



**DAİRESEL MİKROKANALLARDA
NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFERİ
VE BASINÇ DÜŞÜMÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Hourieh BAYRAMIAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı
Prof. Dr. Bayram ŞAHİN
2018
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DAİRESEL MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN ISI
TRANSFERİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Hourieh BAYRAMIAN

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM
2018**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

DAİRESEL MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFERİ VE
BASINÇ DÜŞÜMÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN danışmanlığında, Hourieh BAYRAMIAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 22/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Enerji Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun **08./02./2018**... tarih ve **6**.../...**88**... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DAİRESEL MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFERİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hourieh BAYRAMIAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Endüstriyel uygulamalarda ısı transferinin artırılması sıkça karşılaşılan ve sürekli geliştirme ihtiyacı duyulan bir mühendislik problemidir. İş yapan akışkana farklı partiküllerin eklenmesi, akışkanın ısı transferi performansını artıran bir yöntemdir. Bu çalışmada, sabit ısı akısı sınır şartlarında dairesel mikrokanallarda SiO₂ partikülü ve saf su'dan oluşan nanoakışkanlarının ısı performansları ve basınç düşüşleri deneysel olarak incelenmiştir. %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 hacimsel derişime sahip nanoakışkanlar hazırlamak için, saf suya SiO₂ (15 nm) nanoparçacıkları ilave edilmiştir. Sıcaklık, debi ve basınç ölçümleri ile ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı, basınç düşüşü ve sürtünme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar için gerekli olan ısı iletkenlik ve viskozite değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve partikülün hacimsel oranının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkanlarla maksimum ısı transferi artışı Re = 2160 civarında ve %1.2 hacimsel oranda saf suya göre yaklaşık % 20 civarında olmuştur. En yüksek Reynolds sayılarında sürtünme faktörü değerleri birbirine çok yakın iken, Reynolds sayısı azaldıkça sürtünme faktöründeki artış daha belirgin hale gelmiştir. Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların sürtünme faktörü değerleri saf suya göre yüksektir.

2018, 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, mikrokanal, ısı transferi, basınç düşümü.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP OF NANOFLUIDS IN CIRCULAR MICROCHANNELS

Hourieh BAYRAMIAN

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

In industrial applications, the demand for the enhancement of heat transfer is a common engineering problem. The use of additives to heat transfer fluid is a technique applied to enhance the heat transfer performance of base fluids. In this study, the thermal performance of nanofluids consisting of SiO₂ particles and deionized water in circular microchannels was investigated experimentally. SiO₂ nanoparticles with diameter of 15 nm added to water to prepare nanofluids with 0.2%, 0.4%, 0.8% and 1.2% volume fractions. Heat transfer, heat transfer coefficient, Nusselt number, pressure drop and friction factor were calculated by using temperature, flow and pressure measurements. The thermal conductivity and viscosity values required for the calculations are measured separately. It is observed that the Nusselt number is increasing at the all volume fraction of particles, by increasing the Reynolds number and the volumetric ratios of the particles. The highest heat transfer enhancement is obtained at Re = 2160 and 1.2 % vol. by 20 % under the condition of a constant pumping power. The friction factor values are very close to each other at the highest Reynolds numbers, whereas the decrease in the Reynolds number makes the increase in the friction factor more prominent. The friction factor values of the nanofluids are higher than the pure water at all volume ratios.

2018, 71 pages

Keywords: Nanofluid, microchannel, heat transfer, pressure drop.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda desteğini hiç esirgemeyen, geniş bilgi ve tecrübeleri sayesinde büyük katkısı olan danışman hocam Sayın Pro. Dr. Bayram ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca ve laboratuvar çalışmalarımın tüm aşamalarında yanımda olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY, Sayın Arş. Gör. Emre MANDEV ve Sayın Arş. Gör. Murat CEYLAN ve emeği geçen herkese çok teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her döneminde, her konuda maddi ve manevi desteklerini hissettiğim sevgili ablam Rukiye BAYRAMIAN ve aileme Őükranlarımı sunarım.

Hourieh BAYRAMIAN

Ocak, 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Isı Transferi İyileştirmesi	2
1.2. Nanoakışkanlar	3
1.3. Mikrokanallar	3
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	7
2.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri	7
2.2. Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü	14
2.3. Mikrokanallarda Isı Transferi ve Basınç Düşümü	19
2.4. Kuramsal Kavramlar	23
2.4.1. Isı transferinin iyileştirme yöntemleri	23
2.4.1.a. Pasif yöntemler	24
2.4.1.b. Aktif yöntemler	26
2.4.2. Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi.....	28
2.4.3. Mikrokanal kavramı	30
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1. Deneysel Materyal.....	33
3.1.1. Nanopartiküller.....	33
3.1.2. Test bölgesi.....	33
3.1.3. Ultrasonik banyo	34
3.1.4. Viskozimetre	35
3.1.5. Isıl iletkenlik ölçer.....	36
3.1.6. Termoelemanlar ve veri okuma kartı	36
3.1.7. Debimetre	39

3.1.8. Basınç transdüzeri	40
3.1.9. Sirkülatörlü su banyosu	41
3.1.10. Mikro filtre	41
3.1.11. Akışkan besleme haznesi.....	42
3.1.12. Pompa.....	42
3.1.13. Güç kaynağı ve analizörü	43
3.1.14. Hassas terazi	45
3.2. Nanoakışkanların Hazırlanması	46
3.3. Deney Prosedürü	48
3.4. Termofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi	49
3.5. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	56
4.1. Saf Su İçin Isı Transferi ve Basınç Düşümü Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması	56
4.2. Isı Transferi Bulguları	58
4.3. Basınç Düşümü Bulguları	60
5. SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Akış Alanı (m^2)
C_m	Kütlesel Oran
C_p	Sabit Basıncıta Özgül Isı (J/kgK)
C_v	Hacimsel Oran
D_h	Hidrolik Çap (m)
f	Sürtünme Faktörü
h	Isı Taşınım Katsayısı (W/m^2K)
H	Kanal Yüksekliği (m)
k	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
L	Test Bölgesi Uzunluğu (m)
m	Akışkanın Kütlesel Debisi (kg/s)
m_n	Nanoakışkan Kütlesi (kg)
m_p	Nanopartikül Kütlesi (kg)
Nu	Ortalama Nusselt Sayısı
Pr	Prandtl Sayısı
Q	Isı Miktarı (W)
Re	Reynolds Sayısı
$T_ç$	Akışkanın Çıkış Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_g	Akışkanın Giriş Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_m	Akışkanın Ortalama Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_s	Yüzey Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
V	Ortalama Akışkan Hızı (m/s)
V_n	Nanoakışkanın Hacmi (m^3)
V_p	Partikülün Hacmi (m^3)
x	Bağımsız Değişken
ΔP	Basınç Düşümü (Pa)
μ	Akışkanın Dinamik Viskozitesi (kg/ms)
ρ	Akışkan Yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_n	Nanoakışkanın Yoğunluğu (kg/m^3)

ρ_p Nanopartikülün Yoğunluğu (kg/m^3)

Alt İndisler:

l Temel Akışkan

m Kütleli

n Nanoakışkan

p Partikül

v Hacimsel



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. MEMS örnekleri	4
Şekil 2.1. Cu-su nanoakışkanının ısı iletkenliğine sıcaklığın etkisi	11
Şekil 2.2. 15 nm TiO ₂ nano partiküllerinin TEM görüntüsü	12
Şekil 2.3. Yuvarlatılmış dikdörtgen mikrokanalların üretim akış diğramı	20
Şekil 2.4. Gözenekli buharlaşma yüzeyinin kesit görünüşü	25
Şekil 2.5. Sıvı ve gazlar için genişletilmiş yüzeyler	25
Şekil 2.6. Nanopartiküllerin mikropartiküllerle karşılaştırılması	29
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin resmi	32
Şekil 3.2. Test bölgesinin şematik resmi	34
Şekil 3.3. Ultrasonik banyo.....	34
Şekil 3.4. Viskozimetre.....	35
Şekil 3.5. Isıl iletkenlik ölçer	36
Şekil 3.6. Termoelemanlara ait kalibrasyon denklemleri ve eğrileri	37
Şekil 3.7. Veri okuma kartı	38
Şekil 3.8. Debimetre	40
Şekil 3.9. Basınç transdüzeri.....	40
Şekil 3.10. Sirkülatörlü su banyosu	41
Şekil 3.11. Mikro filtre	42
Şekil 3.12. Akışkan besleme haznesi.....	42
Şekil 3.13. Pompa	43
Şekil 3.14. Güç kaynağı	44
Şekil 3.15. Güç analizörü.....	45
Şekil 3.16. Hassas terazi	45
Şekil 3.17. SiO ₂ nanopartikülü.....	46
Şekil 3.18. Isıl iletkenliğin farklı hacimsel oranlarda literatür ile karşılaştırması.....	50
Şekil 3.19. Farklı hacimsel oranlarda ısı iletkenliğin sıcaklıkla değışimi	51
Şekil 3.20. Farklı hacimsel oranlarda viskozitenin literatüre ile karşılaştırması.....	52
Şekil 3.21. Farklı hacimsel oranlarda viskozitenin sıcaklıkla değışimi.....	53
Şekil 3.22. Mikrokanallarda basınç kaybı ölçümü şematığı	54

Şekil 4.1. Saf suya ait Nusselt sayısı değerlerinin literatür ile karşılaştırılması	57
Şekil 4.2. Saf suya ait sürtünme faktörü değerlerinin literatür ile karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.3. Isı taşınım katsayısı değerlerinin kütleli debi ile değişimi	59
Şekil 4.4. Farklı hacimsel oranlarda Nu sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	60
Şekil 4.5. Farklı hacimsel oranlarda sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi	61
Şekil 4.6. Farklı hacimsel oranlarda basınç düşümünün kütleli debi ile değişimi	62



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Bazı alanlarda MEMS uygulamaları	5
Çizelge 2.1. Farklı nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzere özetlenmiş sonuçlar	9
Çizelge 2.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.....	16
Çizelge 2.3. Nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri	16
Çizelge 2.4. Akışkanların termofiziksel özellikleri	17
Çizelge 2.5. Farklı nanoakışkanların su içerisinde %1.0 hacimsel oranda ve Re=100'de boyutsuz basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayısı sonuçları	17
Çizelge 3.1. Isıl iletkenlik ölçerın teknik özellikleri.....	36
Çizelge 3.2. Isıl çiftlerin ölçüm aralıkları	38
Çizelge 3.3. Farklı nanoakışkan hacimsel oranları için hesaplanan kütleler	48
Çizelge 3.4. SiO ₂ nanopartikülün özellikleri	48

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu ve insanların daha konforlu bir yaşam isteği gün geçtikçe artmaktadır. Buna bağlı sanayileşmeden dolayı, teknoloji hızlı bir şekilde gelişmektedir. Böylece enerji tüketimi de hızla artmaktadır. Enerji tüketimindeki bu artış da, doğal enerji kaynaklarının hızla tüketilmesine neden olmaktadır. Biz insanların görevi, günlük yaşantımızın her alanında, enerji kaynakları ihtiyaçlarımızı kısıtlamadan, tasarruflu bir şekilde kullanmaktır. Enerji tasarrufu, enerji kayıplarının önlenmesi, enerji atıklarının değerlendirilmesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması, vb. eylemlerle mümkündür.

Alternatif bir enerji kaynağı olarak görülen enerjinin verimli bir şekilde kullanımı, ısı transferinde sağlanacak iyileştirmeyle mümkün olabilir. Isı transferi iyileştirilme çalışmaları, endüstride geniş uygulama alanları bulmaktadır.

Birçok ısı transferi uygulamalarında saf sıvı akışkanlar dikkate alınmıştır. Halbuki katı maddelerin ısı iletkenliği sıvılardan daha yüksektir (Yang *et al.* 2000). Bu nedenle ısı transferinin daha iyi performansı için bilim adamları katı parçacıklarını nano boyutlarında (100 nm den küçük) temel akışkanlara karıştırmayı düşünmüşler ve elde edilen akışkanı ısı transferinde verimli soğutucu akışkan olarak kullanmaya başlamışlardır. Bu yeni akışkanlara ise nanoakışkanlar ismini vermişlerdir. Nanoakışkanların son yıllarda yeni ısı transferi akışkanları olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu akışkanlar su ve etilen glikol gibi bir sıvı akışkan ile alüminyum, bakır ve titanyum gibi nano boyutunda parçacıkların karıştırılması ile elde edilmektedir. Bu akışkanlarda parçacıkların fiziksel özelliklerinden dolayı ısı transferinin artmasına neden olmaktadır (Khastar 2016).

Son yıllarda hızla gelişen mikro-elektronik sistemlerde artan güç tüketimi nedeniyle oluşan yüksek ısının bu bölgeden uzaklaştırılması için etkili ve yenilikçi soğutma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerdeki cihazların minyatür hale gelmesi,

cihazlardaki kanal ölçülerinin de mikro boyutlu tasarlanmasını gerektirmektedir. Mikrokanallar, mikro akışlı cihazların bileşiminde yer alan en önemli parçalardan biridir. Bu nedenle bu kanallarda akış ve ısı transferi performansı kanal geometrisi, kanal ölçüleri, duvar ısı akısı/sıcaklığı, akışkan tipi ve akış hızı gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Mikro-akışlı cihazlarda gerekli soğutma ihtiyacını karşılamada hava soğutmalı tekniklerin yetersiz kalması sıvı soğutmalı tekniklere olan ilgiyi artırmıştır. Ana akışa nanopartiküllerin ilavesi ile elde edilen nanoakışkanların termal iletkenliği önemli derecede artmaktadır. Bu yüzden bilim adamları son yıllarda mikrokanalların ısı transferisini artırmak amacı ile nanoakışkanları mikrokanallarda kullanmaya başlamışlardır. Mikrokanallarda soğutma uygulamalarında değişik nanoakışkanların kullanılmasını konu alan çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmalarda farklı dalga şekillerine sahip mikrokanallar, farklı nanoakışkan tipleri ile, değişen partikül hacim oranlarında ve Reynolds sayısının belirli aralığında incelenmiştir. Re sayısı ve partikülün hacimsel oranları arttıkça, saf suya göre ısı transferinin önemli derecede iyileştirilmesi, ancak basınç düşüşü ve sürtünme faktöründe de bir artış gözlemlendiği belirlenmiştir (Akçay 2017).

1.1. Isı Transferi İyileştirmesi

Isı transferini artırmak için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar aktif, pasif ve karma yöntemler olarak sınıflandırılır. Pasif yöntemlerde, dışarıdan enerji verilmeden ısı transferinde iyileşme sağlamaktadır. Aktif yöntemler ise, ısı transfer edilen akışkana veya ortama dış bir kaynaktan ilave enerji verilerek ısı transferinde iyileşme sağlayan yöntemlerdir. Örneğin, akışkan titreşimi, yüzey titreşimi, akışın mekanik parçalar ile karıştırılması, yüzeyin döndürülmesi, enjeksiyon ve akış ortamında elektrostatik alanların oluşturulması. Pasif yöntemlerde ise kaplanmış yüzeyler, pürüzlü yüzeyler, genişletilmiş yüzeyler, dönmeli akış elemanları, borunun içine yerleştirilen iyileştirme elemanları, bazı örneklerdir. Karma yöntemlerde ise, aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır.

Pasif yöntemler ısı transferini önemli miktarda artırmasına rağmen, basınç düşümünü artırmak gibi dezavantajları da vardır. Bu durum akışkanı pompalamak için gerekli enerji miktarında büyük bir artışa sebep olur. Termal sistemlerin geliştirilmesi yönünde, ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar, araştırmacılar tarafından devam edilmektedir.

1.2. Nanoakışkanlar

Geleneksel ısı transferi akışkanlarının (su, motor yağı ve etilen glikol gibi) ısı transferi performansları nispeten düşüktür. Bu yüzden bu geleneksel akışkanların ısı transferi karakteristiklerini iyileştirmek için, temel akışkanın içine katı partiküllerin süspansiyonu edilmesi pasif yöntemlerden biridir. Temel akışkanın içine katı partiküllerin katılması ısı iletkenliğini artırır. Konvansiyonel iş akışkanları içerisinde nanometre boyutlarında katı partiküllerin süspansiyonu edilmesiyle elde edilen yeni nesil akışkanlar nanoakışkanlar olarak adlandırılır. Katı partikül olarak, çoğunlukla metaller (Au, Ag, Cu, Fe), metal oksitler (CuO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, ZnO, Fe₃O₄), karbürler (SiC, TiC) ve Nitritler (AlN, SiN) kullanılır.

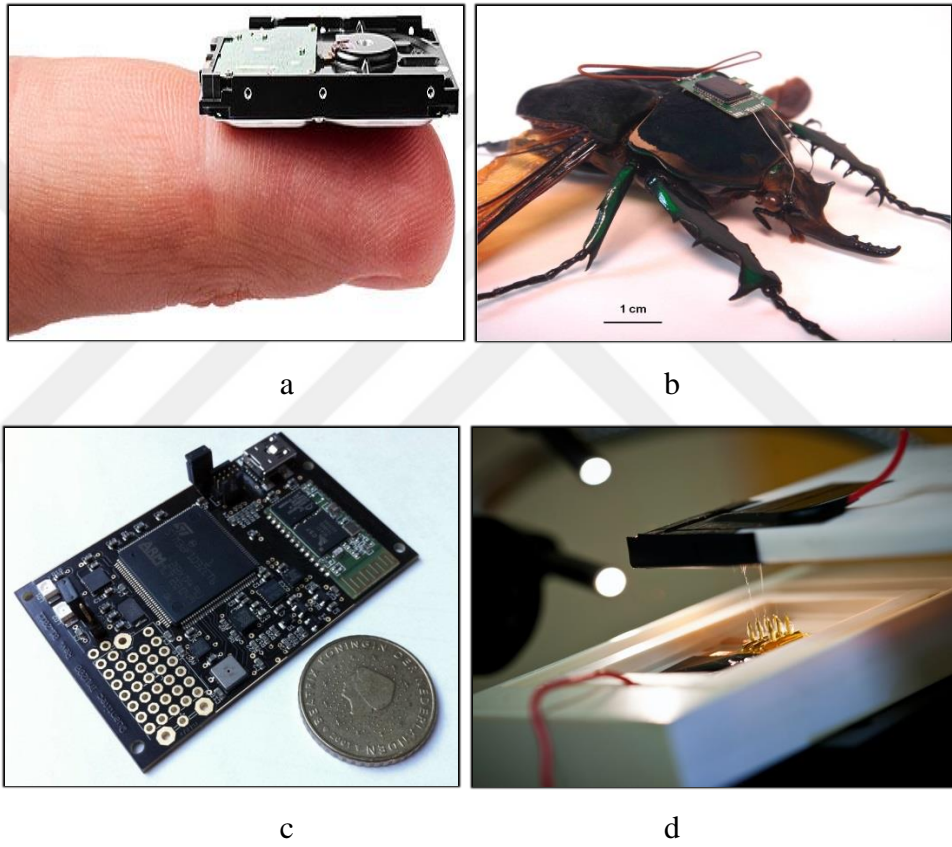
Nanoakışkanlarda, diğer bir önemli bileşen ise yüzey aktif maddelerdir. Yüzey aktif maddelerin kullanımı ile akışkan içerisinde bulunan partiküllerin özellikleri önemli ölçüde değiştirilerek daha kararlı akışkanlar üretilebilir yani partikülün çökmesinin önüne geçilmiş olur. Düşük partikül konsantrasyonlarında yüzey aktif maddelere pek fazla ihtiyaç duyulmasa da partikül konsantrasyonu arttıkça bu maddeler nanoakışkanın olmazsa olmaz bileşeni haline gelmektedir.

1.3. Mikrokanallar

Teknolojik gelişmelerle birlikte, mikrometre boyutlarında sistemlerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Elektronik çip veya entegre devrelerde bulunan sistemlerde boyutların gittikçe küçülmesi, aşırı ısınma problemleri ortaya çıkarmaktadır. Sonuç olarak Mikro elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) bileşenleri artan sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu

durumda daha iyi performans ve güvenlik için, bu üretilen ısının daha etkin bir şekilde dışarı atılması gerekmektedir.

