



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

MİNİKANALLARDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

**AYŞE CANDAN
BURAK MARKAL
ORHAN AYDIN
METE AVCI
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

MINİKANALLARDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Characteristics in Minichannels

Ayşe CANDAN
Burak MARKAL
Orhan AYDIN
Mete AVCI

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, 1.2 mm hidrolik çapa sahip (kanal genişliği: 1.8 mm, kanal yüksekliği: 0.9 mm) tek dikdörtgen kesitli bir minikanalda doymuş kaynamalı akış karakteristikleri incelenmiştir. İş akışkanı olarak deiyonize su kullanılmıştır. Akışkan giriş sıcaklığı 86 ± 2 °C' de sabit tutularak farklı kütle akısı (100, 200 ve 300 kg/m²s) ve ısı güç (89.8, 119.8, 149.9, 179.9 ve 210.1 W) değerlerinde çalışılmıştır. Kütle akısı, ısı akısı ve kuruluk derecesinin yerel iki faz ısı transfer katsayısı ve toplam basınç düşümü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüksek hızlı kamera aracılığıyla akış görüntüleri elde edilmiş ve fiziksel mekanizma analiz edilmiştir. Genel karakter olarak, iki faz ısı transfer katsayısının artan ısı akısı, kuruluk derecesi ve kütle akısı ile arttığı; benzer şekilde, toplam basınç düşümünün de artan ısı akısı, çıkış kuruluk derecesi ve kütle akısı ile arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Minikanal, Kaynamalı akış, İki faz ısı transfer katsayısı, Akış görüntüleme.

ABSTRACT

In this experimental study, saturated flow boiling characteristics are investigated in a single rectangular minichannel with hydraulic diameter of 1.2 mm (channel width: 1.8 mm, channel height: 0.9 mm). Deionized water is used as the working fluid. Inlet temperature of the fluid is kept constant at 86 ± 2 °C, while experiments are conducted under different mass fluxes (100, 200 ve 300 kg/m²s) and heating powers (89.8, 119.8, 149.9, 179.9 ve 210.1 W). The effects of the mass flux, heat flux and vapor quality on the local two phase heat transfer coefficient and total pressure drop are investigated. Flow images are obtained via high speed camera, and the physical mechanism is analyzed. It is concluded that, in general manner, two phase heat transfer coefficient increases with increasing heat flux, vapor quality and mass flux, and similarly, total pressure drop increases with increasing heat flux, exit vapor quality and mass flux.

Key Words: Minichannel, Flow boiling, Two phase heat transfer coefficient, Flow visualization.

1. GİRİŞ

Savunma, tıp, haberleşme, otomotiv ve benzeri birçok sektörde elektro-mekanik sistemlerden/cihazlardan faydalanılmaktadır. Teknolojik ilerleme, aynı zamanda, bu gibi alanlardaki pratik uygulamaların gelişimi anlamına gelmektedir. Ancak, artan fonksiyonelliğe karşı küçülen boyutlar neticesinde, yüksek ısı yoğunluk problemi ortaya çıkmaktadır. Bu durum da, güvenli çalışma koşulları ve sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi açısından etkili soğutma tekniklerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, mini kanallarda kaynamalı akış, en ideal ısı kontrol yöntemlerinden

bir olmasının yanı sıra fiziksel boyutların küçük olması ve faz değişimli taşınımın karmaşık yapısı nedeniyle ilgi çekici araştırma alanları arasındadır. Optimum tasarım ve etkin uygulamalar için mini kanallarda kaynamalı akış karakteristiklerinin incelenmesi ve fiziksel mekanizmanın ayrıntılı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir.

Tran vd. [1], 2.46 mm çapındaki mini dairesel bir kanalda ve 2.40 mm hidrolik çapındaki dikdörtgen kesitli tek bir kanalda, R-12 akışkanının kaynamalı akışını incelemiştir. Isı akısının geniş bir aralığı için (kızma farkının 2.75 °C'den düşük değerlerine karşılık gelen) ısı transfer katsayısının, kütle akısı ve kuruluk derecesinden bağımsız olup; ısı akısına bağlı olduğunu belirtmiş ve bu nedenle kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Lee ve Lee [2], ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ve kütle akısındaki artış ile arttığını; ısı akısının ise ısı transfer katsayısı üzerinde daha az etkili olduğunu belirtmiştir. Zorlanmış taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Kullandıkları iş akışkanı R-113 olup, hidrolik çapları 0.784 mm, 1.9 mm ve 3.63 mm olan üç farklı dikdörtgen kesitli tek kanalda çalışmışlardır. Yu vd. [3], mini kanallarda kaynamalı akışta (su için) ısı transferinin ısı akısına bağlı olup, kütle akısından bağımsız olduğunu belirtmiş ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmiştir. 2.98 mm iç çapa sahip dairesel bir kanalda çalışmışlardır. Huai vd. [4], mini kanallarda (1.31 mm çapındaki on dairesel kanaldan oluşan test bölgesi) CO₂'nin kaynamalı akışında ısı akısı ve kütle akısının ısı transfer karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. Huo vd. [5], 4.26 ve 2.01 mm çaplarında iki dairesel kanalda çalışmış ve etkin ısı transfer mekanizmasının (kabarcıklı kaynama veya taşınımlı kaynama olarak) çalışma koşullarına göre değiştiğini belirtmişlerdir. Akışkan olarak, R134a kullanmışlardır. Saitoh vd. [6], 0.51, 1.12 ve 3.1 mm çaplarında üç farklı dairesel kanalda R-134a akışkanı ile çalışmıştır. 3.1 mm çapa sahip kanalda ısı transfer katsayısının artan kütle akısı ve ısı akısı ile arttığını; 0.51 mm çaplı kanalda ise kütle akısından belirgin bir şekilde etkilenmediğini belirtmişlerdir. Taşınımlı kaynamanın etkisinin azalan çap ile azaldığını ifade etmişlerdir. Balasubramanian ve Kandlikar [7], her biri 333 µm hidrolik çapa sahip dikdörtgen kesitli altı mini kanaldan oluşan ısı alıcıda de-iyonize suyun kaynamalı akışını incelemiş ve etkin ısı transfer mekanizmasının kabarcıklı kaynama olduğunu belirtmişlerdir. Bang vd. [8], 1.73 mm çapında, tek dairesel bir mini kanalda suyun kaynamalı akışında basıncın (2 – 16 bar) ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini incelemiş ve bu etkinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu belirtmiştir. Taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ifade etmişlerdir. Kaew-On vd. [9], 1.1 mm çapında on dört ve 1.2 mm çapında sekiz paralel mini kanaldan oluşan test bölgelerinde, R134a'nın kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Isı transfer katsayısının artan ısı akısı ile arttığını, kütle akısından bağımsız olduğunu ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Copetti vd. [10], 2.6 mm çapında dairesel bir mini kanalda R-134a akışkanıyla deneyler yapmış ve kuruluk derecesi, ısı akısı ve kütle akısının ısı transfer katsayısı ve basınç düşümü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yüksek ısı akısı değerlerinde ısı transfer katsayısının kütle akısından neredeyse bağımsız olduğunu; sürtünme basınç düşümünün ise, artan kuruluk derecesi ve kütle akısı ile arttığını belirlemişlerdir. Isı transferi üzerinde ısı akısının; basınç düşümü üzerinde ise kütle akısının belirgin etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Lim vd. [11], 0.5 mm hidrolik çaplı dikdörtgen kesitli tek bir mini kanalda suyun kaynamalı akışında ısı transfer katsayısının ısı akısına bağlı olup, kütle akısı ve kuruluk derecesinden bağımsız olduğunu ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu belirlemiştir. Keepaiboon ve Wongwises [12], dikdörtgen kesitli tek bir mikro kanalda (0.68 mm hidrolik çaplı) R-134a'nın kaynamalı akışta ısı transfer karakteristiklerini ve akış desenlerini incelemiştir. Düşük ısı akısı değerlerinde ısı transfer katsayısının kütle akısından bağımsız olduğunu ve kabarcıklı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu; yüksek ısı akısı değerlerinde ise, ısı transfer katsayısının artan ısı akısı ile arttığını ve taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu elde etmişlerdir.

