



**ORTAM SICAKLIĞININ KARARLI VE OSİLASYONLU YÜZEY
GERİLİM HAREKETLERİNE ETKİSİ**
**(EFFECT OF AMBIENT AIR TEMPERATURE ON STEADY AND
OSCILLATORY THERMOCAPILLARY FLOW)**

Ramazan SELVER*

ÖZET/ ABSTRACT

Bu araştırmada, yüzen bölge konfigürasyonunda yukarıdan ısıtılarak yüksek Prandtl sayısına sahip bir akışkan kolonundaki kararlı ve osilasyonlu yüzey gerilimli akış deneysel olarak araştırılmıştır. Deney akışkanı 3 mm çapındaki bakır çubuklar arasına düz vaziyette asılmış olup, bu bakır çubuklara farklı sıcaklıklar uygulanmıştır. Deney akışkanı olarak kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanılarak belli şartlar altında akış ve sıcaklık osilasyonları gözlenmiştir. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının osilasyonların başlama noktasına olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, farklı duvar sıcaklıklarında ve ortam sıcaklıklarındaki kritik sıcaklık farkı değerleri incelenmiştir.

In this research, steady and oscillatory thermocapillary flows of high Prandtl number fluids were investigated experimentally under normal gravity in floating-zone configuration by heating from above (opposite direction of thermocapillary and buoyant forces). A liquid column was suspended vertically between two 3 mm diameter circular copper rods which were applied at different temperatures. Flow and temperature oscillations were observed under various conditions using 5 cSt silicone oil as the test fluid. 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 ambient air temperatures and various cold wall temperatures were investigated in the present experiment.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Yüzey gerilimli akış, Kararlı yüzey gerilimli akış, Periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış
Thermocapillary flow, Steady thermocapillary convection, Periodic oscillatory thermocapillary convection

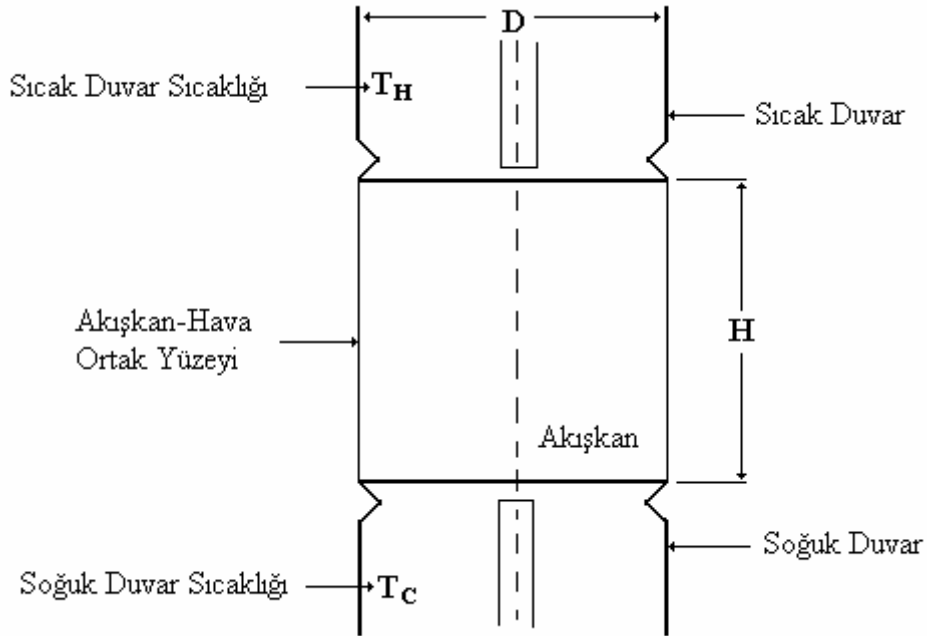
* SDÜ, Müh.Mim. Fak. Makina Mühendisliği Bölümü, 32260, Çünür Kampüsü, ISPARTA

1. GİRİŞ

Yarı iletken malzemelerin alt yapısını oluşturan kristallerin kalitesinin artırılması için birçok teknikler kullanılmıştır. Bu tekniklerden en önemlisi yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu olup, bu konfigürasyon Şekil 1’de gösterilmiştir. Konfigürasyonda, silindirik iki bakır çubuk arasına yerleştirilen akışkanın yüzey gerilim hareketinin değişmesine sebep olan farklı parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerden ilki; farklı soğuk duvar sıcaklıkları, ikincisi ise deneyin yapıldığı farklı ortam sıcaklıklarıdır.

Bu farklı parametreler altında silindirik konumdaki deney akışkanı, sıcaklık farkından dolayı yüzey geriliminin etkisi ile başlangıçta meydana gelen kararlı akış durumundan (steady state) periyodik osilasyonlu akış durumuna (*oscillatory state*) gelecektir.

