

Mikrokanallarda Nanoakışkanların Kaynamalı Akış Karakteristikleri

Eyüphan MANAY¹

ÖZET: Mikrocihazlarda giderek artan ısı akısı değerleri nedeniyle geleneksel ısı transfer arttırım yöntemleri mikrosistemlerin soğutulmasında yetersiz kalmaktadır. Kaynama ile ısı transferi yüksek ısı transfer katsayılarının elde edilmesi yanında yüzey sıcaklığının neredeyse sabit olması nedeniyle yüksek ısı atımını gerektiren mikrosistem uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptir. Diğer yandan geleneksel akışkanlar yerine nanoakışkanların kullanımı yüksek ısı performans için önemli bir alternatif olarak düşünülmektedir. Nanoakışkanların tek fazlı ısı transferiyle ilgili birçok çalışma olmasına rağmen mikrokanallarda kaynamalı akış durumunda nanoakışkan kullanımıyla ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Literatürde nanoakışkanların kaynamalı akışta kullanımının bazı çalışmalara göre uygun olup olmadığı yönünde belirsizlikler vardır. Bu nedenle nanoakışkanların kaynamalı akış şartlarında kullanılabilirliği ile ilgili daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, farklı nanoakışkanlar ile yapılan deneysel çalışmalar derlenmiş ve nanoakışkanların mikrokanallarda kaynamalı akışta kullanımının avantaj ve dezavantajları belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kaynamalı akış, kritik ısı akısı, mikrokanal, nanoakışkan

Flow Boiling Characteristics of Nanofluids in Microchannels

ABSTRACT: Due to the ever increasing heat flux values, traditional heat transfer enhancement methods fail to satisfy on cooling of micro systems. Flow boiling heat transfer has a great potential for the applications requiring high heat removal rates because high heat transfer coefficients are achieved in addition to surface temperature to be nearly constant. On the other hand, use of nanofluids instead of traditional fluids is thought to be an important alternative for high thermal performance. Although there are numerous study on the single phase heat transfer of nanofluids, a few number of study concerning with the flow boiling heat transfer of nanofluids in microchannels exists. In the literature, there are some conflicts on whether the use of nanofluids in flow boiling is appropriate or not. Thus, more detailed studies on the usability of nanofluids in boiling flow conditions are required. In this study, experimental studies conducted by with nanofluids were reviewed, and the advantages and disadvantages of the using nanofluids in boiling flows in microchannels were determined.

Keywords: Critical heat flux, flow boiling, microchannel, nanofluid

¹ Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, Erzurum, Türkiye
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Eyüphan MANAY, emanay@erzurum.edu.tr

GİRİŞ

Elektronik cihazların boyut ve ağırlıklarının gittikçe azalması ve daha kompakt hale gelmesi bu cihazların birim alanından olan ısı transferi yayılım miktarının önemli ölçüde artmasına yol açmıştır. Havacılık, savunma, uzay, tıp gibi yüksek teknoloji alanlarında kullanılan elektronik ekipmanların artan ısı akısı değerleri nispeten daha az yüzey sıcaklık artışının görüldüğü iki fazlı soğutma uygulamalarını cazip hale getirmektedir (Ritchey et al., 2014).

Diğer yandan, insan akciğerlerindeki solunum sisteminde, böbreklerdeki boşaltım sisteminde ve doğadaki diğer birçok canlı sistemlerde gözlemlendiği üzere, mikro ölçüdeki pasajlarda taşınım süreci daha verimli gerçekleşmektedir (Kandlikar et al., 2013). Mikrokanalların yüksek ısı transfer alan/hacim oranına sahip olması ve akış ve ısı transfer karakteristiklerinde makro ölçekteki kanallara kıyasla farklı kuvvetlerin ön plana çıkması yeni bir taşınım prosesinin oluşmasına neden olmuştur (Kandlikar et al. 2014).

Mikrokanallar yüksek ısı transfer alan/hacim değerine sahip olduklarından dolayı küçük yüzeylerden yüksek miktarda ısı transferi gerçekleştirmektedirler. Bu ise ısı transferi sistemlerinde daha az miktarda akışkan ile daha fazla ısı transferi elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Öte yandan, kaynama sırasında sıvı-gaz faz değişiminde buharlaşma gizli ısının kullanılması, yüzey sıcaklığının neredeyse sabit kalması ve böylelikle yüksek ısı transfer katsayılarının elde edilmesine yol açmaktadır (Kandlikar, 2016).

Kaynamalı akışın makro kanallar yerine mikrokanallarda kullanılması ise sistemin ısı transferi performansını artırmaktadır.

Son yıllarda ivme kazanan teknolojik gelişmeler yüksek etkinliğe sahip ısı transferi sistemlerine olan ihtiyacın daha da artmasına yol açmıştır.

Isı transferinin iyileştirmesi için aktif ve pasif metodlar içeren birçok araştırma yapılmıştır (Bahiraei ve Hangi, 2015). İlk olarak (Choi, 1995) tarafından önerilen akışkanın ısıl özelliklerini arttırmak için temel akışkana nanopartikül eklenmesi fikri birçok araştırmacının nanoakışkanlarla ısı transferi arttırımı konusuna yoğunlaşmasını sağlamıştır.

Bu makalede mikrokanallarda nanoakışkanların kaynamalı akışta termofiziksel özellikleri, akış ve ısı transfer karakteristikleri ile ilgili son zamanlarda yapılmış olan çalışmalar özetlenmiş ve literatür değerlendirmesi yapılmıştır.

Mikrokanallarda Nanoakışkanların Kaynamalı Akış Karakteristikleri

Bu bölümde, nanoakışkanların mikrokanallarda kaynamalı akışa ait akış rejimleri, ısı transfer katsayısı, basınç düşüşü, kritik ısı akısı karakteristikleriyle ilgili bir literatür değerlendirmesi yapılmıştır. Kaynamalı akışta nanoakışkan kullanımının ısı transferi, basınç düşüşü ve kritik ısı akısına etkisi araştıran çalışmalar sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmiştir.

Bu tablolarda verilen deneysel çalışmalar genellikle mini kanallarda ya da makro ölçekte yapılmış çalışmaları içermektedir.

Literatürde nanoakışkanlar ile yapılmış mikrokanallarda kaynamalı akış ısı transfer karakteristiklerini inceleyen yayınlanmış çok az sayıda çalışma vardır. Son zamanlarda yapılmış çalışmalar Çizelge 3’te özetlenmiştir.