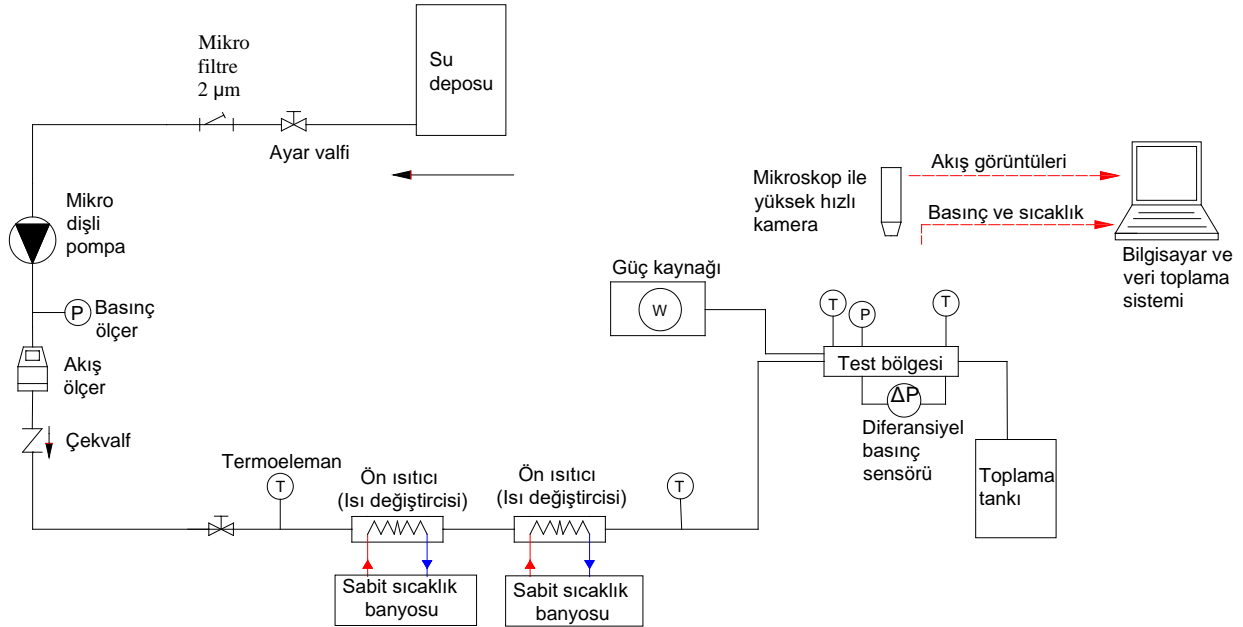
Yukarıda da belirtildiği üzere, mini kanallarda kaynamalı akışta ısı transferini etkileyen parametreler ve/veya bu parametrelerin etki düzeyleri ve etkin ısı transfer mekanizmasıyla ilgili literatürde çelişkiler bulunmaktadır. Bu nedenle, farklı geometrik konfigürasyonlarda ve çalışma koşulları altında yeni deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, bu çalışmanın amacı, 1.2 mm hidrolik çapa sahip tek dikdörtgensel kesitli bir minikanalda doymuş kaynamalı akış karakteristiklerini (yüksek hızlı akış görüntülerinden de yararlanarak) incelemektir.

2. DENEYSEL YÖNTEM

2.1. Deney Düzenegi

Deney düzeneginin Őematik resmi, Őekil 1'de verilmiŐtir. İŐ akıŐkanın hareketi, mikro diŐli pompa ile sađlanmaktadır. Pompa, dijital bir sŪrŪcŪ ile bŪtŪnleŐiktir ve bu sŪrŪcŪ kullanılarak ayarlanan debi deđeri eŐ zamanlı olarak dijital bir akıŐ Őlçer (Cole Parmer TW-32709-52) ile gŪrŪntŪlenmektedir. Sistemdeki ekipmanları korumak ve daha gŪvenilir deneysel sonuçlar elde etmek amacıyla sisteme mikro filtre yerleŐtirilmiŐtir. AkıŐkan giriŐ sıcaklıđını istenilen deđere getirebilmek için sistemde iki adet minyatŪr, sıvı – sıvı ısı deđiŐtircisi kullanılmıŐtır. Test bŪlgesinde, akıŐkan giriŐ ve çıkıŐ sıcaklıkları kŪçŪk haznelere yerleŐtirilen K tipi termoelemanlarla; giriŐ basıncı ise, giriŐteki bŪyŪk hazneye yerleŐtirilen mutlak basınc sensŪrŪyle ŐlçŪlmŪŐtŪr. Toplam basınc dŪŐŪmŪ ise, bŪyŪk hazneler arasını kapsayacak Őekilde, diferansiyel basıncŐlçer (Valcom 27D) ile belirlenmiŐtir. Test bŪlgesi, AC gŪç kaynađı ile beslenen kartuŐ ısıtıcılar ile ısıtılmaktadır. Test bŪlgesindeki sıcaklık ve basınc deđerleri bir veri toplama sistemi ile kaydedilmiŐtir. ŐlçŪmlerle eŐ zamanlı alınan akıŐ gŪrŪntŪleri için mikroskop ve yŪksek hızlı kameradan oluŐan akıŐ gŪrŪntŪleme sistemi kullanılmıŐtır.

