

YÜZEN BÖLGE KONFIGÜRASYONUNDA KARARLI MARANGONİ KONVEKSİYONDAN OSİLASYONLU MARANGONİ KONVEKSİYONA GEÇİŞİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Adnan SAĞLAM, Nuri ÖZEK ve Ramazan SELVER*

Fizik Böl., Fen-Edebiyat Fak., Süleyman Demirel Üniv., Isparta nozek@sdu.edu.tr

* Mak. Müh. Böl, Müh.-Mim. Fak., Süleyman Demirel Üniv., Isparta rxs38@cwru.edu

ÖZET

Bu çalışmada, yüzen bölge konfigürasyonunda yukarıdan ısıtılarak yüksek Prandtl sayısına sahip bir akışkan kolonundaki yüzey gerilimli akış deneysel olarak araştırılmıştır. Deney akışkanı iki küçük dairesel bakır çubuk arasına dikey vaziyette asılmış olup, bu bakır çubuklara farklı sıcaklıklar uygulanmıştır. Bu çalışmada 3 mm çapında bakır çubuklar kullanılmıştır. Deney akışkanı olarak kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanılarak belirli şartlar altında akış ve sıcaklık osilasyonları gözlenmiştir. Farklı şartlar için kritik sıcaklık farkı ölçülmüş ve akış şekilleri mikroskop sistemi sayesinde gözlenmiştir. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının osilasyonların başlama noktasına olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada farklı duvar sıcaklıklarında ve farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farkı değerleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey gerilimli akış, kararlı Marangoni konveksiyon, osilasyonlu Marangoni konveksiyon.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSITION FROM STEADY TO OSCILLATORY MARANGONI CONVECTION IN A FLOATING ZONE CONFIGURATION

ABSTRACT

In this study, thermocapillary flow was investigated experimentally in liquid bridges of high Prandtl number fluids in floating-zone configuration by heating from above (opposite direction of thermocapillary and buoyant forces). Test fluid was suspended vertically between two small circular rods which are maintained at different temperatures. We used 3 mm diameter rods in the present experiment. Flow and temperature oscillations were observed under various conditions using 5 cSt silicone oil as the test fluid. The critical temperature differences were measured for various conditions and flow patterns were observed by a microscope system. The effect of heat transfer from the liquid free surface to surrounding air on the onset of the oscillations was investigated. The values of the critical temperature differences measured at various aspect ratios and various cold wall temperatures were investigated in the present experiment.

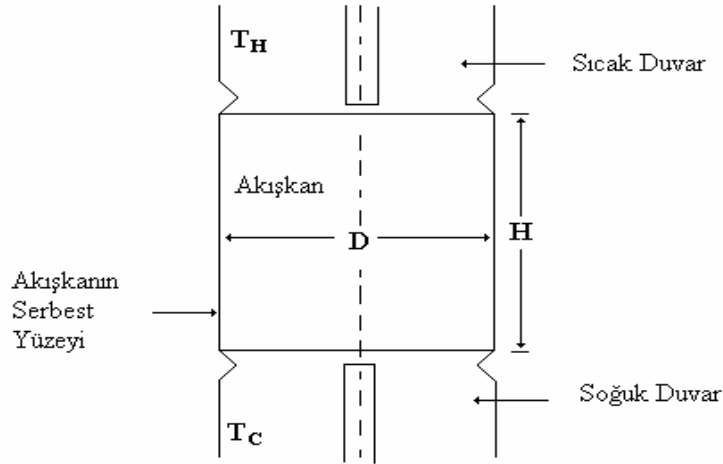
Keywords: Thermocapillary flow, Marangoni convection, oscillatory convection.

1. GİRİŞ

Son yıllarda yarı iletken malzemelerin temeli olan kristallerin kalitesinin artırılması için ileri teknolojiler sunulmaya başlanmış ve bu ileri teknolojiler için de bir çok teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en önemlisi yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonudur. Bu konfigürasyon Şekil 1'de gösterilmektedir. Konfigürasyonda silindirik iki çubuk arasına asılan akışkanın (silindirik konum almış akışkanın) yüzey

gerilim hareketinin sebep olduğu değişik parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerden birincisi; silindirik çubukların arasında asılı konumdaki silindirik akışkanın dikey vaziyetteki uzunluğu, ikincisi ise; soğutucu duvarın sıcaklık değeridir.

Değişik şartlar altında silindirik konumdaki deney akışkanı sıcaklık farkından dolayı yüzey geriliminin etkisi ile başlangıçta meydana gelen kararlı akış



Şekil 1. Yüzen bölge konfigürasyonunun deney bölgesi

durumundan periyodik osilasyonlu akış durumuna gelecektir.

Akışkandaki yüzey gerilim hareketi sıcaklığın fonksiyonudur. Sıcaklık gradyeni yüzey gerilim gradyenlerini meydana getirir. Bu yüzey gerilim gradyenleri akışkan-hava arakesiti boyunca akışkana hareket verir.

Teorik, analitik ve deneysel çalışmalarda, yüzey gerilimli akış olarak adlandırılan bu önemli hareket, özellikle akışkanın sıcaklık farkının artırılması ile meydana geldiği görülmektedir. Akışkanın fiziksel özelliklerinden biri olan viskozite, sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık arttıkça viskozite değeri azalmaktadır. Akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca oluşan sıcaklık gradyeni yerel olarak değişmesi akışkanın viskozite gradyeninin de yerel olarak değişmesine sebep olacaktır. Akışkanın viskozite gradyeninin yerel olarak değişmesi ile akışkanın yüzey gerilim kuvveti de yerel olarak değişecektir. Böylece akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen akış hareketi, ortak yüzeyi tamamladıktan sonra hacimsel akış türüne geçerek akışkanın sürekliliği sağlanmış olacaktır.

Yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu ile ilgili deneysel çalışmalar değişik tarihlerde bir çok araştırmacı tarafından da yapılmıştır. İlk olarak, değişik şartlar altında yüzey gerilimi sayesinde akışkan hareketini geniş olarak Ostrach S. [1] tarafından incelenmiştir. Schwabe D., ve arkadaşları [2] yeryüzü şartlarında (yerçekimi ivmesinin 1g olduğu konumda) yüzen bölge konfigürasyonunda yüzey gerilim hareketi yapan akışkan üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmacılar deney akışkanı olarak NaNO_3 kullanmışlardır. Akışkan ile temas halinde bulunan sıcak duvarın yüzey sıcaklığı ile soğuk duvarın yüzey sıcaklığı arasındaki fark belirli bir değeri geçtikten sonra, akışkanın kararlı akış türünden periyodik osilasyonlu akış türüne geçtiğini gözlemişlerdir. Akışkanın kararlı

akış türünden periyodik osilasyonlu akış türüne tam olarak geçtiği noktadaki sıcaklık farkı ise kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) olarak tanımlanır. Ayrıca, Chun ve West [3], yeryüzü şartlarında (1g) kristal büyütme işlemlerinde yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu kullanılarak elde edilen kritik sıcaklık farkı değerlerini (ΔT_{kr}), akışkanın akış türünün kararlı konveksiyon durumundan periyodik osilasyonlu konveksiyon durumuna geçişini hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir.

Bir çok araştırmacı kaliteli kristal üretiminde periyodik veya periyodik olmayan osilasyonun olumsuz etkileri üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu araştırmacılar, periyodik osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değerini tespit ederek, akışkanın fiziksel özelliklerini içeren boyutsuz kritik Marangoni sayısını (Ma_{kr}) elde etmişlerdir. Boyutsuz sayıdan dolayı bu tür konveksiyon, Marangoni konveksiyon olarak adlandırılır. Yine bu araştırmacılar; yüksek Prandtl sayısına ($Pr > 1$) sahip akışkanları kullanarak, kritik Marangoni sayısı (Ma_{kr}) değerinin 1×10^4 mertebesinde olduğunu tespit etmişlerdir. Napolitano, L. G., Monti, R. ve Russo, G. [4], yüzen bölge konfigürasyonunun düşük yerçekimi ivmesinin olduğu uzay laboratuvarında yaptıkları bir deneyde, kritik Marangoni sayısının (Ma_{kr}) 4×10^5 mertebesinde elde edilmesine rağmen periyodik osilasyona rastlamamışlardır.

Son zamanlarda bazı araştırmacılar, Marangoni konveksiyonda, kritik Marangoni sayısı (Ma_{kr}) üzerine etki eden faktörleri yoğun bir şekilde incelemeye başlamışlardır. Bu yoğun incelemelerden birisi de araştırmacıların önceki yıllarda yapmış olduğu çalışmalardır. Bu çalışmalar yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanlar (kinematik viskozitesi 2 cSt silikon yağı) için yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu kullanılarak, silindirik konumdaki silikon yağının serbest yüzeyinden ortama geçen ısı kaybı üzerine yapılan deneysel çalışmalardır. Yapılan deneysel çalışmalarda, ortam sıcaklığının normal

şartlardakinden yüksek olduğu değerler için ısı kaybı etkileri araştırılmıştır [5-6].

Bu deneysel çalışmada ise, yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu kullanılarak farklı soğuk duvar sıcaklık değerlerinde ve akışkanın farklı yükseklik değerlerinde ki kararlı Marangoni konveksiyondan, periyodik osilasyonlu konveksiyona geçtiği kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değerleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda; deneylerin yapıldığı ortam sıcaklıkları $+23^{\circ}\text{C}$ 'de akışkanın serbest yüzeyinden ortama geçen ısı kaybı etkisi ile kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değerleri incelenmiştir. Silindirik akışkanın çapı sabit ve 3 mm olarak seçilmiştir. Buna göre; akışkanın düşey durumdaki yüksekliğinin akışkan çapına oranı boyutsal oran (Aspect ratio) olarak tanımlanmıştır. Boyutsal oran, $Ar=H/D$ dir. Burada Ar: Boyutsal oran, H: Akışkanın dikey yüksekliği, D: Akışkan çapıdır. Deneylerimizde yerçekimi faktörünün deney sonuçlarına etkisini azaltmak için boyutsal oran ($0.5 \leq Ar \leq 0.9$) olarak seçilmiştir.

2. DENEY APARATLARI VE PROSEDÜRÜ

Yüzen bölge konfigürasyonunda kullanılan deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir. Yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak, sıcak bölgenin üstte, soğuk bölgenin altta olması durumuna göre araştırmalar yapılmıştır.

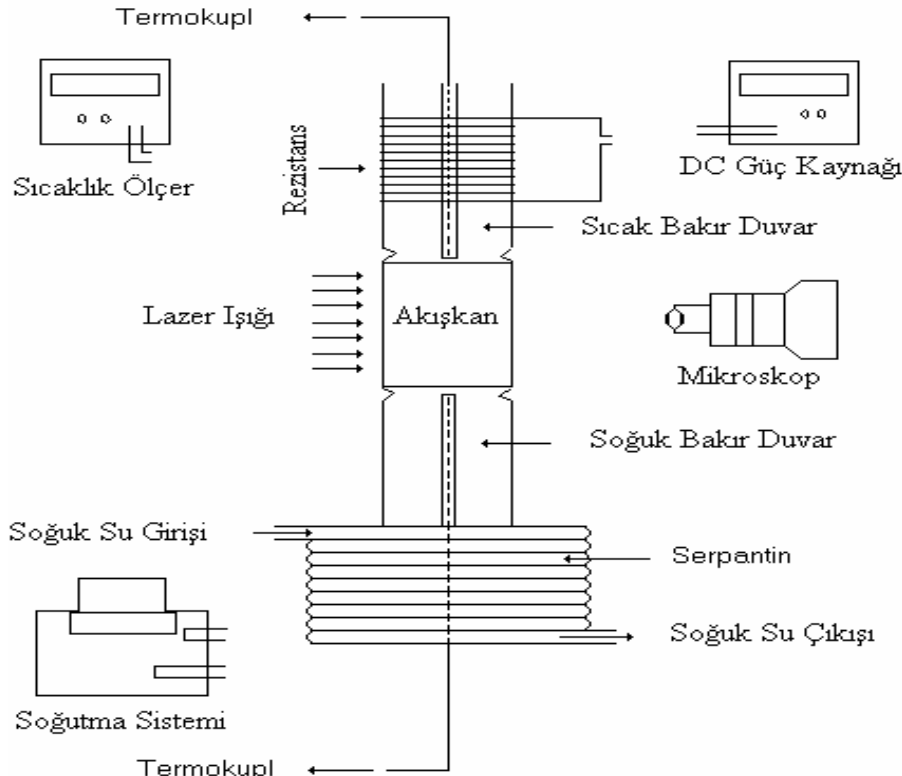
Deney düzeneği; deney akışkanı, deney bölgesi, ısıtma sistemi, soğutma sistemi, termokupllar, sıcaklık ölçer cihazı, akış görüntüleme sistemi ve akışkanın

