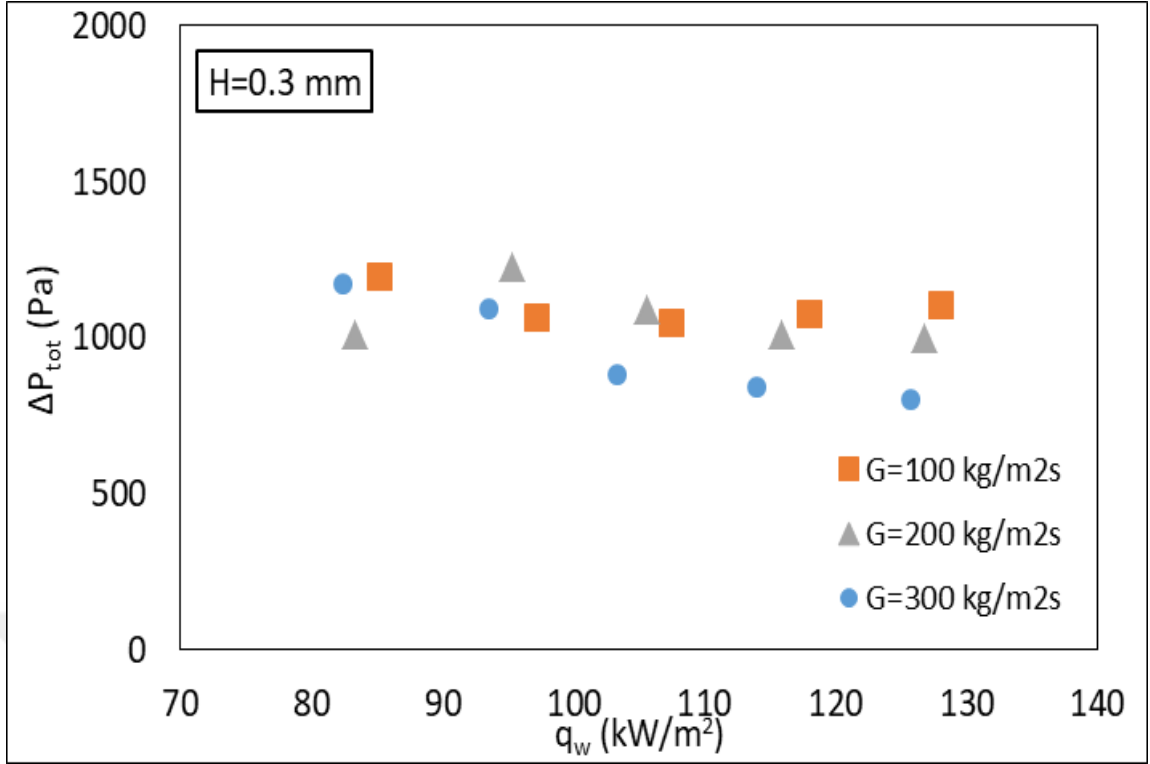
Şekil 4.6. Farklı kütle akıları için ısı taşınım katsayısının çıkış kuruluk derecesiyle değişimi (H=450 µm)

Sabit bir ısı akısı için kütle akısındaki artış, ince sıvı filminin sürdürülebilirliğini arttırır, kuruma zamanını azaltır ve hatta tam kurumayı önleyebilir. Sonuç olarak, taşınımlı kaynama mikrokanallardaki baskın ısı transfer mekanizmasıdır. Ancak, ısı transfer olayını yalnızca ince film buharlaşması ile açıklamak yeterli değildir. Bu olay, periyodik prosesin yalnızca bir bölümüdür.

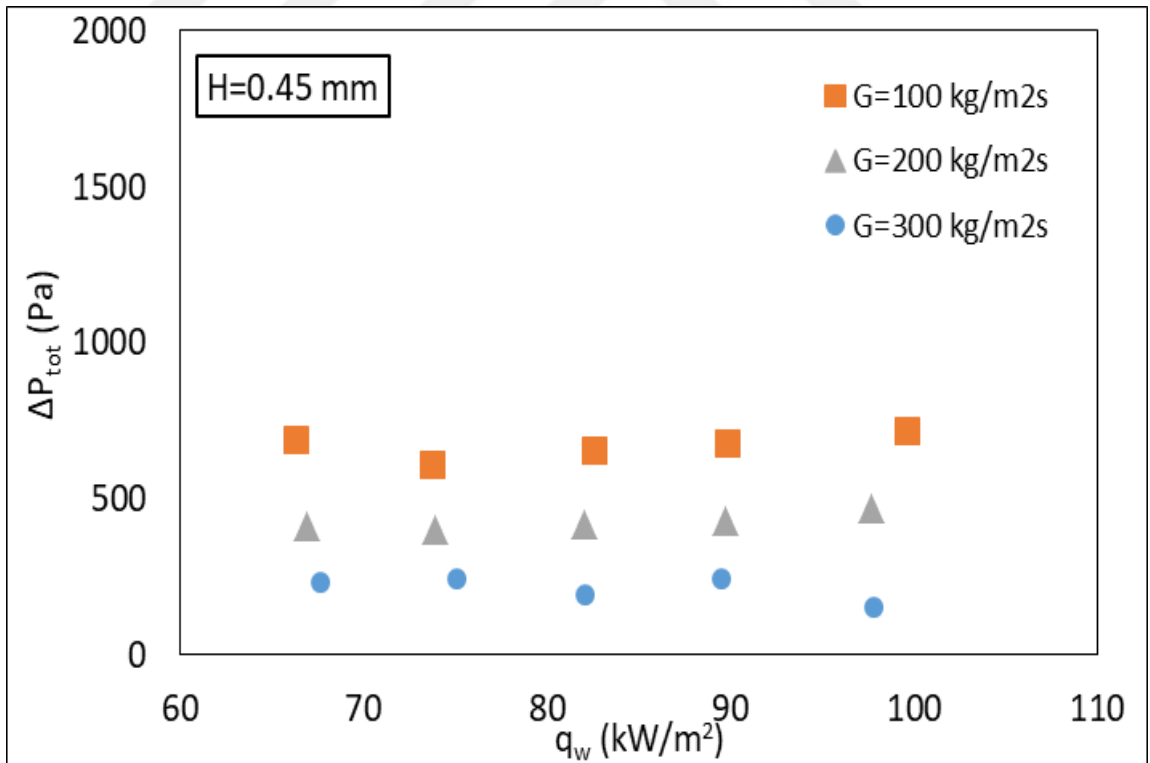
Şekil 4.5 ve 4.6'da çıkış ısı taşınım katsayısının çıkış kuruluk derecesi ile değişimleri farklı kütle akıları için sunulmuştur. Isı taşınım katsayısı kuruluk derecesinden çok fazla etkilenmemektedir. Bunun nedeni kuruluk derecesinin çok düşük olmasıdır. Kanal içerisinde tamamen kuruma meydana gelse bile; bu durum, kısmî kuruma olarak adlandırılabilir. Çünkü bir ölçüm esnasında, komşu kanalların içinde eş zamanlı olarak sadece sıvı akışı veya buharlaşan sıvı filmi görülebilmektedir.