Dünya çapında MEMS, çok çeşitli uygulama alanlarında örneğin çeşitli endüstriyel ve tıbbi alanlarda kullanılmaktadır. MEMS için bazı örnek görseller Şekil 1.1'de verilmiştir. Ayrıca MEMS'lerin kullanım alanları Çizelge 1.1'de sunulmaktadır.



Şekil 1.1. MEMS örnekleri

a. Silicon based microelectronics, b. Hybrid insect microelectro mechanical system, c. Mems used in surgery navigation systems, d. Nanofiber

Çizelge 1.1. Bazı alanlarda MEMS uygulamaları (Avcı 2008)

Alan	Uygulama
Proses kontrolü ve metroloji	İvme ölçerler ve eğiklik duyargaları, gaz duyargaları, manyetik duyargaları, spektrometre, sıcaklık/basınç duyargaları, ultrasonik dönüştürücüler
Otomotiv	Basınç/sıcaklık/nem/ivme duyargaları, manyetik duyargalar, optic duyargaları, mikroenjektör, hava yastıkları, taşıt güdüm teknolojileri, yağmur algılama sistemleri, mikro ısı değıştiricileri
Bilişim	Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, ivme duyargaları, dönölçer, duyarga ağıları, mikroaynalar, mikro ısı değıştiricileri (elektronik devrelerin soğutulması)
Savunma, havacılık, uzay	Mikro uydular, radyasyon ölçümü, akıllı giysiler, ivme ölçerler, biyolojik ve biyokimyasal ve duyargalar, yonga-laboratuar (biyolojik ve kimyasal silahların algılanması, ilaç yönetimi), ivme ölçerler, mikrobolometreler (kızıl ötesi görüntüleme sistemleri), mikro güç kaynakları, optik duyargaları, mikro ısı değıştiricileri (elektronik çiplerin soğutulması)
Çevre	İvme ölçerler (depremin algılanması), kimyasal ve biyokimyasal duyargalar, yonga-laboratuar (çevre kirliliğinin algılanması), radyoaktif duyargalar

Yukarıda bahsedilen alanların gelişimi Mikro elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) ve mikro akışlı cihazların (Micro Fluidic Devices) gelişimi ile doğrudan ilgilidir. Mikrokanallardaki akış, Knudsen sayısına (akışkan moleküllerinin ortalama serbest yolunun mikrokanal karakteristik uzunluğuna oranı) bağlı olduğu için, makro kanallarda uygulanan klasik akış analiz yöntemleriyle çözülemeyebilir. Bu yüzden, mikrokanallar ile ilgili çalışmalarda bir ortak sonuca varmaması da bu meseleyi onaylamaktadır.

Dolayısıyla, araştırmacılar yoğun bir şekilde mikrokanallarda ısı transferi karakteristiklerini incelemektedirler.

MEMS sistemlerinde mikrokanallar küçük boyut ve ağırlıkları, iş akışkanı miktarının düşük olması ve yüksek ısı akıları avantajları sebebiyle yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanında, mikrokanalların kullanılmasının bazı dezavantajları da vardır. Bunlar basınç düşümü, küçük hidrolik çap, çift fazlı akışlarda kavitasyon ve akış analizinde kullanılan teorilerin belirsizliği olarak sıralanabilir.

Yüksek ısı iletkenliğe sahip nanoakışkanların kullanılmasıyla, mikro akışlı sistemlerin performansı daha yukarı çekilebilir. Konu ile ilgili son dönemde çalışmalar yürütölmüş olsa da deneysel çalışma daha azdır ve mevcut çalışmaların çoğunluğu sayısal çalışmadır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Maxwell yaklaşık 100 yıl önce geleneksel ısı transferi akışkanlarının içine milimetre veya mikrometre boyutlarda katı partikülleri süspansiyon edilerek, ısı transferi üzerinde etkilerini incelemiştir. Mikrometre boyutundaki partiküllerle hazırlanan karışımlar daha az kararlı yapı göstermektedir ve bundan dolayı, mikro kanalların içinde tıkanmaya neden olurlar. Bunun yanında boru/kanal içinde büyük basınç düşümleri, çökme, tortulaşma, aşınma gibi bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Bu sorunları gidermek amacıyla, son yıllarda malzeme bilimindeki gelişmelerle paralel, nanometre boyutunda partiküllerin kullanılması ortaya çıkmıştır.

Küçük boyutlarda partiküller (16–60 nm) akışkan içinde iyi bir şekilde karıştırıldığında, ortaya çıkan bu karışım, tek fazlı ve kararlı bir akışkan gibi davranmaktadır. Isı transferi çalışmalarında önemli parametrelerden biri ısı iletkenliğinin bilinmesidir. İlk defa Choi nanoakışkanların ısı özelliklerini ve ısı transferisini araştırmıştır ve nanoakışkanın ısı iletkenliğinin, partiküllerin boyutları, şekilleri ve hacimsel oranlarına bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Bu arada, iki fazlı süspansiyonlar için bazı korelasyonların olmasına rağmen, nanoakışkanın ısı özelliğini belirlemeye yönelik belli bir teori şimdiye kadar belirlenmemiştir. Bu yüzden, yapılan çalışmalarda, iki fazlı nanoakışkanlar için mevcut modelleri ölçülmüş ısı iletkenliklerle kıyaslamışlardır. Mevcut modellerden bazıları, Maxwell, Hamilton - Crosser, Yu ve Choi, Wasp ve Bruggeman modelleridir.

Literatürde nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin ölçülmesinde deneysel çalışmalarda önerilen yöntemler aşağıda sıralanmaktadır:

a) Geçici sıcak tel metodu

b) Kararlı hal paralel plaka tekniği

c) Sıcaklık salınım tekniği

Geçici sıcak tel metodu bu yöntemler içerisinde en çok kullanılan metottur.

Das *et al.* (2003) yaptıkları çalışmada sıcaklık salınım metodu kullanarak, deneysel olarak CuO (28.6 nm) ve Al₂O₃ (38.4 nm) içeren nanoakışkanlar için sıcaklığın ısı iletkenlik artışı üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. 21°C ile 52°C sıcaklık aralığında, ısı iletkenlikte 2-4 kata kadar artış olabileceği gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta soğutucu akışkanların çalışabileceği yüksek enerji yoğunluklu cihazlar için soğutucu akışkan olarak nanoakışkan uygulaması önerilmiştir.

Xie *et al.* (2003) karbon nanotüp ve su, etilen glikol nanoakışkanların ısı iletkenliklerini ölçmüşlerdir. Sonuçlar gösteriyor ki nanoakışkanların ısı iletkenlikleri temel akışkanlardan yüksektir. Isı iletkenlikte partikül boyutu ve şekli önemlidir. Bu yüzden, temel akışkanın ısı iletkenliğinin artmasıyla, nanoakışkanın ısı iletkenliği azalmakta ve nanotüp konsantrasyonu arttıkça, artmaktadır.

Katı partiküllerin ısı iletkenliği geleneksel akışkanların ısı iletkenliğinden daha yüksek olduğu için, temel akışkan içine nanopartiküllerin süspanse edilmesiyle, nanoakışkanlar, daha yüksek ısı iletkenlikle elde edilmektedir. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri partikül tipine, partikül hacimsel konsantrasyonuna, partikül boyutuna ve geometrisine bağlıdır. Farklı türde bir çok nanopartikül farklı temel akışkanlar içerisinde kullanılmıştır. Çizelge 2.1'de farklı nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin hacimsel partikül konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi üzerinde olan çalışmalar verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzere özetlenmiş sonuçlar (Murshed *et al.* 2008)

Araştırmacılar	Nanoakışkanlar (boyut nm)/ temel akışkan	Partikül hacimsel oranı ile termal iletkenlikte gözlenen önemli artış
Wang <i>et al.</i>	Al ₂ O ₃ (28)/su /EG CuO (23)/su/EG	Al ₂ O ₃ /su: %3 için %12 Al ₂ O ₃ /EG: %5 için %26
Hwang <i>et al.</i>	CuO (35.4)/su/EG	CuO/EG: %1 için %9
Eastman <i>et al.</i>	Al ₂ O ₃ (33)/su CuO (36)/su Cu (35)/yağ	%5 için %29 %5 için %60 %0.052 için %44
Xuan and Li	Cu (100)/su/TO	Cu/su: %5 için %54
Li and Peterson	CuO (29)/su	34°C 'de %6 için %5 CuO(36)/su: 34°C 'de %10 için %30
Eastman <i>et al.</i>	Cu (<10)/EG	%0.3 için %40 CuO (35)/EG %4 için %22
Xie <i>et al.</i>	Al ₂ O ₃ (60.4)/su/EG	Al ₂ O ₃ /EG: %5 için %30
Choi <i>et al.</i>	MWCNT (25nm-50nm)/yağ	%1 için %160
Wen and Ding	TiO ₂ (34)/su	%0.66 için %13
Murshed <i>et al.</i>	TiO ₂ (15)/EG	%5 için %18
Kang <i>et al.</i>	Elmas (30-W)/EG	%1.32 için %75 Ag (8-15)/su %0.4 için %11
Murshed <i>et al.</i>	Al ₂ O ₃ (80)/DIW	%5 için 24%
Zhu <i>et al.</i>	Fe ₃ O ₄ (10)/su	%4 için %38
Xuan <i>et al.</i>	Cu (3.4)/su	%2 için %24
Wang <i>et al.</i>	CuO (50)/DIW	%0.4 için %17
Xuan and Li	Cu (10)/su	%3 için %70

Çizelge 2.1. (devam)

Patel <i>et al.</i>	Au (10-20)/toluene/su	Au/toluene: 30°C 'de %0.008 için %5.5
Hong <i>et al.</i>	Fe (10)/EG	%0.55 için %18
Kim and Kwon	CuO (12)/EG	%1 için %6
Krishnamurthy	Al ₂ O ₃ (20)/su	%1 için %16
Lee <i>et al.</i>	Al ₂ O ₃ (38)/su/EG CuO (23.6)/su/EG	CuO/EG: %4 için %22 Al ₂ O ₃ /EG: %5 için %18
Liu <i>et al.</i>	CuO (29)/EG	%5 için %23
Murshed <i>et al.</i>	TiO ₂ (15)/EG Al (80)/EG	%5 için %18 Al (80)/EG: %5 için %45

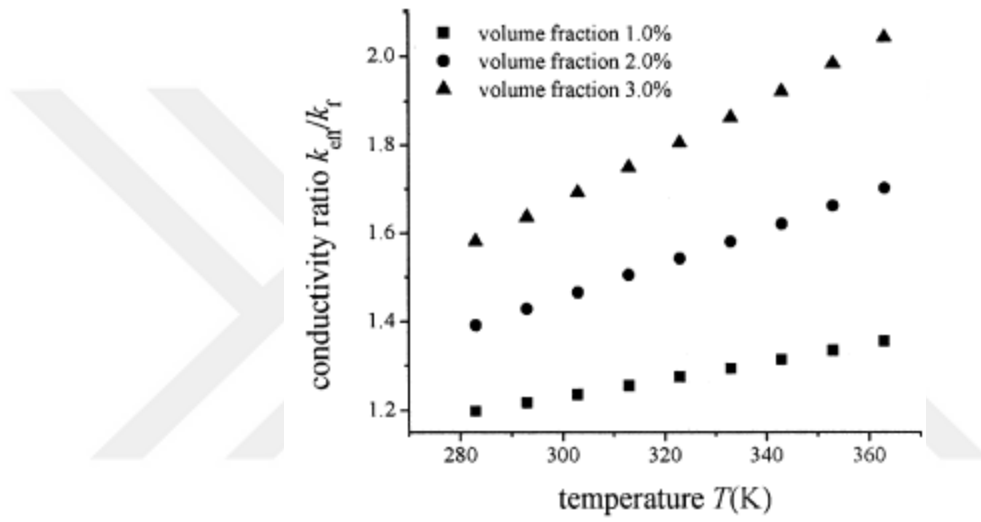
Teng *et al.* (2010) Al₂O₃ içeren su bazlı nanoakışkanın ısı iletkenliğini ölçmek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Teng dört farklı hacimsel konsantrasyonda (%0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0), üç farklı partikül çapında (20, 50 ve 100 nm) ve üç farklı sıcaklıkta (10°C, 30°C ve 50°C) araştırmayı gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, düşük partikül çaplarında ısı iletkenlik artışının daha belirgin olduğu ve benzer şekilde sıcaklığın artması ile ısı iletkenlikte gözlenen artışın yükseldiği ortaya konmuştur.

Ghozatloo *et al.* (2012) su ve Grafen nanopartiküllerle nanoakışkan hazırlamak için, alkalın metodu kullanmışlardır. Çalışmada Grafen nanoakışkanlarının ısı iletkenlik özelliklerini belirlemek için araştırmalar yapılmıştır. Sonuçta, sıcaklık ve partikül konsantrasyonu arttıkça, ısı iletkenlikte artış görülmüştür. Ayrıca Grafen nanoakışkanında kararlı bir süspansiyon oluşturmanın zorluğundan ve çökelme problemlerinden bahsedilmiştir.

Yu *et al.* (2009) ZnO-etilen glikol nanoakışkanını iki adım metoduyla hazırlayıp nanoakışkanın ısı iletkenliğini ve viskozitesini farklı hacimsel partikül oranlarda (%0.02 ile %0.05 arasında) incelemişlerdir. Bu araştırma, geçici sıcak tel metoduyla

yapılmıştır. Sonuçlar artan sıcaklık ve hacimsel partikül oranı ile ısı iletkenliğin arttığını göstermiştir.

Xuan *et al.* (2003) yuruttukleri deneysel çalışmalar surspansiyon sıcaklığının bakır-su nanoakışkanının ısı iletkenliği uzerinde oldukça etkili olduğu vurgulamışlardır. Ayrıca, hacimsel oranın artmasıyla ısı iletkenliğin arttığını bildirmişlerdir (şekil 2.1).

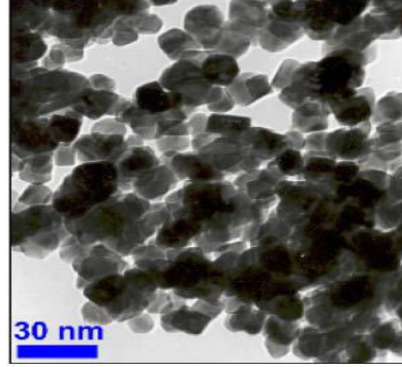


şekil 2.1. Cu-su nanoakışkanının ısı iletkenliğine sıcaklığın etkisi (Xuan *et al.* 2003)

Li *et al.* (2008) Cu-su nanoakışkanının ısı iletkenliğini araştırdılar ve partikül konsantrasyonu, pH değeri, ve yuzey aktif madde konsantrasyonu gibi bazı parametrelerin ısı iletkenlik uzerindeki etkisini incelediler. Sonuç olarak, partikullerin konsantrasyonu arttığı, ısı iletkenliğin de arttığı ortaya konmuştur. Ayrıca, pH değeri ve yuzey aktif madde konsantrasyonu ısı iletkenlik uzerinde onemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Murshed *et al.* (2005) ubuk ve kure şeklinde olan TiO₂ nano partikulleri ve sudan oluşan nanoakışkanın geçici sıcak tel metoduyla ısı iletkenliğini olmuşlerdir. Çalışmada partikül konsantrasyonu, partikül tipi ve partikül boyutunun nanoakışkanın

ıslıl iletkenliğinde önemli etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur. TiO_2 nano partiküllerin TEM görüntüleri Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2. 15 nm TiO_2 nano partiküllerinin TEM görüntüsü (Murshed *et al.* 2008)

Li and Peterson (2006) CuO -su nanoakışkanının ıslıl iletkenliğinin üzerinde, partikülün hacimsel oranının ve çalışma sıcaklığının etkisini deneysel bir çalışmada araştırmışlardır. Sonuçlar hacimsel konsantrasyonunun artışıyla, ıslıl iletkenliğinde arttığını göstermektedir.

Hong *et al.* (2006) su bazlı Fe nanopartiküllerinden oluşan nanoakışkanı kullanarak, ıslıl iletkenlik üzerine topaklanma sorununun etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar Su bazlı ıslıl iletkenliğin topaklanma ile önemli bir ölçüde değiştiğini göstermiştir.

Patel *et al.* (2003) çok düşük partikül hacimsel oranlarının ıslıl iletkenlik üzerinde etkilerini görmek için Au ve Ag nanopartiküllerini ve su ile hazırlanan nanoakışkanları incelemişlerdir. Ag-su nanoakışkanının %0.00026 hacimsel oranda ıslıl iletkenlikte %5-21 ve Au-su nanoakışkanının %0.011 hacimsel oranda ıslıl iletkenlikte %7-14 arasında arttırmaya sebebiyet verdiğini ortaya çıkmıştır.

Chopkar *et al.* (2003) su ve etilen glikol bazlı Al_2Cu ve Ag_2Al nanoakışkanlarının ıslıl iletkenliklerini farklı hacimsel oranlarında incelediler. %0.2-1.5 hacimsel oran kullandığında, nanoakışkanların ıslıl iletkenliğinde %50-150 arasında artış görülmüştür.

Isıl iletkenliğin artışında, nanopartikülün cinsi, şekli, boyutu ve hacimsel oranı faktörlerin etkisini incelediler.

Hwang *et al.* (2006) birkaç temel akışkan içinde (su, yağ, etilen glikol, poly- α -olefin yağı ve silikon yağı) farklı nanopartiküllerden (Ag, SiO₂, CuO, MWCNT ve fullerene) oluşan nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Fullerene-su nanoakışkanının ısı iletkenliği suya göre daha düşük olduğu görünmüştür. Bunun yanında, geri kalan nanoakışkanlar için, partikülün konsantrasyonu arttıkça, ısı iletim katsayısı da artmaktadır.

Lee *et al.* (1999) CuO ve Al₂O₃ partikülü ve temel akışkan olarak su ve etilen glikol kullanarak, nanoakışkanların termal iletkenliklerini ölçmüşlerdir. Nanoakışkanlarda, temel akışkanlardan daha yüksek termal iletkenlik görüntülenmiştir. CuO-etilen glikol nanoakışkanında %4 hacimsel oranda %20'den fazla artış olmuştur. Termal iletkenlik hacimsel oranla lineer olarak artmıştır. Deney sonuçları, nanoakışkanın termal iletkenliğinin hem nanopartiküllerin hem de temel akışkanın termal iletkenliğine bağlı olduğunu göstermiştir.

Wang *et al.* (1999) paralel plakada Al₂O₃ ve CuO nanopartikülleri ile hazırlanan nanoakışkanların termal iletkenliğini incelemişlerdir. Çalışmada temel akışkan olarak su, etilen glikol, vakum pompası yağı ve motor yağı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, nanoakışkanın termal iletkenliği temel akışkanından yüksek olduğu ortaya konmuştur. Nanopartikülün hacimsel oranı arttıkça, nanoakışkanın termal iletkenliği artmaktadır. Belirli bir hacimsel oranda, farklı temel akışkan için termal iletkenliğin artışı farklı olmuştur.

Eastman *et al.* (2001) Cu-etilen glikol nanoakışkanının ısı iletkenliğini deneysel olarak araştırdılar. Sonuçlar nanoakışkanın ısı iletkenliğinde büyük artış meydana geldiğini göstermiştir. Çalışma sonunda etilen glikol içine süspansiyon edilen Cu nanopartiküllerinin %0.3 hacimsel oranda ve 10 nm çapında olduğu ve nanoakışkanın termal iletkenliğinin %40'dan fazla arttığı rapor edilmiştir.

