



HAVUZ KAYNAMA ISI TRANSFERİNDE MEKANİK ÇALKALAMA ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Huri Firdevs FURKAN*, Fatma ŞAHİN**, Erdem ALIÇ*** ve Ahmet KAYA****

*Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
46000, Kahramanmaraş, hurifirdevs38@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7567-9682

**Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
46000, Kahramanmaraş, fadilossahin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9872-823X

*** Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Andırın Meslek Yüksekokulu
46400, Kahramanmaraş, ealic@ksu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2852-0353

****Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
46000, Kahramanmaraş, kaya38@ksu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9197-3542

(Geliş Tarihi: 29.05.2020, Kabul Tarihi: 08.10.2020)

Özet: Bu çalışmada, havuz kaynamada ısı transferini iyileştirme metodlarından biri olan mekanik çalkalamanın ısı transfer katsayısına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney akışkanı olarak saf su kullanılmıştır. Deneylerde havuz içerisinde mekanik çalkantı oluşturmak amacıyla farklı devir hızlarında çalışan bir adet 100 mm çapında aksiyel fan kanadı kullanılmıştır. Deneylerde 100 mm uzunluğunda 20 mm çapında silindirik çelik ısıtıcı kullanılmıştır. Deneyler havuz kaynamada en yüksek ısı transfer katsayılarının elde edildiği kabarcıklı kaynama bölgesinde (su için ΔT 5-30 °C) gerçekleştirilmiştir. Deneyler 9 farklı ısıtıcı gücünde (17, 23, 29, 38, 47, 58, 70, 83 ve 94 kW/m²) ve 5 farklı mekanik karıştırıcı devrinde (0, 55, 139, 205 ve 212 d/d) gerçekleştirilmiştir. Isı transferi katsayısının, ısıtıcı gücün ve mekanik karıştırıcının devir sayısının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Isıtıcı gücün 17 kW/m² den 94 kW/m² ye yükseltilmesiyle (mekanik karıştırıcının 55 d/d da sabit tutulmuştur), ısı transferi katsayısının yaklaşık %10 oranında arttığı belirlenmiştir. Düşük ısıtıcı gücünde (17 kW/m²'de), devir sayısının 0 d/d'dan 212 d/d'ya çıkartılmasıyla, ısı transferi katsayısının %190 oranında iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buhar, Havuz kaynama, Mekanik karıştırma, Isı transfer katsayısı

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER EFFECTS OF MECHANICAL AGITATION IN POOL BOILING

Abstract: In this study, the effect of mechanical agitation, which is one of the methods of improving the heat transfer in pool boiling, on the heat transfer coefficient has been investigated experimentally. Pure water has been used as the test fluid. In the experiments, a 100 mm diameter axial fan blade operating at different rotational speeds have been used to create mechanical agitation in the pool. In the experiments, 100 mm long, 20 mm diameter cylindrical steel heater has been used. Experiments have been carried out in nucleate boiling regime region (for water ΔT 5-30 °C), where the highest heat transfer coefficients have been obtained in pool boiling. Experiments have been carried out at 9 different heating power (17, 23, 29, 38, 47, 58, 70, 83 and 94 kW/m²) and at 5 different mechanical agitator speeds (0, 55, 139, 205 and 212 rpm). It has been determined that the heat transfer coefficient (HTC) increases with the increase of the heater power and the speed of the mechanical agitator. Increasing the heater power from 17 kW / m² to 94 kW / m² (the mechanical agitator has been kept constant at 55 rpm), it has been determined that the heat transfer coefficient increased by approximately 10%. It has been determined that the HTC improved by 190% by increasing the number of revolutions from 0 rpm to 212 rpm at low heater power (at 17 kW/m²).

Keywords: Pool boiling, Mechanical agitation, Heat transfer coefficient, Vapor

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A : Yüzey Alanı [m²]
atm : Atmosferik basınç [Bar]
B : Boyut
Cp : Özgül ısı [j/kg°C]
d : Buhar kabarcık çapı [mm]
DC : Doğru akım

d/d : Bir dakikadaki devir sayısı
doy : Doyma
dk : Dakika
g : Yer çekimi ivmesi [m/s²]
h : Isı transfer katsayısı [W/m²K]
I : Amper [A]
k : Isıl iletkenlik [W/mK]
KKB : Kabarcık kopma başlangıcı

l	: Sıvı
MP	:Mega piksel
Pr	: Prandtl
s	: Termokupl yüzeye olan mesafesi [m]
T	: Sıcaklık [°C]
t	: Zaman [s]
th	: Termokupl
V	: Voltaj [V]
v	:Buhar
y	: Yüzey
q"	: Isı akısı [kW/m ²]
Δ	: Fark
σ	:Yüzey gerilimi [N/m]
α	:Isıl yayılım [m ² /s]
x	: mesafe [m]
y	: Yüzey
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
μ	: Dinamik viskozite [kg/ms]
Ø	: Çap [mm]

GİRİŞ

Birçok endüstriyel uygulamada havuz kaynama ısı transferi kullanılmaktadır (Guan et al., 2011). Özellikle taşırılmalı tip ısı eşanjörü, buhar kazanları ve birçok kimyasal proses (parfümeri, ilaç, boya, saflaştırma vb.) havuz kaynama ısı transferi uygulamalarından bazılarıdır(Dikici et al., 2014; Gheitaghy et al., 2017). Kaynama ısı transferi akışkanın belirli bir basınçta o basınca karşılık gelen kaynama sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktaki bir yüzey ile teması sonucunda meydana gelen sıvı fazından buhar fazına geçişi ifade etmektedir. Havuz kaynama ile ilgili ilk detaylı çalışma Nukiyama tarafından gerçekleştirilmiştir (Nukiyama, 1934). Sabit ısı akısında daha düşük yüzey sıcaklığı ısı transfer katsayısını artıracak ve en küçük ısı transferi iyileştirmelerinde çok büyük enerji kazançlarına sebep olmaktadır (Kumar et al., 2018). Bu nedenle havuz kaynamada ısı transferinin iyileştirme yöntemleri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır (Kamel et al., 2018; Kamel & Lezsovit, 2020). Bu çalışmalardan bazıları da sıvı çalkalama içermektedir (Cengel, 2014). Sıvı çalkalama işlemi mekanik, ultrasonik, elektrostatik, vorteks, ve basınçlandırma ile gerçekleştirilmektedir (Price, 1966). Mekanik çalkalama, akışkanın kaynama havuzu içerisinde yer alan bir karıştırıcı yardımıyla gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu işlemde genellikle karıştırıcı ısıtma yüzeyinin üstüne konumlandırılmıştır (Gates et al., 1976).