Akışkandaki yüzey gerilim hareketi sıcaklığın fonksiyonudur. Akışkan-hava ortak yüzeyi üzerindeki sıcaklık gradyeni viskozite gradyenini oluşturur. Bu viskozite gradyeni yüzey gerilim gradyenini meydana getirir. Daha önceki analitik, teorik ve deneysel çalışmalarda, yüzey gerilimli akış olarak adlandırılan akışkan hareketinin özellikle akışkanın sıcaklık farkının bir taraftan diğer tarafa doğru artırılması ile meydana geldiği görülmüştür. Sıcaklık arttıkça akışkanın viskozite değeri azalmaktadır. Böylece akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen sıcaklık gradyeni bölgesel olarak değişeceğinden, akışkanın viskozite gradyeninin de bölgesel olarak değişmesine neden olacaktır. Akışkanın viskozite gradyeninin bölgesel değişmesi ile akışkan yüzeyindeki yüzey gerilim kuvveti de bölgesel olarak değişecektir. Bölgesel olarak değişen yüzey gerilim kuvveti sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru çekilmiş olacaktır. Böylece sıcaklık farkı var olduğu sürece, akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen akış hareketi ortak yüzeyi tamamladıktan sonra hacimsel olarak transport fenomenlerinin etkisi ile akışkanın sürekliliğini sağlamış olacaktır.



Şekil 1. Yüzen bölge konfigürasyonunun deney bölgesi

Birçok araştırmacı tarafından farklı tarihlerde yüzen bölge (floating-zone) konfigürasyonu ile ilgili deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk defa hem deneysel hem de teorik olarak farklı şartlar altında yüzey gerilimli akışkan hareketi Ostrach tarafından incelenmiştir (Ostrach, 1977).

Yüzen bölge yapılandırmasında yüksek Prandtl sayısına sahip akışkan kullanılarak kararlı ve osilasyonlu akış hareketini boyut analizi ile teorik bir çalışma Kamotani ve Ostrach tarafından yapılmıştır (Kamotani ve Ostrach, 1988). Çalışmalarında kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçişte akışkan-hava ortak yüzey deformasyonunun önemli bir etken olduğu kararına varmışlardır.

Yüzen bölge konfigürasyonunda Hexadecane ve Fluorinert FC-43 gibi akışkanları kullanarak, akışkanların değişik çapları için kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçiş noktalarını araştırmışlardır (Kamotani vd., 1984). Farklı akışkanlardaki geçiş noktasının değerini incelemiştirler. Bu geçiş noktasını etkileyen parametrelerden birisi olan sınır tabaka kalınlığının geçiş noktası üzerinde önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuşlardır.

Chun Octadecane ($C_{18}H_{38}$) kullanarak yüzen bölge yapılandırmasındaki akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca sıcaklık değerlerini ölçmüş ve elde edilen değerleri incelediğinde akışkan-hava ortak yüzeyindeki sıcaklık gradyanının kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçişinde bu gradyanın önemli bir parametre olduğu sonucuna yapmış olduğu çalışmada varmıştır (Chun, 1986). Bu araştırmacının yapmış olduğu çalışmalardan hareketle çalışmalarımızı bu yönde yoğunlaştırmış bulunmaktayız.

Yüzen bölge yapılandırmasında yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanları (kinematik viskozitesi 2 cSt ve 5 cSt silikon yağı) kullanarak, silindirik konumdaki silikon yağının akışkan-hava ortak yüzeyinden ortama olan ısı kaybı üzerine deneysel çalışmalar Kamotani vd. tarafından yapılmıştır (Kamotani vd., 2001b). Yapılan deneysel çalışmalarda, ortam sıcaklığının etkilerini normal şartların üzerinde olduğu durumlar için araştırmışlardır. Kamotani vd., aynı konfigürasyonun simülasyonunu yaparak, akışkanın serbest yüzeyinden ortama konveksiyon ve kondüksiyon yolu ile olan ısı kaybını nümerik olarak incelemiştirler (Kamotani vd., 2001a).

Bu deneysel çalışmada ise, farklı soğuk duvar sıcaklıklarının ve deneyin yapıldığı farklı ortam sıcaklıklarının, akışkanın kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçtiği kritik sıcaklık farkları üzerine etkileri araştırılmıştır. Soğuk duvar ve sıcak duvar arasındaki silindirik akışkanın çapı ve boyutsal oranı ($Ar=H/D=0.5$) sabit tutulmak şartı ile deneylerimiz gerçekleştirilmiştir.