yüksekliğini hassas olarak ayarlayan deney aparatından oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarda "Dow Corning" firması tarafından ticari olarak alınan, 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı (polydimethylsiloxane polimer) kullanılmıştır. Tablo 1'de silikon yağının 25°C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri verilmiştir. Kullanılan deney akışkanının Prandtl sayısı, $Pr=72$ 'dir.

Deney bölgesi Şekil 1'de gösterildiği gibi olup, deney bölgesinde kullanılan ısıtıcı ve soğutucu duvarlar saf bakırdan yapılmıştır. Silindirik duvarların bakır olarak seçilmesi bakırın yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayıdır. Bu bakır duvarlar, akışkanın yüzey gerilim hareketinin homojen olarak gerçekleşmesinde önemli rol oynamaktadır. Deneylerde kullanılan silindirik bakır duvarların çapı 3 mm olarak seçilmiştir. Silindirik bakır duvarların her birinin tam merkezinden akışkan yüzeyine derinliği 0.5 mm kalacak şekilde termokupllar yerleştirilmek için 1 mm çapında kanallar açılmıştır. Duvarlar üzerindeki çentikler ise ısıtma yüzeyinin azaltılması için yapılmıştır.

Deney düzeneğinde ısıtma sistemi olarak, 0.5 mm çapında krom-nikel telden imal edilen rezistans kullanılmıştır. Akışkanla temas halindeki bakır silindirik duvarın yüzeyine sıkı bir şekilde sarılmış olup (Şekil 2), bu rezistans akışkan yüzeyinden 5 mm daha yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Rezistansın uçları "Phillip Harris" firması tarafından



Şekil 2. Yüzen bölge konfigürasyonu deney düzeneği

Tablo 1. 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25°C'deki fiziksel özellikleri [5]

Semboller	Birimler	Değerler
Yoğunluk (ρ)	[gr/cm ³]	0.913
Dinamik viskozite (μ)	[gr/cm s]	0.0488
Kinematik viskozite(ν)	[cm ² /s]	0.05345
Termal kondüksiyon katsayısı (k)	[W/cm K]	0.00116
Termal difüzyon katsayısı (α)	[cm ² /s]	7.42x10 ⁻⁴
Yüzey gerilim sıcaklık katsayısı $ \sigma_T $, $ \frac{\partial\sigma}{\partial T} $	[dyn/cm/K]	-0.059
Prandtl sayısı (Pr)	Birimsiz	72
Akışkanın kinematik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi, $\nu = 8.185 - 0.2T + 3.74 \times 10^{-3} T^2 - 4.865 \times 10^{-5} T^3 + 3.47 \times 10^{-7} T^4 - 9.76 \times 10^{-10} T^5$ şeklindedir. Sıcaklıkların birimi (°C) dir.		

üretilen AC-DC akımı veren 0-25 volt arasında çalışan güç kaynağına bağlanmıştır. Akışkan ile temas halinde bulunan ısıtılmış bakır iyi bir iletken olduğu için akışkanın temas yüzeyini homojen bir şekilde ısıtmaktadır.

Akışkan yüzeyinin alt bölgesine, akışkanla temas halinde ve yine bakırdan yapılmış 3 mm çapındaki duvara soğutma özelliği verecek şekilde uyarlanmış akışkan deney bölgesi oluşturulmuştur. Soğutucu duvarın sıcaklığını sabit tutmak için duvar üzerine sıkı bir şekilde serpantin sarılmıştır. Soğutucu bakır duvarın soğutulması, 0-300°C aralığında soğutma ve ısıtma yapabilen, "Heto HMT 200" model 0.1°C hassasiyetli su sirkülasyon cihazı ile sağlanmıştır.

Isıtıcı ve soğutucu bakır duvar sıcaklıklarının ölçülmesi için, bu silindirik duvarların merkezinde açılmış bulunan kanallara 0.25 mm çapında 0.015°C hassasiyete sahip Copper-Constantan T tipi izoleli termokupllar yerleştirilmiştir. Kanallara yerleştirilen termokuplların çevresindeki boşluklar "Omega" firması tarafından üretilen yüksek ısı iletim katsayısına sahip bir macun ile doldurulmuştur. Soğutucu duvar ile ısıtıcı duvar arasındaki sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerleri arasındaki hassasiyeti, akışkanın yüzey gerilim hareketinin başlayıp periyodik osilasyonlu hale geçinceye kadarki hassasiyeti belirler.

Bu termokuplun diğer uçları "Omega" firması tarafından üretilen ve 0.1°C hassasiyette olan "DP26-TC-230" modele sahip sıcaklık ölççere bağlanmıştır. Bu cihaz iki kanallı olup, kanallar arasındaki sıcaklık farkını veren özelliğinden dolayı, deney anında gerekli olan ve ihtiyaç duyulan ısıtıcı ve soğutucu duvarlar arasındaki sıcaklık farkının anlık hassasiyetini verir.