Literatürde mekanik çalkalamanın kaynamada ısı transferine etkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Gates vd. mekanik çalkalanma etkisini sıvı süspansiyonlar için araştırmış ve süspansiyonlarda karıştırıcı sistemlerin seçilmesinde dikkat edilmesi gerek hususlar üzerinde durmuşlardır (Gates et al., 1976). Smith ve Katsanevakis farklı tip karıştırıcılar için buhar kabarcıkları oluşumu olmadan ve buhar kabarcığı oluşumu olan sistemler için karıştırıcının güç gereksinimini araştırmışlardır. Çift fazlı kaynamada buhar kabarcığı fraksiyonunun karıştırıcı güç gereksinimini etkilediğini belirtmişlerdir (Jm & An,

1993). Smith ve ark. yeni tip üç farklı karıştırıcı kullanarak karıştırıcı için bağıl güç talebi (RPM) formülasyonunu üretmişlerdir (Smith et al., 2001). Takahashi vd. kaynama havuzuna oranla büyük boyutlu karıştırıcının ($D_{kazan}=0,108$ m ve $D_{karıştırıcı}=0,1$ m) ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Karıştırıcı hızı arttıkça karışma süresinin azaldığını ifade etmişlerdir. Çalışmada üç tip karıştırıcı kullanmışlardır. Tüm karıştırıcıların boyutsuz karıştırma süresinin, güç sayısı ile ters orantılı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Güç sayısına bağlı olarak değişen boyutsuz karıştırma süresi eşitliğini üretmişlerdir (Takahashi et al., 2006). Durmaz ve Özdemir merkezci karıştırıcılı kaynama kazanında ısı geçişine; karışımın şeker derişikliği, karıştırıcı devir sayısı, kanat boyutu ve kanat ile taban arasındaki mesafenin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Viskozitesi yüksek şekerli sıvıların ısıtılması veya kaynatılmasında kanat ile yüzey tabanı arasındaki boşluğun minimum değerinde olması gerektiğini, devir sayısının ise olabilecek en yüksek değerinde olması en iyi ısı geçiş hızının elde edilmesini sağladığını belirtmişlerdir (Durmaz & Ozdemir, 2012). Durmaz ve Özdemir sonraki çalışmalarında yine şekerli süspansiyonlar için karıştırıcı kenarı ile kaynama kazanı tabanı arasındaki boşluğun, karıştırıcı hızının ve karıştırıcı boyutunun kaynama ısı transfer katsayısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Isı transfer mekanizması için Peclet sayısına bağlı yeni bir Nusselt formülasyonu önermişlerdir (Ozdemir & Durmaz, 2015). Das vd. çalışmalarında farklı tip süspansiyonlar için $\text{Ø}=86\text{mm}$, $\text{Ø}=114\text{mm}$, $\text{Ø}=160$ mm çapında A310 model karıştırıcı kullanmışlardır. Karıştırıcı hızları 100-700 d/d arasında değişmektedir. Tank içerisinde karıştırıcı ile akış hareketinin iki farklı yol izlemesini sağlamışlardır. Çalkalamalı bir tankta karıştırıcı boyutlarının değişiminin hidrodinamik ve ısı transferine etkilerini deneysel olarak incelenmeye çalışmışlardır. Sonuçta karıştırıcı boyutundaki değişimin süspansiyonun dibe çökmesini etkilediği ve dibe çökme miktarına bağlı olarak ısı transferinin etkilendiğini ifade etmişlerdir (Das et al., 2018). Suriyawong vd. deneysel çalışmalarında havuz kaynama ısı transferinde ısıtma yüzeyi üzerine farklı uzaklıklarda yerleştirdikleri pasif karıştırıcının etkisini araştırmışlardır. Bu karıştırıcının ısıtma yüzeyine uzaklığı sırası ile 5mm-15mm-25mm dir. Karıştırıcı olarak 2-3-4 bıçaklı, aynı yükseklikte, aynı çapta ve aynı göbek çapında üç karıştırıcı kullanmışlardır. Sonuç olarak, karıştırıcı kullanımının genel olarak ısı transferini artırdığını ifade etmişlerdir. Diğerlerine göre dört bıçaklı karıştırıcının ısı transferini daha çok artırdığını söylemişlerdir. Karıştırıcıda artan bıçak sayısının ısı transferini artırdığını ifade etmişlerdir (Suriyawong et al., 2017) .

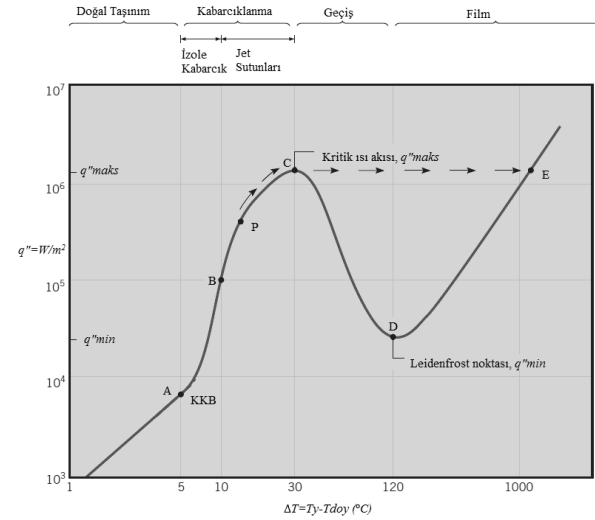
Araştırmacılar mekanik çalkalamanın kaynama ısı transferi uygulamalarında bazı zorluklar içerdiğini belirtmişlerdir (Cengel, 2014). Burada mekanik aksamın varlığı ve akışkan içerisinde kontrolü, ısıtma yüzey sıcaklığı değişimine bağlı olarak hassas yönetim gerektirmesi ve ekstra enerji tüketiminden kaynaklanan bazı zorluklar içerdiğinden bahsedilebilir. Gelişen teknoloji ile bahsedilen tüm zorlukların aşılabileceği

düşünülmektedir. Kaynama ısı transferinde için mekanik çalkalamanın önemi literatürce kabul edilmiş ve etkisi üzerine çalışmalar günümüzde de devam etmektedir (Esonye, 2019; Takahashi et al., 2006). Bu çalışma ile literatürde ilk defa silindirik ısıtıcı (fişek) altına yerleştirilen mekanik karıştırıcının, kabarcıklı kaynamada ısı transfer katsayısına etkisi araştırılmıştır. Karıştırıcı olarak, modern bilgisayar soğutma fanlarından kullanılan 7 kanatlı bir model seçilmiştir. Çalışma bu yönü ile de literatürden ayrılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan kanat modelleri sadece karıştırma yapmak (sıvı akışına yön vermek) için tasarlanmış modellerdir. Bu model tasarımı itibarı ile hem akışa yön vermekte hemde güçlü bir türbülans etkisi oluşturabilmektedir. Çalışma bu yönü ile de literatüre yeni bir bakış açısı getirmeyi amaçlamaktadır. Havuz kaynamada, kabarcıklı kaynama bölgesinde gerçekleşen bir kaynama prosesinde eksenel mekanik karıştırıcı kullanılarak ısı transfer katsayısının artırılması hedeflenmiştir. Bunlara ek olarak, mekanik çalkalamanın kabarcık dinamiği ve ısı transfer katsayıları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

