

SABİT SICAKLIK KONFIGÜRASYONUNDA ORTAM SICAKLIĞI VE SOĞUK DUVAR SICAKLIĞININ OSİLYONLU YÜZEY GERİLİM HAREKETİNE GEÇİŞE ETKİLERİ

Çağrı ÇIRAK*, Ramazan SELVER**, Nuri ÖZEK*

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260 Isparta, Türkiye

** Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260 Isparta, Türkiye
e-mail: cagri@fef.sdu.edu.tr

Alınış: 24 Nisan 2008, Kabul: 08 Ekim 2008

Özet: Bu araştırma, Sabit Sıcaklık Konfigürasyonunda, yüksek Prandtl sayısına sahip, silindirik bir kaptaki akışkanın kararlı ve osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel olarak, 30 mm çapındaki deney silindirin simetri eksenine yerleştirilen silindirik bakır çubuk tarafından ısıtılmış ve deney silindirin dış kenarına sarılan bakır boru içerisinde geçen su ile soğutulmuştur. Deneysel akışkan olarak kinematik viskozitesi 5 cSt olan silikon yağı kullanılarak belli şartlar altında akış hareketleri ve sıcaklık osilasyonları gözlenmiştir. Akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybının, farklı ortam sıcaklıklarının ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarının kararlı haldeki akışkan hareketinin periyodik osilasyonlu akış hareketine başlama noktasına etkileri araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüzey gerilimli akış, kararlı yüzey gerilimli akış, periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış, sabit sıcaklık konfigürasyonu

EFFECT OF AMBIENT AIR TEMPERATURE AND COLD WALL TEMPERATURE ON ONSET OF OSCILLATORY THERMOCAPILLARY FLOW IN CONSTANT TEMPERATURE CONFIGURATION

Abstract: In this research, steady and oscillatory thermocapillary flows of high Prandtl number fluids were investigated experimentally under normal gravity in Constant Temperature Configuration by heating from center and cooled from side wall of a cylindrical container with 30 mm diameter. Flow and temperature oscillations were observed under various conditions using 5 cSt silicone oil in the test fluid. The effect of heat transfer from the liquid free surface to surrounding air, ambient air temperatures, and cold wall temperatures on the onset of the oscillations was investigated.

Key words: Thermocapillary flow, steady state thermocapillary convection, oscillatory thermocapillary convection, constant temperature configuration

GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan bu yana birçok önemli buluş yapmış ve bunları zaman içerisinde geliştirerek bilim tarihine her gün yeni katkılarda bulunmuştur. Yarıiletken malzemelerin üretimi, insanlık tarihinin en önemli buluşlarından biri olmuştur. 18. yüzyılın ilk çeyreğinde iletkenler ve yalıtkanlar sınıflandırması yapılmaktaydı. Michael

Faraday bundan bir yüzyıl sonra yeni bir malzeme sınıfı tanımlayarak, bu sınıfa “Yarıiletken Malzeme” adını vermiştir.

1800’lü yıllardan günümüze, yarıiletken malzemelerin gelişimi, onu gündelik hayatımızın vazgeçilmezi yapmıştır. Yarıiletken kelimesi bize çok şey anlatmasa da günümüzde yarıiletkenler olmadan modern bir dünya düşünülemez. Hayatımızda yarıiletken malzemeler olmasaydı, günlük hayatımızda önem taşıyan birçok cihazdan bugün yararlanamayacaktık. Nano teknolojiler ve savunma sanayi uygulamaları yarıiletken malzemelerin gelişmesini hızlandırmıştır.

Yarıiletken malzemelerin en çok kullanıldığı alan bilgisayar teknolojileri alanıdır. Yarıiletken kristaller kullanılarak diyotlar, transistörler ve entegre devreler üretilmektedir. Entegre devrelerin kullanımı ise ikinci bir endüstri devrimini başlatmıştır. Bir entegre devre; bir tek silisyum kristali üzerinde iç bağlantılar, diyotlar, transistörler, dirençler ve kondansatörlerin bir araya getirilmiş halidir. Entegre devreyi oluşturan çipler, yüz binlerce devre elemanı bulundurabilmektedir. Bu entegre devreleri bilgisayarın, televizyonların, videoların, saatlerin, kameraların, hesap makinalarının, otomobillerin, uçakların, robotların, uzay araçlarının ve günümüzde kullanılan tüm haberleşme sistemlerinin kalbini oluşturmaktadır.