Xie *et al.* (2002) Al_2O_3 süspansiyonunun ısı iletkenliğini ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda partikül yüzey alanı, süspansiyonun pH değeri, katı fazın kristal yapısı ve temel akışkanın ısı iletkenliği gibi parametrelerin, ısı iletkenlik artışında etkin olduğu rapor edilmiştir. Hacimsel oran, Al_2O_3 nin izoelektrik noktası ve pH değeri arasındaki fark arttıkça, ısı iletkenlik de artmıştır. Temel akışkan aynı olduğu zaman, nanopartiküllerin yüzey alanı arttığında, ısı iletkenlik de artmıştır. Aynı nanopartiküller kullanıldığında, temel akışkanın ısı iletkenliğinin artışıyla, nanoakışkanın ısı iletkenliği azalmıştır. Partiküllerin kristal yapısı ısı iletkenlik üzerinde önemli bir etkiye neden olmamıştır.

Patel *et al.* (2003) ısı iletkenlikte, partikül boyutu, sıcaklığı ve partikülleri kaplayan tabakaların kimyasal özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Bu deneyde Au ve Ag nanopartiküllerinin yüzeyleri thiolate ve sitratla kaplanmıştır. Nanoakışkan için temel akışkan olarak su ve toluen seçilmiştir. Sonuçlar gösteriyor ki, thiolate kaplamalı partikül kullanılmış nanoakışkan, sitrat kaplamalı partikül kullanılan nanoakışkana göre daha az ısı iletkenlik artışı göstermiştir. Nanoakışkanın partikül konsantrasyonu arttıkça, ısı iletkenliği temel akışkana göre lineer olarak artmıştır. Ag nanoakışkanının ısı iletkenliğindeki artış, Au nanoakışkanına göre daha küçük olmuştur. Buna sebep olarak ise Au partiküllerinin daha büyük çaplarda olması gösterilmiştir.

2.2. Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü

Heyhat *et al.* (2013) Al_2O_3 -su nanoakışkanının ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerini laminar akış koşullarında deneysel olarak çalışmışlardır. Isı transferinin artan hacimsel konsantrasyon ve Reynolds sayısı ile arttığı belirtilmiştir. Ancak, ısı transferindeki artış sadece termal iletkenlikteki artış değil farklı parametrelerin de etkisinin olduğu belirtilmiştir. Temel akışkan içerisine nanopartiküllerin eklenmesi basınç düşümünün de artmasına neden olmuştur. %2.0 hacimsel oranda nanoakışkanın saf suya göre 5.67 kat daha büyük olduğu vurgulanmıştır.

Hwang *et al.* (2008) üniform ısıtılan dairesel bir boruda akan su- Al_2O_3 nanoakışkanının tam gelişmiş laminar akımda basınç düşüşü ve konvektif ısı transfer katsayısını ölçmüşler. Deney sonuçları nanoakışkanın sürtünme faktörünün tek fazlı akış için Darcy eşitliği ile çok iyi uyum sağladığını göstermiştir. Nanoakışkanın konvektif ısı transfer katsayısı saf su ile karşılaştırıldığında %0.3 hacimsel oranda %8'in üzerinde artış göstermiştir ve bu artış Shah eşitliği ile sağlanamamıştır. Ayrıca deney sonuçları ısı transferi katsayısı artışının büyük oranda ısıl iletkenliğini geçtiğini göstermiştir.

Putra *et al.* (2003) bir tarafından ısıtılıp ve diğer tarafından soğutulan yatay bir boru içinde iki farklı nanopartikül (Al_2O_3 -CuO) kullanarak, su bazlı süspansiyonun doğal taşınım karakteristiklerini incelemiştir. Çalışmada bir kaç parametrenin değişimi ve birbirleri ile ilişkisi araştırılmıştır. Örneğin, partikül konsantrasyonu, malzemesi ve akışkanın aktığı silindirin geometrik özellikleri gibi. Partikül konsantrasyonunun artması ile ısı transferi miktarının azaldığı görülmüştür.

Wu *et al.* (2013) Al-su nanoakışkanını bir çift borulu helisel ısı değiştiricide, kütle konsantrasyonu %0.78-%7.04 aralığında, ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerini hem laminar hem de türbülanslı akış şartlarında incelemiştir. Sonuçlar nanopartiküllerin olduğu durumda kritik Reynolds sayısının değişimi ihmal edilebilecek kadar az olduğunu göstermiştir. Ayrıca literatürde kullanılan korelasyonlarla kıyaslandığında, nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü performansları neredeyse birbirine eşit olduğu belirlenmiştir.

Sekhar *et al.* (2013) boru içinde yerleştirilen bükülmüş şerit elemanlar kullanarak, oksit nanopartiküller ve su dan oluşan nanoakışkanların taşınımıyla ısı transferi karakteristiklerini incelemiştir. Sonuçlar gösteriyor ki, partikülün hacimsel oranı arttıkça, nanoakışkanların ısı transferi ve sürtünme katsayısı artmaktadır.

Azari *et al.* (2013) su bazlı Al_2O_3 , SiO_2 ve TiO_2 nanoakışkanlarının ısı transferi karakteristiklerini laminar akış şartlarında incelemiştir. Nanopartiküllerin varlığından dolayı ısıl iletkenliklerinin saf suya göre oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca

Al_2O_3 ve TiO_2 nanoakışkanlarının kullanımı ile ısı transferinde önemli miktarda artış görülmüştür. Bunun yanında, Al_2O_3 partiküllü nanoakışkandaki ısı transferi artışının TiO_2 partiküllü nanoakışkana göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.2. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri (Azari *et al.* 2013)

Partikül	Partikül Şekli	Ortalama Çap nm	Yoğunluk $kg.m^{-3}$	Termal İletkenlik $w.m^{-1}.k^{-1}$	Özgül Isı $J.kg^{-1}.k^{-1}$	Özgül Yüzeysel Alan $m^2.g^{-1}$	Safılık
SiO_2	Küresel	20	2500	1.4	730	90	>99.8%
TiO_2	Küresel	25	3800	11.7	689.3	-	>99.9%
$\gamma-Al_2O_3$	Küresel	40	3920	40	880	>40	>99.9%

Kalteh (2013) farklı nanopartiküller (Elmas, Al_2O_3 , CuO, Fe, Au, Ag, SiO_2 , TiO_2) ve farklı temel akışkanlarla (Etilen glikol, Motor yağı, Saf su) hazırladığı nanoakışkanların ısı transferi karakteristiklerini araştırmıştır. Deneylerde giriş hızı, partikülün hacimsel oranı ve partikülün çapı sabit kalmaktadır. Aşağıda bu çalışmaya ait sonuçlar çizelgeler (2.3, 2.4 ve 2.5) halinde verilmiştir.

Çizelge 2.3. Nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri (Kalteh 2013)

Nanopartikül Tipi	ρ (kg/m^3)	C_p (J/KgK)	K (W/mK)
Au	19.320	128	318
TiO_2	4250	686.2	8.95
Al_2O_3	3970	765	40
Fe	7860	440	80.4
Cu	8954	383.1	386
CuO	6500	535.6	20
Elmas	3510	497.3	1000
SiO_2	2200	703	1.2
Ag	10.500	235	429

Çizelge 2.4. Akışkanların termofiziksel özellikleri (Kalteh 2013)

Temel Akışkan Tipi	ρ (kg/m ³)	C_p (J/KgK)	K (W/mK)	Pr
Motor yağı	890	1868	0.145	12900
Su	1000.52	4181.8	0.590	7.02
Etilen Glikol	1117	2390	0.249	205.4

Çizelge 2.5. Farklı nanoakışkanların su içerisinde %1.0 hacimsel oranda ve $Re=100$ 'de boyutsuz basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayısı sonuçları (Kalteh 2013)

Nanopartikül	Saf su	Cu	Ag	Al ₂ O ₃	Elmas	Fe	SiO ₂	CuO	SiO ₂	Au
ΔP	24.19	24.61	24.63	24.6	24.58	24.63	24.59	24.61	24.59	24.66
Nu	7.92	11.65	12.07	8.42	17.35	8.81	8.00	8.23	8.12	11.04

Tiwari *et al.* (2013) deneysel olarak bir levha tipi ısı değiştiricide, CeO₂ ve su dan oluşan nanoakışkanının ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerini araştırmışlardır. Bu deneyler boyunca partikülün hacimsel oranı %0.5 ile %3.0 arasında tutulmuştur. Nanoakışkanın sıcaklığının azalması, partikül konsantrasyonu ve ısıtma-soğutma suyunun hacimsel debisinin artmasıyla, ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Nanoakışkanın saf suya göre, basınç düşümünde de artış görülmemiştir.

Arani and Amani (2013) su ve TiO₂ dan oluşan nanoakışkanın tam gelişmiş türbülanslı akış koşullarında, ısı transferi ve basınç düşümünü incelemiştir. Bu çalışmada parametre olarak partikülün hacimsel oranı (%1.0-2.0) ve partikülün çapı araştırılmıştır. Sonuçlar gösteriyor ki, en yüksek ısı transferi performansı 20 nm çapındaki nanopartiküllerden oluşan nanoakışkanlarda görülmüştür. Bunun yanında, nanoakışkanların saf suya göre, basınç düşümünde önemli miktarda artış gözlenmemiştir. Bu çalışmada, en yüksek ısı transferi performansı $Re=47.000$, $\phi=0.02$ ve $d=20$ nm için elde edilmiştir.

Xuan and Li (2003) düz bir boruda sabit duvar ısı ile Cu-su nanoakışkanının ısı transferisini deneysel olarak incelediler. Sonuçlar saf su ile karşılaştırıldığında ısı

transferde büyük bir artış ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca çalışma sonunda düşük konsantrasyonlarda ek bir pompalama gücüne ihtiyaç duyulmadığı da rapor edilmiştir.

Wen and Ding (2003) γ - Al_2O_3 (27–56nm)-su nanoakışkanının bakır boruda ($D=4.5\text{mm}$, $L=970\text{mm}$) laminar akımda konvektif ısı transferini deneysel olarak çalışmışlardır. Deneysel sonuçları Al_2O_3 parçacıklarının sıvıya dahil edilmesinin ısı transfer katsayısını önemli derecede artırdığını göstermiştir, bu artış Re sayısının ve parçacık konsantrasyonunun artışıyla artmıştır. Bunun yanında ısı transfer katsayısındaki artış giriş bölgesinde daha büyüktür ve aksel uzaklıkla azalmıştır.

Rea *et al.* (2003) ZrO_2 (zirkonyum dioksit), Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve su dan oluşan nanoakışkanların laminar akış koşullarında, ısı transferi ve basınç düşümünün karakteristiklerini incelemiştir. ZrO_2 partiküllü nanoakışkanda %1.32 hacimsel oranla, giriş bölgesinde ısı transferinde %2 ve tam gelişmiş bölgede %3 artış gözlemlenmiştir. Al_2O_3 partiküllü nanoakışkanda ise giriş ve tam gelişmiş bölgelerde ısı transferinde sırayla %17 ve %27 artış görülmüştür. Nanoakışkanın basınç kayıpları saf su ile kıyaslandığında çok yüksektir.

Kang *et al.* (2007) gümüş nanopartikül kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Gümüş nanopartikül boyutları 10 nm ve 35 nm dir. Sonuçlar göstermiştir ki toplam ısı direnç nanoparçacık konsantrasyonu ve nanoparçacık boyutunun artması ile azalmıştır. Saf su kullanılan ısı borusuyla nanoakışkan kullanılan ısı borusu karşılaştırıldığında ısı direncin, 10 nm boyutundaki nanopartiküller için %50 ve 35 nm boyutundaki partiküller için %80 oranında azladığı ortaya konmuştur.

Kumaresan *et al.* (2012) borulu bir ısı değiştiricisinde çok cidarlı karbon nanotüpleri su ve etilen glikol karışımından oluşan nanoakışkanların ısı transferi performanslarını incelemiştir. Sonuçlar, Reynolds sayısının azalması ile ısı transferi katsayısının arttığını göstermiştir. Termal iletkenliğin %19.0'luk artışı ortalama ısı transferinde yaklaşık %159'luk bir artışa neden olmuştur.

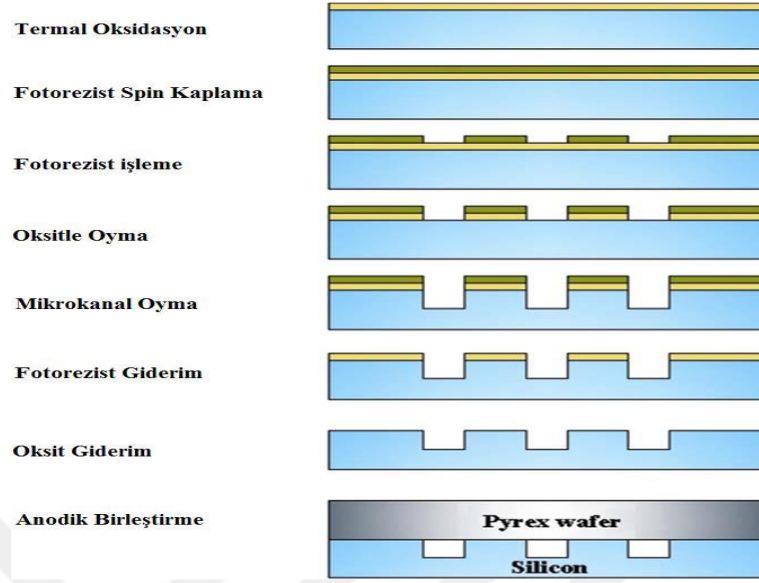
2.3. Mikrokanallarda Isı Transferi ve Basınç Düşümü

1981 yılında ilk olarak Tuckerman ve Pease mikrokanallarda akışkanlarla soğutma üzerine bir takım araştırmalara başlamışlardır. Mikrokanal geometrisinin ısı transferisinde önemli bir etkisi vardır. Literatürde bu konu ile ilgili pek çok araştırma mevcuttur. Kanal geometrisi, kanal sayısı, kanal yüksekliği, kanal genişliği, kanal pürüzlülüğü ve kanal içine yerleştirilen yüzey elemanlar geometri parametrelerden etkin parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikrokanallarda sürtünme faktörünü incelemek için de çalışmalar devam etmektedir. Genel teoriler mikrokanallardaki sürtünme katsayısı hesaplamasında kullanılıp kullanılmayacağı henüz belli değildir.

Jong *et al.* (2007) dikdörtgen kesitli mikrokanallarda matematiksel olarak, kılcallık ve yer çekimi etkisi ile gerçekleşen akışı Navier Stokes denklemlerini kullanarak çözmüştür.

Mikrokanallardaki basınç kaybı Hrnjak ve Tu *et al.* (2007) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada hidrolik çap değeri $69.5 \leq D_h \leq 304.7 \mu\text{m}$ ve $112 \leq D_h \leq 9180$ aralığında tutulmuştur. Çalışmada kritik Reynolds sayısı değerinin 2150-2290 aralığında kaldığı belirlenmiştir. Sürtünme faktörü hesabında, R134a akışkanı için laminar akış şartında Navier Stokes denklemine dayanan analitik bir çözüm geliştirilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda türbülanslı bölgede literatürde bilinen korelasyonlardan daha yüksek basınç kaybı değerleri elde edilmiştir.

Chu *et al.* (2010) deneysel ve sayısal olarak yuvarlatılmış mikrokanallarda akışı incelemişlerdir. Çalışmada Reynolds sayısı 80-876 aralığında tutulmuştur. Sonuçlar farklı kanal genişliklerinin ve farklı yuvarlatma çaplarının basınç düşümünde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Yuvarlatılmış dikdörtgen mikrokanalların üretim akış diagramı (Chu *et al*)

Tang *et al.* (2012) silika mikrotüplerde (75-250 μm) ve silika kare mikrokanallarda (75-100 μm) ve paslanmaz çelik mikro tüplerde su ve PAM solüsyonunun Non-Newtonian sıvı akışı üzerinde akış karakteristiklerini geniş bir Reynolds sayısı aralığında araştırmışlardır. Sonuçlar göstermiştir ki yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla mikrokanallardaki sürtünme faktörüde artmaktadır. Ayrıca silika tüp ve kare kanallarda sürtünme faktörünün hesabında genel teorilerin uygulanabildiği de ortaya konmuştur.

Rahman (2000) düz paralel ve zik-zak paralel mikrokanallarda suyun ısı transferi ve basınç düşümünü zorlanmış taşınım şartlarında incelenmiştir. Bu araştırmada kanal uzunluğunun, akış hızının ve akış dallanmasının etkilerini incelemek amacıyla iki farklı paralel kanal geometrisi kullanmıştır. Zik-zak kanalların hız sınır tabakasının parçalanmasına neden olmasından dolayı, geniş kanallarda mevcut modellerden daha yüksek ortalama Nusselt sayıları elde edilmiştir.

Li *et al.* (2007) mikrokanallarda kullanılan akışkanların ısıl özelliklerinin zorlanmış taşınım ile ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerinde etkilerini sayısal olarak incelenmişlerdir. Araştırmalar mikrokanalın hidrolik çapı 0.333 mm sabit ve Reynolds

sayısı 101-1775 arasında laminar akış şartlarında yapılmıştır, ve üç farklı yöntem, giriş özellik metodu, ortalama özellik metodu ve değişken özellik metodu kullanılmıştır. Elde edilen sürtünme katsayısı giriş özellik yöntemde, ortalama ve değişken özellik yöntemin sonuçlara göre daha yüksektir. Deneyin başlangıcında ortalama özellik yönteminden elde edilen sürtünme katsayısı değişken özellik yöntemin sonucuna göre daha yüksek olduğu görülmüştür, ama kanal boyunca daha düşük değerler ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni kanal boyunca viskozitedeki değişim belirlenmiştir. Ayrıca, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı için de Sürtünme katsayısı gibi benzer davranış sonuçlanmıştır. Pratik mühendislik problemlerinde değişken özellikler yöntemi daha doğru sonuçlar göstermektedir.

Şahin vd (2015) saf su ve TiO_2 dan oluşan nanoakışkanı dört farklı hacimsel oranda (%0, %0.5, %1.0 ve %1.5) mikrokanallı ısı alıcıda dört farklı kanal yüksekliğinde (200μ , 300μ , 400μ ve 500μ) inceledi. Deney laminar akış ve kararlı hal şartlarında yapıldı ve ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri incelendi, ve parametreleri optimize edilerek optimum değerlerini belirledi.

Hung and Yan (2012) çift katlı bir mikrokanalda Al_2O_3 , CuO , TiO_2 ve su dan oluşan nanoakışkanları farklı hacimsel oranlarda (%0.5-5 aralığında) sayısal olarak incelediler. Sonuçta, Al_2O_3 partiküllü olan nanoakışkan en iyi soğutma performansı göstermiştir. Optimum ısı direncinin bir kaç faktöre bağlı olduğunu belirlediler, ki uygun nanoakışkan, partikül konsantrasyonu, kanal sayısı ve kanal genişliğini soyliyebiliriz.

Lee and Mudawar (2007) mikrokanallarda Al_2O_3 ve su dan oluşan HFE7100 tabanlı nanoakışkanları tek ve iki fazlı akış yaklaşımı ile ve sabit ısı akısı sınır şartında ısı transferi açısından incelemişlerdir. Çalışma iki farklı kütleli debi de yapılmıştır. Kanal boyunca sürtünme katsayısının ve basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimleri ve ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimleri incelenmiştir.

Jang and Choi (2006) bakır-su ve elmas-su nanoakışkanlarının mikrokanallı soğutucunun soğutma performansına etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışma

sabit pompalama gücü, ısı akısı ve laminar akışta, dört farklı enerji modu kullanılarak yapılmıştır. Sonuçta sıcaklık kontürleri, ısıl direncin pompalama gücüne karşılık değişimi, ısıl iletkenlik-hacimsel oran ilişkileri incelenmiştir.

Mohammed *et al.* (2010) mikrokanallı ısı eşanjörlerinde, farklı nanoakışkanlarda farklı hacimsel oranlarda farklı Reynolds sayılarında ısı transferi ve akış karakteristiklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışma laminar akış şartlarında sabit ısı akısında yapılmıştır. Çalışmada, mikro kanallı ısı eşanjörünün performansı, ısı transfer katsayısı, basınç kaybı belirlenmiştir.

