

ESNEK BÖLGE KONFIGÜRASYONUNDA YÜZEY GERİLİMİ İLE MEYDANA GELEN TAŞINIMLI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

Ramazan SELVER ve Nilay UGUZ

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, S.D.Ü., Çünür Kampüsü, 32260, Isparta,
rselver@mmf.sdu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, esnek bölge konfigürasyonunun yüzey gerilimli akış hareketinin deneysel bir çalışması sıcaklık ölçümleri ve akış görüntüleri kullanılarak araştırılmıştır. Hakim olan yüzey gerilimli akış hareketinin meydana gelmesi için üst bakır çubuk tarafından dikey konumdaki akışkan kolonu ısıtılmıştır. Deney akışkanı olarak 5 cSt silikon yağı kullanılarak bazı şartlar altında akış ve sıcaklık osilasyonları gözlenmiştir. Değişen şartlar için kritik sıcaklık farkları ölçülmüş ve mikroskop sistemi sayesinde akış şekilleri gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kararlı Marangoni taşınım, periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım, yüzey gerilimli akış.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF SURFACE TENSION DRIVEN CONVECTION FLOW IN FLOATING-ZONE CONFIGURATION

ABSTRACT

In this study, an experimental study of thermocapillary flow in a floating zone configuration is investigated by flow visualization and temperature measurements. A vertical liquid column is heated by top copper rod to generate predominantly thermocapillary flow. Flow and temperature oscillations are observed under certain conditions using 5 cSt silicone oil as the test fluid. The critical temperature differences are measured for various conditions and the flow patterns are observed by a microscope system.

Keywords: Steady state Marangoni convection, oscillatory Marangoni convection, thermocapillary flow.

GİRİŞ

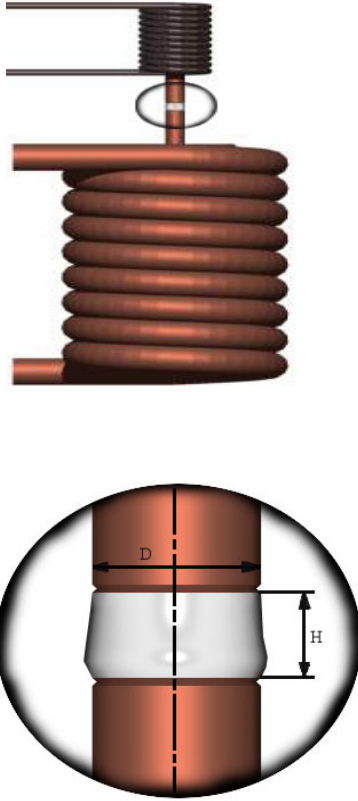
Yarı iletken malzemelerin alt yapısını oluşturan kristallerin kalitesinin artırılması için son yıllarda birçok teknikler kullanılmıştır [2]. Bunlardan en önemlisi esnek bölge konfigürasyonu olup, Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu konfigürasyonda silindirik, çapı sabit ve 3 mm olan iki bakır çubuk (sıcak ve soğuk çubuk) arasına akışkan yerleştirilerek, bu akışkanın yüzey gerilim hareketinin değişmesine sebep olan farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. Bu farklı parametreler; farklı soğuk çubuk sıcaklıkları, deneyin yapıldığı farklı ortam sıcaklıkları ve silindirik çubukların arasında asılı konumdaki silindirik akışkanın dikey konumdaki yükseklik değerleridir.

Yukarıda bahsedilen farklı parametreler altında silindirik deney akışkanının alt bölümündeki soğuk duvar sıcaklığı ile üst bölümündeki sıcak duvar

sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı meydana gelen, akışkan ile hava arasındaki ara kesit bölgesinde akışkanın fiziksel özelliklerinden olan viskoziteden kaynaklanan yüzeysel hareket meydana gelmekte olup; bu yüzeysel hareket ile akışkanın bütün hacmini kapsayan kararlı akış durumundan periyodik osilasyonlu akış durumuna geçmektedir.

Günümüze değin esnek bölge konfigürasyonu ile ilgili değişik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve farklı sonuçlar elde edilmiştir. Ostrach [1] tarafından deneysel ve teorik olarak farklı şartlar altında akışkan hareketi incelenmiştir.

Kamotani ve arkadaşları [2] tarafından esnek bölge konfigürasyonunda yüksek Prandtl sayısına sahip akışkan kullanılarak kararlı ve osilasyonlu akış hareketini boyutsal analiz kullanarak teorik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmalarında kararlı yüzey



Şekil 1. Esnek bölge konfigürasyonunun test bölgesi

gerilim hareketinden periyodik osilasyonlu yüze gerilim hareketine geçişte akışkan - hava ortak yüzeyindeki deformasyonunun önemli bir etken olduğu sonucuna varmışlardır.

Prandtl sayısı 9.8 olan akışkanın silindirik kolonunun, üst çubuk ile üstten ısıtılarak ve alt çubuk ile alttan da soğutularak oluşturulan bir konfigürasyonda yüze gerilim hareketinden meydana gelen doğal taşınımı gözlenmiştir. Preisser [3] kararlı (steady state) yüze gerilim taşınımının boyutsal oranı ($H/D < 1$ (H: akışkanın dikey yüksekliği, D: akışkanın silindirik çapı) olduğu durumda en yüksek kritik Marangoni sayısının $Ma_c = 7 \times 10^3$ değerine göre; Marangoni sayısı (yüze gerilim kuvvetlerinin ısı kuvvetlere oranı) bu değerden az ise kararlı, bu değer üzerinde ise periyodik osilasyonlu yüze gerilim hareketinden kaynaklanan doğal taşınım hareketi elde etmiştir. Bu elde edilen periyodik osilasyonlu yüze gerilim hareketi incelendiğinde silindirik konumdaki akışkanın akışkan - hava arakesitindeki hareketi akışkan yüzeyi boyunca tamamlandıktan sonra soğuk çubuğa yakın yerlerde ivmelenen akışkan çevresel olarak merkeze doğru yönelerek akışın devamlılığını sağlayan iç hacimdeki hareket üç boyutlu olarak devam eder. Çevresel yüze hareketinin silindirik akışkanın dikey aksel merkezinde meydana gelen ayrılma yüzeyi olan simetrik ayrılma yüzeyi dik konumdan çıkar ve eğik konumda aksi simetrik rotasyonel hareket yaparak akış hareketini sürdürür.