4.3. Basınç Düşümü

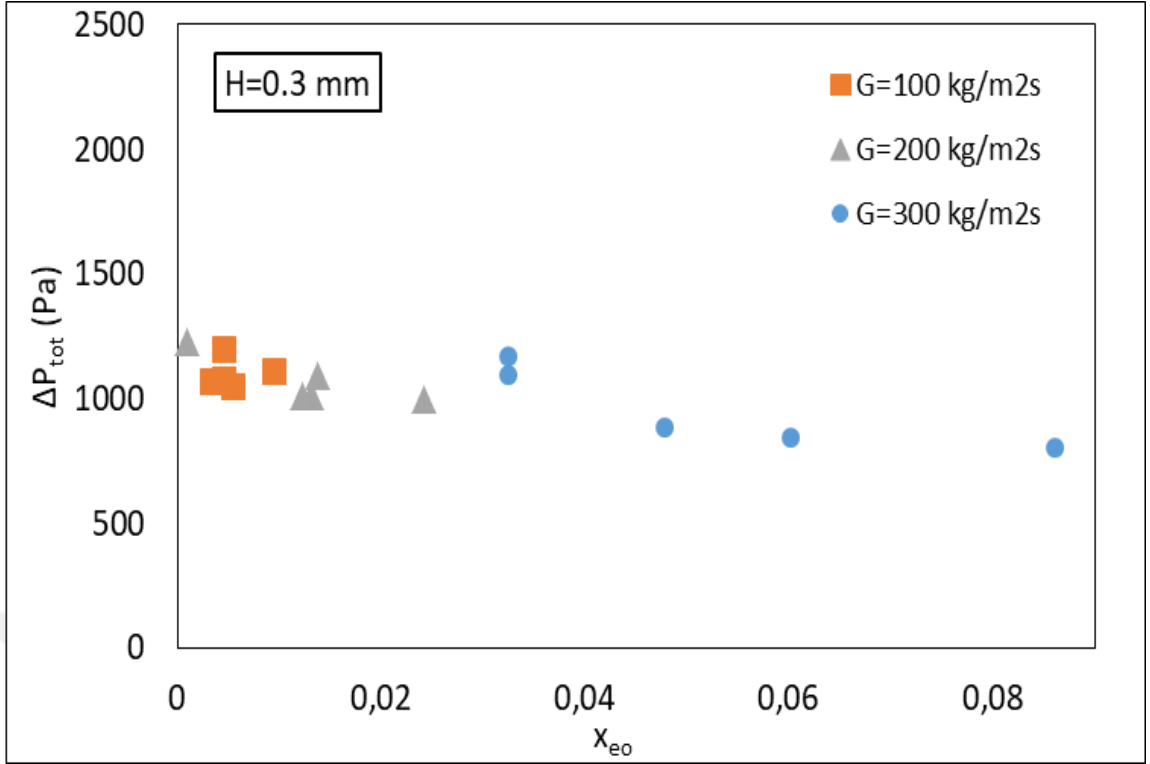
Şekil 4.7 ve 4.8'de toplam basınç düşümünün ısı akısıyla değişimleri verilmektedir. Yüksek ısı akısı değerlerinde, basınç düşümü eğrileri kütle debisine bağlılık göstermektedir. Bu taşınım kaynamanın etkili olduğunu göstermektedir. Isı akısındaki artış ile buharlaşma momentum kuvveti artar. Bunun sonucu olarak, kanal girişine doğru uzayan kabarcık daha fazla kuvvet uygulamaya başlar ve akışa karşı direnç artar. Buharlaşma momentum kuvvetine karşı olan kuvvet ise sıvı ataletidir. Atalet kuvveti ise artan kütle akısı ile artar. Aynı zamanda sabit ısı akısı değerinde yüksek kütleli akı değerleri için basınç düşümünün daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum buharlaşma yoğunluğuyla ilişkilendirilebilir. Kanal yüksekliğinin azalması ise aynı kütleli akı değerlerinde daha fazla basınç düşümüne neden olur. Basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesiyle değişimleri Şekil 4.9 ve 4.10'da sunulmuştur.