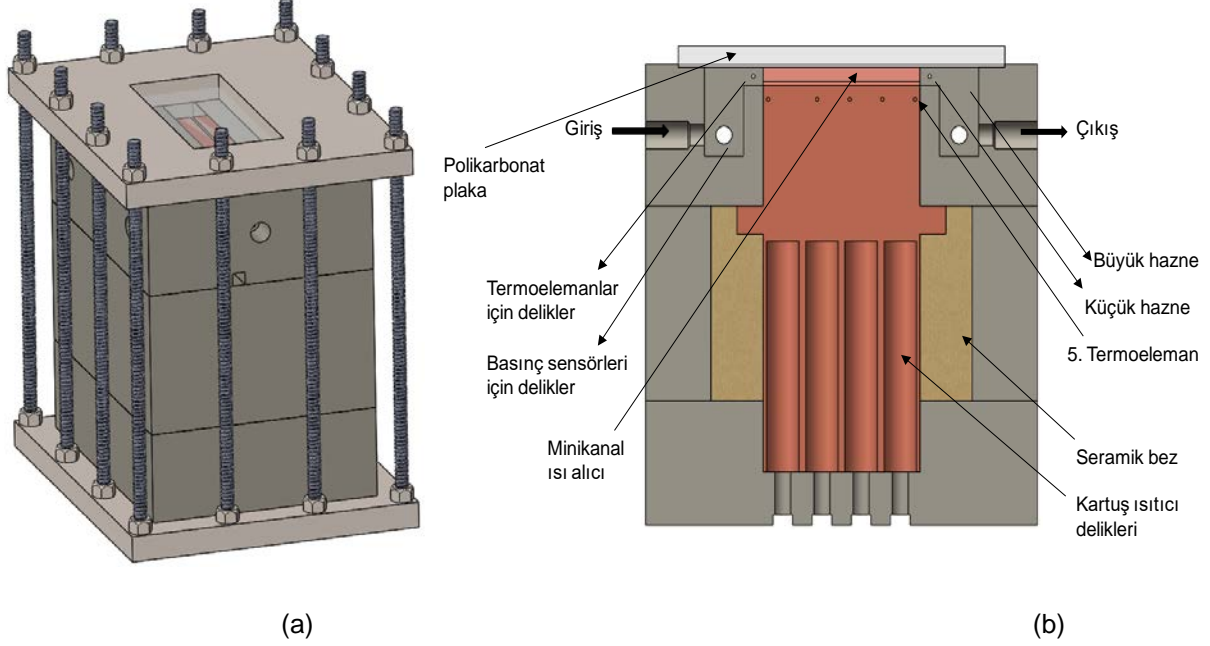
Deney dŪzenegi, Markal vd. [13, 14] ve Markal [15] tarafından tasarlanıp kullanılan deney dŪzeneginin kısmen modifiye edilmiŐ hali olup, cihaz ve sensŪrlerle ilgili detaylı bilgiler bu çalıŐmalarda yer almaktadır.



Őekil 1. Deney dŪzeneginin Őematik resmi

2.2. Test BŪlgesi

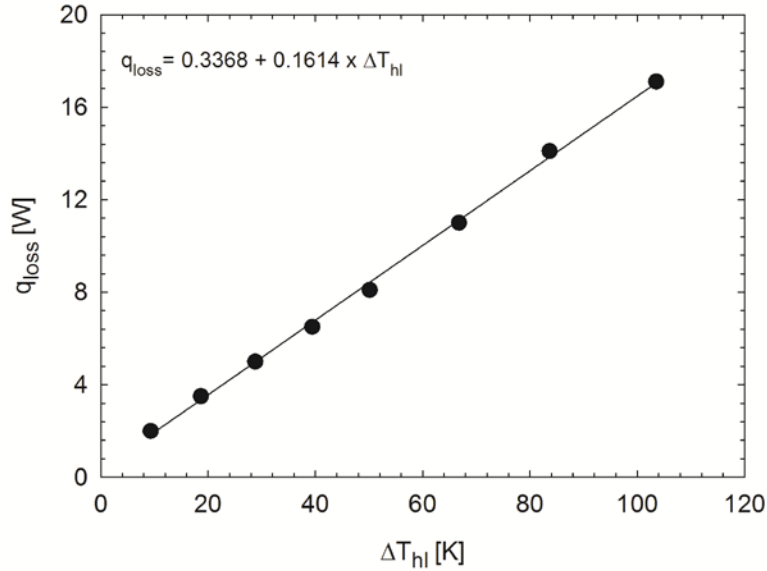
Őekil 2a ve b'de test bŪlgesinin, sırasıyla, montajlı ve kesit gŪrŪnŪŐleri verilmiŐtir. 1.8 mm geniŐliđinde, 0.9 mm yŪksekliđinde ve 48 mm uzunluđunda olan mini kanal, saf bakır plaka yŪzeyine CNC freze tezgahında (17.500 devirde iŐlenerek) açılmıŐtır. Açılan kanalın Ūst kısmı, akıŐ gŪrŪntŪleme yapabilmek için Őeffaf polikarbonat plaka ile kapatılmıŐtır. Test bŪlgesinden çevreye olan ısı kaybının azaltılması için dıŐ gŪvde teflon malzemeden yapılmıŐ ve bakır blok seramik bez ile sarılmıŐtır. Bakır blok, kartuŐ ısıtıcıları ve kanal boyunca sıcaklık ŐlçŪmŪ almak için yerleŐtirilen termoelemanları barındırmaktadır. Ayrıca, minikanal test parçası da bu blok Ūzerine yerleŐtirilmiŐtir. Termoelemanlar giriŐten 1.5 mm, 16.5 mm, 26.5 mm, 36.5 mm ve 46.5 mm uzaklıkta olacak Őekilde yerleŐtirilmiŐtir. Test bŪlgesi sızdırmazlıđı sađlamak amacıyla metal levhalar arasında sıkıŐtırılmıŐtır.