2. DENEY APARATLARI VE PROSEDÜRÜ

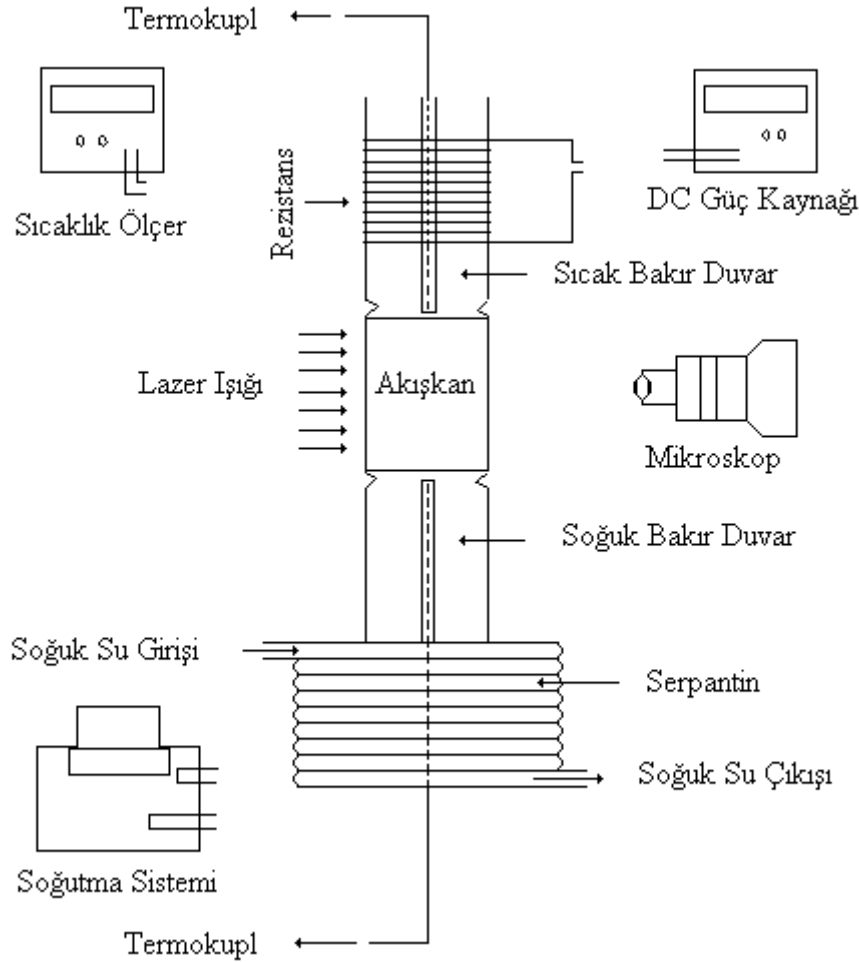
Deneysel çalışmamızda kullanılan deney düzeneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Yüzen bölge konfigürasyonu iki farklı ısıtma metodu ile gerçekleştirilmektedir. Bu metotlardan birisi, sıcak duvarın üst tarafta soğuk duvarın alt tarafta, diğeri ise soğuk duvarın üst tarafta sıcak duvarın alt tarafta olduğu durumdur. Bu çalışmada, akışkandaki doğal konveksiyonun etkisini minimize etmek amacıyla sıcak duvarın üst tarafta soğuk duvarın alt tarafta olduğu metot kullanılmıştır.

Şekil 2'de görüldüğü gibi deney düzeneği; deney akışkanı, deney bölgesi, ısıtma sistemi, soğutma sistemi, termokupllar, sıcaklık ölçer cihazı, akış görüntüleme sistemi ve akışkanın dikey yüksekliğini hassas olarak ayarlayan deney aparatından oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarımızda 5 cSt kinematik viskoziteye sahip olan silikon yağı (polydimethylsiloxane polimers) kullanılmıştır. Çizelge 1'de bu silikon yağının 25 °C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri verilmiştir.

Deney bölgesi Şekil 2'de gösterildiği gibi olup, deney bölgesinde kullanılan, akışkanla temas halinde olan sıcak duvar ve soğuk duvar saf bakırdan yapılmıştır. Bu sıcak ve soğuk duvarların bakır olarak seçilmesi bakırın yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı olup, akışkanla temas halinde olan yüzeylerinin homojen bir sıcaklık değerine sahip olması

amacı ile tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan bakır duvarların çapı 3 mm olarak seçilmiştir. Silindirik bakır duvarların her birinin tam merkezinden akışkan temas yüzeyine derinliği 0.5 mm kalacak şekilde sıcaklık değerlerini ölçecek termokupllar yerleştirilmek için 1 mm çapında kanallar açılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi, silindirik sıcak bakır duvar ve silindirik soğuk bakır duvarların akışkana temas yüzeyine yakın yerlerden radyal yönde çentikler açılmıştır. Bu çentikler ise akışkanın silindirik bakır duvarlarının radyal iletme yüzeylerinin azaltılması amacı ile yapılmıştır.



Şekil 2. Yüzen bölge konfigürasyonunun deney düzeneği

Deney düzeneğinde ısıtma sistemi 0.5 mm çapında krom-nikel telden imal edilen rezistans ile sağlanmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü gibi rezistans, akışkanın üst tarafında bulunan silindirik sıcak bakır duvarın üzerinde ve akışkan ile temas noktasından yaklaşık 5 mm yukarıda olacak şekilde sıkı vaziyette sarılmıştır. Rezistansın uçları AC-DC akımı veren 0-25 volt arasında çalışan güç kaynağına bağlanmıştır.

Akışkanın alt yüzeyinin soğutulması için silindirik bakır duvar soğutma özelliği verecek şekilde düzenlenmiştir. Silindirik bakır duvarın üzerine bakır borudan yapılmış serpantin sıkı bir şekilde sarılmıştır. Soğutucu duvarın sıcaklığını sabit tutmak amacı ile serpantinden sabit sıcaklığa sahip su sirkülasyonu yaptırılmaktadır. Sabit sıcaklığa sahip su sirkülasyonu 0.1 °C hassasiyete sahip cihaz ile sağlanmıştır. Bu cihaz istenilen sıcaklıklarda (0-300 °C aralığında) ayarlanabilmektedir.