Periyodik osilasyonlu yüze gerilim hareketi yapılmış olan deneysel çalışmada da gösterilmiştir.

Schwabe ve arkadaşları [4] tarafından esnek bölge konfigürasyonu kullanılarak düşük yer çekimi ivme değerlerinde ve normal yer çekimi ivme değerlerinde hem yukarıdan ısıtılıp aşağıdan soğutulan hem de aşağıdan ısıtılıp yukarıdan soğutulan metodu kullanılarak deneysel olarak osilasyonlu yüze gerilim hareketini incelemiştir. Kullandıkları test akışkanı $NaNO_3$ ve $C_{24}H_{50}$ ile Argon (Ar) atmosferi altında KCl olup, deneylerde aşağıdan ısıtılan konfigürasyondaki kararlı akışın eğiliminin daha dengeli olduğunu gözlemiştir. Periyodik osilasyonlu akış hareketinin karakterinin yer çekimi vektörü yönü doğrultusunda önemli bir rol oynadığı yapılan araştırmalarda elde edilmiştir. Ayrıca yaptıkları çalışmalarda silikon için sıcaklık gradyeninin 5 K/cm değerinde kritik bir değer olduğu ve bu değer üzerinde değerlerde osilasyonun başladığını gözlemiştir.

Chun [5] esnek bölge konfigürasyonunda farklı viskoziteye sahip silikon yağları ile octadecane ($C_{18}H_{38}$) akışkanı kullanılarak elde edilen Marangoni taşınımının kararlı ve periyodik osilasyonlu konumlarındaki akışkan - hava ara kesit bölgesi sıcaklık profilini deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen değerlere göre farklı sıcaklık gradyenlerinin yüze gerilim akış hareketine doğrudan etkili olduğunu ve bu sıcaklık gradyeninin periyodik osilasyonlu akış modundaki sıcaklık osilasyon frekansının farklı sinüzoidal dalgalanmalara etken olduğunu elde etmiştir.

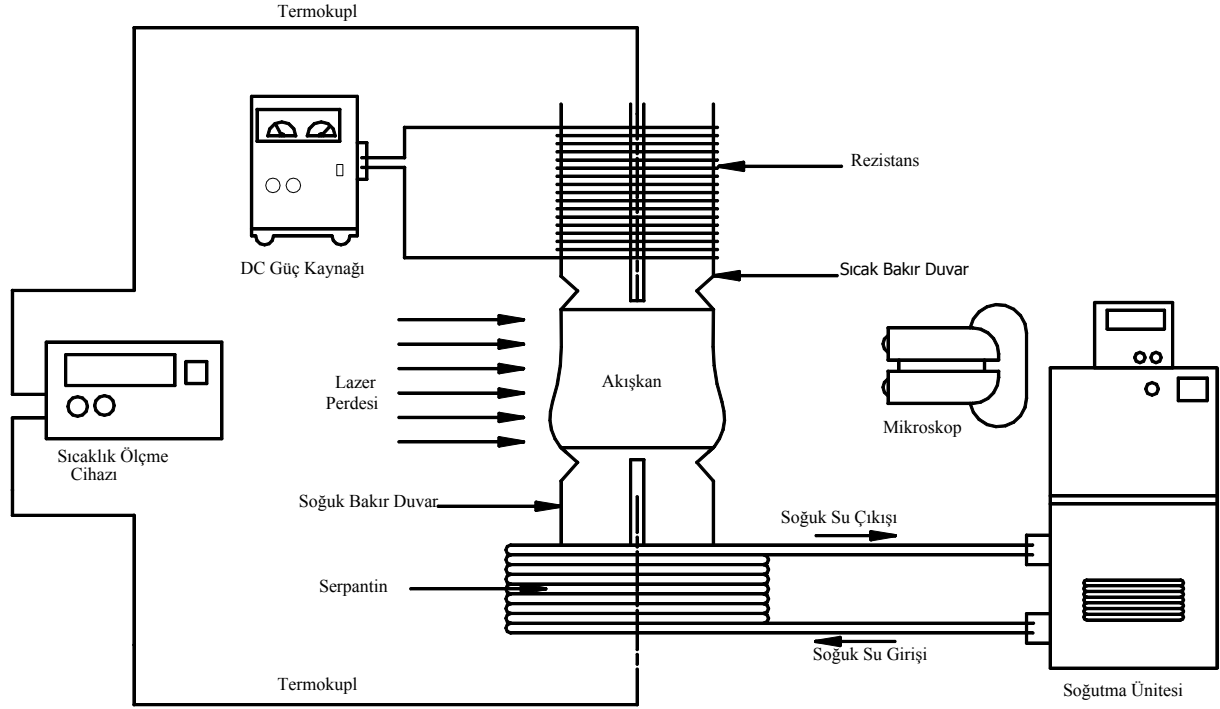
DENEY APARATLARI VE YÖNTEMİ

Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 2'de verilmiştir. Esnek bölge konfigürasyonunda akışkandaki doğal taşınım etkisini en aza indirmek için ısıtıcı çubuğun üst tarafta soğutucu çubuğun alt tarafta olduğu metot kullanılmıştır.

Şekil 2'de verilen deney düzeneği; deney akışkanı, deney bölgesi ısıtma sistemi, termokupullar, sıcaklık ölçme cihazı, akış görüntüleme sistemi ve akışkanın yüksekliğini hassas şekilde ayarlayan deney aparatından oluşmaktadır.

Deneysel çalışmada deney akışkanı olarak 'Dow Corning' firmasından ticari olarak alınan, 5cSt kinematik viskoziteye sahip silikon yağı (polydimethylsiloxane polimerleri) kullanılmıştır. Bu silikon yağının 25 °C sıcaklıktaki fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Deneysel bölgede kullanılan akışkanla temas halinde olan sıcak duvar ve soğuk duvar çapı 3 mm olan saf bakırdan yapılmıştır. Silindirik duvarların malzemesi yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı



Şekil 2. Deneysel düzeneğin şematik genel görünüşü

Tablo 1. 5 cSt viskoziteye sahip silikon yağının 25°C'deki fiziksel özellikleri [6]

	Birim	Değer
Yoğunluk (ρ)	[g/cm ³]	0.913
Dinamik viskozite (μ)	[dyn.s/cm ²]	0.0488
Kinematik viskozite (ν)	[cm ² /s]	0.05345
Isı iletim katsayısı (k)	[W/cm.K]	0.00116
Isıl difüzyon katsayısı (α)	[cm ² /s]	7.42×10^{-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. Sıcaklık birimi (°C).		

bakır olarak seçilmiştir. Ayrıca bu bakır duvarlar, akışkanın yüzey gerilim hareketinin homojen olarak gerçekleşmesinde önemli rol oynamaktadır. Silindirik bakır duvarların her birinin merkezinden akışkan yüzeyine derinliği 0.5 mm kalacak şekilde iki adet termokupul yerleştirmek için 1 mm çapında delikler açılmıştır.