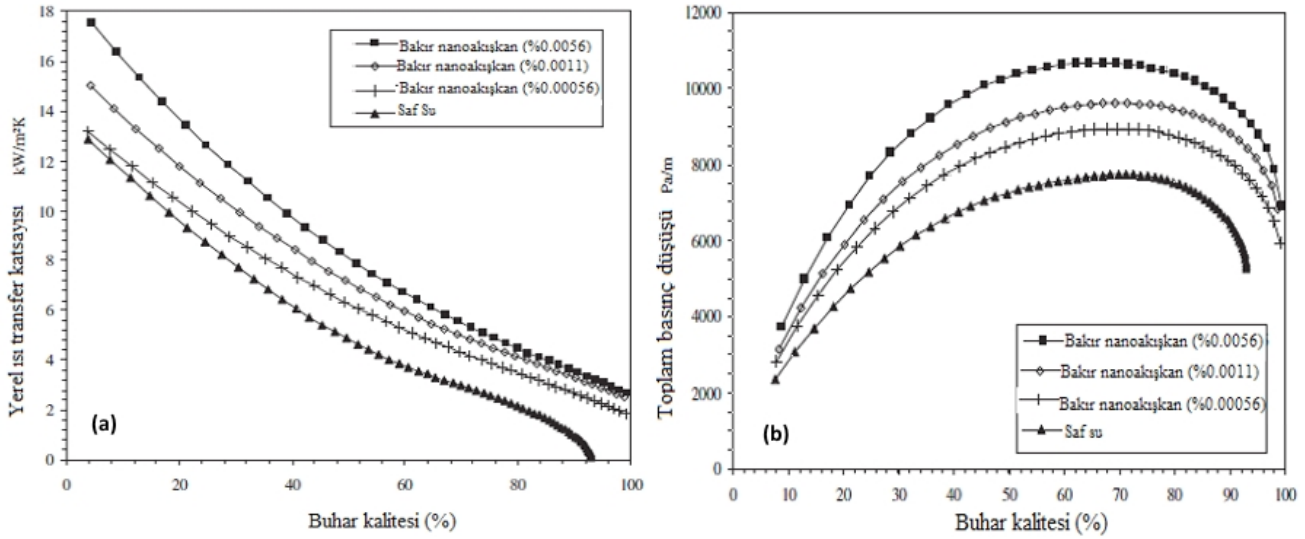
Çizelge 1. Nanoakışkanların kaynamalı akış ısı transfer katsayısı ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların özeti (Fang et al., 2015)

Yazar	Akış Parametreleri: Çıkış basıncı P (kPa) /d (mm)/L (mm)/G (kg m ⁻² s) /q (kW m ⁻²)	Nanoakışkanlar; konsantrasyon	Partikül boyutu (nm)	Yüzeysel Analizi	Isı Transferi
Faukner et al., 2003	101/0.923-1.714/10 ^a /100-2750	Al ₂ O ₃ , Al-N/su; 0.25-0.5 wt%	a	a	Hem artış hem de azalma mevcuttur
Peng et al., 2009	78.25/8.12/1400/100-200/3.08-6.16	CuO/R113; 0-0.5 wt%	40	TEM	% 29.7'lik artış
Kim et al., 2010	101/5.53/100/1500-2500/100-7500	Al ₂ O ₃ /su, ZnO/su, elmas/su; 0.001-0.1 vol%	40-165.4	SEM	Birbirine yakın (\pm % 20 içerisinde).
Boudouh et al., 2010	^a /0.8/160/167-616/ ^a	Cu/su; 0.00056-0.0056 vol%	35	a	Artan konsantrasyonla beraber artış
Henderson et al., 2010	835/7.9/2000/125-390/5.8-16.2; 336/7.9/2000/125-390/0.7-3.1	SiO ₂ /R134a; 0.05-0.5 vol%. CuO/R134a/POE; 0.02-0.08 vol%	200-300 SiO ₂ için 30 CuO için	a	SiO ₂ /R134a için % 55 azalma; CuO/R134a/POE için >% 100 artış
Xu and Xu, 2012	101/0.143/7.5/171-401/0-1000	Al ₂ O ₃ /su; 0.2 wt%	40	SEM TEM	% 17 artış
Abedini et al., 2013	101/10/1000/137-303/51-102	TiO ₂ /su; 0.1-2.5 vol%	20	a	Artan konsantrasyonla beraber artış
Cehade et al., 2013	101/0.8/160/87-653/3-6	Ag/su; 0.000237-0.000475 vol%	35	a	% 132-% 162 artış
Rana et al., 2013; Rana et al., 2014	101/21.8/500/405-710/100-550	ZnO/su; 0.001-0.01 vol%	40	SEM	Artan konsantrasyonla artış
Sun and Yang, 2014	101/10/1400/120-330/ ^a	Cu/R141b, Al/R141b, Al ₂ O ₃ /R141b, CuO/R141b, 0.1-0.3 wt%	40	a	Cu/R141b için % 49 artış
Sarafraz and Hormozi, 2014	^a /30/140/353-1059/0-190	CuO/su; 0.5-1.5 vol%	50	SEM	Konsantrasyon ile kötüleşme

^a Mevcut değil veya yayınlanmamış

Boudouh et al. (2010) bakır bir plaka üzerine yerleştirilmiş hidrolik çapı 800 μ m olan dikdörtgen kesitli 50 adet paralel kanal kullanarak Cu-su nanoakışkanının akış kaynama ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristiklerini incelemiştir. Ortalama çapı 35 nm olan bakır nanopartiküller % 0.00056, 0.0011 ve 0.0056 olacak şekilde çok düşük hacimsel oranlarda temel akışkan su içerisine dağıtılmıştır. Nanopartikül konsantrasyonu ile beraber yüzey sıcaklığı azalmıştır. Kanal çıkış bölgesinde % 0.0011 hacimsel nanopartikül oranı için doyma sıcaklığı saf suya göre azalarak 98°C olmuştur. Temel akışkan içerisindeki bakır nanopartiküller lokal olarak

ısı transferini artırarak kaynama başlangıcını hızlandırmıştır. Nanopartikül konsantrasyonuna bağlı olarak yerel ısı transfer katsayısının değişimi Şekil 1a'da verilmiştir. Nanopartikül konsantrasyonu ile beraber artan ısı transfer katsayısı, mikrokanal yüzeyi ve akışkan giriş sıcaklığının azalmasının yanında kaynama yüzeyinde nanopartiküllerin etkisiyle artan lokal ısı akısından kaynaklanmaktadır. Cu nanopartikül konsantrasyonu ile artan yerel ısı akısı aynı zamanda buhar kalitesini de arttırmıştır. Şekil 1b farklı nanopartikül konsantrasyonu için buhar kuruluk derecesine bağlı olarak kanal boyunca oluşan toplam basınç kayıplarını göstermektedir.



Şekil 1. Cu-su nanoakışkanı için hacimsel konsantrasyon oranına bağlı olarak (a) yerel ısı transfer katsayısı değişimi (b) toplam basınç düşüşü (Boudouh et al., 2010)

Lee and Mudawar (2007) bir mikrokanallı ısı alıcıda Al_2O_3 -su nanoakışkanını kullanarak akış kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan alüminyum oksit partikülleri 36 nm ortalama büyüklüğünde olup temel akışkan olan sudaki hacimsel konsantrasyon değerleri % 1 ve % 2'dir. Deneyler, bakır blok üzerine işlenmiş, 215µm genişliğinde ve 821 µm derinliğinde 21 adet paralel mikrokanal kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynama olayı başladığında mikrokanal çıkışına yakın bölgede yerel buharlaşmadan dolayı nanopartiküllerin büyük kümeler halinde birikmeye başladığını gözlemlemişlerdir. Bu kümelenme hızlı bir şekilde mikrokanal girişine doğru ilerlemiş ve bütün kanala yayılarak akışkanın ısı alıcısı içerisine girişini engellemiştir. Dolayısıyla, nanopartiküllerin ana akışkan içerisinde topaklanmalarını engellemek ve ara yüzey özelliklerini iyileştirmek için yüzey aktif maddeler kullanılmalıdır.

Vafai and Wen (2010; 2011) 510 µm çaplı tek bir mikrokanal içerisinde Al_2O_3 -su nanoakışkanının sıkıştırılmış sıvı akış kaynama özelliklerini 600-1650 kg m⁻²s⁻¹ arasında

değişen kütleli akı aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan alüminyum oksit nanopartiküllerinin ortalama büyüklüğü 25 nm'dir. Kaynama kritik ısı akısı değerinin hem saf su hem de Al_2O_3 -su nanoakışkanı için artan kütleli debi ile arttığı gözlenmiştir. Saf su ile karşılaştırıldığında Al_2O_3 -su nanoakışkanının kaynama kritik ısı akısı değerinde % 0.1 gibi çok düşük nanopartikül konsantrasyonunda % 51 'lik gibi kayda değer bir artış görülmüştür.