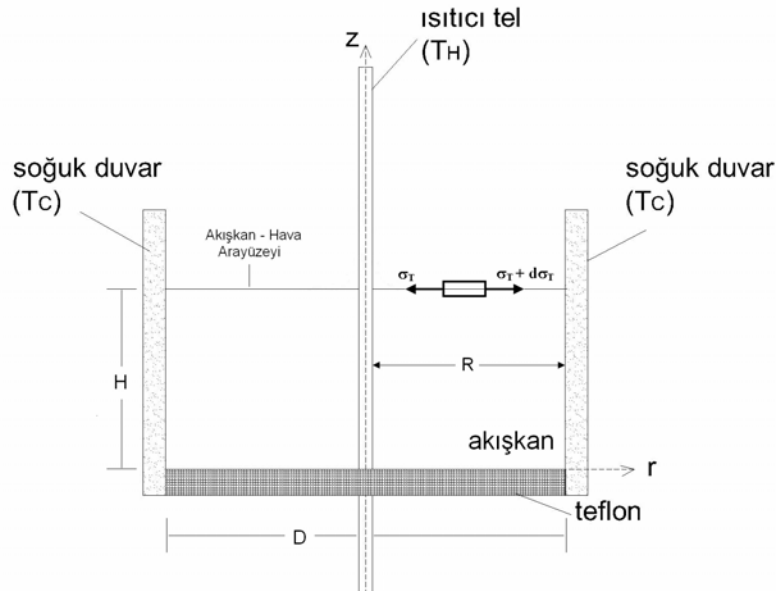
Bilgisayar teknolojileri alanındaki ilk uygulama, kısa adı TRADIC adı verilen (TRANSİSTOR-DİGİTAL-COMPUTER) ve üzerinde 800 adet transistör ve 11.000 germanyum diyotu bulunduran dev boyutlardaki hesap makinesidir. Günümüzdeki bilgisayar teknolojisi ile TRADIC karşılaştırılırsa, yarıiletken malzemelerin ve teknolojisinin geliştirilmesinin önemi daha iyi anlaşılacaktır. Bu nedenle o günlerden bu günlere kadar yarıiletken malzemelerdeki teknolojik gelişmeler birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Son zamanlarda ise, akışkanlar üzerine çalışan araştırmacılar, yarıiletken malzemelerin homojen yapısına, ısı ve kütle alışverişinin (Transport Fenomenleri) etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Isı ve kütle alışverişi sayesinde akışkan, sadece doğal konveksiyon ve yüzey gerilim konveksiyonunun (Marangoni convection) tesiri altındadır. Akışkanın bölgesel sıcaklık farkının var olduğu durumlarda (yeryüzünde yerçekimi ivmesinin $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ olduğu) doğal konveksiyon her zaman var olacağına göre; doğal konveksiyon yarıiletken malzemenin üretimindeki homojen yapıyı bozmaktadır. Sözü edilen zararlı etkiyi azaltıcı konfigürasyonlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Araştırmacıların yoğun çalışmaları; yarıiletken malzemelerin, sadece yüzey gerilim konveksiyon hareketinin tesiri altında iken daha homojen bir yapı sergilediğini ispatlamıştır.

Yarıiletken malzemelerin alt yapısını oluşturan kristallerin kalitesinin artırılması için birçok teknikler kullanılmıştır. Bu tekniklerin önemlileri ise şunlardır; Yüzen bölge konfigürasyonu (Liquid Bridge Configuration), sabit sıcaklık konfigürasyonu (Constant Temperature Configuration) ve sabit ısı akısı konfigürasyonu (Constant Heat Flux Configuration). Yüzen bölge konfigürasyonunda kararlı ve osilasyonlu yüzey gerilim hareketi yapan akışkan bu güne kadar birçok araştırmacı tarafından araştırılmış olup bu konfigürasyon üzerine çalışmalar devam etmektedir. Sabit sıcaklık konfigürasyonunda ise bu güne kadar farklı parametreler altında kararlı ve osilasyonlu yüzey gerilim hareketi yapan akışkan yine birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Fakat bu konfigürasyon altında, farklı ortam sıcaklıkları ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarının

ikisini birden içeren parametrelerin kararlı yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçiş noktaları olan kritik sıcaklık farkı değerinin değişiminin belirlenmesi ilk kez gerçekleştirilecektir. Deneyler için hazırlanmış olan sabit sıcaklık konfigürasyonu Şekil 1 de gösterilmiştir.

Yukarıda bahsedilen 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) geçecektir. Periyodik osilasyonlu akış durumu ise kristal büyütme sürecinde, kristal kusurlarının oluşmasına sebep olmasından dolayı istenmeyen bir durumdur.

Akışkandaki yüzey gerilim hareketi sıcaklığın fonksiyonudur. Akışkan-hava ortak yüzeyi üzerindeki sıcaklık değişimi viskozite değişimini oluşturur. Bu viskozite değişimi yüzey gerilim değişimini 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 değişimi bölgesel olarak değişeceğinden, akışkanın viskozite değişimi de bölgesel olarak değişmesine neden olacaktır. Akışkanın viskozitesinin 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, Şekil 1’de görülen akışkan-hava ortak yüzeyi boyunca gerçekleşen akış hareketi ortak yüzeyi tamamladıktan sonra hacimsel olarak transport fenomenlerinin etkisi ile akışkanın sürekliliğini sağlamış olacaktır.



Şekil 1. Sabit sıcaklık (CT) konfigürasyonunun deney bölgesi

Ostrach, kararlı haldeki yüzey gerilimli akışkan hareketini, ilk olarak 70'li yıllarda değişik şartlar altında analitik olarak incelemiştir. Bu çalışmalarda, hem sıcaklık hem de viskozite değişimlerinin her ikisinin de birbirleri ile bağıntılı olarak bir arada bulunduğu durumlar için kompleks olan yüzey gerilimli akış alanını tanımlamak amacı ile, önemli boyutsuz parametreleri kullanmış ve diğer araştırmacılara da bu parametrelerin kullanılmasını önermiştir (OSTRACH 1977, OSTRACH 1979).

Kistal büyüme tekniklerini temel alan konfigürasyonlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar; yüzen bölge, silindirik, dikdörtgen ve kare kaplar içeren konfigürasyonlardır. Schwabe, kristal büyüme tekniklerinin de yüzey gerilimli akış hareketinin incelendiği önceki tüm çalışmaları özetlerken, Pimputkar ve Ostrach, Marangoni konveksiyonunun eriyikten kristal büyüme üzerine etkilerini çalışmıştır (SCHWABE 1981, PIMTUKAR & OSTRACH 1981).