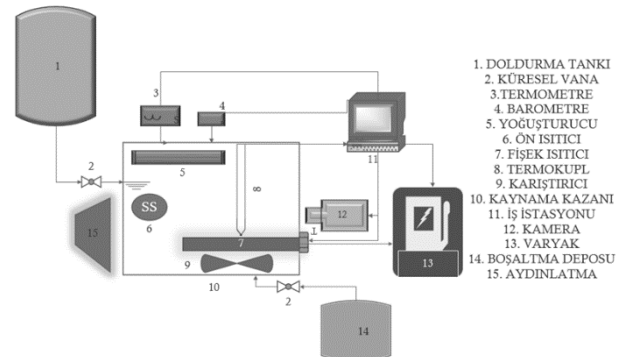
Bu çalışma, Nukiyama'nın kaynama eğrisi bölgelerinden en yüksek ısı transfer katsayılarının elde edildiği "kabarcıklı (çekirdek) havuz kaynama" bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Nukiyama, 1934). Nukiyama kaynama ısı transferi için sıcaklık farkı-ısı akışı eğrisi çizmiş ve kaynamayı dört önemli bölgeye ayırmıştır (Şekil 1) (Bergman et al., 2015). Bunlardan kabarcıklı kaynama bölgesi (A-C), düşük sıcaklık farklarında yüksek ısı transferi elde edilmesi sebebiyle en çok çalışma yapılan bölgedir (Nukiyama, 1934). Bu bölge kendi içerisinde ikiye ayrılır. A-B bölgesi, izole kabarcık bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede oluşan buhar kabarcıkları sıvının serbest yüzeyine ulaşmadan sönerler. Bu kabarcıklar enerjilerini etkileşim içerisinde buldukları çevre akışkana aktararak tekrar sıvı faza dönüşürler. B-C bölgesi ise jet sütunları bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede oluşan buhar kabarcıkları genellikle birbirlerini sıra (dizi) şeklinde takip ederek, sıvı serbest yüzeyine ulaşırlar. Bu durumda ise buhar kabarcığı sıvı serbest yüzeyine doğru ilerlerken bir miktar enerji kaybeder ve buhar kabarcığı formunda az miktar küçülme gözlenir. Bu küçülme buhar kabarcığının sıvı serbest yüzeyine ulaşmasını engelleyecek mertebede gerçekleşmez. A-C bölgesinde gerçekleşen kaynama sırasında, ısıtıcı yüzey sıcaklığının birkaç derece düşürülmesiyle çok yüksek ısı transfer katsayıları elde edilebilir (Kim, 2003; Mehrotra et al., 2012). C-D bölgesi geçiş bölgesi olarak tanımlanır ve ısıtma yüzeyi üzerinde buhar filmi tabakası ile jet sütunu oluşumu gözlemlenir. D-E bölgesi ise film kaynamayı ifade bu bölgede ısıtma yüzeyi üzeri tamamen buhar filmi tabakası ile kaplanmıştır ve bu bölgede taşınım ile ısı transferinin yanı sıra ışınım ile ısı transferinin etkisi de gözlemlenir (Kim, 2003; Mehrotra et al., 2012). Hakem değerlendirmelerinden sonra, yayın için kabul edilmiş olan makaleler, dergimizin basım formatına tam uygun olarak yazarlar tarafından hazırlanmalıdır. Makaleler

yazarların hazırladığı haliyle basıldığı için, yazarların makalelerini basım için hazır formatta hazırlarken burada belirtilen esasları titizlikle takip etmeleri çok önemlidir. Aşağıda, basıma hazır formatta makale hazırlamak için uyulması gereken esaslar detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 1. 1 atm basınçta saf suyun kaynama eğrisi (Bergman et al., 2015)

Bu çalışmada izole edilmiş kabarcık rejimi bölgesi incelenmiştir. Bu bölgenin önemi yüksek ısı akılarında, düşük sıcaklık farkları elde edilmesi ile yüksek miktarda enerji transfer edilebilirliğidir (Rashidi et al., 2020; Yagov, 2009). Bu bölgede çalışan bir uygulama, kaynama ısı transferi en yüksek verimle gerçekleştiriyor demektir. Bu rejim bölgesi, saf su için, yaklaşık $\Delta T=5^\circ\text{C}$ civarında başlar ve yaklaşık $\Delta T=10^\circ\text{C}$ civarında bitmektedir. Bu çalışmada, tüm deneyler atmosferik basınçta doyma sıcaklığında saf su kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2'de deney setinin şematik gösterimi yer almaktadır.



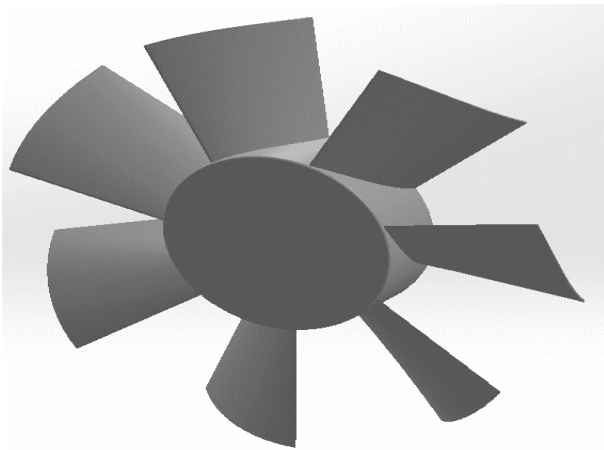
Şekil 2. Deney setinin şematik gösterimi

Deney Seti Teknik Özellikleri ve Deneyin Yapılışı

Tamamen kapalı ve dikdörtgen şeklindeki kaynama kazanı, 25 litre akışkan kapasitesine sahiptir ve temperli camdan yapılmıştır. Sistemde bir adet kondenser vardır. Bu kondenser silindirik ısıtıcının ürettiği buharı yoğunlaştırarak sisteme tekrar kazandırmakta ve sistem basıncının artmasını engellemektedir. Kazan içerisindeki sıvı sıcaklığı doyma sıcaklığında sabit tutulmaktadır. Ön

ısıtıcı, sıvıyı doyma sıcaklığında tutmak için kullanılmıştır. Her deneyde mekanik karıştırıcı devri sabit tutularak ısı akısı değiştirilmiştir. Her ısı akısı değişiminden sonra 10 dakika sistem şartlarının sabit olması beklenmiştir. Kaynama kazanına silindirik ısıtıcı tabandan 120 mm yüksekliğe yerleştirilmiştir. Silindirik ısıtıcı paslanmaz çelikten imal edilmiştir, yüzey pürüzlülüğü $Ra=1,275 \mu\text{m}$ ve ısıtıcı uzunluğu 100 mm'dir.

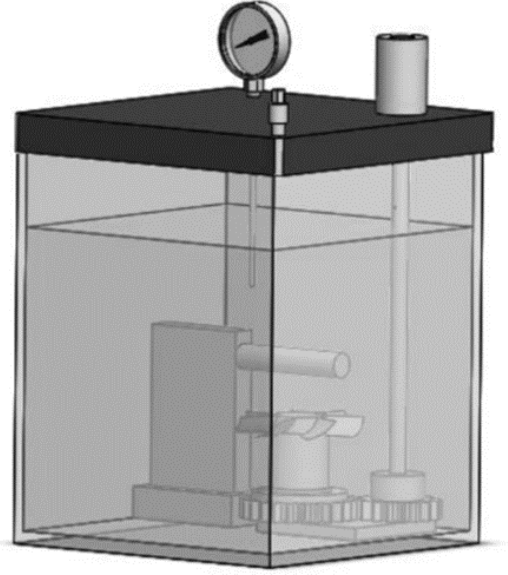
Bu çalışmada modern bilgisayarlarda kullanılan yedi kanatlı mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Bu karıştırıcılar bilgisayarlarda farklı devir hızlarında çalışarak yüksek verimlilikle soğutma işlemi gerçekleştirebilmektedir. Karıştırıcı kap tasarımlarında klasik tip karıştırıcılar oldukça kullanılsa da bu tip bir mekanik karıştırıcı literatürde ilk defa kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü çok düşük olan modern fan kanadının kaynama ısı transferine yapabileceği etki araştırılarak literatüre kazandırılmıştır. Mekanik karıştırıcı plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilmiştir ve deney sıcaklığında şekil değişimine uğramamaktadır. Şekil 3'de karıştırıcı modeli verilmiştir. Karıştırıcının dış çapı $\varnothing 100 \text{ mm}$ 'dir ve silindirik ısıtıcının altına yerleştirilmiştir. Isıtıcı ve karıştırıcı arasındaki dikey mesafe 25 mm'dir. Deneyleri görsel olarak kayıt etmek için bir adet süper ağır çekim kamerası kullanılmıştır. Isıtıcıdaki elektrik gücü varyak ile kontrol edilmiştir. Elektriksel gürültünün önlenmesi için varyak faraday kafesi ile çevrilmiştir. Ek önlem olarak varyak, 'a ana kumanda panosundan harici elektrik hattı ve topraklaması çekilmiştir. Termokupol termometreden elde edilen veriler ve varyak değerleri iş istasyonu aracılığıyla kayıt edilmiştir. Veriler usb destekli, 4-kanallı termokupl termometre ile aktarılmıştır. Varyak gücü her değiştirildikten sonra 10 dk beklenmiştir. Bu süreç içerisinde ısıtıcı yüzey sıcaklığındaki değişimin sabitlendiği gözlenmiştir. 10 dk sonunda elde edilen sıcaklık verileri usb yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Mekanik bir manometre kullanılmıştır. Deneyler atmosferik basınçta gerçekleştirilmiştir. Her deney üçer kez tekrar edilmiş ve ortalama değerler alınmıştır.