Şekil 2'de görüldüğü üzere; silindirik sıcak bakır duvar ve silindirik soğuk bakır duvarın akışkana temas yüzeyine yakın bölgelerden radyal yönde çentikler açılmıştır. Bu çentikler akışkanın silindirik bakır duvarlarının radyal ısıtma yüzeylerinin azaltılması amacı ile yapılmıştır.

Deneysel düzeneğinde ısıtmayı gerçekleştirmek amacıyla 0.5 mm çapında krom-nikel telden imal edilen elektrik rezistansı kullanılmıştır. Havanın doğal taşınımının akışkana yakın noktalarda akışkanı etkilememesi için bu rezistans akışkan yüzeyinden 5 mm yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiştir ve

akışkanla temas halindeki bakır silindirik duvarın yüzeyine sarılmıştır. Rezistansın uçları "Phillip Harris" firması tarafından üretilen AC-DC akımı veren 0-25 volt arasında çalışan güç kaynağına bağlanmıştır.

Akışkan yüzeyinin alt bölgesinin soğutulması için silindirik bakır duvara soğutma özelliği verecek şekilde uyarlanmış akışkan test bölgesi oluşturulmuştur. Silindirik bakır duvarın üzerine bakır borudan yapılmış serpantin sıkı bir şekilde sarılmıştır. Soğutucu bakır duvarın soğutulması 0-300°C aralığında soğutma ve ısıtma yapabilen, 'Heto' firması tarafından üretilen 0.1°C hassasiyete sahip cihaz ile sağlanmıştır.

0.25 mm çapında ve 0.015°C hassasiyette olan copper-constantan T tipi izoleli termokupullar ısıtıcı ve soğutucu bakır duvar sıcaklıklarının ölçülmesi için, bu silindirik duvarların merkezinde açılan kanallara yerleştirilmiştir. Kanallara yerleştirilen termokupul-

ların 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 osilasyonlu hale geçinceye kadar ki hassasiyeti belirler.

Yapılan çalışmada deney bölgesinin çevresindeki ortam sıcaklığı dört farklı noktadan sıcaklığa karşı çok hassas hassasiyete sahip iron-constantan J tipi izoleli termokupullar ile ölçülmüştür. Dört farklı noktadan elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması deneyin yapıldığı ortamın sıcaklığını verir.

Sıcak ve soğuk duvarlara yerleştirilen termokupulların diğer uçları 'Omega' firması tarafından üretilen ve 0.1°C hassasiyeti olan 'DP26-TC-230' model sıcaklık ölçer cihazına bağlanmıştır. Bu cihaz iki kanallı olup, kanalların herbirinin sıcaklık değerini verdiği gibi kanallar arasındaki sıcaklık farkını veren özelliğinden dolayı da deney anında gerekli olan ve ihtiyaç duyulan ısıtıcı ve soğutucu duvarlar arasındaki sıcaklık farkının anlık hassasiyetini verir. Ortam sıcaklığını ölçen J tipi termokupulların diğer uçları ise 1°F hassasiyete sahip yirmi kanallı 'Newport' model sıcaklık ölçere bağlanmıştır.

Isıtıcı ve soğutucu duvarlar arasına asılan akışkanın saydam bir akışkan olmasından dolayı, akışkan partikülünün hareketinin izlenebilmesi oldukça zordur. Bu nedenle akışkan içerisine 3 mikron çapında Al_2O_3 partikülleri ilave edilmiştir. Bu partiküllerin hareketleri yüzey gerilim hareketlerinin karakterini gösterir. Silindirik konumdaki akışkanın deney anında homojen bir yapıya sahip olmasından dolayı üç boyutlu akışkan hareketi meydana gelir. Bu boyutlardan radyal olanında akışkan partikülünün hareketi simetriden dolayı akışkanın her bölgesinde ve her açısında sabit kalmaktadır. Silindirik saydam akışkana, akışkanın merkezinden geçecek şekilde ve dalga boyu 630 - 670 nm olan kırmızı lazer ışığı uygulanarak lazer perdesi oluşturulmuştur. Lazer perdesi üzerindeki akış hareketinin rahatlıkla gözlenebilmesi için, perdeye dik olacak şekilde 'Western Electric' firması tarafından üretilen ve büyütme oranı 26 olan bir mikroskop yerleştirilmiştir. Bu mikroskop ile lazer perdesi üzerindeki 3 mikron çapındaki Al_2O_3 partiküllerinin izleri takip edilerek, akışkanın akış hareketinin kararlı Marangoni taşınım hareketinden periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım hareketine geçtiği noktaların dikkatle izlenmesi sağlanır.

Yüzey gerilim akış hareketlerinin karakterini belirleyen önemli parametrelerden biri de akışkanın boyutsal oranıdır. Bu boyutsal oran akışkan dikey yüksekliğinin akışkan çapına oranı olup akışkanın akış karakterinin değişim noktasını etkilemektedir. Deneysel çalışmalarda değişik oranlar için akışkanın

çapının sabit tutulması ile akışkanın dikey yüksekliğinin değişimi önem kazanmaktadır. Deneysel çalışmalar esnasında akışkan yüksekliğinin hassas olarak ölçülmesi bu çalışmanın hassasiyetini belirlemektedir. Deney akışkanının dikey yüksekliği 0.01 mm hassasiyete sahip bir komparatör ile kalibre edilmiştir.