Nanoakışkan kaynamasında daha fazla kabarcık oluşumunun meydana geldiği fakat ömürlerinin daha kısa olduğu gözlenmiştir. Saf su ve nanoakışkan için farklı yanma olayı karakteristikleri elde edilmiştir. Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanımında iğne deliği şeklinde yanık bölgeler oluşmuştur.

Yüzeyde nanopartiküllerin birikmesinin kızgın noktaların oluşmasına neden olabileceği veya mikrokanal içinde büyüyen kabarcıkların altında kalan kuru bölgelerin genişlemesinin nanopartiküller tarafından engellenmesi bu tip bir yanma şekline yol açabileceği belirtilmiştir.

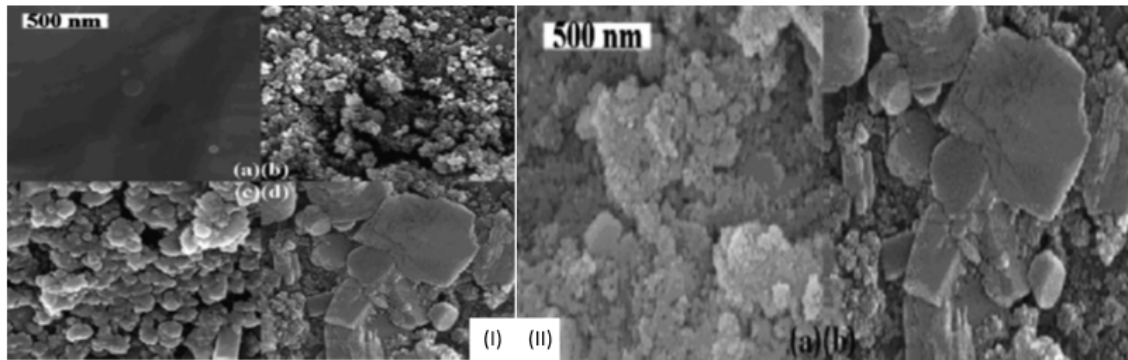
Çizelge 2. Nanoakışkanların kaynamalı akış kritik ısı akısı değeriyle ilgili yapılan deneysel çalışmaların özeti (Fang et al., 2015)

Yazar	Akış Parametreleri: Çıkış basıncı P (kPa) /d (mm)/L (mm)/G (kg m ⁻² s) /q (kW m ⁻²)	Nanoakışkan türü ve konsantrasyonu	Partikül boyutu (nm)	Yüze Analizi	Kritik Isı Akısı
Kim et al., 2008	101/8.7/240/≥1000/0-3000	Al ₂ O ₃ /su;0.01-0.1 vol%	40-50	^a	% 30 artış
Kim et al., 2009	101/5.53//1500-2500/ ^a	Al ₂ O ₃ /su, ZnO/su, elmas/su; 0.001-0.1 vol%	<100	SEM	Al ₂ O ₃ /su, ZnO/su, elmas/su nanoakışkanları için sırasıyla % 53, % 53 ve % 38'lik artış
Ahn et al., 2010	^a /10×5 (dikdörtgen)/1200/0-4000/0-3000	Al ₂ O ₃ /su;0.01 vol%	47	TEM	% 25-% 51 artış
Kim et al. 2010	101/10.98/500/100-300/10-2000	Al ₂ O ₃ /su;0.001-0.1 vol%	50	FE-SEM	% 70.2 artış
Vafai and Wen, 2010	101/0.51/306/600-1650/246.14	Al ₂ O ₃ /su;0.001-0.1 vol%	25	SEM	% 51 artış
Vafai and Wen, 2011	101/0.51/306/600-1980/175	Al ₂ O ₃ /su;0.001-0.1 vol%	25	SEM	Çok düşük konsantrasyon
Lee et al., 2012	101/12.7/500/100-250/100-3500	Al ₂ O ₃ /su;SiC/su; 0.01 vol%	50	SEM	Al ₂ O ₃ /su için % 15 artış ve SiC/su için % 41 artış
Lee et al., 2013	101/12.7/500/100-250/100-3500	GO/su; 0.01 vol%	^a	SEM	% 100 artış
Lee et al., 2013	110/10.92/250/100-500/ ^a	Fe ₂ O ₃ /su, Al ₂ O ₃ /su; 0.01-0.1 vol%	25	SEM	Fe ₂ O ₃ /su için önemli bir artış

^a Mevcut değil veya yayınlanmamış

Nanopartikül yoğunluğunun artmasıyla mikrokanal yüzeyi üzerinde oluşan gözenekli yapı tabakasının kalınlığının arttığı ve daha yoğun hale geldiği gözlenmiştir (Şekil 2-I). Kaynama yüzeylerinde yapılan detaylı gözlemler, partikül konsantrasyonunun artışıyla kirlenme etkilerinin kanal çıkışında daha belirgin hale geldiği ve yüzey özelliklerinin değiştiğini ortaya çıkarmıştır (Şekil 2-II).

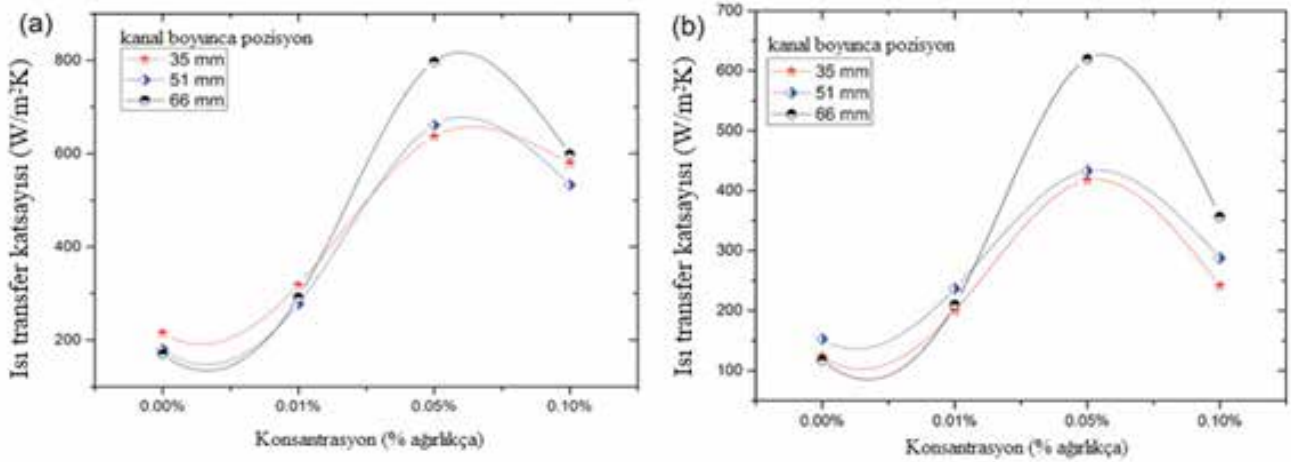
Düşük partikül hacimsel oran değerlerinde nanoakışkanın ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısında önemli bir artış gözlenirken silikon mikrokannallar boyunca basınç düşüşünde ki artış nispeten daha az olmuştur. Nanoakışkanın Nusselt sayısının, artan Reynolds sayısı, Prandtl sayısı ve nanopartikül konsantrasyonu ile beraber arttığı görülmüştür.