Çizelge 1. 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25°C'deki fiziksel özellikleri (Kamotani vd., 2001b)

Özellik	Birimler	Değerler
Yoğunluk (ρ)	[kg/m ³]	913
Dinamik viskozite (μ)	[m ² /s]	4.88x10 ⁻³
Kinematik viskozite (ν)	[N.s/m ²]	5.345x10 ⁻⁶
Termal kondüksiyon katsayısı (k)	[J/m.s.K]	0.116
Termal difüzyon katsayısı (α)	[m ² /s]	7.42x10 ⁻⁸
Yüzey gerilim sıcaklık katsayısı $ \sigma_T , \left \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right $	[N/m.K]	-5,9x10 ⁻⁵
Prandtl sayısı (Pr)	Birimsiz	72.0
Akışkanın kinematik viskozitesinin 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 (Masud, 1997).		

Isıtıcı ve soğutucu bakır duvarların 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 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 osilasyonlu hale geçinceye kadar ki hassasiyeti belirler.

Deney bölgesinin çevresindeki ortam sıcaklığı dört farklı noktadan sıcaklığa karşı çok hassas hassasiyete sahip Iron-Constantan J tipi izoleli termokupllar sayesinde ölçülmüştür. Dört farklı noktadan elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması deneyin yapıldığı ortamın sıcaklık değerini verir.

Sıcak ve soğuk duvarlara yerleştirilen termokuplların diğer uçları 0.1 °C hassasiyete haiz 'DP26-TC-230' model sıcaklık ölçer cihazına 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. Ortam sıcaklığını ölçen J tipi termokuplların diğer uçları ise 1 °F hassasiyete sahip yirmi kanallı sıcaklık ölçer cihaza bağlanmıştır.

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 gerçekleşir. Bu boyutlardan birisinde akışkan partikülünün hareketi simetriden dolayı akışkanın her bölgesinde ve her açısında sabit kalmaktadır. Silindirik saydam akışkanın merkezinden dikey geçecek şekilde dalga boyu 630-670 nm olan kırmızı lazer ışığı uygulanır. Lazer perdesi üzerindeki akış hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi için, perdeye dik olacak şekilde ve büyütme oranı 26 olan bir mikroskop yerleştirilmiştir. Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki Al₂O₃ partiküllerinin izleri takip edilerek, akışkanın akış hareketinin kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik salınımlı yüzey gerilim hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanır.

Akışkan yüzey alanının sabit tutulması; akışkanın boyutsal oranının ve çapının sabit tutulması anlamına geleceğinden (D ve Ar=H/D sabit), ortam sıcaklığının ve soğuk duvar

sıcaklığını etkilerinin incelenmesi bu çalışmayı teşkil etmektedir. Deneysel çalışmalar esnasında akışkan yüksekliğinin hassas olarak ölçülmesi bu çalışmanın hassasiyetini belirlemektedir. Deney akışkanının yüksekliği 0.001 mm hassasiyete sahip bir comparatör ile kalibre edilmiştir.

Deneylerimiz ortam sıcaklığı $T_R=+10$ °C, $+16$ °C ve $+23$ °C de ve ortamın titreşimsiz olduğu anlarda gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi; sıcak bölgenin üst tarafta soğuk bölgenin alt tarafta olması halinde deney aparatları kendi hassasiyetleri ölçüsünde, güç kaynağı, soğutucu duvarın sıcaklığını sabit tutan soğutucu su sirkülasyon cihazı, lazer, sıcaklık ölçer cihazı teker teker açılır. Bunlardan sabit sıcaklıktaki soğutucu sirkülasyon cihazı istenilen $T_C=+23$ °C sıcaklığa ayarlanır ve T_C sıcaklığının kararlı duruma geçmesi beklenir. İlk olarak; deney bölgesindeki akışkan yüksekliği akışkanın boyutsal oranına ($Ar=H/D=0.5$ için) göre ayarlanır. Boyutsal orana bağlı yükseklik ayarlandıktan sonra, akışkanın kirliliği açısından ısıtıcı ve soğutucu bakır duvarların yüzeyleri etilalkol ile temizlenir. Bakır duvarlar üzerindeki etilalkol kuruduktan sonra bir hava kompresörü ile tekrar temizlenir. Bakır duvarlar arasına asılan akışkanın yerçekiminden ve akışkanın ıslaklığından dolayı alt bakır duvar üzerinden akışkan kayarak hacimsel olarak eksilirken, bazen de bu etkiler akışkanın kayarak tamamen yok olmasına sebep 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 bir defa daha temizlenir. Akışkan, camdan yapılmış temiz bir enjektör ile yukarıda bahsedilen 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, daha sonra mikroskop akışkan perdesine odaklanır. Güç kaynağı ile akışkanın sıcak duvarının sıcaklığı (T_H) adım adım artırılır ve osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı ise sıcaklık ölçer cihazından ölçülür. Deneyler aynı şartlarda üçer defa tekrarlanır ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, deneydeki akışkanın periyodik osilasyona başlama noktası bulunmuş olur. Akışkan hareketinde; kritik sıcaklık farkının altındaki değerlerde kararlı konveksiyon, üstündeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu konveksiyon olarak görülmüştür. Hazırlanan deney aparatları sayesinde değişik ortamlarda yüzey gerilim hareketleri ile başlayan akışkanın, akış hareketlerinin geçiş noktaları üzerine etkileri araştırılmıştır.

