

MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLI VE MİKRO OYUKLU ISI ALICIDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

¹Burak MARKAL , ²Beyzanur KUL 

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE

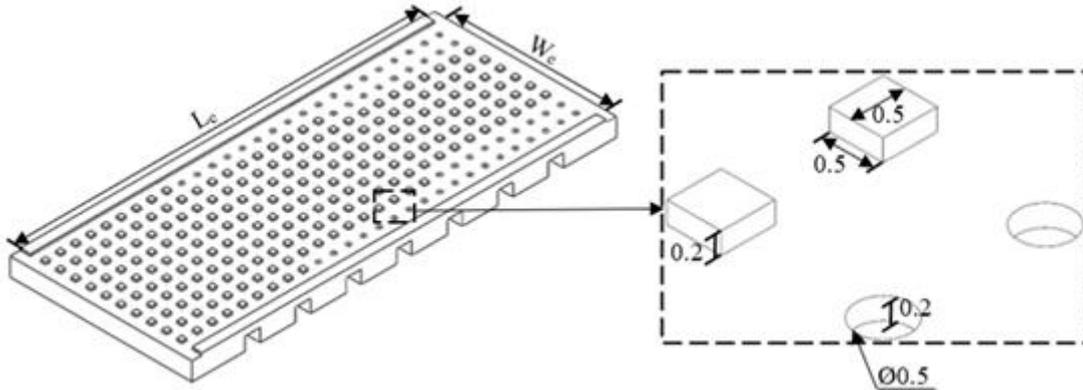
²Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE

¹burak.markal@erdogan.edu.tr, ²beyzanur_kul19@erdogan.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Konvansiyonel ısı alıcıya (KIA) kıyasla, modifiye edilmiş ısı alıcı (MIA) iki faz ısı transfer katsayısını %827.2'ye kadar artırmıştır.
- MIA'da hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkin ısı transfer mekanizmalarıdır.
- MIA kabarcık tıkanma problemini ortadan kaldırmıştır ve giriş sıcaklığı ve basıncı için çok düşük standart sapma değerleri sunmuştur.

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



Not: Bütün ölçümler mm cinsinden verilmiştir.

MIA; mikro kanatçık ve oyuklar
(MIA; micro fin and cavities)



MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLI VE MİKRO OYUKLU ISI ALICIDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

¹Burak MARKAL , ²Beyzanur KUL 

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE

² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE

¹burak.markal@erdogan.edu.tr, ²beyzanur_kul19@erdogan.edu.tr

(Geliş/Received: 26.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.11.2022)

ÖZ: Mikrokanallarda kaynamalı akış, hava araçlarındaki yüksek kapasiteli elektronik sistemler, bilgisayar işlemcileri ve elektrikli araç bataryaları gibi yüksek yoğunluklu atık ısının açığa çıktığı sistemlerde, sürdürülebilirlik ve güvenli çalışma koşulları için gerekli olan soğutma çözümlerini sunma potansiyeline sahip popüler bir ısı kontrol tekniğidir. Bu makalede, farklı kütle (136 ve $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ve ısı akısı ($132 - 272 \text{ kW m}^{-2}$) değerlerinde deiyonize suyun kademeli olarak genişleyen akış kesitine ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda (modifiye edilmiş ısı alıcı, MIA) doymuş kaynamalı akışı deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar düz duvarlı paralel mikro kanallı ısı alıcı (konvansiyonel ısı alıcı, KIA) üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. İş akışkanının giriş sıcaklığı yaklaşık $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 'da sabit tutulmuştur. Yüksek hızlı kamera ile akış görüntüleri alınmış (1000 fps) ve fiziksel mekanizma görüntülerle desteklenerek irdelenmiştir. MIA'da, KIA'ya kıyasla, iki fazlı ısı transfer katsayısında %827.2'ye kadar artış sağlanmış ve kaynama kararsızlıkları etkin bir şekilde bastırılabilmiştir. Isı transferindeki iyileşmeye karşı, basınç düşümünde %50.5'e kadar artış olmuştur. Genel karakter olarak, her iki ısı alıcısında da kütle akısının basınç düşümü üzerindeki etkisi görece ihmal edilebilir düzeyde olup, artan kütle akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır. MIA'ya ait sonuçlar, KIA'ya kıyasla, kütle akısındaki değişimden görece daha çok etkilenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaynamalı Akış, Mikrokanal, Yapay Kabarcıklaşma Odakları, Kesit Genişlemesi

Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Characteristics in Micro Pin Fin and Micro Cavitied Heat Sinks

ABSTRACT: Flow boiling in microchannels is a popular thermal management technique with the potential to provide cooling solutions required for sustainability and safe operating conditions in systems where high-density waste heat is released, such as high-capacity electronic systems in aircrafts, processors of computers, and batteries of electric vehicles. In the present paper, saturated flow boiling of deionized water in a heat sink having gradually expanding flow passage and artificial nucleation sites (modified heat sink, MIA) was experimentally investigated at different mass (136 and $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and heat flux ($132 - 272 \text{ kW m}^{-2}$) values. Results were comparatively presented via plain wall parallel microchannel heat sink (conventional heat sink, KIA). Inlet temperature of working fluid is kept constant at nearly $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Flow images were taken via high-speed camera (1000 fps), and the physical mechanism was scrutinized by supporting with the images. Compared to KIA, in the MIA, an improvement in two-phase heat transfer coefficient up to 827.2% is obtained, and flow boiling instabilities could be successfully suppressed. Contrary to enhancement in heat transfer, an increase up to 50.5% occurred for pressure drop. As general character, for both the heat sinks, effect of mass flux on pressure drop is relatively negligible, and heat

*Corresponding Author: Burak MARKAL, burak.markal@erdogan.edu.tr

transfer coefficients decrease with increasing mass flux. Compared to KIA, results of MIA are relatively more influenced from variation in mass flux.

Keywords: *Artificial Nucleation Sites, Expansion of Cross Section, Flow Boiling, Microchannel*

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üretim alanındaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak mikro/nano boyutlu bileşenlerin imalatının kolayca gerçekleştirilebilmesi ve dijital sistemlerin fonksiyonelliğine yönelik beklentilerin giderek artması, ısı kontrolün önemini gün geçtikçe artıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu sebeple hem mikro sistemlere adaptasyonu kolay hem de yüksek ısı uzaklaştırma potansiyeline sahip ısı transfer mekanizmaları ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, [1-2] çalışmalarında da ifade edildiği üzere, ultra kompakt yapı sunmaları, doymuş koşullar sebebiyle yüzey sıcaklığının nispeten sabit tutulması, mikro akış pasajları sayesinde birim zamanda mililitre düzeyinde debilerde çalışmaları ve kaynama mekanizması aracılığıyla yüksek ısı uzaklaştırma potansiyeline sahip olmaları sebebiyle mikrokanallarda kaynamalı akış popüler ısı kontrol teknikleri arasında yer almaktadır. Mikrokanallarda kaynamalı akışlara yönelik çalışmalar, atık ısı yoğunluğunun yüksek olduğu; elektrikli veya hibrit araçlar, roket lüleleri, uzay araçları ve havacılık elektroniği, türbin kanatları, yüksek işlemcili bilgisayarlar ve benzeri sistemleri/cihazları yakından ilgilendirmektedir [3-4]. Bu sebeple, mikrokanallarda kaynamalı akışta performans artışı sağlayacak geometrik düzenlemelere ve geometrik yapıya ek olarak diğer çalışma koşullarının akış ve ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmalara ilgi artmaktadır. Bu kapsamda, özellikle son yıllarda, mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcılarda kaynamalı akış ön plana çıkmaktadır.

[5] çalışmasında kaydırılmış sıralı olarak yerleştirilmiş hidrofoil şekilli pim tipi kanatçıklara sahip ısı alıcıda farklı kütle ($976 - 2349 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ve ısı akılarında ($19 - 312 \text{ W cm}^{-2}$) R-123 iş akışkanının kaynamalı akışı incelenmiştir. Isı transfer katsayılarının artan ısı akısı ile arttığını ve bir maksimuma eriştikten sonra sürekli olarak azaldığını, düşük ısı akısı değerlerinde kabarcıklı kaynamanın yüksek ısı akısı değerlerinde ise taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ve artan kütle akısı ile kritik ısı akısı koşulunun yüksek ısı güç değerlerine ötelendiğini belirtmişlerdir. [6] çalışmasında kare kesitli mikro boyutlu pim tipi kanatçıklara sahip silikon ısı alıcıda FC-72 iş akışkanı kullanarak kaynamalı akışa yönelik çalışma yapılmıştır. Kanatçiksiz ısı alıcı referans olarak dikkate alınmış olup, taban kesiti $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ölçülerinde sabit olan ve yükseklikleri sırasıyla $60 \mu\text{m}$ ve $120 \mu\text{m}$ olan kanatçıklardan oluşan iki farklı ısı alıcı üzerinde çalışmışlardır. Kanatçıklı ısı alıcıların kanatçiksiz duruma göre ısı transferini iyileştirdiğini ve en yüksek kritik ısı akısı değerinin 150 W cm^{-2} olarak 2 m s^{-1} akışkan hızında ve 35 K aşırı soğutma derecesinde $120 \mu\text{m}$ kanatçık yüksekliğine sahip ısı alıcı için elde edildiğini göstermişlerdir. [7] çalışmasında pirana pim kanatçık olarak adlandırdıkları kanatçıklara sahip ısı alıcıda HFE7000 iş akışkanının kaynamalı akışı deneysel olarak incelenmiştir. İki farklı akış konfigürasyonunu dikkate almışlardır. Birincisinde, akışkan sadece kanatçıklı bölgede bulunan çıkış deliklerinden ana akış eksenine dik olarak ısı alıcısını terk etmekte olup sızdırma akışı olarak adlandırılmıştır. İkincisinde ise akışkan hem kanatçıklı bölge tabanından hem de kanatçıkların bitiminden sonra açılmış olan geniş bir kanaldan ısı alıcısını terk etmekte olup, açık akış olarak adlandırılmıştır. Sızdırma akışı için elde edilen ısı transfer katsayıları, açık akışa kıyasla daha büyüktür, ancak ısı transferindeki iyileşmeye karşın basınç düşümünde artış meydana gelmiştir. [8] çalışmasında mikro pim tipi kanatçıklı buharlaştırıcıdaki kaynamalı akış incelenmiştir. Akış desenine dayalı yeni bir metot geliştirmişlerdir. Uzun kabarcıklı akış ve halkasal akışla ilgili ısı transfer mekanizmaları dikkate alınmıştır. 7219 veri noktası kullanarak geliştirdikleri model, tüm veri tabanı üzerinden %23.4 ortalama mutlak hata ile verilerin %72'sini tahmin edebilmiştir. [9] çalışmasında FC-72'nin mikro pim tipi kanatçıklı bir ısı alıcıdaki aşırı soğuk kaynamalı akış incelenmiştir. Düşük ve orta düzeyli ısı akısı değerlerinde yer çekiminin kaynamalı akışta ısı transferi üzerinde kabarcıkların yüzeyden ayrılması açısından bir etkisinin olmadığını, yüksek ısı akılı bölgede ısı performansın düştüğünü ve kanal içindeki kabarcık birikiminin kritik ısı akısına yol açtığını ifade etmişlerdir. [10] çalışmasında pim tipi kanatçıklı bir mikrokanalda kaynamalı akışı deneysel olarak