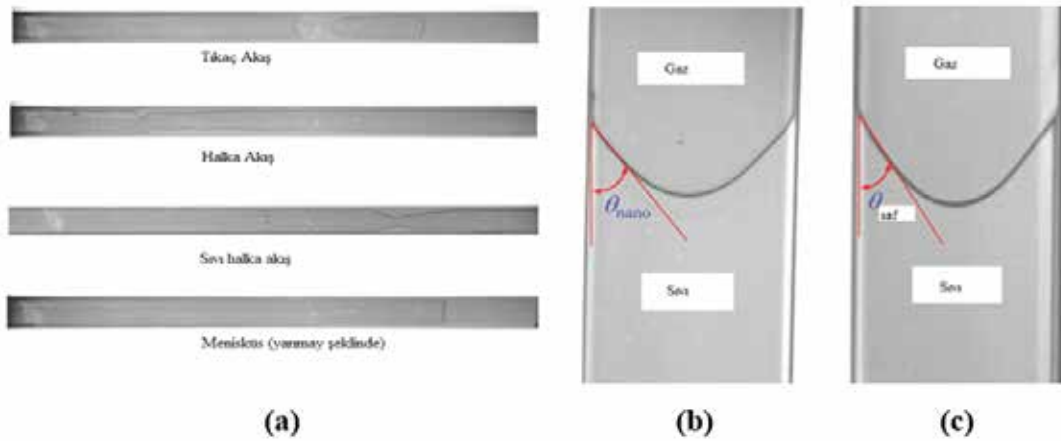
Şekil 2. (I) Farklı hacimsel oranlar için SEM görüntüleri (a) saf su (b) % 0.001 alüminyumoksit, (c) % 0.01 alüminyumoksit, (d) % 0.1 alüminyumoksit, (II) % 0.1 alüminyumoksit için test bölümünün (a) girişine, (b) çıkışına ait SEM görüntüleri (Vafai and Wen, 2010)

Duursma et al. (2015) hidrolik çapı 571 μm , 762 μm ve 1454 μm olan dairesel kesitli yatay mikrokannallarda alüminyum oksit/etanol nanoakışkanı kullanarak tek fazlı akış ve kaynamalı akış ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyselerde, Reynolds sayısı 2.3 ile 18.1 arasında değişirken, mikrokannal duvarlarına 1.5 ile 9 kW m^{-2} aralığında değişen sabit üniform ısı akısı değeri uygulanmıştır. Deneyseler, alüminyum oksit partikül konsantrasyon değerleri % 0.01 ile % 0.1 arasında olan nanoakışkanlar ile gerçekleştirilmiştir. Deneyselerine göre tek fazlı akışta, mikrokannal içerisindeki basınç düşüşü nanopartikül konsantrasyonu ile önemli bir değişim göstermemiştir. Kaynamalı akışta ise mikrokannal basınç kayıpları kararsız ve dalgalı bir şekil almıştır. Mikrokannal giriş basınç değerleri çıkış değerlerine kıyasla daha büyük salınım genliğine sahipken frekans değerleri giriş ve çıkışta birbirine yakın olarak ölçülmüştür. Kaynamalı akışta etanole alüminyum oksit nanopartiküllerinin ilave edilmesinin saf etanole göre ısı transferini arttırdığı görülmüştür. % 0.05 nanopartikül konsantrasyon değerinde saf etanole göre nanoakışkanın ısı transfer katsayısında maksimum beş katlık bir artış görülmüştür. Daha yüksek konsantrasyon değerlerinde ısı transfer katsayısında azalma meydana gelmiştir. Şekil 3 farklı Reynolds sayıları için saf etanol ve değişik

konsantrasyon oranlarına sahip alüminyumoksit-etanol nanoakışkanının kanal boyunca ısı transfer katsayısının değişimini göstermektedir. Isı transferindeki maksimum artışın kanal çıkışına yakın bölgede meydana geldiği görülmüştür. Deneyselerde, aynı zamanda mikrokannal içerisinde nanoakışkan kaynamasına ait akış rejimleri ve akış sıvı-gaz ara yüzeyinin biçimi yüksek hız görüntüleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4a deney sırasında mikrokannalda gözlenen akış kaynama biçimlerini göstermektedir. Alüminyum oksit nanopartikül ilavesinin sadece saf etanole göre sıvı/gaz arayüzeyini daha kararlı hale getirdiği gözlenmiştir. Kaynama sırasında yüzeyde toplanan nanopartiküllerin, lokal partikül konsantrasyonun arttığı bu durum nanoakışkan viskozitesinin artmasına yol açarak sıvı/gaz arayüzeyinin daha kararlı olmasına yardımcı olduğu öne sürülmüştür. Bu durumun yüksek Reynolds sayılarında ve ısı akısı değerlerinde daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, nanoakışkan kullanımında yüzey temas açısının saf etanole göre arttığı gözlenmiş ve üçlü temas noktası civarının ısı transferi için önemli olduğu ifade edilmiştir (Şekil 4b). Xu and Xu (2012) boyutu $100 \times 250 \times 7500 \mu\text{m}$ olan tek bir mikrokannal içerisinde saf su ve ağırlıkça % 0.2 oranında ortalama partikül boyutu 40 nm alüminyum oksit içeren Al_2O_3 -su nanoakışkanı için akış kaynama ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir.



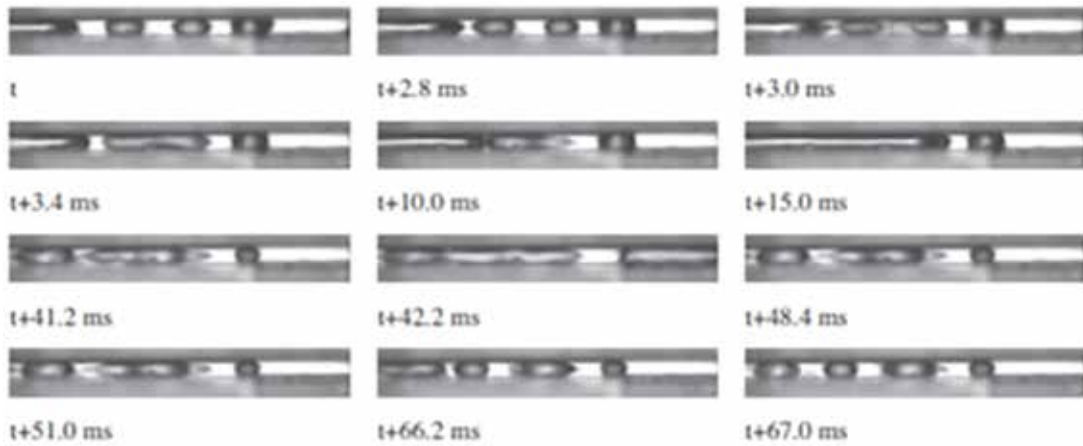
Şekil 3. Isı transfer katsayısının nanopartikül konsantrasyonu ile değişimi (a) $\text{Re}=4.5$ $q=4.5 \text{ kW m}^{-2}$, (b) $\text{Re}=11.3$ $q=7.5 \text{ kW m}^{-2}$ (Duursma et al., 2015)



Şekil 4. (a) Mikrokanalda nanoakışkan kaynama akış biçimleri, (b) % 0.01 etanol hacimsel konsantrasyonda temas açısı (c) saf etanolde temas açısı (Duursma et al., 2015)

Mikrokanallarda kaynama sırasında oluşan kabarcıklar küçük kanal genişliğinden dolayı mikrokanal yüzeyleri tarafından hapsedilir ve akış doğrultusunda uzamış kabarcık oluşumuna neden olur. Oluşan bu uzun yapıdaki kabarcık kanal girişine