Isıtıcı ve soğutucu duvarlar arasına asılan akışkanın saydam bir akışkan olmasından dolayı, akışkan partikülünün hareketinin izlenebilmesi için akışkana 3 mikron çapında Al₂O₃ partikülleri eser miktarda ilave edilmiştir. Silindirik konumdaki akışkanın deney anında homojen bir yapıya sahip olmasından dolayı, üç boyutlu akışkan hareketi meydana gelir. Bu

boyutlardan birisinde akışkan partikülünün hareketi, simetriden dolayı akışkanın her bölgesinde ve her açısında sabit kalmaktadır. Silindirik saydam akışkana, akışkanın merkezinden dikey geçecek şekilde ve dalga boyu 630-670 nm olan kırmızı lazer ışığı uygulanmıştır. Lazer perdesi üzerindeki akış hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi için, perdeye dik olacak şekilde "Western Electric" firması tarafından üretilen ve büyütme oranı 26 olan mikroskop yerleştirilmiştir. Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki 3 mikron çapındaki Al₂O₃ partiküllerinin izleri takip edilerek akışkanın akış hareketinin kararlı Marangoni konveksiyon hareketinden birden bire periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyon hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanır.

Deneyel çalışmalarda önemli olan parametrelerden biri de akışkanın boyutsal oranı olduğu daha önce ifade edilmişti. Boyutsal oran, akışkan yüksekliğinin akışkan çapına oranı olup, akışkanın akış karakterinin değişim noktasını etkilemektedir. Deneyel çalışmalar sırasında, değişik boyutsal oranlar için akışkanın çapının sabit tutulması yüksekliğinin değişimi ile önem kazanmaktadır. Deneyel çalışmalar esnasında, akışkan yüksekliğinin hassas olarak ölçülmesi bu çalışmanın hassasiyetini belirlemektedir. Deney akışkanının yüksekliğini deney aparatı vermektedir. Bu aparatın dikey yüksekliği belirlenirken, 0.01 mm hassasiyete sahip komparatör ile kalibrasyon yapılmıştır.

Deneyel çalışmalar titreşimsiz ve homojen sıcaklığa sahip bir deney odasında gerçekleştirilmiş olup deney odası sıcaklığı +23°C'dir.

Yukarıda bahsedildiği gibi sıcak duvarın üstte soğuk duvarın altta olması halinde, deney aparatları kendi hassasiyetleri ölçüsünde güç kaynağı, (soğutucu duvarın sıcaklığını sabit tutan) soğutucu su sirkülasyon cihazı, lazer, sıcaklık ölççer cihazı teker teker açılır. Bunlardan sabit sıcaklıktaki soğutucu sirkülasyon cihazı istenilen T_C=+10°C sıcaklığa ayarlanır ve T_C sıcaklığının kararlı duruma geçmesi için beklenir. İlk olarak; deney bölgesindeki akışkan yüksekliği akışkanın boyutsal oranına bağlı kalınarak

($Ar = H/D = 0.5$ için) 1.5 mm ye göre komparatör ile ayarlanır. Boyutsal oran ayarlandıktan sonra, akışkan kirliliği açısından ısıtıcı ve soğutucu duvar yüzeyleri etilalkol ile temizlenir. Silindirik bakır duvarlar üzerindeki etilalkol kuruduktan sonra bir hava kompresörü ile tekrar temizlenir. Silindirik bakır duvarlar arasına asılan akışkanın yerçekiminden ve akışkanın ıslaklığından dolayı, alt bakır duvar üzerindeki akışkan kayarak hacimsel olarak eksilirken, bazen de silindirik bakır duvarlar arasına asılan akışkan kayarak tamamen yok olmaktadır. Bunu önlemek amacı ile; soğutucu bakır duvarın radyal yüzeyine pamuklu kür ile “Scotch-Gard” sıvı malzemesi sürülür. Sürülen malzeme kuruduktan sonra deney bölgesi hava kompresörü ile bir defa daha temizlenir. Akışkan, camdan yapılmış temiz bir enjektör ile yukarıda bahsedilen silindirik bakır duvarlar arasına yerleştirilir. Akışkanın akış hareketinin rahat bir şekilde izlenebilmesi için, eser miktarda Al_2O_3 partikülleri iğne ucu ile akışkana ilave edilir. Akışkanın merkezinden geçecek şekilde lazer perdesi oluşturulur ve daha sonra mikroskop akışkan perdesine odaklanır. Güç kaynağı kullanılarak akışkan ile temas halindeki sıcak duvarın sıcaklığı (T_H) kademeli olarak artırılır. Periyodik osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı ise sıcaklık ölçer cihazından ölçülür. Deneyler aynı şartlarda üçer defa tekrarlanarak ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, deneydeki akışkanın periyodik osilasyona başlama noktaları elde edilmiştir. Akışkan hareketinde, kritik sıcaklık farkının altındaki değerlerde kararlı konveksiyon, üstündeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu konveksiyon gözlenmiştir. Hazırlanan deney aparatları sayesinde, değişik şartlarda kararlı haldeki yüzey gerilim hareketleri ile başlayan akışkanın akış hareketlerinin, periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketlerine başladığı nokta üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