incelenmiştir. Temel olarak yerel ve zaman bağımlı sıcaklık ölçümüne odaklanmış ve bu kapsamda mikro direnç sıcaklık detektörleri kullanmışlardır. Sıcaklık ölçümleri akış görüntüleriyle senkronize olarak alınmıştır. Uzun kabarcıklı akışta çevrimsel sıcaklık çalkantıları gözlemlenmiş olup, bir çevrim iş akışkanının yüzeyi ıslatması, film buharlaşması ve yerel kuruma olaylarını içermektedir. [11] çalışmasında elmas şekilli pim tipi kanatçıklar ile yeniden girişli kesite sahip paralel kanalların bütünleşik formunu içeren bir ısı alıcı tasarlanmıştır. Kütle akısı $125 - 300 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aralığında değişmekte olup, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $10 \text{ }^\circ\text{C}$ olmak üzere iki farklı giriş aşırı soğutma derecesinde çalışmışlardır. Özgün geometrili ısı alıcı için elde ettikleri sonuçları konvansiyonel yeniden girişli paralel kanal için elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Su ve etanol kullanılarak yapılan testlerde, özgün geometride konvansiyonel geometriye kıyasla, su için %39 - %284 arasında, etanol için ise %29 - %220 arasında iyileşme (ısı transferi açısından) elde edilmiştir. Isı transferindeki iyileşme, birbiriyle bağlantılı kanal yapısı nedeniyle kabarcık sınırlandırma etkisinin azalmasına ve kabarcık oluşumu için uygun alanlarının varlığına atfedilmiştir. [12] çalışmasında farklı kanatçık kesitlerine sahip mikro pim tipi ısı alıcılarda, deiyonize suyun kaynamalı akışında, kabarcıklı kaynamanın başlangıcı (ONB) incelenmiştir. Dairesel, elmas ve oval şekilli kanatçıklara sahip ısı alıcılar kullanılmıştır. Farklı ısı akısı ve kütle akısı değerlerinde çalışmışlardır. Kabarcıklı kaynamanın daima kanatçıkların çevresinde başladığını görüntülemişlerdir. Kabarcıklı kaynamanın başlangıcı için gerekli olan ısı akısı ve duvar kızma farkının artan kütle akısı ve giriş soğutma derecesi ile arttığını belirtmişlerdir. Dairesel kesitli kanatçıklı yapıda ONB diğer şekillere kıyasla daha düşük ısı akısında gerçekleşmektedir. [13] çalışmasında açık halka tipi kanatçıklardan oluşan ısı alıcı geliştirmiş ve ilgili ısı alıcıda deiyonize suyun kaynamalı akış karakteristikleri incelenmiştir. Hem düz hem de kaydırılmış sıralı pim yerleşimleri dikkate alınmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda, her iki yerleşim düzeninde de ONB'nin $1 - 2 \text{ }^\circ\text{C}$ gibi oldukça küçük kızma farklarında oluştuğunu, artan ısı akısı ile sırasıyla kabarcıklı kaynama hem kabarcıklı kaynama hem de ince film buharlaşması ve taşınımli kaynama mekanizmalarının ısı transferi üzerinde etkin rol oynadığını ve kanatçıkların düzgün olarak dizildiği geometrinin hem ısı transferi hem de basınç düşümü açısından kaydırılmış sıralı olana kıyasla avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir. [14] çalışmasında sırasıyla 40° , 120° ve 150° temas açılarında sahip elmas şekilli mikro kanatçıklı ısı alıcıda kaynamalı akışta ısı transferi ve akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde ettikleri sonuçları dairesele, üçgen ve elips formundaki kanatçıklara sahip ısı alıcılarla karşılaştırmışlardır. Film kaynama, geçiş, kabarcıklı kaynama ve tek faz olmak üzere dört farklı akış rejimi görüntülemişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplamasının akış direncini azalttığını, temas açısındaki artışın ısı transferi açısından dezavantaj oluşturduğunu, elmas kanat şeklinin buhar kabarcıklarını parçaladığını belirtmişlerdir.

Mikrokanallarda kaynamalı akış, hava araçlarındaki yüksek kapasiteli elektronik sistemler, bilgisayar işlemcileri ve elektrikli araç bataryaları gibi yüksek yoğunluklu atık ısının açığa çıktığı sistemlerde, sürdürülebilirlik ve güvenli çalışma koşulları için gerekli olan soğutma çözümlerini sunma potansiyeline sahip popüler bir ısıl kontrol tekniğidir. Temelde, kompakt hale gelen bileşenlerde/sistemlerde hacim kısıtlaması ve artan ısı akısı probleminin çözümünü hedef alan bir ısıl kontrol tekniğidir. Yukarıdaki çalışmalardan da görüldüğü üzere, mikro kanatçıklı ısı alıcılarda kaynamalı akış güncel bir araştırma alanıdır ve ilgili konu kapsamında hem performans artışına yönelik hem de akış mekanizmalarının anlaşılmasına yönelik çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Isı alıcı geometrisinin direkt olarak kabarcık dinamiğini ve dolayısıyla ısı ve akış karakteristiklerini etkilemesi, geometrik-hidrolik-ısı birlikteliğin karmaşık ilişkisinin/yapısının tam olarak anlaşılabilmesi, geometrik tasarımların ve diğer çalışma parametrelerinin performans artışı üzerindeki etkilerinin açık bir araştırma alanı olması ve benzeri sebeplerle mikro pim tipi kanatçıklı yapılarda kaynamalı akışa yönelik yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, yazarların önceki çalışmalarında [15] çalışmasında literatüre özgün bir ısı alıcı geometrisi sunulmuştur. Kare kesitli pim tipi mikro kanatçıklardan oluşan ilgili ısı alıcıda, akış pasajının kesiti akış doğrultusunda kademeli olarak artmakta ve eksilen kanatçıkların yerinde yapay kabarcıklaşma oyukları bulunmaktadır. Bu çalışmada, ilgili ısı alıcı farklı çalışma koşulları altında incelenmiş olup, çalışmanın temel amacı farklı kütle akıları altında, kademeli olarak genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyukları içeren mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda doymuş kaynamalı akış

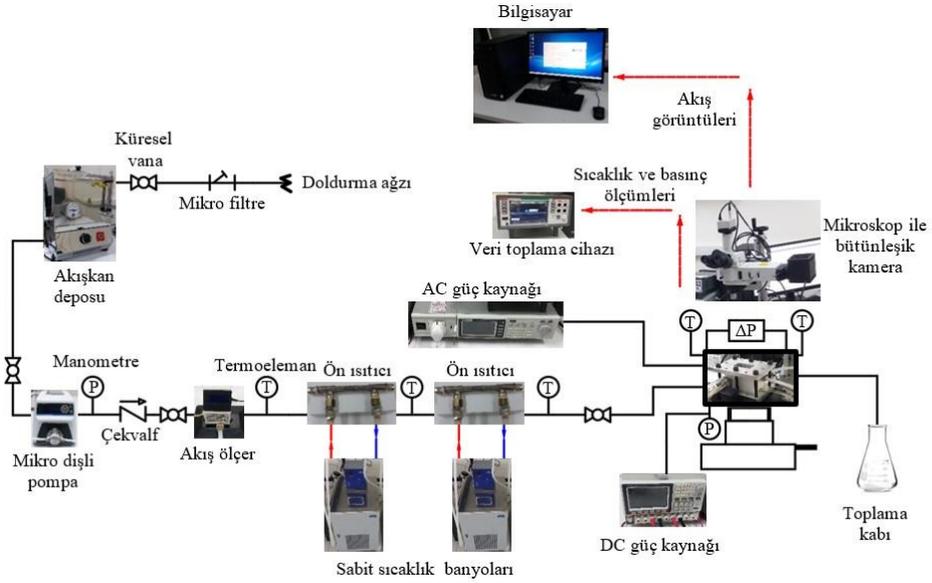
karakteristiklerini incelemek ve sonuçları düz duvarlı paralel kanallı konvansiyonel ısı alıcı üzerinden karşılaştırmalı olarak sunmaktır. İlgili geometriler, literatürde ilk kez, farklı kütle akıları ve dolayısıyla farklı çalışma koşulları altında incelenmiştir. Yüksek hızlı kamera ile akış görüntüleri alınarak akış desenleri, rejimleri ve sebep olduğu termo-hidrolik davranışlar fiziksel mekanizmalar üzerinden irdelenmiştir. İş akışkanı olarak deiyonize su kullanılmıştır.

2. DENEY DÜZENEGİ VE HESAPLAMA PROSEDÜRÜ (EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURE OF DATA ANALYSIS)

2.1. DeneY Düzenegi ve Detaylar (Experimental Setup and Details)

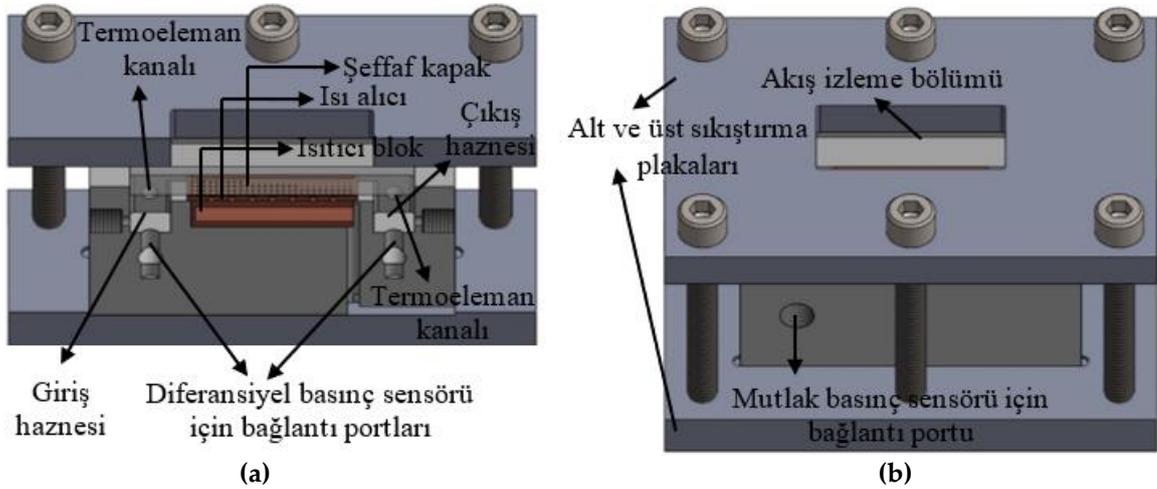
Bu makale tamamen deneysel çalışmaları kapsamakta olup, gerçekleştirilen deneylerde kullanılan düzenek Şekil 1'de şematik olarak sunulmuştur. DeneY düzenegi üç bölüm olarak tanımlanabilir: (1) iş akışkanını istenilen giriş koşullarında test bölgesine taşıyan akış hattı, (2) akışa ait ölçümlerin alındığı test bölgesi ve (3) görüntülerin alındığı ve ölçümlere ait verilerin depolandığı veri toplama ve görüntüleme bölümü. Aşağıdaki paragraflarda ilgili bölümler detaylandırılmıştır.

Akış hattı ve üzerine yerleştirilen ekipmanlar aracılığıyla iş akışkanı istenilen özelliklerde test bölgesine giriş yapabilmektedir. Akış hattındaki ilk ana bileşen akışkan deposudur. Akışkan deposu 8 µm'lik filtreden geçirilen iş akışkanı (deiyonize su) ile doldurulur. Böylece, olası herhangi kirletici veya yabancı maddelerin iş akışkanından ayrışması sağlanır. Depo, bir ısıtıcı ünite ile bütünleşik formda olup (ısıtıcı depo), ısıtma özelliği aktif hale getirilerek, iş akışkanı içinde çözünmüş halde bulunan gazların akışkandan ayrılması sağlanır. Bu işleme kaynamalı akış literatüründe gaz alma işlemi adı verilmekte olup, iş akışkanının şiddetli kaynatılmasıyla gerçekleştirilir [16-17]. İşlem sonucunda, iş akışkanı içindeki çözünmüş oksijen miktarı bir oksijen metre ile kontrol edilir. Depo içindeki akışkan dijital sürücülü mikro pompa ile emilerek akış hattına basılır. Dijital sürücünün devir sayısı değiştirilerek akışkanın hacimsel debisi ayarlanır. Aynı zamanda, sistemde bulunan dijital akış ölçerle debi değeri kontrol edilmektedir. Çalışma boyunca akışkanın istenilen sıcaklık değerinde test bölgesine girmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda, hem termal gerilme problemlerinin ortadan kaldırılması hem de istenilen sıcaklık değerinin hassas olarak ayarlanabilmesi için seri olarak yerleştirilmiş iki ön ısıtıcı kullanılmıştır. Ön ısıtıcılar gövde borulu ısı değiştiricisi ve sabit sıcaklık banyosu çiftinden oluşmaktadır. Sabit sıcaklık banyoları aracılığıyla iş akışkanının sıcaklığı istenilen değere kademeli olarak getirilebilmektedir. Akış hattı, ısıtıcılardan itibaren, ısı kayıplarını minimuma indirmek için yalıtılmıştır.



Şekil 1. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi
Figure 1. Schematic demonstration of the apparatus used in the experiments

Deney düzeneğindeki ana bölüm test bölgesi olup, detayları Şekil 2'de görülmektedir. Test bölgesi, çalışmaya temel teşkil eden mikro kanatçıklı ısı alıcıları ve deneylerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısıtıcı ve ölçüm ekipmanlarını barındırır.