Şekil 2. Test bölgesinin montaj (a) ve kesit görünüşü (b)

2.3. Isı Kaybı Kalibrasyonu ve Belirsizlik Analizi

Deneyler esnasında, test bölgesinden olan ısı kaybını belirlemek için uygulanan yöntem kısaca şu şekilde ifade edilebilir: Test bölgesine akışkan gönderilmeden sabit bir ısı gücü uygulanır. Termoelemanlardan okunan sıcaklık değerleri kararlı hale geldiğinde, bu sıcaklıkların aritmetik ortalaması ile ortam sıcaklığı arasındaki fark ilgili güç değeri ile birlikte kayıtlı edilir. Bu işlem, uygulanan ısı gücü artırılarak tekrarlanır ve ısı kaybı kalibrasyon eğrisi elde edilir. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi, Şekil 3'te verilmiştir. Deneyler boyunca ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 23.5 °C' de sabit tutulmuştur.



Şekil 3. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi

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

Çalışma kapsamında belirsizlik analizi de yapılmış olup, belirsizlik değerleri için üretici firma kataloglarından ve Kline ve McClintock [16] tarafından önerilen yöntemden yararlanılmıştır. Ölçülen ve türetilen parametrelere ait ilgili değerler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Belirsizlik analizi

		Belirsizlik
Ölçülen değerler	Toplam basınç düşümü, ΔP_{tot}	± 0.25 %
	Giriş basıncı, P_i	± 0.25 %
	Debi, \dot{V}	± 2 %
	Uygulanan güç, q	± 1 %
	Sıcaklık, T	± 0.1 (°C)
Türetilen parametreler	Kütle akısı, G	± 2.08 %
	Duvar ısı akısı, q_w''	$\pm 0.32 - 0.32$ %
	Çıkış kuruluk derecesi, x_{eo}	$\pm 2.05 - 3.43$ %
	Isı transfer katsayısı, h_{tp}	$\pm 1.19 - 3.52$ %

2.4. Deneysel Hesaplama Yöntemi

Kütle akısı G ile gösterilmiş olup, aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$G = \frac{\dot{V}\rho_L}{A_{ch}} \quad (1)$$

Burada, \dot{V} , akışkanın hacimsel debisi, ρ_L , sıvı yoğunluğu ve A_{ch} , kanalın kesit alanıdır. Efektif ısı akısı (q_{eff}'') ise aşağıdaki gibi belirlenir.

$$q_{eff}'' = \frac{q - q_{loss}}{A_p} \quad (2)$$

Burada; q , ısıtıcılar tarafından uygulanan ısı gücü, q_{loss} , ısı kaybını, A_p ise ısı alıcının taban alanını ifade etmektedir. Minikanalın taban yüzey sıcaklığı doğrudan ölçülemediğinden, bir boyutlu ısı iletimi kabulü yapılarak yerel taban yüzeyi sıcaklığı şu şekilde hesaplanır:

$$T_{w,n} = T_n - q_{eff}'' \left(\frac{l_a}{k_c} + \frac{l_b}{k_c} + R_{t,c}'' \right) \quad (3)$$

Burada; k_c , bakırın ısı iletim katsayısı, $R_{t,c}''$, bakır – bakır ara yüzeyindeki ısı temas direnci, l_a , termoeleman ile bakır bloğun üst yüzeyi arasındaki uzaklık, l_b , ısı alıcı tabanı ile kanal taban yüzeyi arasındaki uzaklık, T_n ise ilgili termoelemandan okunan sıcaklık değeridir. Isıl temas direncinin belirlenmesinde [17] numaralı referanstan yararlanılmıştır.

Duvar ısı akısı (q_w'')

$$q_w'' = \frac{q - q_{loss}}{A_t} \quad (4)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada; A_t , kanalın toplam ısıtma alanıdır.

$$A_t = L(2H_{ch} + W_{ch}) \quad (5)$$

L , H_{ch} ve W_{ch} sırasıyla kanalın uzunluğu, yüksekliği ve genişliğidir. Kaynamalı akışta yerel iki faz ısı transfer katsayısı ise aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$h_{tp} = \frac{q_w''}{(T_{w,n} - T_{sat,n})} \quad (6)$$

Burada; $T_{sat,n}$, yerel doyma sıcaklığıdır. Yerel doyma sıcaklığının belirlenebilmesi için yerel doyma basıncı değerinin hesaplanması gerekmektedir. İlgili işlem adımları şu şekildedir:

Deiyonize su minikanal içerisinde aşırı soğutulmuş halde girmektedir. Bu nedenle kanal tek ve iki fazlı olmak üzere iki alt bölgeye ayrılabilir. Bu bölgeler arasındaki ayırım noktası kuruluk derecesinin sıfır olduğu konumdur. Bu değere kadar su, tek fazlı sıvı halinde; bu noktadan itibaren ise iki fazlı doymuş karışım halindedir.

Tek fazlı akış bölge uzunluğu,

$$L_{sp} = \frac{\dot{m}c_{p,L}(T_{sat,0} - T_i)}{q''_{eff}W_T} \quad (7)$$

şeklinde belirlenir. Burada; $T_{sat,0}$, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki doyma sıcaklığını, T_i akışkanın kanala giriş sıcaklığını, \dot{m} , kütleli debiyi, $C_{p,L}$, sıvının özgül ısısını, W_T , ısı alıcının genişliğini ifade etmektedir. Tek fazlı akış bölgesindeki basınç düşümü Eşitlik (8) ile belirlenir.

$$\Delta P_{sp} = \frac{2f_{sp}G^2L_{sp}v_L}{D_h} \quad (8)$$

$$f_{sp} = \frac{1}{\text{Re}_{\sqrt{A}}} \left[\left(\frac{3.44}{\sqrt{L^+}} \right)^2 + \left(\frac{12}{\sqrt{\alpha}(1+\alpha) \left[1 - \frac{192\alpha}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\alpha}\right) \right]} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$L^+ = 0.0822\alpha(1+\alpha)^2 \left[1 - \frac{192\alpha}{\pi^5} \tanh\left(\frac{\pi}{2\alpha}\right) \right]^2 \quad (10)$$

Burada; ΔP_{sp} , tek fazlı bölgedeki basınç düşümünü, v_L , özgül hacmi, α kanal genişlik/derinlik veya derinlik/genişlik oranını ($0 < \alpha < 1$) ve f_{sp} , tek fazlı sıvı akışı için Fanning sürtünme faktörünü ifade etmektedir. Burada, deneyler süresince tek fazlı akış bölgesinde gelişmekte olan akış söz konusudur. Bu nedenle f_{sp} için Muzychka ve Yovanovich [18] tarafından önerilen bağıntı kullanılmıştır.