Şekil 3. Karıştırıcı modeli şematik gösterimi

Kaynama kazanının Solidworks R2019 programında oluşturulan 3 boyutlu katı modeli Şekil 4'te gösterilmiştir. Karıştırıcının dönme hareketi, iki dişli ile

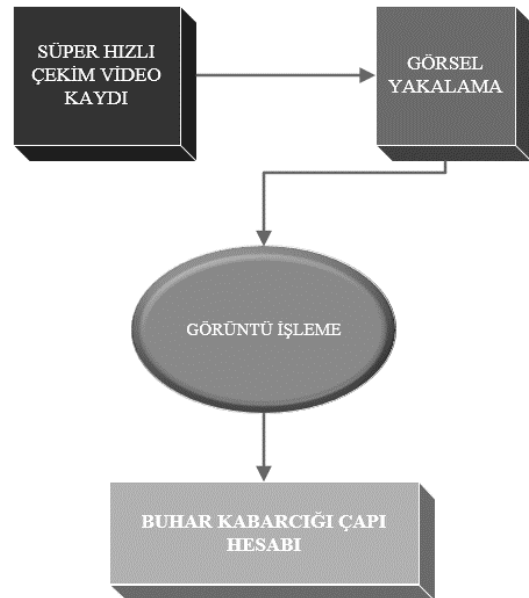
sağlanmıştır ve bu dişli 12 V'luk DC elektrik motoru ile tahrik edilmiştir. Farklı karıştırıcı devri elde etmek için, bir voltaj regülatör cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4. Kaynama kazanı 3-B modeli

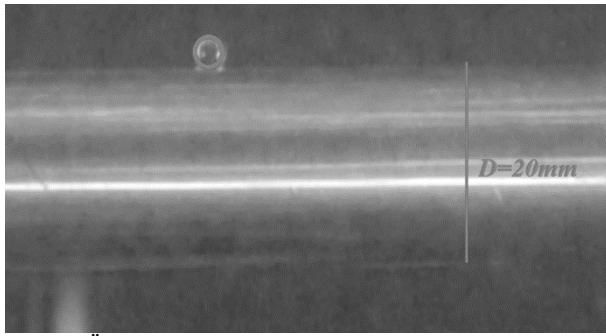
Görüntü İşleme Tekniği

Görüntü işleme tekniği çoğunlukla askeri, su altı, tıp, parmak izi analizi ve havacılık sistemi gereksinimlerinde kullanılır. Birçok araştırmacı havuz kaynama analizi için bu tekniği kullanmıştır. Lee vd. tek buhar kabarcığı hareketini ve kabarcık boyutunu belirlemek için süper hızlı çekim kamerası kullanmışlardır (Lee et al., 2003). Sarafraz vd. silindirik yüzeyde gerçekleşen havuz kaynamada saniyede maksimum 1200 kare görüntü alabilen 6 megapiksel (MP) bir kamera ile buhar kabarcığı görüntüsü almışlardır (Sarafraz et al., 2012). Bu çalışmada ise saniyede 1000 kare alabilen, 20,2 MP süper hızlı bir kamera kullanılmıştır. Alınan görüntüler 1920x1080 piksel karedir. Şekil 5'te bu çalışmada gerçekleştirilen görüntü işleme tekniği akış şeması yer almaktadır.



Şekil 5. Görüntü işleme tekniği iş akış şeması

Süper hızlı video kaydı yapıldıktan sonra ekran görüntüsü alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra MATLAB 2017’de görüntü işleme ve buhar kabarcığı çapı hesabı gerçekleştirilmiştir. MATLAB görüntü işleme ile, dairesel şekilleri yakalayabilmektedir (Alıç et al., 2018; Atherton & Kerbyson, 1999; Schuster & Katsaggelos, 2004). Şekil 6’da bu çalışmada işlenmiş bir görsel yer almaktadır. Bu çalışmada görüntü kalitesi hassasiyeti 0,85 kullanılmıştır. Bu değer MATLAB’ın ön tanımlı kullanıcı değeridir (Image Processing Toolbox User’s Guide Revised for Version 11.1 (Release 2020a), n.d.). Burada seçilen görüntü kalitesine göre yakalanan kabarcık sayısı, kalitesi ve boyutunun değişebileceği belirtilmelidir. Ayrıca program dairesel şekilleri yakalamaktadır. Yakalanacak obje daire biçiminden uzaklaştıkça yakalanamamaktadır.



Şekil 6. Örnek görüntü işleme

Şekil 7’ de buhar kabarcığı kalkış çapı görüntü işlemesi yer almaktadır. Burada, henüz yeni kopmuş yada kopmakta olan buhar kabarcıkları ortalama çapı hesap edilmiştir. Yeni oluşmakta olan veya birden fazla buhar kabarcığının koştuktan sonra birleşmesiyle dairesel formun dışına çıkmış kabarcıklar buhar kabarcığı çapı hesabına dahil edilmemiştir. Literatürde buhar kabarcığının dinamik hareketi ile ilgili birçok çalışmada buhar kabarcığı kopma çapı dairesel forma sahip buhar kabarcıklarının kopma anındaki çapı hesap edilerek gerçekleştirilmiştir. (Chen et al., 2017; Jung & Kim, 2016; Sathyabhama & Dinesh, 2017)

Teori Rehberi

Kaynama ısı transferinde, ısı transfer performansı ısı transfer katsayısı ile hesaplanır. Yerel ısı transfer katsayısı Eşitlik 1’de verilmiştir. Eşitlik 1’de T_x yerel ölçülen sıcaklığı, q'' ısı akısını T_∞ yığın akışkan sıcaklığını ve h_x yerel ısı transfer katsayısını ifade etmektedir (S. A. Alavi Fazel et al., 2011).

$$h_x = \frac{q''}{T_x - T_\infty} \quad (1)$$

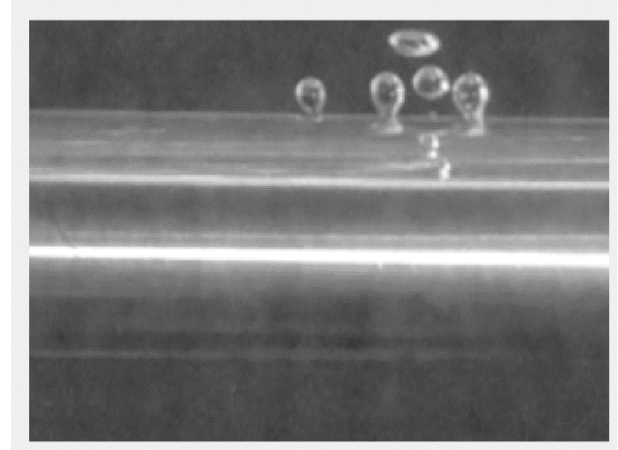
Silindirik ısıtıcılarda ortalama ısı transfer katsayısı Eşitlik 2’deki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlik 2’de T_y ortalama yüzey sıcaklığını, T_{doy} sıvı doyma sıcaklığını, q'' ısı akısını ve h_{ort} ortalama ısı transfer katsayısını ifade etmektedir.