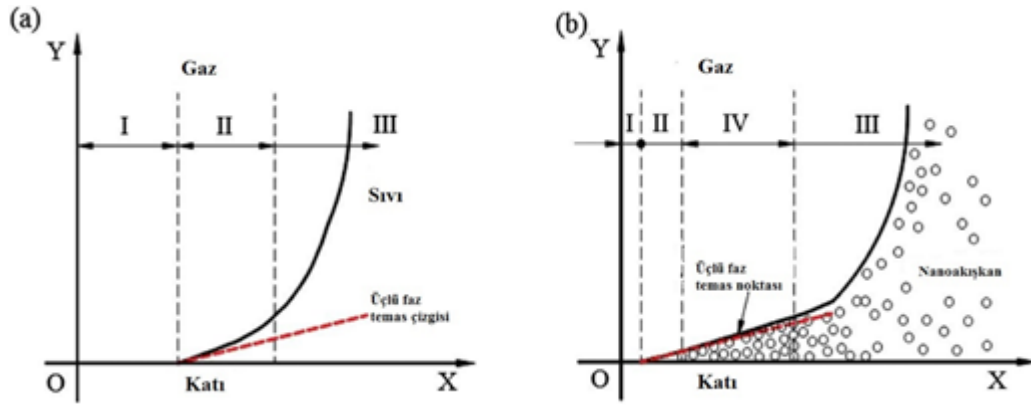
doğru hareket ederek kanalı bloke eder ve kanaldaki basıncın yükselmesine ve kütleli debinin azalmasına yol açar. Faz değişimi sırasında tekrarlayan biçimde kabarcıkların birleşmesi ve parçalanması kaynama prosesini kararsız hale getirmektedir (Şekil 5).



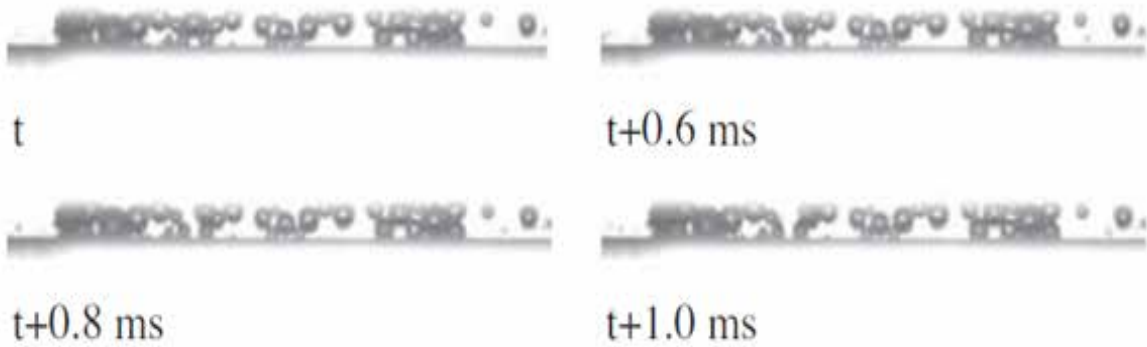
Şekil 5. Kabarcıkların kaynama sırasında birleşme ve ayrılması (saf su için) (Xu and Xu, 2012)

Mikrokanallarda kaynamalı akışta nanoakışkan kullanılması durumunda kaynama prosesinin daha kararlı hale geldiği gözlenmiştir. Nanoakışkanlı kaynama prosesinde mikrokanal içerisinde uzamış kabarcıklar yerine Şekil 6 ve 7’de görüldüğü gibi çok sayıda fakat daha küçük boyutta kabarcık oluşumunun kaynamayı kararlı hale getirdiği öne sürülmüştür. Küçük kabarcık oluşumunun mikrokanal içerisinde uzun kabarcıklı akış yerine isole edilmiş kabarcıklı akışa olanak vermesi kanalın bloke edilmesini dolayısıyla

basıncın dalgalarının oluşmasını engellemiştir. Ayrıca nanoakışkanlı kaynamada daha düşük ısıtıcı yüzey sıcaklığı elde edilmiş olup bu durum nanoakışkanın kaynamayı daha stabil hale getirmesinin yanısıra kaynama ısı transferini arttırdığının da bir göstergesidir. Nanoakışkanlı kaynamada ısıtıcı yüzey üzerinde görülen kuru buhar tabakasının azalması, sıvı film tabakasının artması ve nanopartiküllerin sınır tabakayı rahatsız ederek mikro taşınımı arttırması kaynama ısı transferinin artmasına yol açmıştır.



Şekil 6. Katı-sıvı-gaz üçlü faz temas çizgisi (a) su için (b) nanoakışkan için (Xu and Xu, 2012)

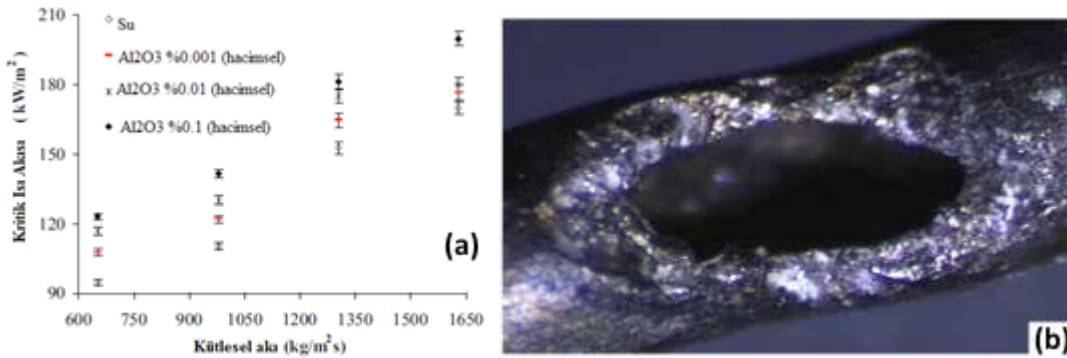


Şekil 7. Nanoakışkan kaynama sırasında kabarcık oluşumu (Xu and Xu, 2012)

Vafai and Wen (2014) 510 μm çaplı tek bir mikrokanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanının kritik ısı akısı değerini deneysel olarak incelemiştir.

Deneyler, % 0.001, % 0.01 ve % 0.1 hacimsel nanopartikül yoğunluğuna sahip nanoakışkanlarla yapılmıştır. Nanoakışkan kaynamalı akışında mikrokanal içerisinde 40-140 kPa aralığında değişen basınç dalgalanmaları görülmüştür. Bu salınımlı değişim kaynama sırasında oluşan kabarcıkların

mikrokanal çeperleri tarafından sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Nanoakışkan kullanımında görülen basınç düşüşü ve sıcaklık periyodunun ve genliğinin saf suya nazaran daha büyük olduğu gözlenmiştir. 85°C nanoakışkan alt soğutma değerinde, saf suya göre kritik ısı akısındaki artış kütle akısına göre % 4-31 aralığında iken 45°C'lik alt soğutma için bu artış % 8-51 arasında olmuştur (Şekil 8a). Nanoakışkan kullanımında yüksek ısı akısı değerlerinde Şekil 8b'de görüldüğü gibi iğne deliği şeklinde yüzeyde yanma görülmüştür.