Doymuş kaynama bölgesindeki yerel basınç ($P_{w,n}$), Eşitlik (11) ile belirlenir.

$$P_{w,n} = P_{w,xe=0} - \left(\frac{P_{w,xe=0} - P_{ch,o}}{L - L_{sp}} \right) (L_n - L_{sp}) \quad (11)$$

$$P_{w,xe=0} = P_{ch,i} - \Delta P_{sp} \quad (12)$$

$P_{w,xe=0}$, kuruluk derecesinin sıfır olduğu noktadaki basıncı, L_n , yerel doyma basıncının hesaplanacağı konum ile kanal girişi arasındaki uzunluğu, $P_{ch,i}$ ve $P_{ch,o}$ sırasıyla kanal giriş ve çıkış basıncını ifade etmektedir. Yukarıda verilen hesaplama prosedürü, literatürdeki çalışmalardan (Mirmanto [19], Mahmoud vd. [20], Qu ve Siu-Ho [21]) yararlanılarak oluşturulmuştur.

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

$$x_{e,n} = \frac{\left(\frac{q''_w A_t L_n}{L} - \dot{m}c_{p,L}(T_{sat,n} - T_i) \right)}{\dot{m}i_{Lv}} \quad (13)$$

$$x_{e,o} = \frac{(q''_w A_t - \dot{m}c_{p,L}(T_{sat,o} - T_i))}{\dot{m}i_{Lv}} \quad (14)$$

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

Test bölgesindeki toplam basınç düşümü büyük hazneler arasını kapsamaktadır. Kanalın giriş ve çıkış basınç değerlerinin belirlenebilmesi için haznelerdeki kesit değişimi sebebiyle meydana gelen basınç kayıpları ve kazanımlarının belirlenmesi gerekmektedir. İlgili basınç değişimleri ve tanımları aşağıda verilmiştir.

$$P_{ch,i} = P_i - (\Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}) \quad (15)$$

$$\Delta P_{c1} = \frac{V_{L,i}}{2} (G_{P2,i}^2 - G_{P1,i}^2) + \frac{K_{c1} V_{L,i}}{2} G_{P2,i}^2 \quad (16)$$

$$\Delta P_{c2} = \frac{V_{L,i}}{2} (G^2 - G_{P2,i}^2) + \frac{K_{c2} V_{L,i}}{2} G^2 \quad (17)$$

$$K_{c1} = 0.6740 + 1.2501\beta_{P2} + 0.3417\beta_{P2}^2 - 0.8358\beta_{P2}^3 \quad (18)$$

$$K_{c2} = 0.6740 + 1.2501\beta + 0.3417\beta^2 - 0.8358\beta^3 \quad (19)$$

$$\beta_{P2} = \frac{H_{P2}}{W_{P2}} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{W_{ch}}{H_{ch}} \text{ veya } \frac{H_{ch}}{W_{ch}} \quad 0 < \beta < 1 \quad (21)$$

Burada; P_{chi} , kanal girişindeki basıncı, P_i , büyük hazneden ölçülen giriş basıncını, ΔP_{c1} ve ΔP_{c2} sırasıyla büyük hazneden küçük hazneye ve küçük hazneden mini kanala girişte kesit daralması nedeniyle oluşan basınç kayıplarını, K_{c1} ve K_{c2} , kesit daralması kayıp katsayılarını ifade etmektedir. Çıkış bölümüyle ilgili basınç düşümü ifadeleri ise aşağıda verilmiştir:

$$P_o = P_i - \Delta P_{tot} \quad (22)$$

$$P_{ch,o} = P_o + \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} \quad (23)$$

$$\Delta P_{e2} = \frac{V_{L,o} + X_{e,o} V_{Lg,o}}{2} (G_{P2,o}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} (V_{L,o} + X_{e,o} V_{Lg,o})}{2} G^2 \quad (24)$$

$$\Delta P_{e1} = \frac{V_{L,o} + X_{e,o} V_{Lg,o}}{2} (G_{P1,o}^2 - G_{P2,o}^2) + \frac{K_{e1} (V_{L,o} + X_{e,o} V_{Lg,o})}{2} G_{P2,o}^2 \quad (25)$$

$$K_{e2} = \left(1 - \frac{A_{ch}}{A_{P2}}\right)^2 \quad (26)$$

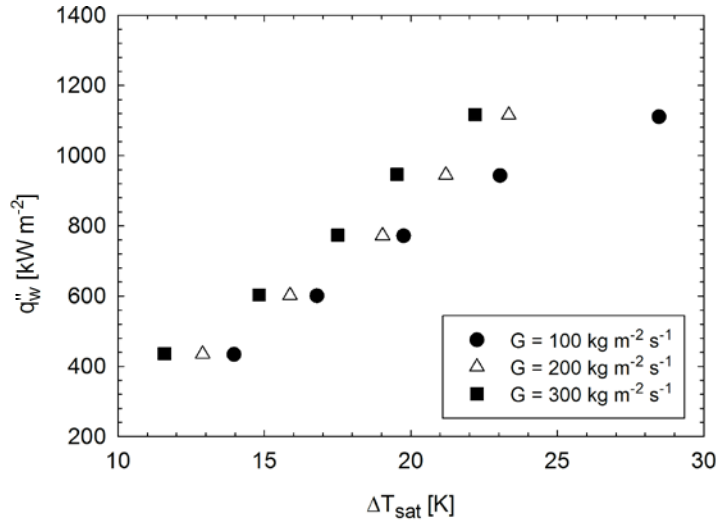
$$K_{e1} = \left(1 - \frac{A_{P2}}{A_{P1}}\right)^2 \quad (27)$$

Burada; ΔP_{tot} , diferansiyel basınç sensörüyle ölçülen toplam basınç düşümünü, P_o , çıkıştaki büyük haznedeki basıncı, ΔP_{e2} ve ΔP_{e1} , sırasıyla, mini kanaldan küçük hazneye ve küçük hazneden büyük hazneye kesit genişlemesinden dolayı oluşan basınç kazanımlarını, K_{e2} ve K_{e1} ise kesit genişlemesi kazanım katsayılarını ifade etmektedir. Kesit daralması basınç kayıpları ile kesit genişlemesi basınç kazanımlarının belirlenmesine yönelik bu tür yaklaşımlar literatürde yer almaktadır (Qu ve Siu-Ho [21], Qu ve Mudawar [22], Lee ve Garimella [23], Qu vd. [24], Collier ve Thome [25], Blevins [26]).