$$h_{ort} = \frac{q''}{T_y - T_{doy}} \quad (2)$$

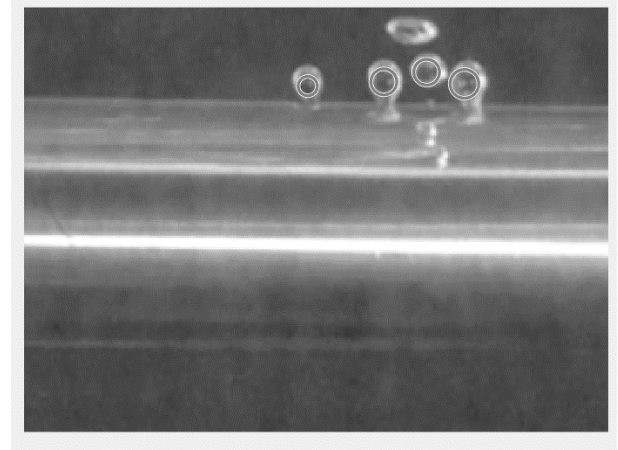
Bu çalışmada ortalama yüzey sıcaklığı Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır. Bu ifadede T_{th} termokupol sıcaklığını, s termokupolun yüzeye olan mesafesini, k ise ısıtıcının ısı iletim katsayısını ifade etmektedir. Eşitlik 4’te deneysel ısı akısı ifadesi yer almaktadır. Eşitlik (4)’te V voltu, I amperi ve A ise ısıtma yüzey alanını ifade etmektedir.

$$T_y = T_{th} - \frac{s}{k} q'' \quad (3)$$

$$q'' = \frac{V \cdot I}{A} \quad (4)$$



(a)



(b)

Şekil 7. Yüzeyden kopma aşaması, a) görüntü işleme yapılmadan önce, b) görüntü işleme yapıldıktan sonra

Hata Analizi

Eşitlik (3) ve (4)’de hesaplanan parametrelerin hata oranları, Tablo 1’de verilmiştir. Literatürde kabul görmüş kaynama ısı transferi çalışmaları ile benzer sonuçlar elde edilmiştir (Çiloglu et al., 2015). Ölçülen verilerdeki okuma hatalarını en aza indirmek için multimetre okumaları ve termokupl okumaları üçer kez tekrarlanmıştır. Isıtıcı yüzey sıcaklık ölçümü için CEM DT 8891E 4 kanallı dijital termometre kullanılmıştır. Bu termometrede K ve J tipi termokupullar ile ölçüm yapılabilmektedir. K tipi termokupl ile -50 +1350 °C arası ölçüm alınabilmektedir. Bu termometrenin çözünürlüğü 0,1 °C veya 1 °C olarak ayarlanabilmektedir. Bu termometrenin kızıl ötesi ölçüm probuda vardır. Bu çalışmada kızıl ötesi ölçüm probu kullanılmamıştır.

Termometre kullanılmadan önce kalibrasyon yapılmıştır. Deneysel veriler her ölçümden sonra termometrenin yazılımı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Sıcaklık değerlerinin ortalaması için EXCEL programı kullanılmıştır. Deneysel verilerden faydalanılarak hesaplanan ısı akısı için hata analizi, eşitlik (5) ile hesaplanmıştır. Bu ifade de U ölçülmesi gereken parametreyi T,Z,K ise bu büyüklüğe etki eden bağımsız parametreleri ifade etmektedir (Holman, 2001).

Tablo 1. Ölçülen parametrelerin belirsizliği

Ölçülen Parametre	Cihaz modeli	Belirsizlik
Voltaj	Entes EVM	±1V
Akım	Entes Epm	±0,1A
Yüzey sıcaklığı	K-tipi	0,2 °C
Yığın sıcaklığı	Pt-100	0.1 °C
Isı akısı (kW/m ²)		±3,35

$$\frac{U_q}{U} = \sqrt{\left(\frac{U_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta Z}}{\Delta Z}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta K}}{\Delta K}\right)^2} \quad (5)$$

Literatürde havuz kaynama ısı transferinde en çok kullanılan hata analiz metodu kullanılarak (Akbari et al., 2019), ısı transfer katsayısı için bağıl hata ±%3,1 ve ısı akısı için bağıl hata ±%3,35 hesap edilmiştir.

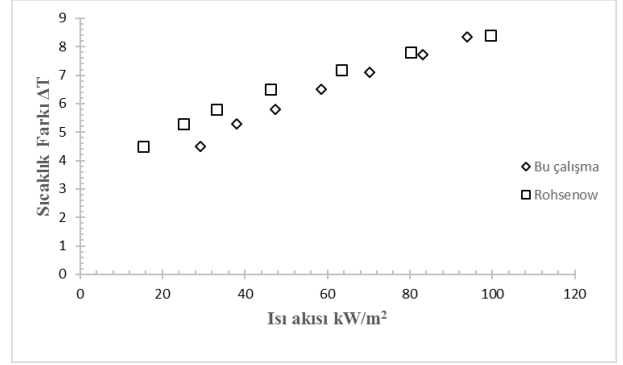
ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu çalışmada, silindirik tip ısıtıcının kullanıldığı kaynamada ısı transferine, mekanik karıştırıcının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler 9 farklı ısıtıcı gücünde (17, 23, 29,38,47,58,70,83 ve 94 kW/m²) ve 5 farklı karıştırıcı devrinde (0, 55, 139, 205 ve 212 d/d) gerçekleştirilmiştir.

Deney setinden alınan verilerin doğrulaması, literatürde yaygın olarak kullanılan Rohsenow(1951) korelasyonu ile sağlanmıştır. Rohsenow korelasyonu Eş.6'da yer almaktadır (Rohsenow, 1951).

$$q'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0,5} \left[\frac{c_{pl}(T_y - T_{doy})}{c_{sf} h_{fg} Pr^n} \right]^3 \quad (6)$$

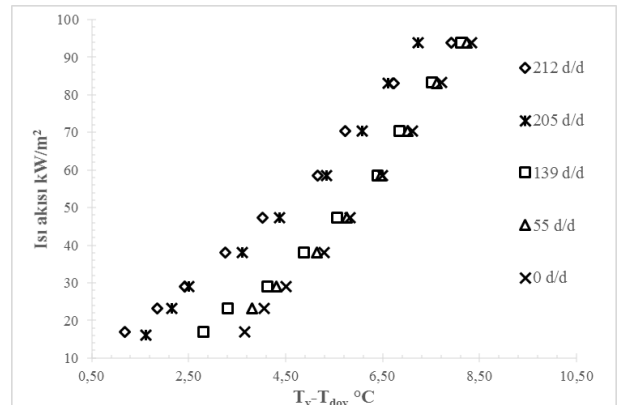
Eş.6'dan elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile Rohsenow korelasyonundan elde edilen değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Rohsenow eşitliğinin hata miktarlarının %30 ile % 100 arasında olduğu ifade edilmektedir (Cengel, 2014). Bu çalışmada yer alan Rohsenow Eş. haricinde, tüm kaynama ısı transferinde kullanılan eşitliklerinde benzer şekilde yüksek hata oranlarına sahip olduğu literatürde farklı çalışmalarda belirtilmiştir (Ahmadreza Zahedipoor & , Shahab Eslami, 2017)(S. Ali Alavi Fazel, 2017).