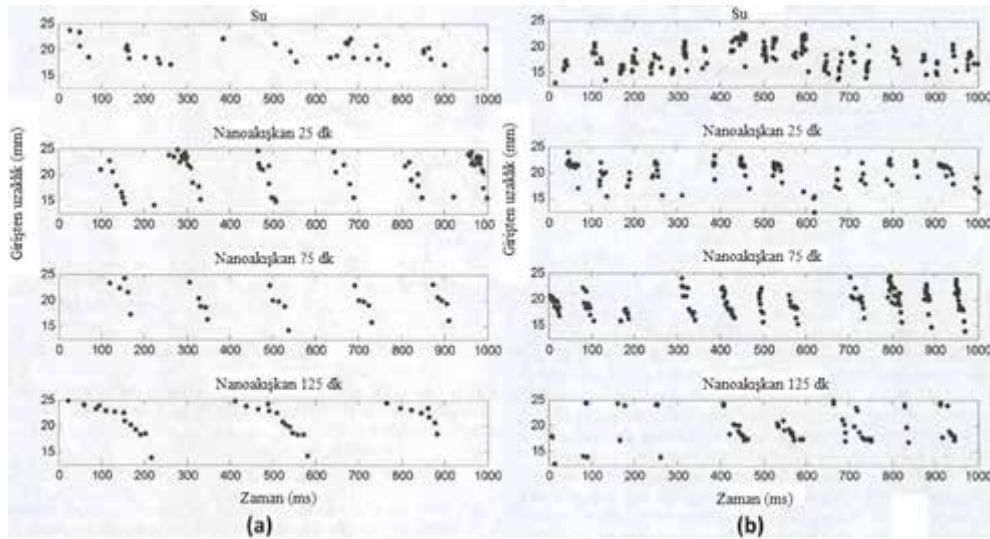


Şekil 8. (a) Kritik ısı akısının hacimsel konsantrasyon ve kütleli akı ile değişimi, (b) kritik ısı akısından dolayı yüzeyde meydana gelen yanma (Vafai and Wen, 2014)

Edel and Mukherjee (2013; 2015) dikdörtgen kesitli 229 μm hidrolik çaplı prinçten yapılmış tek bir mikrokanalda saf su ve hacimsel olarak % 0.001 alüminyum oksit nanopartikül içeren Al_2O_3 -su nanoakışkanına ait akış kaynama karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Kaynamalı akışta mikrokanal içerisinde uzun kabarcık oluşumunun kanal girişine doğru gelişmesi nanoakışkan kullanılması durumunda saf suya göre daha yavaş gerçekleşmiştir. Aynı zamanda, artan ısı akışı mikrokanal yüzey sıcaklığını ve uzun kabarcık oluşum başlangıç noktasının kanal girişine doğru ilerleme hızını arttırmıştır. Mikrokanal yüzeyinde nanopartikül birikmesinden dolayı uzun kabarcık oluşum başlangıç noktaları kanal

boyunca yayılma göstermekle birlikte kanalın çıkış bölgesine yakın bir noktada yoğunluk göstermiştir. Saf su deneylerinde ise bu noktalar kanalda gelişigüzel bir dağılım göstermiştir (Şekil 9).

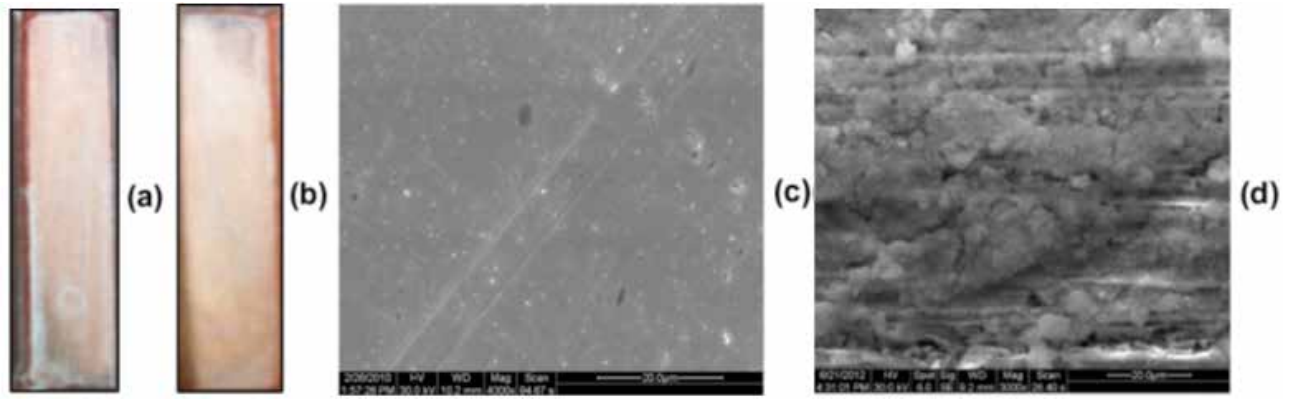
Morshed et al. (2013) 672 μm hidrolik çapındaki tek bir bakır mikrokanalda yüzey morfolojisinin akış kaynama özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. İlk olarak bakır mikrokanalda alüminyumoksit-etanol nanoakışkanı ile havuz kaynama prosesi gerçekleştirilerek kanal yüzeyinin Al_2O_3 nanopartikülleriyle kaplanması sağlanmıştır. Daha sonra saf su ile akış kaynama deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Zamana bağlı olarak uzun kabarcık oluşumu başlangıç yeri (a) $Re=100$ $q=130$ kW m^{-2} (b) $Re=100$ $q=300$ kW m^{-2} (Edel and Mukherjee, 2015)

Kaynamalı akış deneyleri süresince çok ince nanopartikül tabakasının mikrokanal yüzeyinde bulunmaya devam ettiği yapılan SEM analiziyle görülmüştür (Şekil 10). Al_2O_3 nanopartiküllerinin kaynama başlangıcını kaplamasız yüzeye göre bir miktar geciktirdiği görülmüştür. Kaplamasız çıplak bakır mikrokanal ve alüminyumoksit nanopartikülleriyle

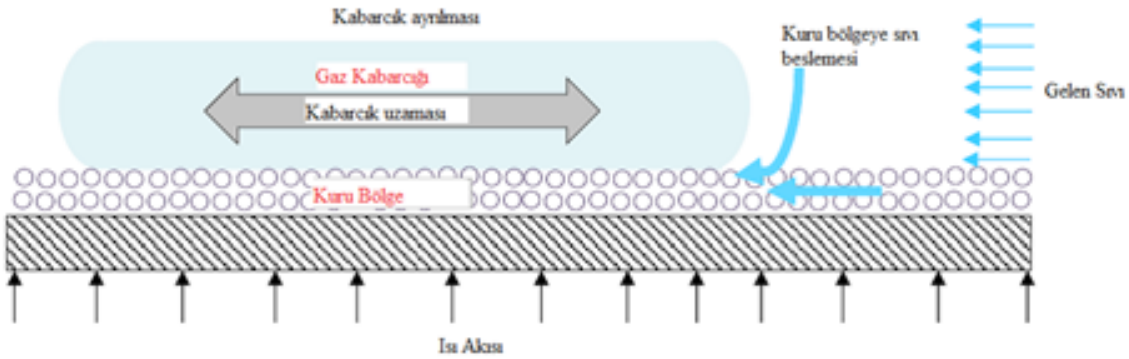
kaplı mikrokanalda kaynamanın benzer olarak mikrokanal çıkışında başladığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, nanotabakanın ince olmasının basınç kayıpları üzerinde gözle görülür bir artış meydana getirmeyeceği söylenebilir. Nanopartikül kaplamasına sahip mikrokanalda ısı transfer katsayısının kütsel akıdan bağımsız olduğu görülmüştür.