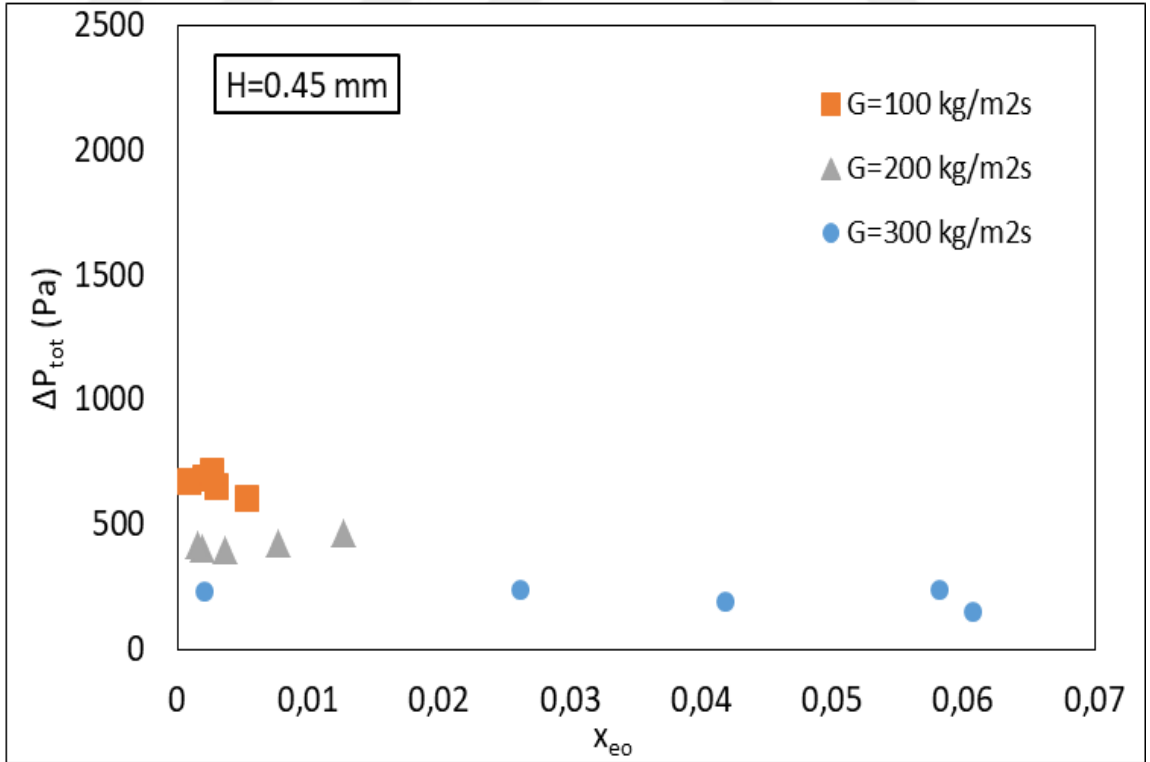
Şekil 4.7. Farklı kütle akıları için basınç düşümünün ısı akısıyla değişimi (H=300 μ m)



Şekil 4.8. Farklı kütle akıları için basınç düşümünün ısı akısıyla değişimi (H=450 μ m)



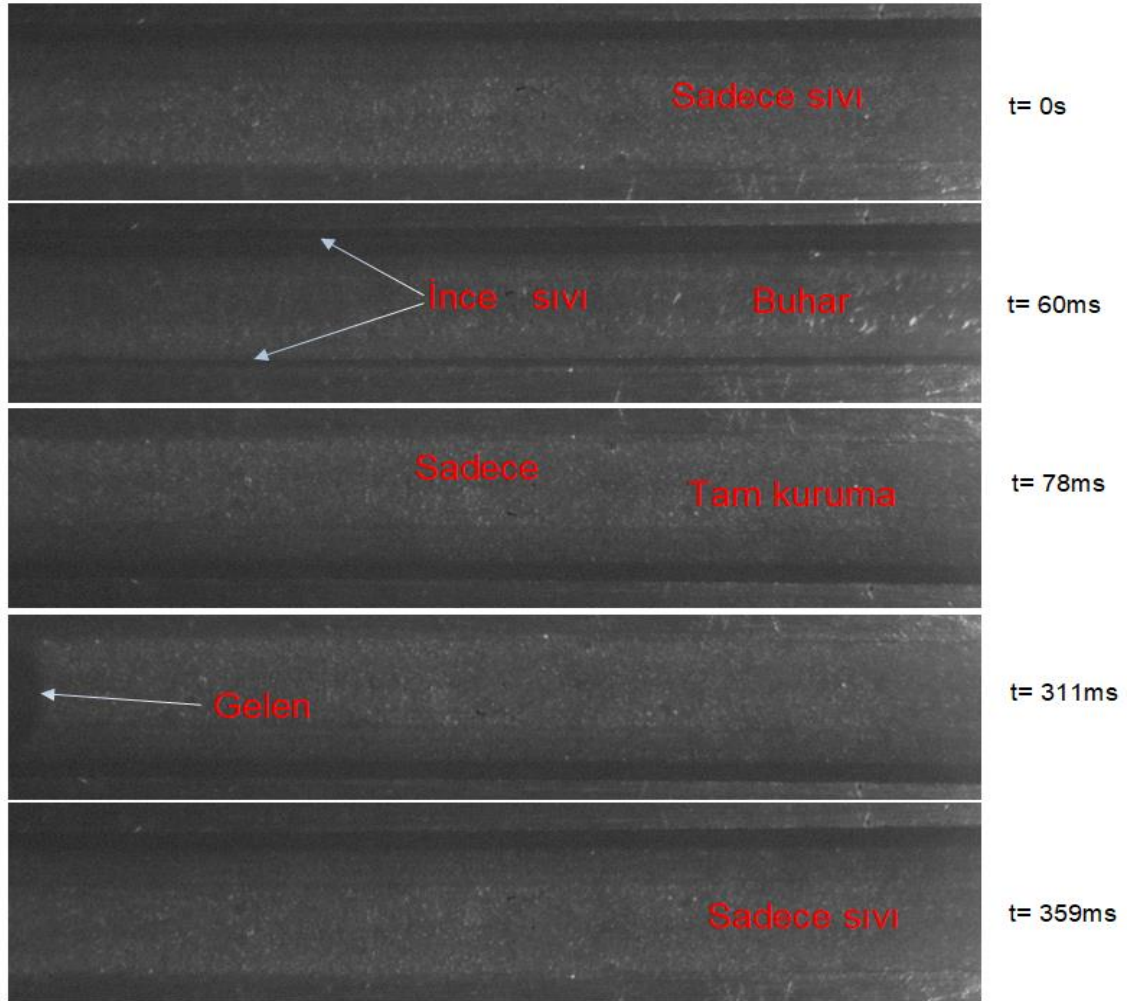
Şekil 4.9. Farklı kütle akıları için basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesiyle değişimi (H=300 μ m)