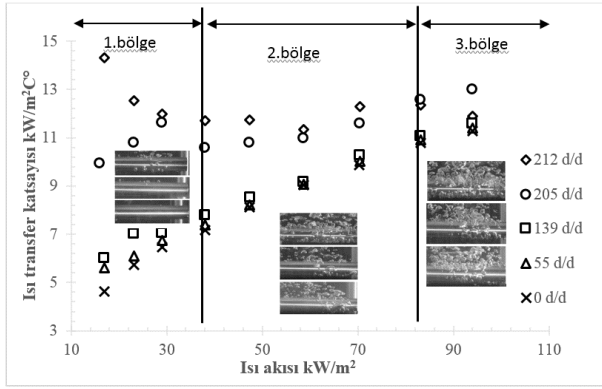
Şekil 8. 0 d/d deneysel sonuçların literatür ile karşılaştırılması

Silindirik ısıtıcı yüzey sıcaklığının ısı akısı ile değişimi Şekil 9'de gösterilmiştir. Tüm deneylerde, artan ısı akısı ile, beklendiği gibi, silindirik ısıtıcı yüzey sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Akışkanın, karıştırıcı ile hareketi olmadığında (karıştırıcı devri 0 d/d) T_y-T_{doy} değerinin maksimum olduğu, karıştırıcı devir sayısı arttıkça T_y-T_{doy} değerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak, karıştırıcı devri arttıkça ısıtma yüzeyi ile temas eden sıvı miktarı ve yüzeyin yeniden sıvı ile kaplanma hızı arttığından, ısıtma yüzeyinden taşınım ile geçen enerji miktarını artırdığı düşünülmektedir.

Karıştırıcının yüksek devir sayılarında (205 d/d ve 212 d/d), ısıtıcı yüzey sıcaklığı T_y-T_{doy}'un, Nukiyama'nın (Nukiyama, 1934) eğrisine göre (Şekil 1), doğal taşınım bölgesi sıcaklığına yaklaştığı görülmektedir. Yani 0 d/d da T_y-T_{doy}'un 6.5 °C iken 212 d/d'da T_y-T_{doy}'un 4,6 °C'ye düştüğü görülmektedir. Bu durumda kaynama olayı kabarcıklı kaynama bölgesinden doğal taşınım bölgesine geçmiştir. Kaynamanın doğal taşınım bölgesine geçmesi, yüzeyden buhar kabarcığı oluşumuna meydan verilmeden yüksek miktarda ısı transferi sağlanabildiği anlamına gelmektedir. Bu şekilde artan ısı transferi ısıtıcı yüzeyinde buhar kabarcığı oluşumuna izin vermezken, sıvı serbest yüzeyinde oluşan buhar miktarını da artırdığı gözlenmiştir.

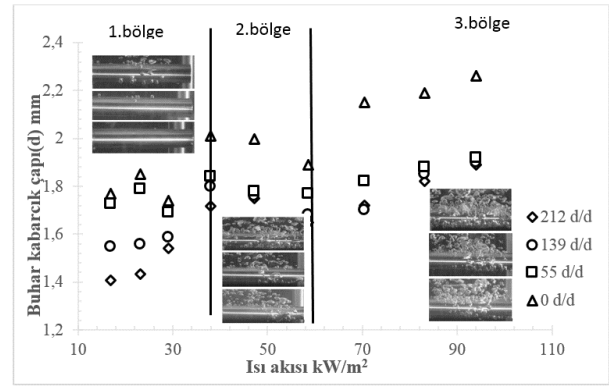


Şekil 9. Isı akısının sıcaklık farkı ile değişimi



Şekil 10. Isı transfer katsayısının ısı akısı ile değişimi

Farklı ısı akılarında ve farklı karıştırıcı devirlerinde, ısı transfer katsayısının değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10 içerisinde verilen görseller en üstten başlayarak sırasıyla 0-139-212 d/d ve sabit ısı akısında ($16\text{kW/m}^2, 58\text{kW/m}^2, 94\text{kW/m}^2$) alınan videolardan elde edilen deney görselleridir. Karıştırıcı devir sayısının artmasıyla, ısı transfer katsayısının arttığı belirlenmiştir. Düşük ısı akısının olduğu 1. bölgede, yüksek karıştırıcı devri, doğal taşınım etkisini artırmıştır. Bu etki ile maksimum karıştırıcı devrinde, düşük ısı akısında maksimum ısı transferi katsayısı elde edilmiş, ısı akısının artmasıyla ısı transfer katsayısında azalma olmuştur. Bunun sebebinin karıştırıcı devir sayısının, artan ısı akısında yeterli kadar bir karıştırma etkisi sağlayamadığı düşünülmektedir. Birinci bölgede 212 d/d'da %60 varan ısı transfer katsayısı iyileştirmesi elde edilmiştir. 2. bölgede ise ısı akısı ve karıştırıcı devri arttıkça ısı transfer katsayısı artmıştır. Bu bölgede 0 d/d'de ısıtıcı tamamen kabarcıklı kaynama bölgesindedir. Karıştırıcı etkisi ile yüksek devirlerde doğal taşınım bölgesine kayma gerçekleşmiş ve ısı transfer katsayısı artmıştır. İkinci bölgede yüksek devirlerde %30 varan ısı transfer katsayısı iyileştirmesi elde edilmiştir. 3. bölgede ise maksimum devirde ısı taşınım katsayısı bir miktar düşmüş ancak karıştırıcının hareketsiz olması durumuna göre artış olmuştur. Bu bölgede yüksek devirlerde %5 varan ısı transfer katsayısı iyileştirmesi elde edilmiştir. Isı akısının yüksek değerlere çıkması karıştırıcı etkisini nötrlemeye doğru bir yönelime sebep olmuştur. Bunun sebebinin, buhar kabarcığı oluşumundaki artışın hızlanarak türbülans oluşturduğu düşünülmektedir. İzole bölgede gerçekleşen kaynamada buhar kabarcığı ilk önce yüzeyde oluşmakta, daha sonra yüzeyden kopmakta ve sıvı serbest yüzeyine doğru harekete geçmektedir. Sıvı serbest yüzeyine hareketi esnasında buhar kabarcığı enerjisini, etkileşim içerisinde bulunduğu çevre sıvısına vermekte ve sıvı serbest yüzeyine ulaşmadan tekrar sönmektedir. Bazı araştırmacılar bu olayın çok ve hızlı bir şekilde gerçekleşmesinin sonucu olarak ısıtıcı yüzeyi civarında türbülans meydana geleceğini ifade etmektedir (Abadi & Meyer, 2018; Minocha et al., 2016; Noori Rahim Abadi et al., 2018).