Deneyler ortam sıcaklığı $T_R = +10^\circ C$, $+16^\circ C$ ve $+23^\circ C$ 'de ve ortamın titreşimsiz olduğu anlarda gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi; sıcak bölgenin üstte soğuk bölgenin altta olması halinde deney aparatları kendi hassasiyetleri ölçüsünde teker teker açılır. Bunlardan sabit sıcaklıktaki soğutucu sirkülasyon cihazı istenilen sıcaklığa ayarlanır ve T_C sıcaklığının kararlı duruma gelmesi beklenir. İlk olarak; deney bölgesindeki akışkan yüksekliği akışkanın boyutsal oranına ($Ar=H/D=0.5$ için) bağlı kalınarak 1.5 mm ye göre komparatör ile ayarlanır. Boyutsal orana bağlı yükseklik ayarlandıktan sonra, akışkanın kirliliği açısından ısıtıcı ve soğutucu bakır duvarların yüzeyleri etilalkol ile temizlenir. Silindirik bakır çeper üzerindeki etilalkol kuruduktan sonra bir hava kompresörü ile tekrar temizlenir. Silindirik bakır duvarlar arasına asılan akışkanın yerçekiminden ve akışkanın ıslaklığından dolayı bazen alt bakır duvar üzerinden akışkan kayarak hacimsel olarak eksilirken, bazen de bu etkiler akışkanın kayarak tamamen yok olmasına sebep olmaktadır. Bunu önlemek amacıyla; 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 silindirik bakır duvarlar arasına yerleştirilir. Akışkanın akış hareketinin rahat bir şekilde izlenebilmesi için eser miktarda Al_2O_3 partikülleri iğne ucu ile akışkana enjekte edilir. Akışkanın merkezinden geçecek şekilde lazer perdesi oluşturulur, daha sonra mikroskop akışkan perdesine odaklanır. Başlangıçta ortam sıcaklığına ($T_R = +10^\circ C$) haiz olan sıcak duvar sıcaklığı (T_H) güç kaynağı kullanılarak kademeli olarak arttırılır.

Periyodik osilasyonun başladığı kritik sıcaklık farkı (ΔT_{kr}) değeri ise sıcaklık ölçer cihazından elde edilen T_H ve T_C değerlerinden hesaplanır. Deneyler aynı şartlar altında üçer defa tekrarlanır ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, deneydeki akışkanın periyodik osilasyona başlama noktası bulunmuş olur. Akışkan hareketinde; kritik sıcaklık farkının altındaki değerlerde kararlı Marangoni taşınım, üstündeki değerlerde ise periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım olarak görülmüştür. Hazırlanan deney aparatları sayesinde değişik ortam sıcaklıklarında yüzey gerilim hareketleri ile başlayan akışkanın, akış hareketlerinin geçiş noktaları üzerine etkileri araştırılmıştır.

BOYUTSUZ PARAMETRELER

Esnek bölge konfigürasyonunda yüzey gerilim hareketlerinin incelenmesinde önemli olan parametreler bu bölümde açıklanacaktır. Yapmış olduğumuz deneysel çalışmada yüzey gerilim akış hareketlerinin karakterini aşağıdaki boyutsuz sayılar belirlemektedir. Bu boyutsuz sayılar sırasıyla şunlardır:

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

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

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

$$\text{Marangoni sayısı, } Ma = Pr Re_{\sigma} = \frac{|\sigma_T|(\Delta T)H}{\alpha\mu}$$

Burada; D akışkanın çapı, H akışkanın dikey yüksekliği, ν akışkanın kinematik viskozitesi, α akışkanın ısı difüzyon katsayısını, μ akışkanın dinamik viskozitesi, $|\sigma_T|$ akışkanın yüzey gerilim sıcaklık katsayısı, ΔT akışkana uygulanan sıcaklık farkı, ($\Delta T = T_H - T_C$) 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 en düşük ve en yüksek sınır değerleri sırası ile: T_R için; $+10^\circ\text{C}$, $+16^\circ\text{C}$ ve $+23^\circ\text{C}$, Ma_{kr} (kritik Marangoni sayısı); $1.2 \times 10^4 - 1.6 \times 10^4$ dir. Kritik Marangoni sayısı belirlenirken akışkanın ortalama sıcaklığı için $T_M = 1/2(T_H + T_C)$ ifadesi kullanılmıştır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada farklı deney odası sıcaklığı (ortam sıcaklığı); $T_R = +10^\circ\text{C}$, $T_R = +16^\circ\text{C}$, $T_R = +23^\circ\text{C}$ değerlerinde sabit tutularak esnek bölge konfigürasyonu ile, normal şartlarda ($+25^\circ\text{C}$ 'de) $Pr=72$ olan silikon yağının serbest yüzeyinin düz (dikey) konumdaki farklı boyutsal oranlarında ve farklı soğuk duvar sıcaklıklarında akışkanın yüzey gerilim hareketleri üzerine etkileri incelenmiştir.

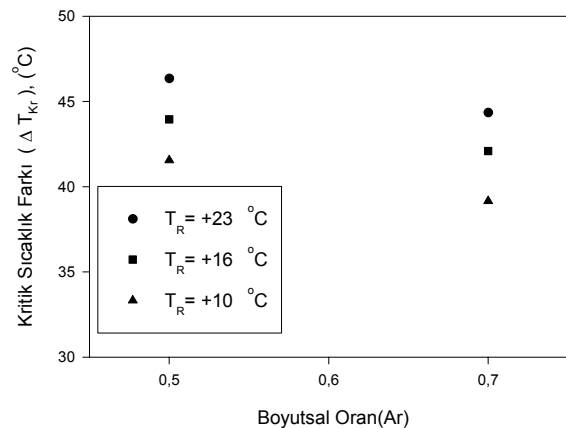
Literatürde, yüzey gerilim akış hareketi Marangoni taşınım olarak bilinmektedir. Bu taşınım hareketinin durumunu Marangoni sayısı belirler. Yukarıdaki bölümlerde bahsedildiği gibi Marangoni sayısının önemli parametreleri; silindirik akışkanın (H) boyutsal yüksekliği ve (D) çapıdır. Bu çalışmamızda, bahsedilen parametrelerden silindirik akışkanın çapı

sabit tutularak akışkan yüksekliğinin değişik değerlerinde araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışma silindirik konumdaki akışkanın boyutsal oranı $Ar = 0.8$ değerinin altındaki değerlerde gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerin üzerindeki konfigürasyonlarda ise yer çekimi kuvvetinin etkisinden dolayı akışkanın serbest yüzeyi düz konumdan çıkarak S-konumuna gelmektedir. Birçok araştırmacı yüzen bölge konfigürasyonunu kullanarak S-konumunun yüzey gerilim hareketleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar, sonuç itibarıyla akışkanın serbest yüzeyinin (S-konumunun) Marangoni taşınım hareketlerinde etkili bir parametre olduğuna ortaya koymuşlardır. Bundan dolayı; bu çalışmada boyutsal oran $Ar = 0.5 - 0.7$ değerlerinde seçilmiştir.

