



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GRAFİT BAZLI BİR NANOSİVİNİN TİCARİ BİR
MİKROKANALDA SOĞUTMA PERFORMANSININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

OĞUZHAN YILDIZ

Nisan 2018

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GRAFİT BAZLI BİR NANOSİVİNİN TİCARİ BİR
MİKROKANALDA SOĞUTMA PERFORMANSININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

OĞUZHAN YILDIZ

Doktora Tezi

Danışman


Prof. Dr. Mustafa BAYRAK

Nisan 2018

Oğuzhan YILDIZ tarafından Prof. Dr. Mustafa BAYRAK ve Doç. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ danışmanlığında hazırlanan “Grafit Bazlı Bir Nanosıvının Ticari Bir Mikrokanalda Soğutma Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı bu çalışma Jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ana Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

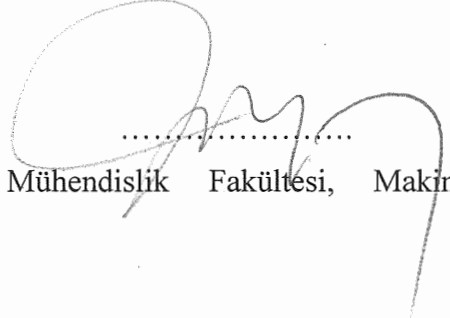
Başkan : Prof. Dr. Mustafa BAYRAK

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Aksaray Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü



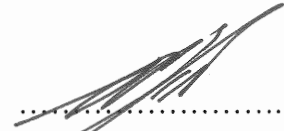
Üye : Doç. Dr. Mahmut ALKAN

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü



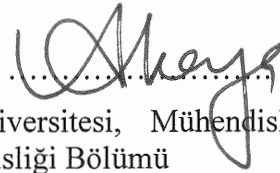
Üye : Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Teknoloji Fakültesi



Üye : Prof. Dr. Ahmet KAYA

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve
Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 13/04/2018 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../...../2018 tarih vesayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2018

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Oğuzhan YILDIZ



ÖZET

GRAFİT BAZLI BİR NANOSIVİNİN TİCARİ BİR MİKROKANALDA SOĞUTMA PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YILDIZ, Oğuzhan

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman :Prof. Dr. Mutafa BAYRAK

İkinci Danışman :Doç. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Nisan 2018, 120 sayfa

Bu doktora çalışmasında, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 yüzde hacimsel yoğunluklarda, saf suya grafit nano parçacık ilavesi ile hazırlanmış olan nanosivinin, $1,6 \cdot 10^{-3}$ mm hidrolik çapa sahip olan endüstriyel bir mikrokanal ısı değiştiricide, 20 °C, 22 °C, 24 °C, 26 °C, 28 °C ve 30 °C sıcaklıklarda taşınım ile ısı geçişi performansı deneysel olarak incelenmiştir. Nanosivinin ısıl geçirgenlik (k), viskozite (μ) ve ısı kapasite (c) gibi termofiziksel özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Grafit nanosivinin ticari bir mikrokanalda zorlanmış taşınım ile 1-2-3-4-5-6-7 lt/dak akışkan debisi ve 100-1100 W ısı aralığında Nusselt sayısı için hesaplamalar türetilmiştir. Deneyler sonucunda, nanosivinin hacimsel yoğunluk oranı, kütleli debisi, giriş sıcaklığı ve parçacık yoğunluğunun ısı geçişi katsayısı üzerinde etki yapan temel parametreler olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Mikrokanal, nanosiviler, ısı Geçişi, grafit nanoparçacık.

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COOLING PERFORMANCE OF A GRAPHITE BASED NANOFLUID IN A COMMERCIAL MICROCHANNEL

YILDIZ, Oğuzhan

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor :Prof. Dr. Mustafa BAYRAK

Co-Advisor :Associate Professor Ahmet Selim DALKILIÇ

April 2018, 120 pages

In this PhD study, nanofluid prepared by the addition of pure water graphite nanoparticles at 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 percent volumetric densities, an industrial microchannel heat exchanger having a hydraulic diameter of $1.6 \cdot 10^{-3}$ mm, 20 °C, 22 °C, 24 °C, 26 °C, 28 °C, and 30 °C temperatures were experimentally investigated. The thermophysical properties such as thermal conductivity (k), viscosity (μ) and thermal capacity (c) of nanofluid have been experimentally determined. Calculations for the Nusselt number for the 100-1100 W heat range and the 1-2-3-4-5-6-7 lt/min fluid flow with forced convection in a commercial microchannel of the graphite nanofluids are derived. As a result of the experiments, it has been observed that the volumetric density ratio of the nanofluid is the fundamental parameter affecting the heat flux coefficient of mass flux, inlet temperature and particle density.

Keywords: Microchannel, nanofluids, heat Transfer, graphite nano particle.

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasında, bir mikrokanal ısı eşanjöründe nano grafit ve saf su karışımından elde edilen nanosıvı kullanılarak ısıl performans değerleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu doktora tez çalışmasındaki deneysel çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FEB 2013/08 nolu desteği ile alınan makine ve teçhizat kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının her aşamasında desteklerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Mustafa BAYRAK ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Beni yetiştiren ve her türlü desteği esirgemeyen annem Suna YILDIZ ve babam Mehmet Emin YILDIZ'a, her zaman yanımda olup desteğini benden esirgemeyen eşim Güldem YILDIZ ve varlığından güç aldığım kızım Begüm YILDIZ'a şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ÖNSÖZ.....	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ.....	XV
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVII
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
1 Isı Geçişi ve Isı Geçişi Sıvılarına Genel Bakış.....	1
BÖLÜM II LİTERATÜRE BAKIŞ.....	4
2.1 Nanosıvılar.....	4
2.2 Nanosıvıların Isıl Geçirgenlik Değerleri.....	6
2.3 Nanosıvıların Isıl Geçirgenlik Ölçüm Metodları.....	12
2.4 Mikrokanallar.....	15
2.4.1 Mikrokanallarda deneysel çalışmalar.....	16
2.4.2 Mikrokanallarda sayısal çalışmalar.....	19
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
3.1 Nanosıvının Hazırlanması.....	25
3.2 Nanosıvının Termofiziksel Özelliklerinin Deneysel Yolla Bulunması.....	27
3.2.1 Nanosıvının ısı kapasitenin deneysel ölçümü.....	27
3.2.2 Nanosıvının viskozitesinin deneysel ölçümü.....	30
3.2.3 Nanosıvının ısı iletim katsayısının deneysel ölçümü.....	43
3.3 Mikrokanal Soğutma Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi	45
3.3.1 Deney düzeneği ve deneylerin yapılışı	45
3.3.2 Deney tesisatının ana bileşenleri.....	49
3.3.2.1 Mikrokanal ısı eşanjörü.....	49
3.3.2.2 Su soğutma ünitesi.....	50
3.4 Kanal Tipi Isı Değiştiricilerinde Temel Kavramlar ve Teorik İnceleme.....	51
3.4.1 Kanat parçasından geçen ısı miktarının hesaplanması.....	51

3.4.2 Kanat verimi.....	57
3.5 Deneysel Veriler İçin Hesaplama Yöntemi.....	58
BÖLÜM IV DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	62
4.1 Farklı Isı Akısı ve Sıcaklıklarda Grafit Nanosivuların Ortalama zorlanmış taşınımla Isı Geçiş Katsayısına Etkisi.....	62
4.2 Deney Sonuçlarının Literatürdeki Denklemlerle Karşılaştırılması.....	86
4.3. Deneylerin Bağımlılık Analizi ile Doğrulanması.....	100
4.3.1 Deneysel verilerin korelasyon analizi.....	100
BÖLÜM V SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105
5.1 Sonuçlar.....	109
5.2 Öneriler.....	111
KAYNAKLAR.....	112
ÖZGEÇMİŞ.....	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Nanosıvılar için kullanılan ısıl geçirgenlik modelleri.....	11
Çizelge 2.2. Nanosıvıların ısı iletim katsayıları ve ölçüm metodları.....	14
Çizelge 2.3. Mikrokanallarda deneysel çalışmalar.....	22
Çizelge 2.4. Mikrokanallarda sayısal çalışmalar.....	24
Çizelge 3.1. Grafit nanosıvının viskozite deneysel verileri	34
Çizelge 3.2. Nanosıvılar için geliştirilen viskozite korelasyonları.....	35
Çizelge 3.3. Korelasyonların deneysel şartlarının detayları.....	36
Çizelge 3.4. ANN sonucunda çıkan korelasyon katsayıları.....	37
Çizelge3.5. Araştırmacıların korelasyonlarının ortalama bağıl hatalarının karşılaştırılması	37
Çizelge 3.6. $\mu_{bf} - \phi$ ve $T - \phi$ ağıının performans değerleri.....	38
Çizelge 3.7. Deneysel kullanılan mikrokanal ölçüleri ve kontrüksiyon parametreleri.....	47
Çizelge 3.8. Deneysel kullanılan makina teçhizat ve özellikleri.....	48
Çizelge 4.1. 20 °C ve 1lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen} - h_{ort}$ çizelgesi.....	62
Çizelge 4.2. 20 °C ve 1 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen} - h_{ort}$ ortalama ısı geçişi katsayısı yüzde artış değerleri.....	63
Çizelge 4.3. 20 °C ve 3 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen} - h_{ort}$ çizelgesi.....	64
Çizelge 4.4. 20 °C ve 3 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen} - h_{ort}$ ortalama mutlak hata yüzdesi değerleri.....	65
Çizelge 4.5. 20 °C ve 5 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen} - h_{ort}$ çizelgesi.....	66
Çizelge 4.6. 20 °C ve 5 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen} - h_{ort}$ ortalama mutlak hata yüzdesi değerleri.....	67
Çizelge 4.7. Kaynaklardaki bazı araştırmacıların korelasyonlarından elde edilen verilerin deneysel verilerle karşılaştırıldığında elde edilen değişim miktarını gösterir çizelge.....	86

Çizelge 4.8. Kaynaklardaki bilinen bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlardan çıkardıkları korelasyon çizelgesi.....	88
Çizelge 4.9. Bağımlılık analizi korelasyon katsayıları.....	101



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Bir kanat dizisi soğutucusunu gösteren şema.....	2
Şekil 2.1 CuO Nanosivuların TEM görüntüsünde görünümü.....	5
Şekil 2.2. Bazı iyi bilinen araştırmacıların nano parçacık yüzde hacimsel yoğunluk oranlarının ısı iletim katsayısı oranının değişimini gösterir grafik.....	8
Şekil 3.1. Isıl kapasitenin diferansiyel ısı analiz tekniği deney şeması.....	28
Şekil 3.2. Kapiler Viskometre Tüpü.....	31
Şekil 3.3. Deneysel viskozite ölçüm sistemi.....	32
Şekil 3.4. Farklı hacimsel nanosivuların sıcaklıkla viskozite değişimini gösterir grafik.....	39
Şekil 3.5. Grafit nanosivunun deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle bulunan korelasyon viskozitesinin sıcaklıkla değişimini gösterir grafik.....	39
Şekil 3.6. Grafit nanosivü viskozitesinin yüzde hacimsel yoğunlukla değişimini gösterir grafik.....	40
Şekil 3.7. Deneysel viskozitenin 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 yüzde hacimsel yoğunluklarda korelasyon viskozite değerlerine göre değişimini gösterir grafik.....	40
Şekil 3.8. Deneysel viskozite sonuçlarıyla korelasyonlarının karşılaştırılması (Wang korelasyonu).....	41
Şekil 3.9. Deneysel viskozite sonuçlarıyla korelasyonlarının karşılaştırılması (Wang korelasyonu).....	41
Şekil 3.10. Grafit nanosivü deneysel viskozite $\mu_{bf} - \phi$ giriş ağ sonuçlarının karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.11. Grafit nanosivü deneysel viskozite $T - \phi$ giriş ağ sonuçlarının karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.12. Grafit nanosivünün tek fazlı mikrokanal tesisatı deney şeması.....	46
Şekil 3.13. Deneylerde kullanılan mikrokanal dış yapısı.....	50
Şekil 3.14. Mikrokanal ısı eşanjörü iç yapısı.....	50
Şekil 3.15. Genişletilmiş yüzeyde enerji dengesi (Incropera ve DeWitt, 2000).....	52
Şekil 3.16. Sabit kesitli düz kanatlar.....	54
Şekil 3.17. Sabit kesitli bir kanatta iletim ve taşınım.....	57
Şekil 3.18. Mikrokanal şematik iç yapısı ve ısılıçiftlerin yerini gösteren şekil.....	59

Şekil 4.1. Ortama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının 1lt/dak debi şartlarında mikrokanala verilen ısı ile değişimi.....	64
Şekil 4.2. Ortama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının 3 lt/dak debi şartlarında mikrokanala verilen ısı ile değişimi.....	66
Şekil 4.3. Ortama zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısının 5 lt/dak debi şartlarında mikrokanala verilen ısı ile değişimi.....	68
Şekil 4.4. 20 °C 31,25 kw/m ² sabit ısı akısındaki Re-Nu değişimi.....	68
Şekil 4.5. 20 °C 50 kw/m ² sabit ısı akısındaki Re-Nu değişimi.....	69
Şekil 4.6. 20 °C 68,75 kw/m ² sabit ısı akısındaki Re-Nu değişimi.....	70
Şekil 4.7. 22 °C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	70
Şekil 4.8. 22 °C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	71
Şekil 4.9. 22 °C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	71
Şekil 4.10. 24 °C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	72
Şekil 4.11. 24 °C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	72
Şekil 4.12. 24 °C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	73
Şekil 4.13. 26 °C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	73
Şekil 4.14. 26 °C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi.....	74
Şekil 4.15. 26 °C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	74
Şekil 4.16. 28 °C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	75
Şekil 4.17. 28 °C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	75
Şekil 4.18. 28 °C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	76
Şekil 4.19. 30 °C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi	

katsayısının verilen ısı ile değişimi	76
Şekil 4.20. 30 °C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	77
Şekil 4.21. 30 °C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi	77
Şekil 4.22. 22 °C’de ve 31,25 kw/m ² Re-Nu Mikrokanalda değişimi.....	78
Şekil 4.23. 22 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	79
Şekil 4.24. 22 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	79
Şekil 4.25. 22 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	80
Şekil 4.26. 24 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.	80
Şekil 4.27. 22 °C’de ve 68,75 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.	81
Şekil 4.28. 26 °C’de ve 31,25 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	81
Şekil 4.29. 26 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.	82
Şekil 4.30. 26 °C’de ve 68,75 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.	82
Şekil 4.31. 28 °C’de ve 31,25 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	83
Şekil 4.32. 28 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.	83
Şekil 4.33. 28 °C’de ve 68,75 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi	84
Şekil 4.34. 30 °C’de ve 31,25 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	84
Şekil 4.35. 30 °C’de ve 50 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	85
Şekil 4.36. 30 °C’de ve 68.75 kw/m ² Mikrokanalda Re-Nu değişimi.....	85
Şekil 4.37. 20 °C Saf su (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).	92
Şekil 4.38. 20 °C % 0.5 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).	92
Şekil 4.39. 20°C % 1.0 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)	93
Şekil 4.40. 20°C % 1.5 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)	93
Şekil 4.41. 20 °C % 2.0 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).....	94
Şekil 4.42. 20 °C Saf su (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar).....	94
Şekil 4.43. 20 °C % 0.5 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar).	95
Şekil 4.44. 20 °C % 1.0 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar).....	95
Şekil 4.45. 20 °C % 1.5 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar).	96
Şekil 4.46 20 °C % 2.0 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar).	96
Şekil 4.47. 22 °C Saf su (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).	97
Şekil 4.48. 22 °C % 0.5 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).....	97
Şekil 4.49. 22 °C % 1.0 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).....	98
Şekil 4.50. 22 °C % 1.5 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).....	98

Şekil 4.51. 22 °C % 2.0 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).....	99
Şekil 4.52. 20 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneyssel}-Nu_{Korelasyon}$ değişimi.....	102
Şekil 4.53. 22 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneyssel}-Nu_{Korelasyon}$ değişimi.....	102
Şekil 4.54. 24 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneyssel}-Nu_{Korelasyon}$ değişimi.....	103
Şekil 4.55. 26 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneyssel}-Nu_{Korelasyon}$ değişimi.....	103
Şekil 4.56. 28 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneyssel}-Nu_{Korelasyon}$ değişimi.....	104
Şekil 4.57. 30 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneyssel}-Nu_{Korelasyon}$ değişimi.....	104
Şekil 4.58. Saf Su $Nu_{Deneyssel} - Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.59. 0.5 % vol’de $Nu_{Deneyssel} - Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması.....	106
Şekil 4.60. 1.0 % vol’de $Nu_{Deneyssel} - Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması.....	106
Şekil 4.61. 1.5 % vol’de $Nu_{Deneyssel} - Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması.....	107
Şekil 4.62. 2.0 % vol’de $Nu_{Deneyssel} - Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması.....	107

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Farklı hacimsel oranlarda nanosıvı hazırlamada kullanılan hassas terazi.....	26
Fotoğraf 3.2. Nanosıvının hazırlanmasında kullanılan ultrasonik sonikatör.....	26
Fotoğraf 3.3. Sonikatörde 2 saat sonikasyona tabi tutulmuş ve 2 saat bekletilmiş nanosıvı.....	26
Fotoğraf 3.4. 40 Khz 600 W ultrasonik sonikatör jeneratörü.....	27
Fotoğraf 3.5. Nanosıvının ısı kapasitesini ölçen deney düzeneği	29
Fotoğraf 3.6. Isıl kapasite deney düzeneği ve ısıtıcı plakaları gösterir varyak cihazı ...	30
Fotoğraf 3.7. Ölçüm tankına batırılmış halde asılı duran viskozimetre kapiler tüpü....	33
Fotoğraf 3.8. Ölçüm tankı sıvı giriş ve çıkışı.....	33
Fotoğraf 3.9. Isıl geçirgenliği ölçen KD2 Pro cihazı ve deney düzeneğine bağlantısı....	43
Fotoğraf 3.10. Örnek türlerinin deney havuzuna yerleştirilme şekli.....	44
Fotoğraf 3.11. Sıcaklık ölçen iki adet ısı çifti ile deney tüplerinin deney havuzuna daldırılarak ısı geçirgenlik ölçülmesi.....	44
Fotoğraf 3.12. Deney tesisatı fotoğraf gösterimi.....	49
Fotoğraf 3.13. Su soğutma banyosu.....	51

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
\dot{m}	Kütle akısı (kg/s)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
A_c	Fin kesit alanı (m ²)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (J/kg K)
D	Dairesel çap (m)
D_h	Hidrolik çap (m)
g	Gravite sabiti (m/s ²)
G	Kütle akısı (kg/m ² s)
h	Taşıyıcıyla ısı geçişi katsayısı (W/m ² K)
H_{ch}	Kanal yüksekliği (m)
I	Akım (Amper)
k	Isıl geçirgenlik katsayısı (W/mK)
k_{fin}	Kanat malzemesinin ısı geçişi katsayısı (W/mK)
L	Mikrokanal kanal uzunluğu (m)
N	Kanal sayısı (Adet)
P	Kanat elemanı çevresi (m)
Q_T	Toplam ısı geçişi (kW)
q_w	Isı akısı (kW/m ²)
Re	Reynolds sayısı (Boyutsuz)
T_s	Yüzey sıcaklığı (°C)
V	Voltaj (Volt)
W_{ch}	Kanal kalınlığı (m)
W_{fin}	Kanat kalınlığı (m)
δ_{tc}	Mikrokanal eşanjör ısı bölgesi et kalınlığı (m)
η	Kanat verimi (Boyutsuz)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
σ_s	Suyun kapiler borudaki yüzey gerilimi (N/m)
ϕ	Yüzde Hacimsel Yoğunluk
Ch	Kanal

fin	Kanat
in	Giriş
b	Temel
s	Katı
Wall	Duvar
exp	Deneysel
ave	Ortalama
f	Sıvı
bulk	Yığın
loss	Kayıp
T	Toplam
nf	Nanosıvı
corr	Korelasyon
h	Hidrolik
tc	Termalçift
vol	Hacimsel

Kısaltmalar

Açıklama

SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
CNT	Karbon nanotüp
KHM	Kararlı Hal Metodu
STM	Sıcak Tel Motudu
CTAB	Cetrimonium bromide
TAM	Isıl Arabirim Malzemeleri
ANN	Yapay Sinir Ağları

BÖLÜM I

GİRİŞ

1 Isı Geçişi ve Isı Geçişi Sıvılarına Genel Bakış

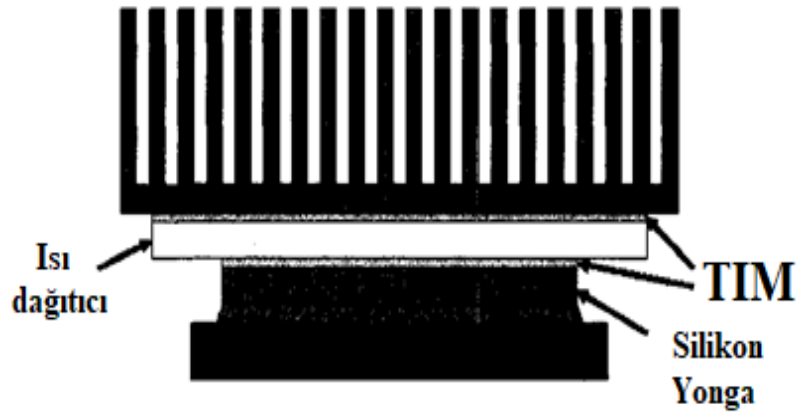
Isı geçişi birçok endüstrideki prosesler için hayati önem taşıyan fiziksel bir olaydır. Isı geçişi akışkanları ise güç üretimi, ısı ve soğutma prosesleri endüstrilerinde çok önemli rol oynayan elemanlardır. Artan enerji maliyetleri ve küresel ticaretteki rekabet birçok endüstriyi yüksek performans ısı geçişi sıvılarını geliştirmeye zorlamaktadır. Bununla birlikte özellikle elektronik, medikal ve askeri endüstrilerde yaşanan hızlı gelişmeler ısı geçişindeki iyileştirme çalışmalarını zorunluluk haline getirmiştir. Mevcut olan konvansiyonel akışkanların kolay bulunabilirliği ve maliyetlerinin ucuzluğu yeni bir akışkan keşfi yerine ısı geçişi akışkanları denilen su, etilen glikol gibi hali hazırda mevcut akışkanlardan vazgeçilemeyeceği gösterir. Yapılan araştırmalarla bu akışkanların ısı özelliklerinin geliştirilmesi ile ısı geçişi iyileştirme mümkün gözükmektedir. Su, etilen glikol ve yağlar birçok katı malzemeyle karşılaştırıldığında çok düşük ısı geçirgenliğe sahiptir.

Modern teknolojiye bağlı olarak, son elektronik sistemlerde, büyük bir miktarda ısı açığa çıkar, bu durum cihazların normal performansını bozar ve dayanıklılığını azaltır. Verimli bir soğutma sistemi elektronik bileşenlerin tasarımında en önemli sorunlardan birisidir. Yüksek ısı akışını etkili bir biçimde uzaklaştırmak için, havayla soğutma, sıvıyla soğutma ve iki fazlı soğutma dahil olmak üzere çok sayıda girişimlerde bulunulmuştur. Uygulanmasının basit olması sebebiyle, havayla soğutma, ya tek bir çip ya da bütün bir baskılı devre kartı biçiminde olan elektronik elemanlar için en yaygın olarak kullanılan soğutma tekniğidir.

Havayla soğutmada genellikle ısı yayan yüzey alanını genişleten bir dizi kanattan oluşan ısı gidericisi kullanılır. Mikroçipten açığa çıkan ısı, bir ısı yayıcı ve ısı arabirim malzemeleri (TAM'ler) içinden geçerek doğal veya zorlanmış hava konveksiyonu ile soğutulan bir dizi kanada aktarılır.

Birçok kanat tasarımları, soğutma verimliliğini artırmak için analiz edilmiş ve uygulanmıştır. Kanat tasarımları dışında, araştırmacılar ısı arabirim malzemeleri (TAM) ve ısı yayıcıların geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Alt-tabaka ve soğutucu arasındaki ara yüzey ısı direnç, toplam ısı direncinin önemli bir bölümünü içerir. Bundan dolayı, ısı arayüz malzemeleri için çok çalışma yapılmıştır. Tipik TAM, yapıştırıcıları, gres yağları, jelleri, ısı pedleri ve faz değişim malzemelerini (FDM'ler) kapsamaktadır. Son zamanlarda, gümüş dolu ya da karbon fiber yüklü malzemeler en iyi TAM'lar olarak geliştirilmiştir. Yüksek ısı iletkenlik, örneğin bakır gibi, çipe zarar verebilen bölgesel sıcak noktayı önlemek için ısı dağıtıcı olarak kullanılmıştır. Son zamanlarda, iki fazlı ısı yayıcı, ısı boruları gibi, sıcaklık değişimlerini azaltmak için sıklıkla kullanılmaktadır.

Hava soğutucularında, ısı geçişi katsayısının sıvı cebri konveksiyon veya kaynama tekniklerinden çok daha düşük olmasına dair sınırlama vardır. Havanın düşük ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi nedeniyle, düşük hızlı hava soğutma, ısı akış dağılımının $100W/cm^2$ 'nin üzerinde gerektiği durumlarda mümkün olmayabilir.



Şekil 1.1. Bir kanat dizisi soğutucusunu gösteren şema

Sıvılar havaya göre daha üstün ısı özelliklere sahip olduğundan, düşük ısı geçişi katsayısının sınırlandırması su sokularak veya başka bir biçimdeki sıvıyla soğutularak üstesinden gelinebilir. Bilhassa, su hava ile karşılaştırıldığında mertebe bakımından daha yüksek bir ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi vardır. Bundan başka, suyun, düşük maliyeti ve iyi bilinen bir davranışı gibi başka avantajları da vardır. Sıvı soğutmada kullanan ısı değiştiricileri arasında mikrokanallı ısı değiştiriciler püskürtmeli soğutma ve jet çarpmalı

soğutma şeklide bulunmaktadır. En yaygın kullanılan ısı değıştirici, mikrokanallı ısı değıştiricidir, bu ısı değıştirici arasından örneğın su gibi sıvı bir soğutucu dolaştırılır. Sıvı soğutucu, tek fazlı zorlanmış taşınım ile ısıyı uzaklaştırır. Mikrokanallar genellikle örneğın silikon veya bakır gibi yüksek ısıl iletkenlikli katılardan ya hassas işleme ya mikro imalat teknolojisi ile imal edilmiştir.

Minyatürleştirme 1960'lı yıllardan buyana bilim ve teknolojiye sürekli ilgi odağı haline gelmiştir. Mikro Elektromekanik cihazlar yapıları gereğı gelişen teknolojiyle beraber sürekli daha fazla ısı üreten cihazlar haline gelmektedir. Özellikle elektronik sanayinde konvansiyonel sıvılar artan soğutma ihtiyaçlarına cevap veremez hale gelmişlerdir. Bu yüzden mikro elektromekanik cihazlara mikro yapıdaki soğutucuların kullanımı gereklilik haline gelmiştir. Mikrokanalların yüksek maliyetlerinden dolayı şimdilik yüksek performans mikroişlemciler, laser diyotlar, radarlar ve yüksek enerji laser aynalarında kullanılmaktadır. Fakat gelişen mikrokanal üretim teknolojileri ısı değıştirici maliyetlerini düşüreceğı ve elektronik komponent sanayinin birçok alanında kullanılabileceğı açıkça görülmektedir.

Yüksek ısı akısına sahip araçlarda kullanılabilecek ısı geçişi sıvılarının geliştirilmesi çok önemli bir rol oynamaktadır. Isı geçişini artırmada kabul görmüş metodlardan birisi yüksek ısıl geçirgenliğe sahip katı malzemelerin ısı geçişi akışkanlarına ilavesidir. Isıl geçirgenliği hesaplamak için kullanılan hesaplama metodlarına göre ısıl geçirgenliğin ısı geçişi akışkanından yüksek olması beklenmektedir. Konvansiyonel sıvıların ısıl geçirgenliğinin artırılmasıyla ilgili ilk çalışmalar milimetre ölçeğindeki parçacıklarla yapılmıştır. Ancak uygulama bazı problemleri de beraberinde getirmiştir . Bunlar geçiş bölgelerindeki aşınma , yetersiz karışımından dolayı oluşan tıkanma ve çeşitli basınç düşümleri olarak sayılabilir.

BÖLÜM II

LİTERATÜRE BAKIŞ

Mikrokanalda yapılan zorlanmış taşınım ısı geçişi deneysel çalışmalarını yapabilmek için öncelikle nanosıvının termofiziksel özelliklerinin deneysel yolla bulunması gerekmektedir. Bu yüzden nanosıvının termofiziksel özelliklerinin tayinine dair yapılmış olan çalışmalara ait literatür araştırması yapılmıştır. Bu kapsamda, nanosıvıların hazırlanması ve kararlılığı, termofiziksel özellikleri ve ısı transfer performansı ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir (Kakac ve Pramuanjaroenkij, 2009).

2.1 Nanosıvılar

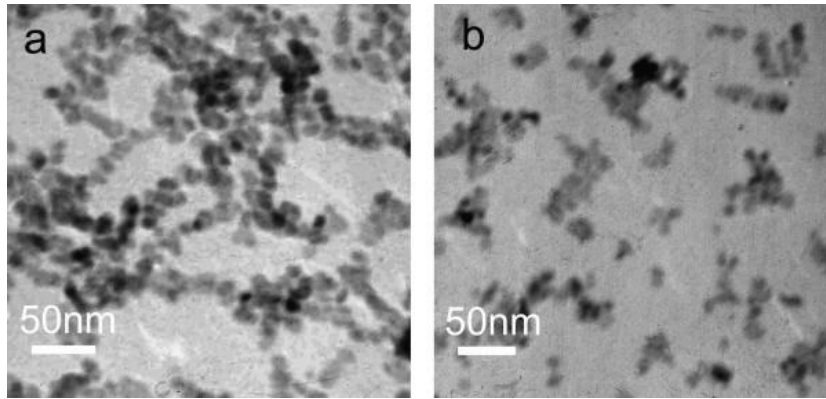
Son yıllarda gelişen teknoloji, araştırmacılara nano ölçekte metalik ve metalik olmayan parçacıkların imalatı imkanını vermiştir. Nanosıvılar, nano ölçekli bu parçacıkların konvansiyonel sıvıların içerisine katılmasıyla keşfedilmiştir. Choi (1995) ilk kez nanoparçacık ve konvansiyonel akışkanları karıştırarak nanosıvı konseptini ortaya çıkarmıştır. Choi (1995) bakır ve alüminyum nanoparçacıkların, su ve diğer ısı geçişi akışkanlarının içerisinde dağılmasını sağlayarak bu parçacıkların akışkan sıvı içerisinde Brownian hareketi yaparak kalıcı olarak asılı kalmasını sağlamıştır. Bu gelişme, Maxwell'in (1881) yaptığı deneylerde ortaya çıkan dezavantajları ortadan kaldırmış ve bu akışkanların ısı özelliklerini geliştirmelerine çok büyük katkı sağlamıştır.

Nanosıvılar 100 nm ($d_p < 100$ nm) altındaki küçük alüminyum oksit, bakır oksit gibi parçacıkların su, yağ ve etilen glikol gibi akışkanlara ilavesiyle imal edilmektedir. Ölçülen birçok nanosıvının ısı geçirgenlik değerleri belirli modeller uygulandığında beklenenden yüksek çıkmıştır. Nanosıvıların ısı geçişi akışkanı olarak bilinen diğer avantajları ise akış kanallarında ve aşınma problemlerinde küçük tanecik boyutlarından dolayı mükemmel bir kararlılık göstermesidir. Bununla birlikte nanosıvıların su, yağ ve etilen glikol gibi bilinen ve çok kullanılan ısı geçişi akışkanlarında herhangi bir karmaşık yapıya sahip olmadan basitçe kullanılabilmesi için ısı geçişinde iyi bir potansiyele sahip olması gerekmektedir. Şu anda nanosıvıların kullanımında bilinen birçok problem vardır. Bunlardan en önemlisi stabil nanosıvıların ısı geçirgenlik değerlerindeki aynı

malzemelerin ve aynı ölçüm tekniklerinin kullanılmasına rağmen görülen geniş belirsizlikler ve sayısal değerlerdeki sıçramalardır. Bu istikrarsızlıklar Kabelac ve Kuhnke (2006) tarafından yapılan çalışmalarda geniş bir şekilde ortaya konulmuştur. Uygunlukların, taşınım ve viskozite deneylerinde diğerlerine göre nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Zorlanmış taşınım ile ısı geçişi oranı ve viskozitenin kritik olmasının sebebi, ısı değiştiricilerinde nanosıvuların kullanım kapasitesinin belirlenmesinin önemli bir rol oynamasıdır. Konu ile ilgili birkaç çalışma mevcut olmakla birlikte, daha net sonuçlara ulaşabilmek için daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır.

Nanosıvular içerisinde bulunan nano ölçekteki parçacıkların cinsine göre sınıflandırılabilir. Bu bağlamda en çok kullanılan nanoparçacıklar, Alümina (Al_2O_3) ve Bakıroksit (CuO) nanoparçacıklardır. İkinci çeşit nanoparçacıklar Bakır (Cu) ve Demir (Fe) gibi metalik nanoparçacıklardır. Üçüncü çeşit nanoparçacıklar örnek olarak ise karbon nano tüp (CNT) örnek gösterilebilir.

Ticari olarak da en çok kullanılan oksit ve metalik nanoparçacıklar basit işlemlerle sentezlenebilir. En bilinen genel metod, ilk olarak ısı geçişi akışkanının basit olarak nanoparçacıkla basit karışımı ve sonrasında ultrasonikasyona tabi tutulmasıdır. Sonikasyon süresi araştırmacıdan araştırmacıya göre değişebilir. Hazırlanan nanosıvuların karakterizasyonunda, araştırmacılar parçacık boyutlarını Dynamic Light Scattering, Scanning Electron Microscopy (SEM) ve Transmission Electron Microscopy (TEM) metotları ile belirlemişlerdir.



Şekil 2.1. CuO Nanosıvularının TEM görüntüsünde görünümü

Birçok araştırmacı, süspansiyonun içindeki parçacık ölçüsü dağılımını karakterize edebilmiş değildir. Eastman vd. (2001), Bakır ve Alümina nanoparçacıklar kullanarak gaz sıvılaştırma işlemleri ile nanosıvı hazırlamışlardır. Yapılan çalışmada, herhangi bir işlem yapılmadan mükemmel dağılım özellikleri elde edilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan oksit nanoparçacıkların aksine bakır nanoparçacıklar zayıf dağılım özellikleri göstermiş ve saf su ile karıştırıldığında hemen çökelmiştir. Karakterizasyon için alınan TEM görüntülerinden, nanoparçacıklarda kümelenme meydana geldiği anlaşılmaktadır. Das vd. (2003) yaptıkları çalışmalarda, saf su ile Alümina (Al_2O_3) ve Bakıroksit (CuO) nanomalzemelerin karışımından sonra 12 saatlik sonikasyona tabi tutarak nanosıvı elde etmişler ve çökelme ya da topaklanma gözlemlenmemiştir.

Xuan vd. (2003), Bakır (Cu) nanoparçacıklarla saf suyu karıştırmış ve %9'luk hacim yoğunluğunda tuz ilave ettikten sonra stabilizasyon için 30 saat sonikasyona tabii tutmuşlardır. Hazırlanan nanosıvının TEM görüntülerinde bazı kümelenmeler gözlemlenmiştir. Hong vd. (2006), demir/etilen glikol'ü herhangi bir yüzey aktif madde kullanmadan hazırlamışlardır. TEM görüntüleri Fe nanoparçacıkların küresel ve küme formunda olduklarını göstermiştir. Ana parçacık ölçüsü eşit dağılımda 10 nm olarak ölçülmüştür.

Karbon nanotüpün yapısı itibariyle ayrışma zor olmaktadır. Karbon nanotüpler çok büyük en/boy oranına sahip olduklarından nanoparçacıklar arasında topaklanma çok yüksek ihtimalle mümkün olmaktadır. Bunun haricinde karbon nanotüp yüzeyine ayrışmaya karşı kuvvetli Van Der Waas kuvvetleri etki etmektedir. En bilinen ve kullanılan CNT/saf su hazırlama metodlarının başında uygun yüzey aktif madde ekleme ve sonrasında ultrasonikatöre tabi tutma gelmektedir.

2.2 Nanosıvıların Isıl Geçirgenlik Değerleri

Akışkanlara ısıl geçirgenliği yüksek farklı malzeme ilavesiyle ısıl geçirgenliğin artırılması ile ilgili ilk çalışma Maxwell (1881) tarafından milimetre veya mikrometre ölçeğinde süspansiyonlar kullanarak yapılmıştır. Fakat bu süspansiyonlar ısıl geçirgenliği artırmakla birlikte düşük süspansiyon stabilitesi, kanal tıkanıklığı, boru hatlarındaki basınç düşüklüğü ve erozyonu gibi problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu süspansiyonlar nispeten daha iyi ısıl performans göstermesine rağmen pratikte

konvansiyonel ısı geçişi akışkanları yerine saydığımız problemlerden dolayı kullanılamamıştır.

Isıl geçirgenlik artışının sebeplerini izah etmek için çok önemli teorik çalışmalar yapılmıştır (Kakac ve Pramuanjaroenkij, 2009). Belirlenen sebepler, parçacıkların Brownian hareketi, sıvı-katı arasındaki moleküler seviye katmanı, nanoparçacıkların kümelenme etkisi olarak sıralanabilir. Daha nceki çalışmalara bakıldığında, performansın çeşitli parametrelere bağlı olduğu görülmektedir (Xuan ve Li, 2000) . Bu parametreler arasında; parçacık malzemesi, parçacık boyutu, parçacık kümelenmesi, süspansiyonun pH değeri, süspansiyonun sıcaklık değeri gibi parametreler sayılabilir.

Maxwell (1881), yaptığı çalışmalar neticesinde iki komponentli ısıl geçirgenlik modelini aşağıdaki şekilde formülize etmiştir :

$$\frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)(k_f-k_p)\phi}{k_p+(n-1)k_f+(k_f-k_p)\phi} \quad (2.1)$$

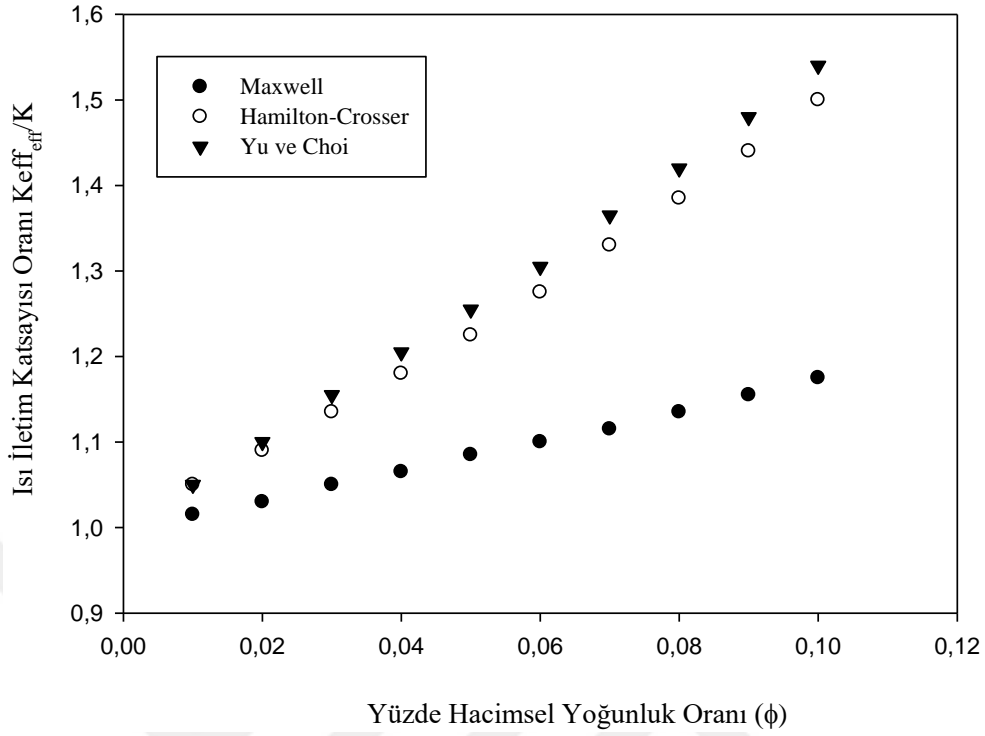
Maxwell (1881)'in çalışmalarının ardından bu süspansiyonların ısıl geçirgenliklerinin hesaplanmasında çok önemli teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları Hamilton ve Crosser (1962) ile Wasp vd. (1999) modelleridir

$$k_{eff} = \frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)(k_f-k_p)\phi}{k_p+(n-1)k_f+(k_f-k_p)\phi} \quad \text{Hamilton ve Crosser (1962)} \quad (2.2)$$

$$\frac{k_p+2k_f+2(k_p-k_f)\phi}{k_p+2k_f-(k_p-k_f)\phi} \quad \text{Wasp Modeli (1999)} \quad (2.3)$$

Bruggeman (1935) yaptığı çalışmalarda rastgele dağılım gösteren parçacıklar için bir model önermiştir. İkili küresel yapıdaki karşımlar için önerdiği model denklem 2.4'de verilmiştir. Bu model, küresel parçacıklar için sınırlama olmadan kullanılabilir. Aynı zamanda bu model, nanosıvının yoğunluğuna da sınırlama getirmeksizin kullanılabilir bir modeldir. Bruggeman modeli Maxwell modeliyle hemen hemen aynı sonuçları vermektedir.

$$\phi \left(\frac{k_p-k_{eff}}{k_p+2k_{eff}} \right) + (1-\phi) \left(\frac{k_f-k_{eff}}{k_f+2k_{eff}} \right) \quad (2.4)$$



Şekil 2.2. Bazı iyi bilinen araştırmacıların nano parçacık yüzde hacimsel yoğunluk oranlarının ısı iletim katsayısı oranının değişimini gösterir grafik

Yu ve Choi (2003) katı parçacıkların ısıl geçirgenliğinin nano katmanlara etkisini hesaplamak için, Maxwell'in denklemlerinde bazı değişiklikler yapmışlar ve geliştirdikleri modeli denklem 2.5'de yer alan şekli ile önermişlerdir:

$$k_{pe} = \frac{[2(1-\gamma)+(1+\beta)^3(1+2\gamma)\gamma]}{-(1-\gamma)+(1+\beta)^3(1+2\gamma)} k_p \quad (2.5)$$

Burada $\gamma = \frac{k_{layer}}{k_p}$ nano katmanın ısıl geçirgenliğinin parçacık ısıl geçirgenliğine oranıdır. $\beta = \frac{h}{r}$ ise nano katman kalınlığının parçacık yarıçapına oranıdır.

$$k_{eff} = \frac{k_{pe}+2k_f+2(k_{pe}-k_f)(1-\beta)^3\phi}{k_{pe}+2k_f-(k_{pe}-k_f)(1+\beta)^3\phi} k_b \quad (2.6)$$

Yu ve Choi (2004), Hamilton-Crosser (1962) modelini değiştirerek parçacık sıvı arayüz modelini kullanarak küresel olmayan parçacıklar için uygulamıştır.

$$k_{eff} = \left(1 + \frac{n\phi_{eff}A}{1-\phi_{eff}A}\right) k_b \quad (2.7)$$

Wang vd. (2003), Maxwell (1881) modelinin yerine geçen parçacık kümelerinin ısı geçirenliğine dayanan çok bileşenli fraktal bir model geliştirmişlerdir.

$$k_{eff} = \frac{(1-\phi)+3\phi \int_0^\infty k_{cl}(r)/[k_{cl}(r)+2k_f]dr}{(1-\phi)+3\phi \int_0^\infty k_f(r)/[k_{cl}(r)+2k_f]dr} k_b \quad (2.8)$$

Wang modeli 50 nm CuO parçacık süspansiyonu ve saf su karışımında $\phi < 0.5 \%$ şartlarında başarılı olmuştur.