Chein and Huang (2005) teorik ve deneysel bir araştırmada, mikrokanallı soğutucu performansını Cu-su nanoakışkanının farklı hacimsel oranlarda iki farklı geometri için incelemiştir. Bu çalışmada basınç kayıpları, Nusselt sayısı ve ısıl direnç farklı durumlar için araştırılmıştır.

Akbarinia *et al.* (2011) Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanarak dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda nanoakışkanların ısı transferi karakteristiklerini kayma ve kaymama şartlarına göre incelemiştirler. Bu araştırmada artan giriş hızı, nanopartikül hacimsel oranını, kinematik viskozite, boyutsuz sıcaklık dağılımları ve boyutsuz hız dağılımlarının yerel Nusselt sayısı ve Knudsen sayısı üzerinde etkileri incelenmiştir.

Tsai and Chein (2007) Cu-su ve CNT-su (karbon nanotüp) nanoakışkanlarını mikrokanallı soğutucuda kullanarak ısı transferi performansını incelemiştirler. Deneysel olarak öncelikle farklı açılarda, boyutsuz hız dağılımları, boyutsuz sıcaklık dağılımları, pompalama gücü ve basınç kayıp dağılımları elde edilmiş, sonra kanal geometrisine göre optimize etmekle mikrokanallı soğutucunun toplam ısıl direnci iki farklı basınç şartı için elde edilmiştir.

Li and Kleinstreuer (2008) ikizkenar yamuk kesitli bir mikrokanalda nanoakışkan kullanımını iki farklı sayısal model kullanarak ısı transferi yönüyle araştırmışlardır.

Sonuçlar literatürdeki birçok çalışmayla kıyaslanmış ve kullanılan sayısal model doğrulanmıştır.

Ho *et al.* (2010) Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanarak, paralel levhalar arasında oluşturulan 25 adet mikrokanalda soğutma performansını incelemişlerdir. Bu deneysel araştırmada sürtünme katsayısı, pompalama gücü, ortalama ısı transferi katsayısı, ısı direnç ve maksimum duvar sıcaklığı parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Tokit *et al.* (2012) Al_2O_3 , CuO ve SiO_2 su dan oluşan nanoakışkanların davranışlarını kesikli mikrokanallı bir ısı alıcıda ısı performans açısından sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar en yüksek ısı iletkenliği sırasıyla Al_2O_3 , CuO ve son olarak SiO_2 nanoakışkanına ait olduğunu göstermiştir

İlgili literatür incelendiğinde konu ile ilgili halen cevaplanmayan sorular mevcuttur. Nanoakışkanlar, ısı transferi iyileştirmesinde sıklıkla kullanılmaktadır ve gelişime açık bir konudur. Nanoakışkanların mikrokanallardaki davranışının belirlenmesi, anlamlandırılması ve geliştirilmesi de mikrokanal sistemlerinin kullanıldığı teknolojilerin gelişmesi için elzemdir. Bu çalışmada partikül çapı 10-20 nm olan SiO_2 (silisium oksit) ve saf su ile hazırlanan nanoakışkanların dairesel mikrokanalda ısı transferi ve basınç düşümleri deneysel olarak incelenmiştir.

2.4. Kuramsal Kavramlar

2.4.1. Isı transferinin iyileştirme yöntemleri

Enerji, endüstri kavramının ortaya çıkışından bu yana bu kavramın en temel ihtiyacıdır. Dolayısı ile endüstrinin gelişimi büyük oranda enerji teknolojilerindeki ilerlemeyle orantılıdır. Bu durum pek çok araştırmacı ve bilim insanını enerji teknolojileri konusunda çalışmaya yönlendirmiştir. Bu konu içerisinde önem arzeden bir konu ise ısı transferi iyileştirmesidir. Isı transferi iyileştirme teknikleri aktif, pasif ve karma yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif yöntemlerde, dışardan güç vermeden ısı

transferi arttırırken, aktif yöntemlerde ise dış güç kaynağı kullanarak, akışkana veya ortama ilave enerji vermekle, ısı transferi arttırılmaktadır. Karma yöntemlerde aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası ile ısı transferinin iyileşmesi sağlanmaktadır.

2.4.1.a. Pasif yöntemler

- İç elemanların yerleştirilmesi

İç elemanlar, akış kanalı içine ısıtılmış yüzeydeki ısı enerjisini iletmek için yerleştirilir. Bu yöntem, tek fazlı ve iki fazlı akışlarda kullanılabilir. Bu elemanlar akışkanın cidara yakın bölgelerde karıştırmaya, akışı döndürmeye duvarla temas yoluyla kanat ödevi görecektir.

- Pürüzlü yüzeyler

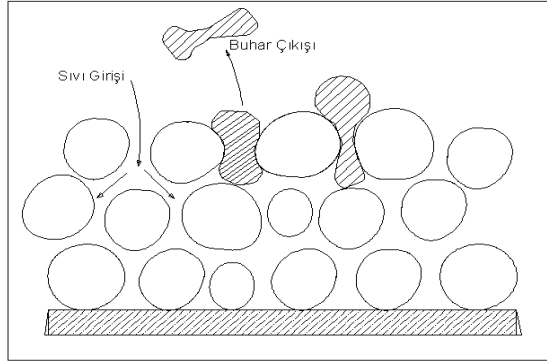
Bu metotta, Kesikli kabarcıklar elde etmek amacıyla pürüzlülük oluşturulur. Genellikle pürüzlü yüzeyler elde etmek için yüzeye kumlama işlemi uygulanır. Diğer pürüzlülük elde etme yöntemleri aşağıdaki gibidir:

- a) Boru cidarına kare veya V şekilli yarıklar açmak
- b) Kum taneleri veya benzer maddeler boru yüzeyine yerleştirmek
- c) Düşük yükseklikli aksel veya spiral kanatçıklar oluşturmak (Yılmaz 1996)

- Kaplanmış yüzeyler

Bu metotta yüzeyler, metalik veya metalik olmayan bazı malzemelerle (örneğin teflon) kaplanmaktadır. Gözenekle iyi bir şekilde kaplanmış olan yüzeyde damlacık buharlaşmanın gerçekleşmesini sağlayabilir. Bu durum faz değişimi proseslerinde

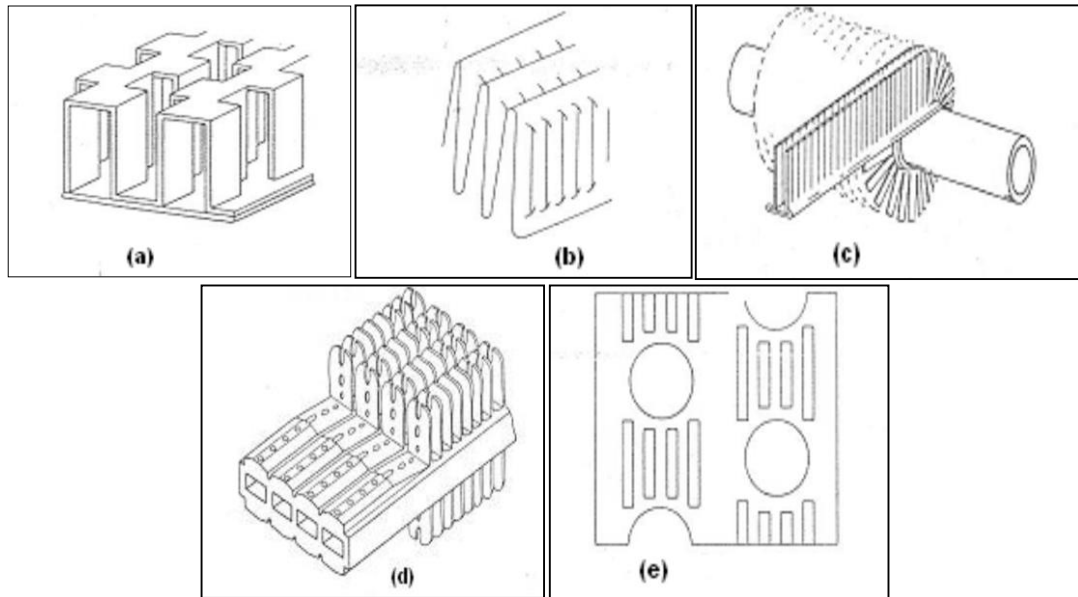
büyük avantaj sağlayacaktır (Bergles *et al.* 1996). Şekil 2.4’de gözenekli buharlaşma yüzeyinin kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.4. Gözenekli buharlaşma yüzeyinin kesit görünüşü (Bergles *et al.* 1996)

- Genişletilmiş yüzeyler

Bu yöntemde, yüzeyi delerek veya şekil vererek genişletilmiş yüzey elde etmekle ısı transfer katsayısı arttırılmaktadır. Bu yöntem birçok ısı değıştircisinde kullanılır. Şekil 2.5 sıvı ve gazlar için genişletilmiş yüzeyler gösterilmektedir (Webb 1994).



Şekil 2.5. Sıvı ve gazlar için genişletilmiş yüzeyler

(a) Levha-kanatçıklı ısı değiştiricilerinde kullanılan dirsek tipi kanatçıklar (b) Otomotiv ısı değiştiricilerinde kullanılan panjur tipi kanatçıklar (c) Dairesel tüpler için parçalı kanatçıklar (d) Bütün alüminyum kanatçıklı tüp (e) Panjur tipindeki tüp-levha kanatçığı

- Dönmeli akış elemanları

Bu yöntemde akış alanına ikinci akışlar oluşturacak geometriler yerleştirilerek ısı transferinde artış amaçlanmaktadır. Örneğin kıvrılmış borular, vorteks üreteçler ve bükülmüş şeritler bu elemanlardan olabilir (Şahin 2001).

- Sıvılar için katkı maddeler

Bu yöntemde, akışkan içerisine katı partiküller eklenmektedir. Nanoakışkan kullanımı ise bu yöntem temelinde bina edilmiştir (Şahin 2001).

- Gazlar için katkı maddeler

Bu yöntemde, sıvı damlacıklar veya katı partiküller kullanılmaktadır. Gaz akışına 0.03-1 mm boyutta katı partiküller eklemekle karışım daha yüksek ısı transferi sonuçları elde edilebilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, katı partiküllerde oluşan radyasyon nedeniyle ısı transferinde artış ortaya çıkacaktır (Şahin 2001).

- Dönmeli akış

Dönmeli akış yönteminde, kanal eksenini etrafında eş merkezli olarak dönmektedir ve kanal boyunca aksenal akışa teğetsel hareket eklenmektedir. Böylece akışkan elemanı helisel bir yörünge takip eder ve ısı transferinde artış elde edilir (Şahin 2001).

2.4.1.b. Aktif yöntemler

- Mekanik karıştırıcılar

Bu yöntemde akışkan, mekanik elemanlarla karıştırılmaktadır veya yüzey mekanik yöntemlerle döndürülmektedir. Böylece, zorlanmış taşınım ile ısı transferinde bariz bir artış görülmektedir. Yüzeydeki sıvıyı karıştırmak kimya sanayisinde viskoz sıvılar için sıklıkla kullanılır ve aynı yöntem borudaki gaz akışına da uygulanabilir (Webb 1994).

- Akışkan titreşimi

Tek fazlı akışlarda akışkanın titreşimi sağlanır. Uygun transdüzer dizaynı ile gazlara ve sıvılara daldırılan basit ısıtıcılar yardımıyla ısı transferini daha fazla artırmak da mümkündür (Webb 1994; Bergles *et al.* 1996; Şahin 2001).

- Yüzey titreşimi

Bu yöntemde, düşük veya yüksek frekanslarda yüzey titreşimi sağlanır ve tek fazlı akışlarda ısı transferini artırır. Ayrıca bu yöntem, kanal içindeki akışta, hem laminar hem de türbülanslı akış durumlarında kullanılabilir (Webb 1994).

- Enjeksiyon

Bu metotta, gazın gözenekli ısı transfer yüzeyi içinden akışkan akımına enjekte edilmesiyle veya aynı sıvının ısı transfer bölgesinin üst kısmına enjekte edilmesiyle, tek fazlı akışta ısı transferini arttırılmaktadır (Webb 1994; Bergles *et al.* 1996).

- Elektrostatik alanlar

Bu yöntemde, dielektrik akışkana değişik yollarla AC veya DC akımı uygulanmaktadır. Genel olarak, elektrostatik alan ısı geçiş yüzeyinin çevresinde akışın karışmasına sebep olur (Webb 1994; Bergles *et al.* 1996). Gerekli gerilim değerinde elektrostatik alanlar oluşturmak için 100.000 V'a kadar çıkartılabilirse ısı transfer katsayısı 40 kata

artırılabilir. Bu yöntem, özellikle laminar akış için uygulanmaktadır (Yılmaz 1996; Şahin 2001).

- Jet çarpması

Yüzeğe düz veya açılı bir şekilde tek fazlı akışkan çarptırılır. Bu yöntemde bir veya daha fazla jet kullanılabilir (Bergles 1985).

- Emme

Bu yöntemde, çekirdek veya film kaynamada, gözenekli ısıtılmış yüzey arasından buhar çekilmesi yoluyla, tek fazlı akışta uygulamaktadır (Bergles 1985).

Isı transferinin iyileşmesinde, pasif yöntemler kullanılarak önemli ölçüde artış elde edilebilir. Bunu yanında, pasif yöntemlerinin kullanılmasında bazı dezavantajlar da vardır. Bu yöntemleri kullandığında, basınç düşümünde artış meydana gelmektedir. Bu nedenle akışkanı tahrik etmek için gerekli enerji miktarı da artmaktadır. Ayrıca, pasif yöntemlerde sistemde çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Örneğin kimyasal uygulamalarda akışkanın özelliklerine bağlı olarak çökme, kirlenme gibi problemler görülmektedir ki, bir süre sonra ısı transferinin azalmasına neden olmaktadır.

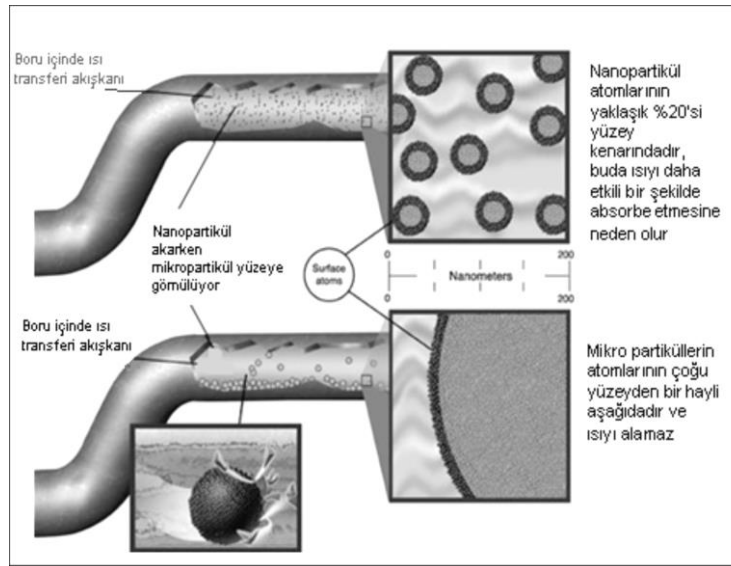
2.4.2. Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi

Milimetre veya mikrometre boyutlardaki katı partiküllerin akışkan içine süspansiyon edilmesiyle ısı iletkenlik artacaktır, fakat kanal içinde büyük basınç düşümleri, kimyasal çökme, tortulaşma ve mekanik aşınma gibi problemler de ortaya çıkacaktır. Bunun yanında, bu süspansiyonların kararlılık problemleri de bulunmaktadır. Son yıllarda bu problemlerin giderilmesi için akışkan içerisine mikro veya milimetre boyutlarında değil nanometre boyutlarında partiküllerin eklenmesi gibi bir çözüm sunulmuştur. Isı iletkenlikleri yüksek olan nanometre boyutlardaki katı partiküllerin

geleneksel akışkanlara eklenmesi ile ısı transferi arttırılmaktadır. Bu nanometre boyuttaki katı partiküllerin temel akışkana eklenmesi ile elde edilen yeni nesil akışkanlara “nanoakışkan“(nanofluid) denilmektedir.

Yaklaşık 20 sene önce Choi (1995) Argonne National Laboratory’de nanopartikülleri temel akışkan içine süspansiyon ederek nanoakışkanlar hazırlamış ve bu akışkanların ısı özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Bu nanopartiküllerin akışkan içine dağıtılması ısı transferi iyileştirmede büyük bir potansiyel göstermektedir. Ayrıca, nanoakışkanların kullanılması basınç düşümünde yok denecek kadar az artışa neden olmaktadır.

Yapılan son araştırmalarda, nanoakışkanların kullanımının ısı transferi karakteristiklerini ve taşınım özelliklerini önemli bir şekilde etkilediği görülmüştür. Ama bu gelişimlere rağmen nanoakışkanların termodinamik özellikleri konusunda literatürde tam bir birlik yoktur. Dolayısıyla nanoakışkanların esas potansiyellerini değerlendirmek zordur. Şekil 2.6’de mikropartiküllerle nanopartiküllerin bir karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 2.6. Nanopartiküllerin mikropartiküllerle karşılaştırılması (Şahin *et al.* 2006)

Nanopartiküllerin akışkana eklenmesi ısı transferi performansını önemli miktarda artmaktadır. Aşağıdaki temel fiziksel olaylar bu artışın sebebi olarak gösterilmektedir:

- Nanopartiküllerin akışkan içine eklenmesi akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini artırır.
- Akışkanın çalkantıları ve türbülans şiddeti artar.
- Partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmalar, akış geçitinin yüzeyini artırmaktadır.
- Nanopartiküllerin savurması (saçılması) akışkanın enine sıcaklık eğiminin düzleşmesine neden olmaktadır.
- Nanoakışkanlarda kullanılan nanopartiküller alüminyum oksit (Al_2O_3), bakır (Cu), bakır oksit (CuO), altın (Au), gümüş (Ag) ve silisyum dioksit (SiO_2) gibi partiküllerdir. Nanopartiküller mekanik aşındırma, gaz yoğunlaştırma ve kimyasal çöktürme gibi yöntemlerle elde edilir. Bunlardan gaz yoğunlaştırma yöntemi diğerlerine göre avantajlı bir yöntemdir. Bunun nedeni partiküllerin bu yöntemle temiz bir ortamda üretilebilir olması ve yüzeylerin istenmeyen maddelerle kaplanmamasıdır. Ayrıca, düşük enerji durumlarında partiküllerin toplanma sorunu görülmektedir.

2.4.3. Mikrokanal kavramı

Son yıllarda üretim teknolojilerdeki gelişmelerle birlikte 100 μm den küçük boyutlarda kanalların üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu durum mikrokanal kavramını ortaya çıkarmıştır ve araştırmacıların bu konuya olan ilgisinde artmıştır. Mikrokanallar veya mikrokanallı ısı alıcıları yüksek ısıl etkinlikleri, küçük boyutları, düşük ağırlıkları ve esnek dizaynları gibi özellikleriyle oldukça avantajlı cihazlar olarak göze çarpmaktadır. Bu sebeple endüstrinin pek çok alanında bu cihazlar kullanılmaktadır. Bu durum mikrokanal veya mikrokanallı ısı alıcılarının kullanıldığı sektörleri bu cihazların gelişimine gebe bırakmaktadır.