3. ÖNEMLİ BOYUTSUZ PARAMETRELER

Kullanılan yüzen bölge konfigürasyonun deney bölgesi Şekil 1’de gösterilmiştir. Deney bölgesinde T_H ısıtıcı duvar sıcaklığı olup, T_C ise soğutucu duvar sıcaklığıdır. Her deney anında T_C sıcaklığı sabit tutulurken, T_H sıcaklığı kademeli olarak arttırılmaktadır. Akışkanın alt ve üst duvar yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının arttırılması ile akışkanın kinematik viskozite değeri düşmektedir. Böylece akışkanın fiziksel özelliklerine bağlı olan yüzey gerilimi değişeceğinden, akışkanda sürekli bir akış hareketi sağlanacaktır. Akışkanın fiziksel özelliklerini içeren değerler ile yüzey gerilim hareketinin oluşması ve değişmesine sebep olan parametreler aşağıdaki gibidir:

$$\text{Boyutsal oran, } Ar = \frac{H}{D}$$

$$\text{Prandtl sayısı, } Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$\text{Yüzey gerilim Reynolds sayısı, } Re_\sigma = \frac{|\sigma_T|(\Delta T_{kr})H}{\nu \mu}$$

$$\text{Marangoni sayısı, } Ma = \frac{|\sigma_T|(\Delta T_{kr})H}{\alpha \mu}$$

Burada; H akışkanın dikey yüksekliği, D akışkanın çapı, ν akışkanın kinematik viskozitesi, α akışkanın termal difüzyonu, μ akışkanın dinamik viskozitesi, $|\sigma_T|$ akışkanın yüzey gerilim sıcaklık katsayısı, ΔT_{kr} akışkanın kritik sıcaklık farkı, ($\Delta T_{kr} = T_H - T_C$) olarak adlandırılmıştır. Prandtl sayısı, yüzey gerilim Reynolds sayısı ve Marangoni sayısı ise akışkanın fiziksel özelliklerini içeren boyutsuz parametrelerdir. Akış hareketi sıcaklığın bir fonksiyonudur. Marangoni sayısı, akışkanın kararlı durumdan periyodik osilasyonlu duruma geçiş noktasını belirleyen önemli bir parametredir. Bu geçiş noktasının altındaki değerlerde homojen ve kararlı bir yüzey gerilim hareketi oluşurken, üzerindeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketi oluşur.

Bu deneysel çalışmadaki parametrelerin en düşük ve en yüksek sınır değerleri sırası ile: Ar için; 0.5-0.9, Ma_{kr} için; $1.2 \times 10^4 - 2.8 \times 10^4$ ’tür. Kritik Marangoni sayıları belirlenirken akışkanın ortalama sıcaklığı için $T_M = 1/2(T_H + T_C)$ ifadesi kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, ortam sıcaklığı (deney odası sıcaklığı), $T_R = +23^\circ C$ değerinde sabit tutulmuştur.

Yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak normal şartlardaki ($+25^\circ C$ ’de) $Pr = 72$ olan silikon yağının serbest yüzeyinin düz (dikey) durumdaki boyutsal oranın ve soğuk duvar sıcaklığının, akışkan yüzey gerilim hareketleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Literatürde, yüzey gerilim akış hareketi Marangoni konveksiyonu olarak bilinmektedir. Marangoni konveksiyon hareketinin durumunu Marangoni sayısı belirler. Yukarıda bahsedildiği gibi, Marangoni sayısının önemli parametrelerinden birisi de akışkan yüksekliğidir. Bu parametre, Marangoni konveksiyonun kararlı halinden periyodik osilasyonlu hale geçişinde çok etkilidir. Akışkanın boyutsal oranı akışkan yüksekliği ile doğru orantılı olup; boyutsal oran arttıkça akışkan yüksekliği artmaktadır. Bu sebepten akışkanın kararlı Marangoni konveksiyondan osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçişindeki kritik sıcaklık farkı ($\Delta T_{kr} = T_H - T_C$) değeri azalmaktadır. Bu ise şöyle ifade edilir; Marangoni sayısının parametrelerine bakıldığında, akışkan yüksekliği (H) ve kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değerleri doğru orantılıdır. Marangoni konveksiyonda Marangoni sayısı sabit olduğundan dolayı, akışkan yüksekliği (H) ve kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) parametrelerinden birisi artarken diğeri azalmaktadır.

Akışkanın boyutsal oranına bağlı olarak kritik sıcaklık farkları arasındaki değişim Şekil 3’de verilmektedir.

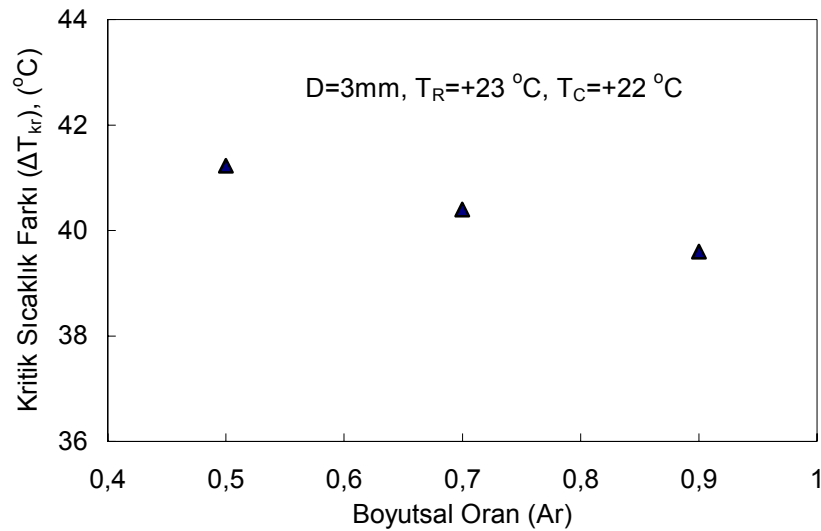
Şekil 3’de görüldüğü gibi, deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı $T_R=+23$ °C ve soğuk duvar sıcaklığı $T_C=+22$ °C de sabit tutulduğu zaman yapılan deneyde, boyutsal oran arttıkça kararlı Marangoni konveksiyondan periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçişteki kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değeri düşmektedir.

Akışkanın boyutsal oranı, $Ar=0.5$ ve deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı, $T_R=+23$ °C de sabit tutulduğu bir durumda kritik sıcaklık farkının ($\Delta T_{kr}=T_H-T_C$), ısıtılan duvar sıcaklığı ve akışkanın ortalama sıcaklığı (T_M) değerlerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi Şekil 4’te verilmektedir.