Chun ve Wuest ve ayrıca Schwabe vd. yarım yüzen bölge konfigürasyonu kullanarak oluşturulan yüzey gerilim hareketlerinde oluşan sıcaklık ve hız alanlarını incelemiştir. Yüzey gerilimli akışın önemli bir özelliği olan kararlı (steady state) yüzey gerilimli akıştan, periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akışa geçişi deneysel olarak gözlemlemiştir (CHUN & WUEST 1978, SCHWABE 1978).

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

Kamotani ve çalışma gurubu, 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. Farklı akışkanlardaki geçiş noktasının değerini incelemiştir. Bu geçiş noktasını etkileyen parametrelerden birisi olan sınır tabaka kalınlığının geçiş noktası üzerinde önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuşlardır (KAMOTANI vd. 1984).

Yüzen bölge konfigürasyonunda 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 ve çalışma gurubu tarafından yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, ortam sıcaklığının etkilerini normal şartların üzerinde olduğu durumlar için araştırmışlardır (KAMOTANI vd. 2001a). Aynı konfigürasyonun nümerik çözümü yapılarak, akışkanın serbest yüzeyinden ortama konveksiyon ve kondüksiyon yolu ile olan ısı kaybını nümerik olarak incelemiştir (KAMOTANI vd. 2001b).

Sabit sıcaklık konfigürasyonunda termokapiler akışı için deneysel ve teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında, kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçiş noktalarını araştırmışlardır. Periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketinin yapısını belirlemiştir (KAMOTANI vd. 1992, LAVALLEY vd. 2001).

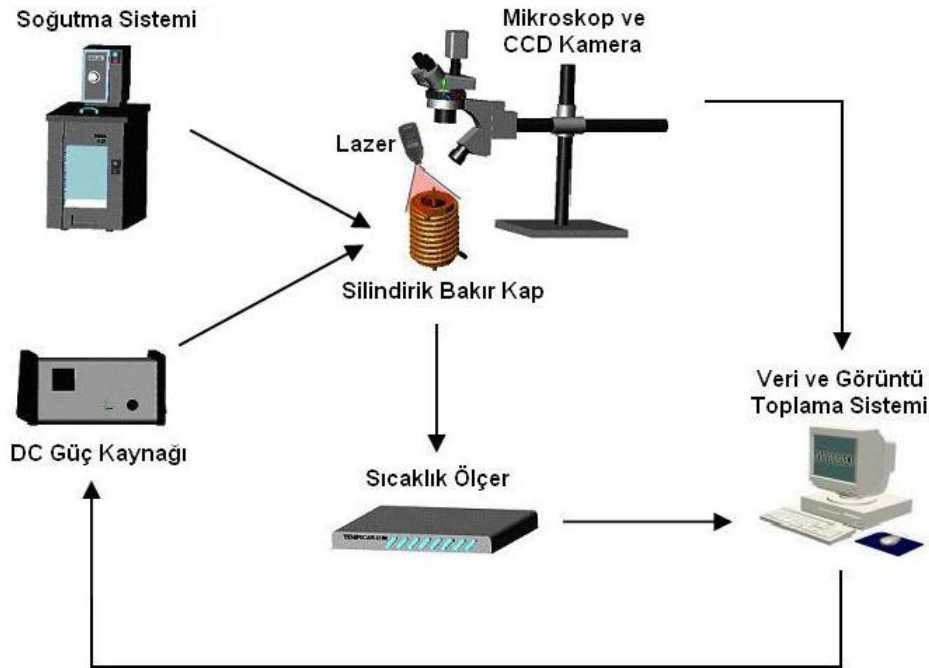
Bu deneysel çalışmada ise, farklı soğuk duvar sıcaklıklarının, deneyin yapıldığı farklı ortam sıcaklıklarının ve akışkanın farklı boyutsal oranlarının, akışkanın kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçtiği kritik sıcaklık farkları üzerine etkileri araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Bu deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi deney düzeneği; silindirik bakır kap, ısıtma sistemi, soğutma sistemi, sıcaklık ölçer bir sistem, akış görüntüleme sistemlerinden oluşmaktadır.

Deneylerde çalışmalarımızda ‘Dow Corning’ firması tarafından üretilen 5 cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı (polydimethylsiloxane polimers) kullanılmıştır. Tablo 1’de bu silikon yağının 25 °C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri verilmiştir.

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 olduğu için, akışkanla temas halinde olan yüzeylerinin homojen bir sıcaklık değerine sahip olması amacı ile tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan bakır kabın iç çapı 30 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Sabit sıcaklık konfigürasyonunun deney düzeneği

Deney düzeneğindeki ısıtma sistemi; silindirik kabın tam simetri ekseninden geçen, çapı silindirik kabın iç çapının %10’u kadar olan 3 mm’lik bir bakır boru ile sağlanmaktadır. Kullanılan bu bakır boru, içerisinden serbest olarak geçirilen 0.8 mm çapında krom-nikel tel, rezistans olarak kullanılmıştır. Krom-nikel rezistans telin uçları “Xantrex”

firması tarafından üretilen “XPD 18-30” model 0-18 V ve 0-30 A arasında DC gerilim sağlayabilen programlanabilir bir güç kaynağına bağlanmıştır. Bir bilgisayar yazılımı sayesinde güç kaynağı programlanarak, ısıtıcı duvar sıcaklığı istenilen hızda adım adım ısıtılabilir.