Xue (2003), tarafından ortalama polarizasyon teorisi ve katı ve sıvı yüzey arasındaki arayüzey etkisine dayanan efektif bir ısı geçirenlik modeli geliştirilmiştir :

$$0 = 9 \left(1 - \frac{\phi}{\lambda}\right) \frac{k_{eff}-k_f}{2k_{eff}+k_f} + \frac{\phi}{\lambda} \left[\frac{k_{eff}-k_{c,x}}{k_{eff}+B_{2,x}(k_{c,x}-k_{eff})} + 4 \frac{k_{eff}-k_{c,y}}{2k_{eff}+(1-B_{2,x})(k_{c,y}-k_{eff})} \right] \quad (2.9)$$

$\lambda = \frac{abc}{(a+t)(b+t)(c+t)}$ (a,b,c) nano parçacığın farzedilen eliptik kompleks yarıçapıdır. $\beta_{2,x}$ ortalama polarizasyon teorisinden çıkarılan x simetri eksenini boyunca depolarizasyon faktörü olarak verilmiştir.

Xue ve Xu (2005), ısı geçirenlik modellerini Bruggeman modelinden elde etmişlerdir. Kompleks nanoparçacıkların ısı geçirenliği arayüz kabuklarının ısı geçirenliği olarak farzedilerek Bruggeman modelinden elde edilmiştir. Bu model aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir :

$$0 = \left(1 - \frac{\phi}{\lambda}\right) \frac{k_{eff}-k_f}{2k_{eff}+k_f B_{2,x}(k_{c,x}-k_{eff})} + \frac{\phi}{\alpha} \frac{(k_{eff}-k_2)(2k_2-k_1)-\alpha(k_1-k_2)(2k_2+k_{eff})}{(2k_{eff}+k_2)(2k_2+k_1)+2\alpha(k_1-k_2)(k_2-k_{eff})} \quad (2.10)$$

Xie vd. (2005), doğrusal ısı geçirenlik dağılımıyla nano katman arayüzünü gözönüne almış ve ısı geçirenlik modelini hesaplamak için nano katman kalınlığının etkilerini hesaplayarak bir model üretmiştir. Bu modelde nanoparçacık ölçüsü nano katman kalınlığı, hacimsel oran gibi parametreler vardır:

$$k_{eff} = \left(1 + 3\theta\phi_T + \frac{2\theta^2\phi_T^2}{1-\theta\phi_T}\right) k_b \quad (2.11)$$

Xuan vd. (2003), nanoparçacıkların rastgele hareketlerini (Brownian hareketi) ele almış ve Maxwell (1881) denklemlerini kullanarak düzenlenmiş bir denklemi elde etmişlerdir. Bu model aşağıdaki gibi ifade edilmiştir :

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\phi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\phi}, 1 + \frac{\rho_p\phi c_p}{2k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \eta}} \quad (2.12)$$

Burada Boltzman sabiti $k_b = 1.381 \times 10^{-23}$ j/K, r_c görünür hücre yarıçapıdır. Bu model aynı zamanda sıcaklığın ısıl geçirgenlik üzerindeki etkisini de ifade etmektedir.

Kumar vd. (2004), ısıl geçirgenlik artışı için sıcaklığa bağlı Stokes-Einstein bağıntılarına bağlı geniş ve kapsayıcı bir model önermişlerdir. Isıl geçirgenlik artışı Brownian hareketine bağlı olarak hesaplandığında aşağıdaki bağıntı ortaya çıkmaktadır :

$$k_{eff} = k_b + c \frac{2k_f T}{(\pi \eta d_p^2) k_f (1-\varepsilon) r_p} \frac{\varepsilon r_b}{k_b} \quad (2.13)$$

Bhattacharya vd. (2004), brownian hareket simülasyonunu kullanarak efektif ısıl geçirgenliği hesaplamak için bir teknik geliştirmişler ve aşağıdaki şekilde formülize etmişlerdir :

$$k_{eff} = k_p \phi + (1 - \phi) k_b \quad (2.14)$$

Koo ve Kleinstreuer (2005), statik ve Brownian hareketini birleştirerek yeni bir model önermiştir :

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownian}$$

$$k_{brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_p c_p \sqrt{\frac{K T}{\rho_p D} \frac{f(T, \phi)}{k_f}} \quad (2.15)$$

Bu model statik model ile Brownian modelin birleşimi şeklinde düşünülerek oluşturulmuş bir modeldir.

Çizelge 2.1. Nanosivılar için kullanılan ısıl geçirgenlik modelleri

Araştırmacı	Denklem
Maxwell (1881)	$\frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi}$
Hamilton ve Crosser (1962)	$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)(k_f - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_f + (k_f - k_p)\phi}$
Wasp (1999)	$\frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\phi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\phi}$
Bruggeman (1935)	$\phi \left(\frac{k_p - k_{eff}}{k_p + 2k_{eff}} \right) + (1 - \phi) \left(\frac{k_f - k_{eff}}{k_f + 2k_{eff}} \right) = 0$
Yu ve Choi (2003)	$\frac{k_{pe} + 2k_f + 2(k_{pe} - k_f)(1 - \beta)^3\phi}{k_{pe} + 2k_f - (k_{pe} - k_f)(1 + \beta)^3\phi}, 1 + \frac{n\phi_{eff}A}{1 - \phi_{eff}A}$
Wang vd. (1999)	$k_{eff} = \frac{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^\infty k_{cl}(r)/[k_{cl}(r) + 2k_f]dr}{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^\infty k_f(r)/[k_{cl}(r) + 2k_f]dr} k_b$
Xue (2003)	$0 = 9 \left(1 - \frac{\phi}{\lambda} \right) \frac{k_{eff} - k_f}{2k_{eff} + k_f} + \frac{\phi}{\lambda} \left[\frac{k_{eff} - k_{c,x}}{k_{eff} + B_{2,x}(k_{c,x} - k_{eff})} + 4 \frac{k_{eff} - k_{c,y}}{2k_{eff} + (1 - B_{2,x})(k_{c,y} - k_{eff})} \right]$
Xue ve Xu (2005)	$0 = \left(1 - \frac{\phi}{\lambda} \right) \frac{k_{eff} - k_f}{2k_{eff} + k_f B_{2,x}(k_{c,x} - k_{eff})} + \frac{\phi}{\alpha} \frac{(k_{eff} - k_2)(2k_2 - k_1) - \alpha(k_1 - k_2)(2k_2 + k_{eff})}{(2k_{eff} + k_2)(2k_2 + k_1) + 2\alpha(k_1 - k_2)(k_2 - k_{eff})}$
Xie vd. (2005)	$1 + 3\theta\phi_T + \frac{2\theta^2\phi_T^2}{1 - \theta\phi_T}$
Xuan vd. (2003)	$\frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\phi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\phi}, 1 + \frac{\rho_p\phi c_p}{2k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \eta}}$
Kumar vd. (2004)	$k_{eff} = k_b + c \frac{2k_f T}{(\pi\eta d_p^2) k_f (1 - \epsilon)r_p} \epsilon r_b k_b$
Bhattacharya vd. (2004)	$k_{eff} = k_p\phi + (1 - \phi)k_b$
Koo ve Kleinstreuer (2005)	$k_{eff} = k_{eff,Maxwell}k_b + 5x10^4\beta\phi\rho_p c_p \sqrt{\frac{K T f(T, \phi)}{\rho_p D k_f}}$

2.3 Nanosıvıların Isıl Geçirgenlik Ölçüm Metodları

Katı ve akışkan malzemelerin ısı geçirgenliğinin ölçülmesiyle ilgili çeşitli metotlar vardır. Nanosıvıların ısı geçirgenliğinin ölçümünde en çok kullanılan metot geçiş sıcak tel ölçüm metodu olarak bilinen metottur. Geçiş sıcak tel metodunun en büyük avantajı, nanosıvının doğal taşınımıyla ısı geçişine fırsat vermeyecek hızda ölçüm yaparak hataları büyük miktarda azaltıyor olmasıdır (Guo vd., 2018).

Aslında akışkanların ısı geçirgenliğinin ölçülmesinde en büyük problem akışkana bir ısı verildiğinde hemen doğal taşınım haline geçiyor olmasıdır. Bu durum sıvı malzemelerin ölçümünü oldukça zorlaştırmaktadır. Metot, ince bir telin uzun ve ince bir test sıvısına daldırılması ile başlamaktadır. İnce tel termometre olmadan hemen önce bir ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu metotta ince tel malzemesi olarak platin tel tercih edilmektedir. Platin telin tercih edilmesindeki en önemli sebep, platinin direnç ve geniş sıcaklık aralığı bağıntısının iyi bilinmesidir. Denklem (2.16), sonsuz bir hat üstündeki ısı kaynağının sonsuz bir ortamdaki matematiksel ifadesini ortaya koymaktadır (Guo vd., 2018).

$$T(t) - T_{ref} = \frac{\dot{q}}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2 e} t\right) \quad (2.16)$$

Burada $T(t)$, t zamanındaki telin sıcaklığını T_{ref} hücre sıcaklığını, r telin yarıçapını, \dot{q} uygulanan elektrik gücünü, k sıvının ısı geçirgenliğini, α sıvının ısı yayılımını, e euler katsayısını ifade etmektedir. Bu denklemde $T(t)$ ve $\ln(t)$ arasında doğrusal bir bağıntı var olduğu görülmektedir. Aradaki eğim malzemenin ısı geçirgenliğini vermektedir. Farklı zamanlarda elde edilmiş iki sıcaklık değeri ile denklem (2.17)'ye uygulanabilir.

$$k = \frac{\dot{q}}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2.17)$$

Isıl geçirgenlik değerinin ölçümü nanosıvıya daldırılmış vaziyette olan platin malzemeden yapılmış telden iki farklı zamanda değişen voltajla alınan iki farklı sıcaklık değeri ile yapılabilir.

Diğer bir ısı geçirgenlik ölçüm metodu ise kararlı hal ölçüm metodudur (Neindre vd., 2018). Bu metotta ölçümü yapılacak sıvının içerisinde karşılıklı olarak yerleştirilmiş

paralel iki levha veya dairesel iç içe geçmiş boru mevcuttur. Elektriksel güç uygulanan paralel levhalara kararlı hale gelinceye kadar voltaj uygulanır. Isıl geçirgenlik değeri paralel levhaların sıcaklıkları ölçülerek Fourier Kanunu ile hesaplanabilir. Tek boyutlu paralel levha metoduna bir örnek Wang vd. (1999) tarafından kullanılmıştır. Bu metotta iki paralel bakır levha örnek sıvının içerisine daldırılmıştır. Bu iki bakır levha cam ayraçlar ile ayrılmıştır. Isı üst bakır levhadan alt bakır levhaya akacak şekilde ayarlanmıştır. Birkaç ısıtıcı da bakır plakaların sıcaklıklarını sabit tutmak için alüminyum hücrelerin ısıtılmasında kullanılmıştır. Bu ısıtmanın en büyük amacı, taşınım ve radyasyon ile olacak ısı geçişini önlemektir. Ana ısıtıcıdan sağlanan tüm ısı alt plakaya akmaktadır. Isıl çiftler bakır plakaların içerisine bitişik paralel levhaların sıcaklığını ölçmek için yerleştirilmiştir. Böylece sıvının ısıl geçirgenliği Fourier Kanununa göre hesaplanabilir. Kararlı hal ısıl geçirgenlik ölçme metodunun zorluğu ise üst plakanın istenmeyen taşınım ve radyasyonla ısı geçişinin gerçekleşiyor olmasıdır. Buna ilaveten buharlaşma ile kaybedilebilecek ısıda hata olarak karşımıza çıkabilir.

Sıcak tel metodu ile elektrik geçirgen sıvıların ısıl geçirgenliğinin ölçülmesindeki dezavantaj, sıvının içerisine daldırılmış vaziyette olan sıcak tele voltaj verildiğinde telden gelen akımın sıvının içerisinde akması ve ölçüm hassasiyetine bu akımların güçten dolayı engel olmasıdır. Nanosıvılar, elektriksel geçirgenliğe sahip sıvılar olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte nano parçacıklar kutuplaşmadan dolayı sıcak tele yapışabilir. Bundan dolayı elektriksel olarak yalıtkan teller, sıvıların ısıl geçirgenliğinin ölçülmesinde kullanılabilir.

Durağan nanosıvıların ısıl geçirgenliğini ölçmede birkaç metot vardır. Genellikle nanosıvıların ısıl geçirgenliği, parçacık hacimsel yoğunluğunun artmasıyla doğrusal olarak artmaktadır (Xuan ve Li, 2000). Isıl geçirgenlik artışına basit yaklaşımla baktığımızda aşağıdaki bağıntı elde edilmektedir :

$$k_{nano} = k_{bf}(1 + k_{cond}\phi) \quad (2.18)$$

Bu bağıntıda k_{nano} nano sıvının ısıl geçirgenliğini, k_{bf} temel sıvıyı, ϕ parçacık hacimsel yoğunluğunukonsantrasyonu, α_{cond} ise gelişim faktörünü ifade etmektedir. Gelişim faktörü α_{conv} α_{visc} taşınım ve radyasyonla ısı geçişi katsayısı ve viskozite için ayrı ayrı bağıntı (2.19) ve (2.20) ile ifade edilebilir (Kaka ve Pramuanjaroenkij, 2009).

$$h_{nano} = h_{bf}(1 + \alpha_{conv}\emptyset) \quad (2.19)$$

$$\mu_{nano} = \mu_{bf}(1 + \alpha_{visc}\emptyset) \quad (2.20)$$

Burada h_{nano} taşınım ile ısı geçişi katsayısını h_{bf} ise temel sıvının taşınım ısı geçişi katsayısını ifade etmektedir. Aynı şekilde μ_{nano} nanosıvının viskozitesi, μ_{bf} temel sıvının viskozitesidir. Bundan dolayı gelişim faktörü birim hacimsel yoğunluk başına özellik artışı ifade etmektedir.

Çizelge 2.2. nanosıvı deneylerinde ölçülmüş k (ısı iletim katsayısı, W/mK) değerlerini göstermektedir. Al_2O_3 nanoparçacıkları içeren α_{cond} nanosıvı değerleri parçacık malzemeleri, parçacık ölçüleri, temel akışkan malzemeleri, ölçüm teknikleri ve ölçülen k değerleri özetlenmiştir. STM (Sıcak Tel Metodu) , KHM (Kararlı Hal Metodu)

Çizelge 2.2. Nanosıvıların ısı iletim katsayıları ve ölçüm metodları

Parçacık Malzemesi	Parçacık Ölçüsü (nm)	Temel Akışkan Malzemesi	k (W/mK)	Ölçüm Tekniği	Referanslar
Al_2O_3	33	Su	6	STM	(Eastman vd., 1996)
Al_2O_3	28	Su	4	KHM	(Wang vd., 1999)
Al_2O_3	38,4	Su	2,5	3w metodu	(Das vd., 2003)
Al_2O_3	36	Su	6	KHM	Li ve Peterson (2007)
Al_2O_3	47	Su	5	KHM	Li ve Peterson
Al_2O_3	20	Su	1,3	STM	(Zang vd., 2006)
Al_2O_3	11	Su	12	STM	(Chon vd.,2005)
Al_2O_3	47	Su	6	STM	(Chon vd.,2005)
Al_2O_3	150	Su	3	STM	(Chon vd.,2005)
Al_2O_3	60,4	Su	1,5	STM	(Xie
Al_2O_3	Verilmemiş	Su	4,6	STM	(Xie vd., 2005)
Al_2O_3	28	Etilen Glikol	3,4	KHM	(Wang vd., 1999)
Al_2O_3	26	Etilen Glikol	3,4	STM	(Xie vd., 2005)
Al_2O_3	60,4	Etilen Glikol	6	STM	(Xie vd., 2005)
Al_2O_3	302	Etilen Glikol	5	STM	(Xie vd., 2005)
Al_2O_3	Verilmemiş	Etilen Glikol	6	STM	(Xie vd., 2003)
Al_2O_3	28	Pompa Sıvısı	2,4	KHM	(Wang vd., 1999)

2.4 Mikrokanallar

1981 yılında ilk olarak silikon çip içinde üretilen su soğutmalı mikrokanallı ısı giderici kullanılmıştır (Tuckerman ve Pease, 1981). Denejde, 300 µm'lik bir derinlik ve 50 mikron genişliğinde bir dizi mikrokanal, silikon plaka içinde oyularak elde edilmiş ve bir pres kapak plakası anotsal olarak kanalların üzerinden bağlanmıştır. Isı, bir ince film direnç tarafından temin edilmiş ve su sıcaklığı ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Maksimum yüzey sıcaklığı artışı giriş suyu sıcaklığının üzerinde, 71 K'de tutulurken 790 W/cm^2 ısı akışının uzaklaştırılabileceği kanıtlanmıştır. Bu çalışmadan bu yana, birçok araştırmacı, mikrokanal ısı değiştiricileri üzerinde analitik, sayısal ve deneysel olarak çalışmıştır. Araştırmaların çoğu, klasik kanat analiz yöntemine dayanan, kanal boyutlarının en uygun şekilde getirildiği projeler üzerine odaklanmıştır. Bir mikrokanal hidrolik çapı küçüldükçe, ısı geçişi katsayısının artmakta olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kanal yüksekliği, en boy oranı ve mikrokanal geometrisinin, tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Mikrokanalların soğutma performansını araştırmak için, 25 mm x 25 mm'lik bir entegre devrede kanal geometrisini optimize etmek için ısı geçişi ve basınç düşümü analiz etmiştir (Kandlikar ve Upadhye, 2005). Isı ve basınç düşümü değerlendirildiğinde, dar ve derin kanalların geniş ve sığ kanallardan daha iyi olduğu ortaya koyulmuştur. Çalışmalar sabit sıcaklık, sabit ısı akısı (100 W/cm^2) ve kanal kalınlığı 150 µm ve 250 µm, kanal derinliği optimal 250 µm arasında olan rejimde gerçekleştirilmiştir. Kanal kalınlığının bu aralığı geçen değerlerinde basınç düşümü artmıştır. Ancak daha çok artan kanal derinliklerinde basınç düşümü önemli ölçüde artmamıştır (Salman vd., 2013).

Literatürde birçok araştırmacı deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Aşağıdaki bölümlerde yapılan bu çalışmalarla ilgili literatür çalışması yer almaktadır.

2.4.1 Mikrokanallarda deneysel çalışmalar

Mikrokanallarda tek fazlı ısı geçişi birçok araştırmacı tarafından araştırma konusu olmuştur. Bazı araştırmacılar ısı iletim katsayısının makro kanallarda mikro kanallardan farklı değerlerde gerçekleştiğini iddia etmişlerdir. Aşağıda, araştırmacıların deneysel çalışmaları açıklanmaktadır.

Jung vd. (2009), nanosivilerin sürtünme ve ısı geçişi katsayılarını deneysel olarak ölçmüştür. Bu deneylerde 170 nm çapındaki Al_2O_3 nanosiviyi malzemeyi 0.6 %, 1.2 % ve 1.8 % hacimsel yoğunluklarda kullanılmıştır. Deneylerde Reynolds sayısı 5 ile 300 aralığında test edilmiştir. % 1.8 nanoparçacık oranında nanosivinin ısı geçiş katsayısının saf suya oranla % 32 daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Nusselt sayısı ısıl geçirgenliğe dayanan Reynolds ve Prandtl sayılarıyla birlikte başarılı bir şekilde korele edilmiştir.

Bavie're vd. (2006), 700 mikrometre ve 200 mikrometre yüksekliğinde iki mikrokanal eşanjörün hidroligini nümerik ve deneysel olarak araştırmıştır. Reynolds sayısının 200-8000 aralığında değiştiği çalışmada test edilmiştir. Test sıvısı olarak $300\mu s/cm$ elektriksel geçirgenlik değerine sahip saf su kullanılmıştır. Test kısmının simetri yüzeyine tekabül eden iki boyutlu sayısal model geliştirilmiştir. Test kısmının etrafındaki havanın doğal konveksiyon ısı geçişi hesabı yapılmıştır. Mikro ölçekteki laminer akışta Nusselt sayısının düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Türbülansa geçişte basınç düşümünün gerçekleştiği gözlemlenmiş , buna ilaveten kritik Reynolds sayısının 3500-4500 arasında gerçekleşmiştir. Deneysel veriler Blasius Hidrodinamik kuralı ve Dittus Boelter ısı geçişi bağıntısından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Wu ve Cheng (2003), 13 farklı trapezoidal silisyum mikrokanalda laminer taşınım ısı geçişi ve basınç düşüşü üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Nusselt sayısının ve görünür sürtünme sabitinin değerlerinin, farklı geometrik parametrelere büyük ölçüde bağlı olduğu bulunmuştur. Laminer Nusselt sayısı ve görünür sürtünme sabiti, yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey hidrofilik özelliklerinin artmasıyla artmıştır. Bu artışlar daha büyük Reynolds sayılarında daha belirgin hale gelmiştir. Deneysel sonuçlar Nusselt sayısının düşük Reynolds sayılarında Reynolds sayısına göre neredeyse doğrusal olarak arttığını göstermektedir ($Re < 100$), ancak 100'den büyük Reynolds sayılarında yavaşça artmaktadır. 168 deneysel veri noktasına dayanarak, Nusselt sayısı için boyutsuz

korelasyonlar, farklı geometrik parametrelere, yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey hidrofilik özelliklerine sahip trapezoid mikrokanallardaki suyun akışı için görünür sürtünme sabiti elde edilmiştir. Son olarak, bu deneyde kullanılan mikro kanallar için pompalama gücü başına ve ısıya göre sıcaklık farkı değerlendirilmiştir.

Park ve Punch (2008), 106-307 μm hidrolik çaplarında tek fazlı akışta ısı geçişi ve sürtünme katsayısını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu deneylerde 69-800 arası Reynolds sayıları kullanılmıştır. Taban akışkan olarak su kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki mikrokanal üzerindeki deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı geleneksel teori için kullandıkları parametrelerin aralıklarının uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Isı geçişi oranının doğruluğunu tam olarak tahmin etmek için $Nu/(Re^{0.62}Pr^{0.33})$ ampirik korelasyonunun kullanımı önerilmiş ve deneysel aralıkta Brinkman sayısı sınırlanmıştır.

Lee vd. (2005), 194-534 μm mikrokanalda tek fazlı akışta nümerik ve deneysel araştırmalar yapmışlar ve çalışmalarında saf su kullanmışlardır. Deneysel çalışmalar esnasında Reynolds sayısı 300-3500 arasında değişmektedir. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki akış oranına bağlı olan kanal ölçüsünün azalışıyla ısı geçişi katsayısı artmıştır. Deneysel çalışmalar konvansiyonel korelasyonlara karşı mikrokanal ısı geçişi tahminlerini değerlendirmek için karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla uyumluluk göstermiştir.

Ergu vd. (2009), 3.7 mm kalınlığında ve 0.107 mm yüksekliğinde 35 mm uzunluğunda mikrokanalda basınç düşümü ve kütle geçişini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada saf su kullanılmıştır. Reynolds sayısı aralığı 100-845 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki sürtünme katsayısı değerleri teorik korelasyonlara nazaran hafifçe artmış ve bu değerler Reynolds sayısının artmasıyla da artış göstermiştir. Klasik laminer akış denklemlerinin mikrokanallardaki sürtünme katsayısı hesaplamalarında kullanılabileceği ortaya koyulmuştur.

Chiu vd. (2011), sıvı soğutmada kullanılan mikrokanal ısı değiştiricilerinin ısı geçişi performansını nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Mikrokanal yüksekliği sabit mikrokanalın çerçeve oranı 1.67-14.29, basınç düşümü 490 Pa'dan 2940 Pa'a kadar gerçekleşmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki mikrokanaldaki ortalama Reynolds sayısı

çerçeve oranının artmasıyla aynı basınç düşümünde azalmıştır. En düşük ısı direnç için çerçeve oranının mikrokanala giriş ve çıkış arasındaki basınç düşümüne bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Kanal içindeki lokal Nusselt sayısının çerçeve oranının artmasıyla azaldığı ve Nusselt sayısının değerinin kanal boyunca oluşan yüksek çerçeve oranlarında tekdüze olarak azaldığı tespit edilmiştir.

Shen vd. (2006), 300 µm ve 800 µm derinliğe sahip iki dörtgenel mikrokanalda tek fazlı akışta ısı geçişini deneysel olarak araştırmışlardır. Bağlı pürüzlülük %4-%6 arasında değişmiştir. Bu çalışmada saf su kullanılmış ve Reynolds sayısı aralığı 162-1257 olarak belirlenmiştir. Giriş sıcaklığı aralığı 30-70 °C, ısıtma gücü 140 W-450 W arasında seçilmiştir. Sonuçlara göre, yüzey pürüzlülüğü mikrokanallardaki laminer akışta büyük etki göstermiştir. Gelişmiş akış için yüksek Reynolds sayılarındaki rejimde Poiseuille sayısı geleneksel teori tahminlerinden daha yüksektir. Ayrıca Poiseuille sayısı sabitlerinden ziyade Reynolds sayısının artmasıyla artmıştır. Yerel ve ortalama Nusselt sayısı tüm akış oranlarında konvansiyonel teori tahminlerinden önemli derecede düşük çıkmıştır.

Wei ve Joshi (2007), 53 µm'den 112 µm çapa kadar olan mikrokanallar içindeki akış ve ısı geçişi üzerindeki kenar duvar profili etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlar ve mikrokanal içindeki birleşik ısı geçişi için sayısal model geliştirmişlerdir. Çalışmada, pratik elektronik uygulamalarını simüle etmek için üniform ısı akısı şartları kanal geçişinin alt bölgesi için adyabatik kabul edilmiştir. Mikrokanal için üç farklı durum göz önüne alınmıştır ki bu durumlar düzlemsel kanal, pozitif eğimli kanal ve reentrant kanallardır. Sonuçlar, hızın orta yüzeyden derine doğru azaldığını ortaya çıkarmıştır. Buna ilaveten sabit ısı akısı şartlarında ısı geçişinde azalma meydana gelmiştir. Sonuç olarak mikrokanallar için geniş çerçeve oranlarında taşınım karakteristiklerinin kanal profilleri için çok hassas olduğu tespit edilmiştir.

Garcia-Hernando vd. (2009), tek fazlı akışta mikrokanalda ısı geçişi ve sıvı akışını deneysel olarak araştırmıştır. Mikrokanallar 100x100 µm ve 200x200 µm şeklinde karakterize edilmiştir. Bu çalışmada saf su kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki kanalların küçük ölçüleri ile ilgili özel bir etki görülmemiş ve genel teoriyle uyumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten küçük kanal ölçülerinde ısı geçişi artışı gözlemlenmemiştir. Çok düşük Reynolds sayıları için sonuçlar uygun model ve

korelasyonlarla uyumsuzluklar göstermiştir. Sınır tabakanın uygunluğu ile ilgili konveksiyon katsayısı beklenenden fazla kaydedilmiştir.

Tuckerman ve Pease (1981), 1x1 cm kare silikon levha mikrokana1 ısı değiştirici imal etmişlerdir. Mikro kana1 genişliği 50 mikrometre, derinliği 302 mikrometre ve kana1 et kalınlığı 50 mikrometre ölçülerinde bir ısı değiştirici yaparak 790 W/cm^2 ısı alma kapasitesi, $71 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstünde giriş sıcaklığı ve 2.2 bar basınç kaybında bir ısı değiştirici imal edilmiştir. Tuckerman ve Pease (1981)'in yaptıkları bu çalışmadan sonra mikrokana1 ısı değiştiricileri yüksek ısı1 kapasitelerinden dolayı dikkatleri üstüne çekmiştir.

2.4.2 Mikrokanalarda sayısal çalışmalar

Yang ve Lai (2010), radyal akış tek fazlı soğutma sisteminde Alümina-su nanosıvısının cebri konveksiyon akış etkilerini sayısal olarak araştırmıştır. Çalışmada geometrik konfigürasyon olarak sınırlandırılmış radyal akış uygulanmıştır. Birbirinden açıklıkla ayrılmış iki plaka kullanılmış, alt plaka bir nozül ile birleştirilmiş ve sınır plaka görevi görmesi sağlanmıştır. Üst plakaya ise sabit ısı akısı uygulanmıştır. Sayısal simülasyonların yapıldığı şartlar; 47 nm Al_2O_3 %0 - %10 Reynolds sayısı 300-900 arası ısı akısı 2438 w/m^2 - 3900 w/m^2 , giriş sıvı sıcaklığı $T_0 = 296 \text{ K}$ olarak verilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki ısı geçişi katsayısı Reynolds sayısına ve hacim yoğunluğu artışına göre artmıştır.

Shevade ve Rahman (2007), dikdörtgen ve kare kesitli mikrokanallar için taşınım ısı geçişini sayısal olarak araştırmışlardır. Gadolinium akışkan, su ise çalışma sıvısı olarak belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki x eksenini boyunca Nusselt sayısı azalmıştır. Y eksenindeki Nusselt sayısının azalışı kana1ın orta kesitinden köşesine doğru daha fazla olmuştur. Bunun en büyük sebebi kana1 köşesindeki sürtünmeden oluşan daha düşük akışkan hızlar olarak değerlendirilmiştir. Dörtgenel kanallardaki ısı geçişi katsayısı uzun kenarlarda kısa kenarlara nazaran daha yüksek olarak ölçülmüştür. Düşük akış oranlarında bölgesel Nusselt sayısı azalmıştır. Dış sıcaklık akışkanın katı ile uzun süreli temasındaki düşük hızlarında artma göstermiştir. Reynolds sayısının artmasıyla basınç düşümü artmıştır. Nusselt sayısı kana1 ölçülerinin artışıyla artmıştır. Aynı kana1 için Reynolds sayısı Nusselt sayısının artışıyla artmıştır.

Gamrat vd. (2009), mikrokanallardaki tam gelişmiş laminer akış için kanal pürüzlülüğü zorlanmış taşınım ısı geçişi üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırmıştır. İlk olarak üç boyutlu sayısal simülasyon, akış ve mikrokanal açıklık yönlerinde tek dalga uzunluğunda genişleyen alan üzerinde hesaplamalı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin simülasyon sonuçları göstermiştir ki Poiseuille P_0 ve Nusselt sayısı (Nu) laminer rejimdeki ($Re < 2000$) hemen hemen bağımsız Reynolds sayısının bağıl pürüzlülük ile arttığını göstermiştir. Buna ilaveten pürüzlülük, mikrokanal imalatından beklenen bağıl pürüzlülük yüksekliği için gerçekleşen zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısından çok pürüzlülük faktörünü artırmıştır.

Mlcak vd. (2008), silikon bir tabla üstünde aşındırılmış paralel aynalı mikrokanal için laminer akışta saf su kullanarak ısı geçişini sayısal olarak araştırılmışlardır. Hidrolik çap $d_h = 85,6$ mm ve çerçeve oranı 50-400 arasındadır. Sonuçlar göstermiştir ki doğrusal olarak artan pürüzlülük katsayısı Reynolds sayısının 50-400 arası değerlerinde artan hidrolik giriş uzunluğunun sonucu olarak gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri için 0,1 çerçeve oranı yaklaşımı için lineer bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Mikrokanalın giriş ve çıkış ısı direnci 0,1 çerçeve oranı yaklaşımında azalma göstermiş, 0,5 çerçeve oranından daha geniş çerçeve oranları için aynı hidrolik çapta ısı direnci ve pürüzlülük katsayısı değerleri için azalma göstermiştir.

Chen vd. (2009), dairesel olmayan mikrokanal içindeki akışkan akışı ve ısı geçişini sayısal olarak araştırmıştır. Soğutma suyu olarak saf su kullanılmıştır. Geometri olarak üç açılı, dörtgenel ve trapezoidal kanal genişlikleri 120 μm , 40 μm ve 158 μm boyutlarında kanal şekilleri kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki ortalama Nusselt sayısı giriş kısmında daha büyük değerdedir fakat tam gelişmiş değere hızlı bir şekilde yaklaşmıştır. Sıvı ve katı sıcaklıkları akış yönü boyunca artma göstermiştir. Mikrokanal içindeki Poiseuille sayısı kanal kesitinde hemen hemen sabit kalıp mikrokanal boyutlarında tam gelişmiş laminer akış için bağımsız olmuştur ki mikrokanal içindeki akışla aynıdır.

Mohammed vd. (2011), mikrokanal şekillerinin (zig-zag, bükümlü ve dalgalı) ısı ve hidrolik performansını sayısal olarak araştırmıştır. Bu çalışmada tüm mikrokanal şekilleri için Reynolds sayı aralığı 100-1000 aralığında alınmıştır. Bu çalışmada dört farklı nanosıvı kullanılmıştır ki bunlar Al_2O_3 , SiO_2 , Ag ve TiO_2 nanoparçacıklar ile

hazırlanmış nanosıvılardır. Nanotanecikler 2%, 5% ve 10% hacimsel kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki nano tanecik hacimsel oranı arttıkça soğutma akışkanı ortalama sıcaklığı artmış taşınım ile ısı geçişi oranı azalmıştır. Buna ilaveten alüminyum oksit nanosıvı diğer akışkanlara göre daha geniş ısı geçişi katsayısına sahiptir. Nanoparçacıkların varlığı basınç düşümünü artırdığı gözlemlenmiştir. En düşük basınç düşümü Ag taneciklerinin kullanıldığı nanosıvı durumunda olduğu gözlemlenmiştir.

Kosar (2010), mikrokanal taban kalınlığı ve malzeme özelliklerinin ısı geçişi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Mikrokanal ölçüsü olarak 200 µm-1000 µm'ye kanal derinliği aralığına kadar değişmekte ve polyamid, silika cam, kuartz, çelik, silikon ve bakır malzeme kullanılmıştır. Mikrokanal ısı eşanjöründe laminar ve türbülanslı Reynolds sayılarında suyun sıcaklık, basınç ve hız dağılımı bulunmuştur. Sonuçlar göstermiştir ki teorik tahminler ve model sonuçları arasında $Re < 976$ ve sabit ısı akısı koşulunda çok iyi bir uyum gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.3. Mikrokanallarda deneysel çalışmalar

Araştırmacı	N	W_{ch}	H_{ch}	W_{fin}	L	D (çap)	d_h	Eşanjör Malzemesi	Akışkan	Debi	Isı Akısı	Re sayısı	Giriş Sıcaklığı	Konsantrasyon	Parçacık Büyüklüğü (nm)	Faz	Taşınım kat. artış
Jung vd. (2009)		50 μ m	50mm	50 μ m	33mm		50 μ m	Aluminyum	Al ₂ O ₃ +Su+EG			20-280		0,6-1,2-1,8 %	27-56nm	Tek Faz	% 32
Bavie're vd. (2006)			200-700 μ m	700 μ m	82				Saf Su		180 W	200-800				Tek Faz	
Wu ve Cheng (2003)		$W_{t=15}$ 8,12-1473,08*10 ⁻⁶ $W_b=6$ 2,30-	56,22-56,49*10 ⁻⁶ m				1,88		Saf Su			Re<100				Tek Faz	
Park ve Punc (2008)	16-100	500 μ m	300 μ m	150 μ m	10 mm		106-307 μ m	Silikon plaka	Saf Su	50-250 ml/dak		69-800				Tek Faz	
Lee vd. (2005)						19-4-			Saf Su			3000<Re<3500				Tek Faz	

Çizelge 2.3. (Devam) Mikrokanallarda deneysel çalışmalar.

Ergu vd. (2009)		3,7 mm	0,107 mm		35				Saf Su			100<Re<845					Tek Faz
Chiu vd. (2011)			2 mm		24 mm							50<Re<1000					
Shen vd. (2006)			300 µm	800 µm	50 mm				Saf Su	20-1200	140-450 W	162<Re<1257	30-50-70 °C				Tek Faz
Wei ve Joshi (2007)		35-103 µm	103 µm	123 µm		53-112			Saf Su								Tek Faz
Garcia-Hernando vd. (2009)	100		100 µm	100 µm				Paslanmaz Çelik	Saf Su			0<Re<1200					Tek Faz
Tuckerman ve Pease (1981)		50 µm	302 µm	50 µm	1 cm	1cm		Silikon levha			790 w/cm ²						

Çizelge 2.4. Mikrokanallarda sayısal çalışmalar.

Araştırmacı	N	W_{ch}	H_{ch}	W_{fin}	L	D (çap)	D_h	Eşanjör Malzemesi	Akışkan	Çerçeve oranı	Debi	Isı Akısı	Re sayısı	Giriş Sıcaklığı	Hacimsel % Yoğunluk	Parçacık Büyüklüğü	Faz
Yang ve Lai (2010)	-	47,6-86,6	86,6-476	-	10 mm	-	-	-	Al ₂ O ₃ +Su	-	-	-	300<Re<900	23 °C	-	47 nm	Tek Faz
Shevade ve Rahman 2007)	-	-	-	-	-	-	-	Gadalinium	-	-	-	-	60<Re<3450	-	-	-	-
Gamrat vd. (2009)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Re<2000	-	-	-	Tek Faz
Mlcak (2008)	-	-	-	-	-	85,6 µm	-	Silikon	Saf Su	50-400	-	90 w/cm ²	-	-	-	-	Tek Faz
Chen (2009)	-	40 µm	158 µm	-	120 µm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mohammed vd.(2011)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100<Re<1000	-	2-5-10 %	-	-
Kosar (2010)	-	-	200 µm	-	1000 µm	-	-	Silika cam , çelik ve silikon	-	-	-	-	Re<976	-	-	-	-

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Nanosıvılar nanometre boyutundaki tanecik malzemeleri (nanoparçacıklar, nanofiberler, nanotüpler, nanoteller, nano çubuklar, nano tabakalar veya damlacıklar) sıvı içinde dağıtarak oluşturulan yeni bir akışkan sınıfıdır. Başka bir deyişle, nanosıvılar nanotanecikler içeren nano ölçekli kolloidal süspansiyonlardır. Bunlar, bir fazda (sıvı faz) bir fazlı (katı faz) iki fazlı sistemlerdir. Nanosıvılar, termal iletkenlik, termal difüzyon, viskozite ve taşınım ile ısı geçişi katsayıları gibi yağ veya su gibi baz sıvılara kıyasla daha fazla termofiziksel özelliklere sahip oldukları bulunmuştur. Nanosıvıların hazırlanmasında en önemli konulardan biri nanosıvıların stabilitesidir. Yapılan çalışmalarda karşılaşılan en önemli konu nano parçacık çökmesi, nano taneciklerin yan yana gelerek topaklanması ve çökmesidir. Bu problemin giderilmesi için nanosıvılar ultrasonikatorede sonikasyona tabi tutulmaktadırlar.