Şekil 4.10. Farklı kütle akıları için basınç düşümünün çıkış kuruluk derecesiyle değişimi (H=450 μ m)

4.4. Akış Görüntüleme ve Akış Kararsızlıkları

Mikrokanallarda kaynamalı akış sırasında görülen akış rejimlerinin sanki-periyodik bir karaktere sahip olduğu görülmüştür. Bu periyodik davranış temelde üç periyoda ayrılabilir: ıslatma periyodu, kuruma periyodu ve buharlaşma periyodu. Bu periyotlar arasında geçen süre, geometrik parametrelere ve test koşullarına göre farklılık göstermektedir. Akış desenleri etkin ısı transfer mekanizmasını belirlemede önemlidir. Deneylede gözlemlenen baskın akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır. Bu taşınım kaynamanın baskın olduğunu göstermektedir. Artan kanal genişliği daha kalın sıvı filmleri oluştuğu görülmüştür. Kanal içerisinde oluşan bir kabarcık ani olarak büyür ve kanal cidarları ile sınırlandırılır. Özellikle, küçük hidrolik çaplı kanallarda sınırlandırma etkileri daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 4.11'de $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $q=65\text{W}$ için bir periyottaki akış desenleri görülmektedir.



Şekil 4.11. $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $q=65\text{W}$ için bir periyottaki akış desenleri

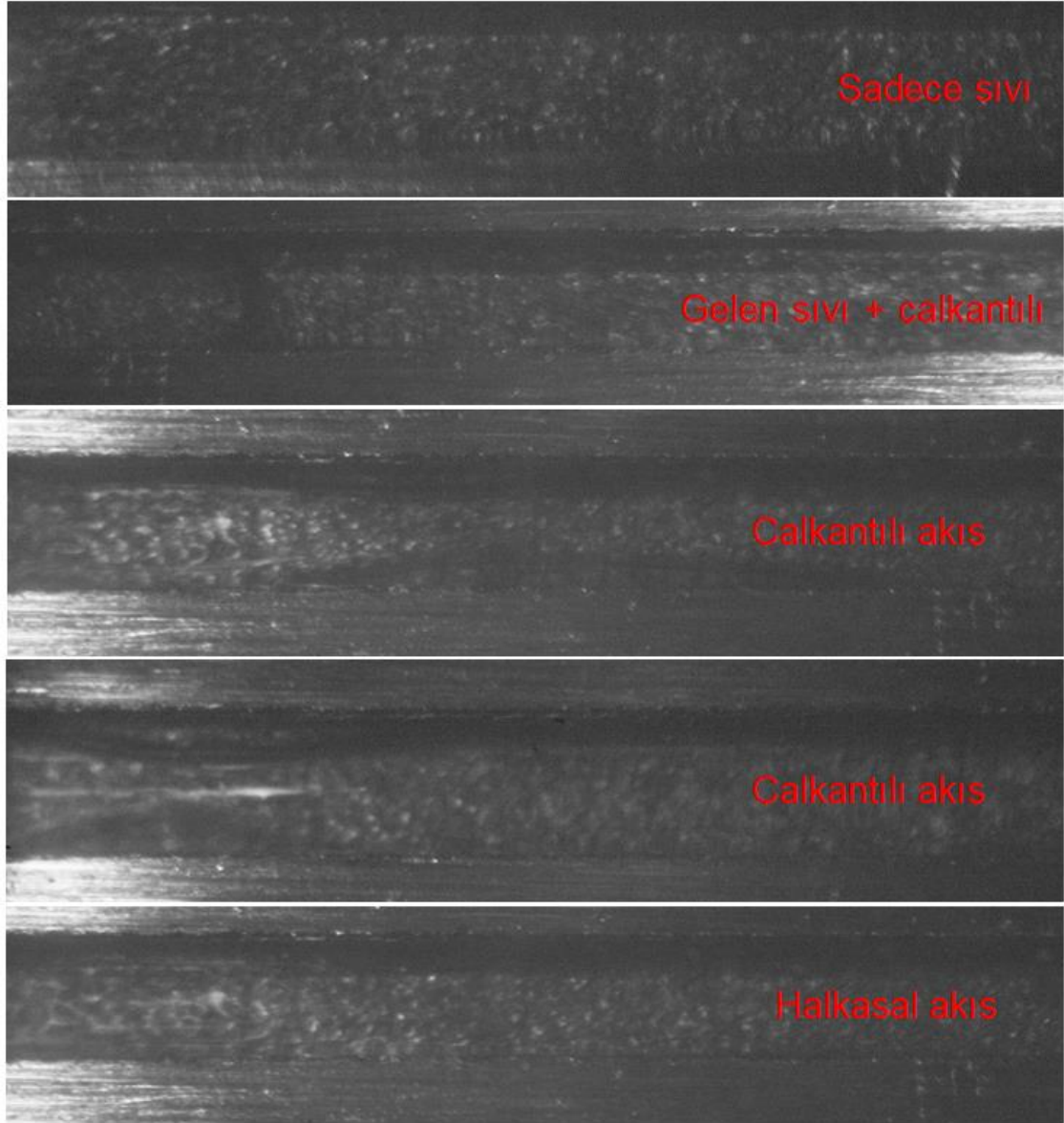
Kanalın sıvı ile olduğu an, referans olarak alınmıő ve bir periyottaki baŐlangıç zamanı olarak sečilmiŐtir ($t=0.0$ ms). Kanal su ile dolar dolmaz, akıŐkan hemen buharlaŐmaya baŐlar. BuharlaŐma ilk olarak merkez bđlgede baŐlar ve halkasal akıŐ deseni oluŐur. Kanal duvarları üzerinde ince sıvı filmi, kanalın iç kesimlerinde ise buhar mevcuttur. Daha sonra sıvı filmi buharlaŐmaya baŐlar ve 60 ms sonra tamamen buhara dđnüşür. Daha sonra, tekrar besleme sıvısı gelir ve kanalı doldurur. Paralel kanallı bir yapıda, tek bir kanal içerisinde tamamen kuruma meydana gelmesi kritik ısı akısı açısından problem değildir. Paralel kanallar arası etkileŐim nedeniyle; farklı kanallarda, farklı akıŐ koŐulları görölmektedir. Bir baŐka ifade ile komŐu kanallar olası problemlerin önüne geçer. Bunu göstermek aŐađıdaki akıŐ görüntüleri verilmiŐtir. Burada, aynı anda komŐu kanallarda farklı akıŐ koŐullarının varlığı görölmektedir. Bu durum, paralel mikrokanallı ısı alıcıların bir avantajıdır (Őekil 4.12).