Literatürde yaygın bir kabul ise mikrokanalları hidrolik çapı 0-1000 μm arasında değişen kanallar olarak tanımlar. Gün gittikçe, endüstrinin gelişimiyle çeşitli alanlarda

boyutların küçültülmesi ve dolayısıyla mikrokanalların geliştirilmesi yönünde çalışmaların sayısı da artmaktadır. Genel olarak MEMS'in (mikro elektro mekanik sistemler) ve içerisinde mikrokanallar içeren MFD'in (mikro akışlı sistemler) gelişimi de bu teknolojiye ön plana çıkmaktadır. Mikrokanalların kullanımının avantajlarının yanısıra bazı dezavantajları da vardır (Manay 2012). Bunlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Dezavantajlar

- Düşük hidrolik çap
- Basınç düşümü
- Kullanılacak teorilerin belirsizliği
- Zor imalat ve yüksek maliyet

Avantajlar

- Yüksek alan/hacim oranı
- Az yer kaplamaları
- Yüksek ısı akısı
- Düşük iş akışkanı ihtiyacı

Mikrokanallarda akışın sınıflandırılması için farklı bir yaklaşım ise Knudsen sayısını bir araç olarak kullanmaktır. Knudsen sayısı aşağıdaki gibi tanımlanır (2.1).

$$Kn = \lambda/L \quad (2.1)$$

Burda λ ortalama serbest yolu, L ise sistemin karakteristik uzunluğunu beyan etmektedir. Knudsen sayısı 10^{-3} den küçük olduğunda, akış sürekli ortam akışı, $10^{-3} < Kn < 10^{-01}$ olduğunda kaygan akış rejimi olarak, $10^{-01} < Kn < 10$ durumunda geçiş akışı ve $Kn > 10$ olduğunda ise serbest moleküler akış olarak sınıflandırılmaktadır. Sürekli akış bölgesinde ve kaygan akış bölgesinde akış için Navier-Stokes denklemleri kullanılabilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada 700 μm çapında bir dairesel mikrokanalda, saf su ve SiO_2 nanopartiküllerden oluşan nanoakışkanın farklı hacimsel oranlarda (%0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2) Reynolds sayısı 300-3300 arasında, ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçları mevcut ısı transferi modelleri ile kıyaslayıp sonuçlar araştırılmıştır. Deney düzeneğinin bir görseli Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deney düzeneğinin resmi

Deneyler önce saf su ile sonra farklı hacimsel oranlarda SiO_2 nanoakışkanları ile yapılmıştır. İlk olarak sisteme güç verilmeden önce, akışkan besleme tankına doldurulup, pompayı çalıştırılarak istenilen en yüksek Reynolds sayısı değerine ulaşıldıktan sonra sisteme ısı enerjisi verilir. Verilen ısı miktarı güç kaynağına bağlanan güç analizörü yardımıyla belirlenmiştir. Bilgisayara bağlı data kartından alınan sıcaklık değerleri takip edilerek sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Sistem kararlı hale ulaşıttan sonra veriler kaydedilerek, akış şartları bir alt debi değerine ayarlanarak son debi değerine kadar deneyler tekrarlanmıştır.

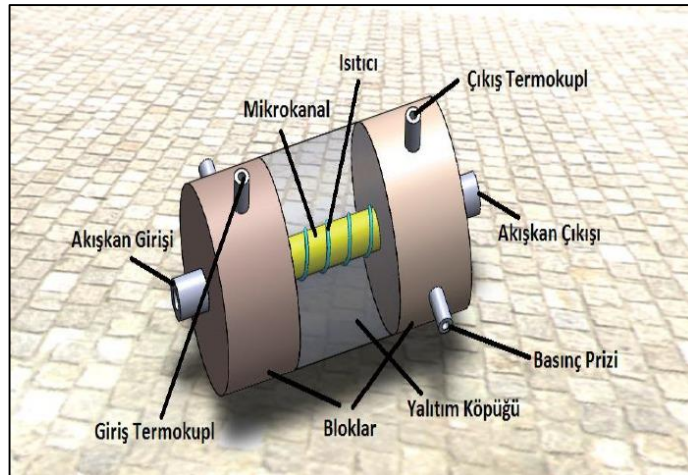
3.1. Deneysel Materyal

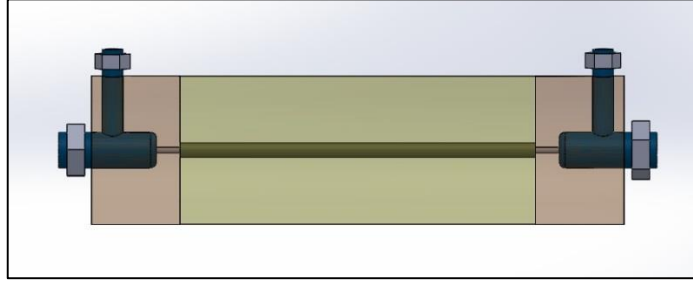
3.1.1. Nanopartiküller

Bu çalışma bir kaç aşamadan oluşturulmaktadır. İlk adım nanoakışkanın hazırlanmasıdır. Nanopartikül olarak silisium oksit (SiO_2) ve temel akışkan ise saf su kullanılmıştır. Toz şeklinde olan SiO_2 partikülü ortalama 15 nm boyutundadır, yapılan hesaplamalar sonucunda, hassas terazi ile ölçülmüş ve saf suyun içine %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 hacimsel oranlarda karıştırılarak, homojen süspansiyon elde etmek için ultrasonik homojenizatörde yaklaşık 5 saat tutulmuştur.

3.1.2. Test bölgesi

Test bölgesi iç çapı 700 μm , dış çapı 760 μm ve uzunluğu 5 cm olan bir mikrokanaldan oluşmaktadır. Mikrokanal kestamit cinsinden olan bloklar arasına yerleştirilmiştir. Test bölgesinde giriş ve çıkışta bloklar üzerinde 2 adet ve mikrokanal üzerinde 6 adet olmak üzere toplamda 8 adet ısı çifti kullanarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Kanal boyunca sabit ısı akışı sağlamak için kanal üzerinde sarılmış şerit ısıtıcılar mevcuttur. Isı kaybını önlemek için blokların arası ve mikrokanalın etrafı termal yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Test bölgesinin şematik resmi Şekil 3.2'de görülmektedir.

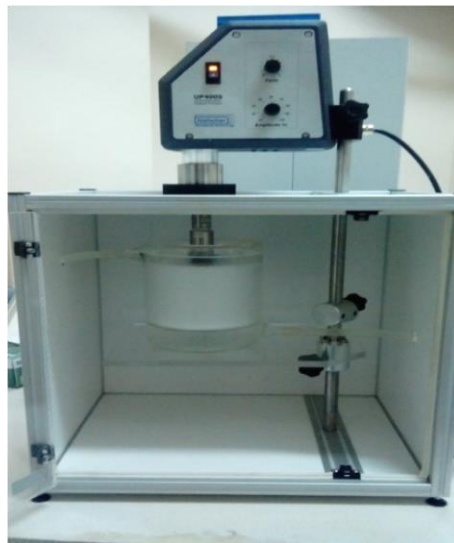




Şekil 3.2. Test bölgesinin şematik resmi

3.1.3. Ultrasonik banyo

Nanoakışkan için gerekli karışım elde edildikten sonra, iki adım metoduna göre, temel akışkan içinde nanopartikülün homojen bir şekilde dağıtılması gerekiyor. Bunun sayesinde çökelme ve topaklanma gibi kararlılık problemlerinin önüne geçilmektedir. Bu çalışmada nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde dağıtılması ultrasonik homojenizatör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatördür. Şekil 3.3'de görseli verilen cihaz 24 KHz çalışma frekansında ve 400W gücündedir. Ayrıca, işlemler boyunca ısınma sorununu çözmek için su banyosu ile soğutma yapılmıştır.



Şekil 3.3. Ultrasonik banyo

3.1.4. Viskozimetre

Nanoakışkanlar için ısıl iletkenliğin yanında diğerk bir kritik termofiziksel özellik ise viskozitedir. Viskozite ölçümleri için A&D marka SV-10 model bir vibro tip viskozimetre kullanılmıştır. Ölçümler boyunca nanoakışkanın sıcaklığı bir su banyosuyla kontrol edilmiştir ve farklı sıcaklıklarda viskozite değerleri kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan viskozitemetre Şekil 3.4’de görülmektedir.



Şekil 3.4. Viskozimetre

3.1.5. Isıl iletkenlik ölçer

Bu çalışmada kullanılan ısı iletkenlik ölçme cihazı Linseis marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçerdir. Cihazın görseli Şekil 3.5’de görülmektedir. Bu cihazda ölçümler geçici ısı köprüler (transient got bridge) yöntemiyle yapılmaktadır. Viskozite ölçümlerinde olduğu gibi ısı iletkenlik ölçümlerinde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Isıl iletkenlik ölçer

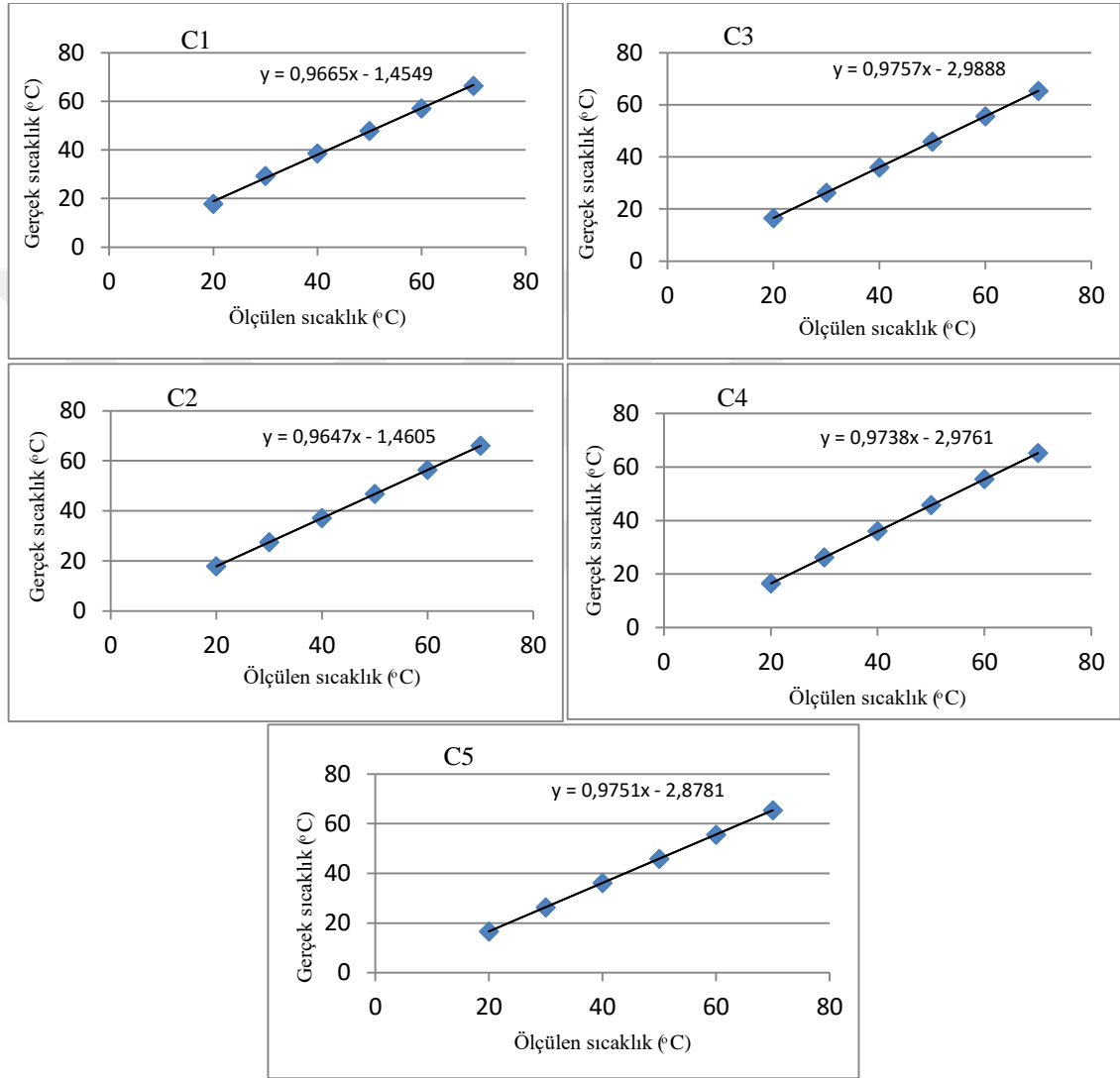
Çizelge 3.1. Isıl iletkenlik ölçerın teknik özellikleri

Ölçüm aralıkları		Ölçüm belirsizlikleri	
Termal iletkenlik	0.01-100 W/(mK)	Termal iletkenlik	%2’den daha iyi
Termal yayılım	0.05-10 mm ² /s	Termal yayılım	%5’den daha iyi
Isı kapasitesi	100-5000 KJ/(m ³ K)	Isı kapasitesi	%5’den daha iyi

3.1.6. Termoelemanlar ve veri okuma kartı

Mikrokanalın test bölgesinin farklı noktalarında, giriş, çıkış ve yüzeyde T tipi ısı çiftleriyle sıcaklık ölçümleri yapılmaktadır. Bu ısı çiftleri fiberglass örgüden oluşan ve yanmaya, aşınmaya ve kimyasal etkilere karşı yüksek dirence sahiptirler. Isıl çiftler kullanılmadan önce su banyosunda 20-70°C sıcaklık aralığında ölçümler yapılarak

kalibre edilmiştir. Burada kullanılan su banyosu Wise Curcu marka sirkülatörlü bir su banyosudur. Her bir termoelemanına ait kalibrasyon denklemleri ve eğrileri Şekil 3.6'da verilmiştir. Çizelge 3.2'de ısıl çiftlerin ölçüm aralıkları görülmektedir.



Şekil 3.6. Termoelemanlara ait kalibrasyon denklemleri ve eğrileri

Çizelge 3.2. Isıl çiftlerin ölçüm aralıkları

DIN 43710	DIN 43710 ve IEC 584	Sıcaklık	Aralığı
U	T	-200°C	+300°C
L	J	-200°C	+800°C
	K	-200°C	+1200°C
	K	-200°C	+1200°C
	E	-200°C	+1200°C
	N	0°C	+1200°C
	S	0°C	+1500°C
	R	0°C	+1600°C
	B	0°C	+1800°C
	W	0°C	+2000°C

Termoelemanlar LR8402- model Hioki marka veri okuma kartına bağlanmıştır. Veri okuma kartı bilgisayara bağlantılıdır. Sistem karalı hale geldikten sonra sıcaklık verileri 2 dk boyunca kaydedilmiştir. Devamında bu verilerin ortalamaları alınarak ilgili eşitliklerde kullanılmıştır. Şekil 3.7’de veri okuma kartının resmi ve devamında teknik özellikleri verilmiştir.

**Şekil 3.7.** Veri okuma kartı

- Maksimum 10 ms örnekleme hızı
- Maksimum giriş ± 100 V DC
- Standart 30 Analog kanala sahip
- Standart 8 kanal puls ve dijital girişi
- 45 veya 60 kanala kadar yükseltilebilir kapasiteye sahip
- Kanallar arası matematiksel hesap olması
- Analog çıkışlı sensörleri, scale özelliği sayesinde kendi biriminde gözlemlenmesi

- Isıl çift ile sıcaklık ölçümü
- Otomatik ısı çift tanıma özelliği K, J, E, T, N, R, S, B, W
- Nem ölçümü ve otomatik nem sensörü algılama
- 2 telli giriş ile ısı çiftleri doğrudan jack olmadan bağlama
- Offset ayarı ile bağlanan sensörlerde meydana voltaj kaymalarını sıfırlama
- İstenilen tarihte ve saatte ölçümleri başlatma ve bitirme
- Puls toplamı ve puls devri ölçümü
- Ani güç kesintilerine karşı koruma
- Alarm çıkış özelliği
- Gerçek zamanlı bilgisayara, USB belleğe yada CF karta kayıt
- Dahili USB ve LAN arayüzü
- E - Mail yolu ile bilgilendirme
- Yazılım ile veri okuma kartını uzaktan kontrol etme ve ayarlama
- Hem cihaz hemde yazılım üzerinden verileri grafiksel olarak inceleme

3.1.7. Debimetre

Çalışmada Reynolds sayısının ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akış Reynolds sayısını belirlemek için akışkanın debisinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada akışkanın debisi Siemens marka Strans FC–MASS6000 model kütleli debimetre ile ölçülmektedir. Cihazın görseli Şekil 3.8’de verilmiştir. Kütleli debimetreler yüksek hassasiyetle veri okuma avantajına sahiptirler ve özellikle düşük hızlarda ve partikül içeren akışkanlarda dönmeli elemanları olmadığı için partikül çökmesi gibi problemlere sebebiyet vermemektedirler.



Şekil 3.8. Debimetre

3.1.8. Basınç transdüzeri

Test bölgesinde meydana gelen basınç düşümünü ölçmek için VALCOM marka basınç transdüzeri kullanılmıştır. Test bölgesi girişinde ve çıkışında bulunan iki basınç prizi ile basınç transdüzerinin bağlantısı yapılmıştır. Şekil 3.9'de basınç transdüzerinin resmi verilmiştir.



Şekil 3.9. Basınç transdüzeri

3.1.9. Sirkülatörlü su banyosu

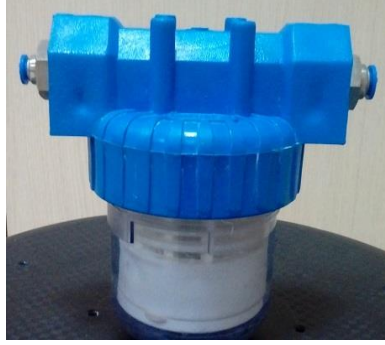
Besleme haznesinden çıkan ve deney sisteminde dolaşan akışkan, mikrokanal test bölgesine girmeden önce istenilen sıcaklığa getirilmelidir. Bu sebeple akışkan Wisecircu marka ve zaman ayarlı bir su banyosunda ısıtma veya soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. Ayrıca nanoakışkanların ısıl iletkenlik ve viskozite ölçümleri sırasında da sıcaklığı istenilen değerlere getirmek için bu su banyosundan faydalanılmıştır. Kullanılan su banyosunun resmi Şekil 3.10'de görülmektedir.



Şekil 3.10. Sirkülatörlü su banyosu

3.1.10. Mikro filtre

Mikrokanallar düşük hidrolik çaplara sahiptirler, sistem içerisinde oluşabilecek kirlilik bu kanalların kolayca tıkanmasına neden olabilir. Bu tür problemleri gidermek için test bölgesi girişinde yıkanabilen ve filtresi değiştirilebilen bir mikro filtre kullanılmıştır. Kullanılan filtrenin resmi Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.11. Mikro filtre

3.1.11. Akışkan besleme haznesi

Besleme haznesi akışkanın sisteme aktarılması için kullanılmaktadır. Pompa akışkanı bu hazneden emerek sistem içine aktarmaktadır. Sistemin havası bu hazne vasıtasıyla alınır. Sistemin havası alındıktan sonra pompa ile haznenin bağlantısı kesilmektedir. Akışkan haznesinin resmi Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Akışkan besleme haznesi

3.1.12. Pompa

Deney sisteminde kullanılan pompa, pozitif yer değiştirmeli ve frekans kontrollü bir pompadır. Bu pompa sisteme atımsız ve sürekli akış sağladığı ve nanoakışkan

formasyonuna zarar vermediği için literatürde kullanılan dişli pompalardan daha etkili olduğu düşünülmektedir. Sistemin debi ayarı pompanın kontrol ünitesinden, frekans kontrolü üzerinden yapılmaktadır. Kullanılan pompanın resmi Şekil 3.13’de görülmektedir, pompanın özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Değişken hızı yüksek
- Maksimum akışkan sıcaklığı 120°C
- Maksimum çalışma basıncı 12 bar
- Dişli bağlantı ¾” giriş, ½” çıkış bağlantı çapı
- Maksimum ortam sıcaklığı 50°C
- Motor yalıtımı, Sınıf “H” (NPVO-26-P, 53-25 ve 63-32 tiplerinde sınıf “F” 155°C)



Şekil 3.13. Pompa

3.1.13. Güç kaynağı ve analizörü

Sistemde sabit ısı akısı sınır şartını şerit ısıtıcılar ve bu ısıtıcıların bağlı olduğu bir güç kaynağı ile sağlanmaktadır. Ayrıca bir güç analizörü (wattmetre) kullanılmaktadır. Bu güç analizörü, güç kaynağının akım ve gerilim değerlerini hassasiyetle kontrol etmektedir. Şekil 3.14’de güç kaynağının resmi görülmektedir. Şekil 3.15’de görülen güç analizörünün özellikleri ise aşağıdaki gibidir.