3. ÖNEMLİ BOYUTSUZ PARAMETRELER

Deney anında istenilen T_C sıcaklığı sabit tutulurken, T_H sıcaklığı adım adım artırılmaktadır. Akışkanın alt ve üst duvar yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının artırılması ile akışkanın 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 oluşmasına sebep olan parametreler aşağıda verilmiştir.

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

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

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

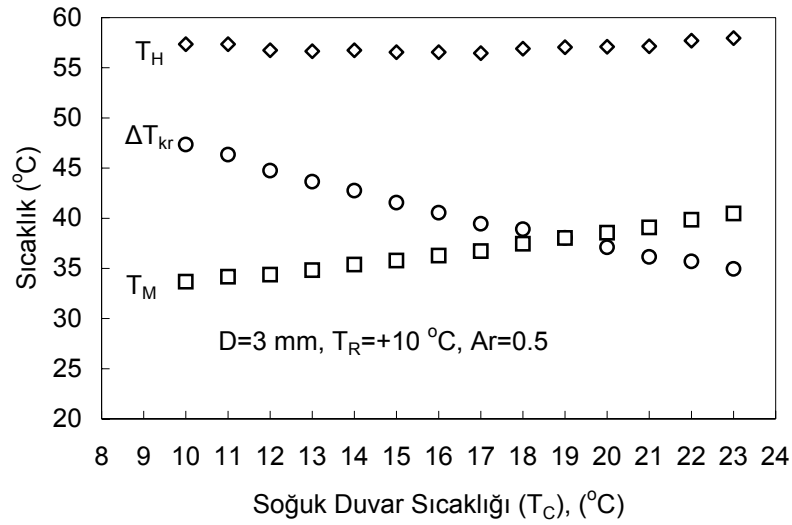
$$\text{Marangoni sayısı,} \quad \text{Ma} = \text{Pr Re}_\sigma = \frac{|\sigma_T| (\Delta T_{kr}) H}{\alpha \mu}$$

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, ($\Delta T_{kr} = T_H - T_C$)'dir. Prandtl sayısı, yüzey gerilim Reynolds sayısı ve Marangoni sayısı akışkanın fiziksel özelliklerini içeren boyutsuz parametrelerdir. Marangoni sayısı yüzey gerilim akış hareketi yapan akışkanın kararlı (*steady state*) akış durumdan periyodik salınımlı duruma geçiş noktasını belirleyen önemli bir parametredir. Yüzey gerilim hareketi yapan akışkan hareketine Marangoni konveksiyon olarak isimlendirilir. Marangoni konveksiyonu yapan akışkan hareketine göre elde edilen Marangoni sayısının belirli bir değerin altında homojen ve kararlı Marangoni konveksiyon hareketi, üzerindeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu Marangoni konveksiyon hareketi gerçekleşir. Kararlı Marangoni konveksiyondan periyodik salınımlı Marangoni konveksiyona geçiş değerine kritik Marangoni sayısı (Ma_{kr}) olarak isimlendirilir. Kritik Marangoni sayısı belirlenirken akışkanın ortalama sıcaklığı için $T_M = 1/2(T_H + T_C)$ ifadesi kullanılmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu proje çalışmasında değişik boyutsal oranlar içerisinde ilk olarak; boyutsal oran (*aspect ratio*), $\text{Ar} = H/D = 0.5$ değerinde sabit tutulmuştur. Yüzen bölge yapılandırma kullanılarak normal şartlarda (+25 °C de) $\text{Pr} = 72$ olan silikon yağının serbest yüzeyinin düz (dikey) durumda ortam sıcaklığının ve soğuk duvar sıcaklığının akışkan yüzey gerilim hareketleri üzerine etkileri incelenmiştir.