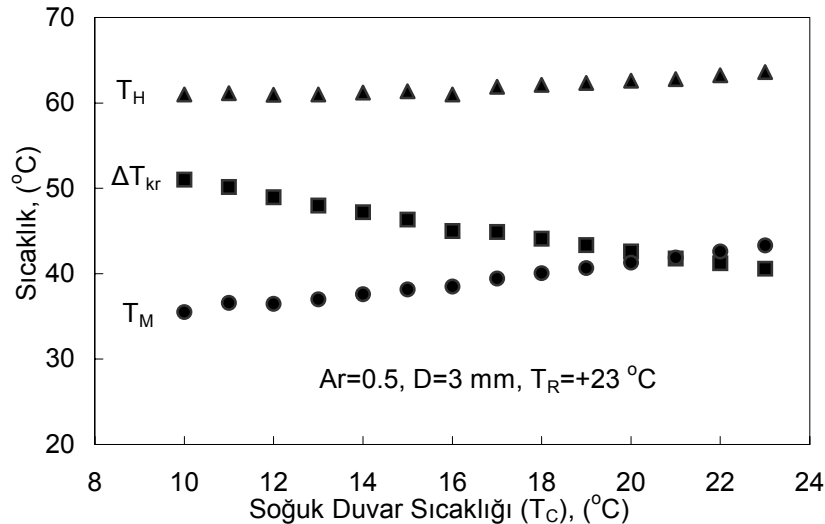
Akışkanın alt temas yüzeyi olan soğutucu duvar sıcaklığı $T_C=+10$ °C’de sabit tutulduğunda, ısıtıcı duvar sıcaklığı yavaş yavaş kademeli olarak arttırılmaktadır. Bu esnada ısıtıcı duvar sıcaklığı ile soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından

dolayı akışkan yüzey gerilim hareketine maruz kalmaktadır. Bu hareket esnasındaki sıcaklık farkı, kritik sıcaklık farkından düşük olduğundan dolayı akışkan kararlı haldeki yüzey gerilim hareketini oluşturur. Bu kararlı haldeki yüzey gerilim hareketi Şekil 5’de görülmektedir.

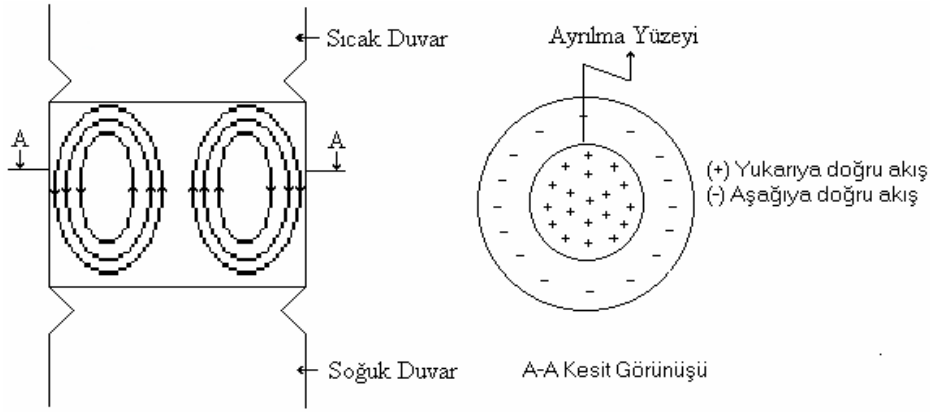
Isıtıcı duvar sıcaklığı yavaş yavaş kademeli olarak arttırılırken bir an geliyor ki $\sim T_H=+61.0$ °C değerine ulaştığında, kararlı haldeki Marangoni konveksiyon hareketi Şekil 5’de açıklandığı konumdan çıkarak birdenbire periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyon hareketine geçmektedir. Periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyon hareketine geçişte, ısıtıcı duvar sıcaklığı ($T_H=+61.0$ °C) ile sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı ($T_C=+10$ °C) arasındaki fark bize kritik sıcaklık farkını ($\Delta T_{kr}=51.0$ °C) vermektedir. Bu değerler ise Şekil 4’te soğutucu duvar sıcaklığı $T_C=+10$ °C de görülmektedir. Periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyonun başladığı kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değeri tespit edildikten sonra ısıtıcı duvar sıcaklığı kademeli olarak



Şekil 3. Kritik sıcaklık farkının akışkanın boyutsal oranına (Ar) göre değişimi



Şekil 4. Sıcaklıkların akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi



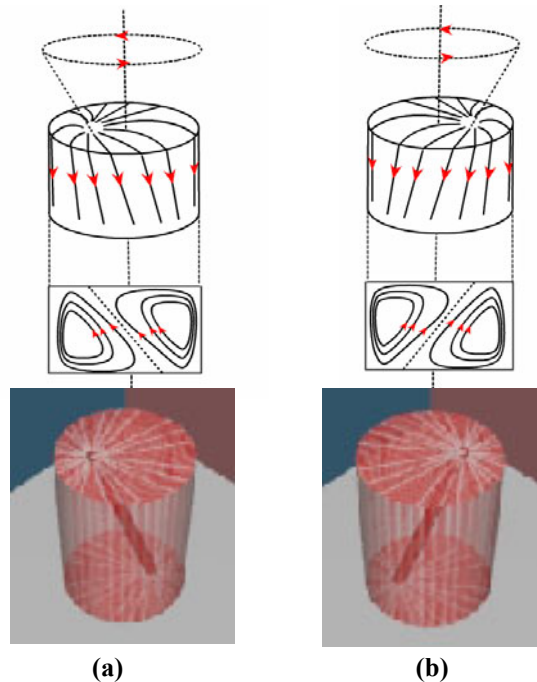
Şekil 5. Akışkanın kararlı haldeki yüzey gerilim hareketinin şematik görünüşü

yine arttırılmaya devam edilmektedir. Bundan sonra periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyonun hareketi izlenmeye devam edilir. Bu periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyon hareketi ise Şekil 6'da gösterilmektedir.