3. BULGULAR ve İRDELEME

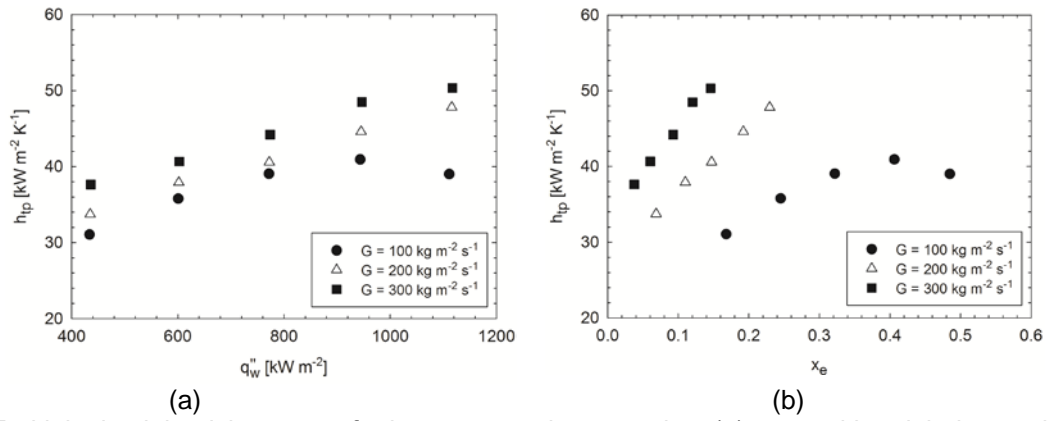
Bu çalışmada, farklı kütle akılarında (100, 200 ve 300 kg/m²s) ve ısı yüklerinde (89.8, 119.8, 149.9, 179.9 ve 210.1 W) deneyler yapılmıştır. İş akışkanının test bölgesine giriş sıcaklığı 86 ± 2 °C'de sabit tutulmuştur. İki faz ısı transfer katsayısı kanal girişinden 46.5 mm uzaklıkta bulunan beşinci termoeleman dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 4'te kaynama eğrileri verilmiştir. Kanalın taban yüzey sıcaklığı (T_w) ile doyma sıcaklığı (T_{sat}) arasındaki farkı ifade eden duvar kızma farkı (ΔT_{sat}), bütün kütle akısı değerleri için, artan duvar ısı akısı ile lineer bir şekilde artmaktadır. Verilen bir ısı akısı değerinde ise kızma farkının artan kütle akısı ile azaldığı görülmektedir. İlgili eğilimlerin sebebi değişen çalışma koşullarına bağlı olarak yüzey sıcaklığında meydana gelen artış veya azalıştır. Sabit bir kütle akısı değerinde artan ısı akısı, yüzey sıcaklığını artırırken, verilen bir ısı yük değeri altında kütle akısındaki artış yüzey sıcaklığında azalmaya yol açmaktadır. Burada, vurgulanması gereken önemli noktalardan bir diğeri de, en düşük debi ve en yüksek ısı akısına karşılık gelen verideki belirgin sapmadır. Başka bir ifade ile bu test koşuluna karşılık gelen kızma farkı değeri, diğer durumdakilere kıyasla belirgin bir sıçrama göstermiştir. Bunun nedeni ise kanalda meydana gelen kısmi kuruma ve/veya kuruma olayıdır.

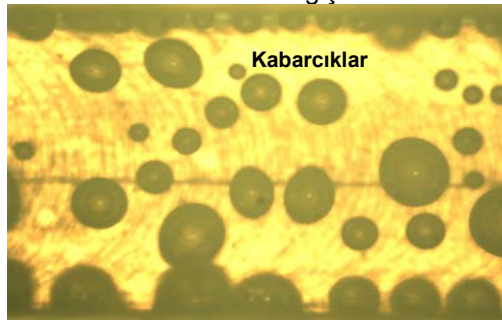


Şekil 4. Farklı kütle akıları için kaynama eğrileri.

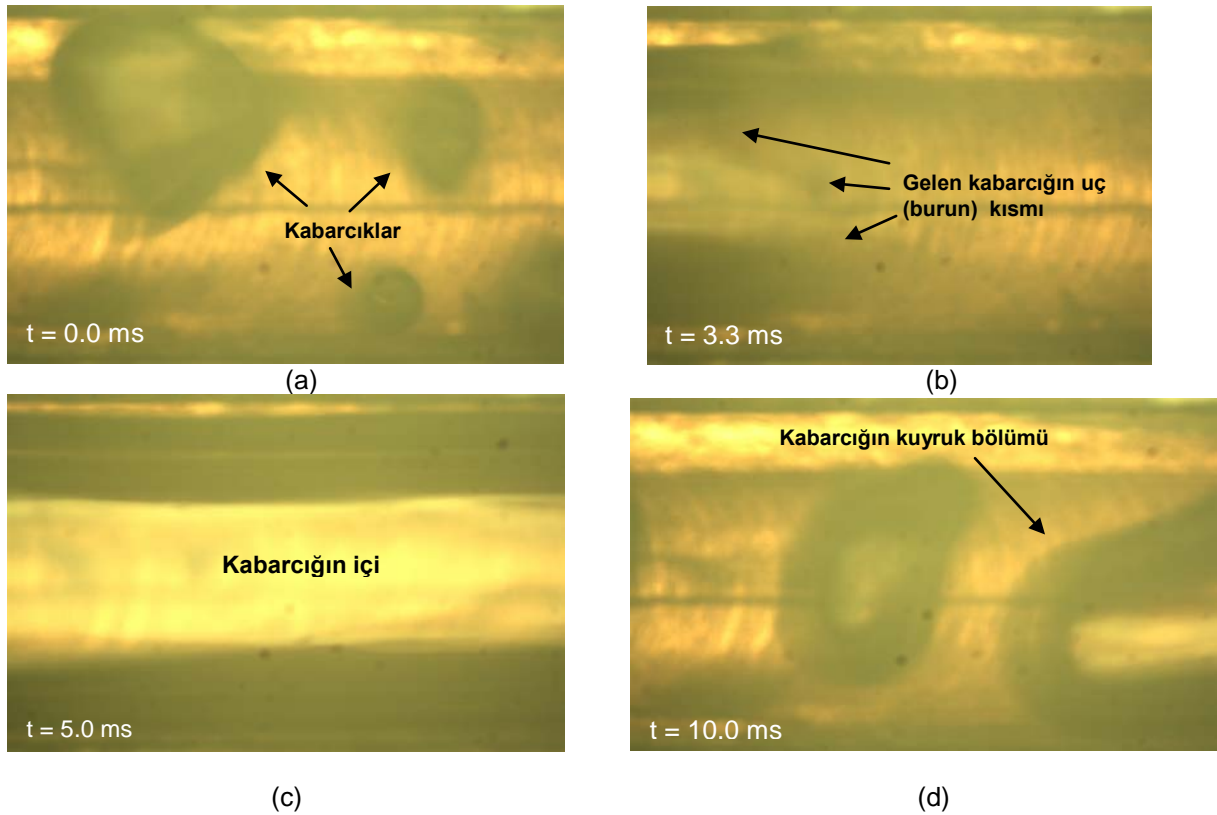
Şekil 5a ve b'de, iki faz ısı transfer katsayısının farklı kütle akıları için, sırasıyla, duvar ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Isı transfer katsayısı genel karakter olarak artan ısı akısı ve kuruluk derecesi ile artmaktadır. Isı transfer katsayısının ısı akısına bu şekilde bağlı olması, kabarcıklı kaynamanın etkin ısı transfer mekanizması olduğunun bir göstergesidir. Ancak, bu sonuç, sadece Şekil 5'te sunulan deneysel verilerin eğilimine dayalı olarak ifade edilmemiştir. Ölçümlerle eş zamanlı olarak, yüksek hızlı kamera ile alınan akış görüntülerine bakıldığında da kanal içerisinde kabarcıklı kaynamanın etkin olduğu görülmektedir. Şekil 6'da kanal girişinden 1.5 mm uzaklıkta, $G=300 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $q = 89.8 \text{ W}$ çalışma koşulları altında alınan akış görüntüsünde, kanal içerisinde etkin bir kabarcıklaşmanın olduğu anlaşılmaktadır. Kanalın çıkışa yakın bölümlerinde ise oluşan kabarcıkların birleşerek daha büyük kabarcıkları oluşturduğu (daha büyük kabarcık geçişi) ve yine kabarcıklı kaynamayı temsil eden kabarcıklı / kabarcık – sıvı yığını dizili akış (*slug flow*) desenlerinin baskın olduğu görülmektedir. Ayrıca, kabarcıklaşma ve/veya kabarcıkların var olması yine bu bölümlerde de devam edebilmektedir. Şekil 7'de bir sıra halinde akış görüntüleri verilerek bu bulgular desteklenmiştir. Kabarcıklaşmanın devam etmesi, buhar kabarcığının geçişi ve arkasından sıvı yığınının gelmesi açıkça görülmektedir. Burada ilk görüntünün zamanı referans olarak seçilerek başlangıç zamanı ($t = 0.0 \text{ ms}$) olarak alınmıştır. En düşük debinin en yüksek ısı güç değerinde, kısmi kuruma sebebiyle ısı transfer katsayısında azalma meydana gelmektedir. Şekil 4'te yapılan açıklamayı da destekleyecek şekilde bu durum, ilgili çalışma koşullarına karşılık gelen ve Şekil 8'de verilen görüntü ile görsel olarak da sunulmuştur. Isı transfer katsayısı, ayrıca, artan kütle akısı ile de artmaktadır. Kütle akısındaki artış yüzeylerin daha etkili bir şekilde ıslanmasına yol açmaktadır. En yüksek ısı güce karşılık gelen ısı transfer katsayısı değerlerine bakıldığında, bu etki belirgin bir şekilde görülmektedir.