- True RMS ölçüm sistemi
- AC akım, gerilim ölçümleri

- Aktif güç, görünür güç power faktör ölçümleri
- Frekans ölçümleri (5kHz)
- D/A çıkışı
- Kademe dışına çıkınca uyarı verebilme
- Ortalama ölçüm değerinin ölçülmesi
- Akım trafosu ve gerilim trafosu ile kullanabilme
- RS-232 bilgisayara bağlantı arabirimi
- Akım, gerilim ve gücün aynı anda ekranda gösterilmesi
- Dış etkenlerle cihaz kapanmasını diye tuş kilidi
- Yüksek hassasiyetli ölçüm ($\pm 0.1\%$ rdg $+0.1\%$)
- opsiyonel printer ile ölçülen değerlerin yazılması
- 300V rms yada 425 V peak gerilimine kadar gerilim ölçümü
- 30A kadar akım ölçümü
- Akım trafosu eki ile yüksek akımlarda ölçebilme
- Gerilim trafosu ile yüksek gerilimlerde ölçebilme
- Standart aksesuarlar: güç kablosu ve kullanım kitapçığı
- Model 9442 printer
- Model 9638 RS-232 kablosu



Şekil 3.14. Güç kaynağı



Şekil 3.15. Güç analizörü

3.1.14. Hassas terazi

Nanoakışkanın hazırlamasında partikülün hacimsel konsantrasyonunu belirlemek için nanopartikülün kütlesi hassas terazi ile ölçülmektedir. Bu çalışmada kullanılan terazi, AND marka maksimum 210 g ölçüm yapabilen 0.0001g hassasiyetli hassas terazidir. Cihazın resmi Şekil 3.16'de gösterilmiştir. Ayrıca hassas terazi self kalibrasyon özelliğine sahiptir ve bu yüzden ölçümlere başlamadan önce kalibre edilebilir.



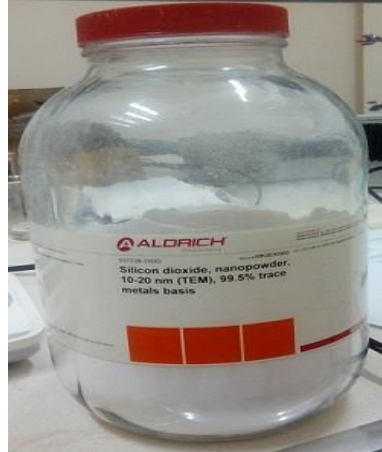
Şekil 3.16. Hassas terazi

3.2. Nanoakışkanların Hazırlanması

Nanopartikül içeren akışkanların süspansiyonları basit bir katı-sıvı karışımı olmamalıdır. Nanoakışkan kavramını taşıyabilmesi için akışkanın kararlı olması, kimyasal özelliklerinin sabit kalması ve topaklanma, zamanla çökeltme gibi olumsuzluklar göstermemesi gerekmektedir. Bu özellikleri elde etmek için nanoakışkanların hazırlanması iki metotla yapılmaktadır.

- tek adım metodu
- iki adım metodu

Bu tez çalışmasında iki adım metodu kullanılmıştır, bu metodun ilk aşaması nanopartiküllerin üretimi, ikinci aşaması ise bu partiküllerin çeşitli yöntemler ile akışkan içerisine dağıtılmasıdır. Nanopartiküller Sigma-Aldrich firmasından alınmıştır. Partiküllerin görseli Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. SiO₂ nanopartikülü

Nanoakışkanın hazırlanmasında aşağıdaki eşitlikler sırasıyla kullanılmıştır. Toplam akışkan hacminin içindeki nanopartikülün kütesini belirlemek için Eş. 3.1 kullanılmıştır. (C_v partikülün hacimsel oranı ve ρ_n nanoakışkanın yoğunluğudur)

$$C_v = \frac{\rho_n - \rho_{su}}{\rho_p - \rho_{su}} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1'den ρ_n bulunur ve Eş. 3.2'de yerine yazılarak

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n} \quad (3.2)$$

m_n (nanoakışkanın toplam kütlesi) hesaplanır.

$$C_m = C_v \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'den C_m (kütle oranı) hesaplanır ve

$$m_p = C_m \cdot m_n \quad (3.4)$$

Eş. 3.4'de yerine yazılarak m_p (partikülün kütlesi) hesaplanır.

$$m_{su} = m_n - m_p \quad (3.5)$$

$$\rho_{su} = \frac{m_{su}}{V_{su}} \quad (3.6)$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.7)$$

Eş. 3.5 ve 3.6 denklemlerinden suyun hacmi hesaplanır ve Eş. 3.7 denkleminde partikülün hacmi hesaplanır. Nanopartiküllerin hacimsel oranları %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2'dir. Yapılan hesaplamalarda nanoakışkanların hazırlanması için gerekli malzeme miktarları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Ayrıca nanoakışkanın özellikleri Çizelge 3.4'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Farklı nanoakışkan hacimsel oranları için hesaplanan kütleler

Hacimsel oran C_v	Akışkan Yoğunluğu Kg/m^3	Partikül Yoğunluğu kg/m^3	Nanoakışkan Yoğunluğu kg/m^3	Nano akışkan hacmi ml	Nano Toplam Kütle gr	Kütleli Oran C_m	Partikül Kütle gr	Suyun Kütleli gr	Suyun Hacmi ml
0.002	989.7	2400	992.5206	750	744.39045	0.0048	3.6	740.79045	748.5
0.004	989.7	2400	995.3412	750	746.5059	0.0096	7.2	739.3059	747
0.008	989.7	2400	1000.9824	750	750.7368	0.01918	14.4	736.3368	744
0.012	989.7	2400	1006.6236	750	754.9677	0.02861	21.60	733.3677	741

Çizelge 3.4. SiO₂ nanopartikülün özellikleri

Adı	Silisyum oksit
Moleküler Formülü	SiO ₂
Moleküler Ağırlığı	60.08
Yoğunluk	2.2-2.6 g/ml (25°C)
Fazı	Gama
Partikül Boyutu	10 – 20nm
Erime Noktası	1710
Isıl İletkenliği (21°C)	1.4 W/mk

3.3. Deneysel Prosedürü

Deneysel önce saf su ile sonra farklı hacimsel oranlarda SiO₂ partikülden oluşan nanoakışkanlar ile yapılmıştır. Nanoakışkanlar önceden laboratuvarında hazırlanmıştır. Sisteme güç vermeden önce akışkan ilk besleme haznesine doldurulmuştur. Test bölgesi girişinde sabit sıcaklık elde etmek için su banyosu istenilen sıcaklığa ayarlanmıştır. Pompa çalıştırılarak istenilen debide akış sağlanmıştır ve sonra sisteme güç verilmiştir. Sistemin kararlı hale gelmesi için ortalama 30 dakika beklenilmiştir. Sistemin kararlı hale gelmesinde bilgisayardan alınan sıcaklık kayıtları ile kontrol edilmiştir. Sistem kararlı hale geldikten sonra debi, sıcaklık ve basınç kayıtları alınmıştır. Isı transferi deneyleri yapıldıktan sonra, sistem boşaltılmadan içerisinde aynı çapta daha kısa bir kanal bulunan kısa kanal test bölgesi ile basınç deneylerine devam edilmiştir. Devamında debi değiştirilerek aynı işlemler istenilen debilerin hepsine yapılmıştır.

3.4. Termofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

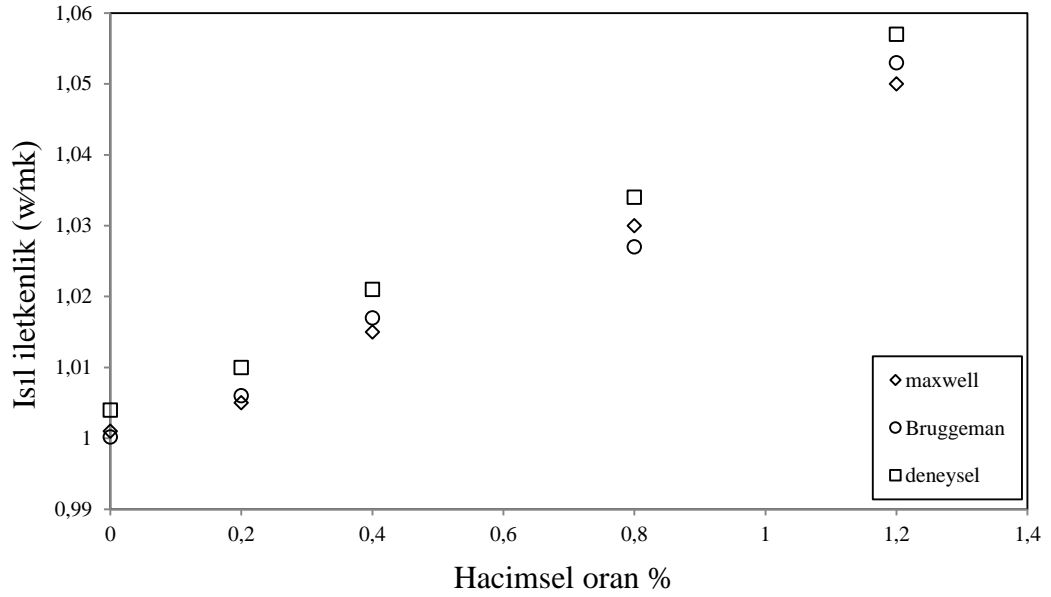
Nanoakışkanların termal iletkenlik ölçümleri Linseis marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçme cihazı ile yapılmaktadır. Deneyde ölçülen ısı iletkenlik değerleri literatürde çok kullanılan Maxwell ve Bruggeman ısı iletkenlik modelleriyle karşılaştırılmıştır. Maxwell ısı iletkenlik modeli, Eş. 3.8’de ve Bruggeman modeli, Eş. 3.9’de verilmiştir.

$$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)\phi} \quad (3.8)$$

$$k_e = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_l] + \frac{k_l}{4} \sqrt{\Delta}$$

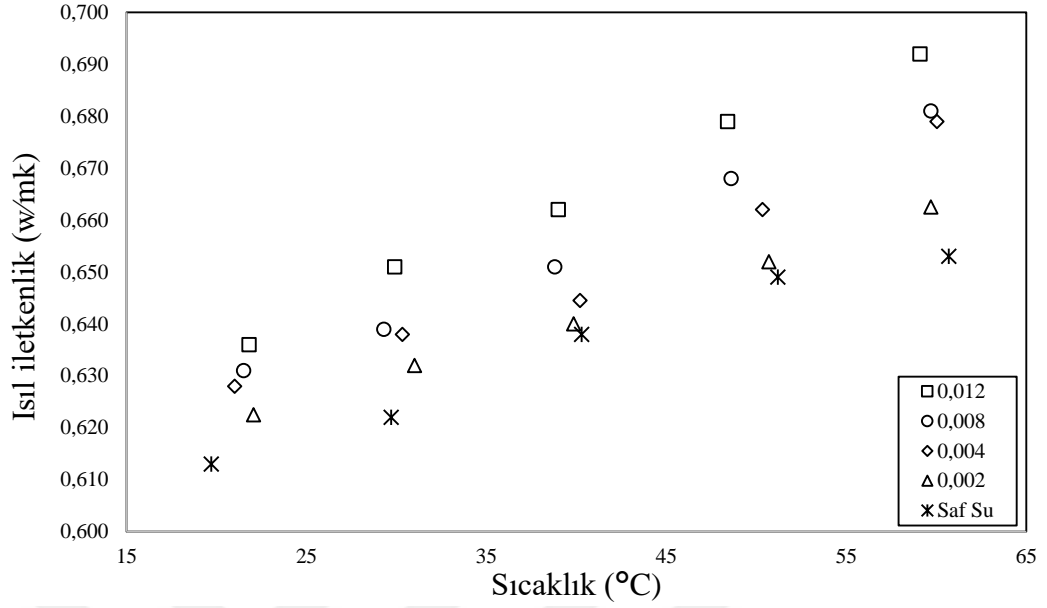
$$\Delta = [(3\phi - 1)^2 (k_p / k_l)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p / k_l)] \quad (3.9)$$

Deneyel değerlerin mevcut modeller ile karşılaştırması Şekil 3.18’de verilmiştir. Grafikte deney verileri ile literatür modelleri arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Deneyel değerler teorik değerler ile karşılaştırıldığında Maxwell eşitliği ile %0,4-0,74 oranında fark vardır. Benzer şekilde Bruggeman eşitliği ile %0,1-1,3 kadar fark olduğu görülmektedir.



Şekil 3.18. Isıl iletkenliğin farklı hacimsel oranlarda literatür ile karşılaştırması

Nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi farklı hacimsel oranlar için Şekil 3.19'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, partikülün hacimsel oranı arttıkça, nanoakışkanın ısı iletkenliği artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda bu artış az miktarda iken yüksek sıcaklıklarda hacimsel oran arttıkça, ısı iletkenlik artışı daha belirgin olmaktadır. Ayrıca sıcaklık arttıkça, ısı iletkenlikte artış görülmektedir. Saf suya göre minimum %1.6 oranında artış %0.2 hacimsel oranında ve maksimum %6 oranında artış %1.2 hacimsel oranında sağlanmıştır. Hacimsel oran %0.2 den %0.4 de artırılmasında ısı iletkenlikteki artış diğer hacimsel oranlara göre daha yüksektir.



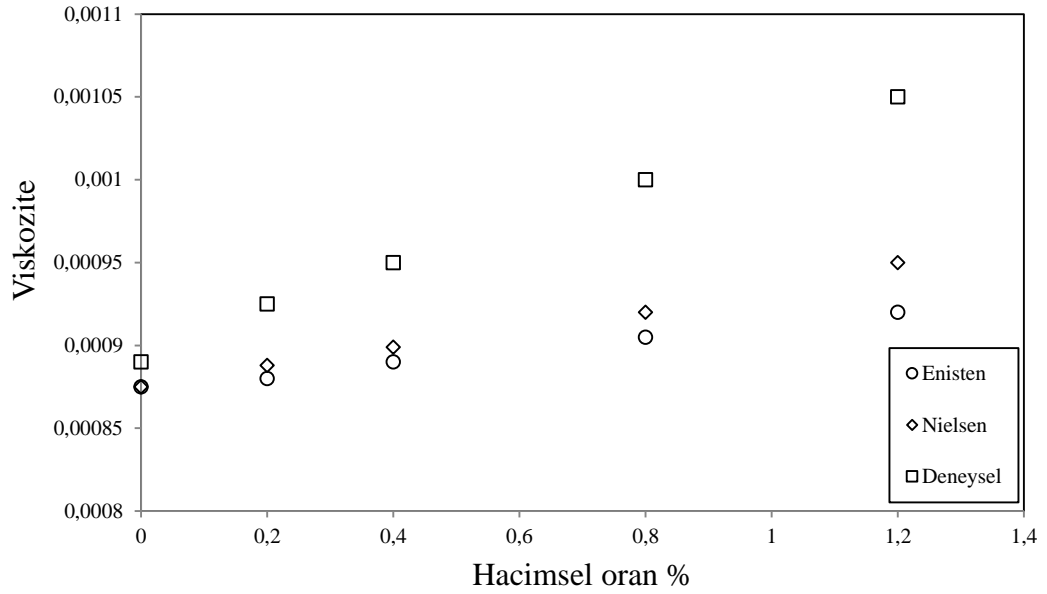
Şekil 3.19. Farklı hacimsel oranlarda ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi

Nanoakışkanların viskozite ölçümleri A&D marka SV-10 model vibro viskozimetre ile yapılmıştır. Çalışmada ölçülen viskozite değerleri literatürde yaygın olan iki modelle karşılaştırılmıştır. Einstein modeli Eş. 3.10'de ve Nielsen modeli Eş. 3.11'de verilmiştir.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 \pm 2.5\phi) \quad (3.10)$$

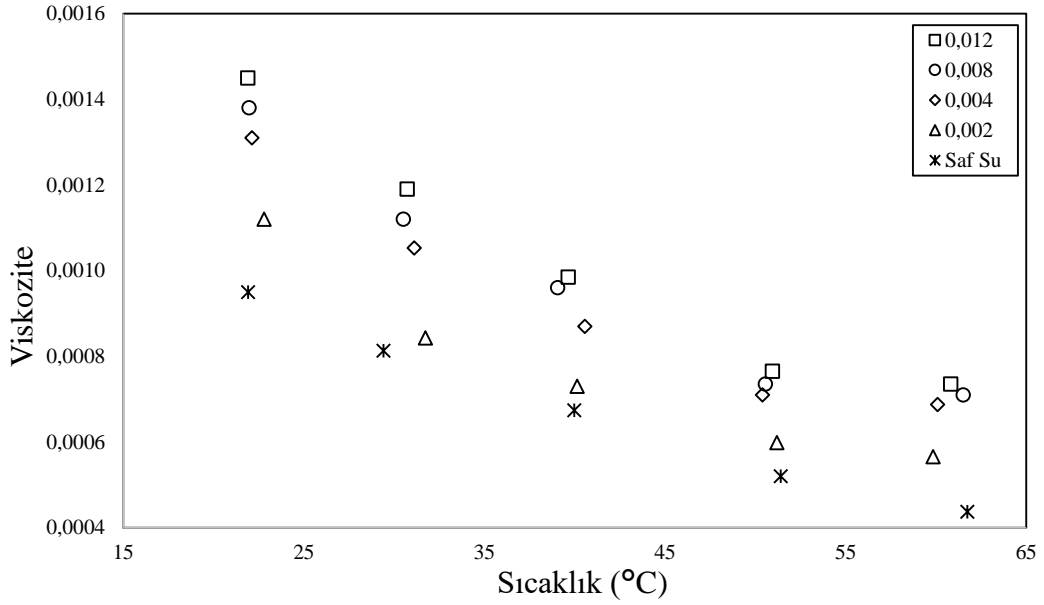
$$\mu_{nf} = \mu_l(1 + 1.5\phi)e^{\phi(1-\phi_m)} \quad (3.11)$$

DeneySEL viskozite değerlerinin farklı hacimsel oranlarda modeller ile karşılaştırılması Şekil 3.20'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi hacimsel oran arttıka değerler korelasyondan oldukça yüksek çıkmıştır.



Şekil 3.20. Farklı hacimsel oranlarda viskozitenin literatür ile karşılaştırması

Nanoakışkanların viskozitesinin farklı hacimsel oranlarda sıcaklıkla değişimleri Şekil 3.21’de görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça, nanoakışkanın viskozitesi azalmaktadır. Nanoakışkanların partikül hacimsel oranı arttıkça viskozitesi de artmaktadır. Saf suya göre minimum %29.5 oranında artış %0.2 hacimsel oranda ve maksimum %52.6 oranında artış %1.2 hacimsel oranda sağlanmıştır. Isıl iletkenliğe benzer şekilde hacimsel oran %2.0 den %0.4 de çıktığında viskozitedeki artış diğer hacimsel oranlara göre daha yüksektir.



Şekil 3.21. Farklı hacimsel oranlarda viskozitenin sıcaklıkla değişimi

3.5. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Isı enerjisi sisteme bir güç kaynağından sağlanmaktadır. Burda güç kaynağı üzerinden okunan akım ve gerilimin değerinin çarpımı ısı girişini göstermektedir (3.12).

$$Q=VI \quad (3.12)$$

Ölçülen sıcaklıklar kullanılarak ortalama ısı taşınım katsayısı h aşağıdaki formülle (3.13) hesaplanmıştır.

$$h = \frac{Q}{A_s(T_s - ((T_g + T_c) / 2))} \quad (3.13)$$

Bu denklemde, A_s mikrokanalda nanoakışkanın ısı transferi yüzey alanı ve Q kanala uygulanan ısı akısını göstermektedir.