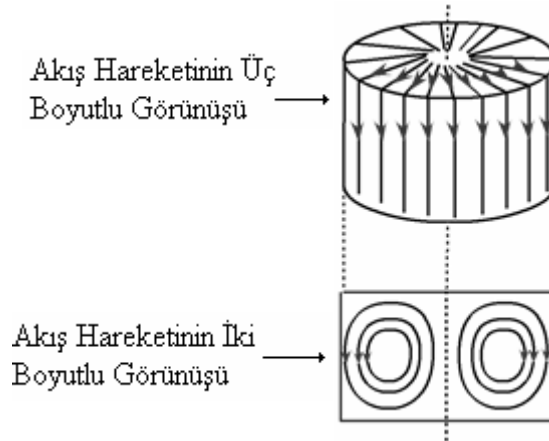
Yüzey gerilim akış hareketi Marangoni konveksiyonu olarak da bilinmektedir. Marangoni konveksiyon hareketinin durumu Marangoni sayısı tarafından belirlenir. Yukarıda; boyutsuz parametreler bölümünde bahsedildiği gibi Marangoni sayısının önemli parametrelerinden birisi de kritik sıcaklık farkıdır. Bu parametre, yüzey gerilim akış hareketinin kararlı halden periyodik osilasyonlu hale geçişinde etkilidir. Marangoni konveksiyonunda Marangoni sayısı sabit olacağından dolayı, akışkanın yüksekliği (H) sabit tutulurken kritik sıcaklık farkı deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı (T_R) ile soğuk duvar sıcaklığından (T_C) etkilenmektedir. Deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı $T_R = +10$ °C de sabit tutulduğu bir durumda kritik sıcaklık farkının ($\Delta T_{kr} = T_H - T_C$), ısıtıcı duvar sıcaklığının ve akışkanın ortalama sıcaklığının (T_M) soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Sıcaklıkların akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Akışkanın alt temas yüzeyi olan soğuk duvar sıcaklığı $T_C = +23$ °C de sabit tutulduğunda ısıtıcı duvar sıcaklığı adım adım artırılmaktadır. Bu esnada ısıtıcı duvar sıcaklığı ile soğuk duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı akışkan yüzey gerilim hareketine maruz kalmaktadır. Bu hareket esnasında sıcaklık farkı, kritik sıcaklık farkından düşük olmasından dolayı akışkanda kararlı yüzey gerilim hareketi meydana gelmektedir. Bu hareket Şekil 4'de gösterilmektedir.

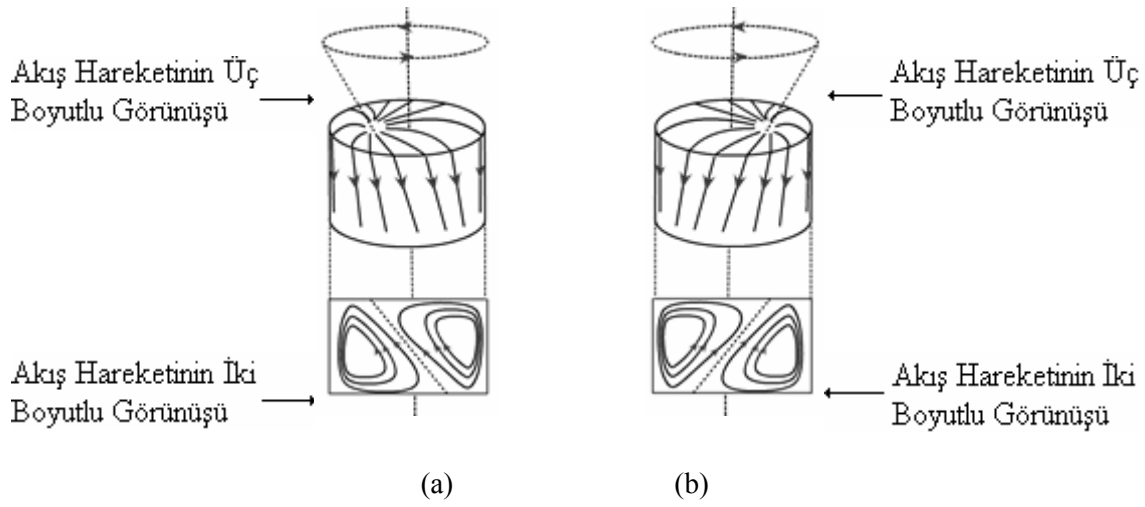
Isıtıcı duvar sıcaklığı adım adım artırılırken, bu sıcaklık $T_H = +57.95$ °C'yi gösterdiğinde kararlı haldeki yüzey gerilim akış hareketi Şekil 4'de açıklanan konumdan çıkarak birdenbire periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketine geçmektedir.



Şekil 4. Akışkanın kararlı haldeki yüzey gerilim hareketinin şematik görünüşü

Periyodik salınımlı yüzey gerilim akış hareketine geçişte, ısıtıcı duvar sıcaklığı $T_H = +57.95$ °C da sabit tutulup soğutucu duvar sıcaklığı $T_C = +23$ °C olduğunda arasındaki fark bize kritik sıcaklık farkını ($\Delta T_{kr} = +34.95$ °C) vermektedir. Bu değerler Şekil 3'de açıkça görülmektedir. Akışkanın akış hareketinin, periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketine başladığı kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değeri tespit edildikten sonra ısıtıcı duvarın sıcaklığı adım adım artırılırken, periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketi izlenmeye

devam edilir. Bu periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketi Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5. Akışkanın osilasyonlu akış hareketinin şematik görünüşü

Şekil 5'deki akış hücreleri birbirleriyle karşılaştırıldığında hiçbir zaman simetrik konuma gelmemektedir. Şekil 5a'daki gibi ayrılma yüzeyine göre; sol yarım düzlemde akışkanın akış hareketindeki hücre, sağ yarım düzlemdeki akışkanın akış hücresine baskı yaparak hareket ederken, ayrılma yüzeyine göre sağ tarafta hareket eden hücrenin boyutunu yukarı doğru küçülterek hareketini sürdürmektedir. Sol yarım düzlemdeki akışkanın akış hücresi Şekil 5a'da gösterilen konumundan radyal yönde θ açısı yaparak dönmekte ve $\theta=180^\circ$ olduğunda Şekil 5b konumuna gelmektedir. Şekil 5.b konumunda görüldüğü gibi ayrılma yüzeyine göre; sağ yarım düzlemde akışkanın akış hareketindeki hücre, sol yarım düzlemde hareket eden akışkan hücresine baskı yaparak hareket etmekte ve sol yarım düzlemdeki 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 büyük olduğunda devam etmektedir ve süreklilik kazanmaktadır. Bizim yaptığımız çalışmalarda elde edilen periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketi ile tarafından elde edilen periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketi benzerlik göstermiştir (Preisser vd., 1983).