Tablo 1. 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25 °C’deki fiziksel özellikleri (SELVER 2005)

	Birimler	Değerler
Yoğunluk (ρ)	[kg/m ³]	913
Dinamik viskozite (μ)	[N.s/m ²]	4.45x10 ⁻³
Kinematik viskozite (ν)	[m ² /s]	4.88x10 ⁻⁶
Termal kondüksiyon katsayısı (k)	[J/m.s.K]	0.1172
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]	-5.87x10 ⁻⁵
Prandtl sayısı (Pr)	Birimsiz	67.0
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.		

Akışkanın dış yüzeyinin soğutulması için silindirik bakır duvara soğutma özelliği verecek şekilde düzenlenmiştir. Silindirik bakır kabın dış duvarının 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 ‘Heto’ firması tarafından üretilen 0.1 °C hassasiyete sahip cihaz ile sağlanmıştır. Bu cihaz istenilen sıcaklıklarda (0 – 300 °C aralığında) ayarlanabilmektedir.

Isıtıcı ve soğutucu duvarların sıcaklıklarının ölçülmesi için bu silindirik duvarların üzerine akışkanın serbest yüzeyi ile temas edecek şekilde 0.003 mm çapında 0.015 °C hassasiyete sahip Bakır-Konstantan T tipi izolasyonlu ısı çiftleri yüksek ısı iletim katsayısına sahip epoxy ile yapıştırılmıştır. 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 iki farklı noktadan 0.005 mm çapında 0.015 °C hassasiyete sahip Bakır-Konstantan T tipi izolasyonlu ısı çiftleri ile ölçülmüştür. İki farklı noktadan elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması deneyin yapıldığı ortam sıcaklık değerini vermektedir.

Deney düzeneği içerisinde kullanılan tüm ısı çiftlerinin diğer uçları “Omega” firması tarafından üretilen, “TempScan-1100” model, 0.1 °C hassasiyete sahip, aynı anda 32 noktadan saniyede 100 sıcaklık değeri alabilecek kapasitedeki bir sıcaklık ölçme cihazına bağlanmıştır. Bir bilgisayar ile gerçek zamanlı çalışabilen bu cihaz yardımı ile okunan sıcaklık değerleri, ChartView isimli ticari bir bilgisayar yazılımı kullanılarak, hem sayısal veri hem de grafiksel olarak görüntülenmiştir.

Bakır kap içerisine yerleştirilen akışkanın saydam olmasından dolayı, akışkan partikülünün hareketinin izlenebilmesi için akışkana 3 mikron çapında Al_2O_3 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 'Meiji' firması tarafından üretilen ve büyütme oranı 26 olan, Omega marka CCD kameralı bir mikroskop yerleştirilmiştir. Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki Al_2O_3 partiküllerinin izleri takip edilerek, akışkanın akış hareketinin kararlı yüzey gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanmıştır.

Deney aparatları hassasiyet sınır değerleri esas alınarak, 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 sıcaklığa tek tek ayarlanır ($T_C = +10, +12, +14, +16, +18, +20, +22, +24, +26$ °C) ve T_C sıcaklığının kararlı duruma geçmesi beklenir. İlk olarak; deney bölgesindeki akışkan yüksekliği istenilen akışkanın boyutsal oranına ($Ar = H/R = 0.5$ için) göre ayarlanır. Boyutsal orana bağlı yükseklik ayarlandıktan sonra, akışkanın kirliliği açısından ısıtıcı ve soğutucu bakır duvarların yüzeyleri etilalkol ile temizlenir. Akışkan, camdan yapılmış temiz bir enjektör ile yukarıda bahsedilen bakır kap içerisine 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 ChartView programı ile 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. Aynı işlemler, farklı boyutsal oranlar ve farklı ortam sıcaklıkları için tekrarlanır. Tekrarlanan her bir deney için değiştirilen parametrelerin, akışkanın kararlı yüzey gerilim hareketinden osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçiş noktaları üzerine etkileri araştırılmıştır.

ÖNEMLİ BOYUTSUZ PARAMETRELER

Deney anında istenilen soğuk duvar sıcaklığı (T_C), istenilen boyutsal oran (Ar) ve ortam sıcaklığı (T_R) sabit tutulurken, ısıtıcı duvar sıcaklığı (T_H) adım adım artırılmaktadır. Akışkanın iç ve dış 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 şunlardır:

Boyutsal oran,	$Ar = \frac{H}{R}$
Prandtl sayısı,	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$
Yüzey gerilim Reynolds sayısı,	$Re_{\sigma} = \frac{ \sigma_T (\Delta T_{kr})R}{\nu \mu}$
Marangoni sayısı,	$Ma = Pr Re_{\sigma} = \frac{ \sigma_T (\Delta T_{kr})R}{\alpha \mu}$

Burada; H silindirin içerisindeki akışkanın dikey yüksekliği, R silindirin içerisindeki ısıtıcı duvar ile soğutucu duvar arasındaki yatay mesafe, 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 akışkanın kararlı durumdan periyodik osilasyonlu duruma geçiş noktasını belirleyen önemli bir parametredir. Akışkanın geçiş noktasının altındaki değerlerde homojen ve kararlı yüzey gerilim hareketi, üzerindeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketi gerçekleşir.