Silindirik konumdaki akışkanın dikey yüksekliği Marangoni taşınımın kararlı halden periyodik osilasyonlu hale geçişinde çok etkilidir. Akışkanın boyutsal oranı, akışkanın dikey yüksekliği ile doğru orantılı olup; boyutsal oran arttıkça dikey yükseklikte artmaktadır. Bu sebepten akışkanın kararlı Marangoni taşınımından osilasyonlu Marangoni taşınımına geçişinde akışkanın dikey yüksekliği Marangoni sayısının değerini değiştirmektedir. Yüzey gerilim hareketleriyle meydana gelen Marangoni taşınımındaki Marangoni sayısı belirli bir değer üzerinde akışkanın akış karakterini etkilemektedir. Bu sebepten akışkanın kararlı Marangoni taşınımından osilasyonlu Marangoni taşınımına geçişindeki kritik sıcaklık farkı ($\Delta T_{kr} = T_H - T_C$) değeri azalmaktadır.

Deneyin yapıldığı farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farkı değerlerinin silindirik konumdaki akışkanın boyutsal oranına göre değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, her iki boyutsal oranda da deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı arttıkça yüzey gerilim hareketi yapan akışkanın kararlı Marangoni taşınımından osilasyonlu Marangoni taşınımına geçişindeki kritik sıcaklık farkı değeri artmaktadır. Bunun sebebi daha sonraki paragraflarda açıklanacaktır.

Akışkanın boyutsal oranının $Ar = 0.7$ de ve deneyin

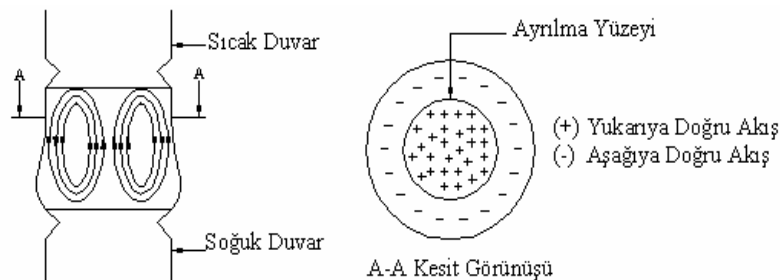


Şekil 3. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farkı değerlerinin boyutsal orana ile değişimi

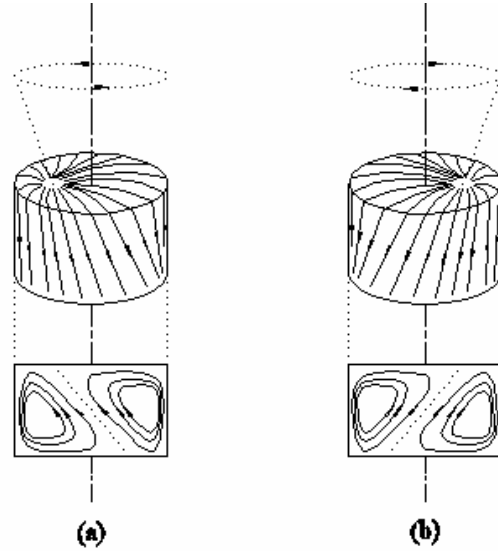
yapıldığı ortam sıcaklığının $T_R = +10^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulduğu durumda, akışkanın alt temas yüzeyi olan soğutucu duvar sıcaklığı $T_C = +10^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulduktan sonra ısıtıcı duvar sıcaklığı yavaş yavaş lineer olarak artırılmaktadır. Bu esnada ısıtıcı duvar sıcaklığı ile soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı akışkan, serbest yüzeyi boyunca yüzey gerilim hareketine maruz kalmaktadır. Başlangıçta akışkanın serbest yüzeyi boyunca başlayan hareketin ivmeli bir hareket olmasından dolayı soğuk duvar sıcaklığına yakın bölgelerde bu ivmeli hareket silindirik konumdaki akışkanın iç bölgelerine doğru ilerlemektedir. İç bölgeler ısınarak doğal taşınım etkisiyle hareket eden akışkan yukarıya doğru doğal taşınım etkisiyle ilerlemekte ve akış hareketinin devamlılığını sağlamaktadır. 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 4'de gösterilmiştir.

Isıtıcı duvar sıcaklığı lineer olarak artırılırken $T_H = +55.52^\circ\text{C}$ değerine ulaştığında kararlı haldeki Marangoni taşınım hareketi Şekil 4'de açıklandığı konumdan çıkarak aniden periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım hareketine geçmektedir. Periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım hareketine geçişte ısıtıcı duvar sıcaklığı ($T_H = +55.52^\circ\text{C}$) ile sabit tutulan soğutucu duvar sıcaklığı ($T_C = +10^\circ\text{C}$) arasındaki fark bize kritik sıcaklık farkını ($\Delta T_{Kf} = +45.52^\circ\text{C}$) vermektedir. Akışkanın boyutsal oranı $Ar = H/D = 0.7$ ve ortam sıcaklığı $T_R = +10^\circ\text{C}$ de sabit tutulduğu bir konfigürasyonda farklı soğuk duvar sıcaklıklarındaki kritik sıcaklık farkı değerleri ve ısıtılan duvarın sıcaklık değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir.

Şekil 5'de görüldüğü gibi ısıtılan duvar sıcaklığının soğutulan duvar sıcaklığına göre değişimi hemen hemen sabit kalırken, kritik sıcaklık farkı değerlerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişim göstermektedir. Soğuk duvar sıcaklığı artarken kritik sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Bu azalmaya neden olan unsur aşağıdaki paragraflarda açıklanacaktır. Periyodik osilasyonlu Marangoni taşınımın başladığı kritik sıcaklık (ΔT_{Kf}) değerleri tesbit edildikten sonra ısıtıcı duvar sıcaklığı lineer olarak yine artırılmaya devam edilmiştir. Bundan sonra periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım hareketi izlenmeye başlanır. Bu periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım hareketi



Şekil 4. Akışkanın kararlı haldeki yüzey gerilim hareketinin şematik görünümü



Şekil 5. Akışkanın osilasyonlu akış hareketinin şematik görünümü

Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5'deki akış hücreleri, Şekil 4'de görülen akış hücreleri gibi dikey eksen üzerinde simetrik konuma gelmemektedir. Şekil 5.a'daki ayrılma yüzeyine göre sol yarım düzlemdeki akışkanın akış hareketindeki hücre momenti, sağ yarım düzlemdeki akışkanın akış hücrelerine baskı yaparak hareket etmekte ve ayrılma yüzeyine göre sağ tarafta hareket eden hücrenin boyutunu yukarıya doğru küçülterek hareketini sürdürmektedir. Şekil 5.a da görülen konumdaki akışkanın akış hareketi radyal yönde θ açısı yaparak dönmekte ve $\theta = 180^\circ$ olduğunda Şekil 5.b konumuna gelmektedir. Şekil 5.b'de görüldüğü gibi; sağ yarım düzlemdeki akışkanın akış hareketindeki hücre momenti, sol yarım düzlemdeki akışkanın akış hücrelerine baskı yaparak hareket etmekte ve sol taraftaki hücrenin üst boyutunun küçülmesine neden olmaktadır.