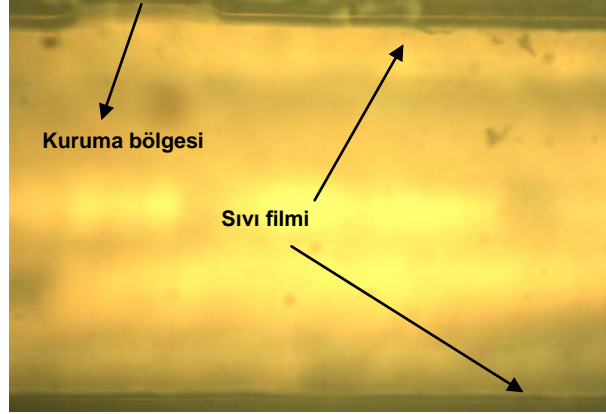
Şekil 5. Farklı kütle akıları için ısı transfer katsayısının duvar ısı akısı (a) ve yerel kuruluk derecesi (b) ile değişimi.



Şekil 6. Kabarcıklı kaynama (kanal girişinden 1.5 mm uzaklıkta, $G=300$ kg m⁻² s⁻¹ ve $q = 89.8$ W)

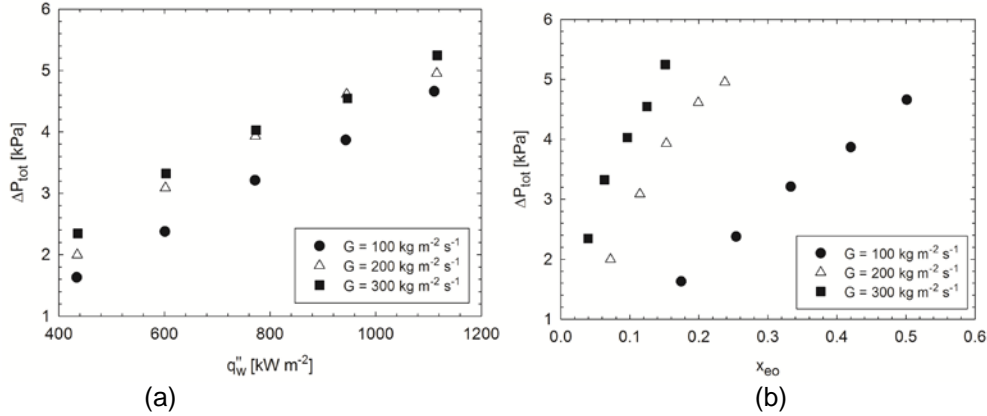


Şekil 7. Akış deseni sırası ve kabarcıklı / kabarcık – sıvı yığılı dizili akışın gösterimi (kanal girişinden 46.5 mm uzaklıkta, $G=300$ kg m⁻² s⁻¹ ve $q = 89.8$ W)



Şekil 8. Kısmi kuruma (kanal girişinden 46.5 mm uzaklıkta, $G=100 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $q = 210.1 \text{ W}$)

Şekil 9a ve b'de farklı kütle akısı değerleri için toplam basınç düşümünün, sırasıyla, duvar ısı akısı ve çıkış kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Toplam basınç düşümü artan ısı akısı ile belirgin bir şekilde artmaktadır. Bunun muhtemel nedenleri buharın ivmelenmesi ve sürtünme basınç düşümü bileşenidir. Benzer şekilde, basıncın genel karakter olarak artan kütle akısı ile artması da sürtünme basınç düşümü ile ilişkilendirilebilir. Basınç düşümü, ayrıca, artan çıkış kuruluk derecesi ile de artmaktadır.