Bu deneysel çalışmadaki parametrelerin sınır değerleri ise; akışkanın boyutsal oranı $Ar = 0.5$, soğuk duvar sıcaklık değerleri $T_C = 10 \text{ }^\circ\text{C} - 26 \text{ }^\circ\text{C}$ de değişirken ortam sıcaklıkları ise $T_R = 12 - 23 \text{ }^\circ\text{C}$ de sabit tutulmuştur. Bu değişken parametrelerden hesaplanan boyutsuz kritik sayıların sınır değerleri ise; $Ma_{kr} = 5.9 \times 10^5 - 6.9 \times 10^5$, $Pr_{kr} = 29 - 34$ dür. Kritik Marangoni sayısı hesaplanırken, akışkanın ortalama sıcaklığı olan $T_M = 1/2(T_H + T_C)$ değeri kullanılmıştır.

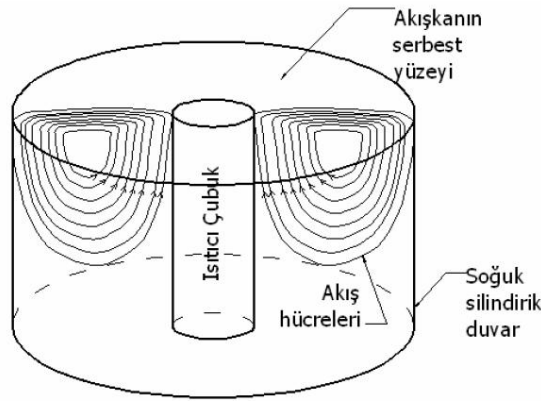
TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada boyutsal oran (Aspect ratio), $Ar = H/R = 0.5$ değerinde sabit tutulmuştur. Sabit sıcaklık konfigürasyonu kullanılarak normal şartlarda ($+25 \text{ }^\circ\text{C}$ de) $Pr = 72$ olan silikon yağının ortam sıcaklığının, akışkanın boyutsal oranının ve soğuk duvar sıcaklığının akışkan yüzey gerilim hareketleri üzerine etkileri incelenmiştir.

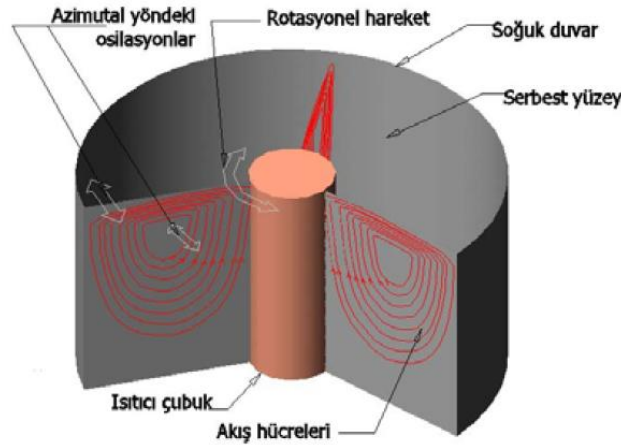
Yüzey gerilim akış hareketi Marangoni konveksiyonu olarak da bilinmektedir. Marangoni konveksiyon hareketinin durumu Marangoni sayısı tarafından belirlenir. Yukarıda; boyutsuz parametreler bölümünde bahsedildiği gibi Marangoni sayısının önemli parametrelerinden birisi de kritik sıcaklık farkıdır. Bu 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 $T_R = +12 \text{ }^\circ\text{C}$ de sabit ve akışkanın boyutsal oranının $Ar = 0.5$ olduğu bir durumda silindirik kabın soğutucu duvar sıcaklığı $T_C = +10 \text{ }^\circ\text{C}$ de sabit tutularak ısıtıcı duvar sıcaklığı adım adım arttırıldığında silindirik kap içerisindeki

akışkan içerisinde Şekil 3’de görüldüğü gibi simetrik akış ipçikleri oluşmaktadır. Sıcaklık arttırılmaya devam edildiğinde, ısıtıcı duvar sıcaklığı ile soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki fark belirli bir değeri geçtikten sonra silindirik kap içerisindeki kararlı yüzey gerilim hareketi yapan akışkan periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketine geçecektir. Yukarıda bahsedilen şartlar altında, yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın ısıtıcı duvar sıcaklığı $T_H = +130.1$ °C’ye ulaştığında periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketinin başladığı gözlenmiştir. Bu durumda kritik sıcaklık farkı, $\Delta T_{kr} = T_H - T_C = 120.1$ °C olarak hesaplanmıştır. Akışkanın akış hareketinin, periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketine başladığı kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değeri tespit edildikten sonra ısıtıcı duvarın sıcaklığı adım adım artırılarak, periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketi izlenmeye devam edilir. Bu periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketi Şekil 4’de gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi akışkanın serbest yüzeyindeki sıcaklık osilasyonunun genliği diğer bölgelerdeki sıcaklık osilasyonunun genliğinden büyüktür. Bunun nedeni ise akışkanın serbest yüzeyindeki sıcaklık değişiminin değeri diğer bölgelerdeki sıcaklık değişimine göre yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