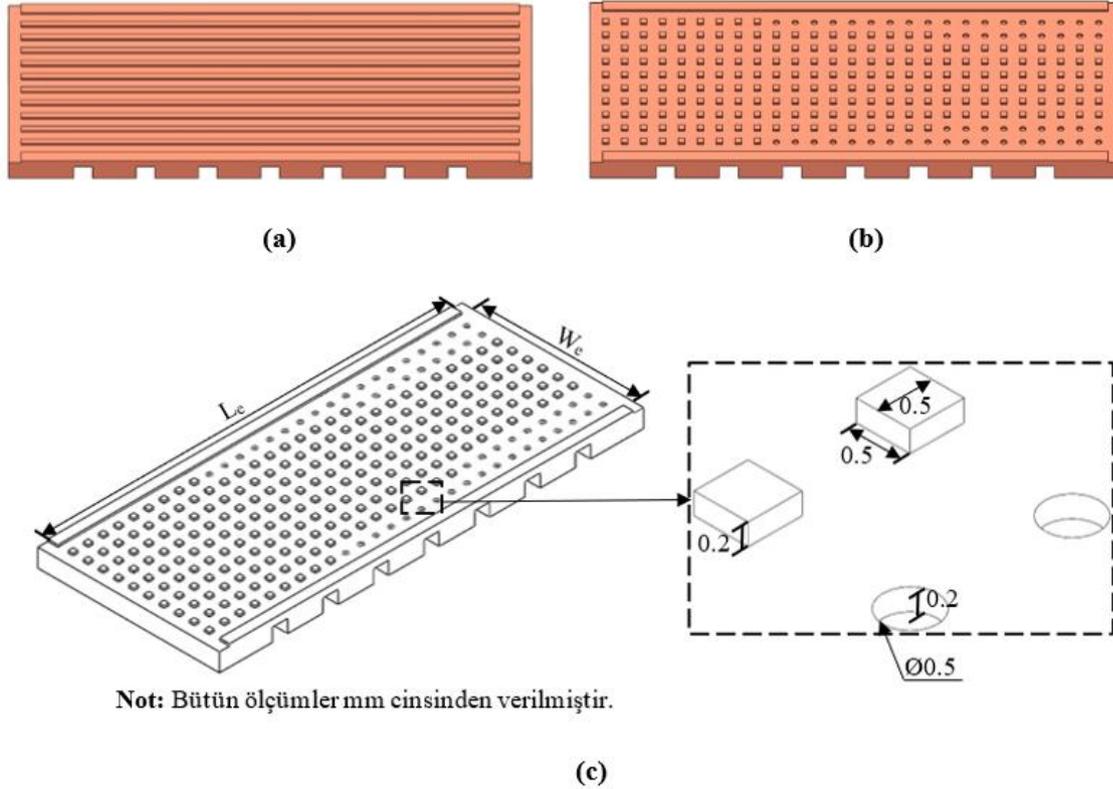
Şekil 2. Test bölgesinin detaylı gösterimi: (a) kesit görünüşü; (b) tam görünüş
Figure 2. Details of the test section: (a) partial view; (b) full view

Test bölgesindeki taşıyıcı blok Teflon malzemeden yapılmıştır. Teflon taşıyıcı blok içinde üç bölüm vardır. Birinci bölüm giriş haznesi olup, üç bağlantı portuna sahiptir. Bağlantı portlarının ikisi yanıl yüzeyler üzerinde, biri ise tabandadır. Yanıl yüzeylerden biri termo-elemanın giriş haznesine yerleşimi içindir ve termo-eleman bu port içerisinden geçirilerek giriş haznesine yerleştirilir. Böylece akışkanın giriş sıcaklığı ölçülebilmektedir. Karşı yanıl yüzeye açılan porta mutlak basınç sensörü bağlanır ve giriş basıncının ölçümünde kullanılır. Tabana açılan kanal ise toplam basınç düşümünün ölçümünde kullanılan diferansiyel basınç sensörü ile ilişkilidir.

Teflon bloğun ikinci bölümüne, ısı alıcısına istenilen ısı gücü uygulamak için bakır ısıtıcı plaka yerleştirilir. Bakır ısıtıcı plaka içerisinde iki kartuş ısıtıcı bulunmaktadır. Kartuş ısıtıcılar dijital olarak kontrol edilip, istenilen güç değerinin kolaylıkla okunabildiği AC güç kaynağı ile tahrik edilmektedir.

Bakır ısıtıcı plakanın üzerine ise ısı alıcı yerleştirilir. Üçüncü bölümde (çıkış haznesi) ise biri yanal yüzeyde diğeri ise tabanda olmak üzere iki port bulunmaktadır. Yanal port çıkış sıcaklığını ölçmede kullanılan termo-elemanın çıkış haznesine yerleşimini sağlamak için kullanılır. Tabandaki port ise diferansiyel basınç sensörünün diğeri koluyla bağlantılıdır. Böylece, diferansiyel basınç sensörü kullanılarak toplam basınç düşümü belirlenmiş olur. Test bölgesindeki basınç sensörlerinin DC bir güç kaynağı ile tahrik edildiği belirtilmelidir.

Test bölgesinin kritik parçası ısı alıcıdır. Bu çalışmada iki farklı ısı alıcı kullanılmış olup, detayları Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Isı Alıcılara ait detaylar: **(a)** MIA genel görünüş; **(b)** KIA genel görünüş; **(c)** MIA kanatçık ve oyuklar

Figure 3. Details of the heat sinks: **(a)** general view of MIA; **(b)** general view of KIA; **(c)** fins and nucleation sites

Birincisi kademeli genişleyen akış pasajı kesitine ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip ısı alıcıdır ve MIA ile kodlanmıştır. Ana akış doğrultusundaki kademeli genişleme veya kesit alanındaki kademeli artış kanatçık sayısının azalması ile sağlanmaktadır. Toplamda üç bölüm ve iki kademe bulunmaktadır. Birinci bölümde üniform olarak dağıtılmış, 9 sütun ve 10 sıra halinde her biri 200 μm yüksekliğe ve 500 μm uzunluk ve genişlik değerlerine sahip mikro kanatçıklar bulunmaktadır. Dokuzuncu sütundan sonra kanal merkezine göre simetrik olarak her iki tarafta da en dıştaki birer sıra kanatçık kaldırılarak yerlerine 500 μm çapa ve 200 μm derinliğe sahip yapay kabarcıklaşma oyukları yerleştirilmiştir. Bu bölüm ikinci bölüm olarak adlandırılmakta olup, 9 sütun ve 8 sıra kanatçık ile 9 sütun ve 2 sıra oyuktan oluşmaktadır. On sekizinci sütundan sonra üçüncü bölüm gelmektedir. Üçüncü bölümde en dıştaki ikişer sıra kanatçık kaldırılmış olup yerlerine yapay kabarcıklaşma oyukları açılmıştır. Üçüncü bölüm 9 sütun ve 6 sıra kanatçık ile 9 sütun ve 4 sıra oyuktan oluşmaktadır. MIA'da toplamda 216 mikro kanatçık ve 54 yapay kabarcıklaşma oyuğu bulunmaktadır.

Birinci bölge ile ikinci bölge ve ikinci bölge ile üçüncü bölge arasındaki geçişler, sırasıyla birinci ve ikinci kademe olarak adlandırılmaktadır. KIA olarak kodlanan diğeri ısı alıcı ise konvansiyonel nitelikte olup, düz duvarlı paralel mikrokanallardan oluşmaktadır ve karşılaştırmalı analize referans teşkil

etmektedir. Konvansiyonel ısı alıcı her biri 333 µm hidrolik çapa sahip on bir (11) paralel mikrokanaldan oluşmaktadır. Kanalların yüksekliği 200 µm, genişlikleri ve uzunlukları ise sırasıyla 1 mm ve 40 mm'dir.

Her iki ısı alıcının da akış pasajı geometrisi haricindeki tüm özellikleri aynıdır. Saf bakır malzemeden üretilen ısı alıcılar toplamda 2 mm kalınlığa sahip olup, ısıtılan (etkin) genişlik ve uzunluk değerleri sırasıyla 16 mm ve 40 mm'dir. İlgili genişlik ve uzunluk değerinin çarpımı aynı zamanda ısıtıcı plakanın platform alanına karşılık gelmektedir. Herhangi bir sızma problemini önlemek için ısı alıcıların toplam genişlik ve uzunluk değerleri 18 mm ve 42 mm olarak tasarlanmıştır. Bu sayede, boyuna ve enine doğrultularda birer milimetrelik pay bırakılarak ilgili bölümler ısıtılmayan teflon blok üzerine oturtulmuş ve ara yüzeylerdeki olası su sızıntısının önüne geçilmiştir. Isı alıcıların alt yüzeyinde akış pasajı boyunca eşit aralıklarla açılmış termo-eleman kanalları bulunmaktadır. Toplam yedi kanal açılmış olup, ilgili kanallar kullanılarak termo-elemanlar kanal girişinden, sırasıyla, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm ve 35 mm uzaklığa konumlandırılmış ve ilgili bölümlerden sıcaklık okumaları yapılmıştır. Termo-elemanlar mikrokanal taban yüzeyinin 0.5 mm altına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

Deney düzeneğinin son bölümü akış görüntüleme ve veri toplama ünitelerini içermektedir. Test bölgesi bir mikroskop standı üzerine yerleştirilmiş olup, mikroskop ve bütünlük yüksek hızlı kamera aracılığıyla akış görüntüleri alınmıştır. Saniyede 1000 görüntü alınmış olup, ilgili görüntüler kamera programı aracılığıyla bilgisayarda depolanmıştır. Deney düzeneğinden alınan sıcaklık ve basınç ölçümleri data logger aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Genel hatlarıyla bir deney sırasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Herhangi bir deneye başlamadan önce iş akışkanına gaz alma işlemi uygulanır.
- Dijital sürücülü pompa çalıştırılır ve devir saati üzerinden ayarlama yapılarak hem dijital gösterge paneli hem de sistemdeki akış ölçer kullanılarak istenilen debi değeri ayarlanır. Bu çalışmada, iki farklı kütle akışı ve bu kütle akılarına karşılık gelecek şekilde 18 ml dk⁻¹ ve 33 ml dk⁻¹ olmak üzere iki farklı hacimsel debi değerinde çalışılmıştır. Her iki ısı alıcının giriş kesit alanları aynı olduğu için hem aynı hacimsel debi değerlerinde hem de aynı kütle akılarında çalışılabilmiştir.
- Kalibrasyon banyosu hassasiyetindeki sıcaklık banyoları çalıştırılarak, ön ısıtıcılar (sabit sıcaklık banyosu + ısı değiştiricisi) aktif hale getirilir.
- AC güç kaynağı çalıştırılarak kartuş ısıtıcılar istenilen ısı güç değerini verecek şekilde aktif hale getirilir. Güç kaynağı ilk olarak 90 W ısı güç verecek şekilde ayarlanır.
- İlgili ısı güç değerinde sistem kararlı hale gelince ölçümler alınarak bir sonraki ısı güç değerine geçilir. Deneyler boyunca 90 W'tan başlamak üzere 10 W artışlarla 180 W'a kadar toplamda 10 farklı ısı güç değeri ve dolayısıyla bu değerlere karşılık gelen ısı akıları uygulanmıştır.
- İlgili debi değeri için tüm ısı güçlerde deney yapıldıktan sonra debi değiştirilerek işlemler tekrar edilir.

Yukarıda tanımlanan süreç her iki ısı alıcı için de gerçekleştirilir.