Bu dönel hareket ısıtıcı duvar sıcaklığı ile soğutucu duvar sıcaklığı arasındaki farkın kritik sıcaklık farkından daha büyük olduğu durumlarda aynen devam etmekte ve süreklilik kazanmaktadır.

Periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım akış hareketi Preisser ve arkadaşları tarafından incelenmiş olup; bu çalışmada elde edilen osilasyonlu akış hareketiyle benzerlik görülmüştür. Bu periyodik osilasyonlu Marangoni taşınım akış hareketi devam

ederken ısıtıcı duvar sıcaklığı lineer olarak yavaş yavaş arttırılmaya devam edildiğinde belirli bir sıcaklık farkından sonra periyodik osilasyonlu hareket kaotik Marangoni taşınım akış hareketine geçmektedir. Bu hareket tamamiyle istenilmeyen bir harekettir. Bu karmaşık akış hareketinde, akışkanın yüksek sıcaklığa sahip olmasından dolayı akışkanın bir kısmı buharlaşarak yok olmaktadır. Buharlaşmış yok olan akışkandan dolayı deney başlangıcındaki akışkanın serbest yüzeyi dikey konumdan konkav konuma gelir ve toplam akışkan hacmi de değişir. Bu değişim akışkanın kaotik akış hareketindeki Transport Fenomenlerini de etkilemektedir.

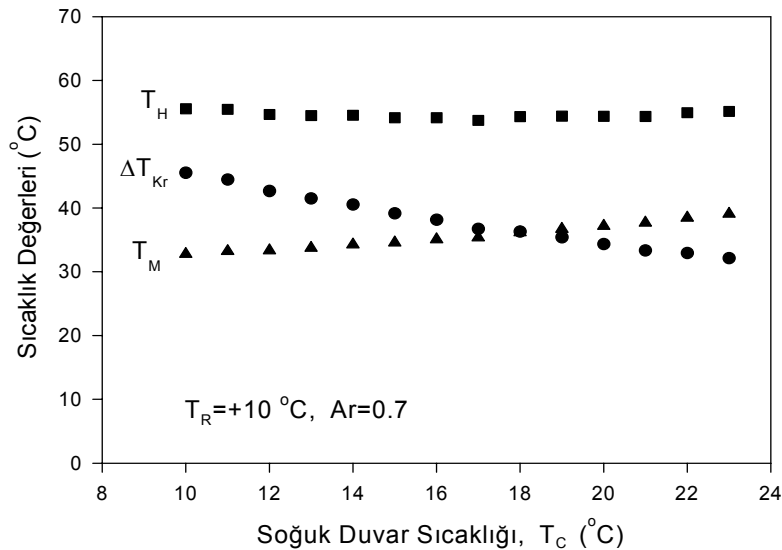
Bu aşamadan sonra deney durdurulmakta ve bir sonraki soğutucu duvar sıcaklığı $T_C = +11^\circ\text{C}$ için deney düzeneği tamamen temizlenip taze akışkan deney düzeneğine yerleştirilmektedir. Deney düzeneğine yerleştirilen akışkana $T_C = +10^\circ\text{C}$ 'de yapılan işlemler ve prosedür $T_C = +11^\circ\text{C}$ için de yapılır ve bu değerler ile diğer $T_C = +12^\circ\text{C}$ 'den $T_C = +23^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan değerler için tek tek tekrarlanarak Şekil 6'daki sayısal değerler elde edilir.

Genel olarak Şekil 6 incelendiğinde soğutucu duvar sıcaklığı arttıkça kararlı Marangoni taşınımından periyodik osilasyonlu Marangoni taşınımına geçiş noktasını belirleyen ΔT_{Kr} değeri azalmaktadır. Bu azalış değeri şöyle ifade edilir; Deney başlangıcında soğutucu duvar sıcaklığı, ısıtıcı duvar sıcaklığı ve akışkan sıcaklığı deneyin yapıldığı ortam sıcaklığıdır ($T_R = +10^\circ\text{C}$). Isıtıcı duvar sıcaklığı yavaş yavaş lineer olarak arttırılmaya başlandığında termik denge konumunda olan akışkan harekete geçmektedir. Harekete geçmiş konumda iken herhangi bir anda T_H değerinin T_R değerinden büyük olmasından dolayı akışkanın aritmetik ortalama değeri $T_M = 1/2 (T_H + T_C - 10^\circ\text{C})$ ortam ve soğutucu duvar sıcaklıklarından büyük olacaktır. Bu nedenle ısı transferi yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru kendiliğinden gerçekleşeceğinden akışkan yüzeyinden