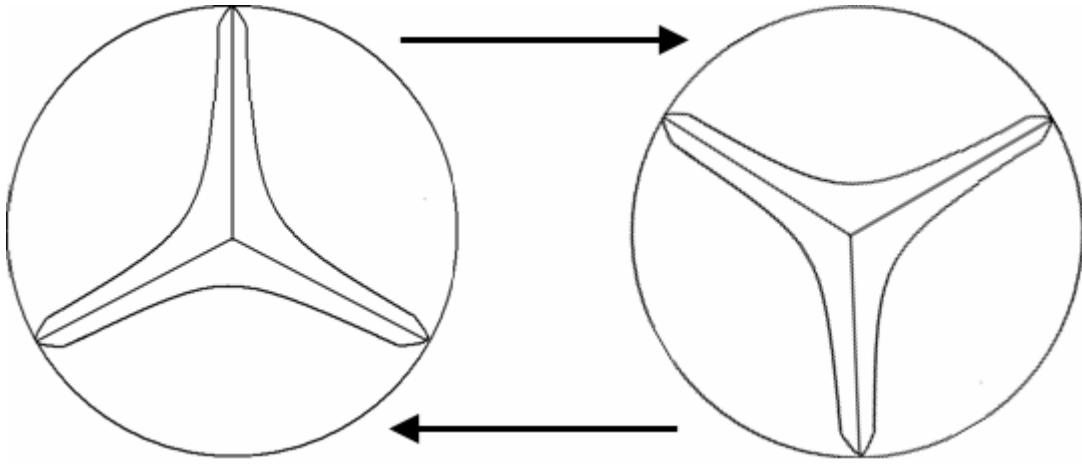


Şekil 3. Akışkanın kararlı haldeki yüzey gerilim hareketinin şematik görünüşü



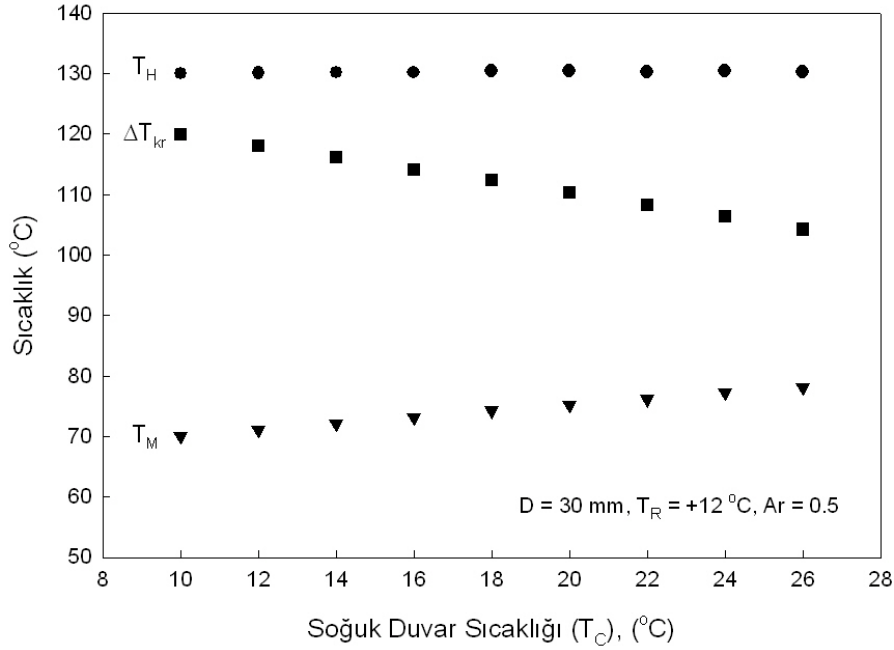
Şekil 4. Akışkanın periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketinin şematik görünüşü

Şekil 4’de görülüşü gibi üç farklı bölgede görülen akış ipçiklerinin üzerindeki akışkanın serbest yüzeyindeki periyodik osilasyon aktif periyot konumunda iken yani akışkan partikülü ısıtıcı duvar yüzeyinden başlayıp soğutucu duvar yüzeyine doğru hızla ilerlerken bir sonraki periyotta ise bu bölgeler pasif yani geriye doğru çekilirken iki aktif periyot arasında kalan bölgedeki akışkan partikülleri ısıtıcı duvar yüzeyinden soğutucu duvar yüzeyine doğru aktif konuma geçer vaziyet alacaklardır. Diğer bir ifadeyle Şekil 4’de görülen akış ipçikleri üzerindeki akışkan partiküllerinin ısıtıcı duvardan soğutucu duvara doğru hızla ilerlerken bu konumun aynen silindirik kap içerisinde tam 60° saat yönünde veya saat yönünün tersinde döndürülmüş vaziyete gelir. Bu osilasyon mekanizması için akışkan hareketinin ardışık konumları Şekil 5 de gösterildiği gibidir.



Şekil 5. Periyodik osilasyon mekanizmasının şematik görünüşü

Bu periyodik osilasyonlu 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 olduğun için bu akışkanın bir kısmı buharlaşarak yok olmaktadır. Buharlaşıp yok 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 için deney düzeneği tamamen temizlenerek taze akışkan deney düzeneğine yerleştirilir. Deney düzeneğine yerleştirilen akışkan için yukarıda bahsedilen işlemler ve prosedür yine $T_R = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $Ar = 0.5$ olduğu durumda $T_C = +12 \text{ }^\circ\text{C}$ için tekrarlanır. Soğuk duvar sıcaklığı $T_C = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de sabit tutuldu durum için ise ısıtıcı duvar sıcaklığı $T_H = 130.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ye ulaştığında periyodik osilasyonlu yüzey gerilim hareketinin başladığı gözlenmiştir. Bu durumda kritik sıcaklık farkı $\Delta T_{kr} = (T_H - T_C) = +118.2 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Bu yukarıda bahsedilen işlemler ve prosedür farklı soğuk duvar sıcaklıkları olan $T_C = +14, +16, +18, +20, +22, +24$ ve $+26 \text{ }^\circ\text{C}$ değerlerinin her birisi için tek tek tekrarlanır. Her bir T_C için elde edilen sayısal değerler Şekil 6’daki grafikte verilmiştir.