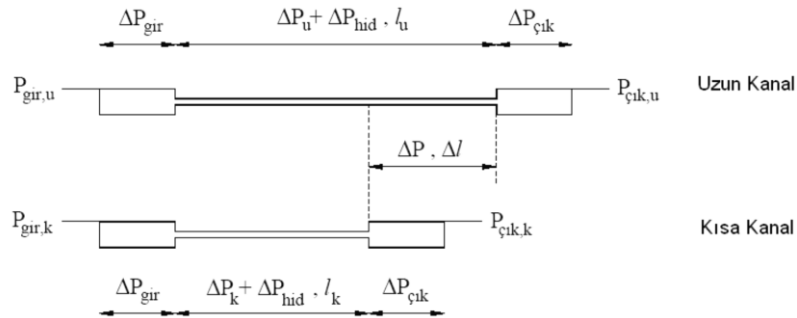
Hesaplanan h kullanılarak Nusselt sayısı ise aşağıdaki denklemden elde edilmiştir (3.14).

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.14)$$

Mikrokanallarda akışkan ile yüzey arasındaki sürtünmeden dolayı sürekli basınç kayıpları ortaya çıkmaktadır ve dolayısı ile kanalda basınç düşümü gerçekleşmektedir. Sürtünme katsayısı denklem 3.15’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{2 \Delta p}{\rho V^2} D/L \quad (3.15)$$

Denklemden, L mikrokanalın uzunluğu, ρ akışkanın yoğunluğu, D mikrokanalın çapı ve V de nanoakışkanın ortalama hızıdır. Mikrokanal test bölgesinde basınç transdüzeri ile ölçülen fark basınç değerleri, yalnızca kanal içerisinde oluşan basınç düşümünü ifade etmemektedir. Okunan bu değer mikrokanalın giriş ve çıkışlarındaki ani genişleme ve daralma, bağlantı elemanları kaynaklı basınç düşümleri vb. yükleri de içermektedir. Bu sebeple mikrokanalda tam gelişmiş akış şartlarındaki basınç düşümünü belirlemek için aynı deney şartlarında mevcut mikrokanaldan daha kısa bir mikrokanalla basınç deneyleri tekrarlanmıştır. Ardından elde edilen kısa kanal ve uzun kanal verilerinden faydalanılarak yalnızca kanalda meydana gelecek basınç düşümü hesaplanmıştır. Şekil 3.22’de farklı uzunluklarda iki mikrokanalda oluşan basınç farkları gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Mikrokanallarda basınç kaybı ölçümü şematiği (Avcı 2008)

Meydana gelen basınç düşümleri eşitlik 3.16 ve 3.17 'de verildiği gibidir.

$$P_{ölçme} = P_{giriş} - P_{çıkış} \quad (3.16)$$

$$P_{kayıb} = P_{giriş} + P_{hid} + P_{çıkış} \quad (3.17)$$

Tam gelişmiş uzunluk boyunca basınç kaybı Eşitlik 3.18 'den elde edilmiştir.

$$\Delta P = \Delta P_{ölçme,uzun\ kanal} - \Delta P_{ölçme,kısa\ kanal} \quad (3.18)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, SiO₂ nanopartikülleri ve saf su kullanılarak farklı hacimsel oranlarda ($\phi=0.002, 0.004, 0.008$ ve 0.012) nanoakışkanlar hazırlanmış ve nanoakışkanın dairesel bir mikrokanalda ısı transferi ve basınç düşümü deneysel olarak incelenmiştir.

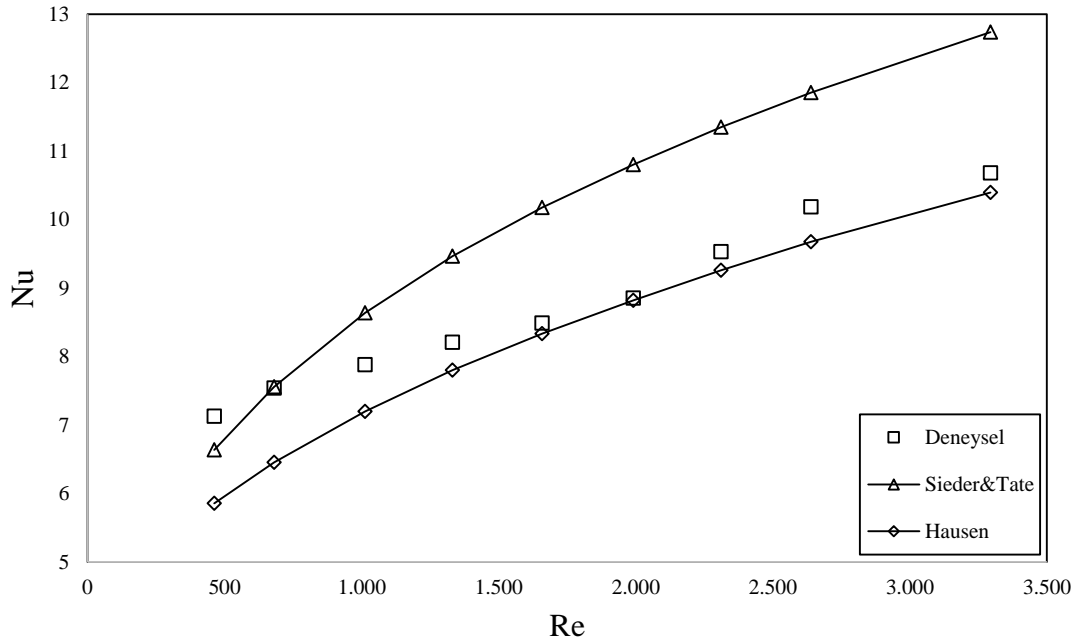
4.1. Saf Su İçin Isı Transferi ve Basınç Düşümü Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

Çalışmada yapılan deneyleri literatür ile uyumunun belirlenmesi için, deney sonuçları iki farklı ısı transferi modeli ile karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir. Karşılaştırma yapılan modeller Hausen modeli Eş. 4.1 ve Sieder&Tate modeli Eş. 4.2’de gösterilmektedir.

$$Nu = 3.66 + \frac{0.19(RePrD/L)^{0.8}}{1 + 0.117(RePrD/L)^{0.467}} \quad (4.1)$$

$$Nu = 1.86(RePr D/L)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (4.2)$$

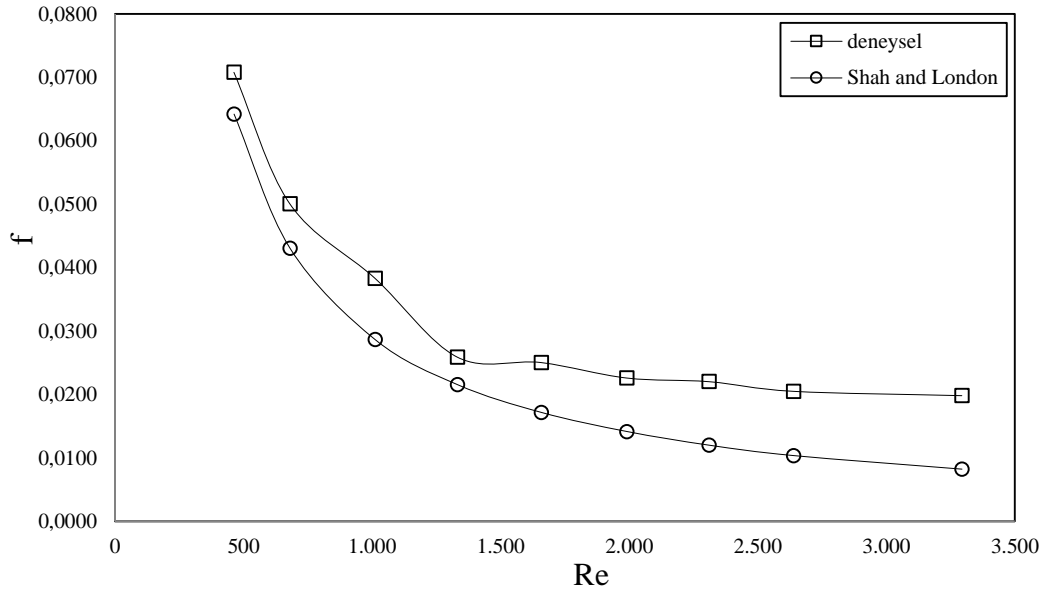
Grafikten de anlaşılacağı gibi ısı transferi bulguları modeller ile iyi bir uyum içindedir. Şekilden görüldüğü gibi yüksek Reynolds sayılarında Nu sayısı Sieder & Tate modelinden daha düşük ve Hausen modeline daha yakın miktarlar gösteriyor, Reynolds sayısı azaldıkça deney sonuçları korelasyon değerlerine daha yaklaşmıştır.



Şekil 4.1. Saf suya ait Nusselt sayısı değerlerinin literatür ile karşılaştırılması

Şekil 4.2’de saf suya ait sürtünme faktörü sonuçları Eş. 4.3’de gösterilen Shah and London modelleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların mevcut modelle iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Değerler düşük Reynolds sayılarında korelasyon değerlerine biraz daha yaklaşmıştır. Reynolds sayısı arttıkça veriler korelasyondan belirgin bir miktarda uzaklaşmıştır.

$$f = (22.03/Re)\left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0.58} \quad (4.3)$$

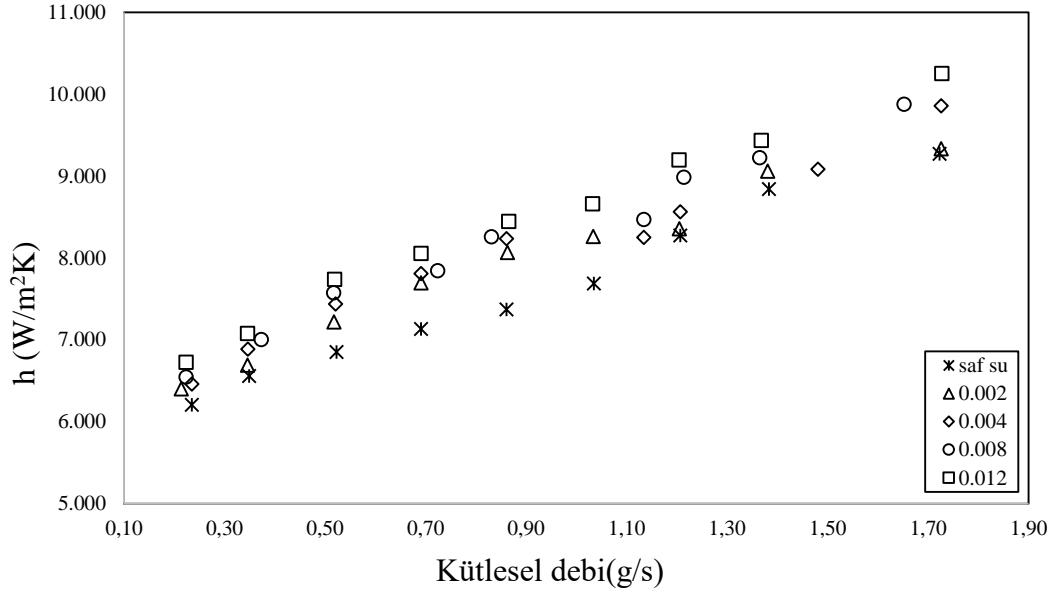


Şekil 4.2. Saf suya ait sürtünme faktörü değerlerinin literatür ile karşılaştırılması

4.2. Isı Transferi Bulguları

Akışkanın içine metal oksit nanopartiküllerin eklenmesi ısı transferinde olumlu etkide bulunmuştur. Partikülün hacimsel konsantrasyonu arttıkça, ısı transferi artmaktadır. Düşük Reynolds sayılarında bu artış az miktarda iken yüksek Reynolds sayılarda hacimsel oranlar arttıkça, ısı transferinin artışı daha belirgin olmaktadır.

Şekil 4.3’de hem saf suyun hemde su-SiO₂ nanoakışkanlarının ısı taşınım katsayısının kütleli debi ile değişimleri sunulmuştur.

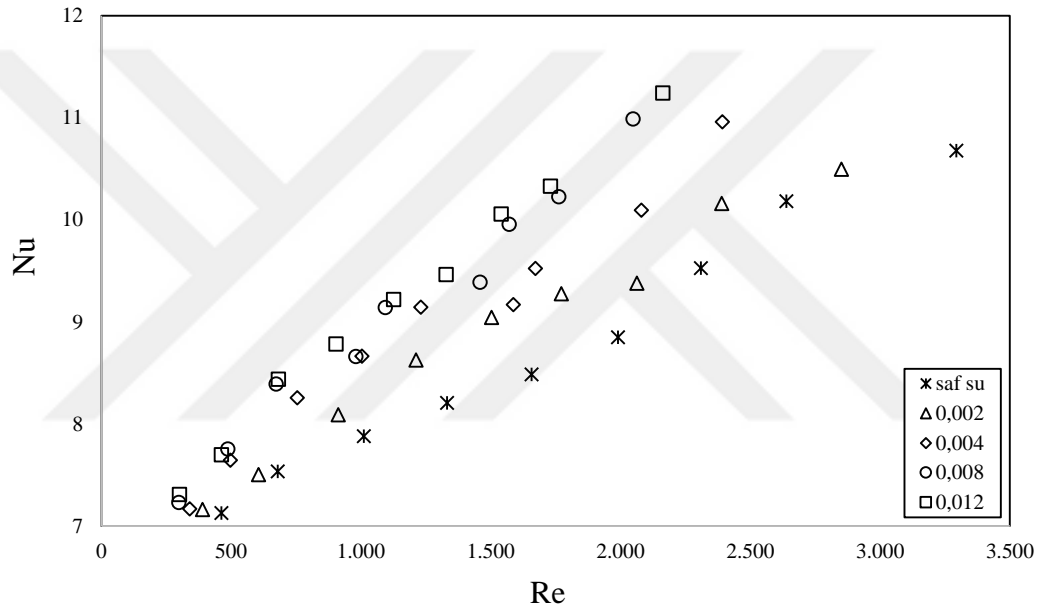


Şekil 4.3. Isı taşınım katsayısı değerlerinin kütleli debi ile değişimi

Şekilden görüldüğü gibi nanopartikül içeren saf su süspansiyonları farklı hacimsel oranlarda saf suya göre ısı transferinde artışa sebebiyet vermiştir. En düşük kütleli debilerde hemen hemen bütün hacimsel oranlarda ısı taşınım katsayısının değeri aynı iken en yüksek kütleli debilerde hacimsel oranlar ile sağlanan artış daha belirgin olmaktadır. %0.8 konsantrasyon ile elde edilen artış %1.2'lik su-SiO₂ ile elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakındılar. Saf suya göre minimum %3.1 artış %0.2 partikül hacimde sağlanırken maksimum artış %10.6 oranında %1.2 partikül hacimde sağlanmıştır. Partikül hacimsel konsantrasyonunun %0.2'den %1.2'ye kadar artırılması %4.2 ile %10.0 arasında artış sağlanmıştır. Partikül hacimsel konsantrasyonunun %0.2'den %0.8'ye çıkarılması %1.9 ile %5.8 arasında ısı taşınım katsayısında artmaya yol açmıştır. En yüksek ısı taşınım katsayısı %1.2 su-SiO₂ nanoakışkanı kullanıldığı durumda elde edilmiştir.

Şekil 4.4'de farklı hacimsel oranlarda Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimleri sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi partikülün hacimsel oranının artışı Nusselt sayısının artmasına neden olmuştur. En düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısı değerleri birbirine çok yakın iken, Nusselt sayısındaki artış artan Reynolds sayısı ile daha belirgin bir hale gelmiştir. Isı taşınım katsayısına benzer bir şekilde, %0.8

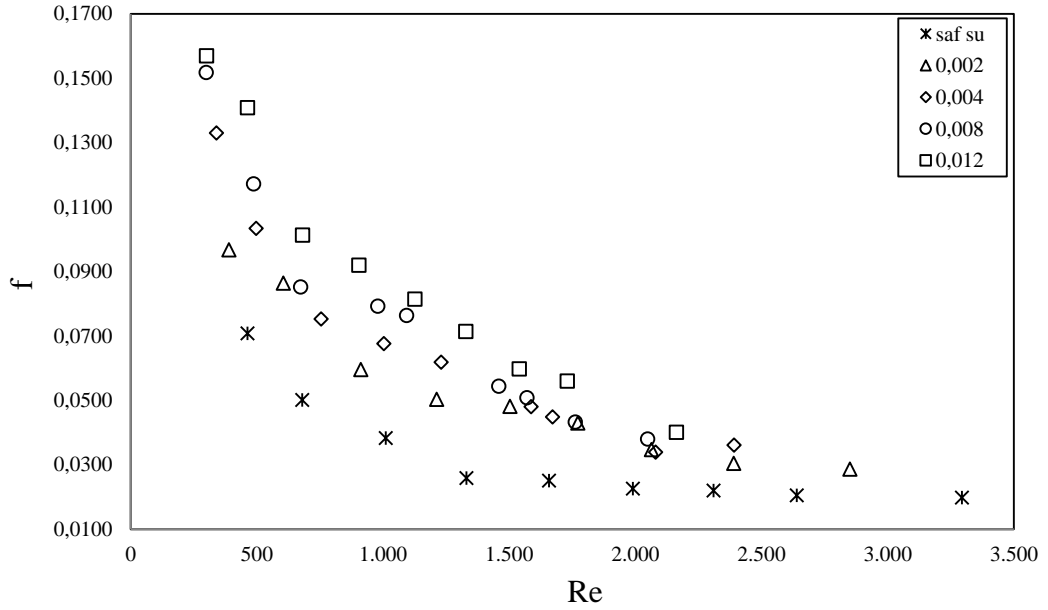
konsantrasyon ile elde edilen Nuselt sayısı artışı %1.2'lik su-SiO₂ ile elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakındılar. Saf suya göre ısı transferide minimum %0.5, maksimum %20 oranında artış sağlanmıştır. Partikül hacimsel konsantrasyonunun %0.2'den %1.2'ye kadar artırılması %2.1 ile %7.1 arasında artış sağlanmıştır. Nuselt sayısında en yüksek artış saf su dan %0.2 hacimsel orana çıktığında olmuştur. En yüksek Nuselt sayısı %1.2 hacimsel oranı ile 2163 Reynolds sayısında ve en düşük Nuselt sayısı saf suyla 463 Reynolds sayısında elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı hacimsel oranlarda Nu sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

4.3. Basınç Düşümü Bulguları

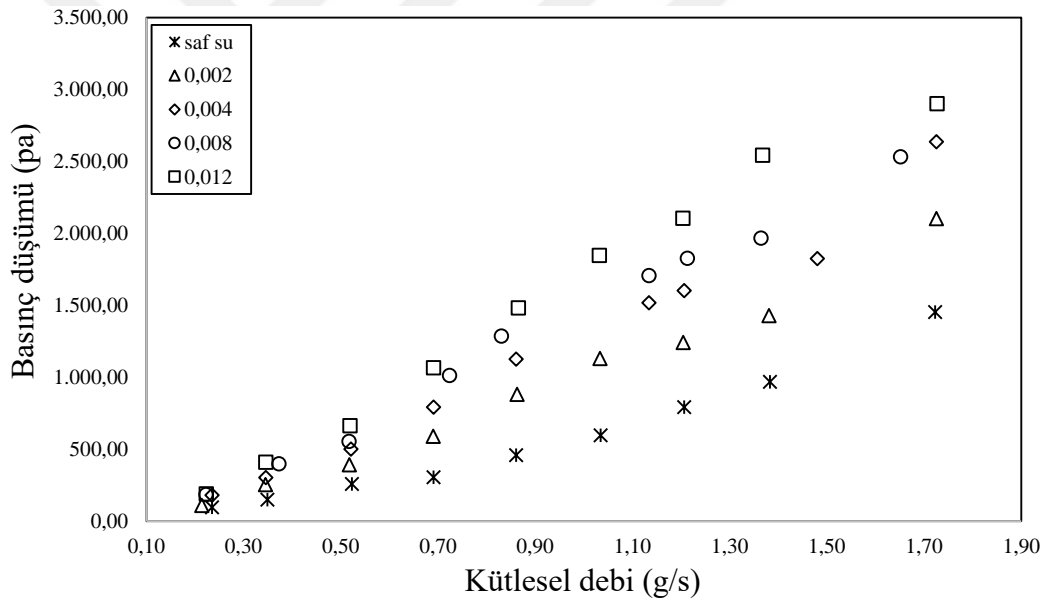
Farklı hacimsel oranlar için sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 4.5'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi, Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörü azalmaktadır.