3.1 Nanosıvının Hazırlanması

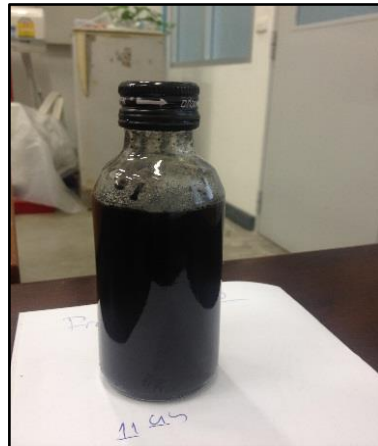
Bu çalışmada grafit/saf su karışımı 0.5%, 1.0%, 1.5% ve 2.0 % hacimsel oranlarında test edilmiştir. Bu karışımlar hacimsel olarak nanoparçacık ve su karışımı ile hazırlanmıştır. Grafit nanoparçacık boyutları 6-20 nm boyutlarındadır. Nanosıvıları istenilen hacimsel yoğunlukta hazırlamak için öncelikle hacimsel oranlar tespit edilmektedir. Hacimsel oranlara tekabül eden ağırlıklar bulunarak hassas terazide (Fotoğraf 3.1.) parçacık ve akışkan ağırlıkları karıştırılarak hazırlanmıştır. Nanoparçacıkların baz sıvı içerisinde stabilitesini sağlamak ve topaklanarak çökmesini önlemek için 40 KHz 800 Watt gücünde bir ultrasonikatore (Fotoğraf 3.2.) cihaz kullanılmıştır. Aynı zamanda nanosıvılara CTAB (Cetyl Trimethylammonium Bromide) Nanografite eşdeğer hacimsel miktarda yüzey aktif madde eklenmiştir. Aynı ayrı şişelerde örnek malzemeler 2 saat sonikasyona tabi tutulmuştur. Çökme olup olmadığı 2 saat sonra gözlemlenmiştir.



Fotoğraf 3.1. Farklı hacimsel oranlarda nanosıvı hazırlamada kullanılan hassas terazi



Fotoğraf 3.2. Nanosıvının hazırlanmasında kullanılan ultrasonik sonikatör



Fotoğraf 3.3. Sonikatörde 2 saat sonikasyona tabi tutulmuş ve 2 saat bekletilmiş nanosıvı



Fotoğraf 3.4. 40 Khz 600 W Ultrasonik Sonikatör Jeneratörü

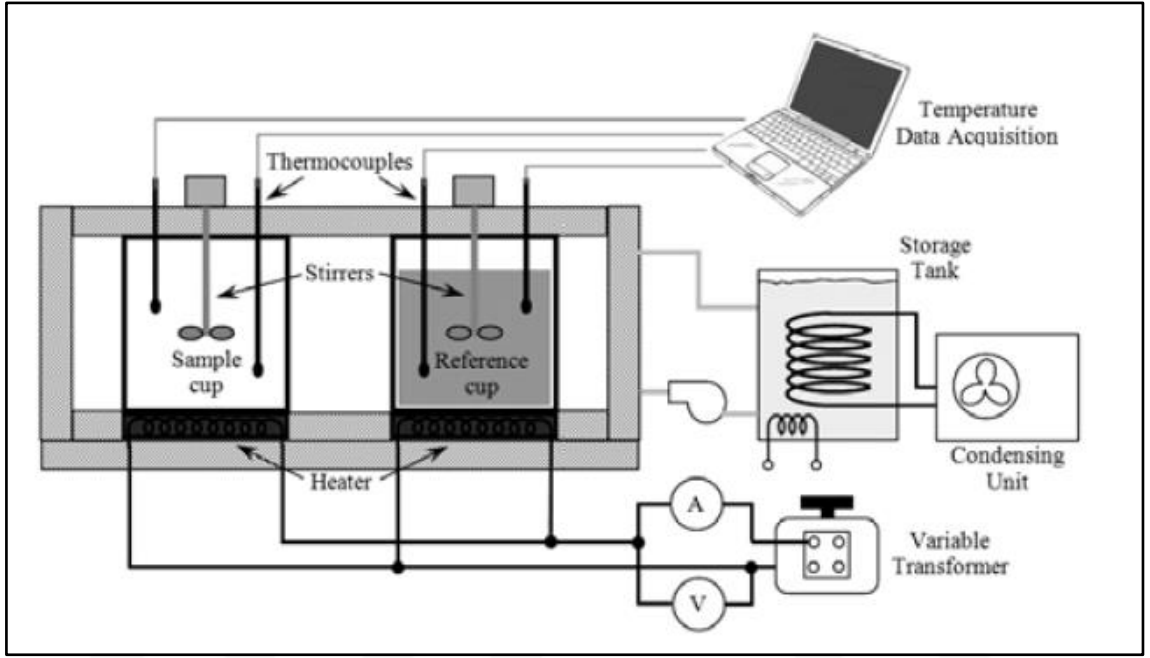
3.2 Nanosıvının Termofiziksel Özelliklerinin Deneysel Yolla Bulunması

Nanosıvıların en önemli termofiziksel özellikleri viskozite, ısı iletim katsayısı ve ısı kapasitesidir. Nanosıvıların termofiziksel özellikleri parçacıkların hacim konsantrasyonuna, boyutlarına ve malzeme çeşidine bağlıdır. Nano parçacık büyüklüğünün azaltılmasıyla viskozite artar ve termal iletkenlik artar (Murshed vd., 2008). Bu davranışın nedenleri tartışıldı. Isı geçişi katsayısı nanoakışkan akış modu (laminer veya türbülanslı) ile belirlenir. Nanoakışkanların bir soğutucu olarak kullanılması, ısı transfer katsayısının büyüklüğünü önemli ölçüde etkiler. Laminer akışta, nanoakışkanların ısı geçişi katsayısı, tüm durumlarda baz sıvılarınkinden çok daha fazladır. % 2 -nano-akışkanın, suya kıyasla iki kattan fazla ısı alışverişini yoğunlaştırdığı gösterilmiştir. Nanoakışkanların türbülanslı modda kullanılmasının etkisi sadece nano-akışkanın termal iletkenliğine değil, aynı zamanda viskozitesine de bağlıdır.

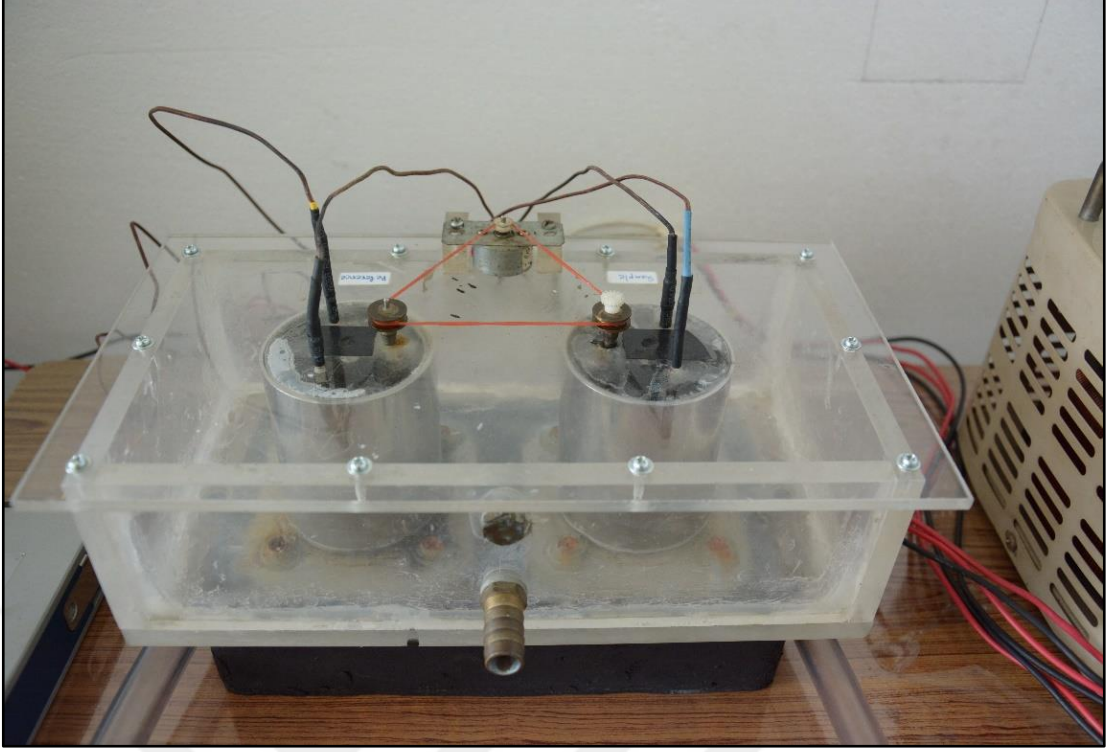
3.2.1 Nanosıvının ısıl kapasitesinin deneysel ölçümü

Isıl kapasite ölçümünde karşılaştırmalı tip kalorimetre kullanılmıştır. Malzemenin ısıl kapasite değerini bulmak için yeni geliştirilmiştir (Yiamsawasd vd., 2012). Ölçüm şekil (3.1)'te görülen diferansiyel ısı analiz tekniğine dayanmaktadır. Sıcaklık farklılıkları yüksek hassasiyetli sıcaklık değişimlerinden elde edilir. İki farklı kap sıcaklık kontrollü bir dörtgenel bir tankın içine yerleştirilmiştir. Isıtıcı sargıları özel olarak sabit ısı akısı verecek şekilde tasarlanmıştır. Isı akısı (Variable Transformer) ile kontrollü şekilde

artırılıp azaltılabilmektedir. Her kapta nano parçacıkların kabın altında çökmesini önlemek ve ısının dağılımının kaba dengeli biçimde dağıtılması için birer kontrollü devir pervanesi yerleştirilmiştir. Her iki kapta, biri kabın alt tarafına yakın diğeri kabın üst tarafında yakın iki adet T tipi ısılıçift kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri bu şekilde saniyede 3 kez hassas şekilde kaydedilmektedir.

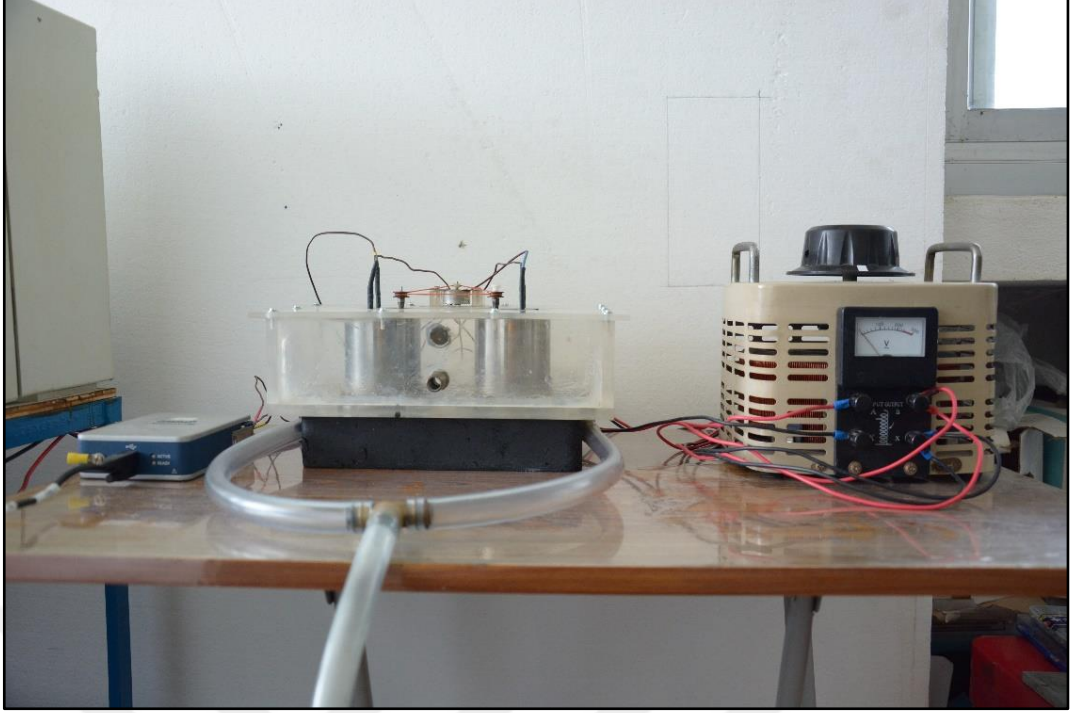


Şekil 3.1. Isıl kapasitenin diferansiyel ısıl analiz tekniği deney şeması



Fotoğraf 3.5. Nanosıvının ısı kapasitesini ölçen deney düzeneği fotoğrafı

Deneyler eşit hacimdeki nonasıvının ve saf suyun kaplara eşit miktarlarda konulmasıyla başlar. Eşit miktardaki malzeme hassas terazide ölçülerek kaplara yerleştirilir. Kapların kapağı kapatılarak sıcaklık ölçerleri ile birlikte kapatılır. Termokupl ve pervane hızları ayarlanır ve kontrol edilir. Soğutma suyu deney kutusunun içerisine doldurularak referans ve örnek kaplardaki sıcaklığın eşit olması ayarlanır (şekil 3.1.) . İstenilen başlama sıcaklığına erişildiğinde soğutma suyu deney kutusundan kazana akıtılarak sıcaklığın sabit kalması sağlanır. Bu işlem kapların ve içindeki sıvıların başlangıç sıcaklıklarının eşitlenmesini sağlayacaktır. İstenilen başlama sıcaklığına erişildiğinde soğutma suyu deney kutusundan soğutma kazanına akıtılır ve kapları ısıtan rezistans ısıtıcı devreye alınarak kaplar ısıtılmaya başlanır. Isıtılan kaplardaki malzemelerin sıcaklık değerleri başlangıç ve son değerlerinde ölçülerek veri kaydedici ve Lab. View programındaki arayüz ile kaydedilir. Artan sıcaklık değeri ölçülecek son sıcaklığa geldiğinde ısıtıcı rezistans kapatılarak sıcaklık kaydı sona erdirilir.



Fotoğraf 3.6. Isıl kapasite Deneý düzenegi ve Isıtıcı plakaları gösterir Varyak cihazı

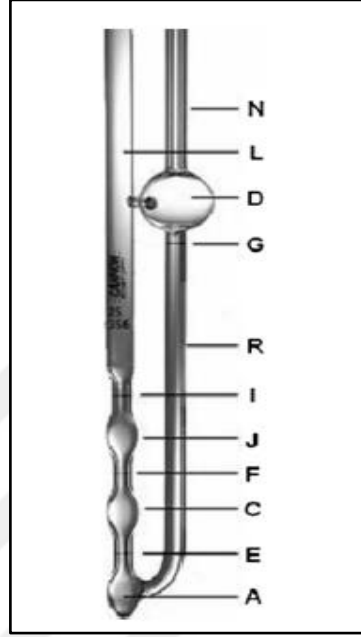
3.2.2 Nanosıvının viskozitesinin deneysel ölçümü

Viskozite akışkan malzemler için , son derece önem taşıyan bir termofiziksel parametredir. Viskoziteyi akışkanların akmaya karşı gösterdikleri iç direnci olarak tanımlanmaktadır. Viskozite çeşitli mühendislik uygulamalarındaki pompalama gücü, borulardaki akış hareketlerindeki zorluklar gibi etkileri bakımından çok önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Nano parçacık ilavesiyle elde edilen nanosıvıların viskozitesinin sıvıların viskozitesini artırdığı bilinen bir gerçektir. Nanosıvıların viskozitesi nano parçacık yoğunluğunun artışı ve nano parçacık ölçüsü ile değiştiği bilinmektedir (Singh vd., 2015).

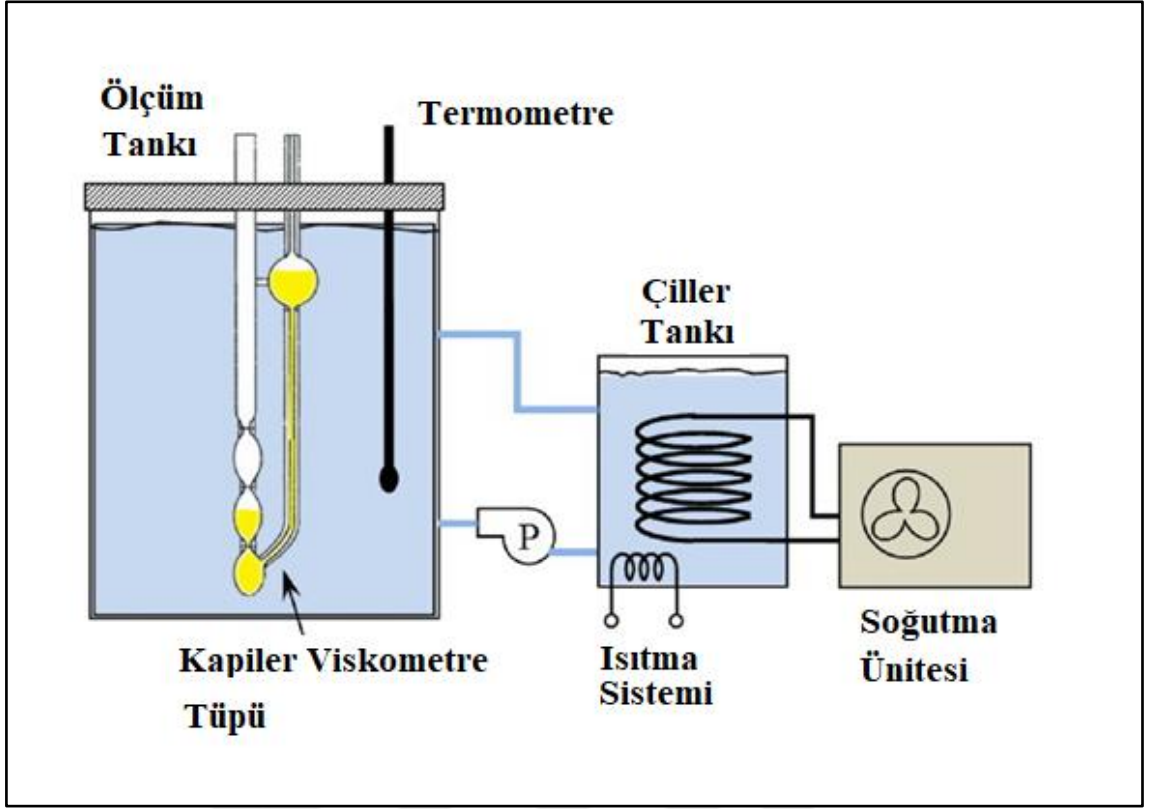
Nanosıvıların viskozitesini ölçmek için kapiler viskozimetre (cannon instruments) kullanılmıştır. Sistem 0,75 mm çapında kapiler vizkometre ile 1,6-8 cSt arasındaki viskozite değerlerini ölçmektedir.

Kapiler viskozimetre tüpü (Şekil 3.2.) sıvıların viskozitelerini ölçen bir cihazdır. Bu kapiler tüp ve içerisindeki malzeme sıcaklık kontrollü su tankına daldırılmış vaziyette Şekil 4'teki gibi asılı tutularak içerisindeki malzeme sıcaklığının ölçüm tank sıcaklığıyla

eşitlenmesi sağlanmaktadır. Soğutucu ve ısıtıcı ünitesi depolama tankı sıcaklığının istenilen değerlere getirilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada viskozite ölçüm sıcaklık değerleri 20-30-40-50 ve 60 °C derecelerdir. Bu sıcaklıklarda 0,1 °C hassasiyetle sıcaklığı sabit tutmak için ölçüm tankına daldırılmış referans termometre kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Kapiler Viskometre Tüpü



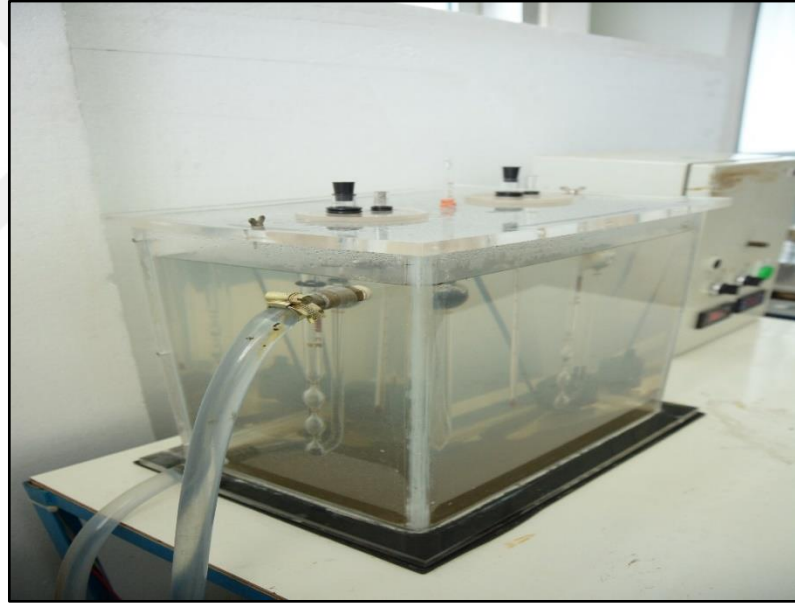
Şekil 3.3. Deneysel viskozite ölçüm sistemi

Ölçüm tankındaki sıcaklığı istenilen değere ayarlamak için, ölçüm tankına daldırılmış vaziyette olan referans termometre Şekil 3.3. kullanılır. Ölçüm tankındaki sıcaklık değeri istenilen sıcaklık değerinden düşük ise, depolama tankı istenilen sıcaklık değerinin üzerine çıkarılır. Daha sonra görülen depolama tankından ölçüm tankına Şekil 3.3. sıcaklık istenilen sıcaklığa gelmesi için çiller kullanılmaktadır. Çiller ile istenilen sıcaklık elde edildiğinde pompa durdurularak akış kesilir ve vanalar kapatılır. Ölçüm tankının içerisinde suyu uniform şekilde dağıtan bir su altı pompası mevcuttur. Bu pompa ölçüm tankının sıcaklığının tankın her hacimsel bölgesinde eşit şekilde dağılmasını sağlamaktadır.

Sıcaklık değeri istenilen değere ulaştığında kapiler viskozimetrenin tapası açılarak akışkanın kapiler kanaldan akışı sağlanmaktadır. Bu akışın A seviyesinden yukarı ilerleyerek E seviyesine çıktığı anda kronometreye basılır. E noktasından 0,01 saniye hassasiyetle viskozimetrenin belirlenmiş seviyelerinden geçtiği noktalar kaydedilir. Bu çalışmada, Şekil 3.2.'deki viskozimetrenin E seviyesinden F seviyesine gelene kadarki süre ölçülerek bu değer bulunmuştur.



Fotoğraf 3.7. Ölçüm tankına batırılmış halde asılı duran Viskozimetre kapiler tüpü fotoğrafı



Fotoğraf 3.8. Ölçüm Tankı sıvı giriş ve çıkışı

Çizelge 3.1. , viskometre aracılığıyla ölçülen deney verilerini göstermektedir. Grafit partiküllerin hacimsel yoğunlukları, Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi % 0 (saf su), % 0.5, %1.0, % 1.5 ve %2.0’dır.

Çizelge 3.1. Grafit nanosıvının viskozite deneysel verileri .

Hacimsel Yoğunluk (%)	Sıcaklık (°C)	Zaman (sn)	Viskozite (cst)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (cp)	Ortalama Ölçülen Viskozite (kg/ms)
0	20	114.9	0.919	0.998	0.917	0.000917
0	30	94.4	0.755	0.996	0.752	0.000752
0	40	76.6	0.613	0.992	0.608	0.000608
0	50	66.0	0.528	0.988	0.521	0.000521
0	60	56.3	0.450	0.983	0.443	0.000443
0.5	20	126.5	1.012	1.002	1.014	0.001014
0.5	30	101.4	0.811	1.000	0.811	0.000811
0.5	40	82.9	0.663	0.996	0.660	0.000660
0.5	50	70.4	0.563	0.992	0.558	0.000558
0.5	60	60.2	0.482	0.987	0.476	0.000476
1	20	132.5	1.060	1.006	1.066	0.001066
1	30	107.0	0.856	1.004	0.859	0.000859
1	40	87.5	0.700	1.000	0.700	0.000700
1	50	74.6	0.597	0.996	0.595	0.000595
1	60	66.5	0.532	0.991	0.527	0.000527
1.5	20	149.8	1.198	1.010	1.210	0.001210
1.5	30	122.38	0.978	1.008	0.986	0.000986
1.5	40	99.68	0.797	1.004	0.801	0.000801
1.5	50	83.28	0.666	1.000	0.666	0.000666
1.5	60	71.1	0.569	0.996	0.566	0.000566
2	20	166.4	1.331	1.014	1.350	0.001350
2	30	131.5	1.052	1.012	1.065	0.001065
2	40	103.3	0.826	1.008	0.833	0.000833
2	50	87.5	0.700	1.004	0.703	0.000703
2	60	75.4	0.603	1.000	0.603	0.000603

Temel olarak sıvıların viskozitesi, ısıtıldığı zaman moleküller harekete geçtiğinden ve bu işlemde ortaya çıkan enerjinin molekülleri bir arada tutan kuvvetleri zayıflatması gerektiğinden dolayı sıcaklıkla birlikte azalır (Singh vd., 2015). Bu nedenle, sıvı daha akışkan hale gelir ve viskozitesi de azalır. Baz akışkana nanopartiküllerin ilavesi ile hacimsel yoğunluğun artırılması da viskozitenin artışına sebep olmaktadır.

Yukarıda belirtilen ilişkileri tarif etmek için tatmin edici bir sinir ağı oluşturmak amacıyla, uygun transfer fonksiyonlarının seçimine dikkat edilmiştir. Sıcaklık ve hacimsel yoğunluk arasındaki viskozite değişimini tarif etmenin uygun yolunun, log-sigmoid ve saf lineer transfer fonksiyonlarını kullanmak olduğu görülmüştür. Önceki transfer fonksiyonlarını kullanarak, ağ sonuçları, viskozite ve sıcaklığın doğrusal olmayan eğilimine neden olur. Nanosıvı ve baz akışkan viskozitesinin değişimi doğrusal olarak tahmin edilebildiğinden, ilgili ağ üzerinde bir korelasyon oluşturmak için sadece saf lineer transfer fonksiyonu kullanılmıştır.

Çizelge 3.2.'de geliştirilmiş olan korelasyonlar farklı partikül tipleri (TiO₂, Al₂O₃, CuO, Ni, Ag), baz akışkanlar (su, etilen glikol, deiyonize su, terpineol), partikül çapları (16–300 nm aralığında) ve hacim yoğunlukları (% 0–9,4 aralığında) için geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan korelasyonların detayları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de görülebilir.

Çizelge 3.2. Nanosıvılar için geliştirilen viskozite korelasyonları

Araştırmacı	Korelasyon
Chen vd. (2007)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 10,6\phi - (10,6\phi)^2)$
Wang vd. (1999)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 7,3\phi - 123\phi^2)$ (1) $\mu_{nf} = \mu_{bf}(306\phi^2 - 0,19\phi + 1)$ (2)
Pak ve Cho (1998)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(108,2\phi^2 + 5,45\phi + 1)$
Kitano vd. (1981)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{-2}$
Nguyen vd. (2007)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}^{0,904e^{0,1482\phi}}$ (1) $\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 0,025\phi - 0,015\phi^2)$ (2) $\mu_{nf} = \mu_{bf}(1,475 - 0,319\phi + 0,051\phi^2 + 0,009\phi^3)$ (3) $\mu_{nf} = \mu_{bf}(1,1250 - 0,0007T)$ (4)
Chandrasekar vd. (2010)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left[1 + b \left(\frac{\phi}{1 - \phi_m} \right) \right]^n$
Mooney (1951)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} e^{\left(\frac{\epsilon\phi}{1 - k\phi} \right)}$
Vand (1948)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} e^{2,5\phi + 2,7\phi^2 / (1 - 0,609\phi)}$
Davalos vd. (2002)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(6,17\phi^2 + 2,5\phi + 1)$
Batchelor (1997)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2,5\phi - 6,2\phi^2)$
Krieger ve Dougherty (1959)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right]^{\eta\phi_m}$
Einstein (1906)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2,5\phi)$
Khanaferand vafai (2011)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1,0538 + 0,1448\phi - 0,00363T - 0,0147\phi + 0,00006735T^2 - 1,337\phi)$
Duanghomguk ve wongwises (2009)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1,013 + 0,092\phi - 0,015\phi^2)$
Godson vd. (2010)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1,005 + 0,497\phi - 0,1149\phi^2)$
Tang vd. (2004)	$\mu_{nf} = \frac{2,761}{10^6} e^{1713/T}$
Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 - \phi)^{2,5}$
Tseng ve Chen (2003)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} 0,4513 e^{0,6965\phi}$
Frankel ve Acrivos (1967)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \frac{9}{8} \left[\frac{(\phi/\phi_m)^{1/3}}{1 - (\phi/\phi_m)^{1/3}} \right]$
Putra vd. (2003)	$\mu_{nf} = \frac{2,9T^2}{10^7} - \frac{2T}{10^4} + 3,4/10^2$ (1) $\mu_{nf} = \frac{3,4T^2}{10^7} - \frac{2,3T}{10^4} + 3,9/10^2$ (2)
Abu-Nada (2009)	$\mu_{nf} = -0,155 - \frac{19,582}{T} + 0,794\phi + \frac{2094,47}{T^2} - 0,192\phi^2 - 8,11 \frac{\phi}{T} - \frac{27463,863}{T^3} + 0,0127\phi^3 + 1,6044 \frac{\phi^2}{T} + 2,1754 \frac{\phi}{T^2}$

Çizelge 3.3. Korelasyonların deneysel şartlarının detayları

Araştırmacı	Parçacık Tipi	Temel Sıvı	Parçacık Ölçüsü (nm)	Sıcaklık Aralığı	Yoğunluk (%)
Chen vd.(2007)	TiO2	Etilen Glikol	25	20-60	0-8 (wt,%) 0-6 (vol,%)

Wang vd. (1999)	Al ₂ O ₃	Su	28	22	0-3,5 (vol,%)
Pak ve Cho (1998)	Al ₂ O ₃ TiO ₂	Etilen Glikol	13 27	15-70	0-2,78 (vol,%)
Nguyen vd. (2007)	Al ₂ O ₃ CuO	Su	36/47 29	20-65	0-3,16 (vol,%)
Chandrasekar vd. (2010)	Al ₂ O ₃	Su	43	22-75	1-9,4 (vol,%)
Duanghonguk ve Wongwises (2009)	TiO ₂	Su	21	25	1-5 (vol,%)
Godson vd. (2010)	Ag	Saf Su	60	25	0,2-2 (vol,%)
Tseng ve Chen (2003)	Ni	Terpineol	300	15-35	0,3-0,9 (vol,%)
Putra vd. (2003)	Al ₂ O ₃ CuO	Su	131,3/87,3	20-60	3-10 (vol,%)
Abu-Nada (2009)	Al ₂ O ₃	Su	47	22-70	1-4 (vol,%)

Çizelge 3.5. , verilerin sadece Çizelge 3.1.'de gösterilenlerle olan uyumluluğunu değil, aynı zamanda yazarların gelişmiş korelasyonlarının literatürdeki diğerlerine göre daha iyi tahmin edilebilirliklerini ortaya koymaktadır. Çizelge 3.1'in açık kaynaklarda bu konudaki hemen hemen tüm ampirik korelasyonları içerdiği belirtilmelidir. Bu ampirik korelasyonları geliştirmek için farklı parçacık tipleri ve çapları kullanılmıştır. Çizelge 3.4.'teki ampirik korelasyonlar, %0.915'den %127.151'e kadar olan tahmin edilebilirlik oranlarına göre sıralanmıştır. Çizelge 3.5'deki analizlerden elde edilen Çizelge 3.5'de gösterilen yazarların önerilen korelasyonları, %0.914 ve %3.418 ortalama orantısal hatalara sahipken, Chen vd. (2007) en yakın başarılı ampirik korelasyonu. %3.507'lik bir tahmin edilebilirliğe sahiptir. Sıcaklık-hacim yoğunluğuna dayanan gelişmiş korelasyon,% 5 hata bandı altında tüm verilerin (20/20), bazal viskozite-hacim yoğunluğu ve Chen vd. (2007) sırasıyla 15/20 ve 18/20 verilerinde ±% 5 hata bandındadır. Uyumsuz ampirik korelasyon, Putra vd. (2003)'e göre % 127.151 oranında öngörülebilirliğe sahiptir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilmiş olan viskozite korelasyonunun doğruluğunu tespit etmek amacıyla geliştirilen korelasyon diğer araştırmacıların geliştirdiği korelasyonlarla karşılaştırılarak Çizelge 3.5.'te bağıl hataları verilmiştir.

Çizelge 3.4. ANN sonucunda çıkan korelasyon katsayıları

$$\mu_{nf} = 1.1686\mu_{bf} + 1.3764 \times 10^{-4} \varnothing - 1.8027 \times 10^{-4} (T-\Phi)$$

$$\mu_{nf} = \frac{N_1}{1+e^{-(a_1+b_1\varnothing+c_1)}} + \frac{N_2}{1+e^{-(a_2+b_2\varnothing+c_2)}} + \frac{N_3}{1+e^{-(a_3+b_3\varnothing+c_3)}} + \frac{N_4}{1+e^{-(a_4+b_4\varnothing+c_4)}} + \frac{N_5}{1+e^{-(a_5+b_5\varnothing+c_5)}} + \frac{N_6}{1+e^{-(a_6+b_6\varnothing+c_6)}} + \frac{N_7}{1+e^{-(a_7+b_7\varnothing+c_7)}} + \frac{N_8}{1+e^{-(a_8+b_8\varnothing+c_8)}} + K (\mu_{bf}-\Phi \text{ input network})$$

i	1	2	3	4	5	6	7	8
a _i	0.01694	0.00798	-0.02988	0.02390	0.02103	-0.08682	0.02825	0.02687
b _i	0.28564	0.09188	-0.30482	0.51910	2.57349	0.70383	0.43587	0.49,799
c _i	-1.02427	-0.40686	1.47504	-1.57051	-4.20596	0.52557	-1.66085	-1.67879
N _i	-0.00017	-6.2 × 10 ⁻⁵	0.00024	-0.00026	0.00038	0.00092	-0.00027	-0.00028
K	0.00087							

Çizelge 3.5. Araştırmacıların korelasyonlarının ortalama bağıl hatalarının karşılaştırılması

	% Ortalama Bağıl Hata	% 5'in altındaki Ortalama Bağıl Hata	% 10'un altındaki Ortalama Bağıl Hata	% 15'in altındaki Ortalama Bağıl Hata	% 30'un altındaki Ortalama Bağıl Hata
T-Φ input network	0.915	20/20	20/20	20/20	20/20
μ _{bf} -Φ input network	3.418	15/20	20/20	20/20	20/20
Chen vd. (2007)	3.507	18/20	20/20	20/20	20/20
Wang vd. (1999)	4.824	10/20	18/20	20/20	20/20
Pak ve Cho (1998)	6.118	9/20	15/20	20/20	20/20
Wang vd. (1999)	8.327	8/20	10/20	18/20	20/20
Kitano vd. (1981)	8.573	9/20	10/20	16/20	20/20
Kitano vd. (1981)	9.075	9/20	10/20	15/20	20/20
Nguyen vd. (2007)	9.213	5/20	11/20	16/20	20/20
Kitano vd. (1981)	9.478	8/20	10/20	14/20	20/20
Chandrasekar vd. (2010)	9.65	6/20	9/20	16/20	20/20
Mooney (1951)	10.07	8/20	10/20	13/20	20/20
Vand (1948)	10.07	8/20	10/20	13/20	20/20
Davalos vd. (2002)	10.09	8/20	10/20	13/20	20/20
Batchelor (1977)	10.09	8/20	10/20	13/20	20/20
Krieger ve Dougherty (1959)	10.093	8/20	10/20	13/20	20/20
Krieger ve Dougherty (1959)	10.098	8/20	10/20	13/20	20/20
Krieger ve Dougherty (1959)	10.102	8/20	10/20	13/20	20/20
Einstein (1906)	10.179	8/20	10/20	13/20	20/20
Khanferand Vafai (2011)	10.388	8/20	11/20	12/20	20/20
Duanghonguk ve Wongwises (2000)	11.576	6/20	9/20	10/20	20/20
Godson vd. (2010)	11.820	5/20	9/20	10/20	20/20
Nguyen vd. (2007)	12.746	5/20	9/20	10/20	20/20
Tang vd. (2004)	13.380	4/20	8/20	10/20	20/20
Brinkman (1952)	15.352	5/20	8/20	10/20	20/20
Nguyen (2007)	21.007	0/20	0/20	6/20	18/20
Tseng and Chen (2003)	24.470	2/20	5/20	6/20	10/20
Frankel ve Acrivos (1967)	27.882	0/20	0/20	5/20	6/20
Nguyen (2007)	28.328	0/20	2/20	4/20	10/20
Frankel ve Acrivos (1967)	48.190	0/20	0/20	0/20	0/20
Putra vd. (2003)	56.340	0/20	0/20	0/20	2/20
Abu-Nada (2009)	56.739	2/20	2/20	3/20	7/20
Frankel ve Acrivos (1967)	65.384	0/20	0/20	0/20	0/20
Putra vd. (2003)	127.151	0/20	0/20	0/20	0/20

Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. , 20 °C ila 60 °C'den başlayarak sıcaklık ile dinamik viskozitenin değişimini göstermektedir. Dinamik viskozite, bu şekilde artan sıcaklıklarda beklendiği

gibi azalır. Aynı zamanda % 0'dan (saf su) % 2'ye kadar artan hacim yoğunluğu ile doğal olarak artar. Şekil 3.4. ve 3.5., ölçülen verilere ve Chen vd. (2007) sonuçlarına aittir. Chen vd. (2007) korelasyonu, deneysel değerlerle aynı özelliklere sahiptir. Bu nedenle, deneylerin doğrulama süreci başarıyla değerlendirilmiştir. Şekil 3.4. , Şekil 3.5' tekilerle benzer sonuçlara sahiptir. Grafit partiküllerinin hacim yoğunluğu ile dinamik viskozitenin saf suda açıkça değişimini göstermektedir.

Şekil 3.4. , yazarların deneysel verileri ile en öngörülse ampirik korelasyonları göstermektedir. Chen vd. (2007) arasında korelasyon %7, Wang vd (1999) ise %11'dir. Aslında, Çizelge 3.5.'den de görülebileceği gibi, Çizelge 3.1.'deki 32 ampirik korelasyondan 9'u, ± 10 'luk hata bandı altında ortalama orantısal hatalara, sırasıyla 32'nin 23'ü ve 32'nin 27'sine, ± 20 ve ± 30 hata bantları altında iyi bir öngörülebilirliğe sahiptir. . Bu durum aynı zamanda ölçülen verilerin güvenilirliğini de kanıtlamaktadır. Çizelge 3.5'de gösterildiği gibi ölçülen verilerle sadece 5 ampirik korelasyonun uyumsuz olduğu bulunmuştur.

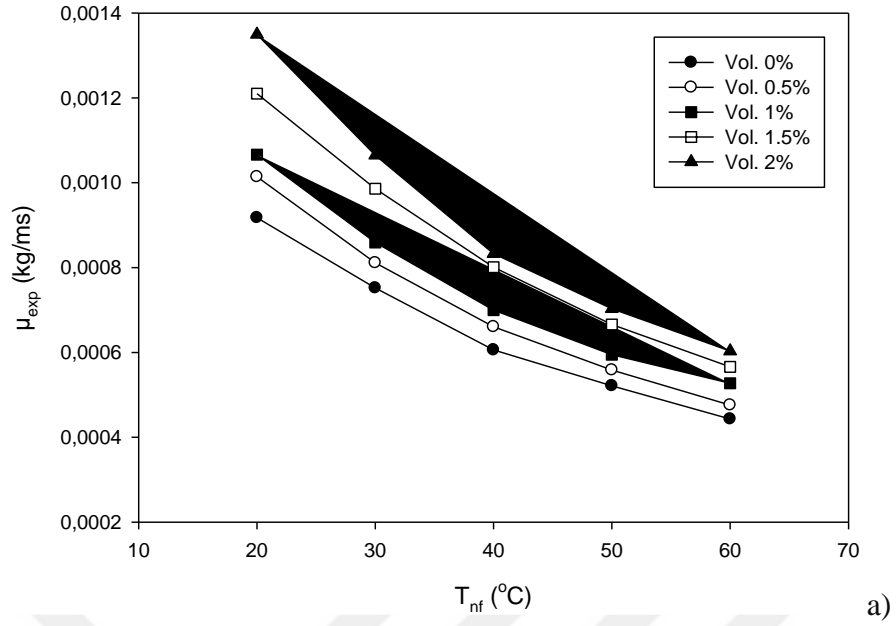
Çizelge 3.6. $\mu_{bf} - \phi$ ve $T - \phi$ ağının performans değerleri

$\mu_{bf} - \phi$ Ağ girişleri

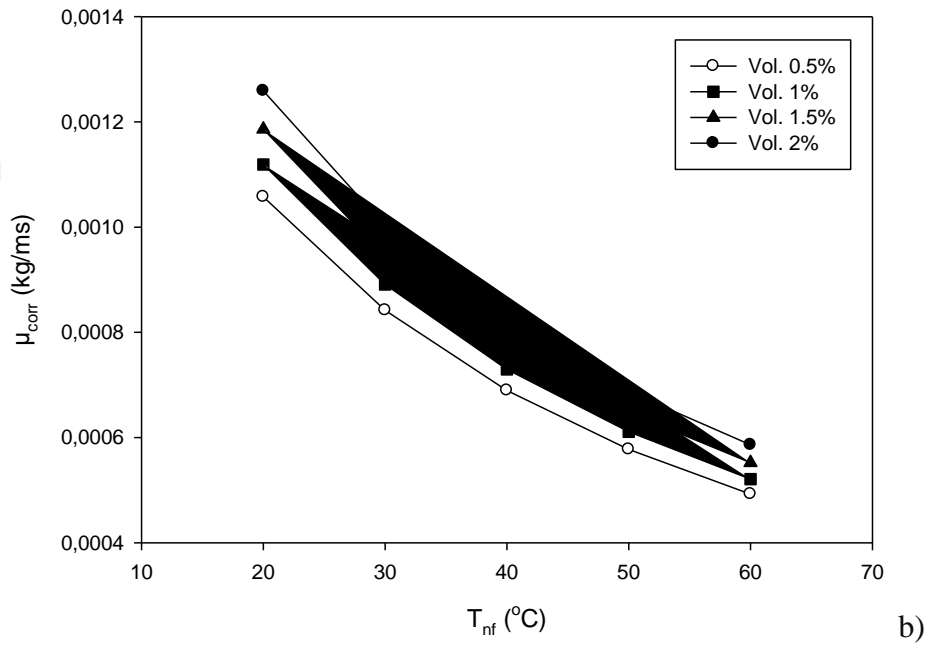
Alıştırma Fonksiyonu	Gizli Katmandaki Nöron Sayısı	MSE	R ²
Levenberg–Marquardt	1	0,00610	0,97933
Scaled conjugate gradient	6	0,07339	0,763329
Bayesian regulation	7	0,29513	-0,02097
Resilient backpropagation	2	0,54621	-0,92472

Alıştırma Fonksiyonu	Gizli Katmandaki Nöron Sayısı	MSE	R ²
Levenberg–Marquardt	4	0,00103	0,99651
Scaled conjugate gradient	1	0,00266	0,99115
Bayesian regulation	8	0,00051	0,99827
Resilient backpropagation	9	0,00337	0,98869

Şekil 3.5. ve Şekil 3.7., yazarlar tarafından önerilen korelasyonlarla ilgilidir. Sırasıyla, sıcaklık - hacim yoğunluğu ve baz akışkan viskozite hacim yoğunluğuna dayanan gelişmiş korelasyonlar için ± 3 ve ± 9 'luk hata bantlarını göstermektedirler. Bu değerler, ANN modellerinde sıcaklık girdilerinin, ANN modelinin bağımlılık analizleri göz önünde bulundurularak, dinamik viskoziteyi baz akışkanın dinamik viskozitesinden daha fazla etkilediğini ortaya koymaktadır.