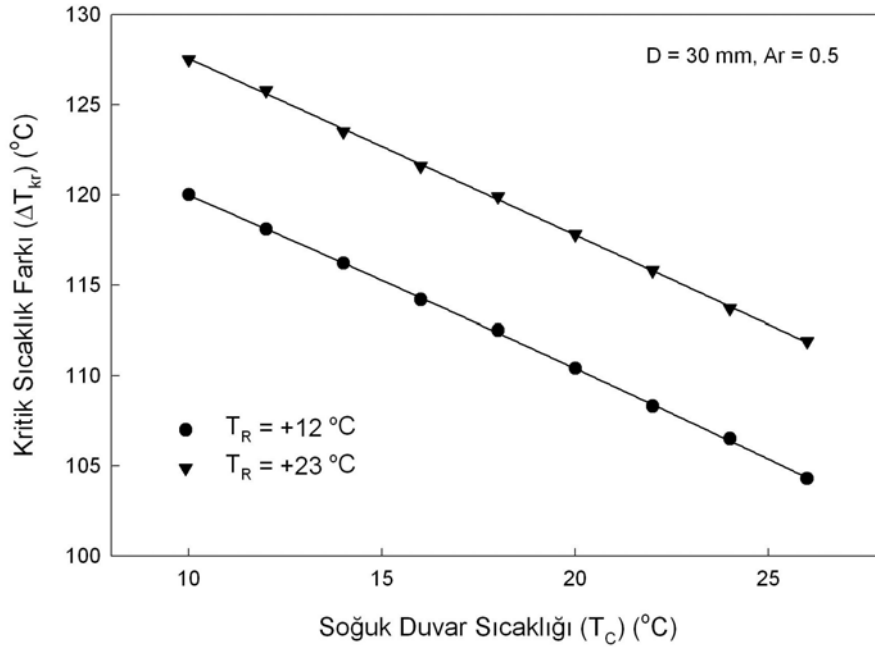


Şekil 6. Sıcaklıkların, akışkanın soğuk duvar sıcaklıklarına göre değişimi

Genel olarak, Şekil 6 incelendiğinde, soğutucu duvar sıcaklığı arttıkça kararlı yüzey gerilimli akış hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilimli akış hareketine geçiş noktasını belirleyen ΔT_{kr} değeri azalmaktadır. Bu azalma 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 sıcaklığındandır. 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) olduğu düşünülerek; 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 edilirse $[\Delta T_{T_C=+10\text{ }^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_C=+10\text{ }^\circ\text{C}}} - T_R)]$ ve $[\Delta T_{T_C=+26\text{ }^\circ\text{C}} = (T_{M_{T_C=+26\text{ }^\circ\text{C}}} - T_R)]$ karşılaştırıldığında görülecektir ki $[\Delta T_{T_C=+10\text{ }^\circ\text{C}} < \Delta T_{T_C=+26\text{ }^\circ\text{C}}]$ olacaktır. Isı kaybı, akışkanın serbest yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı değerine bağlı olacağından, matematiksel olarak $[Q_{T_C=+10\text{ }^\circ\text{C}} < Q_{T_C=+26\text{ }^\circ\text{C}}]$ olacaktır. Dolayısıyla; sıcaklık farkı değerinin küçülmesiyle ısı

transferi azalacak, akışkan yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama geçen ısı miktarı soğutucu duvar sıcaklığı küçüldükçe azalacaktır.

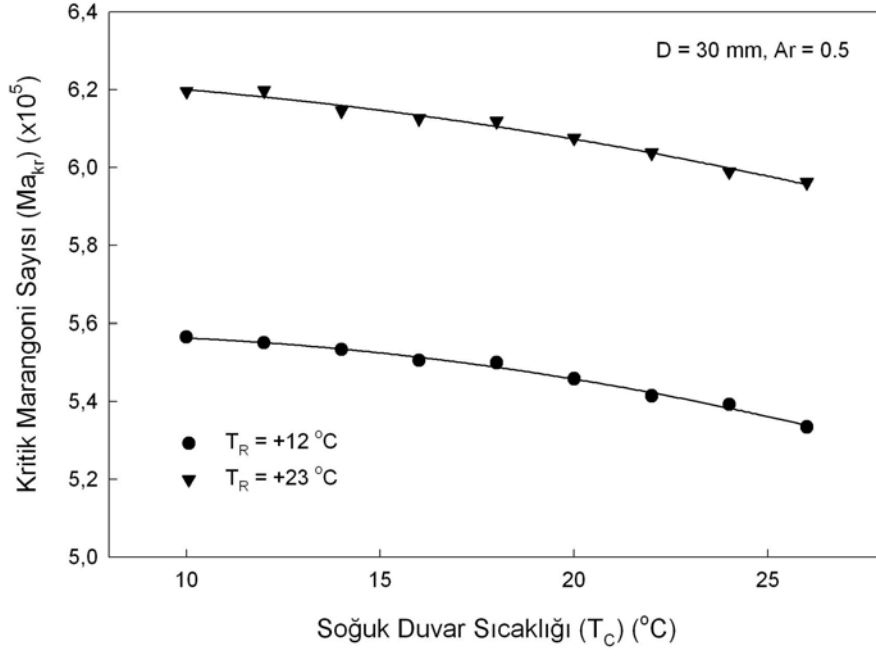
Ortam sıcaklığı $T_R = +12$ °C olduğu durumda yapılan deneyler tamamlandıktan sonra, ortam sıcaklığı $T_R = +23$ °C için de deneyler aynen tekrarlanmıştır. Bu deneylerin sonuçları Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekilde, aynı boyutsal oranda ve farklı ortam sıcaklıklarındaki yüzey gerilim akış hareketinin kritik sıcaklık farklarının değerleri ve bu değerler için regresyon analizi 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 7. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farklarının akışkanın soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Şekil 7’de verilen 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 (Ma_{kr}) soğuk duvar sıcaklıkları ile değişimi ise regresyon analizi ile birlikte Şekil 8’deki grafikte gösterilmektedir. Boyutsuz Marangoni sayısı Tablo 1’de verilen silikon yağının kinematik viskozitesinin değişimini veren ifadede ortalama akışkan sıcaklığı (T_M) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi ortam sıcaklığı azaldıkça ve soğuk duvar sıcaklığı arttıkça boyutsuz Marangoni sayısı azalmaktadır. Bu kritik Marangoni sayısı, kritik sıcaklık farkı değerinin ve akışkanın dinamik viskozitesinin bir fonksiyonudur. Ma_{kr} , ΔT_{kr} değeri ile doğru orantılı iken dinamik viskozite değeri ile ters orantılıdır. Şekil 8’de görüldüğü gibi T_c ’nin artması ile kritik Marangoni sayısının