Şekil 10. Al_2O_3 nanopartikülleriyle kaplanmış bakır yüzey (a) Birikmeden hemen sonra Al_2O_3 kaplanmış bakır yüzey (b) Kaynama deneyi sonrası Al_2O_3 kaplanmış Cu yüzeyi (c) Kaplamasız bakır borunun SEM görüntüsü (d) Kaynama sonrası Al_2O_3 kaplanmış bakır yüzeyin SEM görüntüsü (Morshed et al. 2013)

Diğer taraftan, nanopartikül kaplamasının çıplak yüzeye göre kritik ısı akı değerini kütleli debiye bağlı olarak % 17-39 arasında arttırdığı görülmüştür. Düşük kütleli debilerde artış oranının daha fazla

olduğu görülmüştür. Nanopartikül kaplamanın yüzeyin ıstatılabilirliğini artırarak mikrokanaal yüzeyinde buhar tabakasının oluşumunu geciktirmesi yüksek ısı akısı değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Nanopartiküllerle kaplı yüzeyde kritik ısı akısı arttırım mekanizması (Morshed et al. 2013)

Nanoakışkanlar ile kaynamalı akış, ısıtıcı yüzeyi üzerinde nanopartiküllerin birikmesine yol açar. Yüzeyde biriken ince nanopartikül tabakası kanal yüzeyinin ıstatılabilirliğini değiştirir. Nanopartiküller statik temas açısının azalmasına yol açarak yüzeyin ıstatılabilirliğini arttırmışlardır (Ahn and Kim, 2011).

Nanopartikül ilavesiyle yüzey pürüzlülüğündeki ve adezyon kuvvetindeki artış yüzey ıstatılabilirliğini arttırmıştır (Kandlikar et al., 2014). Yüksek ıstatılabilirlik kabarcık dinamiğini değiştirerek kritik ısı akısı değerini artırır. Yüzeyde nanopartikül

birikmesi nanopartiküllerin boyutu ve dağılımı, ısı akısı, nanopartikül-sıvı etkileşimi, nanopartikül konsantrasyonu, çalışma süresi ve yüzey pürüzlülüğü gibi birçok parametreye bağlı olduğundan deneysel sonuçlar arasında farklılıklara yol açmaktadır.

Nanoakışkan kullanmak yerine mikrofabrikasyon teknikleri kullanarak ısıtıcı yüzey üzerinde nano yapı bir tabaka oluşturmak nanoakışkanlarla edinilen üstünlükleri elde etmek için alternatif bir yöntem olarak düşünülebilir (Kandlikar et al., 2014).

Çizelge 3. Mikrokanallarda nanoakışkanlarla yapılmış kaynamalı akış çalışmaları

Yazar	Temel akışkan	Nano partikül	Hacimsel Oran (vol.%)	Kanal Geometrisi ve Ölçüleri	Akış özellikleri	Sonuçlar
Lee and Mudawar, 2007	Su	Al ₂ O ₃	1, 2	Bakır blok üzerine işlenmiş 215µm genişlik, 815µm derinliğinde 41 adet paralel mikrokanal	Re=248	Çıkış bölgesinde başlayan nanopartikül birikmesi kanal girişine doğru ilerleyerek kanalı tıkamıştır. Akış kaynamada nanoakışkan kullanımı uygun değildir
Vafai and Wen, 2010; Vafai and Wen, 2011	Su	Al ₂ O ₃	0.01- 0.1	510 µm çaplı dairesel paslanmaz çelik bir kanal	G=600-1650 kg m ⁻² s ⁻¹	Kritik ısı akısı değeri % 0.1 nanopartikül hacimsel oran değerinde % 51'lik bir artış göstermiştir. Yüksek ısı akısı değerlerinde yüzeyde yanmaya bağlı olarak iğne tipi deformasyon meydana gelmiştir.
Wu et al., 2009	Su	Al ₂ O ₃	0.15, 0.26	194.5 µm hidrolik çaplı silikon trapez mikrokanal	Re=200-1400, Pr=4.8, 5.6	Nanoakışkanın Nusselt sayısının, artan Reynolds sayısı, Prandtl sayısı ve nanopartikül konsantrasyonu ile beraber arttığı görülmüştür.
Duursma et al., 2015	Etanol	Al ₂ O ₃	0.01-0.1	D _h =571, 762, 1454 µm	Re=2.3, 18.1	%0.05 nanopartikül konsantrasyon ısı transfer katsayısında maksimum beş katlık bir artış olmuştur. Sıvı/gaz arayüzeyinin kararlılığı artmıştır. Yüzey temas açısı artmıştır. Vizkozite artmıştır.
Xu and Xu, 2012	Su	Al ₂ O ₃	0.2 (ağırlıkça)	100 × 250 × 7500 µm mikrokanal	G=171, 285, 401 kg m ⁻² s ⁻¹	Küçük kabarcık oluşumu görülmüş, kararlılık artmış, basınç dalgalanması azalmıştır. Kaynama ısı transferi artmıştır.
Vafai and Wen, 2014	Su	Al ₂ O ₃	0.001, 0.01, 0.1	510 µm çaplı dairesel paslanmaz çelik bir kanal	G=600-1650 kg m ⁻² s ⁻¹	40-140 kPa aralığında basınç dalgalanmaları görülmüştür. Daha uzun kabarcık oluşumu görülmüştür. Kritik ısı akısı kütle akısı ile lineer olarak artmıştır, nanopartikül konsantrasyonu ile yükselmiştir.
Edel and Mukherjee 2015	Su	Al ₂ O ₃	0.001	Dikdörgen kesitli 229 µm hidrolik çaplı prinçten yapılmış tek bir mikrokanal	Re=100	Kabarcık oluşum bölgeleri artmıştır. Gaz fazının kanal içinde kalma süresi kısalmış ve kaynama kararlı hale gelmiştir.
Morshed et al., 2013	Etanol	Al ₂ O ₃	-	672 µm hidrolik çaplı tek mikrokanal	G=23, 46, 92 kg m ⁻² s ⁻¹	Aluminyumoksit kaplamalı Cu yüzeyinde ısı transfer katsayısı % 5 azalmış, kritik ısı akısı düşük debilerde daha fazla olmak üzere % 17-39 arasında artmıştır.
Boudouh et al., 2010	Su	Cu	0.00056, 0.0011, 0.0056	800 µm hidrolik çaplı, 50 paralel mikrokanal	G=217, 516 kg m ⁻² s ⁻¹	Nanopartiküller kaynama başlangıcını hızlandırmıştır. Yerel ısı akısı, ısı transfer katsayısı ve buhar kalitesi ve toplam basınç düşüşü konsantrasyonla beraber artmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada ısı transferinin artırılması amacıyla son yıllarda yoğun araştırmalar yapılan nanoakışkanlar ve mikrokanallarda kaynamalı ısı transferi üzerine geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Bu alanda araştırma yapacak araştırmacılar için referans olacak bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

* Genel olarak mikrokanallarda kaynamalı akışta çok düşük konsantrasyon değerlerine sahip nanoakışkan kullanımı dahi kaynama karakteristiklerini iyileştirdiği görülmüştür.

* Nanoakışkan kullanımı vizkoziteyi arttırdığı ve yüzeydeki kabarcık büyümesini düzenli hale getirdiğinden dolayı kaynama olayının en büyük sorunlarından biri olan kararsızlığın azalmasına yardımcı olmuştur.

* Nanoakışkan kullanımında kaynama sırasında daha küçük çaplı fakat çok sayıda kabarcıklı akış biçimi görülmüştür.

* Kaynamalı akışta nanoakışkan kullanımı kabarcık oluşum bölgelerini artırmıştır. Benzer şekilde

gaz fazının kanal içinde kalma süresini kısaltarak kaynama sürecinin kararlılığını da arttırmıştır.

* Nanoakışkan kullanımının kaynama sırasında görülen akış biçimlerini değiştirerek basınç dalgalanmalarını azaltmıştır.