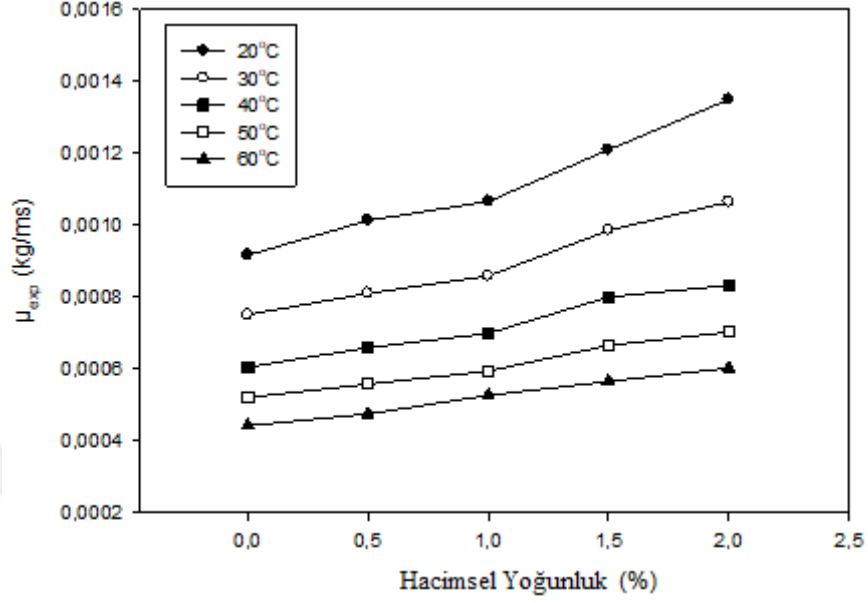


Şekil 3.4. Farklı hacimsel nanosivilerin sıcaklıkla viskozite değişimini gösterir grafik

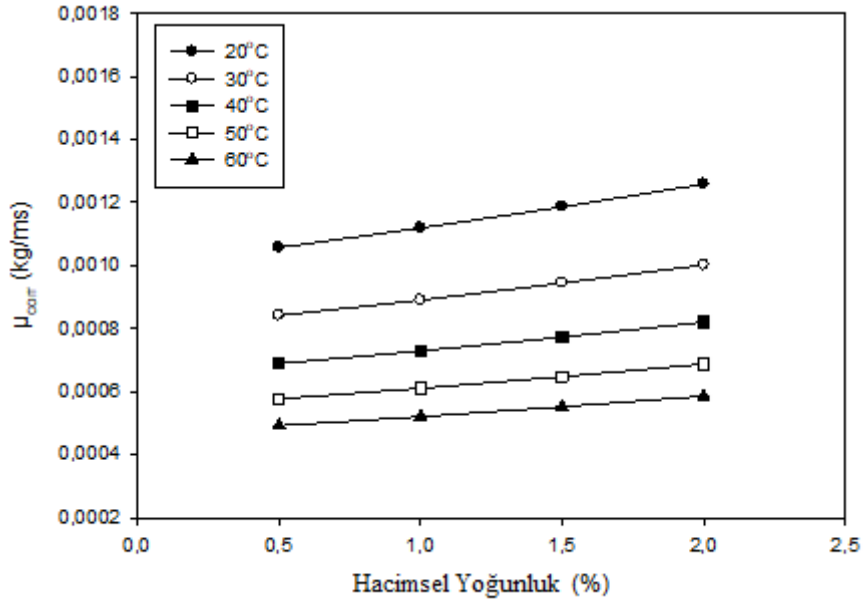


Şekil 3.5. Grafit nanosivinin deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle bulunan korelasyon viskozitesinin sıcaklıkla değişimini gösterir grafik

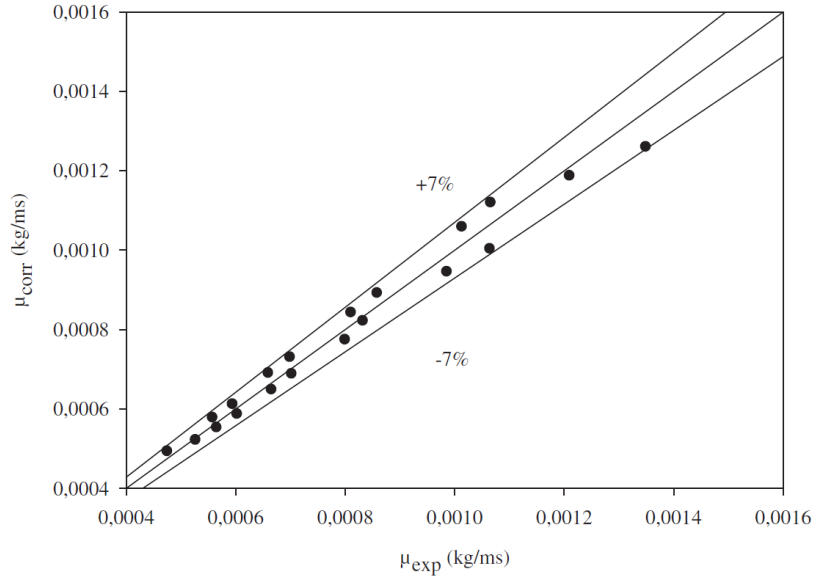
Yapılan deneyler viskozite deneyleri sonucunda elde edilen verilerin parçacık hacimsel yoğunluğu arttıkça viskozitesinin arttığı yönünde olmuştur. Aynı zamanda sıcaklığın artışıyla da nanosivinin viskozitesi artmıştır.



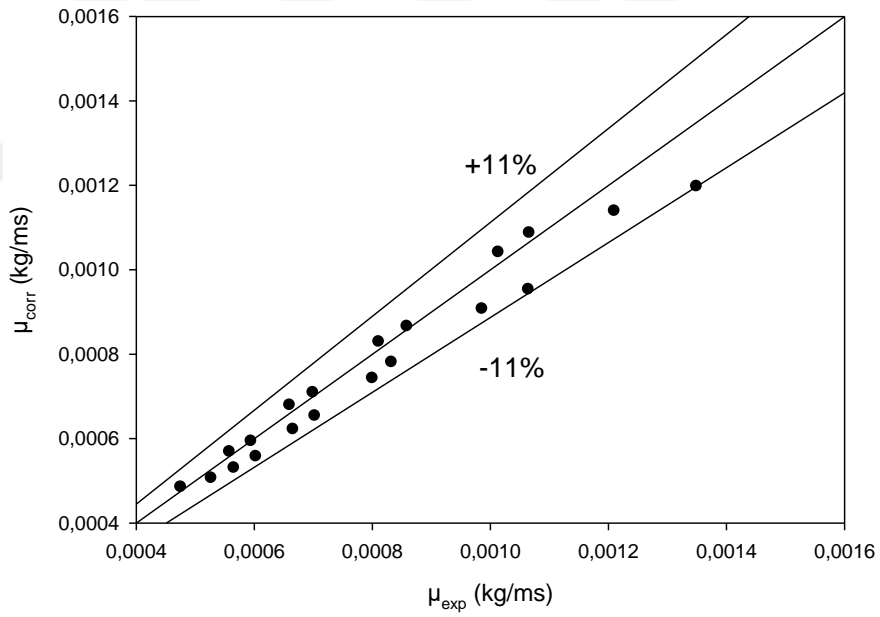
Şekil 3.6. Grafit nanosivinin viskozitesinin yüzde hacimsel yoğunlukla değişimini gösteren grafik



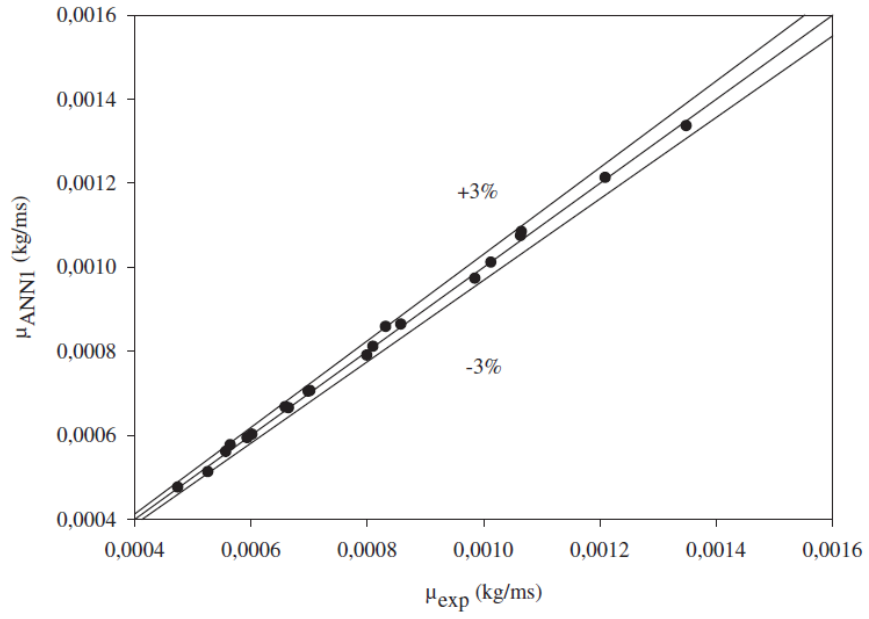
Şekil 3.7. Deneysel viskozitenin 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 yüzde hacimsel yoğunluklarda korelasyon viskozite değerlerine göre değişimini gösteren grafik



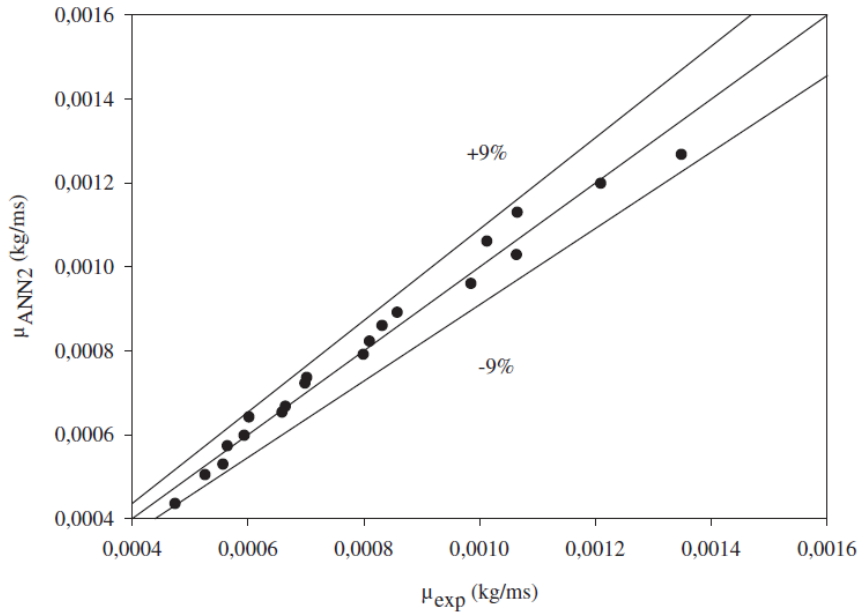
Şekil 3.8. Deneysel viskozite sonuçlarıyla korelasyonlarının karşılaştırılması (Wang korelasyonu)



Şekil 3.9. Deneysel viskozite sonuçlarıyla korelasyonlarının karşılaştırılması (Wang korelasyonu)



Şekil 3.10. Grafit nanosıvı deneysel viskozite $\mu_{bf} - \phi$ giriş ağ sonuçlarının karşılaştırılması

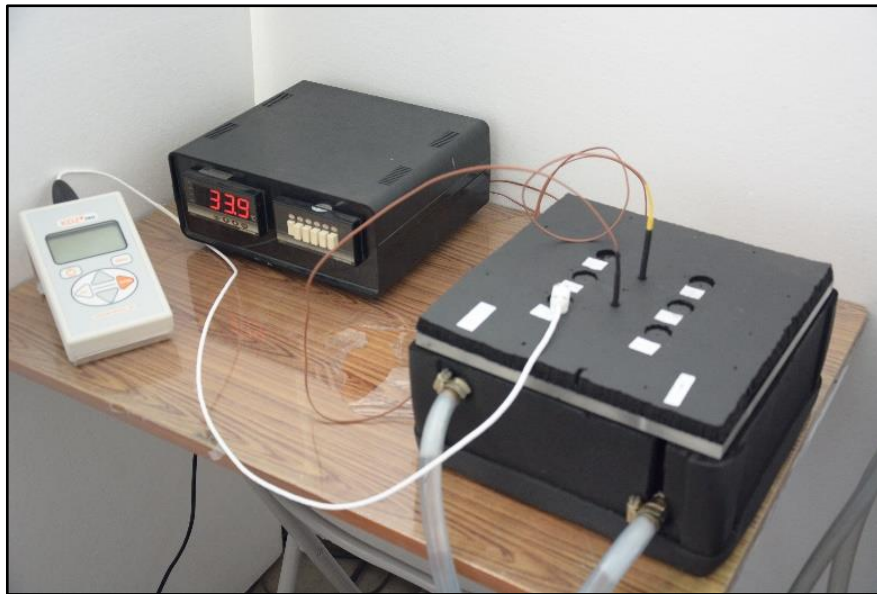


Şekil 3.11. Grafit nanosıvı deneysel viskozite $T - \phi$ giriş ağ sonuçlarının karşılaştırılması

3.2.3 Nanosıvının ısı iletim katsayısının deneysel ölçümü

Nanosıvıların ısı iletim katsayısı sadece parçacık konsantrasyonunun değil, aynı zamanda parçacık büyüklüğünün, malzeme çeşidinin ve baz sıvısının tipinin de karmaşık bir işlevidir. Ölçülen ısı iletim katsayıları hemen hemen her zaman Maxwell korelasyonu ile hesaplanan değerleri aşmaktadır, ancak yeterince küçük parçacıklara sahip nanosıvılar, Maxwell teorisi tarafından tahmin edilenlerden bile daha düşük ısı iletim katsayılarına sahip olabilirler. Bununla birlikte nanosıvı ısı iletim katsayısı, artan parçacık büyüklüğü ile artmaktadır (Pryazhnikov vd., 2017). Nanoparçacık malzemenin ısı iletkenliği ile bu parçacıkları içeren nano-akışkanın ısı iletkenliği arasında doğrudan bir korelasyon olmadığı ikna edici bir şekilde gösterilmiştir. Baz sıvının ısı iletkenliği ne kadar düşükse, nanosıvının bağıl ısı iletim katsayısının o kadar yüksek olduğu doğrulanmıştır (Pryazhnikov vd., 2017).

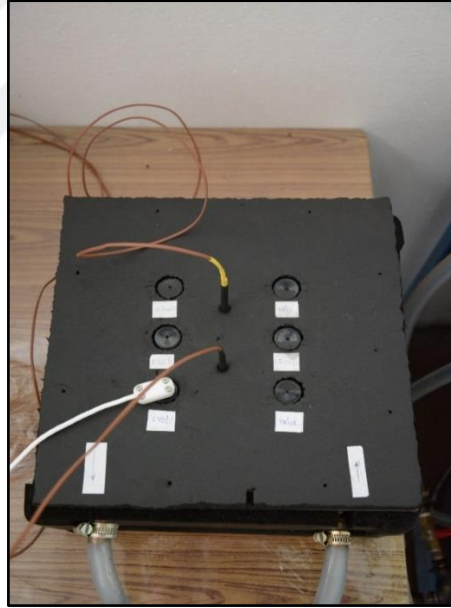
Isı iletim katsayısı değerini ölçebilmek için KD2 Pro ısıl geçirgenlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz sıvıların ısıl geçirgenliklerini sıcak tel metodu ile ölçmektedir. Deney yapılan farklı hacimsel yoğunluktaki nanosıvılar Fotoğraf 3.10.'da görülen küçük şişelere koyularak ölçüm cihazının probunu bu küçük şişelere açılmış probun kalınlığı kadar olan delikten sokarak ölçüme başlanmaktadır. Hangi tüpün ölçülen değeri bittiyse diğer tüpe geçilerek deney bitirilmektedir.



Fotoğraf 3.9. Isıl Geçirgenliği ölçen KD2 Pro cihazı ve Deney Düzenine bağlantısı



Fotoğraf 3.10. Örnek türlerinin deney havuzuna yerleştirilme şekli



Fotoğraf 3.11. Sıcaklık ölçen iki adet ısılıçift ile deney tüplerinin deney havuzuna daldırılarak ısıl geçirgenlik ölçülmesi

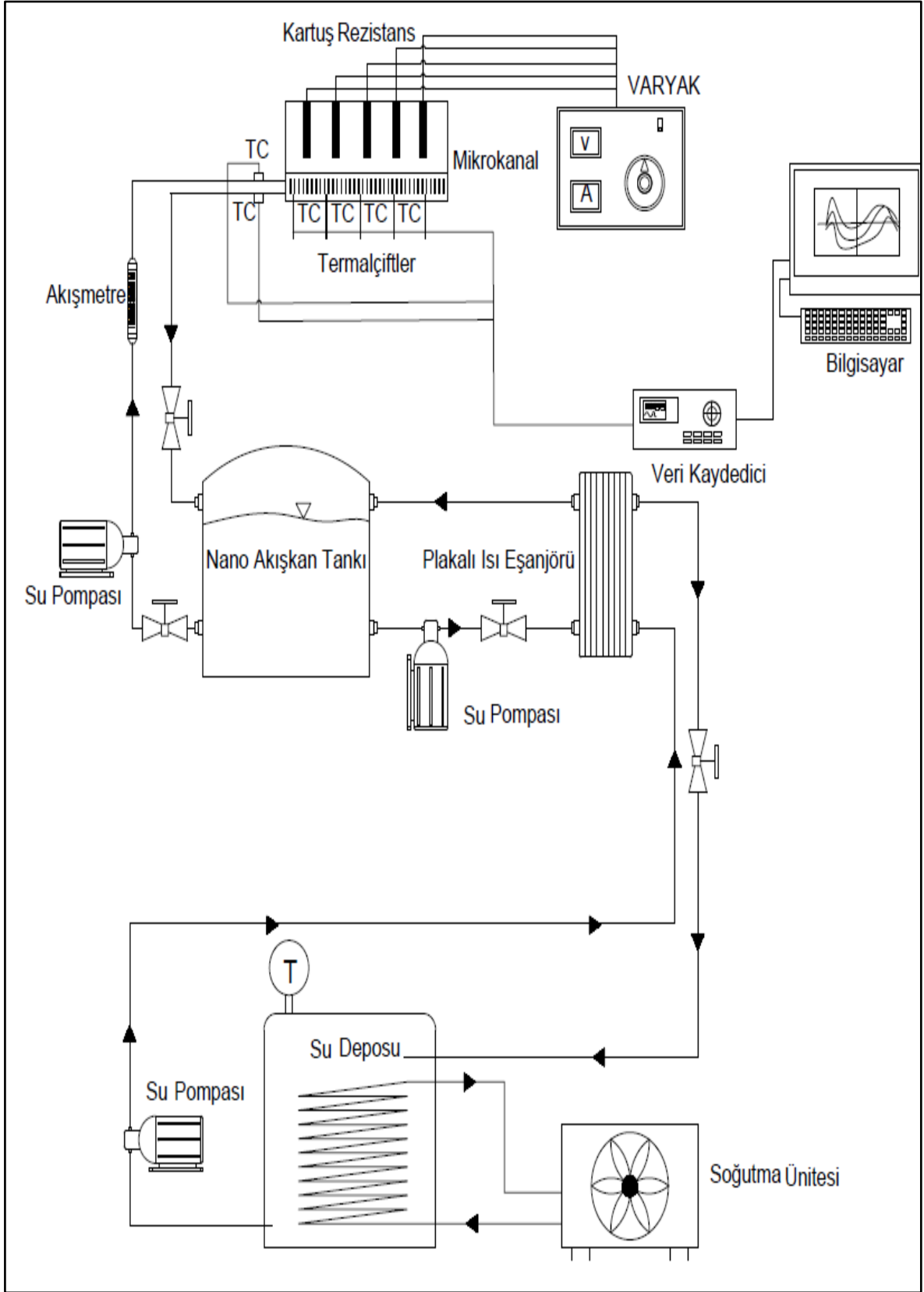
3.3 Mikrokanal Soğutma Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi

3.3.1 Deney düzeneği ve deneylerin yapılışı

Deneysel çalışmalar için öncelikle deney tesisatının tasarlanması aşaması birinci evreyi almaktadır. Deneysel tesisat için ilgili literatür taraması yapılarak deney tesisatının nasıl olacağı bilgisi edinilmiştir. Mikrokanal eşanjör ısıtıcı fişek rezistanslı blok alüminyum parça ile bağlantı halindedir. Mikrokanal eşanjör ile blok alüminyum arasındaki kontak yüzeyine ısılıft için ısılıft çapında bir kanal açılarak buraya yerleştirilmiştir. Bu kanala ısıl gres eklenerek eşanjöre akuple edilmiştir. 20 °C ‘deki deneylere başlanmadan önce su soğutucu havuz 15 °C’ye kadar düşürülmüştür. Bu soğutma havuzu soğutulduktan sonra sabit sıcaklık havuzunun deney sıcaklığına getirilmesi için plakalı ısı eşanjörüne bağlı çiller ile vanalar vasıtasıyla ayarlama yapılmıştır. Sabit sıcaklık havuzu istenilen deney sıcaklığına ulaştığında istenilen debi rotametrede ayarlanarak nanosıvı eşanjöre pompa vasıtasıyla gönderilmiştir. Deney tesisatında iki tane pompa kullanılmıştır. Mikrokanala giren ve çıkan nanosıvı sıcaklığı iki adet ısılıft ile ölçülmekte ve data logger ile kayıt edilmektedir. Bu pompalardan birincisi nanosıvıyı mikrokanal eşanjöre gönderirken ikincisi ise sabit sıcaklık havuzundaki nanosıvıyı plakalı ısı eşanjörüne göndererek havuz sıcaklığının sabit kalabilmesini sağlamaktadır.

Deney düzeneği ve deneyler, mikrokanal ısı eşanjörüne istenilen sıcaklık, basınç ve akış oranında saf su ile karışık halde nanosıvı gönderilerek ve bu parametreleri bir veri kaydedici cihazla ölçerek yapılmıştır. Öncelikle su bir pompa ve su tankı vasıtasıyla mikrokanal eşanjöre basılarak bir sıvı akımı oluşturulmuş, oluşan sıvı akımının kontrolü bir by-pass valfiyle gerçekleştirilmiştir. Pompadan test ünitesine giden nanosıvının, bir çiller vasıtasıyla istenilen test ünitesi giriş sıcaklığına getirilmesi sağlanmıştır. İstenilen debi, bir vana sayesinde ayarlanmış ve debi kontrolü rotametre ile yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan mikrokanal ısı eşanjörünün üst tarafında fişek rezistans gömülü bir alüminyum bloğu, varyağa bağlı olan rezistanslar ısıtmaktadır. Mikrokanal ısı eşanjörünün üst kısmındaki ısı alan bölgeye ısılıftler yerleştirilmiştir. Isılıftler mikrokanala verilen ısı akısını ölçmektedir. Isılıftlerden alınan veriler, veri kaydedici vasıtasıyla ölçülmüştür. Ayrıca mikrokanala giren ve çıkan su sıcaklıkları da ölçülmüştür.



Şekil 3.12. Grafit nanosıvının tek fazlı mikrokanal tesisatı deney şeması

Hazırlanan nanosıvı, tankta muhafaza edilmiş ve deney başlangıcında pompa vasıtasıyla mikrokanala basılmıştır.

Grafit nanosıvının yüzde 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 hacimsel yoğunluklarda ısı ve kütle akısının ortalama zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısına etkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Deney $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık giriş değerlerinde yapılmıştır. Yapılan deneyler farklı kütle akılarında $154\text{ (kg/m}^2\text{s)}$, $232\text{ (kg/m}^2\text{s)}$, $309\text{ (kg/m}^2\text{s)}$ yapılmış ve sonuçlar aşağıda grafiksel olarak düzenlenmiştir. Reynolds ve Nusselt ilişkisi $T_{in}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ayrı ayrı hesaplanarak grafiksel olarak düzenlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki hesaplamalarla düzenlenmiştir.

Çizelge 3.7. Deneylerde kullanılan mikrokanal ölçüleri ve kontrüksiyon parametreleri

Parametreler	Ölçüler
Kanal sayısı	57.0
Hidrolik Çap , d_h (mm)	1.6
Kanal Kalınlığı , W_{ch} (mm)	1.0
Kanal Derinliği , H_{ch} (mm)	4.0
Fin Kalınlığı , W_{fin} (mm)	1.0
Kanal Uzunluğu, L(mm)	98.0
Isılçiftin kanal temeline olan mesafesi (mm)	3.0

Çizelge 3.8. Deneylerde kullanılan makina teçhizat ve özellikleri

Cihaz Tipi	Özellikleri	Adeti
Veri Kaydedici- Graphtec GL220	10 Kanallı , Ölçüm alma sıklığı: 10 ms'den 1 saate kadar Ölçüm Aralığı: -200 °C < TS < -100 °C - 100 °C < TS 1370 °C E Doğruluk : ± (0.05 % of reading + 2.0 °C) ± (0.05 % of reading + 1.0 °C)	1
Akışmetre	0-8 lt/dak ölçüm aralığı	1
Küresel Vana	Paslanmaz çelik 1/2"	10
Bilgisayar	İ5 işlemciler (8 GB RAM)	1
Mikrokanal	57 Kanallı D _h =1,6 mm L=98 mm	1
Su Pompası	40 mss /45 lt/dak kapasiteli	2
Varyak	2000 W Voltmetre ve Ampermetre göstergeli	1
Soğutma Suyu Ünitesi	17 litre sıvı kapasitesi , su ve etilen glikol gibi alkol türevleri ile çalışma olanağı.	1
Plakalı ısı eşanjörü	2 kw ısı alma kapasitesi olan eşanjör.	1
Termalçift	K Tipi Termalçift (0-400 °C)	4

Deney tesisatı Şekil 3.12'de görülmektedir. Mikrokanal eşanjörün üstündeki alüminyum bloğa fişek rezistanlar gömülü halde bulunmaktadır. Aynı zamanda eşanjöre giriş ve çıkış borularının üzerinde fark basınç ölçer bağlantısı yapılmış haldedir.

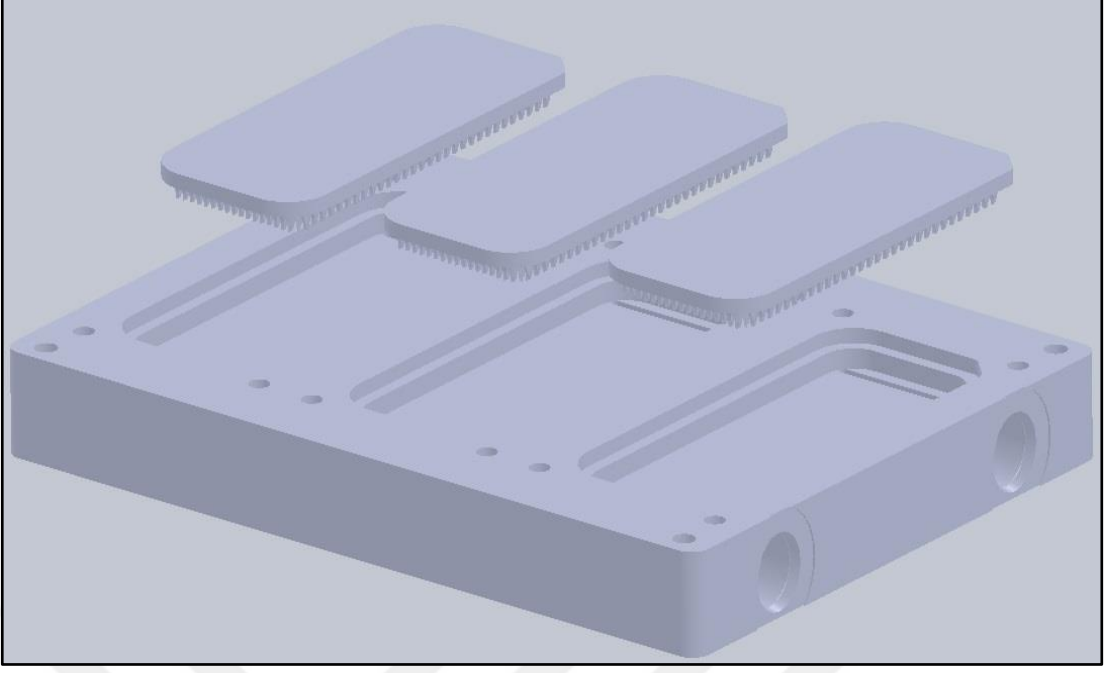


Fotoğraf 3.12. Deney Tesisatı fotoğraf gösterimi

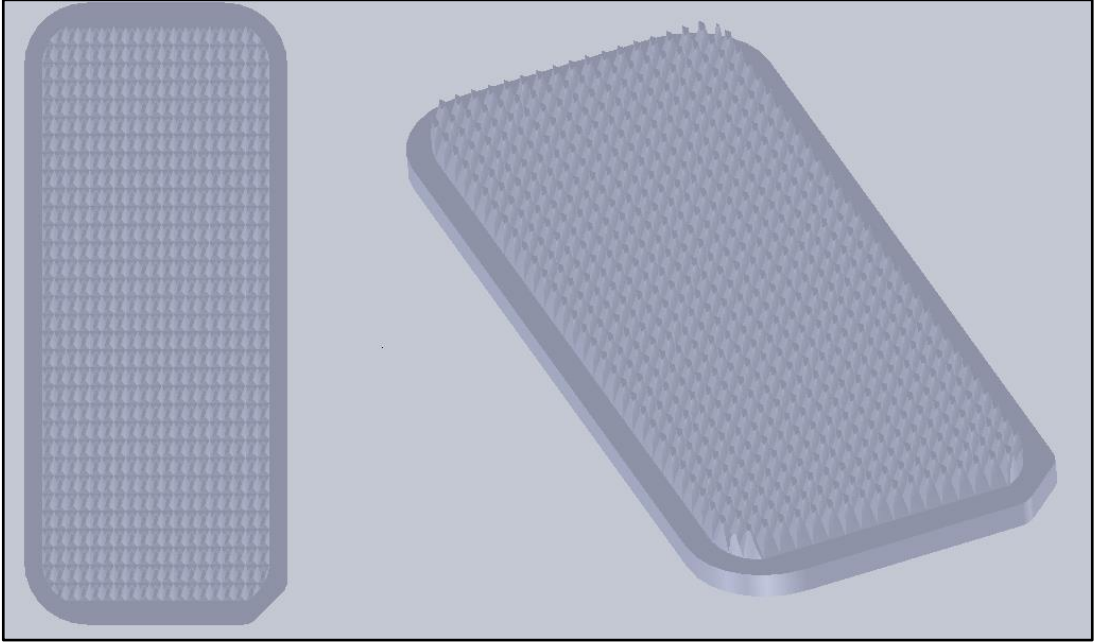
3.3.2 Deney tesisatının ana bileşenleri

3.3.2.1 Mikrokanal ısı eşanjörü

Test ünitesinin ana parçasıdır. Alüminyum ısıtma gövdesi ana gövdesi alüminyum olan mikrokanal eşanjöre akuple edilerek sabitlenmiştir. Deney tesisatında kullanılan mikrokanal ısı eşanjörü Volverine Heat Exchanger firmasının ürettiği ticari bir eşanjördür. Bu eşanjör tipi güç elektroniği soğutmasında kullanılmaktadır. IGBT bipolar transistörlerin soğutmasında kullanılan bu eşanjörler sulu tipli ve tek fazlı olarak çalışmaktadırlar. Bu firmanın ürettiği eşanjörler micro deformation teknolojisiyle imal edilmektedir.



Şekil 3.13. Deneysel olarak kullanılan mikrokanaal dış yapısı



Şekil 3.14. Mikrokanaal ısı eşanjörü iç yapısı

3.3.2.2 Su soğutma ünitesi

Bu ünite deney tesisatının devre şemasında eşanjörden gelen ısının soğutulmuş mikrokanaal eşanjöre tekrar gönderilmesini sağlayan ünite olarak tasarlanmıştır. Sıcaklık kontrollü bu çiller

ünitesi aynı zamanda 11 l/dak'ya kadar basma yapmaktadır.. Çiller ünitesi -20 dereceden +90 dereceye kadar soğutma ve ısıtma yapabilmekte, 23 litre akışkan alma kapasitesine sahiptir. Bu değerler mikrokanal eşanjör için yapılan çalışmalar için yeterli görülmektedir.



Fotoğraf 3.13. Su soğutma banyosu

3.4 Kanal Tipi Isı Değiştiricilerinde Temel Kavramlar ve Teorik İnceleme

3.4.1 Kanat parçasından geçen ısı miktarının hesaplanması

Mikrokannallar taşınım ile ısı geçişini, daha fazla ısı geçiş yüzeyi sağlamak sureti ile gerçekleştirirler. Taşınım ile ısı geçişini mikrokanal eşanjörün sıcak kanatları arasından geçen nanosıvı ile sağlanmaktadır (Incropera ve DeWitt, 2000).

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = h A (T_s - T_{\infty}) \quad (3.1)$$

h = Taşınım ısı geçişi katsayısı

T_s = Sıcak yüzey sıcaklığı

T_{∞} = Akışkan Sıcaklığı

A = Akışkanın temas yüzeyi alanı

Böylelikle taşınım ile ısı geçişi ($T_s - T_\infty$) yüzey ve akışkan sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıyla, akışkanın temas ettiği kontak yüzeyinin artışıyla ve taşınım ile ısı iletim katsayısının artışıyla gerçekleştirilebilir.

Finler bir yüzeye veya katı malzemeye çakılı yüzeylerdir. Bu yüzeyler ısı geçişi yüzey alanını yükselterek taşınım ile ısı geçişi miktarını artırmak için tasarlanmış elemanlardır.

Şekil (3.15)'deki diferansiyel elemana enerji korunum kuralları uygulandığında denklem (3.2) elde edilir (Incropera ve DeWitt, 2000).

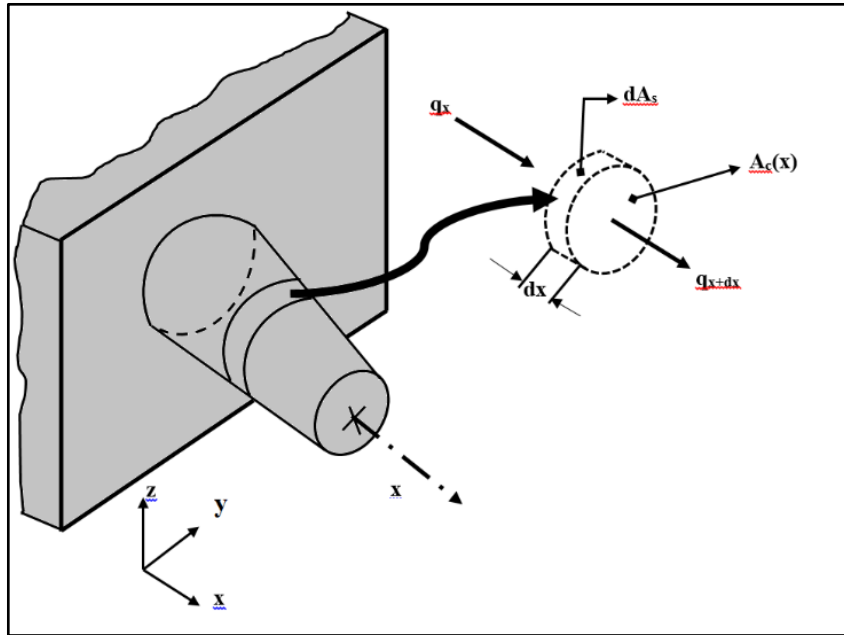
$$q_x = q_{x+dx} + dq_{\text{taşınım}} \quad (3.2)$$

Fourier yasasından

$$Q_x = -k A_c \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

k_{fin} = Kanat malzemesinin Isı iletim katsayısı.

A_c = Kanat kesit alanı



Şekil 3.15. Genişletilmiş yüzeyde enerji dengesi (Incropera ve DeWitt, 2000)

$x+dx$ 'deki ısı iletimi (3.3) deki şekilde yazılabilir

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (3.4)$$

$$q_{x+dx} = -kA_c \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) dx \quad (3.5)$$

Taşıyım ile geçen ısı

$$dq_{\text{taşıyım}} = h dA_s (T - T_\infty) \quad (3.6)$$

Bağıntısıyla verilmektedir. Buradaki dA_s diferansiyel elemanın yüzey alanıdır. Bu denklemler (3.2)'de yerine konursa

$$\frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) - \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} (T - T_\infty) = 0 \quad (3.7)$$

İfadesi elde edilir ki bu sonuç genişletilmiş bir yüzeyde enerji denkleminin genel gösterimidir (Incropera ve DeWitt, 2000).

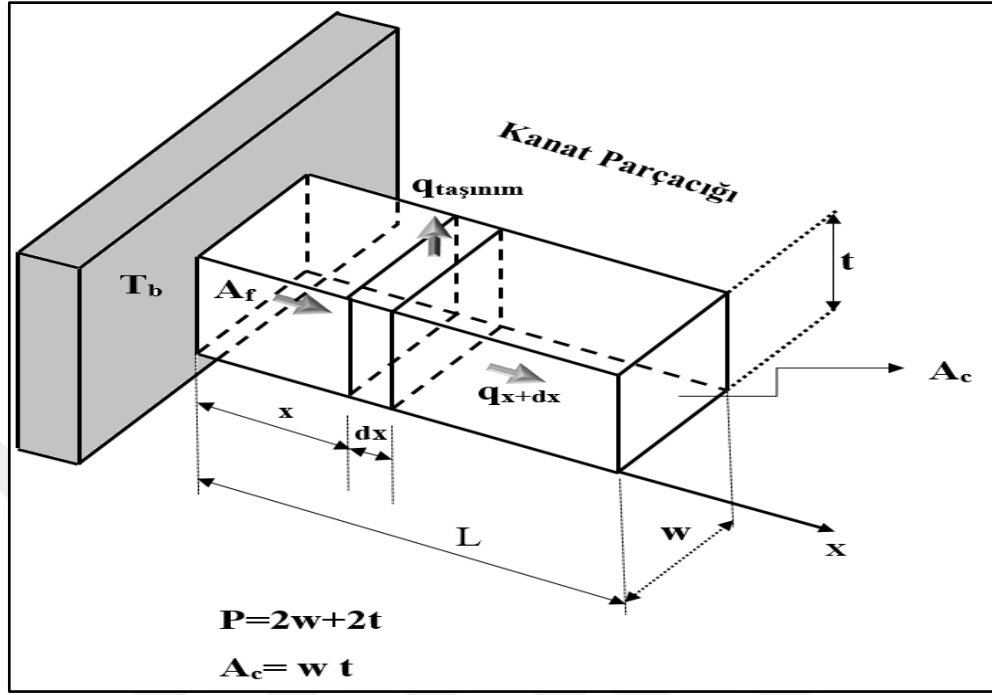
Denklem (3.7)'yi çözmek için geometriyi daha açık belirtmek gerekir. Sabit kesit alanlı düz dikdörtgen ve iğne kanatlı en basit durum ile başlanabilir Şekil (3.28). Her bir kanat $T(0)=T_b$ sıcaklığındaki taban yüzeyine oturtulmuş olup T_∞ sıcaklığındaki bir akışkan içinde bulunmaktadır. İncelenen kanatlar için A_c sabit ve $A_s=P_x$ olup, A_s tabandan x 'e kadar olan yüzey alanı ve P kanadın çevre uzunluğudur. Buna göre $\frac{dA_c}{dx} = 0$ ve $\frac{dA_s}{dx} = P$ olmaktadır ve denklem (3.7) aşağıdaki gibi sadeleşir:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad (3.8)$$

Bu denklem bir değişken dönüşümü ile daha da basitleşir. Sıcaklık farkı θ ,

$$\theta(x) = T(x) - T_\infty \quad (3.9)$$

olarak tanımlansın . Burada T_∞ sabit olduğundan $\frac{d\theta}{dx} = \frac{dT}{dx}$ olur denklem (3.9) denklem (3.8)'de yerine konursa ,



Şekil 3.16. Sabit kesitli düz kanatlar

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (3.10)$$

elde edilir. Bu denklemde ,

$$m^2 = \frac{hP}{kA_c} \quad (3.11)$$

olmaktadır.