azalmasının sebebi; T_C 'nin artmasının sonucunda, yukarıda bahsedildiği gibi ΔT_{kr} değerindeki değişimi, dinamik viskozite değerindeki değişim ile karşılaştırıldığında ΔT_{kr} değerindeki değişimin büyüklüğünün daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. Farklı ortam sıcaklıklarında, kritik Marangoni sayılarının akışkanın soğuk duvar sıcaklıklarına göre değişimi

Sonuç olarak; yüksek Prandtl sayısına sahip akışkan kullanılan, sabit sıcaklık konfigürasyonundaki, kararlı yüzey gerilim akış hareketinden periyodik osilasyonlu yüzey gerilim akış hareketine geçiş olan kritik sıcaklık farkı değerinin, soğuk duvar sıcaklığının artması ile azaldığı ve ortam sıcaklığının yükselmesi ile birlikte arttığı bu deneysel çalışmada belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi tarafından 1461-D06 no'lu proje ile desteklenmiştir. Bu çalışmaya vermiş oldukları destekten dolayı Süleyman Demirel Üniversitesine teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- CHUN CH, WUEST W, 1978. A Micro-Gravity Simulation of Marangoni Convection. *Acta Astronautica*, 5, 9, 681-686.
- KAMOTANI Y, OSTRACH S, VARGAS M, 1984. Oscillatory Thermocapillary Flow in A Simulated Floating-Zone Convection Configuration. *Journal of Crystal Growth*, 66, 83-90.

- KAMOTANI Y, OSTRACH S, 1988. Theoretical Analysis of Thermocapillary Flow in Cylindrical Columns of High Prandtl Number Fluids. *Journal of Heat Transfer*, 120, 758-764.
- KAMOTANI Y, LEE JH, OSTRACH S, PLINE A, 1992. An Experimental Study of Oscillatory Thermocapillary Convection in Cylindrical Containers. *Physics of Fluids A*, 4, 5, 955-962.
- KAMOTANI Y, WANG L, HATTA S, SELVER R, YODA S, 2001a. Effect of Free Surface Heat Transfer on Onset of Oscillatory Thermocapillary Flow of High Prandtl Number Fluid. *Journal of The Japan Society of Microgravity Application*, 18, 4, 283-288.
- KAMOTANI Y, WANG L, HATTA S., SELVER R, BHUNIA P. S, AND YODA S, 8-11 January 2001b Effect of Cold Wall Temperature on Onset of Oscillatory Thermocapillary Flow, *39 th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV*.
- LAVALLEY R, AMBERG G, ALFREDSSON H, 2001. Experimental and Numerical Investigation of Nonlinear Thermocapillary Oscillations in An Annular Geometry. *European Journal of Mechanics B-Fluids*, 20, 771-797.
- OSTRACH S, 1977. Motion Induced by Capillarity. *Physicochemical Hydrodynamics*, 2, 571-589.
- OSTRACH S, 1979. Convection due to Surface-Tension Gradients. *(COSPAR) Space Research*, 19, 563-570.
- PIMPUTKAR SM, OSTRACH S, 1981. Convective effects in crystals grown from melt. *Journal of Crystal Growth*, 55, 614-646.
- SCHWABE D, SCHARMANN A, PREISSER F, OEDER R, 1978. Experiments on Surface Tension Driven Flow in Floating Zone Melting. *Journal of Crystal Growth*, 43, 305-312.
- SCHWABE D, 1981. Marangoni effects in crystal growth melt. *Physico-Chemical Hydrodynamics*, 2 (4), 263-280.
- SELVER R, 2005. Experiment on the Transition from the Steady to the Oscillatory Marangoni Convection of a Floating-Zone under Various Cold Wall Temperatures and Various Ambient Air Temperature Effects. *Microgravity Science and Tecnology*, 17, 25-35.