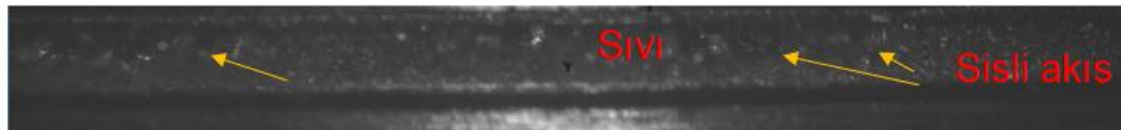
Şekil 4.12. Paralel mikrokanallarda aynı anda farklı akış koşullarının varlığı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.13'te periyodik akış desenine ikinci bir örnek, $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=60 \text{ W}$ için verilmiştir. Burada, halkasal akıştan önce çalkantılı akış deseninin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, halkasal akıştaki sıvı filmi kalınlıkları üniform değildir.



Şekil 4.13. $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=60 \text{ W}$ için bir periyottaki akış desenleri

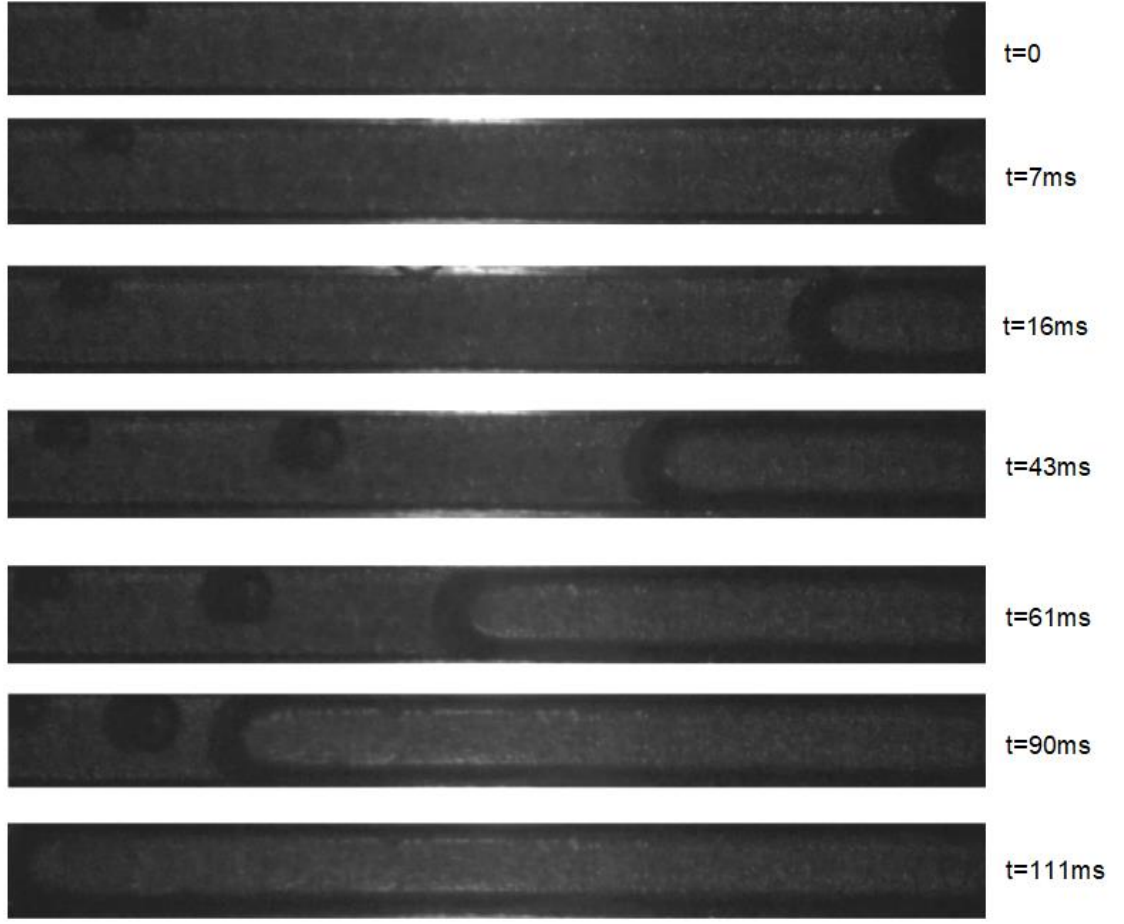


Şekil 4.14. $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=70 \text{ W}$ için bir periyottaki akış desenleri

Şekil 4.14'te kütle akısı ve ısı akısı değerlerine göre, kanallar içerisinde sisli akış oluşabilmektedir. Bu görüntü, $G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=70\text{W}$ için çalışma koşullarında alınmıştır. Verilen bir kütle akısında, sisli akış yüksek ısı akısı durumlarında, akışkan tamamen buhar faza dönüşmeden önce görülür.

Buharlaştırma momentum kuvveti ve atalet kuvveti arasındaki rekabet/etkileşim $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $\dot{q}=50\text{W}$ için Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Buharlaştırma momentum kuvveti etkisiyle buhar kanal girişine doğru uzamaya başlar. Gelen sıvının ataleti bu harekete karşı bir kuvvet uygular. Şekillerde mili saniye mertebelerinde meydana gelen ileri-geri yönlü ara yüz hareketleri görülmektedir.

Kanallarda meydana gelen ters akış, kısmî ve tam kuruma ve yukarıda bahsedilen farklı akış desenleri, basınç ve sıcaklık değerlerini etkilemektedir. Periyodik akış karakteri sıcaklık ölçümleri tarafından da yansıtılmaktadır. Salınım genlikleri $3-10^\circ\text{C}$ arasında değişmektedir. Yüzey sıcaklığı artan kütle akısı ile azalırken; artan ısı akısı ile artmaktadır. Yüksek kütle akıları, kuruma periyodunda azalmaya sebep olur ve aynı zamanda daha yüksek sistem kararlılığı anlamına gelir. Atalet kuvvetindeki artış, ters akışa karşı artan direnç anlamına gelmektedir. Verilen bir ısı akısında, debi artırılarak kuruma önenebilir. Şekillerde farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün zamanla değişimini göstermektedir. İncelenen koşullarda düşük basınç salınımları gözlenmiştir. Salınımların genlikleri 1 kPa değerinin altındadır. Bunun muhtemel iki