Denklem (3.10) lineer , homojen ve sabit katsayılı ikinci mertebeden bir diferansiyel denklemdir. Bu denklemin genel çözümü,

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (3.12)$$

Şeklindedir. Denklem (3.12)'nin denklem (3.10)'un bir çözümü olduğu kolayca sağlanabilir (Incropera ve DeWitt, 2000).

Denklem (3.12)'deki entegrasyon sabitlerinin bulunabilmesi için uygun sınır koşullarının tanımlanması gerekir. Bu şartlardan biri kanadın tabanındaki ($x=0$) sıcaklık olabilir.

$$\theta(0) = T_b - T_\infty = \theta_b \quad (3.13)$$

İkinci sınır koşulu , kanadın ucunda ($x=L$) tanımlanır ve dört ayrı fiziksel durumundan birine karşılık gelebilir. Bu dört farklı durum A,B,C,D şıkları olarak ele alınmıştır.

İlk şık veya A şıkında , kanadın ucundan taşınım ile ısı geçişi gözönüne alınır. Bu uç etrafında şekil (3.29) bir kontrol yüzeyine enerji dengesi uygulanırsa,

$$hA_c[T(L) - T_\infty] = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} \quad (3.14)$$

veya

$$h\theta(L) = -k \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} \quad (3.15)$$

elde edilir. Başka bir deyişle , kanadın ucundan taşınım ile akışkana geçen enerji kanat içinden uca iletilen enerjiye eşit olmalıdır. Denklem (3.12) denklem (3.13) ve (3.14) de yerine konursa ,

$$\theta_b = C_1 + C_2 \quad (3.16)$$

ve

$$h(C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL}) = k m (C_2 e^{-mL} - C_1 e^{mL}) \quad (3.17)$$

elde edilir. C_1 ve C_2 bu denklemlerden çözülerek ara işlemlerden sonra ,

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x) + \left(\frac{h}{mk}\right) \sinh(L-x)}{\cosh mL + \left(\frac{h}{mk}\right) \sinh mL} \quad (3.18)$$

olduğu gösterilebilir. Bu sıcaklık dağılımı şekil (3.30)'da grafiksel olarak gösterilmektedir. Sıcaklık gradyanının büyüklüğü x arttıkça azalmaktadır. Bu eğilim ,

x 'in artması ile iletimle ısı geçişindeki azalmanın bir sonucudur. Şekil (3.30) 'da açıkça görüldüğü gibi kanattan geçen ısı her ikisi de sıcaklık dağılımının kullanılmasını içeren , iki farklı yol ile hesaplanabilir . Kullanılabilecek en basit yol kanat tabanında Fourier yasasının uygulanmasıdır (Incropera ve DeWitt, 2000).

$$q_f = q_b = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = -kA_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} \quad (3.19)$$

Buradan $\theta(x)$ sıcaklık dağılımı kullanılarak ,

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \frac{\sinh mL + \left(\frac{h}{mk}\right) \cosh mL}{\cosh mL + \left(\frac{h}{mk}\right) \sinh mL} \quad (3.20)$$

Bulunur. Ayrıca enerji korunumu kanattan taşınım ile geçen ısının kanat tabanından iletim ile giren ısıya eşit olmasını gerektirir .

Kanat parçacığının ucu adyabatik varsayıldığında ,

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (3.21)$$

yazılabilir. Denklem (3.12)'nin burada yerine konması ve m ile bölünmesinden sonra,

$$C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL} = 0$$

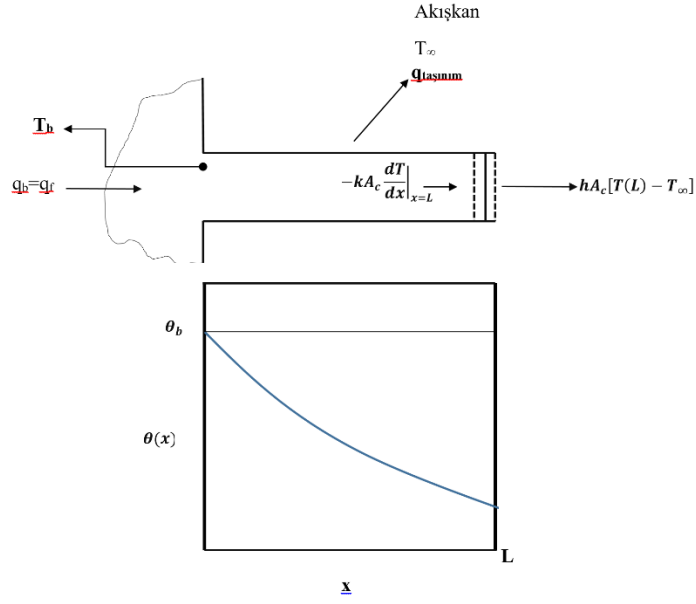
elde edilir. Bu ifadenin denklem (3.16) ile beraber kullanılmasıyla C_1 ve C_2 çözülür ve bu sonuçların denklem (3.12)'de yerine konmasıyla ,

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (3.22)$$

bulunur . Bu sıcaklık dağılımının denklem (3.19) ile birlikte kullanılmasından ,

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \tanh mL \quad (3.23)$$

Kanattan geçen ısı miktarı elde edilir.



Şekil 3.17. Sabit kesitli bir kanatta iletim ve taşınım

3.4.2 Kanat verimi

Kanat ısı performansının bir diğer ölçüsü kanat verimi η_f 'dir. Taşınım için en yüksek sıcaklık farkı , dip ($x=0$) ve akışkan arasındaki sıcaklık farkıdır , $\theta_b = T_b - T_\infty$ bu nedenle bir kanadın yayabileceği enerjinin en yüksek değeri bütün kanat yüzeyi taban sıcaklığında olduğu zaman gerçekleşecektir. Ancak tabiki bu ideal bir durumdu ki kanat içinde bir sıcaklık değişimi her zaman vardır (Incropera ve DeWitt, 2000).

Buna dayanarak kanat verimi ,

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{maks}} \quad (3.24)$$

Biçiminde tanımlanabilir, çalışmamızda sabit kesitli bir kanat parçacığı çalışıldığı için adyabatik uçlu kanat için denklem (3.23) ve (3.24) kullanılarak

$$\eta_f = \frac{\sqrt{hPkA_c}\theta_b \tanh mL}{h PL \theta_b} = \frac{\tanh mL}{mL} \quad (3.25)$$

P = Kanat parçacığının çevresi. (m)

A_c = Kanat parçacığının taşınım ile ısı iletimi alanı (m^2)

= Kanat parçacığının çevresi (P) x kanat uzunluğu (L)

h = Isı taşınım katsayısı ($kW/m^2 \cdot ^\circ C$)

T_b = Kanat parçacığının tabanındaki sıcaklık ($^\circ C$)

T_∞ = Akışkan sıcaklığı ($^\circ C$)

q_{maks} = Kanat alanından gerçekleşen maksimum ısı iletimi. (kW)

q_f = Kanat alanından gerçekleşen gerçek ısı iletimidir. (kW)

3.5 Deneysel Veriler İçin Hesaplama Yöntemi

Test bölgesindeki ısı akısı denklem (3.32) ile belirlenir. Denklem (3.39) ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısını belirlemek için kullanılacaktır. Şekil 3.30'da Şekil 3.12'deki deney tesisatı şemasından anlaşılacağı üzere fişek rezistanslardan gelen ısının yarattığı ısı akısı Q_T olarak

$$d_h = \frac{4(W_{ch}H_{ch})}{2(W_{ch}+H_{ch})} \quad (3.29)$$

$$Re = \frac{\rho_b v_m d_h}{\mu_b} \quad (3.30)$$

Q_T Voltaj ayarlamasını yapabildiğimiz Varyak vasıtasıyla fişek rezistanslara verilen akım ile elde edilen güce eşittir. Bu güç aşağıdaki bağıntıyla elde edilebilir.

$$Q_T = I \cdot V \quad (3.31)$$

$$Q_{ts} + Q_{loss} = Q_T = \dot{m} c_p (T_o - T_{in}) \quad (3.32)$$

Mikrokanal fin verimi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir.

$$\eta = \sqrt{\frac{\tanh(m H_{fin})}{m H_{fin}}} \quad (3.33)$$

Fin parametresi aşağıdaki şekilde tarif edilir.

$$m = \sqrt{\frac{h_{ave} 2(L+W_{fin})}{k_s (W_{fin} L)}} \quad (3.34)$$

Mikrokanal'dan geçen ısı akısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$q_w = \frac{q_{base} (W_{ch} W_{fin})}{W_{ch} + 2 \eta H_{fin}} \quad (3.35)$$

Temel ısı akısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$q_{base} = \frac{\dot{Q}_{TS}}{A_{base}} \quad (3.36)$$

$$\Delta T = T_{wall} - T_{bulk} \quad (3.37)$$

Duvar sıcaklığı şu şekilde hesaplanabilir.

$$T_w = T_{tc} - \frac{q_{base} \delta_{tc}}{k_s} \quad (3.38)$$

Ortalama deneysel zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$h_{ave,exp} = \frac{q_w}{\Delta T} \quad (3.39)$$

Ortalama Nusselt sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Nu_{ave-exp} = \frac{h_{ave-exp} D_h}{k_f} \quad (3.40)$$

Yukarıdaki bölümlerdeki denklemlerle hesaplanan değerler grafiklere dönüştürülerek aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.



BÖLÜM IV

DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

4.1 Farklı Isı Akısı ve Sıcaklıklarda Grafit Nanosıvıların Ortalama Zorlanmış Taşınım İle Isı Geçişi Katsayısına Etkisi

Zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının artışı ısı eşanjörlerinin tasarımında nanoakışkanın ısı iletim katsayısına göre çok daha önemli bir göstergedir. Nanosıvıların ısı iletim katsayısı baz sıvısından oldukça farklıdır. Literatürdeki bazı deneyler tarafından rapor edilen geliştirme sonuçları ısı iletim katsayısındaki artışı aşan bir değişimi yoğunluk, özgül ısı ve viskozite üzerinde de gösterdiğini belirlemiştir. (Kakac ve Pramuanjaroenkij, 2009).

Ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının tespiti için öncelikle 20 °C-30 °C'den (2'şer °C artarak) başlayarak $D_h=1600$ um 1-2-3-4-5-6-7 lt/dak debi aralığında ve 100-1100 W (100'er Watt artırılarak) ısıl güç verilerek deneyler yapılmıştır. Aşağıdaki çizelgede ortalama zorlanmış taşınım ile katsayıları (h_{ort}) birimi $W/m^2 K$ olarak verilmektedir. Çizelge 4.1.'de 0.5,1.0-2.0 yüzde hacimsel nano grafit katkı oranında ortalama deneysel ısı geçişi katsayısındaki değişim görülmektedir.

Çizelge 4.1. 20 °C ve 1lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{verilen}$ - h_{ort} çizelgesi

**Ortalama Zorlanmış Taşınım Isı Geçişi Katsayısı h_{ort}
(W/m^2K)**

Watt	Saf Su	0.5 vol %	1.0 vol %	1.5 vol %	2.0 vol %
100	539,2754	661,293	777,2302	911,2613	1036,364
200	780,6541	954,1233	1129,604	1327,383	1512,792
300	917,5524	1119,344	1330,705	1565,706	1786,558
400	1005,737	1225,446	1460,731	1720,125	1964,296
500	1067,282	1299,345	1551,703	1828,316	2088,991
600	1112,675	1353,769	1618,918	1908,335	2181,305
700	1147,537	1395,521	1670,608	1969,919	2252,401
800	1175,151	1428,566	1711,595	2018,78	2308,841
900	1197,565	1455,369	1744,892	2058,491	2354,733
1000	1216,121	1477,547	1772,476	2091,403	2392,782
1100	1231,737	1496,201	1795,702	2119,125	2424,839

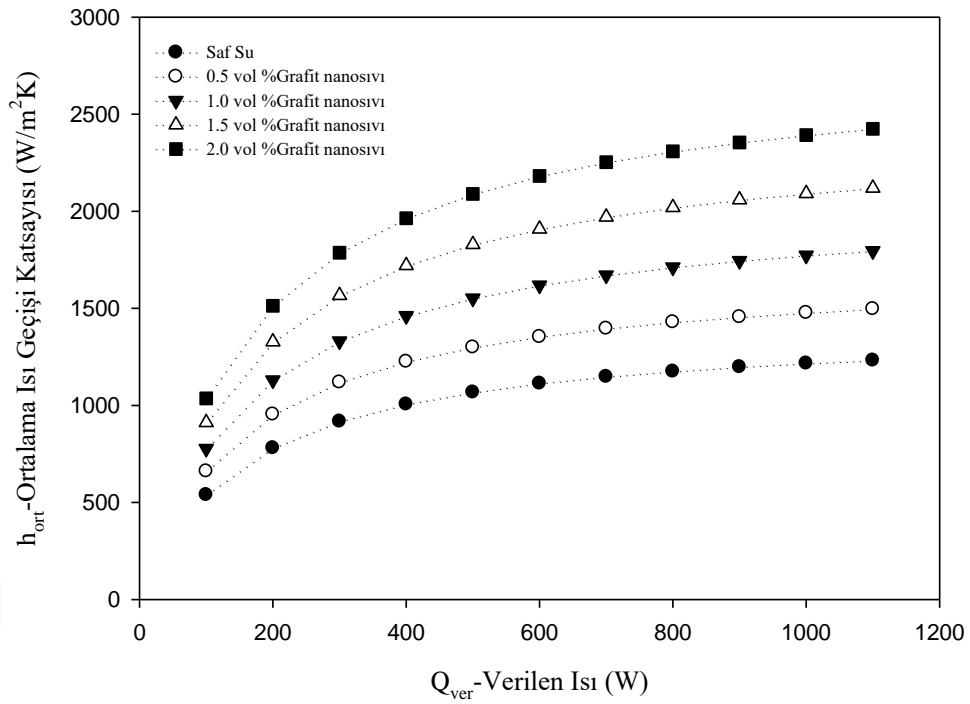
Çizelge 4.2.'de saf suya oranla 0.5-2.0 vol % hacimsel oranlarda grafit nanosivinin ortalama zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısındaki yüzde % artış miktarını göstermektedir.

Çizelge 4.2. 20 °C ve 1 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosivî şartlarında $q_{\text{verilen}} - h_{\text{ort}}$ ortalama ısı geçişi katsayısı yüzde artış değerleri

Ortalama Zorlanmış Taşınım Isı Geçişi Katsayısı h_{ort} (W/m²K)				
Watt	0.5 vol %	1.0 vol %	1.5 vol %	2.0 vol %
100	18,45	30,62	40,82	47,96
200	18,18	30,89	41,19	48,40
300	18,03	31,05	41,40	48,64
400	17,93	31,15	41,53	48,80
500	17,86	31,22	41,62	48,91
600	17,81	31,27	41,69	48,99
700	17,77	31,31	41,75	49,05
800	17,74	31,34	41,79	49,10
900	17,71	31,37	41,82	49,14
1000	17,69	31,39	41,85	49,18
1100	17,68	31,41	41,88	49,20

Çizelge 4.2.'den anlaşılacağı gibi 5lt/dak debi şartlarındaki grafit nanosivî hacimsel 0.5-2.0 vol % oranın artışıyla % 18-49 bandında artış göstermiştir. Görüldüğü gibi hacimsel oranın katlı artışının aksine ortalama zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısındaki artış aynı oranda gerçekleşmemiştir.

Çok Kanallı Pin-Fin Mikrokanal $D_h=1,6 \times 10^3 \mu\text{m}$ $T_{in}=20^\circ\text{C}$ 1lt/dak



Şekil 4.1. Ortama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının 1lt/dak debi şartlarında mikrokanala verilen ısı ile değişimi

Çizelge 4.3. 20°C ve 3 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosivisi şartlarında $q_{verilen}$ - h_{ort} çizelgesi

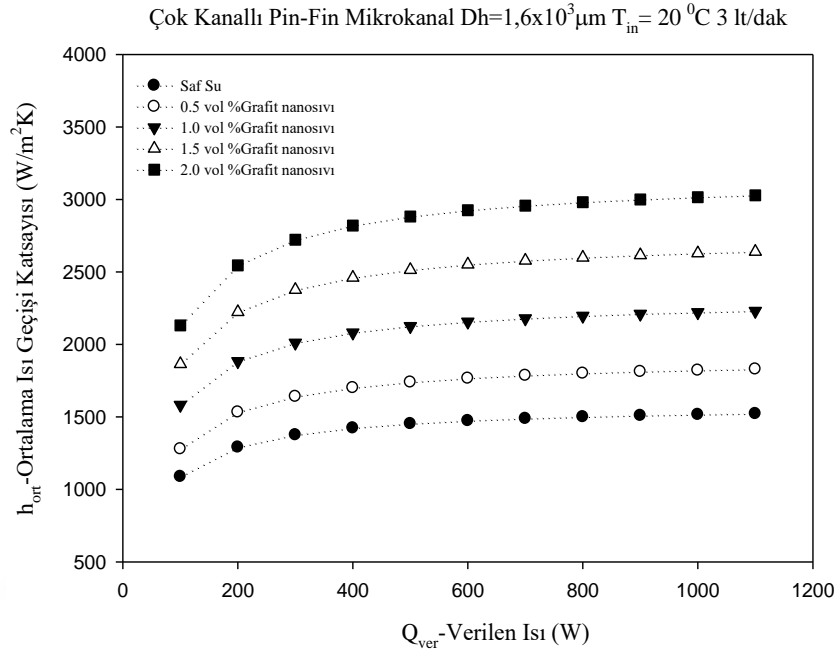
Ortalama Isı Geçişi Katsayısı h_{ort} (W/m ² K)					
Watt	Saf Su	0.5 vol	1.0 vol	1.5 vol	2.0 vol
100	1088,00	1278,84	1582,36	1864,81	2131,08
200	1290,52	1532,48	1883,24	2223,68	2545,83
300	1375,89	1640,96	2010,69	2376,11	2722,45
400	1422,96	1701,17	2081,10	2460,43	2820,28
500	1452,78	1739,47	2125,77	2513,96	2882,42
600	1473,36	1765,98	2156,63	2550,96	2925,40
700	1488,42	1785,41	2179,23	2578,07	2956,89
800	1499,92	1800,26	2196,49	2598,78	2980,95
900	1508,99	1811,99	2210,10	2615,11	2999,94
1000	1516,33	1821,48	2221,12	2628,33	3015,31
1100	1522,38	1829,32	2230,21	2639,25	3028,00

Çizelge 4.3.'deki verilerden anlaşılacağı üzere 20 °C ve 3lt/dak debi şartlarında çok kanallı mikrokanal ısı eşanjörü kullanılarak yapılan deneylerde nanosıvı debisindeki artış nanosıvının ortalama ısı geçişi katsayısındaki artışa sebep olmuştur.

Çizelge 4.4. 20 °C ve 3 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{\text{verilen}} - h_{\text{ort}}$ ortalama mutlak hata yüzdesi değerleri

Ortalama Isı Geçişi Katsayısı h_{ort} (W/m²K)				
Watt	0.5 vol %	1.0 vol %	1.5 vol %	2.0 vol %
100	14,92	31,24	41,66	48,95
200	15,79	31,47	41,96	49,31
300	16,15	31,57	42,09	49,46
400	16,35	31,62	42,17	49,55
500	16,48	31,66	42,21	49,60
600	16,57	31,68	42,24	49,64
700	16,63	31,70	42,27	49,66
800	16,68	31,71	42,28	49,68
900	16,72	31,72	42,30	49,70
1000	16,75	31,73	42,31	49,71
1100	16,78	31,74	42,32	49,72

Çizelge 4.4.'deki verilerden anlaşılacağı üzere 20 °C ve 3 lt/dak debi şartlarında çok kanallı mikrokanal ısı eşanjörü kullanılarak yapılan deneylerde nanosıvı debisindeki artış nanosıvının ortalama ısı geçişi katsayısındaki artışa sebep olmuştur.



Şekil 4.2. Ortama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının 3 lt/dak debi şartlarında mikrokanala verilen ısı ile değişimi

Çizelge 4.5. $20^\circ C$ ve 5 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosivisi şartlarında $q_{verilen}$ - h_{ort} çizelgesi

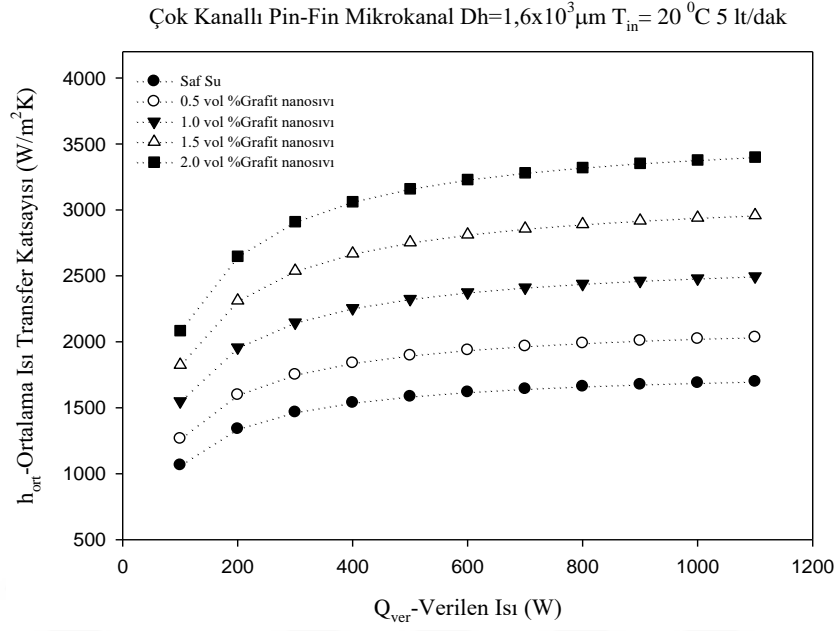
Ortalama Isı Geçişi Katsayısı h_{ort} (W/m²K)

Watt	Saf Su	0.5 vol. %	1.0 vol. %	1.5 vol. %	2.0 vol. %
100	1065,30	1266,43	1548,77	1824,83	2084,97
200	1340,15	1598,51	1957,29	2312,21	2648,38
300	1466,25	1751,62	2145,97	2538,18	2910,54
400	1538,64	1839,72	2254,64	2668,58	3062,11
500	1585,60	1896,97	2325,29	2753,45	3160,86
600	1618,54	1937,15	2374,90	2813,10	3230,32
700	1642,92	1966,92	2411,66	2857,31	3281,83
800	1661,69	1989,85	2439,98	2891,39	3321,55
900	1676,59	2008,05	2462,47	2918,47	3353,12
1000	1688,70	2022,86	2480,76	2940,49	3378,80
1100	1698,74	2035,14	2495,93	2958,77	3400,12

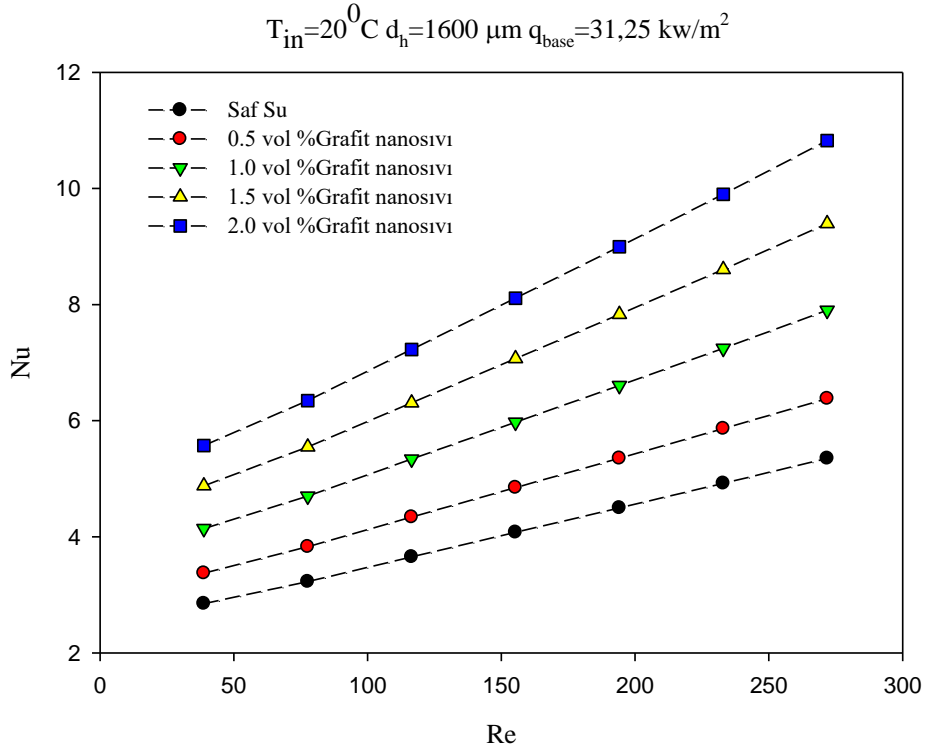
Çizelge 4.6. 20 °C ve 5 lt/dak 0.5-2.0 vol % nanosıvı şartlarında $q_{\text{verilen}} - h_{\text{ort}}$ ortalama mutlak hata yüzdesi değerleri

Watt	0.5 vol %	1.0 vol %	1.5 vol %	2.0 vol %
100	15,88	31,22	41,62	48,91
200	16,16	31,53	42,04	49,40
300	16,29	31,67	42,23	49,62
400	16,37	31,76	42,34	49,75
500	16,41	31,81	42,41	49,84
600	16,45	31,85	42,46	49,90
700	16,47	31,88	42,50	49,94
800	16,49	31,90	42,53	49,97
900	16,51	31,91	42,55	50,00
1000	16,52	31,93	42,57	50,02
1100	16,53	31,94	42,59	50,04

Çizelge 4.6.'daki deneysel verilerden alınan sonuçlardan anlaşılacağı üzere 20 °C ve 5 lt/dak debi şartlarında 0.5-2.0 hacimsel nanosıvı şartlarında çok kanallı pin-fin mikrokanal ısı eşanjörü kullanılarak yapılan deneylerde nanosıvı debisindeki artış nanosıvının ortalama ısı geçişi katsayısındaki artışa sebep olmuştur.

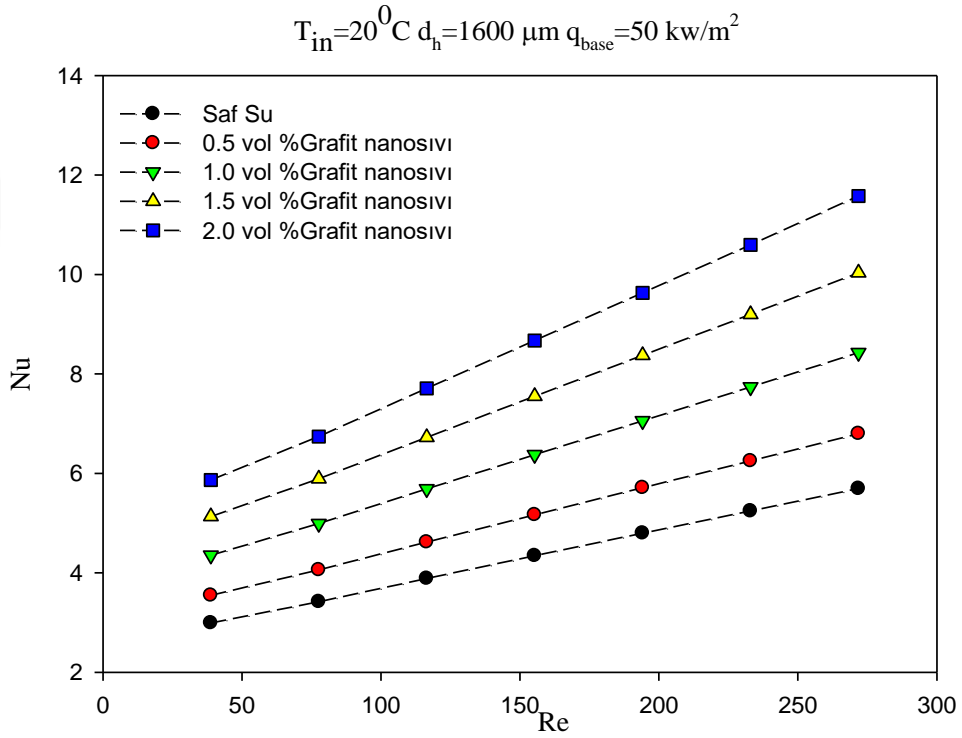


Şekil 4.3. Ortama zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısının 5 lt/dak debi şartlarında mikrokanala verilen ısı ile değişimi

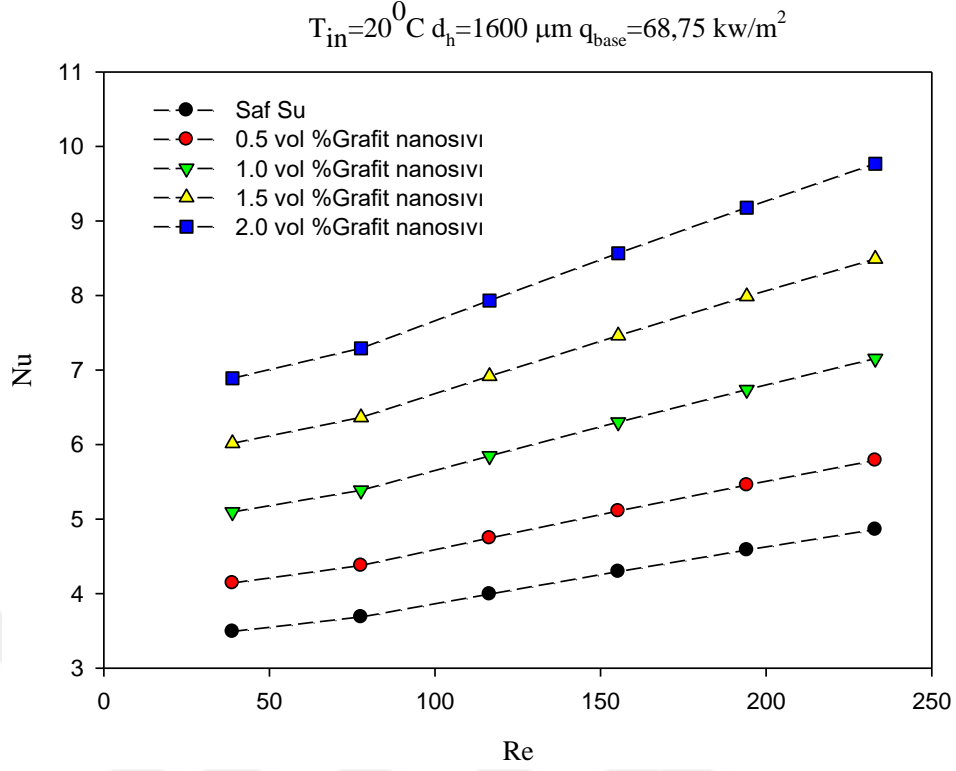


Şekil 4.4. 20°C $31,25 \text{ kw/m}^2$ sabit ısı akısındaki Re-Nu değişimi

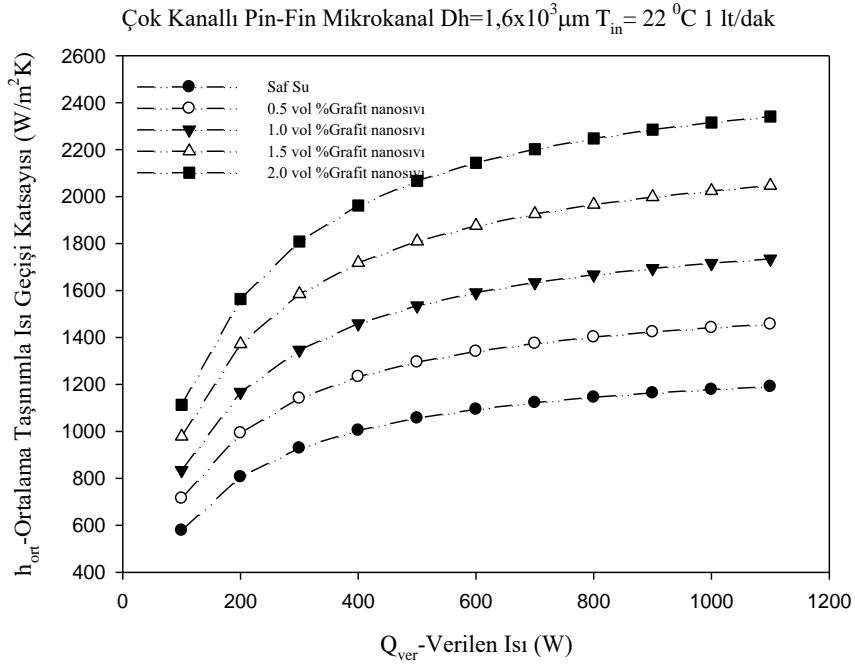
Şekil 4.4.'deki grafikten anlaşılacağı gibi mikrokanal eşanjörde 0.5-2.0 hacimsel oranlarda hazırlanmış nanosivinin çok kanallı pin-fin mikrokanalda Reynolds sayısına bağlı olarak Nusselt sayısının arttığı açıkça gözlemlenmektedir. Ayrıca deneysel sonuçlar göstermiştir ki hacimsel oranın artışıyla birlikte grafit nanosivinin Nusselt sayısında artma olmaktadır. Ayrıca aşağıdaki 20 °C 'de ve 31,5-50-68,75 kw/m² deki ısı akılarında yapılan deney sonuçlarına göre ısı akısı artıkça Reynolds sayısının artışına bağlı olarak Nusselt sayısında da artış gözlenmiştir.



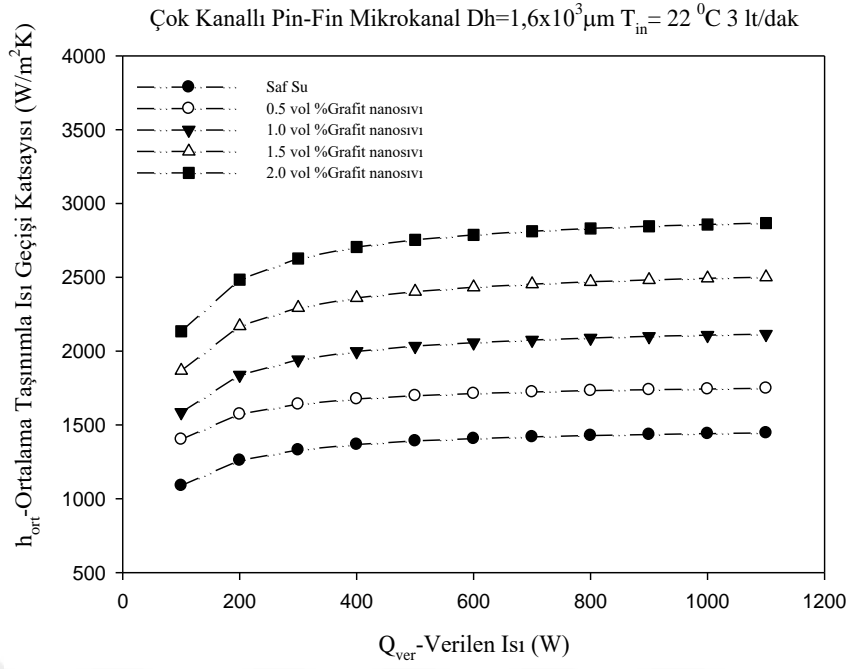
Şekil 4.5. 20 °C 50 kw/m² sabit ısı akısındaki Re-Nu değişimi



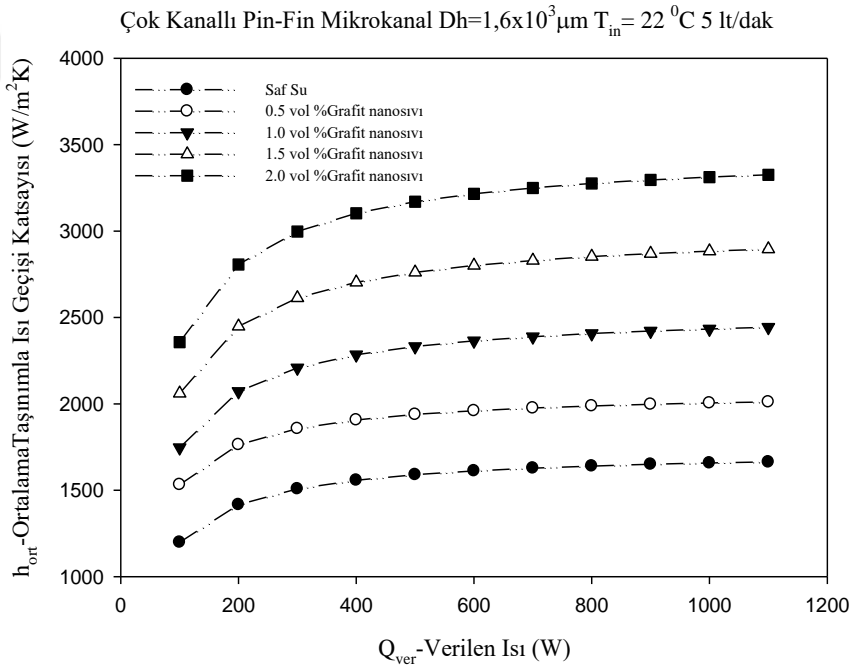
Şekil 4.6. $20^0 C$ $68,75 kw/m^2$ sabit ısı akısındaki Re-Nu değişimi



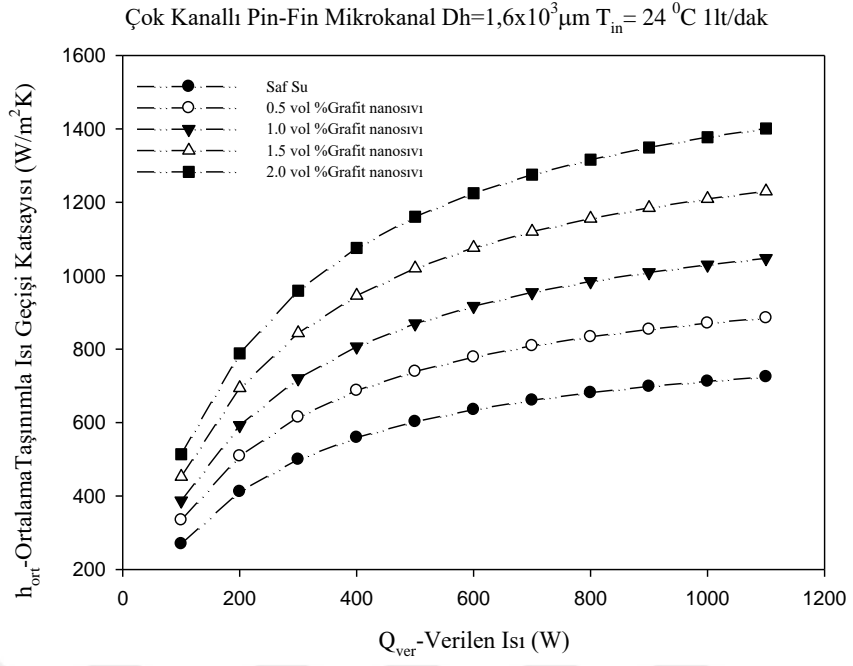
Şekil 4.7. $22^0 C$ ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



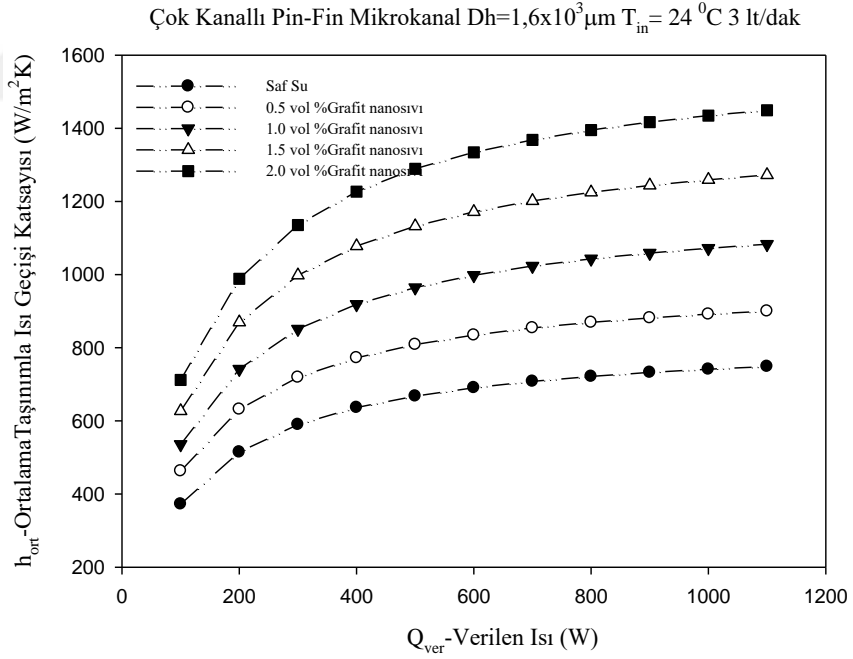
Şekil 4.8. 22°C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