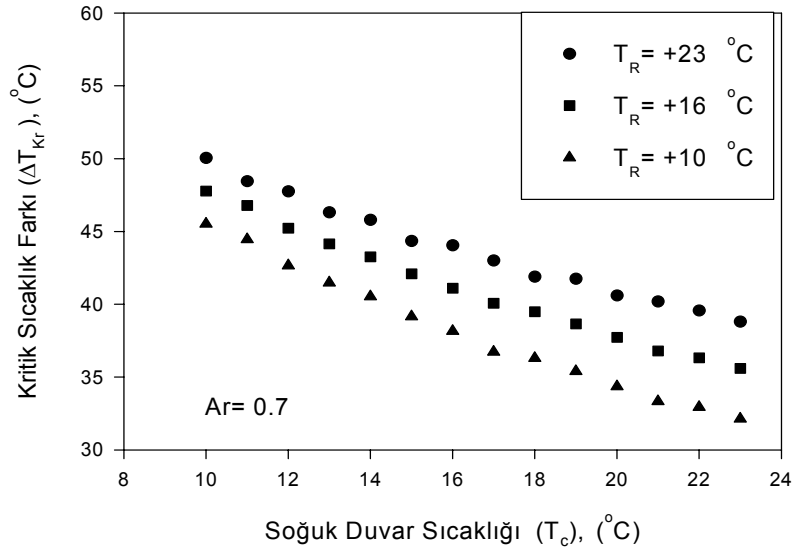
deneyin yapıldığı ortama doğru ısı geçişi olacaktır. Böylece akışkan yüzeyi ısı kaybedeceğinden kaybedilen ısı miktarı artışı akışkanın kararlı Marangoni taşınımından periyodik osilasyonlu Marangoni taşınımına geçişteki kritik sıcaklık farkı değerinin düşmesine neden olacaktır. Bu ifadeye göre; soğutucu 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 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 ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı değerine bağlı olacağından dolayı yukarıdaki matematiksel ifadeden de anlaşıldığı gibi akışkan serbest yüzeyi sabit kalmak şartıyla ($Ar = 0.7$ değerine göre) $Q_{T_C = +10^\circ\text{C}} < Q_{T_C = +23^\circ\text{C}}$ olacaktır.

Dolayısıyla sıcaklık farkı değerinin küçülmesiyle ısı transferi azalacak, diğer bir ifade ile akışkan serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama geçen ısı miktarı soğutucu duvar sıcaklığı büyüdükçe artacaktır. Ortam sıcaklığı $T_R = +10^\circ\text{C}$ olduğu durumda yapılan deneyler tamamlandıktan sonra farklı ortam sıcaklıkları $T_R = +16^\circ\text{C}$ ve $T_R = +23^\circ\text{C}$ değerleri içinde deneyler yapılmıştır. Bu farklı ortam sıcaklıklarındaki kritik sıcaklık farkı değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Aynı boyutsal oranda ($Ar = 0.7$) ve farklı ortam sıcaklıklarındaki yüzey gerilim akış hareketinin birbirleriyle benzerlik sağladığı görülmüştür. Kritik sıcaklık farkı değerlerine 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 değerleri artacaktır. Bu sebeplerden dolayı periyodik osilasyonlu



Şekil 6. Sıcaklık değerlerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi



Şekil 7. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farkı değerlerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

Marangoni akış hareketinin başlangıç noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri ortam sıcaklığın artmasıyla artacaktır.

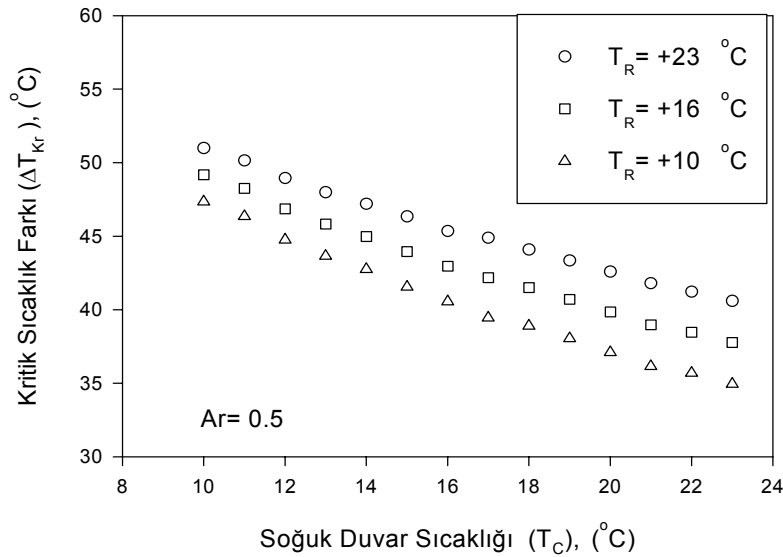
Silindirik konumdaki akışkanın boyutsal oranı $Ar=0.7$ alınarak yapılan değerler tamamlandıktan sonra, farklı boyutsal oran olan $Ar=0.5$ değeri için de deneyler tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerin farklı ortam sıcaklıkları yine; $T_R=+10^\circ\text{C}$, $T_R=+16^\circ\text{C}$, $T_R=+23^\circ\text{C}$ alınmıştır. Bu deneylerin sonuçları; aynı boyutsal oranda $Ar=0.5$ ve farklı ortam sıcaklıklarındaki Marangoni taşınım akış hareketinin kritik sıcaklık farkı değerleri ise Şekil 8’de verilmiştir.

Bu değerlere bakıldığında da ortam sıcaklığı arttıkça kritik sıcaklık farkı değerleri artmaktadır. Bununla gerçekleşmesi yukarıda bahsedilen sebepten dolayıdır. Silindirik konumdaki akışkanın farklı boyutsal oranlarının $Ar=0.5$ ve $Ar=0.7$ olduğu durumda ayrı ayrı elde edilen kritik sıcaklık farkı değerleri

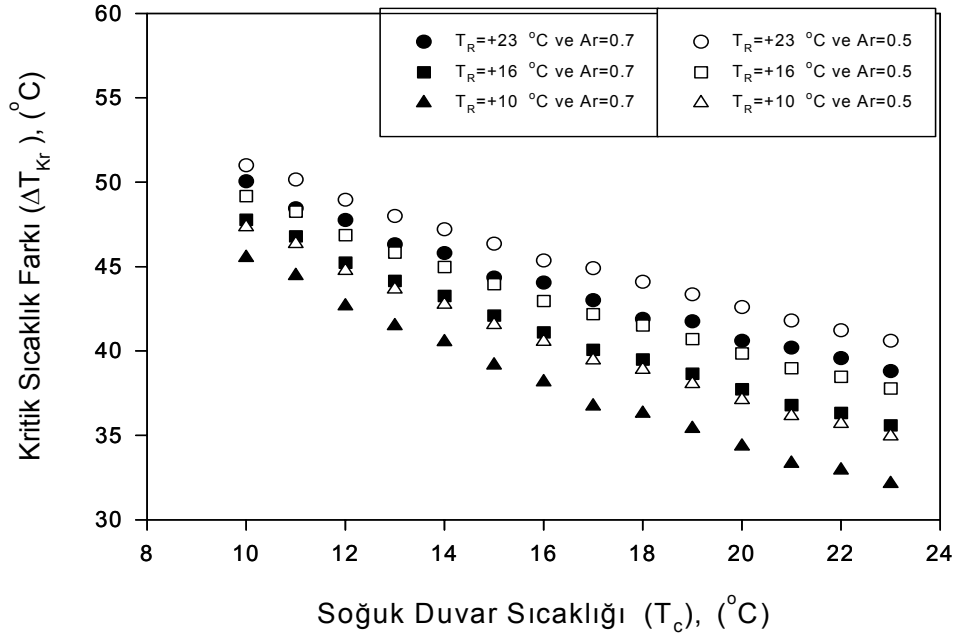
karşılaştırıldığında farklı değerler gözlenmiştir. Bu değerler Şekil 9’da gösterilmiştir.