sebebi vardır. Birincisi, test bölgesinin geometrisi ve ikincisi ise paralel kanallar arasındaki etkileşimdir. Paralel kanallı konfigürasyonlarda, tek bir kanal ters akış veya kabarcığın kanal girişine doğru uzaması nedeniyle akışa karşı direnç gösterirse, gelen akışkan daha düşük dirençli kanallara önlenir ve akışın sürekliliği/sürdürülebilirliği sağlanır. Bu sebeplerle, ne yüksek basınç düşümü çalkantıları önlenir.



Şekil 4.15. $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ve $q \approx 50\text{W}$ için ileri-geri yönlü ara yüz hareketleri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında mikrokanallı ısı alıcılarda kanal yüksekliğinin kaynamalı akış ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı ısı akısı ve kütle akısı şartlarında gerçekleştirilen deneyler kaynamalı akış ısı transferi ve basınç düşümü açısından değerlendirilmiş, kaynama süreçleri parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği ile elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli sonuç ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Kızma farkının artan ısı akısıyla beraber doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Bu durum ısı transferinde taşınım kaynamasının etkin mekanizma olduğunu göstermektedir.
- Kanal yüksekliğinin 450 μm 'den 300 μm 'ye düşürülmesi sabit bir ısı akısında kızdırma farkının %3,9 ile % 9,3 oranında azalmasına neden olmuştur.
- Isı taşınım katsayısının artan kütle akı ile azaldığı, artan ısı akısı ile arttığı görülmüştür.
- Mikrokanallardaki kaynamalı akışın periyodik karakteristiği ve paralel kanallar arasındaki etkileşimin önemli olduğu görülmüştür. Bu nedenle ısı transfer sonuçlarının değerlendirilmesinde dikkate alınmıştır.
- Kütle akınının sabit olduğu durumda kanal yüksekliğinin düşürülmesi kanal çıkışında kuruluk derecesinin artmasına neden olmuştur.
- Yüksek ısı akısı değerlerinde, basınç düşümü eğrileri kütle debisine bağlılık göstermektedir. Bu durum taşınım kaynamasının etkili olduğunu göstermektedir.
- Kanal yüksekliğinin azalışı aynı kütle akı değerlerinde daha fazla basınç düşümüne yol açmıştır.
- Mikrokanallarda kaynamalı akış sırasında görülen akış rejimlerinin sanki-periyodik bir karaktere sahip olduğu görülmüştür.
- Akış rejimi periyotları arasında geçen süre, geometrik parametrelere ve test koşullarına göre farklılık gösterdiği görülmüştür.
- Deneylerde gözlemlenen baskın akış desenleri uzun kabarcıklı akış ve halkasal akıştır.