2.2. Hesaplama Prosedürü ve Belirsizlik Analizi Sonuçları (Procedure of Data Analysis and Results of Uncertainty Analysis)

Önceki bölümde de belirtildiği üzere her iki ısı alıcısı da aynı giriş kesit alanına sahiptir. Bu sebeple, her iki ısı alıcı için de hem aynı kütle akıda hem de aynı kütle debide çalışılabilmiş olup, kütle akı eşitliği aşağıda verilmiştir:

$$G = \frac{\dot{V} \rho_a}{A_{gi}} \quad (1)$$

Burada, A_{gi} ısı alıcı giriş kesit alanını (toplam); \dot{V} , hacimsel debiyi ve ρ_a , akışkan yoğunluğunu temsil etmektedir. Net ısı güç (q_{net}), güç kaynağı aracılığıyla sisteme kontrollü bir şekilde uygulanan ısı

güçten (q_u) ilgili çalışma koşulları altında oluşan kayıp ısı gücün (q_k) çıkartılması ile aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$q_{net} = q_u - q_k \quad (2)$$

Net ısı gücün ısıtıcı plakanın platform alanına bölünmesiyle efektif ısı akısı elde edilir.

$$q''_{eff} = \frac{q_{net}}{A_{pa}} \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan platform alanı ısıtıcı plakanın platform uzunluğu ile genişliğinin çarpımına eşittir. Isıtıcı plakanın platform uzunluğu aynı zamanda ısı alıcının ısıtılan (etkin) bölge uzunluğuna (L_e); platform genişliği ise ısı alıcının ısıtılan (etkin) bölge genişliğine (W_e) eşittir. Bu nedenle ısıtıcı plakanın platform alanı aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$A_{pa} = L_e \times W_e \quad (4)$$

Isı kaybı prosedürü özetle şu şekildedir: Test bölgesinde akışkan yokken, ısı güç uygulanır ve kararlı koşullar altında ısı alıcı boyunca yerleştirilen yedi termo-elemandan okunan sıcaklık değerinin aritmetik ortalaması ile ortam sıcaklığı arasındaki fark ilgili ısı güce karşılık kaydedilir. Bu işlem farklı ısı güçler için tekrarlanarak ısı kaybı kalibrasyon eğrisi ve eğriyi temsil eden korelasyon elde edilir. Herhangi bir deney esnasında, ortalama termo-eleman sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farka karşılık gelen ısı kaybı değeri ilgili korelasyon kullanılarak belirlenir. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi ve sürece yönelik detaylar yazarların önceki çalışmalarında sunulmuştur [15, 18].

İki faz ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$h_{tp} = \frac{q_{net}}{A_t (T_y - T_d)} \quad (5)$$

Bu çalışmada, hesaplama prosedüründe, çıkışa en yakın olan termo-elemandan okunan sıcaklık değerleri ve dolayısıyla yedinci termo-eleman konumuna karşılık gelen (girişten 35 mm uzaklıktaki) yerel değerler dikkate alınmıştır. Bunun sebebi, literatürde de [13, 19] çalışmalarında vurgulandığı üzere, doymuş kaynama koşullarının kanal çıkışına doğru artmasıdır. Bu çalışmada, sadece doymuş kaynamanın dikkate alındığı vurgulanmalıdır. Eşitlik (5)'te, T_y yerel yüzey (duvar) sıcaklığını; T_d yerel doyma sıcaklığını; A_t ise toplam ısı transfer alanını göstermektedir. Yerel doyma sıcaklığı, yerel doyma basıncına göre belirlenmektedir. Bu kapsamda, giriş ve çıkış basınçları arasında lineer interpolasyon uygulanarak ısı alıcı boyunca, doymuş bölgede, istenilen herhangi bir konumdaki yerel doyma basıncı değeri belirlenebilir. Bu yöntem literatürde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [13-21]. Yerel yüzey sıcaklığı ve toplam ısı transfer alanı aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilir.

$$T_y = T_{lt} - q''_{eff} \left(\frac{l_v}{k_b} \right) \quad (6)$$

$$A_t = A_{dy} + \eta N A_f \quad (7)$$

Eşitlik (6)'da; l_v , termo-elemandan akış pasajı taban yüzeyine olan düşey mesafe; T_{lt} , termo-eleman aracılığıyla okunan sıcaklık değeri ve k_b , ısı alıcının (bakır malzemeden üretilmiş) ısı iletim katsayısıdır. Eşitlik (7) ile ifade edilen toplam ısı transfer alanı ise adyabatik uç kabulü yapılarak kanatçık analizi aracılığıyla belirlenmiştir. Burada; A_{dy} , kanal tabanındaki kanatçıksız alanı; A_f , tek bir kanatçığın ıslak alanını; N , kanatçık sayısını; η ise kanatçık verimini göstermektedir. Alan ifadelerinin açık formu aşağıda sunulmuştur.

$$A_f = H_f P_f \quad (8)$$

$$A_{dy} = W_e L_e - N A_{fc} \quad (9)$$

Burada; H_f , tek bir kanatçığın yüksekliğini (aynı zamanda akış pasajı yüksekliği); P_f , tek bir kanatçığın kesit çevresini; A_{fc} ise tek bir kanatçığın kesit alanını (genişlik x uzunluk) ifade etmektedir. Kanatçık verimi (η) ve kanatçık parametresi (m_f), sırasıyla, aşağıda tanımlanmıştır:

$$\eta = \frac{\tanh(m_f H_f)}{m_f H_f} \quad (10)$$

$$m_f = \sqrt{\frac{h_p P_f}{k_b A_{fc}}} \quad (11)$$

İki faz ısı transfer katsayısı, yukarıda yer alan denklemler kullanılarak, iteratif yaklaşımla belirlenir. Doymuş bölge için önemli büyüklüklerden biri yerel kuruluk derecesi olup, ilgili parametrenin açık formu aşağıda sunulmuştur:

$$x_e = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{q_{eff}'' A_{pa} L_n}{\dot{m} L_e} - c_p (T_d - T_i) \right) \quad (12)$$

Yukarıdaki eşitlikte, h_{fg} , buharlaşma gizli ısısını; \dot{m} , akışkanın kütleli debisini; T_i , akışkanın giriş sıcaklığını; c_p , akışkanın özgül ısısını ve L_n , hesaplama yapılan veya incelenen konumun kanal girişinden uzaklığını sembolize etmektedir.

Mikro yapıdaki geometrik kısıtlamalar sebebiyle test bölgesindeki basınçlar giriş ve çıkış haznelerinden ölçülmüştür. Giriş ve çıkış haznesine yerleştirilen diferansiyel basınç sensörü aracılığıyla toplam basınç düşümü (ΔP) direkt olarak ölçülmüştür. Giriş haznesine yerleştirilen mutlak basınç sensörüyle de giriş basıncı (P_i) direkt belirlenmiştir. Basınç ölçüm konumları ve test bölgesinin geometrisi dikkate alındığında, kesit daralması basınç kayıpları ile kesit genişlemesi basınç kazanımı değerlerinin bileşke değerinin ve/veya görece büyüklüklerinin ihmal edilecek mertebelerde olması nedeniyle toplam basınç düşümü mikro kanal boyunca olan basınç düşümüne eşit alınabilir. Ayrıca, doymuş kaynama koşullarının baskın olması nedeniyle, tek faz basınç düşümü iki faz basınç düşümü yanında ihmal edilebilecek düzeydedir. Böylece, nihai olarak, toplam basınç düşümü iki faz basınç düşümüne eşit olarak alınabilir. Basınç düşümünün tüm bileşenleri ve kabullere ait detaylı açıklamalar yazarların önceki çalışmasında sunulmuştur [15].

Ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik düzeyleri birbirinden farklı değerlendirilmektedir. Ölçülen büyüklükler için ilgili ölçüm cihazının katalog verileri veya kalibrasyon sonucu elde edilen yeni belirsizlik düzeyleri dikkate alınmıştır. Hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlikler için ise literatürde yaygın bir şekilde kullanılan ve [22] çalışmasında sunulmuş olan metod kullanılmıştır. Ölçülen büyüklüklerden hacimsel debi ile ilgili olarak akış ölçer hassas bir ölçekli kap ile kalibre edilmiştir. Sıcaklık ölçümünün kalibrasyonunda ise hassas sabit sıcaklık banyosu kullanılmıştır. İlgili belirsizlik değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Belirsizlik düzeyleri

Table 1. Levels of uncertainty

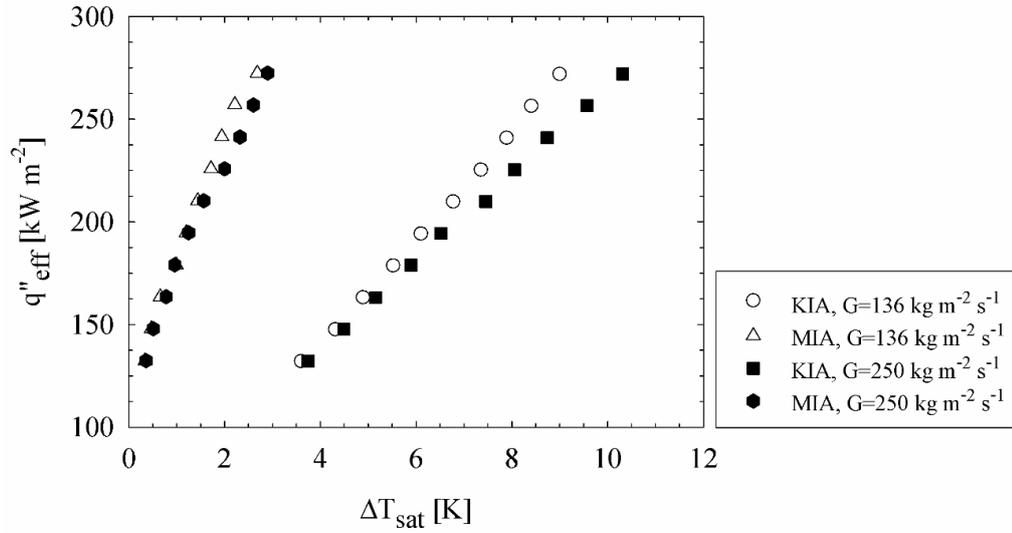
| Ölçülen Parametreler | Belirsizlik Düzeyi | |
|---|-------------------------------|------------|
| | KIA | MIA |
| Giriş basıncı (P_i) | ± 0.05 (TS) | |
| Uygulanan ısı gücü (q_u) | ± 0.6 (OS) | |
| Hacimsel debi (\dot{V}) | ± 0.2 ml dk ⁻¹ | |
| Sıcaklık (T) | ± 0.1 °C | |
| Toplam basınç düşümü (ΔP) | ± 0.08 (TS) | |
| Hesaplanan Parametreler | Ortalama | |
| | KIA | MIA |
| Kütle akısı (G) | ± 2.7 | ± 2.7 |
| Efektif ısı akısı (q''_{eff}) | ± 3.0 | ± 2.9 |
| Yerel kuruluk derecesi (x_e) | ± 2.0 | ± 2.1 |
| İki fazlı ısı transfer katsayısı | ± 2.1 | ± 12.2 |
| Açıklama: TS: Tüm skala; OS: Okuma skalası | | |

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, kademeli genişleyen akış kesit alanına ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip mikro kanatçıklı ısı alıcı (MIA) ile paralel düz duvarlı mikro kanatçıklardan oluşan konvansiyonel tipteki ısı alıcıda (KIA) doymuş kaynamalı akış, farklı kütle akısı değerlerinde, yüksek hızlı görüntü desteğiyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 90 W ısı gücünden başlanarak 10 W aralıklarla 180 W'a kadar sabit ısı yük değerlerinde (yaklaşık 132 – 272 kW m⁻² ısı akısı aralığına karşılık gelmektedir) ve iki farklı kütle akısında (136 ve 250 kg m⁻² s⁻¹) çalışılmıştır. Görüntüler saniyede 1000 kare olarak (1000 fps) alınmış olup, görüntülerde ana akış yönü soldan sağa doğrudur. İş akışkanı ise deiyonize sudur.

3.1. Kaynama Eğrilerinin Analizi (Analysis of Boiling Curves)

Şekil 4'te, farklı kütle akıları için KIA ve MIA'ya ait kaynama eğrileri sunulmuştur. Doymuş kaynama bölgesindeki davranışa uygun olarak, her iki ısı alıcı içinde, artan ısı akısı ile kızma farkı ($\Delta T_{sat} = T_y - T_d$) artmaktadır. Burada önemli olan nokta, kaynama eğrisinin eğimi ve ısı akılarına karşılık gelen sıcaklık farkı değerleridir. Şekil 4'ten de görüldüğü üzere, MIA'ya ait kaynama eğrileri KIA'ya kıyasla grafiğin sol tarafında bulunmaktadır. Bir başka ifade, aynı ısı akısı değerleri için MIA'daki doymuş kaynama koşulları daha düşük kızma farklarında ve dolayısıyla daha küçük yüzey sıcaklığı değerlerinde gerçekleşmektedir. MIA ısı alıcı olarak kullanıldığında, verilen bir ısı yük değeri için, KIA'ya kıyasla, soğutulmak istenen parçanın yüzey sıcaklığı daha düşük değerlerde tutulabilmekte ve artan ısı akılarına karşı yüzey sıcaklığındaki değişim KIA'ya kıyasla daha az olmaktadır. Tüm ısı akısı aralığında MIA için 136 kg m⁻² s⁻¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, 0.34 °C – 2.64 °C ve 0.36 °C – 2.90 °C aralıklarını kapsamaktadır. Buna karşın, KIA için 136 kg m⁻² s⁻¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, 3.6 °C – 9.0 °C ve 3.75 °C – 10.31 °C aralıklarını kapsamaktadır. Kütle akısının kaynama eğrisi üzerindeki değişimi MIA için görece ihmal edilebilecek düzeyde iken, KIA için genel karakter olarak azalan kütle akısı ile kızma farkı değerleri azalmaktadır.