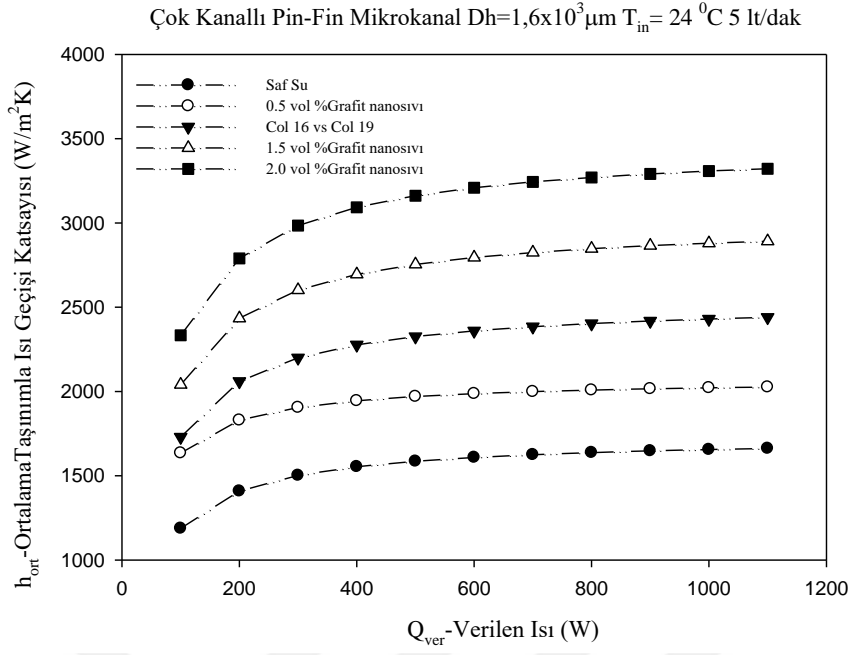
Şekil 4.9. 22°C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



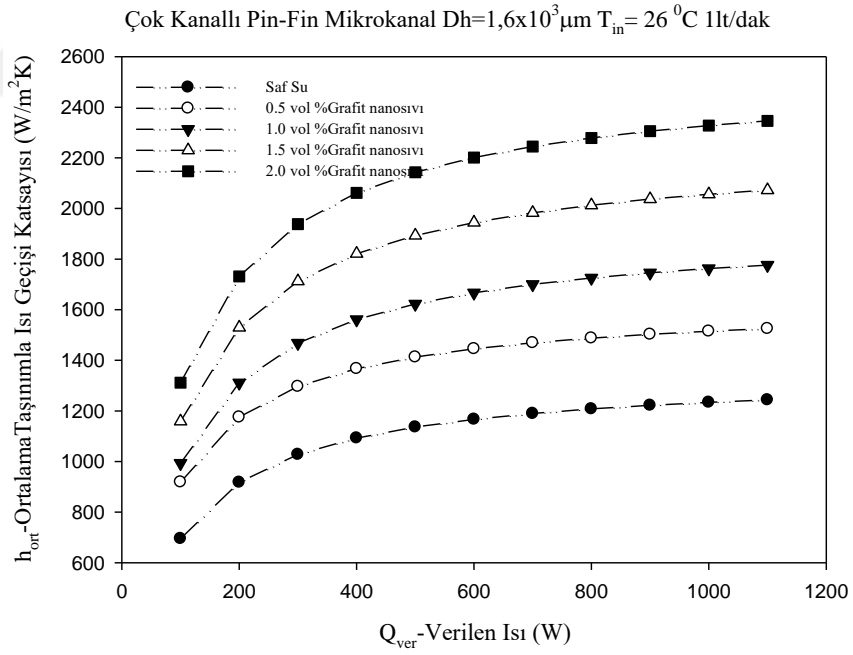
Şekil 4.10. 24°C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



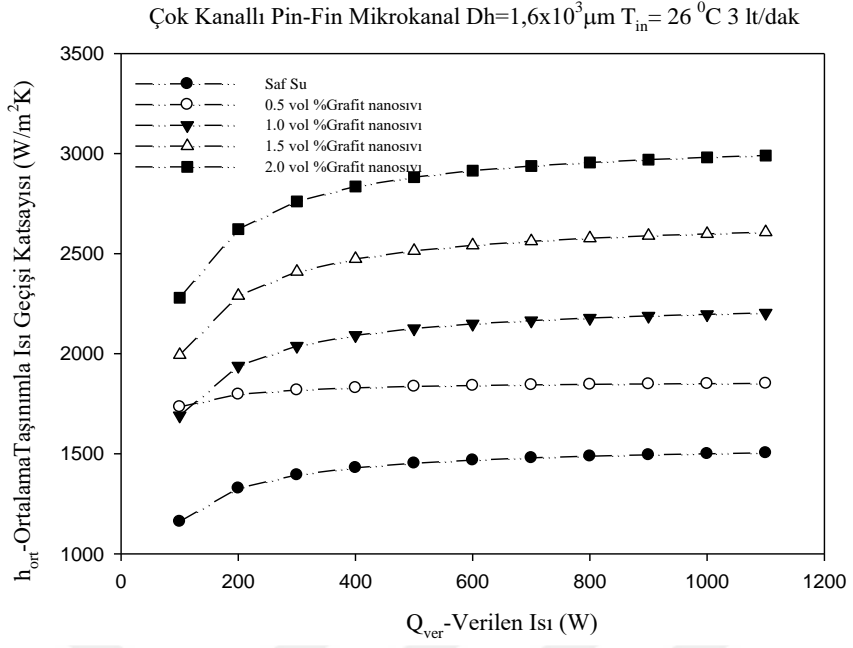
Şekil 4.11. 24°C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



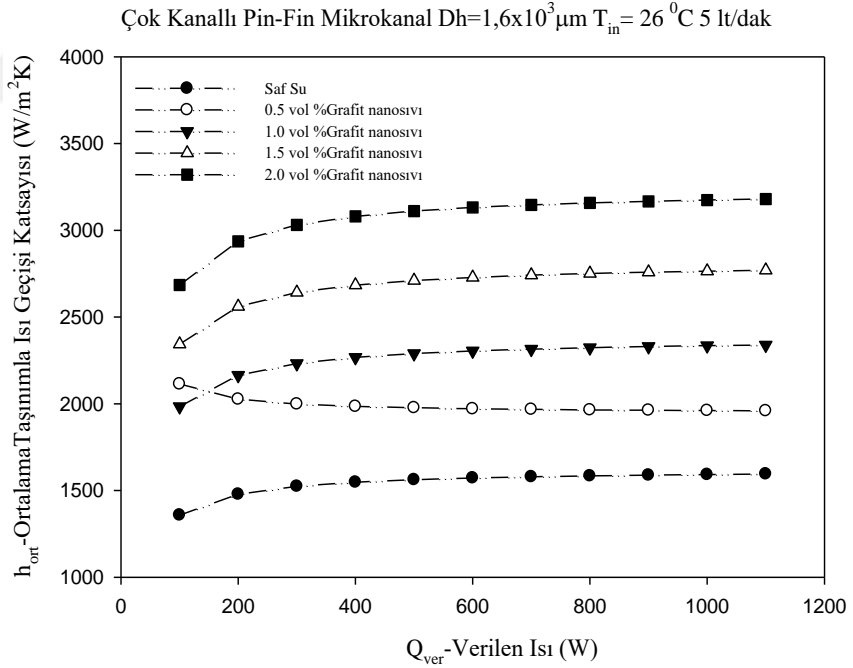
Şekil 4.12. 24°C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



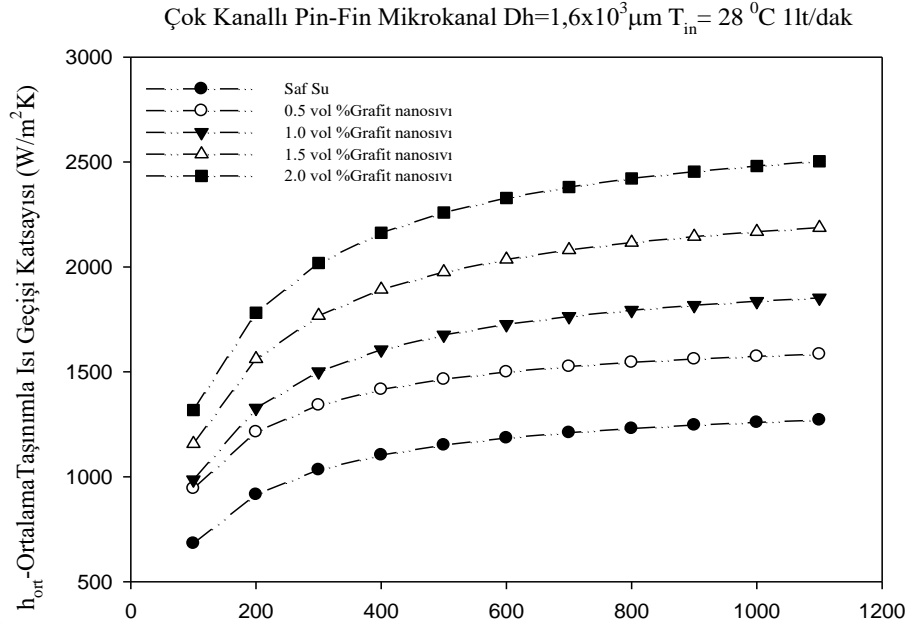
Şekil 4.13. 26°C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



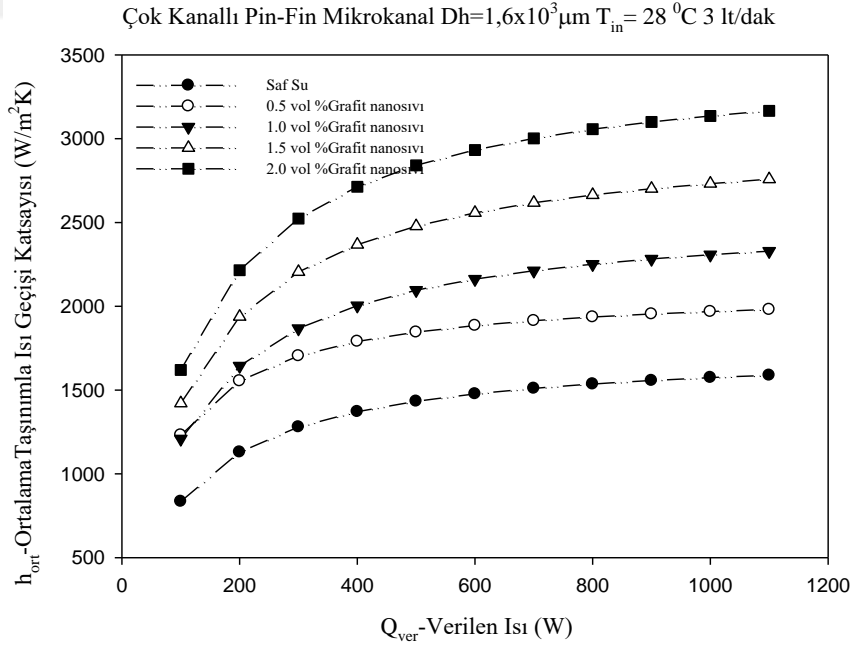
Şekil 4.14. 26°C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



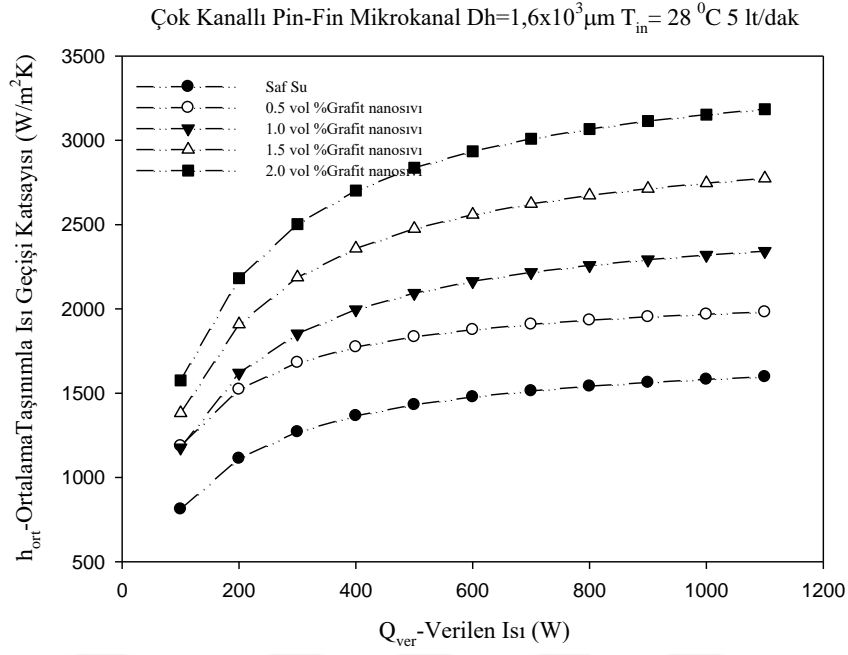
Şekil 4.15. 26°C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



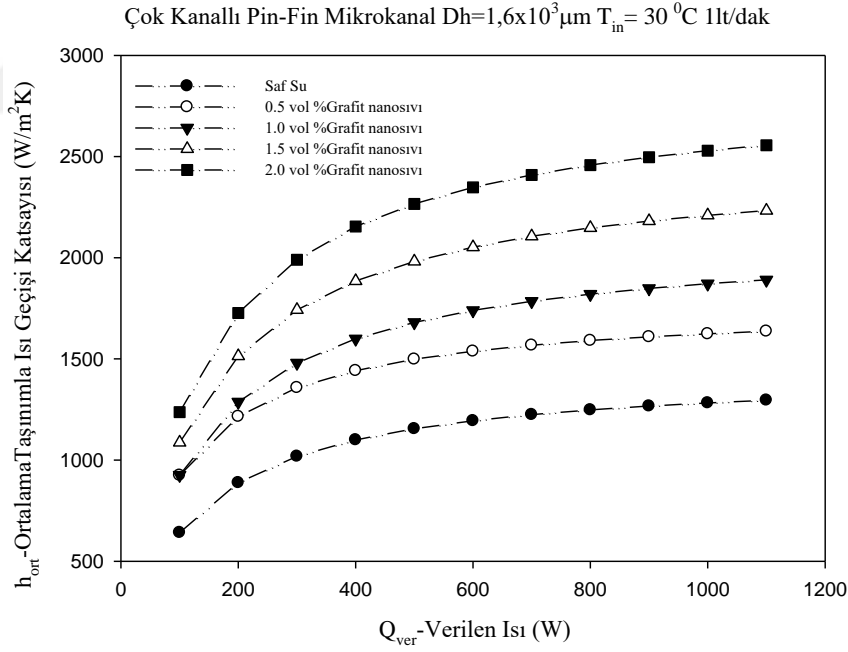
Şekil 4.16. 28°C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



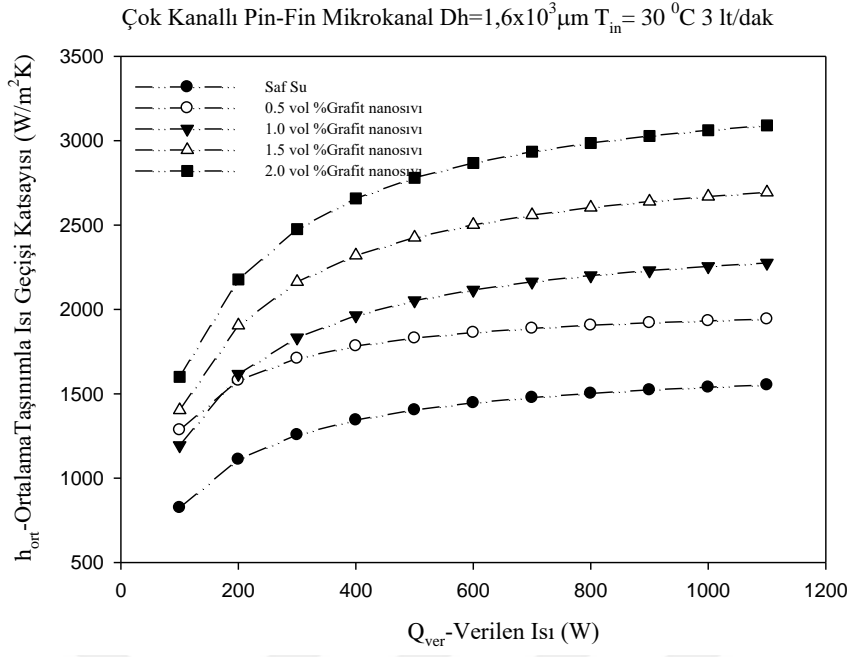
Şekil 4.17. 28°C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



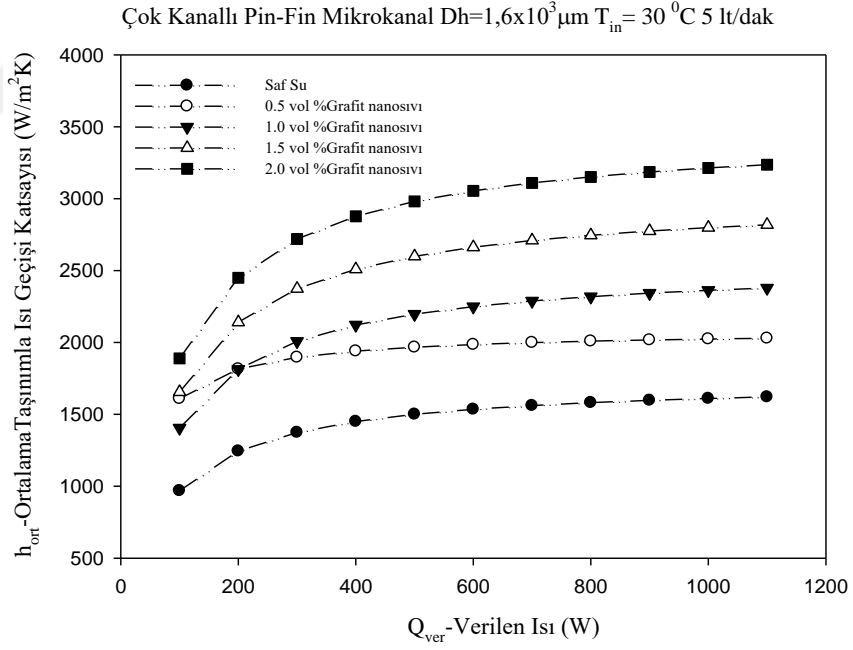
Şekil 4.18. 28°C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



Şekil 4.19. 30°C ve 1 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi

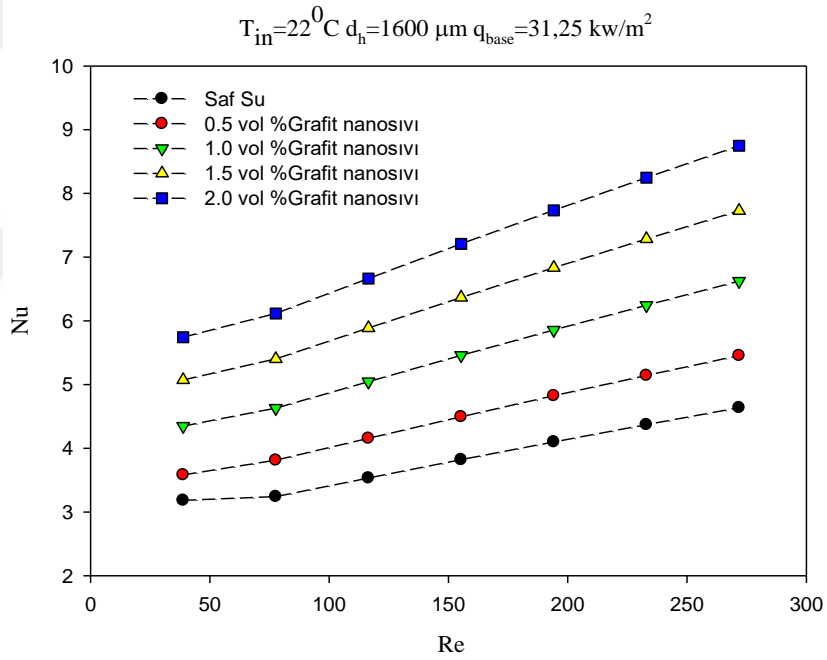


Şekil 4.20. 30°C ve 3 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi



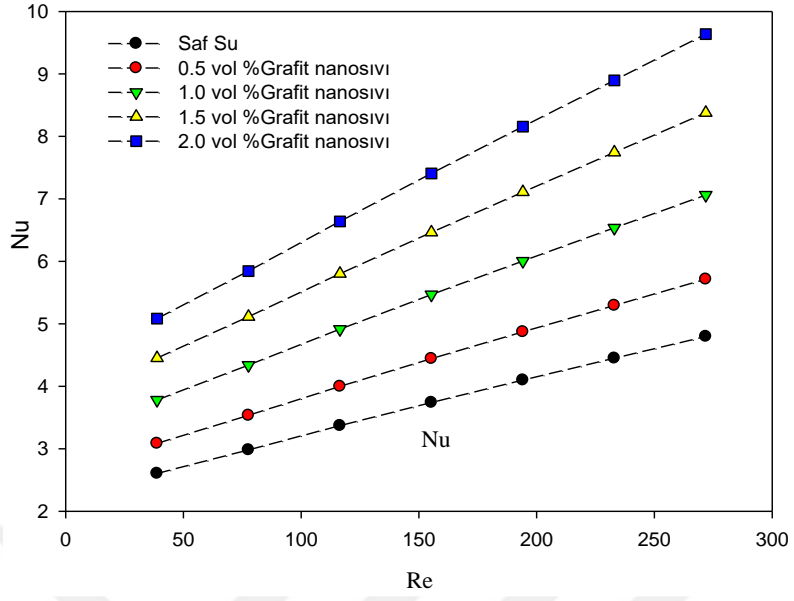
Şekil 4.21. 30°C ve 5 lt/dak şartlarında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısının verilen ısı ile değişimi

$T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası 2'şer derece artırılarak yapılan deneylerdeki zorlanmış taşınım ile ısı geçişi Re-Nu sonuçları göstermiştir ki Nano grafit parçacık hacimsel yüzde 0.5-2.0 arasındaki artışıyla Nusselt sayısında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Aynı zamanda Reynolds sayısındaki artışla birlikte her bir hacimsel yoğunlukta Nusselt sayısında artış meydana gelmiştir. Bu sonuç grafit malzemenin hacimsel yoğunluk artışının nanosivinin mikrokanaldaki ısı performansını artırırğını açıkça göstermektedir. Ayrıca deneyler $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dereceden başlayarak 2'şer derece artan sıcaklıklarda yapıldığı için grafit nanosivini zorlanmış taşınım ısı geçişi koşullarında artan sıcaklıkla Nusselt sayısında belirgin artış gözlemlenmiştir. Bu sonuç Şekil 4.22'den Şekil 4.36'ya kadar olan grafiklerde açıkça görülmektedir.



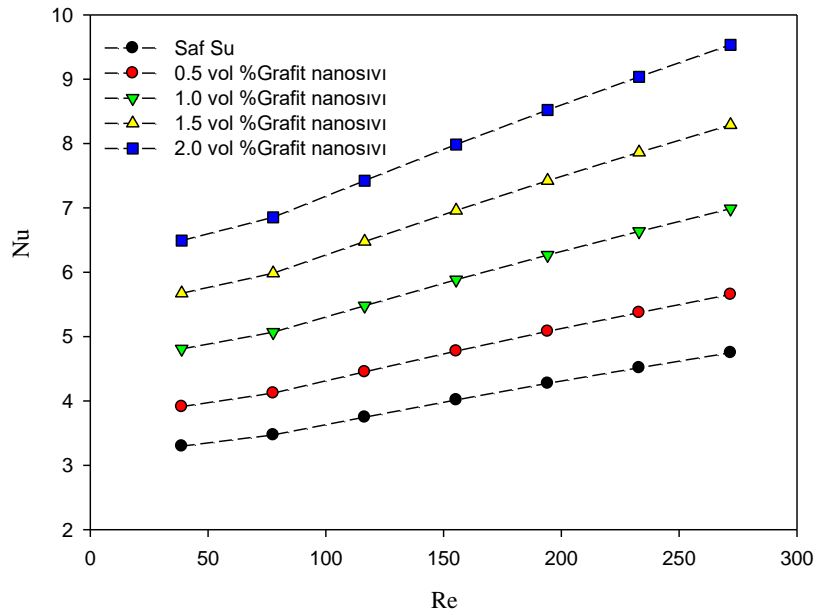
Şekil 4.22. $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ve $31,25\text{ kw/m}^2$ Re-Nu Mikrokanalda değişimi

$$T_{in}=22^{\circ}C \quad d_h=1600 \mu m \quad q_{base}=50 \text{ kw/m}^2$$

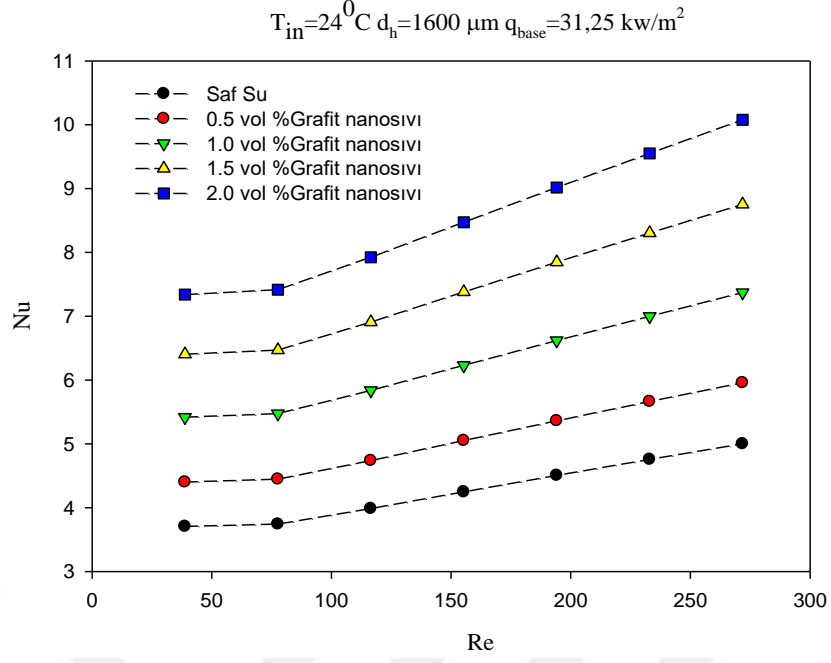


Şekil 4.23. 22 °C’de ve 50 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi

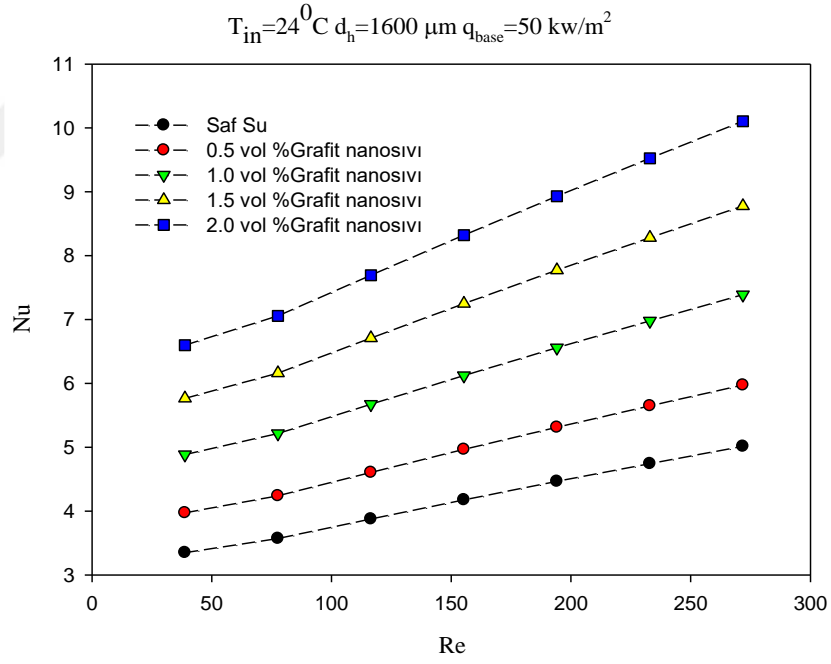
$$T_{in}=22^{\circ}C \quad d_h=1600 \mu m \quad q_{base}=68,75 \text{ kw/m}^2$$



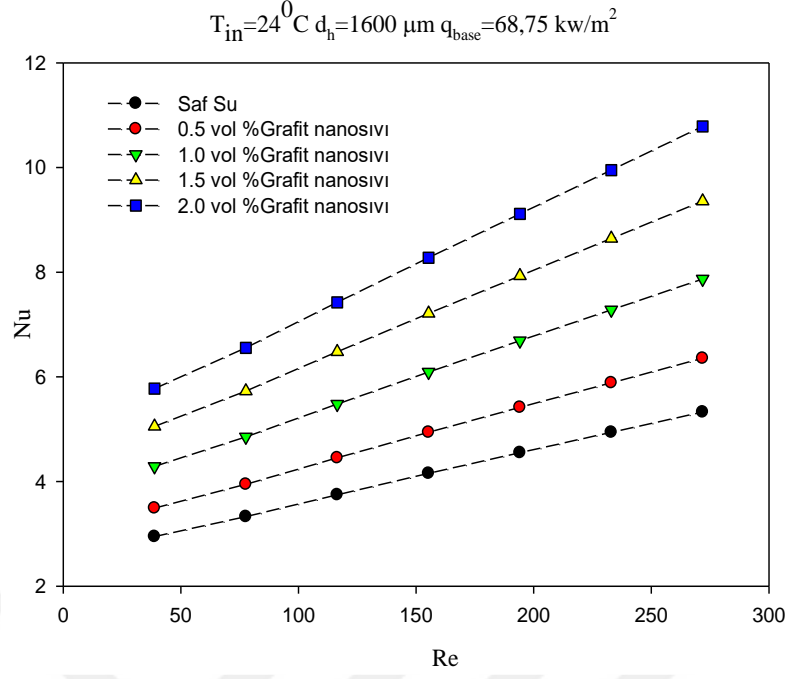
Şekil 4.24. 22 °C’de ve 50 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



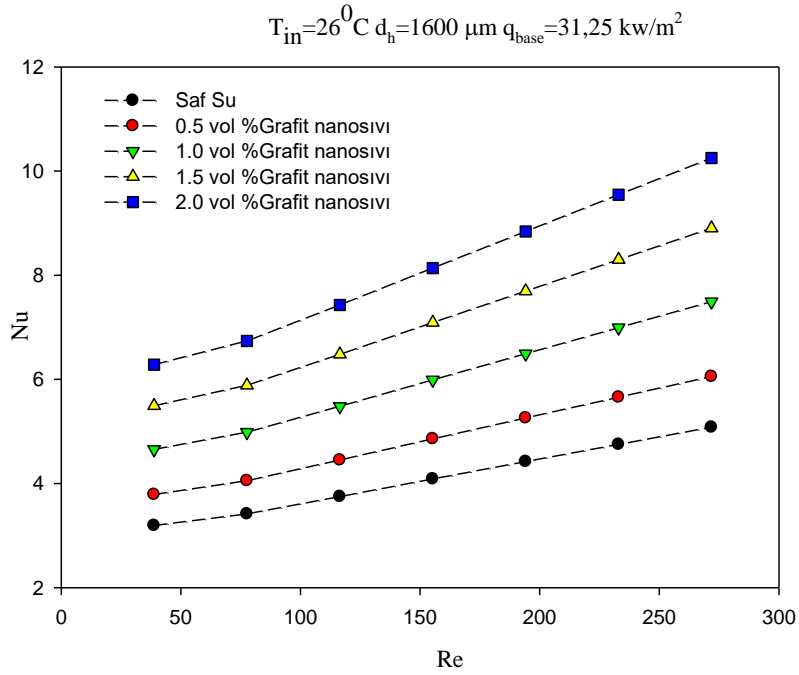
Şekil 4.25. 22 °C’de ve 50 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



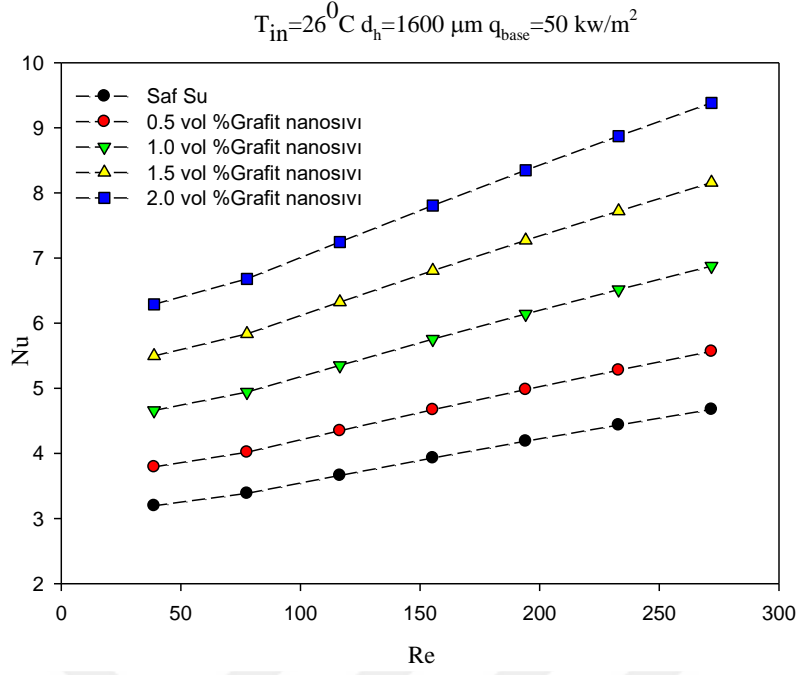
Şekil 4.26. 24 °C’de ve 50 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



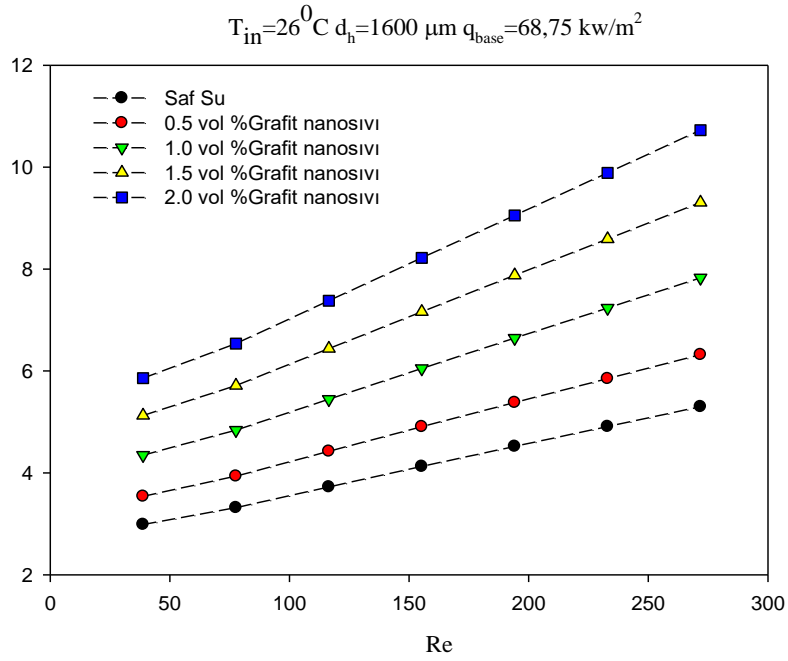
Şekil 4.27. 22 °C’de ve 68,75 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



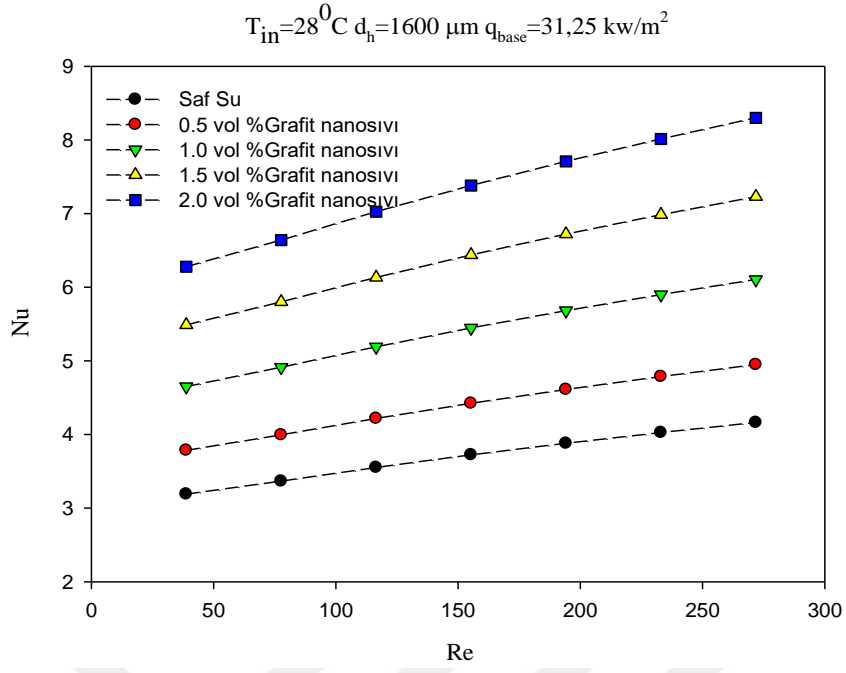
Şekil 4.28. 26 °C’de ve 31,25 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



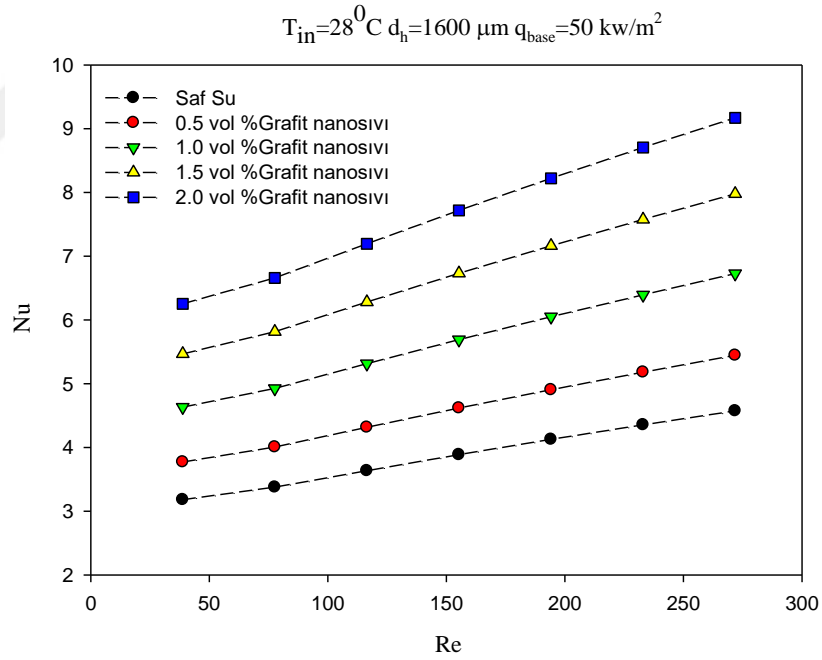
Şekil 4.29. 26^0C 'de ve $50\ \text{kw/m}^2$ Mikrokanalda Re-Nu değişimi



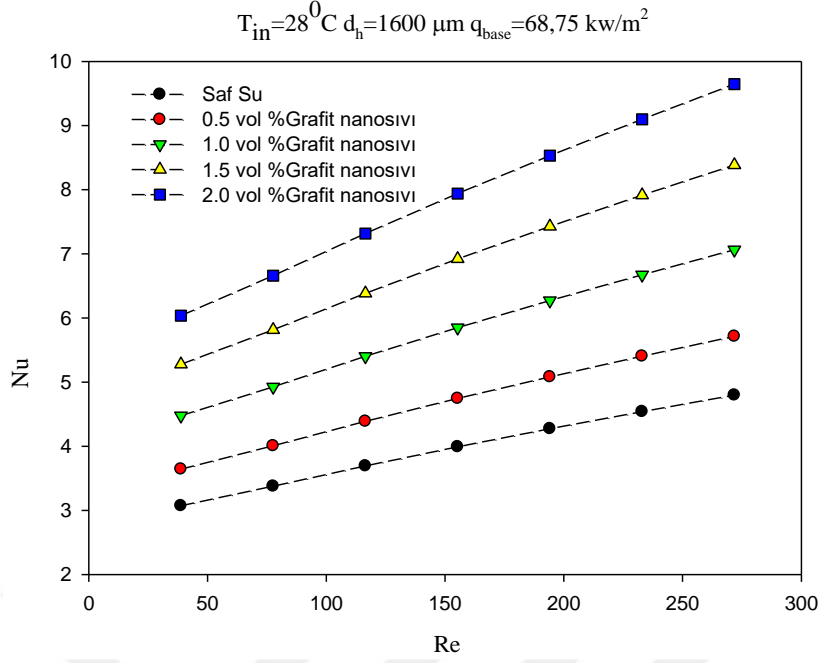
Şekil 4.30. 26^0C 'de ve $68,75\ \text{kw/m}^2$ Mikrokanalda Re-Nu değişimi