- Aynı anda komşu kanallarda farklı akış koşullarının varlığı görülmüştür. Bu durum, paralel mikrokanallı ısı alıcıların sağladığı bir avantaj olarak değerlendirilmiştir.
- Verilen bir kütle akısında, sisli akış yüksek ısı akısı durumlarında, akışkan tamamen buhar faza dönüşmeden önce görülmüştür.
- Kanallarda meydana gelen ters akış, kısmî ve tam kuruma ve yukarıda bahsedilen farklı akış desenleri, basınç ve sıcaklık değerlerini etkilemiştir.



KAYNAKLAR

- Agostini, B., Revellin, R., Thome, J.R., Fabbri, M., Michel, M., Calmi, D. ve Kloter, U. 2008. High Heat Flux Flow Boiling In Silicon Multimicrochannels – Part III: Saturated Critical Heat Flux of R236fa and Two-phase Pressure Drops. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 5426–5442.
- Balasubramanian, K., Lee, P.S., Jin, L.W., Chou, S.K., Teo, C.J.ve Gao, S. 2011. Experimental investigations of flow boiling heat transfer and pressure drop in straight and expanding microchannels – A comparative study. *International Journal of Thermal Science*, 50, 2413-2421.
- Balasubramanian, K., Jagirdar, M., Lee, P.S., Teo, C.J. ve Chou, S.K. 2013. Experimental investigation of flow boiling heat transfer and instabilities in straight microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 655-671.
- Barber, J., Sefiane, K., Brutin, D. ve Tadrist, L., 2009. Hydrodynamics and Heat Transfer During Flow Boiling Instabilities in A Single Microchannel. *Applied Thermal Engineering*. 29(2009), 1299–1308.
- Buchling, P. ve Kandlikar, S., 2016. Enhanced Flow Boiling of Ethanol in Open Microchannels with Tapered Manifolds in a Gravity-Driven Flow. *Journal of Heat Transfer*, 138(3), 031503.
- Candan, A. 2017. Minikanallarda Kaynamalı Akışta Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı. 64, Trabzon.
- Celata, G.P., Saha, S.K., Zummo, G. ve Dossevi, D. 2010. Heat transfer characteristics of flow boiling in a single horizontal microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7), 1086-1094.

- Celata, G.P. ve Cumo, M. ve Dossevi, D. ve Jilisen, R.T.M. ve Saha, S.K. ve Zummo, G. 2012. Flow pattern analysis of flow boiling inside a 0.48 mm microtube. *International Journal of Thermal Sciences*, 58(2012), 1-8.
- Ceylan, M., 2018. Minikanallarda Nanoakışkanların Karma Taşınımıyla Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı. 63, Erzurum.
- Collier, J.G. ve Thome J.R., 1994. *Convective Boiling and Condensation*, Third Edition, Oxford University Press, 596, USA.
- Chen, T. ve Garimella, S.V., 2011. Local Heat Transfer Distribution and Effect of Instabilities During Flow Boiling in a Silicon Microchannel Heat Sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(2011), 3179–3190.
- Çengel, Y.A. 2012. *Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım*. İzmir Güven Kitabevi, 861, İzmir.
- Gupta, M.K., Sharma, D.S. ve Lakhera. V.J., 2006. Vapor Bubble Formation, Forces, and Induced Vibration: A Review. *Applied Mechanics Reviews*, 68(3), 1-6.
- Harirchian, H.S. ve Garimella, S.V. 2009. Effects of channel dimension heat flux and mass flux on flow boiling regimes on microchannels. *International journal of Multiphase Flow*, 35(4), 349-362.
- Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnyak, E. ve Segal, Z. 2006. Periodic Boiling in Parallel Micro-channels at Low Vapor Quality. *International Journal of Multiphase Flow*, 32, 1141-1159.
- Huh, C. ve Kim, M.H., 2006. An Experimental Investigation of Flow Boiling in an Asymmetrically Heated Rectangular Microchannel *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 775–784.

- Incropera, F.P. ve Dewitt, D.P. 2001. Isı ve Kütle Geçişinin temelleri. Mart Matbaacılık, 960, İstanbul
- Kalani, A. ve Kandlikar, S.G. 2014. Evaluation of Pressure Drop Performance During Enhanced Flow Boiling in Open Microchannels with Tapered Manifolds. Journal of Heat Transfer, 136(5), 1-7.
- Kandlikar, S.G. 2002. Fundamental Issues Related to Flow Boiling in Minichannels and Microchannel. Experimental Thermal and Fluid Science. 26, 38-47.
- 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), 2-3.
- Karayiannis, T.G. ve Mahmoud, M.M. 2016. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. Applied Thermal Engineering, 15(2017), 1372-1397.
- Kuo, C.J. ve Peles, Y., 2009. Pressure Effects On Flow Boiling Instabilities in Parallel Microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer. 52, 271–280.
- Krishnamurthy, S. ve Peles, Y. 2010. Flow boiling heat transfer on micro pin fins entrenched in a microchannel. Journal of Heat Transfer, 132, 041007-1.
- Lagus, T.P ve Kulacki, A. 2012. Two phase heat transfer and bubble characteristics in a microchannel array. Journal of Heat Transfer, 134(7), 071502.
- Law, M., Lee, P-S. ve Balasubramanian, K. 2014. Experimental investigation of flow boiling heat transfer in novel oblique-finned microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer, 76(2014), 419-431.