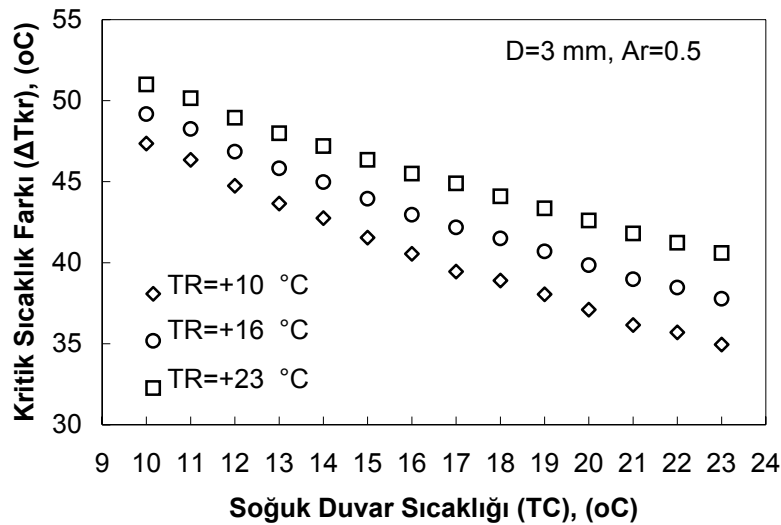
Bu periyodik salınımlı yüzey gerilim akış hareketi devam ederken, ısıtıcı duvar sıcaklığı adım adım arttırılmaya devam edildiğinde belirli bir sıcaklık farkından sonra periyodik osilasyonlu hareket kaotik yüzey gerilim akış hareketine geçmektedir. Bu kaotik yüzey gerilim akış hareketinde, akışkan yüksek sıcaklığa sahip olduğundan dolayı bu akışkanın bir kısmı buharlaşarak yok olmaktadır. Buharlaşmış olan akışkandan dolayı deney başlangıcındaki akışkan hacmi değişmektedir. Bu değişim, akışkanın kaotik akış hareketindeki Transport Fenomenlerini etkilemektedir. Bundan dolayı, deney durdurulur ve bir sonraki soğutucu duvar sıcaklığı $T_C=+22^\circ\text{C}$ için deney düzeneği tamamen temizlenerek taze akışkan deney düzeneğine yerleştirilir. Deney düzeneğine yerleştirilen akışkan yukarıda bahsedilen $T_C=+23^\circ\text{C}$ de yapılan işlemler ve prosedür bu değer içinde yapılır; bu değerler ile diğer $T_C=+21^\circ\text{C}$, $+20^\circ\text{C}$, $+19^\circ\text{C}$, $+18^\circ\text{C}$, $+17^\circ\text{C}$, 16°C , $+15^\circ\text{C}$, $+14^\circ\text{C}$, $+13^\circ\text{C}$, $+12^\circ\text{C}$, $+11^\circ\text{C}$ ve $+10^\circ\text{C}$ değerlerinin her birisi için tekrarlanarak Şekil 3'deki sayısal değerler elde edilir. Genel olarak, Şekil 3 incelendiğinde, soğutucu duvar sıcaklığı azaldıkça kararlı yüzey gerilimli akış hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketine geçiş noktasını belirleyen ΔT_{kr} değeri artmaktadır. Bu artış değeri şu şekilde 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 sıcaklığıdır. 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 akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama doğru ısı geçişi olacaktır. Böylece akışkan serbest yüzeyi ısı kaybedeceğinden; kaybedilen ısı miktarı arttıkça akışkanın kararlı yüzey gerilim akış hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketine 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 ifade edecek olursak $[\Delta T_{T_C=+10^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_C=+10^\circ\text{C}}} - T_R)]$ ve $[\Delta T_{T_C=+23^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_C=+23^\circ\text{C}}} - T_R)]$ eşitliklerinin değerleri karşılaştırıldığında görülecektir ki $[\Delta T_{T_C=+10^\circ\text{C}} < \Delta T_{T_C=+23^\circ\text{C}}]$ olacaktır.

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

Ortam sıcaklığı $T_R = +10^\circ\text{C}$ olduğu durumda yapılan deneyler tamamlandıktan sonra, ortam sıcaklıkları $T_R = +16^\circ\text{C}$ ve $T_R = +23^\circ\text{C}$ değerleri için de deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları Şekil 6'da gösterilmektedir.