Şekil 4.5. Farklı hacimsel oranlarda sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Sürtünme faktörü partikül konsantrasyonunun artması ile artmaktadır. En yüksek Reynolds sayılarında sürtünme faktörü değerleri birbirine çok yakın iken, Reynolds sayısı azaldıkça sürtünme faktöründeki artış daha belirgin hale gelmiştir. Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların sürtünme faktörü değerleri saf suyunkinden yüksektir. Sürtünme faktöründe en yüksek artış %0.2 den %0.4 hacimsel orana çıktığında olmuştur. Akışkan test bölümüne giriş ve çıkış yaptığı basınçların farkı, basınç düşümünü göstermektedir. Araştırmacılar tam gelişmiş bölgede basınç düşümünü hesaplamak için farklı yöntemler kullanmışlardır. Literatürde tam gelişmiş bölgede basınç düşümü hesaplamasında iki yöntem vardır. Bir yöntemde, test modülünün giriş ve çıkış arasındaki toplam basınç düşümü ölçmekte ve lokal kayıpları toplam değerden çıkarmaktadır. Diğer yöntem de hidrodinamik gelişme uzunluğu kadar olan ve aynı malzemeden imal edilen kısa bir kanal kullanılmasıdır. Kanalların giriş ve çıkış arasında ölçülen basınç farklarının birbirinden çıkarılmasıyla hidrodinamik tam gelişmiş bölge için basınç düşümü elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında ikinci yöntem kullanılmıştır ve basınç düşümü ve sürtünme faktörü de hidrodinamik tam gelişmiş bölge için verilmiştir.

Şekil 4.6’de farklı hacimsel oranlarda basınç düşümünün kütleli debi ile değişimi sunulmuştur. Partikülün hacimsel oranı arttıkça basınç düşümünün de arttığı görülmektedir. Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların basınç düşümü saf suyunkinden yüksektir. Saf su için en yüksek Reynolds sayılarda 1453 Pa ve %1,2 hacimsel partikül oranı için 2902 Pa basınç düşümü meydana gelmiştir. Sürtünme faktörüne benzer şekilde basınç düşümünde en yüksek artış %0.2 den %0.4 hacimsel orana çıktığında oluşmaktadır. Saf suya göre en yüksek basınç düşümü %1.2 hacimsel oran için %99.7 ve en düşük %97.6 artış görülmektedir. En düşük Reynolds sayılarda farklı hacimsel oranlarda basınç düşümü artışı birbirine çok yakın iken Reynolds sayısı arttıkça hacimsel yüzdeler bazında basınç düşümleri arasındaki fark açılmaktadır.



Şekil 4.6. Farklı hacimsel oranlarda basınç düşümünün kütleli debi ile değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dairesel mikrokanalda saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanının zorlanmış taşınımıyla ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Partikülün hacimsel oranı %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 olarak belirlenmiş ve Reynolds sayısı değeri 300-3300 aralığında tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Isı transferi için literatürde kullanılan modellerle deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.
- Reynolds sayısı arttıkça, ısı transferi artmaktadır.
- Nanopartikül içeren saf su süspansiyonları farklı hacimsel oranlarda saf suya göre ısı transferinde artışa sebebiyet vermiştir.
- En düşük kütleli debilerde hemen hemen bütün hacimsel oranlarda ısı taşınım katsayısının değeri aynı iken en yüksek kütleli debilerde hacimsel oranlar ile sağlanan artış daha belirgin olmaktadır. %0.8 konsantrasyon ile elde edilen artış %1.2'lik su-SiO₂ ile elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakındır.
- Saf suya göre ısı taşınım miktarı minimum %3.1 artış %0.2 partikül hacimde sağlanırken maksimum artış %10.6 oranında %1.2 partikül hacimde sağlanmıştır. En yüksek ısı taşınım katsayısı %1.2 su-SiO₂ nanoakışkanı kullanıldığı durumda elde edilmiştir.
- Partikülün hacimsel oranının artışı Nusselt sayısının artmasına neden olmuştur.
- En düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısı değerleri birbirine çok yakın iken, Nusselt sayısındaki artış artan Reynolds sayısı ile daha belirgin bir hale gelmiştir. Isı taşınım katsayısına benzer bir şekilde, %0.8 konsantrasyon ile elde edilen Nuselt sayısı artışı %1.2'lik su-SiO₂ ile elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakındır.
- Saf suya göre ısı transferinde minimum %0.5, maksimum %20 oranında artış sağlanmıştır.
- Nusselt sayısında en yüksek artış saf su dan %0.4 hacimsel orana çıktığında olmuştur.
- En yüksek Nusselt sayısı %1.2 hacimsel oranı ile 2163 Reynolds sayısında ve en düşük Nusselt sayısı saf suyla 463 Reynolds sayısında elde edilmiştir.

- Reynolds sayısı arttıkça, sürtünme faktöründe azalma meydana gelmiştir.
- Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların sürtünme faktörü değerleri saf suyunkinden yüksektir.
- Sürtünme faktöründe en yüksek artış %0.2 den %0.4 hacimsel orana çıktığında olmuştur.
- Partikülün hacimsel oranı arttıkça basınç düşümünün de arttığı görülmektedir.
- Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların basınç düşümü saf suyunkinden yüksektir.
- Saf su için en yüksek Reynolds sayılarda 1453 Pa ve %1,2 hacimsel partikül oranı için 2902 Pa basınç düşümü meydana gelmiştir.
- Sürtünme faktörüne benzer şekilde basınç düşümünde en yüksek artış %0.2 den %0.4 hacimsel orana çıktığında oluşmaktadır.
- Saf suya göre en yüksek basınç düşümü %1.2 hacimsel oran için %99.7 ve en düşük %97.6 artış görülmektedir. En düşük Reynolds sayılarda farklı hacimsel oranlarda basınç düşümü artışı birbirine çok yakın iken Reynolds sayısı arttıkça hacimsel yüzdeler bazında basınç düşümleri arasındaki fark açılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akbarinia, A., Abdolzadeh, M. and Laur, R., 2011. Critical investigation of heat. *Applied Thermal Engineering*, 31:556-565.
- Akçay, S., Akdağ, A., 2017. Numerical investigation of effects on heat transfer of nanofluids in a way microchannel. 13. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi, 19-22. İzmir.
- Arani, A., Amani, J., 2013. Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44:520–533.
- Avcı, M., 2008. Mikrokanallarda akış ve ısı transferi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. Trabzon.
- Azari, A., Kalbasi, M., Derakhshandeh, M., Rahimi, M., 2013. An experimental study nanofluids convective heat transfer through a strait tube under constant heat flux, fluid dynamics and transport phenomena. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21:1082- 1088.
- Bergles, A.E., 1996. The imperative to enhance heat transfer. *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers, Nato ASI series*, 355: 13-29.
- Bruggeman D.A.G., 1935. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen., I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen., *Annalen der Physik, Leipzig* 24 ,636–679.
- Bhimani, V. L., Rathod, P. P., Sorathiya, A. S., Experimental study of heat transfer enhancement using water based nanofluids as a new coolant for car Radiators. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2250- 2459.
- Canay, A., 2007. Mikrokanallarda Isı Transferi. Yüksek Lisans Tezi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chein, R. and Chuang, J., 2007. Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 46:57–66.
- Chein, R. and Huang, G., 2005. Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 25:3104–3114.
- Chen, C.H. and Ding, C.Y., 2010. Study on the thermal behavior and cooling performance of a nanofluid-cooled microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(3):1-7.
- Chen, H., Yang, W., He, Y., Ding, Y., Zhang, L., Tan, C., Lapkin, A.A., Bavykin, D.V., 2008. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids). *Powder Technology*, 183:63–72.
- Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E., Grulke, E.A., 2001. Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions. *Applied Physics Letters*, 79: 2252-2254.
- Choi, US., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME FED*, 231, 99–103.

- Chopkar, M., Kumar, S., Bhandari, D.R., Das, P.K., Manna, I., 2007. Development and characterization of Al_2Cu and Ag_2Al nanoparticle dispersed water and ethylene glycol based nanofluid. *Materials Science and Engineering B*, 139, 141–148.
- Chu, J.C., Teng, J.T., Greif, R., 2010. Experimental and numerical study on the flow characteristics in curved microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 30:1558–1566.
- Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P., Roetzel, W., 2003. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *ASME Trans. J. Heat Transfer*, 125:567–574.
- Daungthongsuk, W. and Wongwises, S., 2007. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11(5):797–817.
- Ding, L. S., Sun, H., Sheng, X.L. ve Lee, B.D., 2000. Measurement of Friction Factors for R134a and R12 Through Microchannels. *Proceedings of Symposium on Energy Engrg. in the 21st Century*, 2, 650–657.
- Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thompson, L.J., 2001. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78 (6) , 718–720.
- Eastman, J.A., Choi, U.S., Li, S., Thompson, L.J., Lee, S., 1997. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Materials Research Society Symposium-Proceedings*, vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, USA, Boston, MA, USA, pp. 3-11.
- Gedik, G., 2009. Nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünün belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Erzurum.
- Geliş, K., 2013. Şerit eleman kullanılan bir ısı değiştiricide nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünün incelenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Erzurum.
- Ghazvini, M. and Shokouhmand, H., 2009. Investigation of a nanofluid-cooled microchannel heat sink using Fin and porous media approaches. *Energy Conversion and Management*, 50, 2373–2380.
- Ghozatloo, A., Shariaty-Niasar, M., Rashidi, A.M., 2013. Preparation of nanofluids from functionalized Graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42,89–94.
- Hamilton, R.L., Crosser, O.K., *Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems, I & EC Fundamentals*, 1, 182–191, 1962.
- Hedayati, F., Malvandi, A., Kaffash, M.H., Ganji, D.D., 2015. Fully developed forced convection of alumina/water nanofluid inside microchannels with asymmetric heating Powder. *Technology journal* 269, 520–531.
- Heyhat, M.M., Kowsary, F., Rashidi, A.M., Momenpour, M.H., Amrollahi, A., 2013. Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water based Al_2O_3 nanofluids in fully developed flow regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44:483-489.
- Ho, C.J., Wei, L.C. and Li, Z.W., 2010. An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al_2O_3 /water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 30, 96–103.

- Hong, K., Hong, T.K., Yang, H.S., 2006. Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles. *Applied Physics Letters* 88(3): 31901.
- Hrnjak, P. and Tu, X., 2007. Single phase pressure drop in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28:2-14.
- Hung, T.C., Yan, W.M., Wang, X.D., Chang, C.Y., 2012. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55:2559–2570.
- Hwang, K.S., Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime. School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Republic of Korea, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607, USA, High Efficiency Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Republic of Korea.
- Hwang, Y., Park, H.S., Lee, J.K., Jung, W.H., 2006b. Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6(1), 67-71.
- Hwang, Y.J., Ahn, Y.C., Shin, H.S., Lee, C.G., Kim, G.T., Park, H.S., Lee, J.K., 2006a. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6(6), 1068-1071.
- Jang, S.P. and Choi, S.U.S., 2006. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26, 2457–2463.
- Jong, W.R., Kuo, T.H., Ho, S.W., Chiu, H.H., Peng, S.H., 2007. Flows in rectangular microchannels driven by capillary force and gravity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34:186-196.
- Jung, J.Y., Oh, H.S., Kwak, H.Y., 2009. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 466–472.
- Kalteh, M., 2013. Investigating the effect of various nanoparticle and base liquid types on the nanofluids heat and fluid flow in a microchannel. *Applied Mathematical Modelling* 37: 8600–8609.
- Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M. and Harting, J., 2010. Eulerian–Eulerian two phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32:107-116.
- Kandlikar, S.G. and Grande, W.J., 2004. Evaluation of single phase flow in microchannels for high heat flux chip cooling-thermo hydraulic performance enhancement and fabrication technology. 25(8):5-16.
- Kang, S.W., Wei, W.C., Tsai, S.H., Huang, C.C., 2009. Experimental investigation of nanofluids on sintered heat pipe thermal performance. *Appl. Thermal Eng.*, Cilt29, 973-979.
- Kang, S.W., Wei, W.C., Tsai, S.H., Yang, S.Y., 2006. Experimental investigation of silver nano fluid on heat pipe thermal performance. *Appl. Thermal Eng.* Cilt 26, 2377-2382.
- Khastar, F., 2016. Yamuk kesitli mikro ısı değiştiricilerde nanoakışkanların (Al₂O₃-su ve CuO-su) Akış ve ısı transferinin sayısal analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri, Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Ankara.
- Kim, D., Kwon, Y.H., Cho, Y.H., Li, C., Cheong, S., Hwang, Y., Lee, J.K., Hong, D.S., Moon, S., 2008. Convective heat transfer characteristics of nanofluids under

- laminar and turbulent flow conditions. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, San30, Jangjeon-Dong, Keumjung-Ku, Busan 609-735, Republic of Korea High Efficiency Energy Research Department, Korea Institute of Samchang Tsinghua Nano Application, N-BARO TECH CO.LTD 974-1, Goyeon-Ri, Ungchnmyon.
- Kumaresan, V., Velraj, R., Das, S.K., 2012. Convective heat transfer characteristics of secondary refrigerant based CNT nanofluids in a tubular heat exchanger. *international journal of refrigeration*, 35:2287-2296.
- Lee, J. and Mudawar, I., 2007. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50:452–463.
- Lee, P.S., Garimella, S.V., Liu, D., 2005. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1688–1704.
- Li, C.H. and Peterson, G.P., 2006. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics*, 99(8):084314.
- Li, H., and Olsen, M.G., 2006. Micro PIV measurements of turbulent flow in square microchannels with hydraulic diameters from 200 μm to 640 μm . *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27:123–134.
- Li, J. and Kleinstreuer, C., 2008. Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29:1221–1232.
- Li, X.F., Zhu, D.S., Wang, X.J., Wang, N., Gao, J.W., Li, H., 2008. Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H₂O nanofluids. *Thermochimica Acta*, 469, 98–103.
- Li, Z., Huai, X., Tao, Y., Chen, H., 2007. Effects of thermal property variations on the liquid flow and heat transfer in microchannel heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 27:2803–2814.
- Liu, M.S., Lin, M.C., Huang, I.T., Wang, C.C., 2005. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 (9):1202–1210.
- Manay, E., 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. Erzurum.
- Manay, E., Sahin, B., Gelis, K., and Yilmaz, M., 2012b. Thermal Performance Analysis of Nanofluids in Microchannel Heat Sinks. *WASET*, (67):100-105.
- Maxwell, J.C., 1873. *Electricity and Magnetism*. 1st Ed., Clarendon Press, Oxford. England.
- Maxwell, J.C., 1881. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. second ed., Clarendon.
- Mohammed, H.A., Bhaskaran, G., Shuaib, N.H., Abu-Mulaweh, H.I., 2010. Influence of nanofluids on parallel flow square microchannel heat exchanger performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, in press Press, Oxford. UK.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C., 2008. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids. A critical review, *Applied Thermal Engineering*, 28, 2109-2125.
- Nebbati, R., Kadja, M., 2015. Study of forced convection of a nanofluid used as a heat carrier in a microchannel heat sink. *International Conference on Technologies*

- and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15.
- Patel, H.E., Das, S.K., Sundararagan, T., Nair, A.S., Geoge, B., Pradeep, T., 2003. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids, Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*, 83, 2931–2933.
- Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K., 2003. Natural convection of nano-fluids. *Heat and Mass Transfer*, 39, 775-784.
- Rahman, M.M., 2000. Measurement of heat transfer in microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 27 (4):495-506.
- Rea, U., McKrell, T., Hu, L. W., Buongiorno, J., 2009. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52:2042-2048.
- Şahin, B., 2001. Isı transferini iyileştirmede kullanılan yay ve konik-halka elemanların ısı verim ve titreşim analizi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Sahin, B., Comaklı, K., Comaklı, O., Yılmaz, M., 2006. Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 47 (559), 29-34.
- Sahin, B., Manay, E., Mandev, E., Geliş, K., 2015. Mikrokanallı ısı alıcıda nanoakışkanların optimizasyonu. Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 25050 . Erzurum.
- Sekhar, R.Y., Sharma, K.V., Karupparaj, R.T., Chiranjeevi, C., 2013. Heat transfer enhancement with Al₂O₃ nanofluids and twisted tapes in a pipe for solar thermal applications. *Procedia Engineering* 64:1474 – 1484.
- Steinke, M.E. and Kandlikar, S.G., 2006. Single-phase liquid friction factors in microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 45:1073–1083.
- Tang, G.H., Li, Z., He, Y.L., Tao, W.Q., 2007. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50:2282–2295.
- Tang, G.H., Lu, Y.B., Zhang, S.X., Wang, F.F., Tao, W.Q., 2012. Experimental investigation of non-Newtonian liquid flow in microchannels. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 173–174:21–29.
- Teng, T.P., Hung, Y., Teng, T.C., Moe, H.E., Hsu, H.G., 2010. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30, 213-218.
- Tiwari, A.K., Ghosh, P., Sarkar, J., 2013. Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO₂/water nanofluid in plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 57:24-32.
- Tokit, EM., Mohammed, H.A., Yusoff, M.Z., 2012. Thermal performance of optimized interrupted microchannel heat sink (IMCHS) using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39: 1595–1604.
- Tsai, T.H. and Chein, R., 2007. Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 1013–1026.
- Tuckerman, D.B. and Pease, R.F., 1981. High performance heat sinking for VLSI, *IEEE Electron. Dev. Lett.* EDL 2 :126–129.

- Wang, J., Zhu, J., Zhang, X., Chen, Y., 2013. Heat transfer and pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in laminar flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44:716–721.
- Wang, X., Mujumdar, A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids. A review *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 1–19.
- Wang, X.D., BA, J.L., Xu, 2013. Optimal geometric structure for nanofluid-cooled microchannel heat sink under various constraint conditions. *Energy Conversion and Management* 65:528–538.
- Webb, R. L., 1994. *Principals of Enhanced Heat Transfer*. John Wiley&Sons, Inc., New York, 1-20 p.
- Wen, D., Ding Y., 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(24):5181 –5188.
- Wu, Z., Wang, L., Sundén, B., 2013. Pressure drop and convective heat transfer of water and nanofluids in a double-pipe helical heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 60:266-274.
- Xie, H., Lee, H., Youn, W., Choi, M., 2003. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *Journal of Applied Physics*. 94(8), 4967–4971.
- Xuan, Y., Li, Q., 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21/1, 58–64.
- Yang, C.Y., Chien, H.T., Lu, S.R. ve Shyu, R.J., 2000. Friction Characteristics of Water, R134a and Air in Small Tubes, in: G.P. Celata, et al. (Eds.), *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, Begell House, New York, USA, 168–174.
- Yılmaz, M., Şara, O.N., 1996. Isı değiştirici seğimi. *Mühendis ve Makine*, 41:(490) 24-37.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y., 2010. Enhancement of thermal conductivity of kerosene based Fe₃O₄ nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 355,109–113.
- Yu, W., Xie, H., Li, Y., Chen, L., 2011. Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid. *Particuology*, 9, 187-191.
- Zhang, X., Gu, H., Fujii, M., 2007. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *Experimental Thermal and Fluid Science* 31/6, 593-599.
- Zhu, H., Zhang, C., Tang, Y., Wang, J., Ren, B., Yin, Y., 2007. Preparation and thermal conductivity of suspensions of graphite nanoparticles. *Letters to the Editor/Carbon* 45, 203–228.

ÖZGEÇMİŞ

Hourieh Bayramian İranın Urmiye ilinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Urmiye 'de tamamladı. 2003 yılında Tebriz Üniversitesi'nden Makina Fakültesi Malzeme Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2015 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Enerji Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