- Law, M. ve Lee, P-S. 2015. A comparative study of experimental flow boiling heat transfer and pressure characteristics in straight- and oblique-finned microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85(2015), 797-810.
- Leao, H.L.S.L, Nascimento, F.J ve Ribatski, G. 2014. Flow boiling heat transfer of R407C in a microchannels based heat spreader. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 59, 140-151.
- 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, W., Yang, F., Alam, T., Khan, J. ve Li, C. 2015. Experimental and theoretical studies of critical heat flux of flow boiling in microchannels with microbubble-excited high-frequency two-phase oscillations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88(2015), 368-378.
- Mahmoud, M.M., Karayiannis, T.G. ve Kenning, D.B.R, 2014. Flow Boiling Pressure Drop of R134a in Microdiameter Tubes: Experimental Results and Assessment of Correlations, *Heat Transfer Engineering*. 35(2), 178-192.
- Manay, E. 2017. Mikrokanallarda Nanoakışkanların Kaynamalı Akış Karakteristikleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 237-249.
- Mandev, E. 2017. Minikanallarda Nanoakışkanların Karma Taşınımıyla Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı. 83-85, Erzurum.
- Markal, B., Aydın, O., Avcı, M. 2016. Effect of aspect ratio on saturated flow boiling in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 130-143.

- Markal, B. 2016. Mikrokanallarda Kaynamalı Akışın Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı. 154, Trabzon.
- Mauro, A.W., Thome, J.R., Toto, D. ve Vanoli, G.P. 2010. Saturated Critical Heat Flux in a Multi-Microchannel Heat Sink Fed by a Split Flow System. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34,81-92.
- Mehendale, S.S., Jacobi, A.M. ve Ahah, R.K., 2000. Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-Scales with Application to Heat Exchanger Design. *Appl. Mech. Rev.*, 53(2000), 175–193.
- Morshed, A.K.M.M., Paul, T.C. ve Khan, J.A., 2013. Effect of Al₂O₃ Nanoparticle Deposition on Flow Boiling Performance of Water in a Microchannel, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 47, 6-13.
- Park, J.E. ve Thome, J.R. 2010. Critical Heat Flux in Multi-Microchannel Copper Elements with Low Pressure Refrigerants. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53,110-122.
- Park, C.Y., Jang, Y., Kim, B. ve Kim, T. 2012. Flow boiling heat transfer coefficients and pressure drop of FC-72 in microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 39, 45-54.
- Prajapati, Y.K., Pathak, M. ve Khan, M.K. 2015. A comparative study of flow boiling heat transfer in three different configurations of microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 711-722.
- Qu, W., Mudawar, I. 2003. Measurement and Correlation of Critical Heat Flux in Two-Phase Micro-channel Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2045–2059.

- Rao, S.R. ve Peles, Y. 2015. Spatiotemporally resolved heat transfer measurements for flow boiling in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89(2015), 482-493.
- Ritchey, S.N., Weibel, J.A. ve Garimella, S.V. 2014. Local measurement of flow boiling heat transfer in an array of non-uniformly heated microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 206-214.
- Roday, A.P. ve Jensen, M.K. 2009. Study of Critical Heat Flux Condition with Water and R-123 during Flow Boiling in Microtubes. Part I: Experimental Results and Discussion of Parametric Effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3235–3249.
- Tibiriça, 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(2014), 152-165.
- Tong, L.E. ve Tang, Y.S., 1997. *Boiling Heat Transfer and Two Phase Flow*, Second Edition, Taylor and Francis, CRC Press, 572, Washington.
- Wang, Y., Sefiane, K., Wang, Z-G. ve Harmand, S. 2014. Analysis of two-phase pressure drop fluctuations during micro-channel flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70(2014), 353-362.
- Wang, Y. ve Peles, Y. 2015. Subcooled Flow Boiling in a Microchannel with a Pin Fin and a Liquid Jet in Crossflow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86(2015), 165–173.
- Wang, Y., 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, 2235-2243.

Wojtan, L., Revellin, R., Thome, J. R. 2006. Investigation of Saturated Critical Heat Flux in a Single, Uniformly Heated Microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 765-774.

Yin, L., Jia, L., Guan, P., and Liu, D. 2014. Experimental investigation on bubble confinement and elongation in microchannel flow boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 290-296.

Yin, L. ve Jia, L., 2016. Confined characteristics of bubble during boiling in microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 247-256.

Zuhuan, R., ve Wang, W. 2013. Boiling heat transfer characteristics in a microchannel array heat sink with low mass flow rate. *Applied Thermal Engineering*, 51, 65-74.

Anonim, 2018. <http://bilimgenc.tubitak.gov.tr> Erişim Tarihi: 05.01.2019.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Girayhan ARSLAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Tarihi ve Yeri : 02.07.1991 – ERZURUM
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +90 536 508 3727
e-mail : girayhanarslan@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2016
Lise	Erzurum Anadolu Lisesi	2010
Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Erzurum Teknik Üniversitesi / 2017-2018

Yayınlar (SCI, SCI-Expanded) (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)*

Hakemli Dergiler (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)

Ulusal Kongre Sunum (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

Uluslararası Kongre Sunum (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

*Tezle ilgili varsa yayın eklenerek belirtilmelidir.