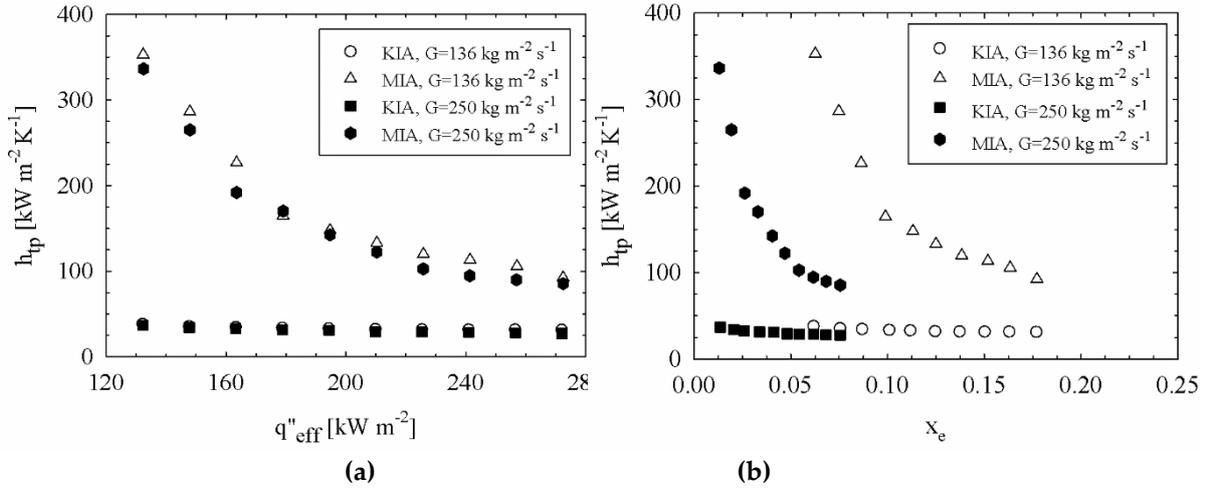


Şekil 4. Farklı kütle akıları için KIA ve MIA'ya ait kaynama eğrileri

Figure 4. Boiling curves of KIA and MIA for different mass fluxes

3.2. Isı Transfer Katsayısının Belirlenmesi (Determination of Heat Transfer Coefficient)

Şekil 5'te, her iki ısı alıcı için, farklı kütle akılarında, iki faz ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. Şekil 5 kütle akısı, ısı akısı ve geometrinin ısı performans üzerindeki etkisinin belirlenmesine olanak sunmaktadır. Öncelikle parametrelerin etki düzeyleri niceliksel olarak sunulacak; nicel değerlendirmeden sonra akış görüntü destekli analize geçilecektir. Şekil 5'ten de görüldüğü üzere, MIA (akış pasajı kesiti kademeli olarak genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcı), KIA'ya (konvansiyonel mikro kanallı ısı alıcı) kıyasla ısı transferini belirgin bir şekilde iyileştirmektedir. Öyle ki, $G = 136\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ kütle akısı değerinde, MIA kullanıldığında KIA'ya kıyasla iki faz ısı transfer katsayısı %827.2'ye kadar artış göstermekte olup, tüm veri tabanı üzerinden ortalama artış %410.5'tir. $G = 250\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ kütle akısı değeri için ise artış yüzdesi maksimum %819.5; ortalama olarak ise %402.1'dir. Ayrıca, MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları ısı akısına daha fazla bağımlıdır. Artan ısı akısıyla, MIA'nın ısı transfer katsayıları sürekli olarak azalmakta olup, ilk veri ile son veri arasındaki azalış oranı $G = 136\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ için %73.8 ve $G = 250\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ için %74.6'dır. Isı akısı ile ısı transfer katsayısındaki söz konusu ilişki KIA için de geçerli olup, artan ısı akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır. KIA için ilk veri ile son veri arasındaki azalış oranı; $G = 136\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ 'de %17.7 ve $G = 250\ kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ 'de %25.3'tür. MIA için elde edilen ısı transfer katsayılarının, KIA'ya kıyasla, çok daha büyük değerlerde olması ve ısı akısıyla değişim hızının daha fazla olması sebebiyle, görece olarak grafikte (Şekil 5a) KIA için yaklaşık yatay bir eğilim görülmektedir.



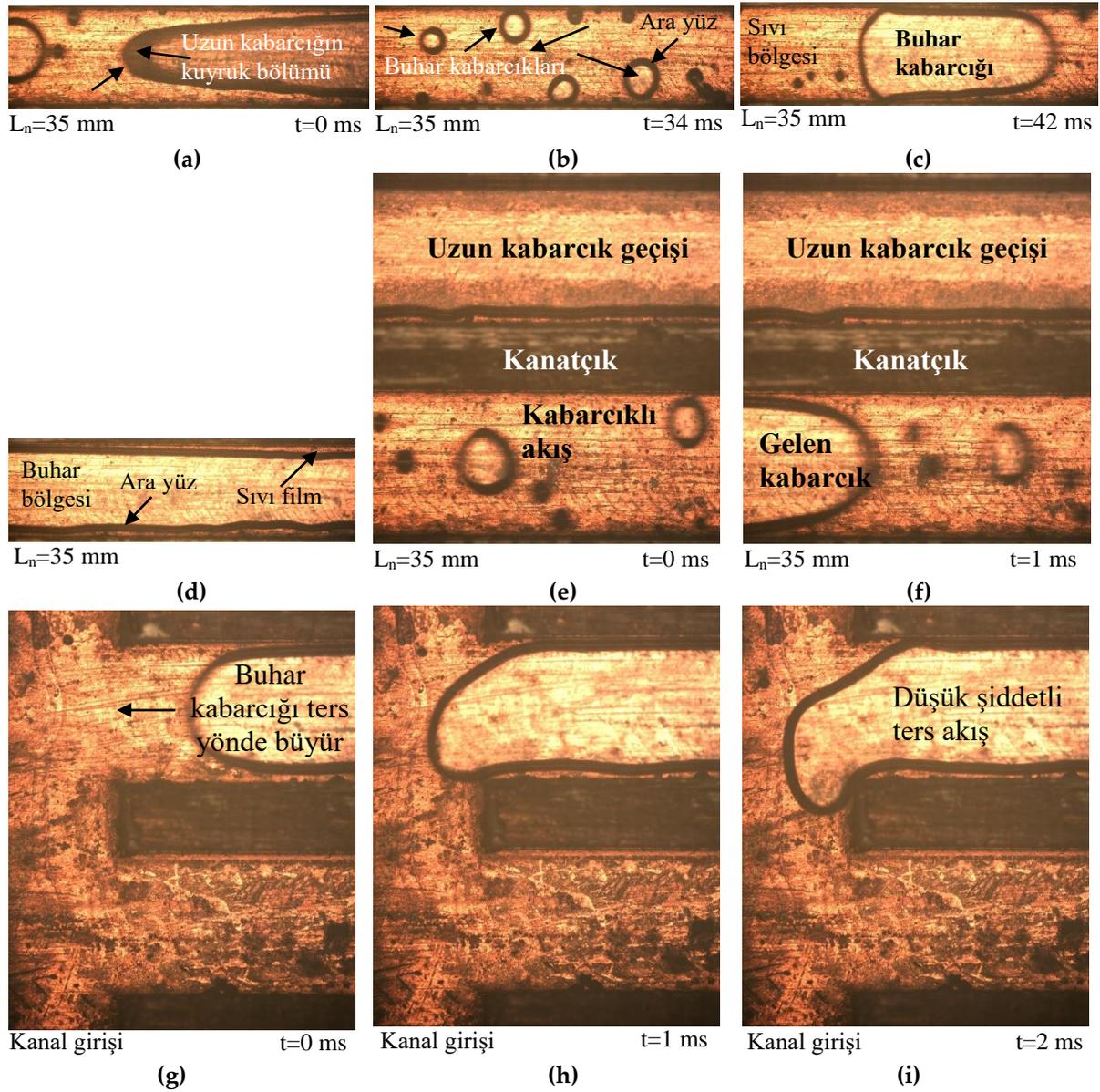
Şekil 5. Farklı kütle akıları için iki faz ısı transfer katsayısının (a) ısı akısı ve (b) kuruluk derecesi ile değişimi

Figure 5. Variation of two-phase heat transfer coefficient with (a) heat flux and (b) vapor quality for different mass fluxes

Kütle akısının, iki faz ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi ise ısı akısına kıyasla zayıftır. MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları KIA'ya kıyasla kütle akısına daha fazla bağlıdır. MIA'da kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %16,4, ortalama olarak ise %9,6 değişim meydana gelmektedir. KIA'da ise kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %12,7, ortalama olarak ise %7,8 değişim meydana gelmektedir. Genel karakter olarak, her iki ısı alıcısı için de artan kütle akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır.

Şekil 5b'de iki faz ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Eşitlik (12)'den de hatırlanacağı üzere, kuruluk derecesi, temelde, ısı ve kütle akısına bağlı olarak hesaplanan bir büyüklüktür ve doymuş kaynamanın derecesinin bir ölçüsüdür. Bu sebeple, iki faz ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile değişimi Şekil 5a'daki değişime benzerdir. Burada, farklı olarak kütle akısının kuruluk derecesi üzerindeki etkisine vurgu yapılacaktır. Her iki ısı alıcısı için de artan kütle akısı ile kuruluk dereceleri belirgin şekilde azalmaktadır. Bunun sebebi, verilen bir ısı yük değerinde artan kütle akısı ile kanal içindeki doymuş kaynama koşullarının zayıflamasıdır.

Yukarıda sunulan niceliksel sonuçlar ve parametrik ilişkiler bu bölümde fiziksel mekanizmanın, akışa ait görüntülerle desteklenmesi ve irdelenmesiyle açıklanacaktır. Şekil 6'da KIA için düşük ısı yüklerindeki akış rejimlerini karakterize eden görüntüler sunulmuştur. Bu kapsamda 100 W değerindeki ısı yük altında, hesaplamalarda kullanılan ölçümlerin alındığı konumdaki bir başka ifade ile girişten 35 mm uzaklığa sahip bölgelerdeki akış görüntüleri ile ters akış olayını göstermek için kanal giriş bölgesindeki görüntüler verilmiştir. KIA için düşük ısı yüklerinde temel akış desenleri kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akıştır. Şekil 6a - c'de gösterilen bu akış deseni modunda, bir seri halinde, sırasıyla, kanalın mikro boyutu nedeniyle sınırlanmış ve eksenel doğrultuda uzamış görece büyük buhar kabarcığı ile devamında genel karakter olarak kanal köşelerinde oluşan küçük kabarcıklar ile daha önceki bölgelerde (görüntü alanına girmeyen) oluşarak sıvı fazla birlikte sürüklenen görece küçük kabarcıkların geçişi gerçekleşir. Etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır. Buna ek olarak, uzun kabarcıklar ile ısı transfer yüzeyi arasında kalan sıvı filminin buharlaşması, sıvı geçişi esnasındaki tek fazlı taşınım ve kabarcıkların sıvı faz içindeki rastgele hareketleri sonucu karışımın iyileşmesi (taşınımın iyileşmesi) de kısmen ısı transferi üzerinde etkilidir.