* Nanoakışkan kullanımında basınç kayıpları arttırmasına rağmen kaynama sırasında görülen basınç dalgalanmalarını azaltmıştır.

* Yüzey üzerine nanopartiküllerle kaplama yapılması kaynama başlangıcını geciktirmiştir.

* Nanopartiküllerin kritik ısı akısı üzerinde arttırıcı yönde etkisi olduğu görülmüştür. Kaynama kritik ısı akısı değerinin artan hacimsel nanopartikül konsantrasyon değerleriyle beraber artmıştır.

* Nanoakışkan ısı transfer katsayısının artan Reynolds sayısı ve partikül konsantrasyon değerleriyle beraber arttığı belirtilmiştir. Kaynamada yüksek ısı akısı değerlerinde yüzeyde görülen yanma olayı nanoakışkan kullanımında farklı biçimlerde gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- Abedini E, Behzadmehr A, Rajabnia H, Sarvari SMH, Mansouri SH, 2013. Experimental investigation and comparison of subcooled flow boiling of TiO₂ nanofluid in a vertical and horizontal tube, Proc. IMechE Part C J. Mech. Eng. Sci. 227 (8):1742-1753.
- Ahn HS, Kim H, Jo H, Kang SH, Chang WP, Kim MH, 2010. Experimental study of critical heat flux enhancement during forced convective flow boiling of nanofluid on a short heated surface, Int. J. Multiph. Flow 36:375-384.
- Ahn HS, Kim MH, 2011. The effect of micro/nanoscale structures on CHF enhancements, Nuclear Engineering and Technology 43(3):205-216.
- Bahiraie M, Hangi M, 2015. Flow and heat Transfer characteristics of magnetic nanofluids: A review, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 374: 125-138.
- Boudouh M, Gualous HL, De Labachellerie M, 2010. Local convective boiling heat transfer and pressure drop of nanofluid in narrow rectangular channels, Appl. Therm. Eng. 30 (17-18): 2619-2631.
- Chehade AA, Gualous HL, Le Masson S, Fardoun F, Besqet A, 2013. Boiling local heat transfer enhancement in minichannels using nanofluids, Nanoscale Res. Lett. 8:1-20.
- Choi SUS, 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle, ASME FED 231:99-105.
- Duursma G, Sefiane K, Dehaene A, Harmand S, Wang Y, 2015. Flow and Heat Transfer of Single-and Two-Phase Boiling of Nanofluids in Microchannels, Heat Transfer Engineering 36(14-15):1252-1265.
- Edel Z, 2013. Experimental investigation of regular fluids and nanofluids during flow boiling in a single microchannel at different heat fluxes and mass fluxes, Master's Thesis, Michigan Technological University.
- Edel Z, Mukherjee A, 2015. Flow Boiling Dynamics of Water and Nanofluids in a Single Microchannel at Different Heat Fluxes, Journal of Heat Transfer 137:011501.
- Fang X, Wang R, Chen W, Zhang H, Ma C, 2015. A review of flow boiling heat transfer of nanofluids, Applied Thermal Engineering 91:1003-1017..
- Faukner D, Khotan M, Shekarriz R, 2003. Practical design of a 1000 W/cm² cooling system, in: Proc. of 19th IEEE SEMI-THERM Symposium, San Jose, CA, March 11-13.
- Henderson K, Park Y-G, Liu LP, 2010. Flow boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube, Int. J. Heat Mass Transf. 53 (5-6):944-951.
- Kandlikar GS 2013. Heat Transfer in Microchannels-2012 Status and Research Needs, Journal of Heat Transfer 135: 091001.
- Kandlikar GS 2016. Heat Transfer and Fluid Flow in Microchannels and Minichannels, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 592 p.
- Kandlikar SG, 2016. Mechanistic Considerations for Enhancing Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels, Journal of Heat Transfer 138: 021504.
- Kim SJ, McKrell T, Buongiorno J, Hu L-W, 2008. Alumina nanoparticles enhance the flow boiling critical heat flux of water at low pressure, ASME J. Heat Transf. 130:044501.

- Kim SJ, McKrell T, Buongiorno J, Hu L-W, 2009. Experimental study of flow critical heat flux in aluminaewater, zinc-oxideewater and diamondewater nanofluids, *J. Heat Transf.* 131:043204.
- Kim SJ, McKrell T, Buongiorno J, Hu LW, 2010. Subcooled flow boiling heat transfer of dilute alumina, zinc oxide, and diamond nanofluids at atmospheric pressure, *Nucl. Eng. Des.* 240: 1186-1194.
- Kim TI, Chang WJ, Chang SH, 2010. An experimental study on CHF enhancement in flow boiling using Al_2O_3 nano-fluid, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (5-6):1015-1022.
- Lee J, Mudawar I, 2007. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50: 452-463.
- Lee SW, Kim KM, Bang IC, 2013. Study on flow boiling critical heat flux enhancement of graphene oxide/water nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transf.* 56:348-356.
- Lee SW, Park SD, Kang S, Kim SM, Seo H, Lee DW, Bang IC, 2012. Critical heat flux enhancement in low flow boiling of Al_2O_3 and SIC nanofluids under low pressure and low flow conditions, *Nucl. Eng. Technol.* 44 (4SI):429-436.
- Lee T, Lee JH, Jeong YH, 2013. Flow boiling critical heat flux characteristics of magnetic nanofluid at atmospheric pressure and low mass flux conditions, *Int. J. Heat Mass Transf.* 56:101-106.
- Morshed, AKMM, Paul TC, Khan JA, 2013. Effect of Al_2O_3 deposition on flow boiling performance of water in a microchannel, *Experimental Thermal and Fluid Science* 47:6-13.
- Peng H, Ding GL, Jiang WT, Hu HT, Gao YF, 2009. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube, *Int. J. Refrig.* 32:1259-1270.
- Rana KB, Agrawal GD, Mathura J, Puli U, 2014. Measurement of void fraction in flow boiling of ZnOewater nanofluids using image processing technique, *Nucl. Eng. Des.* 270:217-226.
- Rana KB, Rajvanshi AK, Agrawal GD, 2013. A visualization study of flow boiling heat transfer with nanofluids, *J. Vis.* 16 (2):133-143.
- Ritchey SN, Weibel JA, Garimella SV, 2014. Local measurement of flow boiling heat transfer in an array of non-uniformly heated microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 71: 206-216.
- Sarafraz MM, Hormozi F, 2014. Scale formation and subcooled flow boiling heat transfer of CuO/water nanofluid inside the vertical annulus, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 52:205-214.
- Sun B, Yang D, 2014. Flow boiling heat transfer characteristics of nano-refrigerants in a horizontal tube, *Int. J. Refrig.* 38:206-214.
- Vafaei S, Wen D, 2010. Critical heat flux (CHF) of subcooled flow boiling of alumina nanofluids in a horizontal microchannel. *Journal of Heat Transfer* 132:102404.
- Vafaei S, Wen D, 2011. Flow boiling heat transfer of alumina nanofluids in single microchannels and the roles of nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research* 13:1063-1073.
- Vafaei S, Wen D, 2014. Critical heat flux of nanofluids inside a single microchannel: Experiments and correlations. *Chemical Engineering Research and Design* 92:2339-2351.
- Wu X, Wu H, Cheng P, 2009. Pressure Drop and Heat Transfer of Al_2O_3 -H₂O Nanofluids through Silicon Microchannels, *J. Micromech. Microeng.* 19(10):105020.
- Xu L, Xu J, 2012. Nanofluid stabilizes and enhances convective boiling heat transfer in a single microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55:5673-5686.