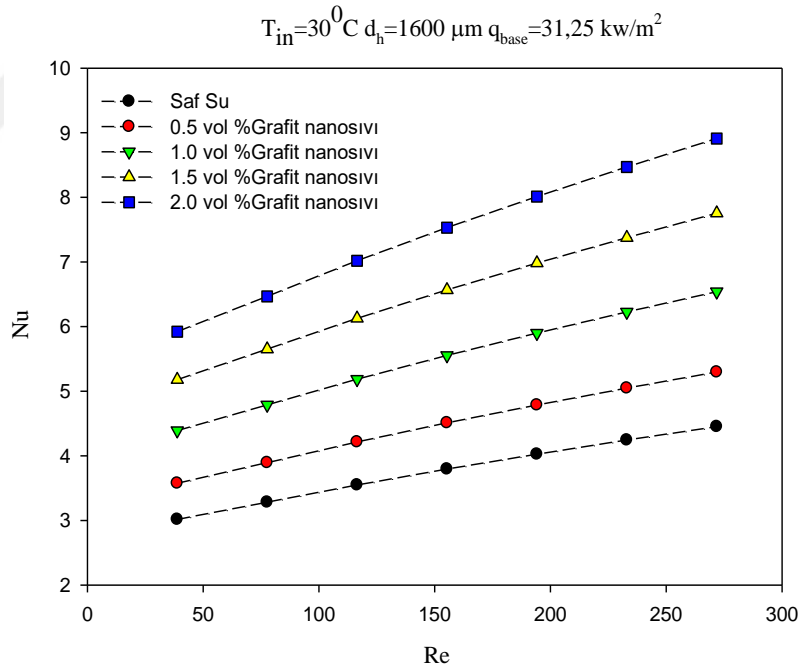
Şekil 4.31. 28 °C’de ve 31,25 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



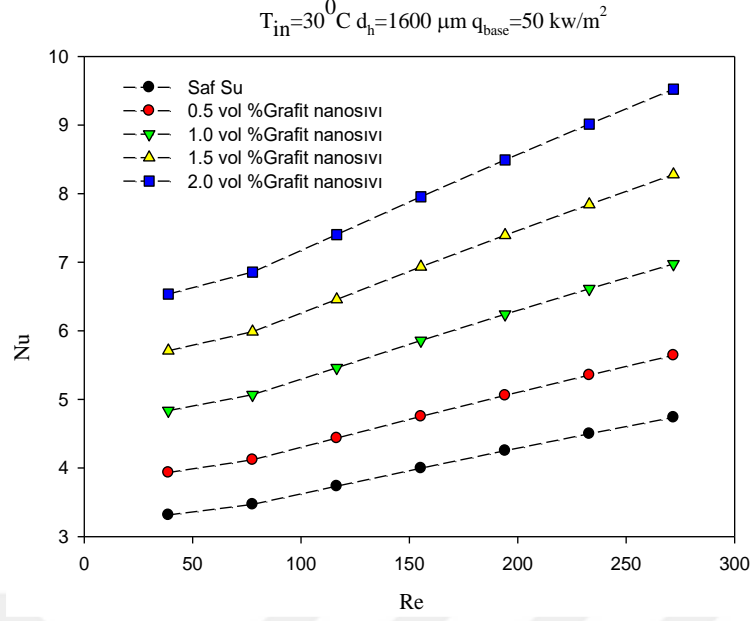
Şekil 4.32. 28 °C’de ve 50 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



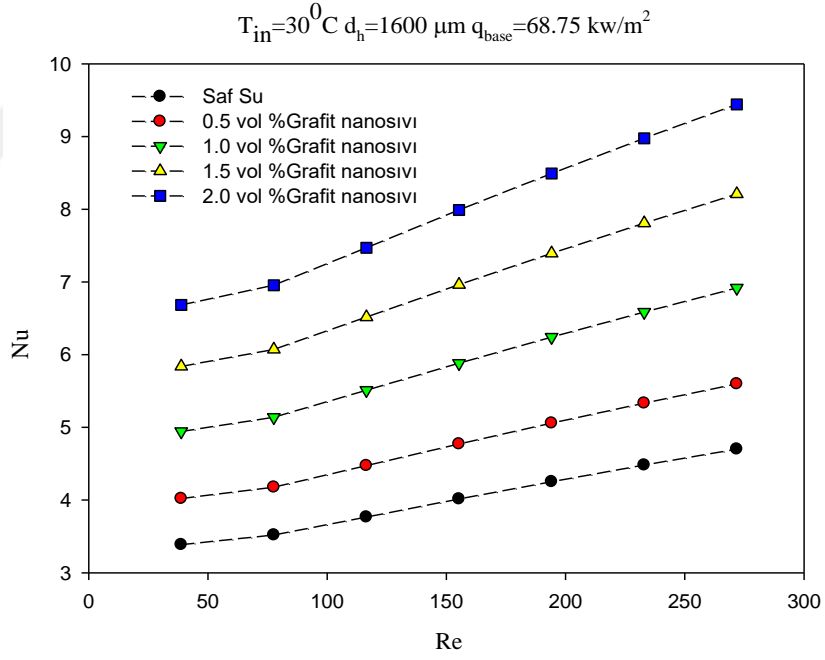
Şekil 4.33. 28°C 'de ve $68,75\ \text{kw/m}^2$ Mikrokanalda Re-Nu değişimi



Şekil 4.34. 30°C 'de ve $31,25\ \text{kw/m}^2$ Mikrokanalda Re-Nu değişimi



Şekil 4.35. 30 °C’de ve 50 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi



Şekil 4.36. 30 °C’de ve 68.75 kw/m² Mikrokanalda Re-Nu değişimi

4.2 Deney Sonuçlarının Literatürdeki Denklemlerle Karşılaştırılması

Deneylerde elde edilen sonuçlar literatürdeki denklemlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada Çizelge 4.7’de kullanılan denklemler kullanılarak elde edilen Nusselt verileri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve karşılaştırılan veriler grafik haline getirilmiştir. Bu denklemlerden en iyi sonucu % 26.3 ile Sajadi ve Kazemi (2011) almıştır. Literatürdeki bilinen diğer denklemlerin bağıl yüzdelik hataları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

$$\text{Yüzde Bağıl Hata (MAPE)} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right|$$

x_i = Deneysel verilerden elde edilen veri.

\hat{x}_i = Literatürdeki denklemlerden elde edilen veri.

n = Veri Sayısı

Yapılan yüzde bağıl hata hesaplamalarında Çizelge (4.7)’de 24 adet korelasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında Sajadi ve Kazemi (2011)’in korelasyonu deneysel verilerden elde sonuçlarla en iyi yakınsamayı yakalayan korelasyon olmuştur.

Çizelge 4.7. Kaynaklardaki bazı araştırmacıların korelasyonlarından elde edilen verilerin deneysel verilerle karşılaştırıldığında elde edilen değişim miktarını gösterir çizelge

	Araştırmacı	Yüzde Değişim Miktarı
1	Wu ve Little (1983).	78.8
2	Choi vd., (1991).	87.1
3	Yu vd., (1995).	38.8
4	Wang ve Peng (2003).	83.9
5	Nguyen vd., (2007).	1104.3
6	Incropera ve DeWitt (1996).	54.2
7	Incropera and DeWitt (1996).	498.9
8	Gnielinski (1976).	650.5
9	Kakac vd., (1987).	1359.4
10	Philips (1987).	220.8
11	Churchill ve Bernstein (1987).	80.5
12	Asirvathama vd., (2011).	94.6

Çizelge 4.7. (Devam) Kaynaklardaki bazı araştırmacıların korelasyonlarından elde edilen verilerin deneysel verilerle karşılaştırıldığında elde edilen değişim miktarını gösterir çizelge

13	Pak ve Cho (1998).	41.8
14	Sajadi ve Kazemi (2011).	26.3
15	Sundar ve Singh (2013).	39.7
16	Vajjha vd., (2010).	235.9
17	Madhesh vd., (2014).	38.2
18	Nasrin ve Alim (2014).	82.6
19	Shah ve London (1978).	32.6
20	Stephan ve Preuber (1979).	35.2
21	Jiang vd., (2001).	784.2
22	Xuan vd., (2003).	86.8
23	Suresh vd., (2012)	460.9
24	Moraveji ve Esmaili (2012).	106.8

Çizelge 4.8. Kaynaklardaki bilinen bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlardan çıkardıkları korelasyon izelgesi

	Araştırmaacı	Korelasyon	Kanal Tipi	Reynolds /Prandtl Sayısı	∅	Nano sıvı Tipi
1	Wu ve Little (1983)	$Nu = 0.00222Re^{1.09}Pr^{0.4}$	-	Re > 3000	-	-
2	Choi vd. (1991)	$Nu = 3.82 \cdot 10^{-6}Re^{1.96}Pr^{1/3}$	-	2500 < Re < 20000	-	-
3	Yu vd. (1995)	$Nu = 0.007Re^{1.2} Pr^{0.2}$	-	6000 < Re < 20000	-	-
4	Wang ve Peng (2003)	$Nu=0,00805 Re^{0.8}Pr^{1/3}$	Dörtgenel	Re>1500	-	-
5	Nguyen vd. (2007)	$Nu=8.39 Re^{0.5}-1.33Re^{2/3}$	Dörtgenel	-	-	-
6	Incropera ve DeWitt. (1996)	Dittus Boelter Korelasyonu $Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad 0.7 \leq Pr \leq 160$	Boru	2500 < Re < 1.24 10 ⁵	-	-
7	Incropera and DeWitt. (1996)	Hausen Korelasyonu $Nu = 3.66 + \frac{0.19\left(\frac{RePrD}{L}\right)^{1/3}}{1 + 0.117\left(\frac{RePrD}{L}\right)^{0.467}}$	Boru	Re>10000	-	-

Çizelge 4.8. (Devam) Kaynaklardaki bilinen bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlardan çıkardıkları korelasyon izelgesi

8	Gnielinski (1976).	$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000) Pr}{1+12.7 (f/8)^{1/2}(Pr)^{2/3}-1}$ $0.5 \leq Pr \leq 2000$ $f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2}$	Boru	$3000 < Re < 5 \times 10^6$	-	-
9	Kakac vd. (1987)	Hausen Korelasyonu $Nu = 0.116 \left[1 + (D_h/L)^{2/3} \right] (Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3}$	-	-	-	-
10	Philips (1987).	$Nu = 0.012 \left[1 + (D_h/L)^{2/3} \right] (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4}$	-	$1.5 \leq Pr \leq 500$	-	-
11	Churchill ve Bernstein (1987).	Churchill Korelasyonu $Nu = Nu_0 + \frac{0.079(f/8)^{1/2} Re Pr}{\left(1 + Pr^{4/5} \right)^{5/6}}$ $f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} ; Nu = 6,3 \text{ (sabit ısı akısı için)}$	-	$2100 < Re < 10^6$	-	-
12	Asirvathama vd. (2011).	$Nu_{nf} = 0.0023 Re_{nf}^{0.8} Pr_{nf}^{0.3} + (0.617 \phi - 0.135) Re^{(0.445\phi - 0.37)} Pr^{(1.081\phi - 1.305)}$	-	$900 < Re < 12100$	$0 \leq \phi \leq 0.9\%$	-

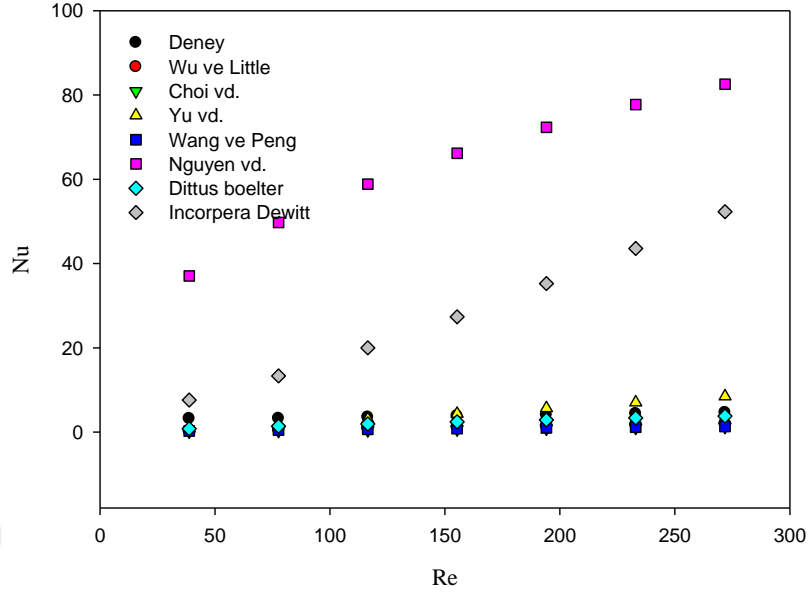
Çizelge 4.8. (Devam) Kaynaklardaki bilinen bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlardan çıkardıkları korelasyon izelgesi

13	Pak ve Cho (1998).	$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.5}$	Boru	$10^4 < Re < 10^5$	$0 \leq \phi \leq 3\%$	Al ₂ O ₃ /Su TiO ₂ /Su
14	Sajadi ve Kazemi (2014).	$Nu = 0.067 Re^{0.71} Pr^{0.35} + 0.0005 Re$	Boru	$5000 < Re < 30000$	$0 \leq \phi \leq 0.25\%$	TiO ₂ /Su
15	Sundar ve Singh (2013).	$Nu = 0.02172 Re^{0.8} Pr^{0.5} (1 + \phi)^{0.5181}$	-	$3000 < Re < 22,000$	$0 \leq \phi \leq 0.6\%$	Fe ₃ O ₄ /Su
16	Vajjha vd. (2010).	$Nu = 0.065 (Re^{0.65} - 60.22) (1 + 0.0169 \phi^{0.15}) Pr^{0.542}$	-	$3000 < Re < 16000$	$0 \leq \phi \leq 0.1\%$ Al ₂ O ₃ /Su $0 \leq \phi \leq 0.06\%$ CuO/Su SiO ₂ /Su	Al ₂ O ₃ /Su CuO/Su SiO ₂ /Su
17	Madhesh vd. (2014).	$Nu = 0.012 Re Pr^{0.333} \phi^{0.032}$	Boru	$4000 < Re < 8000$	$0.1 \leq \phi \leq 2.0\%$	Cu-TiO ₂ /Su
18	Nasrin ve Alim (2014).	$Nu = 2.2275 + (0.8849 + 0.2233 Pr)(Re)^{0.2120}$	Düz levha	$200 < Re < 1100$	$\phi = 5\%$	Al ₂ O ₃ /Su
19	Shah ve London (1978).	$Nu = \begin{cases} 1.953 \left(\frac{RePrD}{L}\right)^{\frac{1}{3}} & \left(\frac{RePrD}{L}\right) \geq 33 \\ 4.364 + 0.0722 RePr \frac{D}{L} & \left(\frac{RePrD}{L}\right) \geq \end{cases}$	Boru	-	-	-
20	Stephan ve Preuber (1979).	$Nu = 3.657 + \frac{0.0677 \left(\frac{RePrD}{L}\right)^{1/3}}{1 + 0.1 Pr \left(\frac{RePrD}{L}\right)^{0.3}}$	Boru	$0.7 < Pr < 7$ veya $Pr > 7$ için $RePrD/L < 33$	-	-

Çizelge 4.8. (Devam) Kaynaklardaki bilinen bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçlardan çıkardıkları korelasyon izelgesi

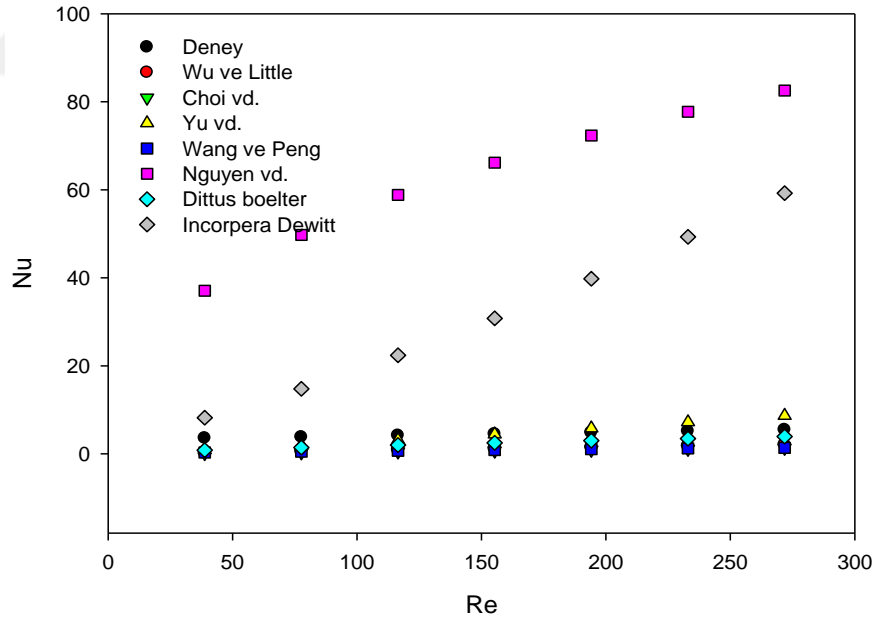
21	Jiang vd. (2001).	$Nu=0.52(X^+)^{-0.62}$ için	Dörtgenel	$100 < Re < 500$	-	-
22	Xuan vd. (2003)	$Nu = 0.4328(1 + 11.25\phi^{0.754} Pe_d^{0.218}) Re_{nf}^{0.333} Pr_{nf}^{0.4}$	Boru	$800 < Re < 4000$	$0 \leq \phi \leq 2.0 \%$	Cu/Su
23	Suresh vd. (2012).	$Nu = 0.031(Re_{nf} Pr_{nf})^{0.68} (1 + \phi)^{95.73}$	Helisel boru	$Re < 2300$	$0 \leq \phi \leq 0.1 \%$	Al ₂ O ₃ /Su Cu/Su
24	Moraveji ve Esmacili (2012).	$Nu = 0.716 Re^{0.314} Pr^{0.6} \phi^{0.3}$	Boru	$Re < 2200$	-	Al ₂ O ₃ /Su

Saf Su $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ $d_h=1600\ \mu\text{m}$ $q_{base}=31.25\ \text{kw/m}^2$

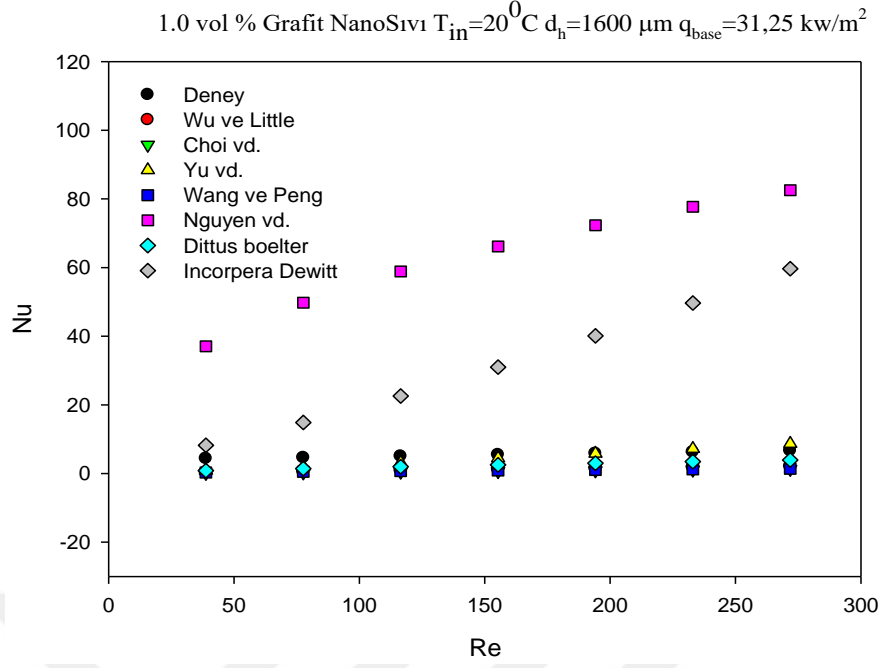


Şekil 4.37. 20 °C Saf su (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)

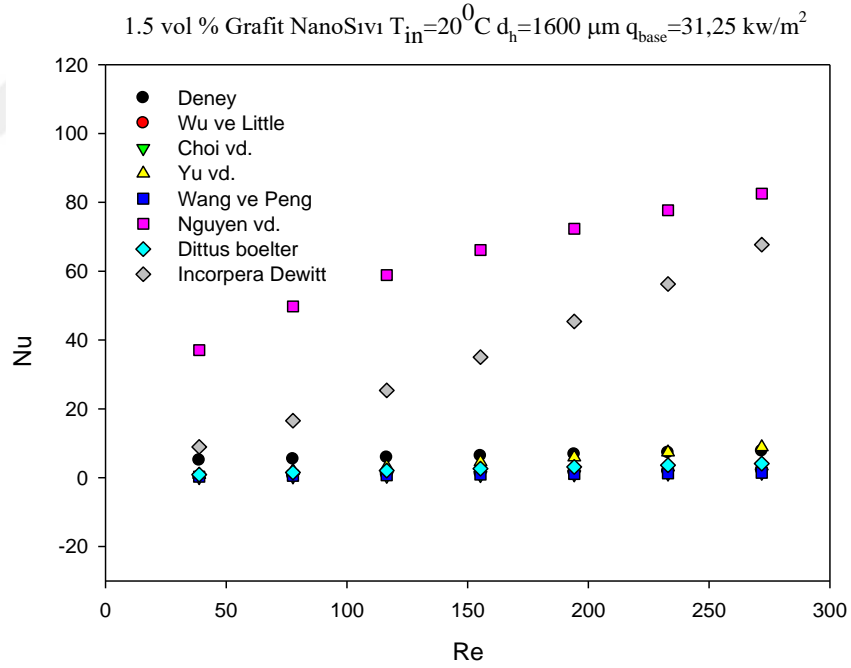
0.5 vol %Grafıt NanoSıvı $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ $d_h=1600\ \mu\text{m}$ $q_{base}=31.25\ \text{kw/m}^2$



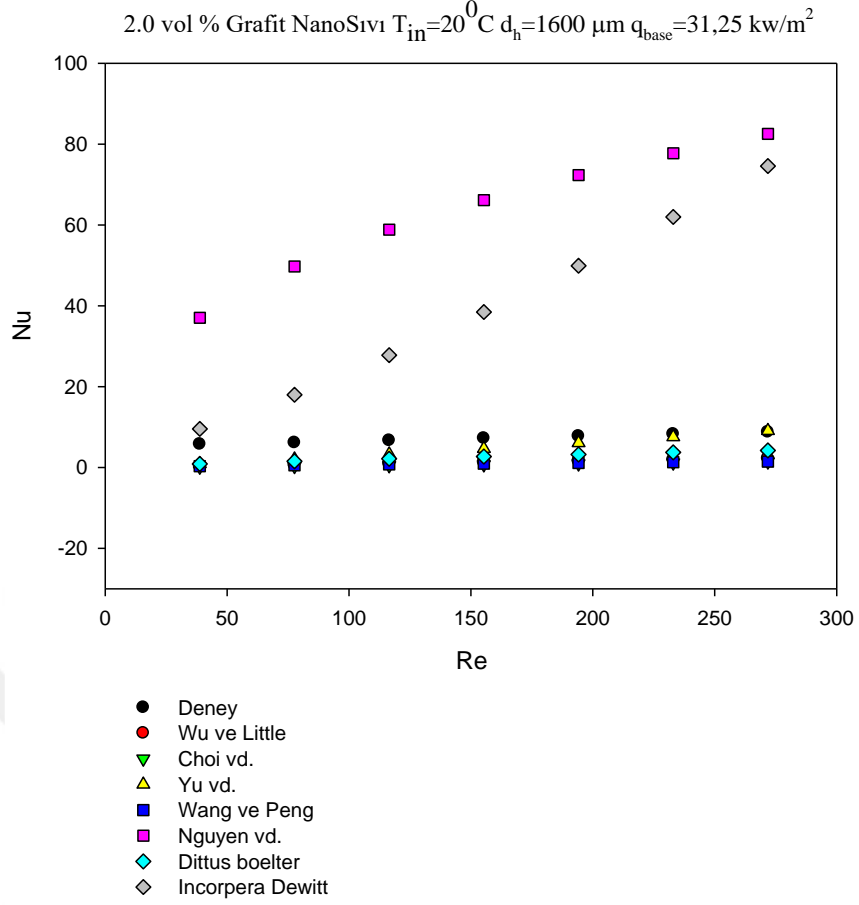
Şekil 4.38. 20 °C % 0.5 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



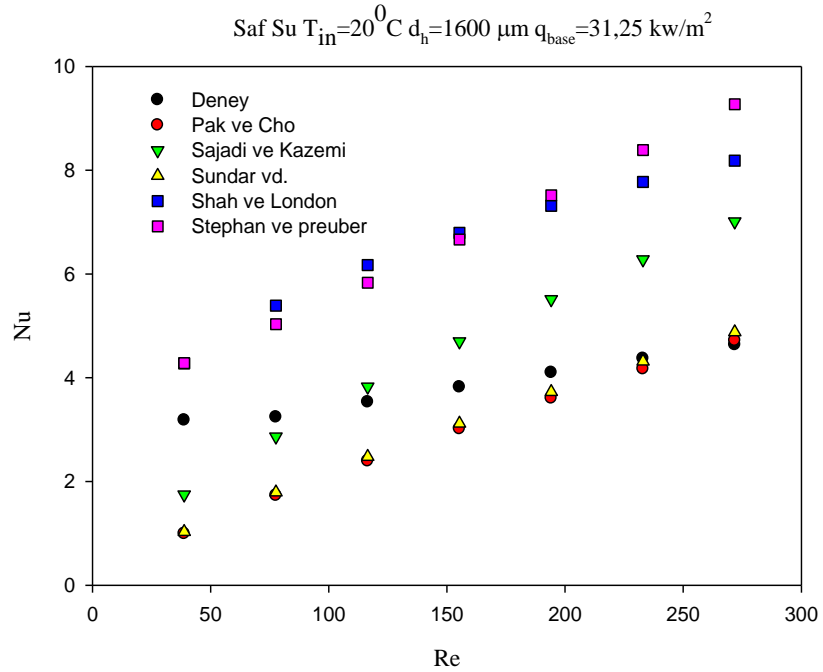
Şekil 4.39. 20^0C % 1.0 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



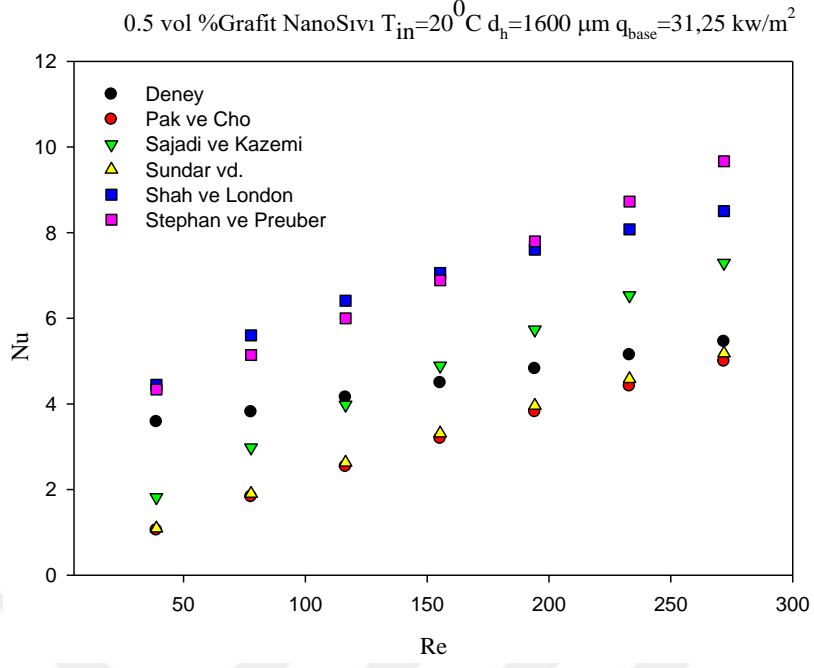
Şekil 4.40. 20^0C % 1.5 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



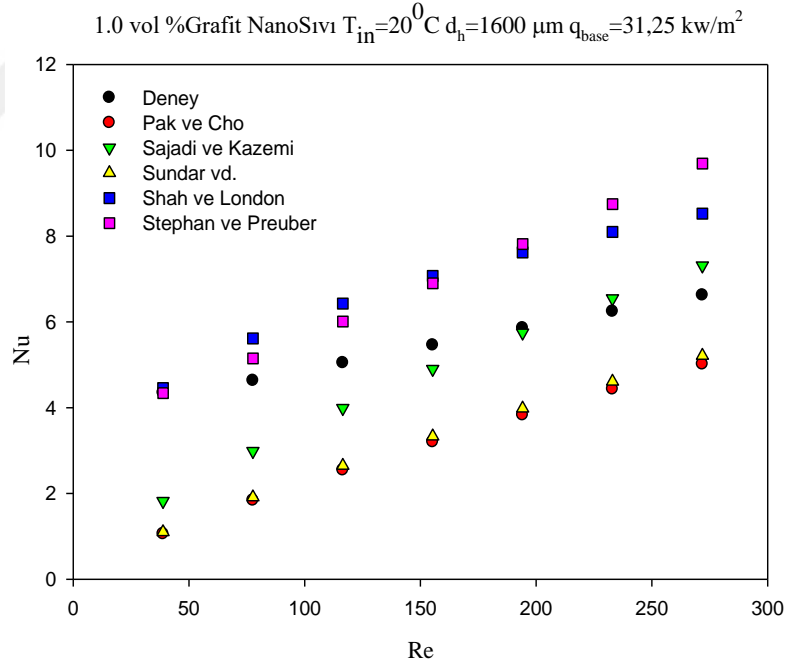
Şekil 4.41. 20 °C % 2.0 Hacimsel Yoğunluk (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



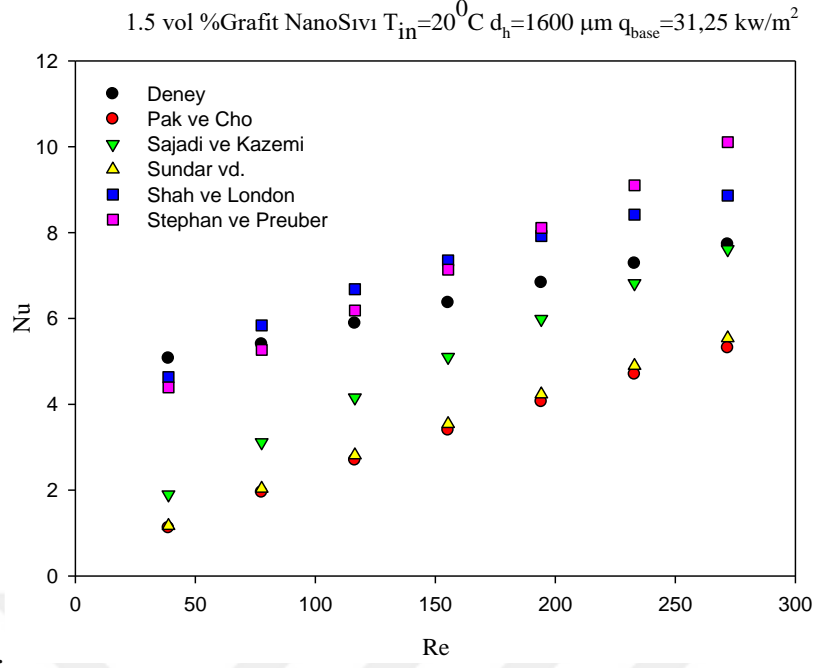
Şekil 4.42. 20 °C Saf su (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar)



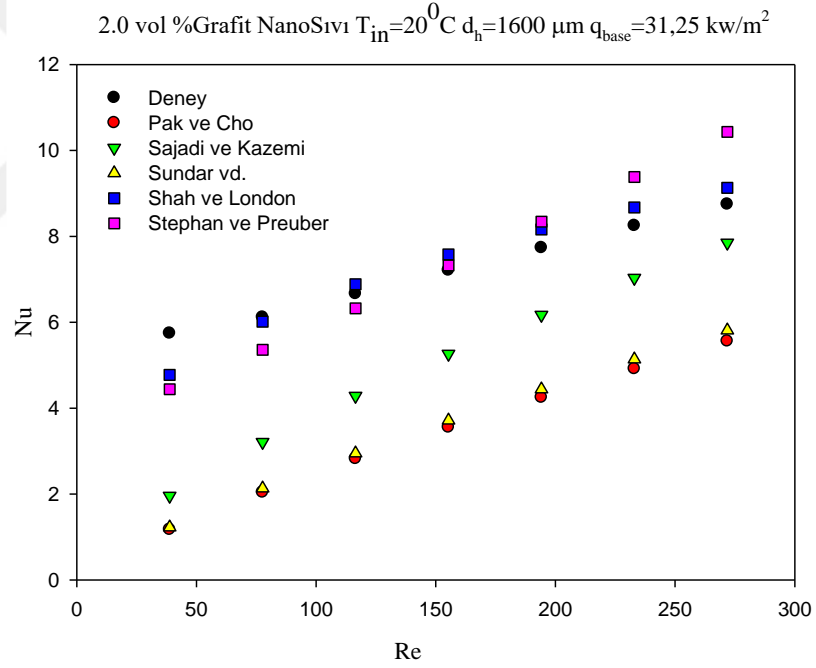
Şekil 4.43. 20 °C % 0.5 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar)



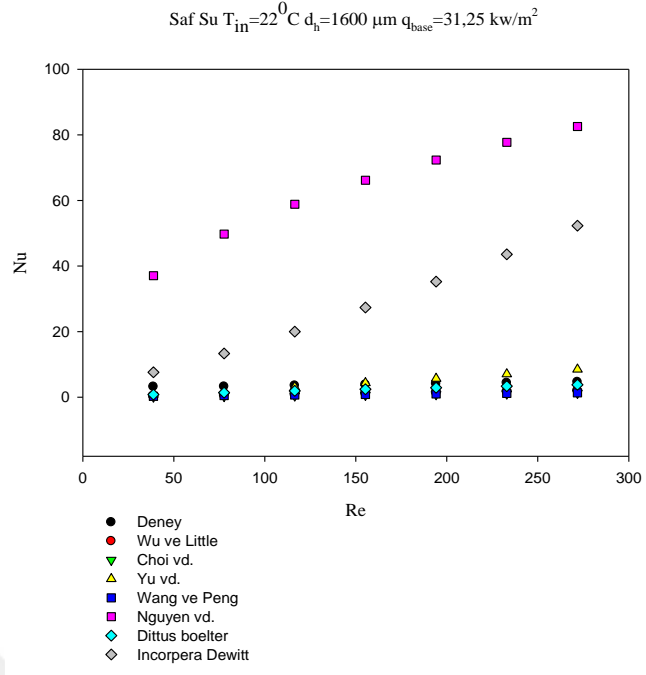
Şekil 4.44. 20 °C % 1.0 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar)



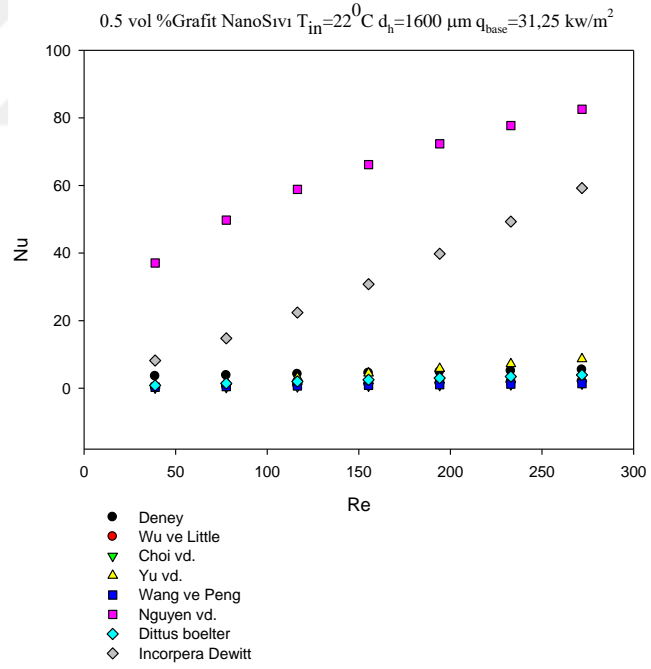
Şekil 4.45. 20 °C % 1.5 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar)



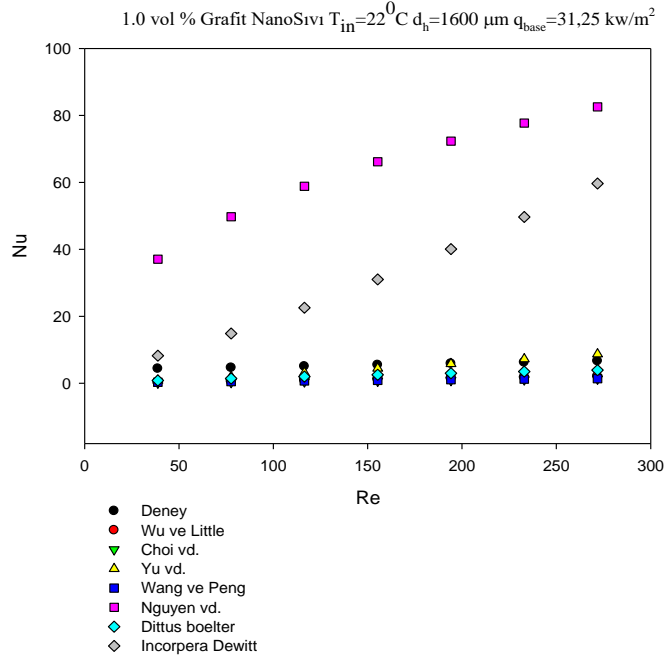
Şekil 4.46 20 °C % 2.0 (Çizelge 4.8. 13-14-15-19-20 numaralı korelasyonlar)



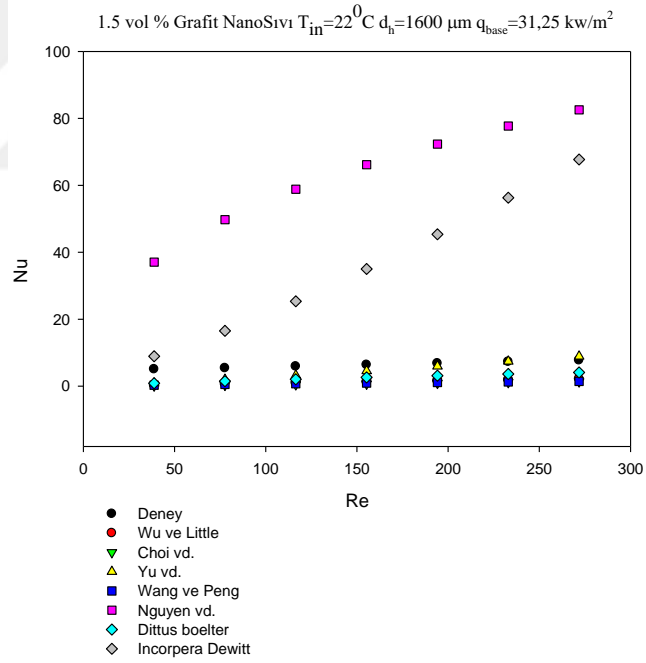
Şekil 4.47. 22 °C Saf su (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



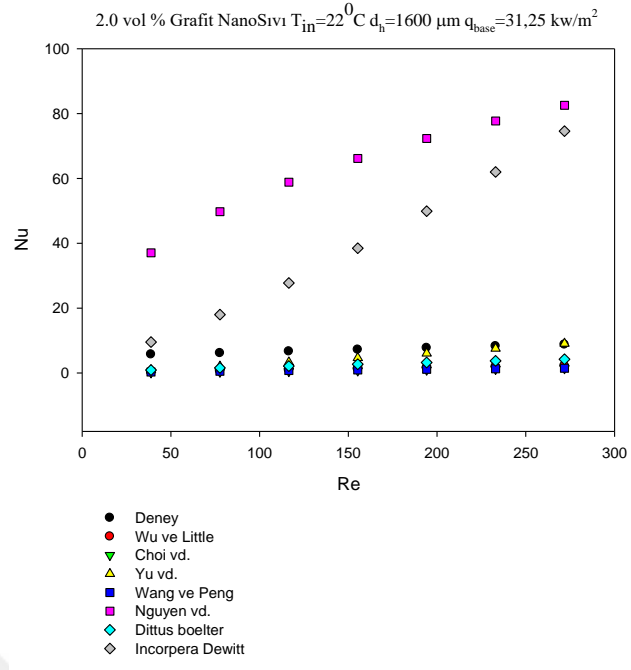
Şekil 4.48. 22 °C % 0.5 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



Şekil 4.49. $22^{\circ}C$ % 1.0 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



Şekil 4.50. $22^{\circ}C$ % 1.5 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası)



Şekil 4.51. 22 °C % 2.0 (Çizelge 4.8. Korelasyon 1-7 arası).