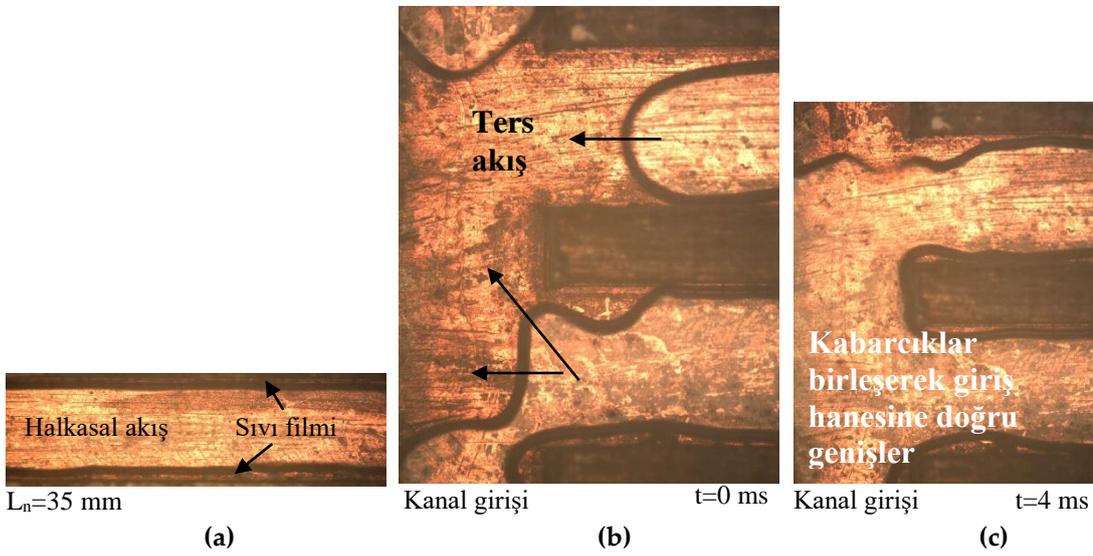
Şekil 6. KIA için $q_u = 100$ W ısı güç değerindeki akış görüntüleri

Figure 6. Flow images for KIA at heat input of $q_u = 100$ W

Şekil 6'de, uzun bir kabarcığın geçişi esnasında kabarcık ile yüzeyler arasında kalan ince sıvı filminin görüntüsü sunulmuştur; ancak yukarıda detaylı olarak açıklandığı üzere, KIA için düşük ısı yüklerinde taşınım mekanizmalarının etkinliğinin zayıf olduğu belirtilmelidir. Şekil 6e ve f'de paralel iki kanalı içeren görüntüler sunulmuştur. İlk görüntüdeki zaman başlangıç zamanı olarak alınmış ve $t = 0$ olarak ifade edilmiştir. İkinci görüntüdeki (Şekil 6f) zaman ise başlangıç zamanına göre 1 ms sonra gerçekleştiği için $t = 1$ ms olarak gösterilmiştir. Zaman bağımlı olarak sunulan tüm görüntülerde ilk görüntü başlangıç zamanını ifade etmekte olup, zamanla değişimi belirtmek için görüntülerin üzerinde başlangıç zamanına göre geçen süreler tanımlanmıştır. Şekil 6e ve f'de önemli olan husus, kanallarda eş zamanlı olarak farklı akış olaylarının gerçekleşmekte olduğunun görülmesidir. Farklı zamanlarda paralel kanallar içinde farklı akış rejimleri/deseni gerçekleşmekte olup, bu durum paralel kanal kararsızlığına neden olmaktadır. İlgili şekillerde, bir kanaldan uzun bir kabarcığın geçişi görülürken sadece 1 ms içinde komşu kanalda kabarcıklı akışın olduğu görülmektedir. Şekil 6g ile i'de ise kanal girişindeki görüntüler sunulmuştur. İlgili şekillerde, kanal içinde oluşan kabarcığın akışa ters doğrultuda genişlemesi görülmektedir. Bu tür ters yöndeki kabarcık hareketi, ısıtma sıvısının kanala girmesine karşı direnç

oluşturur, yerel ve anlık olarak basıncı artırır ve/veya oluşan mikro kabarcıkları bünyesine katarak kabarcıklaşmayı önüler. Bu nedenle, hem ısı transfer performansını düşürür hem de akış kararsızlıklarını tetikler. Şekil 6'yı kapsayan düşük ısı yükler altında veya bir başka ifade ile doymuş kaynamanın erken periyotlarında, bu tür bir ters akışın etkisi, Şekil 6g ile i'den de görüldüğü üzere zayıftır. Kanal girişinin bir miktar dışına çıkan buhar, doymuş kaynama etkinliğinin zayıf olması ve dolayısıyla kanal içinde sıkışan kabarcık tarafından ters yönde uygulanan buharlaşma momentum kuvvetinin etkisinin zayıf olması sebebiyle, ıslatma sıvısı tarafından uygulanan atalet kuvvetine direnemeyerek tekrar akış doğrultusunda hareket eder. Her ne kadar ters akışın etkisi zayıf olsa da kabarcıklaşma potansiyelini zayıflatması, ıslatma sıvısının kanala girişini bir süre engellemesi ve akışın tek bir kanaldaki sürekliliğini olumsuz etkilemesi sebebiyle KIA'daki ısı performans düşüklüğünün önemli sebeplerinden birisidir.

Şekil 7'de yüksek ısı güç değerlerini temsilen 180 W ısı güçte alınan ve KIA'ya ait olan akış görüntülerinden örnekler sunulmuştur.

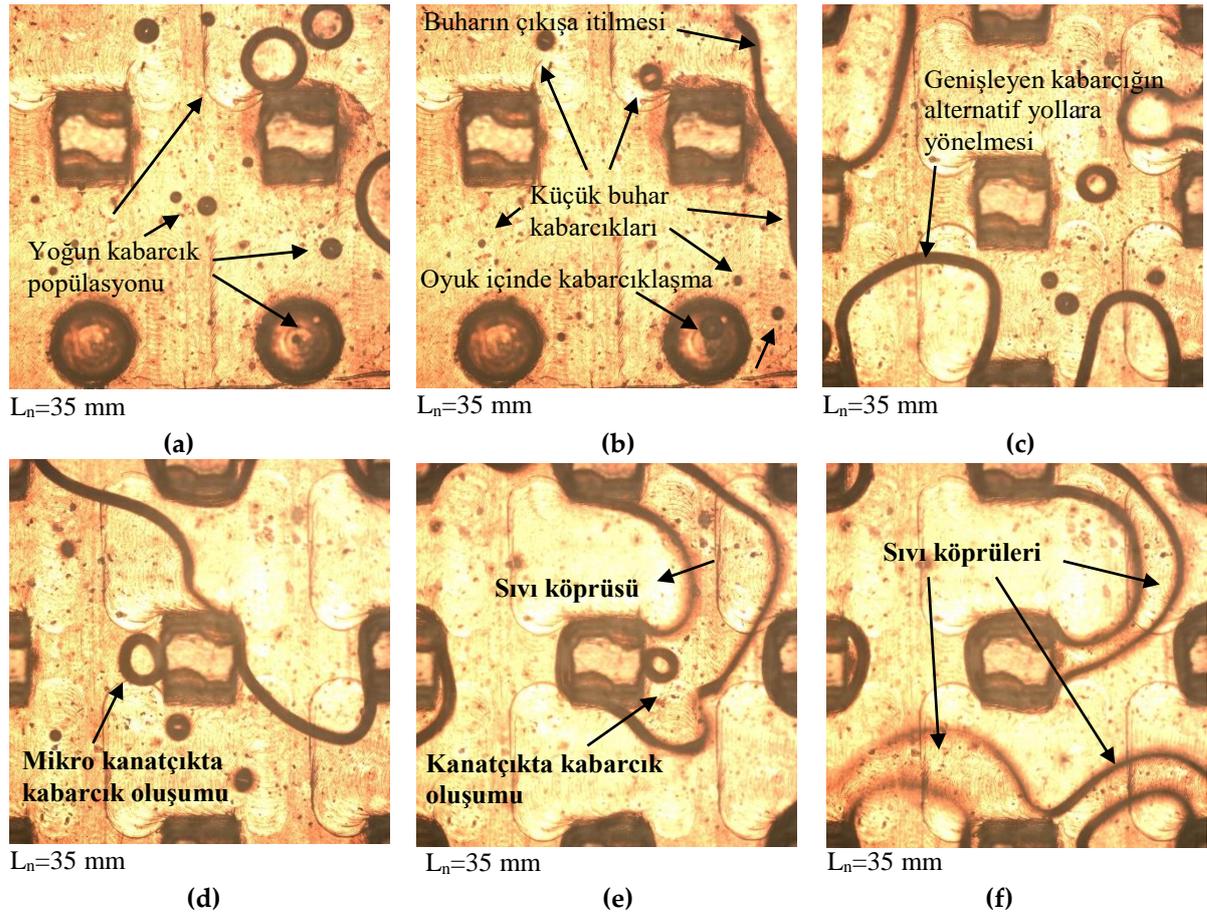


Şekil 7. KIA için $q_u = 180$ W ısı güç değerindeki akış görüntüleri

Figure 7. Flow images for KIA at heat input of $q_u = 180$ W

Yüksek ısı güç değerlerinde, KIA için baskın akış desenleri uzun kabarcıklı ve halkasal akıştır. Şekil 7a'da halkasal akışa ait bir görüntü sunulmuş olup, halkasal akış, iç bölgede buharın kenarlarda ise ince sıvı filminin olduğu akış desenini ifade eder. Kabarcıklı akış sönümlenerek etkisini kaybetmiş olup, baskın ısı transfer mekanizması taşınımlı kaynamadır. Artan ısı yük sebebiyle, kabarcıklaşma çok şiddetli ve hızlı gerçekleşir ve patlamalı kaynama olarak da adlandırılır. Oluşan kabarcık sınırlı akış pasajı hacmi sebebiyle sınırlanır ve sınırlanma olayı düşük ısı yüklerine kıyasla çok daha şiddetlidir. Dolayısıyla kabarcık hem akış doğrultusunda hem de akışa ters doğrultuda kuvvet uygular. Bu kuvvet buharlaşma momentum kuvvetidir. Buharlaşma momentum kuvveti nedeniyle ters akış oluşur ve kabarcıklaşma sönümlenir. Ters yönde uzayan kabarcık hem yerel olarak basıncı artırarak kabarcıklaşmayı önüler hem de ıslatma sıvısının kanala girişini engeller. Şekil 7b ve c'de ters akışın şiddeti görülmektedir. Komşu iki kanaldan çıkan buhar kabarcıkları birleşerek kanal girişinden dışarı çıkmakta ve görece geniş bir alanı kaplamaktadır. Ters akış kaynama kararsızlıklarına yol açarak ısı performansı önemli ölçüde düşürür.

Şekil 8'de, düşük ısı yüklerine karşılık gelen koşullarla ilgili olarak, MIA için elde edilen ve farklı akış olaylarını karakterize eden görüntüler sunulmuştur.



Şekil 8. MIA için $q_u = 100$ W ısı güç değerindeki akış görüntüleri

Figure 8. Flow images for MIA at heat input of $q_u = 100$ W

Şekil 8a ve b'den görüldüğü üzere, düşük ısı yüklerinde ısı transfer yüzeyinde yoğun bir kabarcık popülasyonu vardır. Bu durum kabarcıklı kaynamanın etkinliğinin bir göstergesidir. İlgili kabarcıklar, genel karakter olarak, kanatçıklarda ve kabarcıklaşma oyuklarında oluşan kabarcıklar ile sıvı içinde sürüklenerek önceki bölgelerden gelen kabarcıkları içermektedir. Kanatçıklar ve yapay oyuklar kabarcıklaşmayı önemli düzeyde destekler. Burada, önemli noktalardan biri kabarcık boyutlarının, genel olarak, KIA'ya kıyasla küçük olmasıdır. İkincil kanalların varlığının sağladığı alternatif yollar ve özellikle akış kesitinin genişlemiş olması, sınırlanma/tıkanma problemi ve buna bağlı olarak kabarcıklaşmanın sönümlemesi ve yerel basınçtaki artışların önemli ölçüde engellenmiş olması, mikro kabarcıkların varlığını sürdürdürebilmesini ve akışın karışarak taşınımını ısı transfer mekanizmasının iyileşmesini sağlamaktadır. Özellikle, akış kesitinin genişlemesi, buharın hızla ve akışa karşı direnç uygulamadan akış doğrultusunda akmasını sağlar. Şekil 8b'de sıvı tarafından buharın ısı alıcı çıkışına doğru sürüklenmesi görülmektedir.