Şekildeki akış hücreleri birbirleriyle karşılaştırıldığında hiç bir zaman simetrik konuma gelmemektedir. Şekil 6.a'daki gibi ayrılma yüzeyine göre; sol yarım düzlemde akışkanın akış hareketindeki hücre, sağ yarım düzlemdeki akışkanın akış hücresine baskı yaparak hareket etmekte ve ayrılma yüzeyine göre sağ tarafta hareket eden hücrenin boyutunu yukarı doğru küçülterek hareketini sürdürmektedir. Şekil 6.a'da gösterilen konumundaki akışkanın akış hareketi radyal yönde θ açısı yaparak dönmekte ve $\theta = 180^\circ$ olduğunda Şekil 6.b konumuna gelmektedir. Şekil 6.b konumunda görüldüğü gibi ayrılma yüzeyine göre; sağ yarım düzlemde akışkanın akış hareketindeki hücre, sol yarım düzlemdeki akışkanın akış hücresine baskı yaparak hareket

etmekte ve sol taraftaki hücrenin üst boyutunun küçülmesine neden olmaktadır. Bu dönel hareket, ısıtıcı duvar sıcaklığı (T_H) ile soğutucu duvar sıcaklığı (T_C) arasındaki fark, kritik sıcaklık farkından daha büyük olduğunda devam etmektedir ve süreklilik kazanmaktadır. Periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyonlu akış hareketi Preisser ve arkadaşları [7] tarafından elde edilmiş olup, bu çalışmada elde edilen osilasyonlu akış hareketi ile benzerlik görülmüştür.

Bu periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyonlu akış hareketi devam ederken ısıtıcı duvar sıcaklığı kademeli olarak yavaş yavaş yine arttırılmaya devam edildiğinde, belirli bir sıcaklık farkından sonra periyodik osilasyonlu hareket kaotik Marangoni konveksiyonlu akış hareketine geçmektedir. Bu karmaşık bir akış hareketinde, akışkan yüksek sıcaklığa sahip olduğundan dolayı akışkanın bir kısmı buharlaşarak yok olmaktadır. Buharlaşıp yok olan akışkandan dolayı deney başlangıcındaki akışkanın



Şekil 6. Akışkanın osilasyonlu akış hareketinin şematik görünüşü

hacmi değişmektedir. Bu değişim, akışkanın kaotik akış hareketindeki Transport Fenomenlerini etkilemektedir. Bundan dolayı deney durdurulmakta ve bir sonraki soğutucu duvar sıcaklığı $T_{C=+11^{\circ}\text{C}}$ için deney düzeneği tamamen temizlenip, taze akışkan deney düzeneğine yerleştirilmektedir. Deney düzeneğine yerleştirilen akışkan yukarıda bahsedilen $T_{C=+10^{\circ}\text{C}}$ 'de yapılan işlemler ve prosedür $T_{C=+11^{\circ}\text{C}}$ için de yapılır ve bu değerler ile diğer $T_C = 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22$ ve 23°C değerleri tek tek tekrarlanarak Şekil 4'teki sayısal değerler elde edilir. Genel olarak, Şekil 4 incelendiğinde, soğutucu duvar sıcaklığı arttıkça kararlı Marangoni konveksiyondan periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçiş noktasını belirleyen ΔT_{kr} değeri azalmaktadır. Bu azalış değeri şöyle izah edilir; deney başlangıcında akışkan sıcaklığı, seçilen ve sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı ile ısıtılmaya başlanmış olan ısıtıcı duvar sıcaklığı (deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı ile dengede yani $T_H \cong T_R$) arasındaki aritmetik ortalama sıcaklığındadır. Bu sıcaklık değeri $T_M = 1/2 (T_H + T_C)$ ile ifade edilir. Karşılaştırma için, akışkanın ortalama sıcaklığı (T_M) ile deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı (T_R) başlangıçta dengede (sıcaklık farkının olmadığı) olduğunu düşünerek; ısıtıcı duvara verilen ısı sayesinde, akışkanın ortalama sıcaklığı (T_M) deneyin yapıldığı ortam sıcaklığından yüksek olacaktır. Bu nedenle ısı transferi, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru kendiliğinden gerçekleşeceğinden; akışkan yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama doğru ısı geçişi olacaktır. Böylece akışkan yüzeyi ısı kaybedeceğinden; kaybedilen ısı miktarı arttıkça akışkanın kararlı Marangoni konveksiyon hareketinden periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçişteki kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değerinin düşmesine neden olacaktır. Bu ifadeye göre; soğutucu duvar sıcaklığının düşük olmasıyla meydana gelen ısı kaybı, soğutucu duvar sıcaklığının yüksek olmasıyla meydana gelen ısı kaybından daha düşük olmaktadır. Matematiksel olarak; $\Delta T_{T_C=+10^{\circ}\text{C}} = T_{M_{T_C=+10^{\circ}\text{C}}} - T_R$

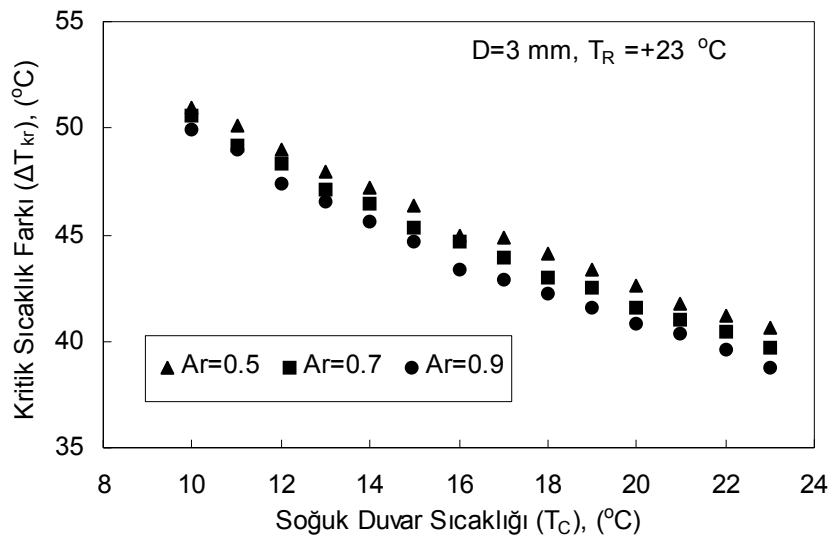
ve $\Delta T_{T_C=+23^{\circ}\text{C}} = T_{M_{T_C=+23^{\circ}\text{C}}} - T_R$ karşılaştırıldığında $\Delta T_{T_C=+10^{\circ}\text{C}} < \Delta T_{T_C=+23^{\circ}\text{C}}$ olacağı görülecektir.