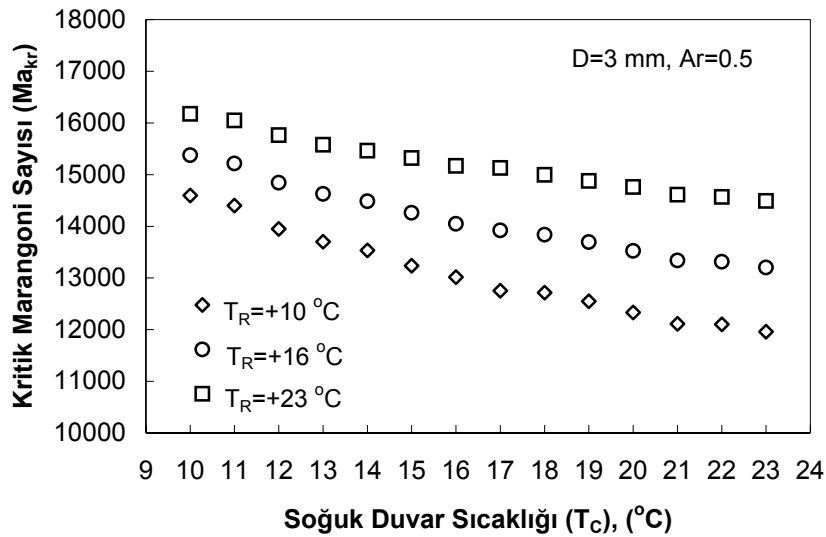
Aynı boyutsal oranda ve farklı ortam sıcaklıklarındaki yüzey gerilim akış hareketinin kritik sıcaklık farklarının değerleri verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında ortam sıcaklığı (T_R) arttıkça kritik sıcaklık farkı değerleri artmaktadır. Ortam sıcaklığının artışı akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının azalmasına sebep olacak; bundan dolayı kritik sıcaklık farkı değeri artacaktır. Bu sebeplerden dolayı periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketinin başlangıç noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri, ortam sıcaklığının artması ile artacaktır.



Şekil 6. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Şekil 6’da elde edilen kararlı yüzey gerilimli akış hareketinin periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketine geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri, Marangoni konveksiyon hareketinin kendisini meydana getiren boyutsuz Marangoni sayısına dönüştürüldüğünde, elde edilen kritik Marangoni sayılarının soğuk duvar sıcaklıkları ile değişimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Boyutsuz Marangoni sayısı Çizelge 1’de verilen silikon yağının kinematik viskozitesinin değişimini veren formül kullanılarak ve ortalama akışkan sıcaklığı (T_M) ile hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi ortam sıcaklığı azaldıkça ve soğuk duvar sıcaklığı arttıkça boyutsuz Marangoni sayısı azalmaktadır.

Sonuç olarak, yüksek Prandtl sayısına sahip akışkan kullanılarak yüzen bölge yapılandırılmasında silindirik konumdaki akışkan üst taraftan ısıtılarak akışkanın yüzey gerilim akış hareketi olarak bilinen Marangoni konveksiyonunun, kararlı yüzey gerilimli akış hareketinden periyodik salınımlı yüzey gerilimli akış hareketine geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerlerinin, akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybı değerlerine bağlı olduğu ve bu ısı kaybı değerleri ise deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı ve soğutucu duvar sıcaklığına bağlı olarak değiştiği çalışmamızda belirtilmiştir.



Şekil 7. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik Marangoni sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi’nden DPT’ye başvuru olan 2002K120590/1 no’lu proje ile desteklenmiştir. Bu çalışmaya vermiş oldukları destekten dolayı Süleyman Demirel Üniversitesine ve DPT’ye teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Chun C.H.H. (1986): “Experiments on Steady and Oscillatory Temperature Distribution in a Floating-zone due to the Marangoni Convection”, *Acta Astronautica*, Vol. 73, p. 352-360.
- Kamotani Y., Ostrach S. (1988): ‘Theoretical Analysis of Thermocapillary Flow in Cylindrical Columns of High Prandtl Number Fluids’, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 758, p. 758-764.

- Kamotani Y., Ostrach S., Vargas M. (1984): "Oscillatory Thermocapillary Flow in a Simulated Floating-zone Convection Configuration", *Journal. of Crystal Growth*, Vol. 66, p. 83-90.
- Kamotani Y., Wang L., Hatta S., Selver R., Bhunia P.S., Yoda S. (2001a): "Effect of Cold Wall Temperature on Onset of Oscillatory Thermo capillary Flow", 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- Kamotani Y., Wang L., Hatta S., Selver R., Yoda S. (2001b): "Effect of Free Surface Heat Transfer on Onset of Oscillatory Thermocapillary Flow of High Prandtl Number Fluid", *J. Japan Soc. Microgravity Appl.*, Vol. 18, No. 4, p. 283-288.
- Masud J. (1997): "The Influence of Gravity on Thermocapillary Flows in High Prandtl Number Fluids", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio.
- Ostrach S. (1977): "Motion Induced by Capillarity", *Physico Chemical Hydrodynamics 2* (Ed. D.B. Spolding), p. 571.
- Preisser F., Schwabe D., Scharmann A. (1983): "Steady and Oscillatory Thermocapillary Convection in Liquid Columns with Free Cylindrical Surface", *J. Fluid Mech.*, vol. 126, p. 545-567.