Şekil 8a ve b'deki önemli fiziksel süreçlerden bir diğeri oyukların su tutucu veya su haznesi görevi görmesidir. Bu durum, sıvının ısı transfer yüzeyi ile temasının kesilmemesi (kuruma probleminin oluşmaması) açısından MIA için üstünlük sağlamaktadır. Şekil 8c'den görüldüğü üzere, genişleyen kabarcık sınırlı bir kanal kesitinde sıkışmak yerine ikincil kanallara doğru genişler. Bu sebeple, genişleyen kabarcığın kanal içinde sıkışarak ısıtma sıvısını engelleme problemi MIA için söz konusu değildir. Ayrıca, Şekil 8c'deki mikro kabarcıkların varlığını sürdürmesi, kabarcık genişlemesinin kabarcıklaşmayı sönümleyecek kadar bir probleme yol açmadığını göstermektedir (MIA'daki geometri için). Şekil 8d ve e'de kanatçıkta kabarcık oluşumu ve dolayısıyla kanatçıkların kabarcıklaşmayı desteklemesi görülmektedir. Şekil 8e ve f'de iki önemli olay söz konusudur: (1) Herhangi bir buhar kabarcığı genişleyerek kanatçığı/kanatçıkları sardığında buhar ile kanatçık arasında sıvı filmi bulunur. Bu nedenle,

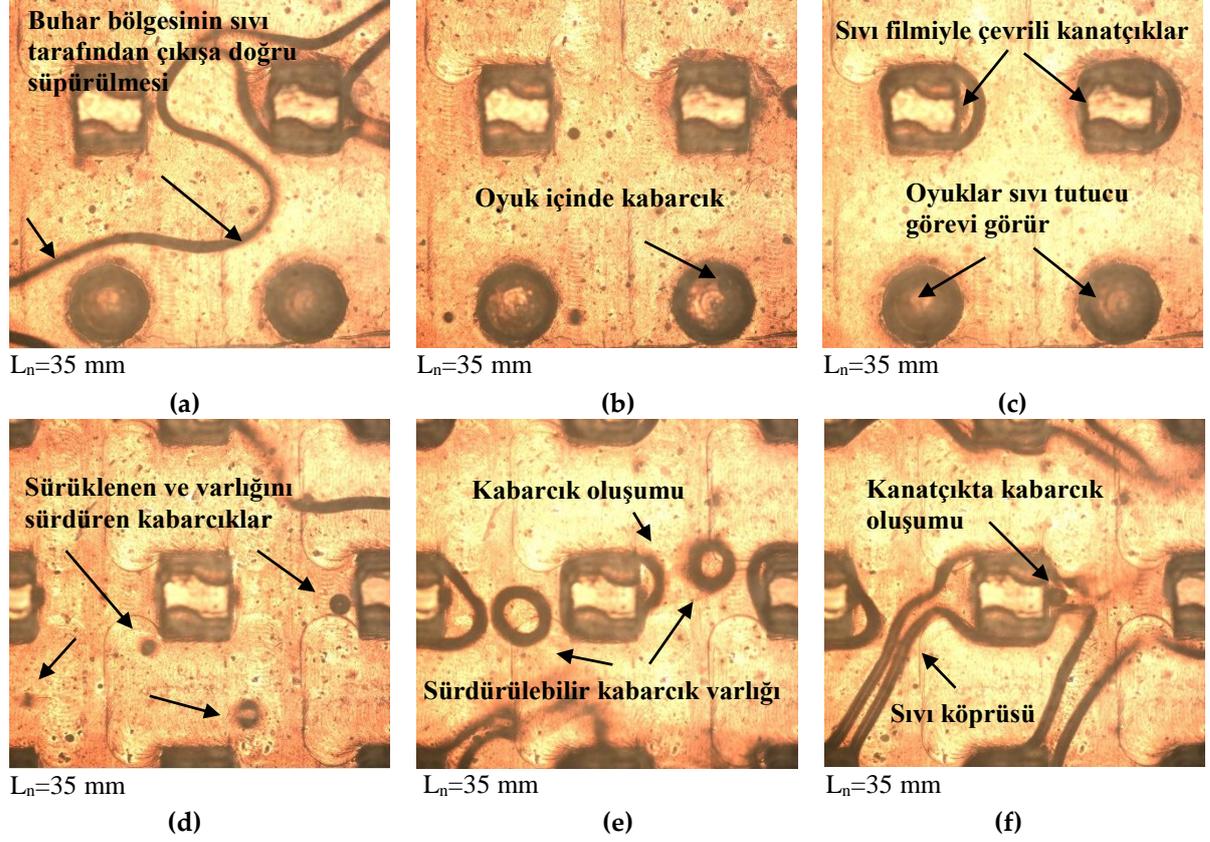
ısı transfer alanının bir bölümü buhar kabarcığı ile kaplanmış olsa bile kanatçığın sıvı film ile çevrili olması nedeniyle ince sıvı filminin buharlaşması ile etkin bir ısı transferi sağlanır. Aynı zamanda, sıvı filmle çevrili kanatçık kabarcıklaşmanın da sürdürülmesini sağlamış olur. (2) Kanatçıklar arasında sıvı köprüsü oluşur. Sıvı köprülerinin varlığı yüzeyin sıvı ile temasının kesilmemesine, kabarcıklaşma potansiyelinin devam etmesine ve kurumunun önlenmesine katkı sağlar.

Şekil 9'de ise MIA için yüksek ısı güçlerindeki akış görüntülerine örnekler sunulmuştur. Çalışmadaki en yüksek ısı güç değerine (180 W) rağmen, ısı yük altında genişleyen buhar kabarcıkları kanalın genişleyen kesitine doğru yönlendirilerek çıkışa doğru hızlı bir şekilde hareket eder ve kabarcık tıkanması problemi oluşmaz. Şekil 9a'da genişleyen buharın kanatçiksiz bölgeye doğru yönelmesi ve ıslatma sıvısı tarafından ısı alıcı çıkışına doğru itilmesi görülmektedir. Şekil 9b'de ise yüksek ısı güçlere rağmen, oyukların sürdürülebilir kabarcık oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir. Oyukların en önemli katkısı ise su hapsedme özelliğidir. Bu sayede, Şekil 9c'de görüldüğü gibi ortam buharla kaplansa bile oyuklarda su bulunduğu için yüzeyin suyla temasının kesilmesi engellemekte ve kabarcık oluşum potansiyeli sürdürülmektedir. Ayrıca, kanatçıkların etrafı da sıvı film ile kaplanmakta ve sıvı film buharlaşması ve kabarcıklaşma sağlama potansiyeli ile ısı transferine katkı sunulmaktadır. Yüksek ısı yüklerde de sınırlanma problemi olmadığı için mikro kabarcıklar varlığını sürdürerek akış pasajları içinde oluşabilmekte ve/veya sıvı içinde sönümlenmeden sürüklenerek taşınabilmektedir (Şekil 9d). Şekil 9e ve f'de ise kanatçıklarda kabarcık oluşumunu ve kanatçıklar arası sıvı köprüleri gösteren görüntüler verilmiştir.

Sonuç olarak, MIA'da hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkin ısı transfer mekanizmalarıdır. Kademeli genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip olan geometri kabarcık tıkanma problemini (çalışılan tüm ısı yük aralığı için) ortadan kaldırmaktadır. Oyukların kabarcıklaşmayı desteklemesi, oyuklarda su tutulması, buhar kabarcıklarının genişleyen bölgelere doğru hızla yönelmesi ve mikro kabarcıklı akışın hızlı, tek yönlü ve sürekli hareketinin sağlanması, kanatçıklar etrafındaki ince sıvı filminin buharlaşması, sıvı köprülerinin oluşumu ve ısı transfer yüzeyinin sıvı tarafından etkin bir şekilde ıslatılması MIA için ısı transferini iyileştiren fiziksel mekanizmalardır.

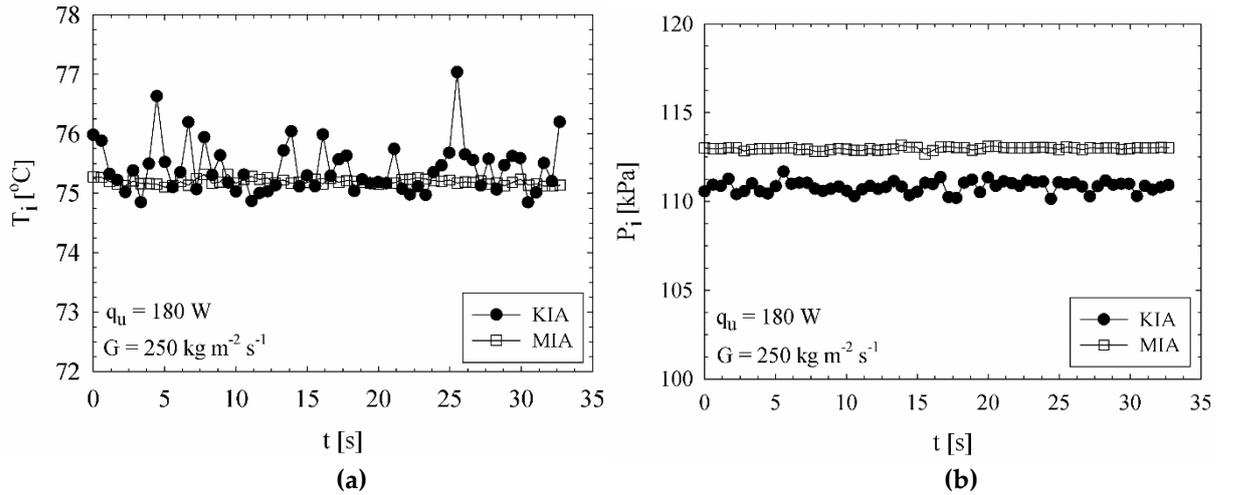
Isıl performanstaki düşüşün göstergelerinden biri de kaynama kararsızlıklarının şiddetidir. Her iki ısı alıcı için hem sıcaklık hem de basınç düzeyindeki kararsızlık grafikleri Şekil 10a ve b'de sunulmuştur. Bu kapsamda, ilgili grafiklerde, giriş sıcaklığı ve giriş basıncının zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi çalışma kapsamındaki en yüksek ısı güç değerine rağmen MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı salınım düzeyleri KIA'ya kıyasla oldukça düşüktür. Niceliksel olarak ifade edilecek olursa, KIA'nın sıcaklık verilerinde (Şekil 10a) ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark $1.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, $\pm 1.8\%$ 'e karşılık gelmektedir. Buna karşın, MIA için elde edilen sıcaklık ölçümlerinden, ardışık iki veri arasındaki maksimum mutlak fark $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, 0.21% 'lik bir değişime karşılık gelmektedir. Giriş basıncı için ise KIA'nın ardışık herhangi iki verisi arasındaki maksimum mutlak fark 1.13 kPa olup, yaklaşık 1% 'lik değişime karşılık gelmektedir. MIA için ise ardışık herhangi iki giriş basıncı verisi arasındaki maksimum mutlak fark 0.37 kPa olup, 0.33% 'lük değişime karşılık gelmektedir. [2] çalışmasında önerilen standart sapma eşitlikleri kullanıldığında ise MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı standart sapma değerleri, sırasıyla, $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 0.08 kPa iken, KIA için ilgili değerler, sırasıyla, $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 0.32 kPa 'dır. MIA'nın kademeli genişleyen yapısı buhar tıkanması veya sınırlanması problemini sönümlenmekte ve/veya ortadan kaldırmaktadır. Böylece, artan ısı yüklerine rağmen, buhar tıkanmadan veya sınırlanarak ıslatma sıvısının gelişini engellemeden ısı alıcı çıkışına doğru hızlı bir şekilde hareket etmekte ve akışın tek yönlü sürekli hareketini desteklemektedir. Sınırlanmayan buhar kabarcıkları ıslatma sıvısının gelişini engelleyecek şekilde veya geçici olarak ıslatma sıvısını giriş haznesine itecek şekilde bir buharlaşma momentum kuvveti uygulamadığı için giriş sıcaklık ve basınç çalkantıları başarılı bir şekilde sönümlenmektedir. KIA'da ise sınırlanan kabarcığın uyguladığı buharlaşma momentum kuvveti, ıslatma sıvısı tarafından kanal çıkışına doğru uygulanan sıvı atalet kuvvetine baskın gelir ve oluşan şiddetli ters akış sonucu akışkan kanal girişinden ters yönde çıkarak giriş haznesine girer. Bu durum farklı zaman periyotlarında ve farklı konumlarda (farklı kanalların girişinde) gerçekleşir. Akışkan bazı kanallardan ters yönde çıkarak giriş haznesine girerken, aynı anda farklı kanallarda tek yönlü akış olur. Sıvı atalet kuvveti

ile buharlaşma momentum kuvvetinin etkileşimi baskındır. Şiddetli ve zaman bağımlı ters akış giriş sıcaklığı ve giriş basıncında yüksek genlikli çalkantılara yol açar.