Şekil 11. Buhar kabarcık çapının ısı akısı ile değişimi

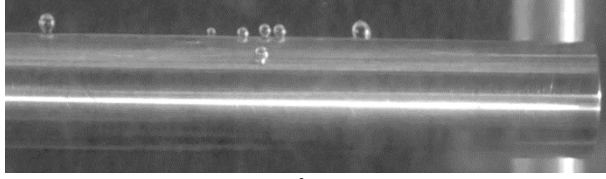
Şekil 11'de buhar kabarcık çapının ısı akısı ile değişimi gösterilmiştir. Birinci bölgede, en büyük buhar kabarcık çapının 0 d/d'da, en küçük çapın ise 212 d/d'de olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, karıştırıcı etkisi ile buhar kabarcığı oluşumunu tam olarak tamamlayamadan, ısıtıcı yüzeyinden kopmasıdır. İkinci bölgede en küçük buhar kabarcığı çapı yine en yüksek mekanik karıştırıcı devrinde (212 d/d) elde edilmiştir. Bu bölümde ısıtıcı yüzeyinin farklı bölgelerine oluşan artan sayıda buhar kabarcığı oluşumu genel olarak bir miktar buhar kabarcıklarının çapını küçültmüştür. Üçüncü bölgede ise ısıtıcı yüzeyinde artan sayıda buhar kabarcığı oluşumu ve daha homojen bir kaynama gözlenmiş, bu durumda buhar kabarcığı çapı ısı akısı ile artarken karıştırıcı etkisi ile azalmıştır. Yüksek ısı akılarında buhar kabarcığı çapında karıştırıcı devir sayısı azalan miktara etki etmiştir. Bu hususun buhar kabarcığının oluşumu-sönmesi olayı boyunca gerçekleştirdiği hareketinden kaynaklanan türbülans etkisinin olabileceği düşünülmüştür.

Buhar kabarcık çapının, ısı akısı ile arttığı ancak karıştırıcı devrinin artması ile azaldığı görülmüştür. En büyük kabarcık çapının, mekanik karıştırıcının dönmediği durumda (0 d/d) olduğu tespit edilmiştir. Literatürde farklı çalışmalarda da buhar kabarcık çapının 1-2,5 mm arasında değiştiğini ve ısı akısının artması ile arttığını ortaya koyan çalışmalar mevcuttur (Aliç et al., 2018; Bovard et al., 2017).

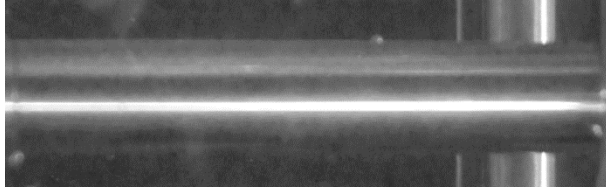
Literatürdeki bazı çalışmalar, mekanik karıştırıcının ısı transferi üzerine etkisini araştırırken, karıştırıcıyı ısıtma yüzeyi üzerine konumlandırmışlardır (Hu et al., 2020)(Babu & Prasanna Kumar, 2011). Ayrıca bu çalışmalar farklı süspansiyon karışımlar, çözeltiler ve gıda işleme proseslerinin ısı transferi üzerine etkilerini de içermektedir (Babu & Prasanna Kumar, 2011; Rajasekaran et al., 2018; Saha et al., 2020; Sarafraz et al., 2020). Literatürde, mekanik karıştırıcının yatay silindirik ısıtıcının alt yüzeyine konumlandırılarak ısı transferine etkisinin incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada mekanik karıştırıcı, ısıtıcının altına konumlandırılarak kaynama ısı transferine ne gibi etkiler yapacağı araştırılmıştır.



a) Isı akısı 16 kW/m² iken karıştırıcı devri 0 d/d



b) Isı akısı 16 kW/m² iken karıştırıcı devri 139 d/d



c) Isı akısı 16 kW/m² iken karıştırıcı devri 212 d/d

Şekil 12. Isıtıcı yüzeyinde kabarcık yoğunluğu ile karıştırıcı devir hızı arasındaki ilişki

Şekil 12’ de sabit ısı akısında farklı karıştırıcı devrinde buhar kabarcığı oluşumu ve yoğunluğu yer almaktadır. 0 d/d karıştırıcı devrinde ve 16 kW/m² ısı akısında (Şekil 12-a) silindirik ısıtıcı etrafında sayıca diğerlerinde fazla miktarda buhar kabarcığı oluştuğu görülmektedir. 139 d/d karıştırıcı devrinde (Şekil 12-b) silindirik ısıtıcı etrafında daha az sayıda buhar kabarcığı oluşumu gözlenmektedir. 212 d/d karıştırıcı devrinde (Şekil 12-c) silindirik ısıtıcı etrafında nadiren buhar kabarcığı oluşumu görülmektedir. Karıştırıcı etkisi ile ısıtıcı civarında oluşan akış hareketinin ısı transfer hızını artırdığını ve akışkanın faz değişimine maruz kalmaksızın ısı transferini gerçekleştirebildiği görülmektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, ısıtma yüzeyinin altına konumlandırılan yedi kanatlı mekanik karıştırıcının kaynama ısı transferine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Mekanik karıştırıcının devir sayısı arttıkça ısı transfer katsayısı artmıştır. En yüksek devirde kabarcıklı kaynama bölgesinde %30 lara varan ve mekanik karıştırıcının etkisiyle doğal taşınım bölgesine geçmiş kaynamada %190 lara varan oranlarda ısı transfer katsayısı iyileştirmeleri elde edilmiştir.
2. Isıtıcı yüzey sıcaklığı ile sıvı doyma sıcaklığı arasındaki fark, doğal taşınım bölgesi sıcaklığına yaklaştıkça azalmıştır ve ısı transferinin daha da arttığı belirlenmiştir.
3. Buhar kabarcık çapının ısı akısının artmasıyla büyüdüğü, devir sayısının artmasıyla da küçüldüğü belirlenmiştir.

4. Yüksek devir sayılarında çalışan karıştırıcının düşük ısı akısı bölgesinde buhar kabarcığı oluşumunu en aza indirdiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Abadi, S. M. A. N. R., & Meyer, J. P. (2018). Numerical investigation into the inclination effect on conjugate pool boiling and the condensation of steam in a passive heat removal system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122, 1366–1382.

Ahmadreza Zahedipoor, M. F., & , Shahab Eslami, A. M. (2017). 10.22104/JPST.2017.2098.1076. 3, 63–69. <https://doi.org/10.22104/JPST.2017.2098.1076>

Akbari, A., Mohammadian, E., Alavi Fazel, S. A., Shanbedi, M., Bahreini, M., Heidari, M., Babakhani Dehkordi, P., & Che Mohamed Hussein, S. N. (2019). Natural Convection from the Outside Surface of an Inclined Cylinder in Pure Liquids at Low Flux. *ACS Omega*, 4(4), 7038–7046. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00176>

Alavi Fazel, S. A., Arabi Shamsabadi, A., Sarafraz, M. M., & Peyghambarzadeh, S. M. (2011). Artificial boiling heat transfer in the free convection to carbonic acid solution. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(4), 645–652. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.12.014>

Alavi Fazel, S. Ali. (2017). A genetic algorithm-based optimization model for pool boiling heat transfer on horizontal rod heaters at isolated bubble regime. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(9), 2731–2744. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2013-8>

Alıç, E., Kaska, Ö., & Tokgöz, N. (2018). Measuring the formation of the bubble occurring in pool boiling with an image processing technique. 521–529.

Atherton, T. J., & Kerbyson, D. J. (1999). Size invariant circle detection. *Image and Vision Computing*, 17(11), 795–803. [https://doi.org/10.1016/s0262-8856\(98\)00160-7](https://doi.org/10.1016/s0262-8856(98)00160-7)

Babu, K., & Prasanna Kumar, T. S. (2011). Effect of CNT concentration and agitation on surface heat flux during quenching in CNT nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1–3), 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.10.003>

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2015). *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2011. In ISBN (Vol. 13, pp. 470–978). John Wiley & Sons.