Isı kaybı, akışkanın serbest yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı değerine bağlı olacağından dolayı; yukarıdaki matematiksel ifadeden anlaşılacağı gibi, $Q_{T_C=+10^{\circ}\text{C}} < Q_{T_C=+23^{\circ}\text{C}}$ olacaktır. Dolayısıyla, sıcaklık farkı değerinin küçülmesiyle ısı transferi azalacak, akışkan yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama geçen ısı miktarı soğutucu duvar sıcaklığı küçüldükçe azalacaktır.

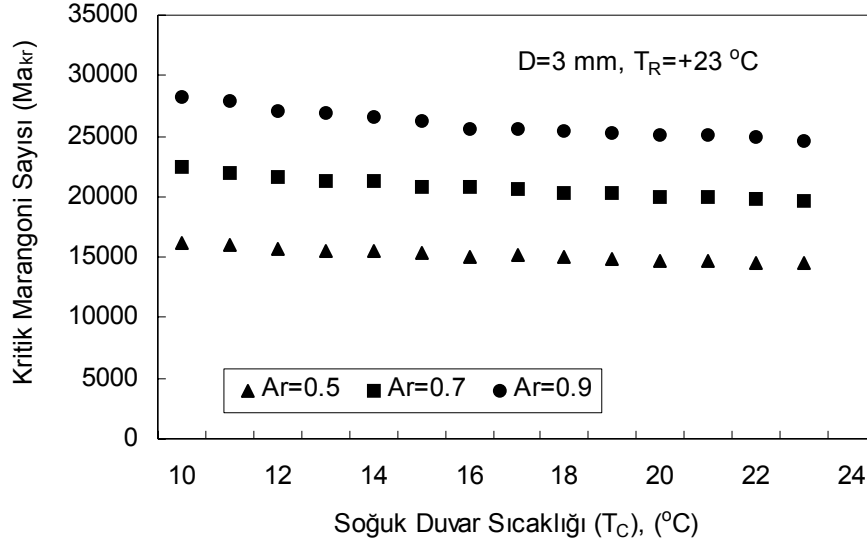
Boyutsal oranın $Ar=0.5$ olduğu durumda yapılan deneyler tamamlandıktan sonra, farklı boyutsal oranlar $Ar=0.7$ ve $Ar=0.9$ değerler için de deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir.

Aynı deney odası sıcaklığında ve farklı boyutsal oranlardaki Marangoni konveksiyonun kritik sıcaklık farklarının değerleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında; boyutsal oran (Ar) arttıkça kritik sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Boyutsal oran (Ar), akışkan yüksekliği (H) ile doğru orantılı olup, akışkan yüksekliği arttıkça boyutsal oran artmaktadır. Akışkan yüksekliğinin artışı, akışkan serbest yüzeyinin artışına sebep olacak; bundan dolayı akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybının artışına neden olacaktır. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı, periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyona başlangıç noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri azalacaktır.

Şekil 7'de elde edilen kararlı Marangoni konveksiyon hareketinin periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerlerini, Marangoni konveksiyon hareketinin kendisini meydana getiren boyutsuz Marangoni



Şekil 7. Farklı boyutsal oranlardaki kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi



Şekil 8. Farklı boyutsal oranlardaki kritik marangoni sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

sayısına dönüştürüldüğünde elde edilen kritik Marangoni sayılarının soğuk duvar sıcaklıkları ile değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Boyutsuz Marangoni sayısı Tablo 1'de verilen silikon yağının kinematik viskozitesinin değişimini veren formül kullanılarak, ortalama akışkan sıcaklığı (T_M) ile hesaplanmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi boyutsal oran azaldıkça ve soğuk duvar sıcaklığı arttıkça boyutsuz Marangoni sayısı azalmaktadır.

Sonuç olarak; yüzen bölge konfigürasyonu kullanılarak, kararlı Marangoni konveksiyondan periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyona geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri araştırıldı. Akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybı değerine bağlı olduğu ve bu ısı kaybı değerinin ise akışkanın yüksekliğine ve soğutucu duvar sıcaklığına bağlı olduğu bu çalışmada belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Ostrach, S., "Motion Induced by Capillarity", Physico Chem Hydrodynamics 2 (ed.D. B. Spolding), p. 571, 1977.
2. Schwabe, D., Scharmann, A., Preisser, F., Oeder, R., "Experiments on surface tension driven

flow in floating zone felting", Journal. of Crystal Growth, 43, p. 305-312, 1978.

3. Chun, H., Wuest, W., "A Micro gravity simulation of Marangoni convection", Acta Astronautica, 6, p. 681-686, 1978.
4. Napalitano, L. G., Monti, R., Russo, G., "Marangoni convection in one and two liquids floating zones", Naturwissenschaften, 73, p. 352-360, 1986.
5. Yasuhiro Kamotani, Li Wang, Sayaka Hatta, Ramazan Selver, Shinichi Yoda, "Effect of free surface heat transfer on onset of oscillatory thermocapillary flow of high Prandtl number fluid", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. Vol. 18, no. 4, p. 283-288, 2001.
6. Y. Kamotani, L. Wang, S. Hatta, R. Selver, P. S. Bhunia, and S. Yoda, "Effect of old wall temperature on onset of oscillatory thermocapillary flow", 39 th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 8-11 January 2001, Reno, NV.
7. Preisser, D. Schwabe, A. Scharmann, "Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface", J. Fluid Mech., vol. 126, p. 545-567, 1983.