Şekil 9. MIA için $q_u = 180$ W ısı güç değerindeki akış görüntüleri

Figure 9. Flow images for MIA at heat input of $q_u = 180$ W

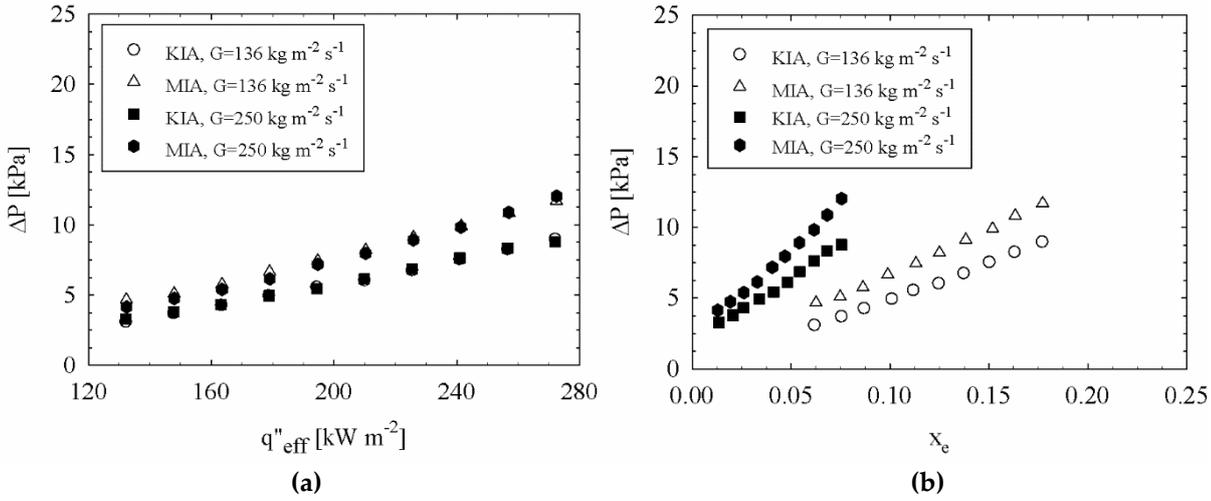


Şekil 10. Kararsızlık düzeyleri: (a) giriş sıcaklığı salınımları ve (b) giriş basıncı salınımları

Figure 10. Level of instabilities: (a) inlet temperature fluctuations and (b) inlet pressure fluctuations

3.3. Basınç Düşümü Verilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Pressure Drop Data)

Şekil 11 a ve b'de her iki ısı alıcıya ait basınç düşümü grafikleri sunulmuştur.



Şekil 11. Farklı kütle akıları için basınç düşümünün (a) ısı akısı ve (b) kuruluk derecesi ile değişimi
Figure 11. Variation of pressure drop with (a) heat flux and (b) vapor quality for different mass fluxes

Artan ısı akısı ile her iki ısı alıcı için de toplam basınç düşümünün arttığı görülmektedir (Şekil 11a). Bunun sebebi, iki faz basınç düşümünü oluşturan ivmelenme ve sürtünme basınç düşümü bileşenlerinin artan ısı akısı ile artmasıdır. MIA için elde edilen basınç düşümü değerleri KIA için elde edilenlerden daha yüksektir. Tüm veri tabanı üzerinden, MIA'da KIA'ya kıyasla basınç düşümünde $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerlerinde, sırasıyla, %50.5 ve %37.1'e kadar artış olmaktadır. Isı transfer katsayısını yaklaşık %827.2'ye kadar iyileştiren geometrik özellikler basınç düşümünde görece düşük bir artışa yol açmıştır. Kanatçıklar sebebiyle akış karışımının iyileşmesi, buharın hızlanarak geniş bölgelere yayılması ve sıvı/buhar fazları arasındaki etkileşimin/sürtünmenin artması ve böylece sürtünme ve ivmelenme basınç düşümü bileşenlerinin artması sonucu toplam basınç düşümünde artış meydana gelmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında, mikro kanatçıklara ve mikro oyuklara sahip genişleyen kesitli bir ısı alıcı ile konvansiyonel paralel kanallı bir ısı alıcıda kaynamalı akış karakteristikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı çalışma koşulları altında deneyler yapılmış ve akış görüntüleri üzerinden fiziksel mekanizma irdelenmiştir. Elde edilen ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Tüm ısı akısı aralığında; MIA için $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, $0.34 \text{ }^\circ\text{C} - 2.64 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $0.36 \text{ }^\circ\text{C} - 2.90 \text{ }^\circ\text{C}$ aralıklarını kapsamaktadır. Buna karşın, KIA için $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, $3.6 \text{ }^\circ\text{C} - 9.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $3.75 \text{ }^\circ\text{C} - 10.31 \text{ }^\circ\text{C}$ aralıklarını kapsamaktadır. MIA ısı alıcı olarak kullanıldığında, verilen bir ısı yük değeri için, KIA'ya kıyasla, soğutulmak istenen parçanın yüzey sıcaklığı daha düşük değerde tutulabilmekte ve artan ısı akılarına karşı yüzey sıcaklığındaki değişim KIA'ya kıyasla daha az olmaktadır.
- Kütle akısının kaynama eğrisi üzerindeki değişimi MIA için görece ihmal edilebilecek düzeyde iken, KIA için genel karakter olarak azalan kütle akısı ile kızma farkı değerleri azalmaktadır.
- $G = 136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerinde, MIA kullanıldığında KIA'ya kıyasla iki faz ısı transfer katsayısı %827.2'ye kadar artış göstermekte olup, tüm veri tabanı üzerinden ortalama artış %410.5'tir. $G = 250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değeri için ise artış yüzdesi maksimum %819.5; ortalama olarak ise %402.1'dir.
- Kütle akısının, iki faz ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi ısı akısına kıyasla zayıftır. MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları KIA'ya kıyasla kütle akısına daha fazla bağlıdır. MIA'da kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %16.4, ortalama olarak ise %9.6 değişim meydana gelmektedir. KIA'da ise kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %12.7, ortalama olarak ise %7.8 değişim meydana gelmektedir.

- Her iki ısı alıcı için de artan ısı akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır. Buna karşın, MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları KIA'ya kıyasla ısı akısına daha fazla bağımlıdır.
- KIA için düşük ısı yüklerinde temel akış desenleri kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akıştır. Etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır. Buna ek olarak, uzun kabarcıklar ile ısı transfer yüzeyi arasında kalan sıvı filminin buharlaşması, sıvı geçişi esnasındaki tek fazlı taşınım ve kabarcıkların sıvı faz içindeki rastgele hareketleri sonucu karışımın iyileşmesi de kısmen ısı transferi üzerinde etkilidir.
- Yüksek ısı güç değerlerinde, KIA için baskın akış desenleri uzun kabarcıklı ve halkasal akıştır. Kabarcıklı akış sönmülenererek etkisini kaybeder. Baskın ısı transfer mekanizması taşınımlı kaynamadır.
- MIA'da hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkin ısı transfer mekanizmalarıdır. Kademeli genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip olan geometri kabarcık tıkanma problemini ortadan kaldırmaktadır. Oyukların kabarcıklaşmayı desteklemesi, oyuklarda su tutulması, buhar kabarcıklarının genişleyen bölgelere doğru hızla yönelmesi ve mikro kabarcıklı akışın hızlı, tek yönlü ve sürekli hareketinin sağlanması, kanaçıklar etrafındaki ince sıvı filminin buharlaşması, sıvı köprülerinin oluşumu ve ısı transfer yüzeyinin sıvı tarafından etkin bir şekilde ıslatılması MIA için ısı transferini iyileştiren fiziksel mekanizmalardır.
- MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı salınım düzeyleri KIA'ya kıyasla oldukça düşüktür. MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı standart sapma değerleri ($250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve 180 W için), sırasıyla, $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 0.08 kPa iken, KIA için ilgili değerler, sırasıyla, $0.43 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 0.32 kPa 'dır.
- Artan ısı akısı ile her iki ısı alıcı için de basınç düşümü artar. MIA için elde edilen basınç düşümü değerleri KIA için elde edilenlerden daha yüksektir. Tüm veri tabanı üzerinden, MIA'da KIA'ya kıyasla basınç düşümünde $136 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ve $250 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kütle akısı değerlerinde, sırasıyla, %50.5 ve %37.1'e kadar artış olmaktadır.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Burak Markal: Kavramsallaştırma; Metodoloji; Araştırma; Kaynakların sağlanması; Makalenin yazımı, Makalenin düzenlenmesi, Görselleştirme; Proje yönetimi; Finansman sağlama.

Bezanur Kul: Validasyon; Araştırma; Kaynakların sağlanması; Görselleştirme.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu makale/çalışma 219M142 nolu proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından desteklenmiştir.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Veriler, gizlilik veya diğer kısıtlamalar nedeniyle yalnızca yazarlardan talep edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. G. Karayiannis and M. M. Mahmoud, "Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 1372–1397, 2017, doi:

- 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063.
- [2] D. Deng, L. Zeng, and W. Sun, "A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 175, p. 121332, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121332.
- [3] G. Liang and I. Mudawar, "Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 146, p. 118864, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118864.
- [4] J. Tang, Y. Liu, B. Huang, and D. Xu, "Enhanced heat transfer coefficient of flow boiling in microchannels through expansion areas," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 177, no. February, p. 107573, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107573.
- [5] A. Koşar and Y. Peles, "Boiling heat transfer in a hydrofoil-based micro pin fin heat sink," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 5–6, pp. 1018–1034, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.032.
- [6] A. Ma, J. Wei, M. Yuan, and J. Fang, "Enhanced flow boiling heat transfer of FC-72 on micro-pin-finned surfaces," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 13–14, pp. 2925–2931, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.031.
- [7] C. Woodcock, X. Yu, J. Plawsky, and Y. Peles, "Piranha Pin Fin (PPF) - Advanced flow boiling microstructures with low surface tension dielectric fluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 90, pp. 591–604, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.072.
- [8] C. Falsetti, M. Magnini, and J. R. Thome, "A new flow pattern-based boiling heat transfer model for micro-pin fin evaporators," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 122, pp. 967–982, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.050.
- [9] Y. Zhang, B. Liu, J. Zhao, Y. Deng, and J. Wei, "Experimental study of subcooled flow boiling heat transfer on micro-pin-finned surfaces in short-term microgravity," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 97, no. February, pp. 417–430, 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.05.003.
- [10] Y. Wang, J. -heon Shin, C. Woodcock, X. Yu, and Y. Peles, "Local, transient heat transfer measurements for flow boiling in a microchannel with a pin fin," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 134, pp. 377–387, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.048.
- [11] D. Deng, L. Chen, W. Wan, T. Fu, and X. Huang, "Flow boiling performance in pin fin-interconnected reentrant microchannels heat sink in different operational conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 150, no. August 2018, pp. 1260–1272, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.092.
- [12] K. Lingjian, L. Zhigang, J. Lei, L. Mingming, L. Ying, "Experimental study on flow and heat transfer characteristics at onset of nucleate boiling in micro pin fin heat sinks," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 115, no. April 2019, 2020, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109946.
- [13] D. Deng, L. Zeng, W. Sun, G. Pi, and Y. Yang, "Experimental study of flow boiling performance of open-ring pin fin microchannels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 167, p. 120829, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120829.
- [14] L. Qin, S. Li, X. Zhao, and X. Zhang, "Experimental research on flow boiling characteristics of micro pin-fin arrays with different hydrophobic coatings," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 126, no. July, p. 105456, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105456.
- [15] B. Markal and B. Kul, "Combined influence of artificial nucleation site and expanding cross section on flow boiling performance of micro pin fins," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 135, p. 106081, 2022, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106081.
- [16] P. S. Lee and S. V. Garimella, "Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 3–4, pp. 789–806, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.019.
- [17] T. Alam, P. S. Lee, C. R. Yap, and L. Jin, "Experimental investigation of local flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics in microgap channel," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 42, pp. 164–174, 2012, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.02.007.

- [18] B. Markal, B. Kul, M. Avcı, and R. Varol, "Effect of gradually expanding flow passages on flow boiling of micro pin fin heat sinks," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 197, p. 123355, 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123355.
- [19] M. Law, P. S. Lee, and K. Balasubramanian, "Experimental investigation of flow boiling heat transfer in novel oblique-finned microchannels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 419–431, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.045.
- [20] M. Law and P. S. Lee, "Effects of varying secondary channel widths on flow boiling heat transfer and pressure characteristics in oblique-finned microchannels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 101, pp. 313–326, 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.055.
- [21] W. Wan, D. Deng, Q. Huang, T. Zeng, and Y. Huang, "Experimental study and optimization of pin fin shapes in flow boiling of micro pin fin heat sinks," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 436–449, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.182.
- [22] S. J. Kline and F. A. McClintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 3-8, 1953.