Bovard, S., Asadina, H., Hosseini, G., & Alavi Fazel, S. A. (2017). Investigation and experimental analysis of the bubble departure diameter in pure liquids on horizontal cylindrical heater. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(4), 1199–1210. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1885-3>

- Cengel, Y. (2014). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- Chen, H., Chen, G., Zou, X., Yao, Y., & Gong, M. (2017). Experimental investigations on bubble departure diameter and frequency of methane saturated nucleate pool boiling at four different pressures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, 662–675. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.031>
- Çiloglu, D., Bölükbaşı, A., & Çifci, H. (2015). Experimental investigation of pool boiling heat transfer in nanofluids around spherical surfaces. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(3), 405–415.
- Das, P., Khan, M. M. K., Rasul, M. G., Wu, J., & Youn, I. (2018). Experimental investigation of hydrodynamic and heat transfer effects on scaling in an agitated tank. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 128(April), 245–256. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.04.019>
- Dikici, B., Eno, E., & Compere, M. (2014). Pool boiling enhancement with environmentally friendly surfactant additives. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 116(3), 1387–1394. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3634-x>
- Durmaz, U., & Ozdemir, M. (2012). An experimental investigation on heat transfer for different parameters in centripetally located boiling agitation vessels. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(2), 99–105. <https://doi.org/10.5505/saufbe.2012.04127>
- Esonye, C. (2019). The Development of Standard Agitator Conditions for Effective Performance of a Batch Crutcher in the Frame of Semi-Boiled Process. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 17(9), 1–12. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2018-0248>
- Gates, L. E., Morton, J., & Pl, F. (1976). Selecting agitator systems to suspend solids in liquids.
- Gheitaghy, A. M., Samimi, A., & Saffari, H. (2017). Surface structuring with inclined minichannels for pool boiling improvement. *Applied Thermal Engineering*, 126, 892–902. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.200>
- Guan, C. K., Klausner, J. F., & Mei, R. (2011). A new mechanistic model for pool boiling CHF on horizontal surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17–18), 3960–3969. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.029>
- Holman, J. P. (2001). *Experimental methods for engineers*.
- Hu, Y., Wang, H., Song, M., Huang, J., Babu, K., Prasanna Kumar, T. S., Rahimian, A., Kazeminejad, H., Khalafi, H., Mirvakili, S. M., & Akhavan, A. (2020). An Experimental Study of the Steel Cylinder Quenching in Water-based Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134(1–3), 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.10.003>
- Image Processing Toolbox User's Guide Revised for Version 11.1 (Release 2020a). (n.d.). The MathWorks, Inc.
- Jm, S., & An, K. (1993). Impeller Power Demand in Mechanically Agitated Boiling Systems. *Chemical Engineering Research & Design*, 71(2), 145–152. <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=51438>
- Jung, S., & Kim, H. (2016). Effects of surface orientation on nucleate boiling heat transfer in a pool of water under atmospheric pressure. *Nuclear Engineering and Design*, 305, 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.06.013>
- Kamel, M. S., & Lezsovits, F. (2020). Enhancement of pool boiling heat transfer performance using dilute cerium oxide/water nanofluid: An experimental investigation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 114(April), 104587. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104587>
- Kamel, M. S., Lezsovits, F., Hussein, A. M., Mahian, O., & Wongwises, S. (2018). Latest developments in boiling critical heat flux using nanofluids: A concise review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 98(September), 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.08.009>
- Kim, J. (2003). Heater Size and Gravity Effects on Pool Boiling Heat Transfer. *AIP Conference Proceedings*, 654(2003), 132–141. <https://doi.org/10.1063/1.1541287>
- Kumar, N., Raza, M. Q., & Raj, R. (2018). Surfactant aided bubble departure during pool boiling. *International Journal of Thermal Sciences*, 131(April), 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.025>
- Lee, H. C., Oh, B. Do, Bae, S. W., & Kim, M. H. (2003). Single bubble growth in saturated pool boiling on a constant wall temperature surface. *International Journal of Multiphase Flow*, 29(12), 1857–1874. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.09.003>
- Mehrotra, A. K., Nassar, N. N., & Kasumu, A. S. (2012). A novel laboratory experiment for demonstrating boiling heat transfer. *Education for Chemical Engineers*, 7(4), e210–e218. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2012.09.003>
- Minocha, N., Joshi, J. B., Nayak, A. K., & Vijayan, P. K. (2016). 3D CFD simulation of passive decay heat removal system under boiling conditions: Role of bubble sliding motion on inclined heated tubes. *Chemical Engineering Science*, 145, 245–265. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.015>

- Noori Rahim Abadi, S. M. A., Ahmadpour, A., & Meyer, J. P. (2018). Numerical simulation of pool boiling on smooth, vertically aligned tandem tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 132(March), 628–644. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.005>
- Nukiyama, S. (1934). Maximum and minimum values of heat q transmitted from metal to water under atmospheric pressure.[J]. *Soc. Mech. Eng. Jpn. L934* (37), 354(367), 2.
- Ozdemir, M., & Durmaz, U. (2015). An approach to obtain the heat transfer coefficient of aqueous sucrose solutions in agitated boiling vessels. *Thermal Science*, 19(3), 1025–1036. <https://doi.org/10.2298/TSCI130111143O>
- Price, D. C. (1966). The effect of surface vibration on nucleate pool boiling at low heat fluxes. In *Doctoral Thesis* (pp. 68–77).
- Rajasekaran, E., Kumar, B., Muruganandhan, R., Raman, S. V., & Antony, U. (2018). Determination of forced convection heat transfer coefficients and development of empirical correlations for milk in vessel with mechanical agitators. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2514–2522. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3169-z>
- Rashidi, S., Hormozi, F., & Sarafraz, M. M. (2020). Fundamental and subphenomena of boiling heat transfer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, February. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09468-3>
- Rohsenow, W. M. (1951). A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids. Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooperation,[1951].
- Saha, S. K., Ranjan, H., Emani, M. S., & Bharti, A. K. (2020). Two-Phase Heat Transfer Enhancement. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20755-7>
- Sarafraz, M. M., Peyghambarzadeh, S. M., & Alavifazel, S. A. (2012). Enhancement of nucleate pool boiling heat transfer to dilute binary mixtures using endothermic chemical reactions around the smoothed horizontal cylinder. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 48(10), 1755–1765. <https://doi.org/10.1007/s00231-012-1019-5>
- Sarafraz, M. M., Pourmehran, O., Yang, B., Arjomandi, M., & Ellahi, R. (2020). Pool boiling heat transfer characteristics of iron oxide nano-suspension under constant magnetic field. *International Journal of Thermal Sciences*, 147(October 2019), 106131. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106131>
- Sathyabhama, A., & Dinesh, A. (2017). Augmentation of heat transfer coefficient in pool boiling using compound enhancement techniques. *Applied Thermal Engineering*, 119, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.029>
- Schuster, G. M., & Katsaggelos, A. K. (2004). Robust circle detection using a weighted MSB estimator. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*, 3, 2111–2114. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2004.1421502>
- Smith, J. M., Gao, Z., & Middleton, J. C. (2001). The unsparged power demand of modern gas dispersing impeller in boiling liquids. *Chemical Engineering Journal*, 84(1), 15–21. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(00\)00267-9](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(00)00267-9)
- Suriyawong, A., Saisorn, S., & Wongwises, S. (2017). Pool boiling heat transfer enhancement of distilled water with passive rotating blades installed above the heating surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 87, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.04.025>
- Takahashi, T., Tagawa, A., Atsumi, N., Dohi, N., & Kawase, Y. (2006). Liquid-phase mixing time in boiling stirred tank reactors with large cross-section impellers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(4), 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.06.012>
- Yagov, V. V. (2009). Nucleate boiling heat transfer: Possibilities and limitations of theoretical analysis. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 45(7), 881–892. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0253-8>