Şekil 9. Farklı kütle akıları için toplam basınç düşümünün duvar ısı akısı (a) ve çıkış kuruluk derecesi (b) ile değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kanal genişliği, kanal yüksekliği ve hidrolik çapı, sırasıyla, 1.8 mm, 0.9 mm ve 1.2 mm olan tek dikdörtgen kesitli bir minikanalda deiyonize suyun doymuş kaynamalı akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir:

- Genel karakter olarak, iki faz ısı transfer katsayısı artan ısı akısı, kuruluk derecesi ve kütle akısı ile artmaktadır.
- Genel karakter olarak, toplam basınç düşümü artan ısı akısı, çıkış kuruluk derecesi ve kütle akısı ile artmaktadır.
- Kabarcıklı kaynama baskın ısı transfer mekanizmasıdır.
- Baskın akış desenleri kabarcıklı / kabarcık – sıvı yığını dizili akıştır.
- Duvar kızma farkı, bütün kütle akısı değerleri için, artan duvar ısı akısı ile artmaktadır.

5. KAYNAKLAR

- [1] TRAN, T. N., WAMBSGANSS, M. W., FRANCE, D.M., “Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants”, *International Journal of Multiphase Flow*, 22, 485-498, 1996.
- [2] LEE, H. J., LEE, S. Y., “Heat transfer correlation for boiling flows in small rectangular horizontal channels with low aspect ratios”, *International Journal of Multiphase Flow*, 27, 2043-2062, 2001.
- [3] YU, W., FRANCE, D. M., WAMBSGANSS, M. W., HULL, J. R., “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, 927–941, 2002.
- [4] HUAI, X., KOYAMA, S., ZHAO, T. S., SHINMURA, E., HIDEHIKO, K., MASAKI, M., “An experimental study of flow boiling characteristics of carbon dioxide in multiport mini channels”, *Applied Thermal Engineering*, 24, 1443–1463, 2004.
- [5] HUO, X., CHEN, L., TIAN, Y.S., KARAYIANNIS, T.G., “Flow boiling and flow regimes in small diameter tubes”, *Applied Thermal Engineering*, 24, 1225–1239, 2004.
- [6] SAITOH, S., DAIGUJI, H., HIHARA, E., “Effect of tube diameter on boiling heat transfer of R-134a in horizontal small-diameter tubes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4973–4984, 2005.
- [7] BALASUBRAMANIAN, P., KANDLIKAR, S.G., “Experimental Study of Flow Patterns, Pressure Drop, and Flow Instabilities in Parallel Rectangular Minichannels”, *Heat Transfer Engineering*, 26, 20–27, 2005.
- [8] BANG, K.H., KIM, K.K., LEE, S.K., LEE, B.W., “Pressure effect on flow boiling heat transfer of water in minichannels”, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 280-286, 2011.
- [9] KAEW-ON, J., SAKAMATAPAN, K., WONGWISES, S., “Flow boiling heat transfer of R134a in the multiport minichannel heat exchangers”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 364–374, 2011.
- [10] COPETTI, J. B., MACAGNAN, M. H., ZINANI, F., KUNSLER, N. L. F., “Flow boiling heat transfer and pressure drop of R-134a in a mini tube: an experimental investigation”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 636–644, 2011.
- [11] LIM, T. W., YOU, S. S., CHOI, J. H., KIM, H. S., “Experimental investigation of heat transfer in two phase flow boiling”, *Experimental Heat Transfer*, 28, 23–36, 2015.
- [12] KEEPAIBOON, C., WONGWISES, S., “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, 2015.
- [13] MARKAL, B., AYDIN, O., AVCI, M., “Effect of aspect ratio on saturated flow boiling in microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 130–143, 2016.
- [14] MARKAL, B., AYDIN, O., AVCI, M., “An Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Square Microchannels”, *International Journal of Refrigeration*, 65, 1–11, 2016.
- [15] MARKAL, B., Mikrokanallarda kaynamalı akışın deneysel incelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
- [16] KLINE, S.J., MCCLINTOCK, F.A., “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”, *Mechanical Engineering*, 73, 3-8, 1953.
- [17] ÇENGEL, Y. A., “Heat and mass transfer: A practical approach”, 3 rd edition, 2006.
- [18] MUZYCHKA, Y., S., YOVANOVICH, M., M., “Pressure drop in laminar developing flow in noncircular ducts: A scaling and modeling approach”, *Journal of Fluids Engineering*, 131, 1-11, 2009.
- [19] MIRMANTO, M., “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, 2014.
- [20] MAHMOUD, M.M., KARAYIANNIS, T.G., KENNING, D.B.R., “Flow Boiling Pressure Drop of R134a in Microchannels Tubes: Experimental Results and Assessment of Correlations”, *Heat Transfer Engineering*, 35, 178-192, 2014.
- [21] QU, W., SIU-HO, A., “Experimental Study of Saturated Flow Boiling Heat Transfer in an Array of Staggered Micro-Pin-Fins”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1853-1863, 2009.
- [22] QU, W., MUDAWAR, I., “Measurement and Prediction of Pressure Drop in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2737-2753, 2003.



- [23] LEE, P., GARIMELLA, S. V., “Saturated Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Silicon Microchannel Arrays”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 789–806, 2008.
- [24] QU, W., MUDAWAR I., LEE, S.Y., WERELEY, S.T., “Experimental and Computational Investigation of Flow Development and Pressure Drop in a Rectangular Microchannel”, Journal of Electronic Packaging, 128, 19, 2006.
- [25] COLLIER, J.G., THOME, J.R., “Convective Boiling and Condensation”, (Third Edition). USA: Oxford University Press, 1994.
- [26] BLEVINS, R.D., “Applied Fluid Dynamics Handbooks”, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe CANDAN

1991 yılı Ankara doğumludur. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı yıl içerisinde KTÜ Makina Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başlamıştır. 2015 yılından beri KTÜ Makina Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Termodinamik, Isı Transferi, Kaynamalı Akış konularında çalışmaktadır.

Burak MARKAL

1985 yılı Trabzon doğumludur. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimini tamamlayarak doktor unvanını almıştır. Mikrokanallarda kaynamalı akış, ısı ve kütle transferi, ısı boruları, mikroakışkanlar, elektronik sistemlerin soğutulması, vorteks tüpler ve dönmeli akışlar konularında çalışmaktadır.

Orhan AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı öğretim üyesidir. Yüze yakın uluslararası saygın dergide yayınlanmış makalesi, uluslararası saygın bir yayınevi tarafından basılan bir kitap bölümü, çok sayıda yurtiçi ve yurtdışı bildirisi mevcuttur.

Mete AVCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Mikrokanallarda ısı ve kütle transferi, ısı enerjisi depolama, Newtonumsu olmayan akışkanlar dinamiği ve gözenekli ortamlarda aktarım konularında çalışmaktadır.