Aynı deney odası sıcaklığında ve farklı boyutsal oranlardaki Marangoni taşınımın kritik sıcaklık farkı değerleri incelendiğinde; boyutsal oran (Ar) arttıkça kritik sıcaklık farkı değerleri azalmaktadır. Boyutsal oran akışkan yüksekliği ile doğru orantılı olup akışkan yüksekliği arttıkça artmaktadır. Akışkan yüksekliğinin artışı akışkanın serbest yüzey alanının artışına sebep olacak, bu da akışkanın serbest yüzeyinden ortama olan ısı kaybını arttıracaktır. Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı periyodik osilasyonlu Marangoni taşınımına başlangıç noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri azalacaktır.

Şekil 8’de elde edilen Marangoni taşınım hareketinin periyodik osilasyonlu Marangoni taşınımına geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerleri, Marangoni taşınım hareketinin kendisini meydana getiren



Şekil 8. Farklı ortam sıcaklıklarında kritik sıcaklık farkı değerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi



Şekil 9. Farklı boyutsal oranlarda kritik sıcaklık farkı değerlerinin soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

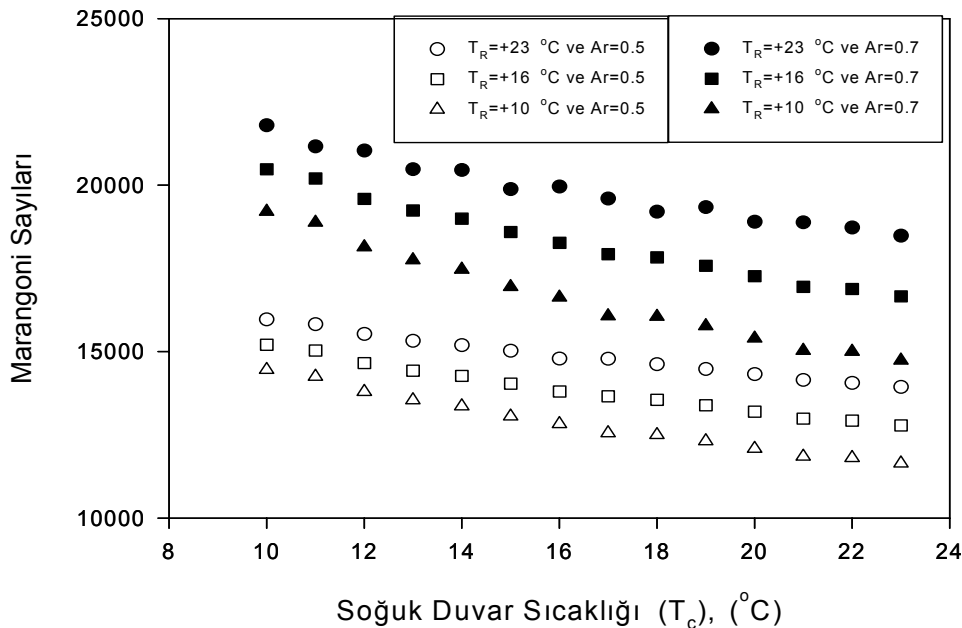
boyutsuz Marangoni sayısına dönüştürüldüğünde elde edilen Kritik Marangoni Sayılarının soğuk duvar sıcaklığı ile değişimi Şekil 10'da gösterilmiştir. Boyutsuz Marangoni sayısı, Tablo 1'de verilen silikon yağının kinematik viskozitesini veren formül kullanılarak ortalama akışkan sıcaklığı ile hesaplanmıştır. Şekil 10'da görüldüğü gibi boyutsal oran (Ar), deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı (T_R) değerleri azaldıkça ve soğuk duvar sıcaklığı (T_C) değerleri arttıkça boyutsuz Marangoni sayısının değeri azalmaktadır.

Sonuç olarak; esnek bölge konfigürasyonu kullanılarak yüksek Prandtl sayısına sahip akışkanın kararlı Marangoni taşınımından periyodik osilasyonlu

Marangoni taşınımına geçiş noktası olan kritik sıcaklık farkı değerlerinin, akışkanın serbest yüzeyinden deneyin yapıldığı ortama olan ısı kaybı değerlerine bağlı olduğu ve bu ısı kaybı değerlerinin ise akışkanın yüksekliğine, ortam sıcaklığına ve soğutucu duvar sıcaklığına bağlı olduğu bu çalışmada belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi'nden DPT'ye başvuru ile 2002K120590/1 no'lu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi'ne ve DPT'ye teşekkürlerimi sunarım.



Şekil 10. Farklı boyutsal oranlarda Marangoni sayılarının soğuk duvar sıcaklığına göre değişimi

KAYNAKLAR

1. Ostrach, S., **Motion Induced by Capillarity**, Advanced Publications, London, 1977.
2. Kamotani, Y., Ostrach, S., “Theoretical analysis of thermocapillary flow in cylindrical columns of high Prandtl number fluids”, **Journal. of Heat Transfer**, 758-764, 1988.
3. Preisser, F., Schwabe, D., Scharmann, A., “Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface ”, **J. Fluid Mech.**, 126, 545-567, 1982.
4. Schwabe, D., Velten, R., Scharmann, A. “The instability of surface tension driven flow in models for floating zones under normal and reduced gravity”, **Journal of Crystal Growth**, 99, 1258-1264, 1990.
5. Chun, CH. H., “Experiments on steady and oscillatory temperature distribution in a floating zone due to the Marangoni convection”, **Acta Astronautica**, 7, 479-488, 1979.
6. Kamotani, Y., Wang, L., Hatta, S., Selver, R. ve Yoda, S., “Effect of free surface heat transfer on onset of oscillatory thermocapillary flow of high Prandtl number fluid”, **J. Jpn. Microgravity Appl.**, Vol. 18, No. 4, 283-288, 2001.