4.3 DeneYlerin Bağımlılık Analizi ile Doğrulanması

4.3.1 Deneysel verilerin korelasyon analizi

Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerin doğrulanabilmesi için çoklu regresyon analizi yapılarak korelasyon katsayıları bulunmuştur. Bulunan korelasyon katsayıları ile deneysel bir korelasyon denklemi elde edilerek deneylerle karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon analizi yapmak için istatistiksel analiz programı olarak bilinen SPSS yazılımı kullanılmıştır. Karşılaştırılan deney ve korelasyon verileri aynı grafikte gösterilmiştir. Aşağıdaki denklemlerde korelasyon katsayılarının nasıl hesaplandığı ve korelasyon değerlerinin nasıl bulunduğu açıklanmıştır. Burada y değeri bağıli değişkendir ve Nusselt sayısını ifade etmektedir. Re, Pr, Vol (hacimsel) değerleri ise bağımsız değişkenleri ifade etmektedir.

$$y = c + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \dots$$

$$\beta_1 = \left(\frac{r_{y,x1} - r_{y,x2} r_{x1,x2}}{1 - (r_{x1,x2})^2} \right) \left(\frac{SD_y}{SD_{x1}} \right)$$

$$\beta_2 = \left(\frac{r_{y,x2} - r_{y,x1} r_{x1,x2}}{1 - (r_{x1,x2})^2} \right) \left(\frac{SD_y}{SD_{x2}} \right)$$

$r_{y,x1}$ ile y arasındaki korelasyon.

$r_{y,x2}$ ile y arasındaki korelasyon.

$r_{x1,x2}$ x_1 ve x_2 arasındaki korelasyon.

$(r_{x1,x2})^2$ x_1 ve x_2 'nin en yüksek değeri için belirleme katsayısı.

SD_y Bağımlı değişkenin standart sapması.

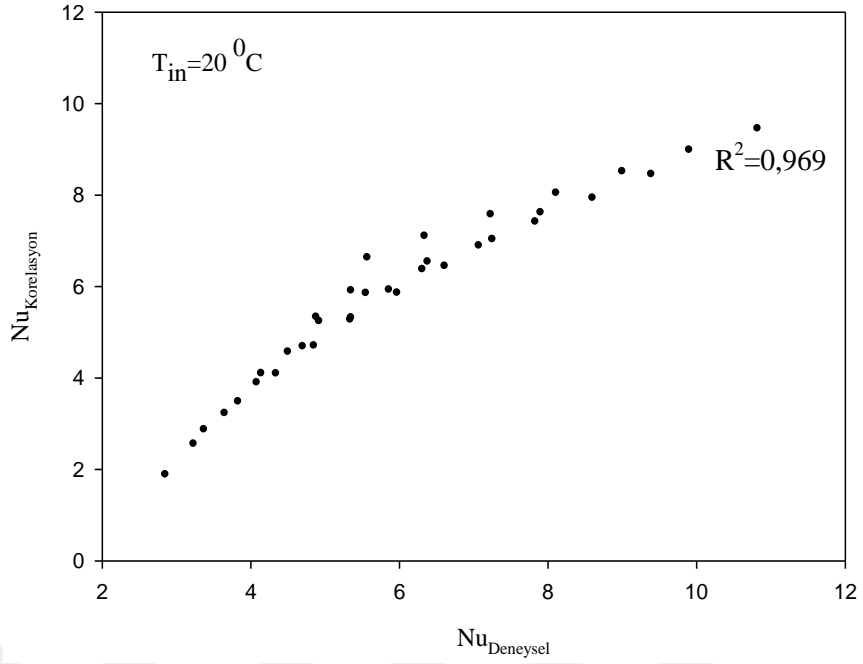
SD_{x1} x_1 değişkenini standart sapma değeri.

SD_{x2} x_2 değişkenini standart sapma değeri.

Çizelge 4.9. Bağımlılık analizi korelasyon katsayıları

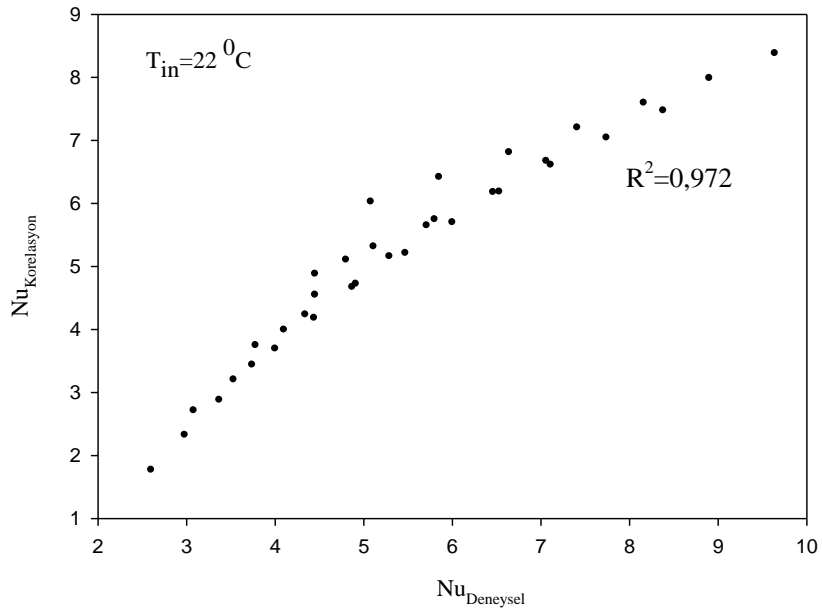
Sıcaklıklar	C	Vol	Re	Pr	Vis	R
20 °C	-1,081	1,891	0,005	-0,787	7992647	0,969
22 °C	-1,081	1,696	0,004	-0,316	4776227,18	0,972
24 °C	0,456	1,803	0,003	-1,045	9845508,45	0,986
26 °C	-0,651	1,751	0,004	-0,996	9952804,83	0,978
28 °C	0,626	1,504	0,002	-0,971	9125989,12	0,991
30 °C	-0,199	1,549	0,002	-1,009	9952506,7	0,984

20 °C ‘de yapılan deneylerde elde edilen verilerin korelasyon katsayılarına bakıldığında Nusselt sayısının Reynolds sayısı , Prandtl sayısı ve viskoziteye bağlı korelasyon değerleri göstermektedir ki grafit nanosiviminin içindeki hacimsel katkı miktarı Nusselt sayısı ile en güçlü bağıntıyı oluşturmaktadır.

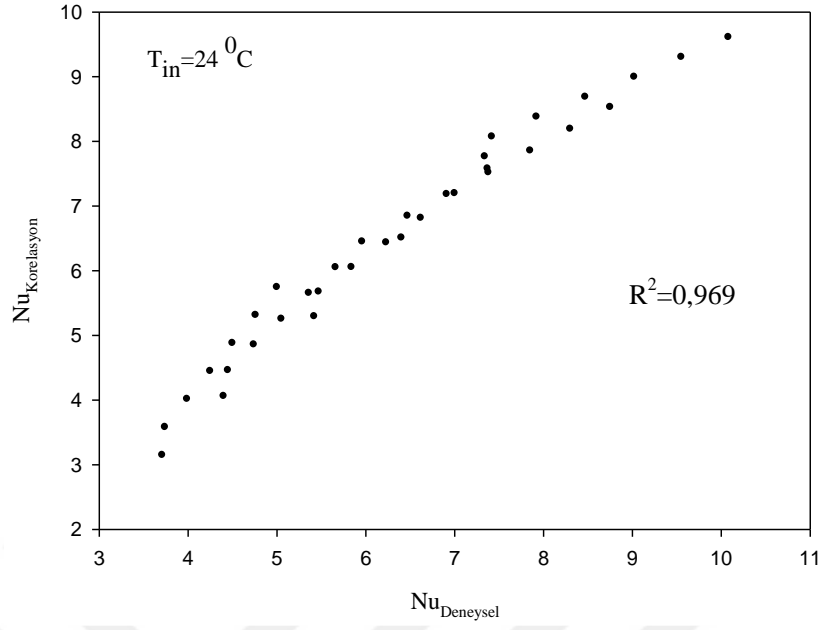


Şekil 4.52. 20 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimi

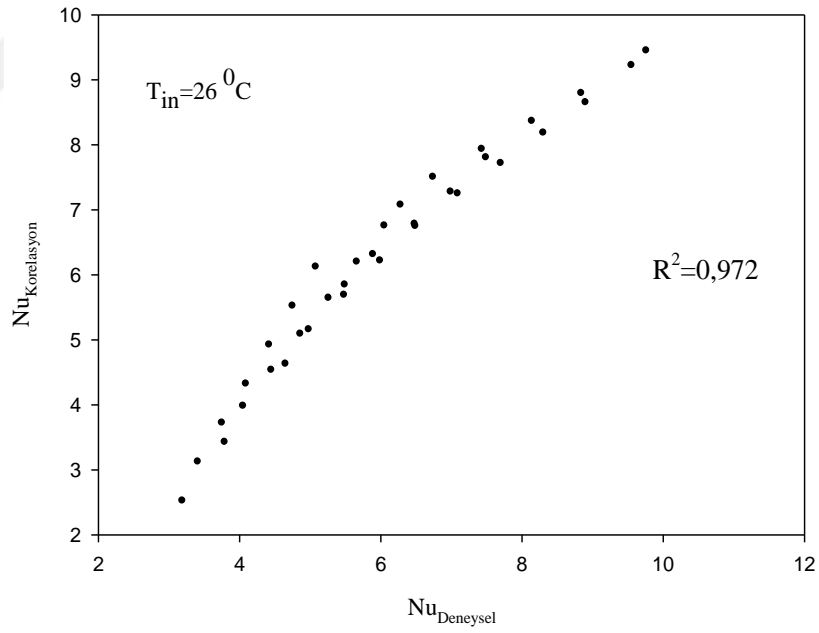
Şekil 4.52. 22 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimini göstermektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere Regresyon katsayısı olarak 0,969 değeri 1 (Bir) değerine çok yakın olduğundan deneysel verilerden elde edilen korelasyon kabul edilebilir şekilde yakınsadığını göstermektedir.



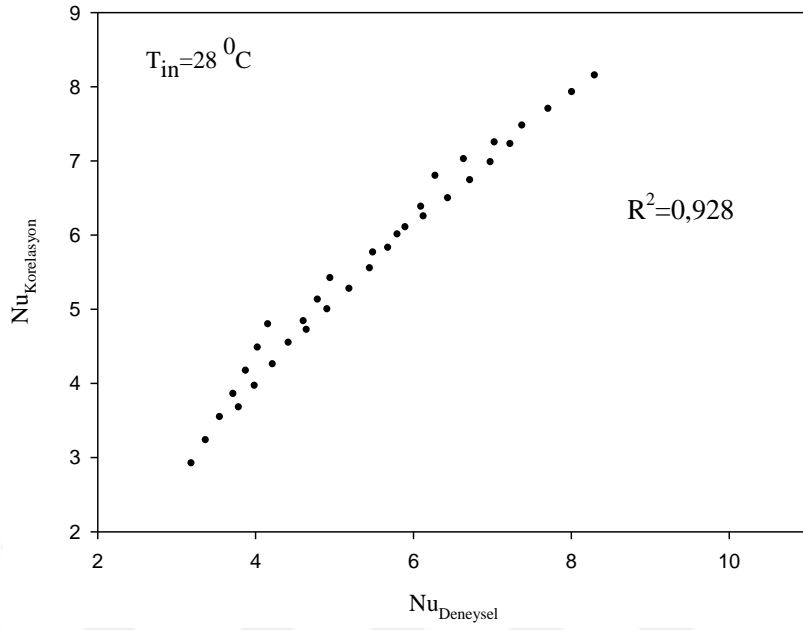
Şekil 4.53. 22 °C’de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimi



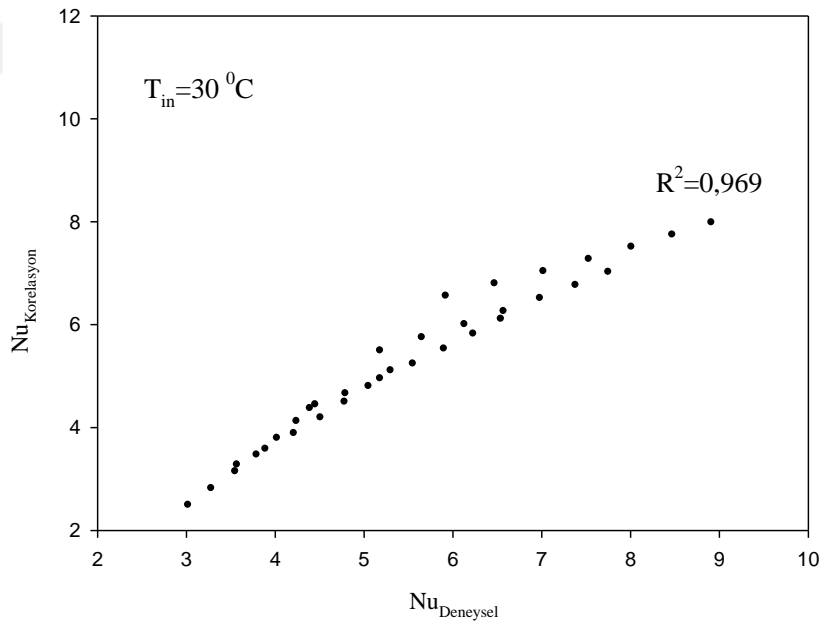
Şekil 4.54. 24 $^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimi



Şekil 4.55. 26 $^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimi



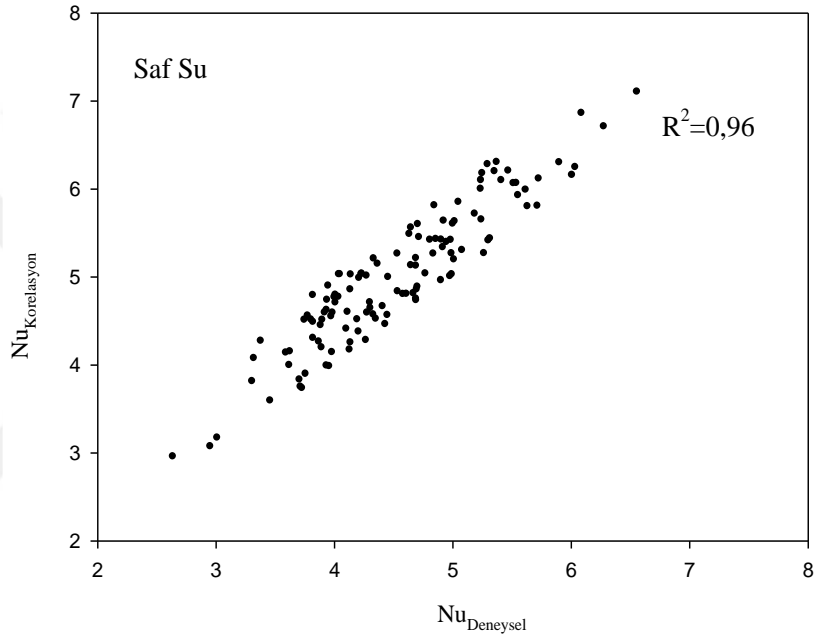
Şekil 4.56. 28 $^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimi



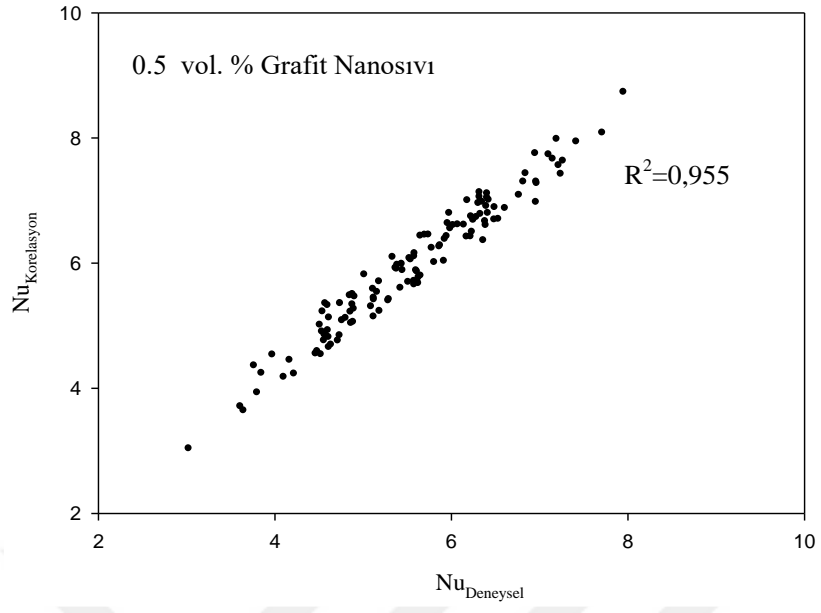
Şekil 4.57. 30 $^{\circ}\text{C}$ 'de yapılan deneylerin $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ değişimi

20 $^{\circ}\text{C}$ 'den 30 $^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ve 0.05-2.0 yüzde hacimsel yoğunluklarda nanosıvı kullanarak yapılan deneylerde elde edilen sonuçların korelasyon değerleriyle karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi R^2 değerinin 0,96 değerinde olması

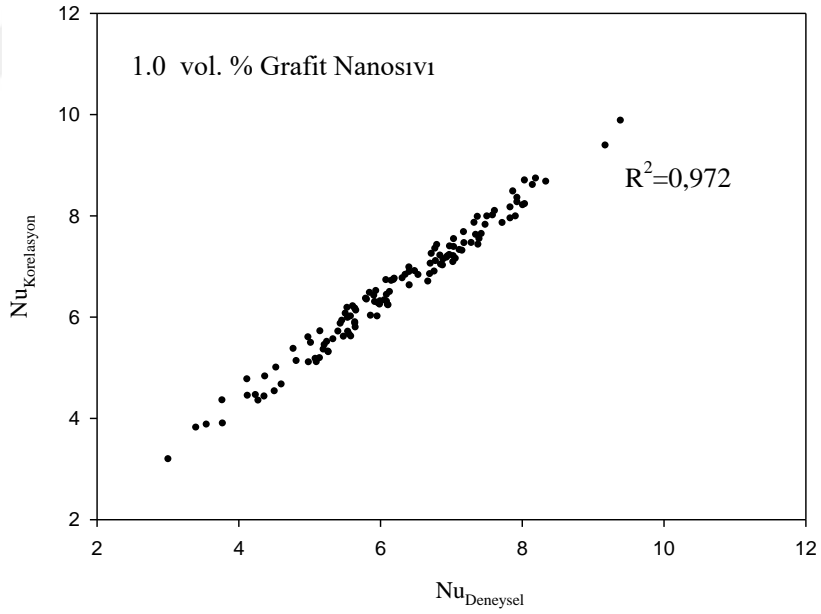
deneylerin kabul edilebilir düzeyde doğrulukla yapıldığını göstermektedir. 0,5 oranından 2.0 oranına kadar olan deneylerde alınan sonuçlar $R^2=1$ değerine daha yakın olduğundan nanosivilerle yapılan deneylerin doğruluğunun daha gerçekçi olduğunu göstermektedir. Alınan bu değerler verilerin geniş bir aralıkta SPSS programıyla elde edilen sonuçlarla doğrulandığını göstermektedir. Ayrıca farklı hacimsel yoğunluklardaki nanosivilerin deneysel bazda yapılan korelasyon analizleride şekil 4.58'den şekil 4.62'ye kadar olan kısımdaki şekillerde görülmektedir.



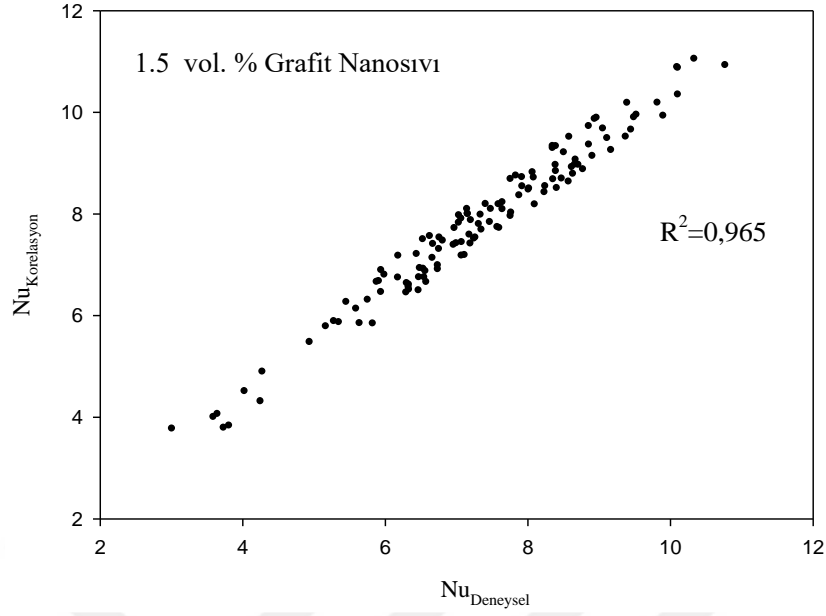
Şekil 4.58. Saf Su Nu_{Deneysel} - Nu_{Korelasyon} karşılaştırılması.



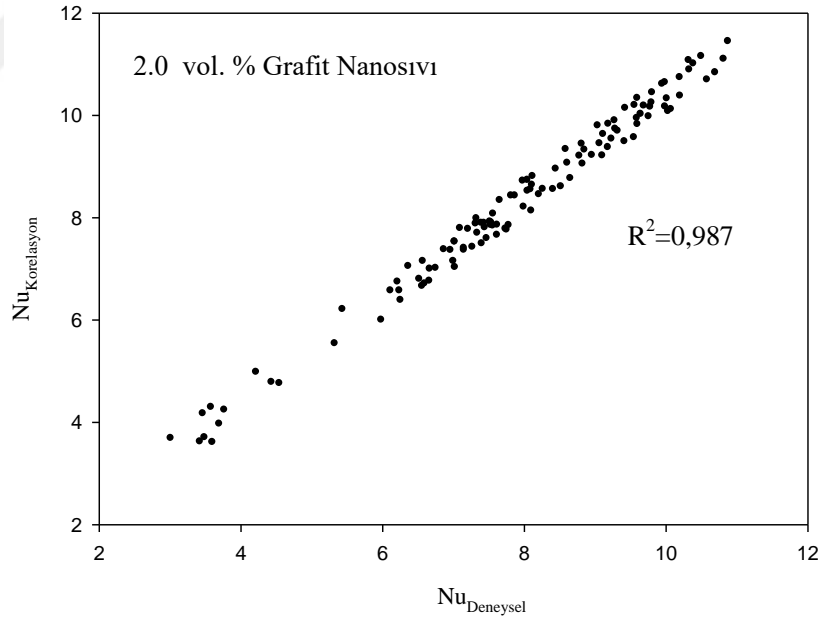
Şekil 4.59. 0.5 % vol'de Nu_{Deneysel} - Nu_{Korelasyon} karşılaştırılması.



Şekil 4.60. 1.0 % vol'de Nu_{Deneysel} - Nu_{Korelasyon} karşılaştırılması.



Şekil 4.61. 1.5 % vol'de $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması



Şekil 4.62. 2.0 % vol'de $Nu_{Deneysel}$ - $Nu_{Korelasyon}$ karşılaştırılması

Yapılan korelasyon analizi çalışmasında bağımsız değişkenlerimiz Re , hacimsel yoğunluk, sıcaklık, Prandtl sayısı ve viskozite değerlerinin hesaba katılarak bağımlı değişken Nu değerinin korelasyon katsayıları bulunmuştur. 0.5-2.0 yüzde hacimsel

yoğunluk oranlarında nanosıvılarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar irdelendiğinde yapılan deneylerin elde edilen korelasyonlarla karşılaştırıldığında regresyon katsayılarının karesinin 1 değerine çok yaklaştığı gözlemlenmiş, bu sonuç deneylerin hata oranlarının kabul edilebilir düzeyde gerçekleştiğinin bir kanıtı olarak değerlendirilmiştir.



BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

1-Grafit partiküllerine ve saf su karışımına dayanan nanosıvıların dinamik viskozitesi, bu çalışmada deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Aşağıdaki sonuçlar deneysel ve sayısal analizlerin sonuçları olarak belirlemiştir:

2-Ölçülen dinamik viskozite değerlerinin doğruluğu, literatürdekilerle karşılaştırılarak kanıtlanmıştır.

3-Diğer araştırmacıların modellerini doğrulamaları için ölçülen dinamik viskozite değerleri bir Tabloda ayrıntılı olarak verilmiştir.

4-Çalışmadaki nanosıvının dinamik viskozite değerleri, azalan sıcaklık ve beklenen yoğunluk artışı ile artmaktadır.

5-ANN analizleri, korelasyon geliştirme konusunda diğerlerinden daha iyi bir yöntem olarak bulunmuştur.

6-Yazarlar tarafından önerilen ampirik korelasyonlar açık kaynaklarda diğerlerinden daha iyi tahmin edilebilirliğe sahiptir.

7-Literatürdeki ampirik korelasyonlar sıcaklık veya baz akışkanın dinamik viskozite terimlerini içerir. ANN analizlerinde bir sıcaklık girdisi olarak, önerilen korelasyon, deneysel ampirik korelasyonlarda en iyi öngörülebilirliğe sahiptir.

8-Nanosıvıların dinamik viskozite korelasyonları, özellikle partikül tipi ve çapıyla ilgili farklı çalışma koşullarını içermesine rağmen, bunların çoğunluğu yazarların deneysel verileri üzerinde kabul edilebilir bir tahmin edilebilirliğe sahiptir. Bu sonuç, dinamik viskozite korelasyonlarının, partikül tipi ve çapından bağımsız olarak düşünülmesi gerektiğini ve bunların farklı parçacık tipleri ve çapları için genellenmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.

9-Yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen grafikler göstermiştir ki 0.5-2.0 nano grafit kullanılarak hazırlanan nanosivularla yapılan deneylerde mikrokanala aynı giriş sıcaklığında, ısı akısında ve kütleli debide verilen ısının artmasıyla ortalama zorlanmış ısı geçişi katsayısı artmaktadır.

10-Grafit nanosivunun hacimsel parçacık oranı arttıkça ortalama zorlanmış ısı geçişi katsayısında artış olduğu gözlemlenmektedir.

11-Aynı giriş sıcaklığında kütleli debi arttıkça ortalama zorlanmış ısı geçişi katsayısı artmaktadır.

12-Aynı kütleli debi, aynı ısı akısı giriş sıcaklığı arttıkça ortalama zorlanmış ısı geçişi katsayısında azalma olmaktadır.

13-Aynı Reynolds sayısı değerlerinde aynı giriş sıcaklığında yapılan deneyler göstermiştir ki nanosivunun parçacık hacimsel artışında Nusselt sayısında artma gözlemlenmektedir. 0.05- 2.0 % hacimsel yoğunluk oranlarında Grafit nanosivü ile yapılan deneylerde aynı giriş sıcaklığı ve Reynolds sayısında ısı akısının artışıyla Nusselt sayısında belirgin artış gözlemlenmiştir.

14-Bu çalışmada kullanılan nanosivuların hacimsel nanosivü parçacık miktarındaki artış yüzde 0,5-2,0 arasında değişmektedir. Her bir 0,05 % artış oranında ortalama zorlanmış taşınım ile ısı geçişi katsayısındaki artış %15-25 arasında değişen oranda artış gösterdiği görülmüştür. Deney sonuçlarından elde edilen verilerden Reynolds sayısı Nusselt sayısı ile literatürde iyi bilinen korelasyonlarla aynı grafikte gösterilmiştir.

15-Elde edilen bağıl yüzde hata oranına göre deney hesaplamalara en yakınkorelasyon%26,5 ile Sajadi ve Kazemi'nin korelasyonu $Nu = 0.067Re^{0.71}Pr^{0.35} + 0.0005Re$ olarak bulunmuştur. 20-22-24-26-28-30 °C derecelerde ve 0,5-2,0 % hacimsel oranlarda yapılan mikrokanal Grafit Nanosivü deneyleri IBM'nin SPSS programı ile deneysel veriler doğrulanmıştır. Doğrulanen deneylerin kabul edilebilir seviyelerde yapıldığı anlaşılmıştır.

5.2 Öneriler

1- 20-22-24-26-28-30 °C derecelerde ve 0,5-2,0 % hacimsel oranlarda yapılan mikrokanal Grafit Nanosıvı deneyleri Re 50-300 sayıları arasında yani laminar bölgede yapılmıştır. İleride deneyler türbülanslı bölgede incelenebilir. Deneyler grafit ve saf su karışımı nanosıvılar ile yapılmıştır. İleride Ertelen Glikol ve Grafit nanoparçacık karışımı ile çalışılabilir.

2-Aynı hidrolik çapta Pin-Fin mikrokanal ile düz kanal karşılaştırmalı olarak ortalama zorlanmış taşınım ısı geçişi katsayısına ve Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi incelenebilir.

3-Grafit nanoparçacığa sahip nanosıvı ile bilinen nanoparçacıklar ilavesiyle hibrit nanosıvı elde edilebilir. Bu nanosıvılar bilinen ısı geçişi akışkanlarıyla değişik oranlarda karışım eldesiyle incelenebilir.

4-Mikrokanalda farklı hacimsel nanosıvı ile yapılan deneylerin CFD programlarıyla doğrulanması yapılabilir.

5-Bu tez çalışmasında kullanılan deney düzeneği ile hibrit nanosıvıların soğutma performansı araştırılabilir. Bu tezde kullanılan mikrokanalın hidrolik çapı ile farklı hidrolik çaplarda mikrokanallar imal edilerek karşılaştırmalı mikrokanal soğutma performansı incelenebilir.

KAYNAKLAR

Asirvathama, L.G., Rajab, B., Lal, D.M. and Wongwises, S. “Convective heat transfer of nanofluids with correlations”, *Particuology*, 9:626–31, 2011.

Bavie're, R., Favre-Marinet, M. and Person, S.L., “Bias effects on heat transfer measurements in microchannel flows”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 3325–37, 2006.

Bhattacharya, P., Saha, S.K., Yadav, A., Phelan, P.E. and Prasher, R.S., “Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids”, *Journal of Applied Physics* 95 (11), 6492–6494 , 2004.

Bruggeman, D.A.G., ”Berechnung verschiedener physikalischer Konstan- ten von heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leit- fähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen”, *Annalen der Physik*, Leipzig 24, 636–679, 1935.

Chen, H.,Ding,Y. And Tan, C.,”Rheological behaviour of ethylene glycol based titaniananofluids”, *Chem. Phys.* 444, 333-337,2007.

Chen, Y., Zhang, C., Shi, M. and Wu J., “Threedimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks”. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36, 917–920, 2009.

Chiu, H.C., Jang, J.H., Y. H.W. and Wu M.S. “The heat transfer characteristics of liquid cooling heatsink containing microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, 34–42. 2011.

Choi, S.B., Barron, R.F. and Warrington, R.O., “Fluid flow and heat transfer in microtubes, Micromech”, *Sensors Actuat. Syst. ASME DSC* 32 ,123–134, 1991.

Choi, S.U.S., “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles”, *ASME FED* 231, 99-103, 1995.

Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P. and Choi, S. U. S. “Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement”, *Applied Physics Letters* 121, 153107-3, 2005.

Churchill, S. W., and M. Bernstein, “A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow”, *ASME J. Heat Transfer* 99, 300–306, 1977.

Das, S.K., Putra N., Thiesen P. and Roetzel W. “Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids”, *Journal of Heat Transfer* 125, 567-574, 2003.

Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W. and Thomson, L.J., “Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles”, *Applied Physics Letters* 78 (6), 718-720, 2001.

Ergu, B.O., Sara, O.N., Yapıcı, S. and Arzutug, M.E., “Pressure drop and point mass transfer in a rectangular microchannel”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36:618–23, 2009.

Gamrat, G., Favre-Marinet, M. and Person, S.L., “Modelling of roughness effects on heat transfer in thermally fully-developed laminar flows through microchannels”, *International Journal of Thermal Sciences* 48, 2203–14, 2009.

García-Hernando, N., Acosta-Iborra, A., Ruiz-Rivas, U. and Izquierdo, M. “Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in a single-phase liquid flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 5433–46, 2009.

Gnielinski, V., “New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow”, *Int. Chem. Eng.* 16, 359–368, 1976.

Guo, W., Li, G., Zheng, Y. and Dong, C., “Measurement of the thermal conductivity of SiO_2 nanofluids with an optimized transient hot wire method”, *Thermochimica Acta* 661, 84-97, 2018.

Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems”, *I&EC Fundamentals* 1 (3), 182–191, 1962.

Hong, K.S., Hong, T.K. and Yang, H.S. “Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles” , *Applied Physics Letters* 88, 031901, 2006.

Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, *John Wiley and Sons*, New York, 1996.

Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, 4nd ed., Derbentli., T., Genceli, O., Güngör, A., Hepbaşlı, A., İlken, Z., Özbalta, N., Özgüç, F. ve Parmaksızoğlu, C., Uralcan, Y., *John Wiley and Sons*, New York, 2000.

Jiang, P.X., Fan, M.H., Si, G.S. and Ren, Z.P., “Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heatexchangers”, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 44, 1039–1051, 2001.

Jung, J.Y., Oh, H.S. and Kwak, H.Y., ”Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 466–472, 2009.

Kabelac, S. and Kuhnke, J. F. “Heat Transfer Mechanisms in Nanofluids Experimental and Theory “, *Annals of the Assembly for International Heat Transfer Conference* 13, Sydney , Australia, KN-11, 13-18 August, 2006.

Kakac, S. and Pramuanjaroenkij, A., “Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 3187-3196, 2009.

Kakac, S., Shah, R.K. and Aung, W., ,Handbook of Single – Phase Convective Heat Transfer, *John Wiley and Sons*, New York, 1987.

Kandlikar, S.G. and Upadhye, H.R., “Extending the heat flux limit with enhanced microchannels in direct single-phase cooling of computer chips”, *Annual IEEE semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 8-15, 2005.

Koo, J. and Kleinstreuer, C., “Laminar nanofluid flow in micro-heat sinks”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (13), 2652–2661, 2005.

Kosar, A., “Effect of substrate thickness and material on heat transfer in microchannel heat sinks”, *International Journal of Thermal Sciences* 49, 635–42, 2010.

Kumar, D.H., Patel, H.E., Kumar, V.R.R., Sundararajan, T., Pradeep, T. and Das, S.K., “Model for heat conduction in nanofluids”, *Physical Review Letters* 93,144301,2004.

Lee, P.S., Garimella, S.V. and Liu, D., “Investigation of heat transfer in rectangular microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 1688–704, 2005.

Madhesh, D., Parameshwaran, R. And Kalaiselvam, S. “Experimental investigation on convective heat transfer and rheological characteristics of CuTiO₂ hybrid nanofluids”, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 52, 104-115, 2014.

Maxwell, J.C., , A Treatise on Electricity and Magnetism, second ed., Clarendon Press, Oxford UK, 1881.

Mlcak, J.D., Anand, NK. and Rightley, M.J., “Three-dimensional laminar flow and heat transfer in a parallel array of microchannels etched on a substrate”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, 5182–91, 2008.

Mohammed, H.A., Gunnasegaran, P. and Shuaib, N.H., “Influence of channel shape on the thermal and hydraulic performance of microchannel heat sink”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, 474–80, 2011.

Moraveji, M.K. and Esmaili, E., “Comparison between single-phase and twophases CFD modeling of laminar forced convection flow of nanofluids in a circular tube under constant heat flux”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 39, 1297-1302, 2012.

Murshed, S.M.S., Leong K.C. and Yang, C., “Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids”, *International Journal of Thermal Sciences* 47, 560-568, 2008.

Nasrin, R., and Alim, M.A., “Semi-empirical relation for forced convective analysis through a solar collector”, *Sol. Energy* 105, 455-467, 2014.

Neindre, B.L., Lombardi, G., Desmarest, Ph., Kayser, M., Zaripov, Z.I., Gumerov, F. and Garrabos Y., “Measurements of the thermal conductivity of ethene in the supercritical region” , *Fluid Phase Equilibria* 459, 119-128, 2018.

- Nguyen, C.T., Gilles, R., Christian, G. and Nicolas, G., “Heat transfer enhancement using Al₂O₃–water nanofluid for an electronic liquid cooling system”, *Applied Thermal Engineering* 27, 1501-1506, 2007.
- Pak, B.C. and Cho, Y.I., “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles”, *Exp. Heat Transfer* , 11 , 1998.
- Park, H.S. and Punch, J., “Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, 4535–43, 2008.
- Philips, R.J., “Microchannel heat sinks”, Ph.D. Thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, USA. 1987.
- Pryazhnikov, M.I., Minakov, A.V., Rudyak, V.Y. and Guzei, D.V., “Thermal conductivity measurements of nanofluids” , *International Journal of Heat and Mass Transfer* 104,1275-1282, 2017.
- Sajadi, A.R. and Kazemi, M.H. “Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid in circular tube”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, 1474–8, 2011.
- Salman, B.H., Mohammed, H.A., Munisamy, K.M. and Kherbeeta, Sh. A., “Characteristics of heat transfer and fluid flow in microtube and microchannel using conventional fluids and nanofluids: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 848-880, 2013.
- Shah, R.K., and London, A.L., ,Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Supplement 1 to Advances in Heat Transfer, Academic Press, New York, 1978.
- Shen, S., Xu, J.L., Zhou, J.J. and Chen, Y., “Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface”, *Energy Conversion and Management* 47, 1311-25, 2006.
- Shevade, S. and Rahman M.M., “Heat transfer in rectangular microchannels during volumetric heating of the substrate”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34, 661-672, 2007.

Singh, R. Sanchez, O., Ghosh, S., Kadimcherlaa, N., Send, S. and Balasubramanian, G., Viscosity of magnetite-toluene nanofluids: dependence on temperature and nanoparticle concentration, *Phys. Lett. A* 379, 2641–2644, 2015.

Stephan, K. and Preußer, P., “Warmeübergang und maximale wärmestromdichte beim behaltersieden binarer und ternärer flüssigkeitsgemische”, *Chem. Ing. Tech.* 51, 37, 1979.

Sundar, L.S. and Singh, M.K., “Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: a review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20, 23-35, 2013.

Suresh, S., Venkataraj, K.P., Selvakumar, P. and Chandrasekar, M., “Effect of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer” , *Experimental Thermal and Fluid Science* 38, 54-60, 2012.

Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., “High –performance heat sinking for VLSI, *IEEE Electron.Dev. Lett.*, EDL-2 ,126-129,1981.

Vajjha, R.S., Das, D.K. and Kulkarni, D.P., “Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nano- fluids”., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 4607-4618, 2010.

Wang, X., Xu, X. and Choi, S.U.S., “Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture” , *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* (13), 475-480, 1999.

Wang, X.L., Zhou, P. and Peng, X.F., “A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2665-2672, 2003.

Wasp, E.J., Kenny, J.P. and Gandhi, R.L., vol1, Solid–liquid Slurry Pipeline Transportation, Bulk Materials Handling, *Trans Tech Publications*, Germany, 1999.

Wei, X. and Joshi, Y., “Experimental and numerical study of sidewall profile effects on flow and heat transfer inside microchannels” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 4640-4651, 2007.

Wu, H.Y. and Cheng, P., “An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 2547–2556, 2003.

Wu, P. and Little, W.A., “Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature refrigerators”, *Cryogenics* 24, 273–277, 1983.

Xie, H., Fujii, M. and Zhang, X., “Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (14), 2926–2932, 2005.

Xie, H., Lee, H., Youn, W. and Choi., M., “Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities”, *Journal of Applied Physics* 94 (8), , 4967-4971, 2003.

Xuan, Y. and Li, Q., “ Heat transfer enhancement of nanofluids” , *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 , 58-64, 2000.

Xuan, Y., Li, Q. and Hu, W. “Aggregation Structure and Thermal Conductivity of Nanofluids”, *AIChE Journal* 49 (4), 1038-1043, 2003.

Xue, Q. Z. , “Model for effective thermal conductivity of nanofluids”, *Physics Letters A* 307, 313–317, 2003.

Xue, Q., and Xu, W.M., “A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells”, *Materials Chemistry and Physics* 90, 3298-3301, 2005.

Yang, Y.T. and Lai, F.H. “Numerical study of heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling system”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 5895-5904, 2010.

Yiamsawasd, T., Dalkilic, A.S. and Wongwises, S. , “Measurement of Specific Heat of Nanofluids”, *Current Nanoscience* 8 , 939-944, 2012.

Yu, D.,Warrington, R., Barron, R. and T. Ameel, “An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes”, *Proceedings of ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conference*, Newyork, s. 523–530, 19-24 Mar.,1995.

Yu, W. And S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Hamilton–Crosser model”, *Journal of Nanoparticle Research* 6, 355–361, 2004.

Yu, W. and Choi, S.U.S., “The role of interfacial layers in the enhanced thermal of nanofluids a renovated Maxwell model”, *Journal of Nanoparticle Research* 5, 1–2, 167–171, 2003.



ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Kayseri'de, lise eğitimini İstanbulda tamamladı. 1997 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1999 yılında vatani görevini tamamlamasına müteakiben, Niğde Üniversitesi Bor Meslek Yüksekokulu İklimlendirme ve Soğutma Programı'nda Öğretim Görevlisi olarak akademik hayata adımını attı. 2002 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği anabilimdalında yüksek lisansını tamamladı.

2004 yılında üniversitedeki görevinden istifa ederek 8 yıl süreyle çeşitli sanayi firmalarında görev yaptıktan sonra 2012 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Doğalgaz ve Tesisatı Teknolojisi programına Öğretim Görevlisi olarak atanmış olup halen görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

ADRES BİLGİLERİ:

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Niğde Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Elektrik ve Enerji Bölümü
Doğalgaz ve Tesisatı Teknolojisi Programı
Tel: +90 388 211 29 25
Gsm: +90 533 729 49 31