

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİNİ/MİKRO KANALLARDA NANOAKIŞKAN İLE
ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ
BEYTULLAH ERDOĞAN

ARALIK 2016

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİNİ/MİKRO KANALLARDA NANOAKIŞKAN İLE
ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Beytullah ERDOĞAN

DANIŞMAN : Doç. Dr. Adnan TOPUZ

İKİNCİ DANIŞMAN : Prof. Dr. Tahsin ENGİN

ZONGULDAK
ARALIK 2016

KABUL:

Beytullah ERDOĞAN tarafından hazırlanan “ Mini/Mikro Kanallarda Nanoakışkan İle Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 23/12/2016

Danışman: Doç. Dr. Adnan TOPUZ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



İkinci Danışman: Prof. Dr. Tahsin ENGİN

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye: Prof. Dr. Mehmet KOPAÇ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye: Doç. Dr. Halit YAŞAR

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye: Yrd. Doç. Dr. Mustafa EYRİBOYUN

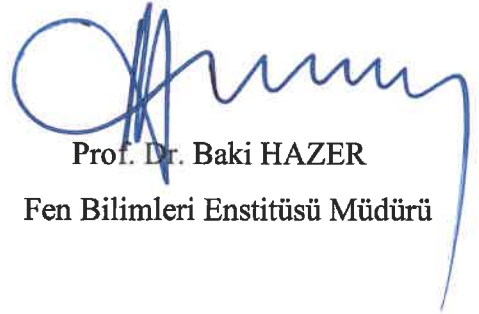
Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../2016



Prof. Dr. Baki HAZER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edilmiştirğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”


Beytullah ERDOĞAN

ÖZET

Doktora Tezi

MİNİ/MİKRO KANALLARDA NANOAKIŞKAN İLE ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Beytullah ERDOĞAN

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adnan TOPUZ

İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tahsin ENGİN

Aralık 2016, 143 sayfa

Bu çalışmada, sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı altında daire kesitli, yatay mikrokannallarda Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanoakışkanlarının ısı performansları ve basınç düşüşleri deneysel olarak incelenmiştir. %0.5, %0.7 ve %1.0 hacimsel derişime sahip nanoakışkanlar hazırlamak için, taşıyıcı sıvı olarak kullanılan saf suya Al_2O_3 (13nm), TiO_2 (10-25nm) ve ZnO (18nm) nanoparçacıkları ilave edilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanlar kararlılık süresini arttırmak amacı ile yüzey aktif maddesi olan Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) içerisinde karıştırılmıştır. Deneysel çalışmalar için bir deney seti kurulmuştur. Bu amaçla, farklı malzemelerden (paslanmaz çelik, Poly Ether Ether Ketone (PEEK)) imal edilmiş farklı iç çap ölçülerine (400, 750, 1000 μm) sahip farklı yüzey sıcaklıklarında (15, 25, 40°C) 20 cm uzunluğundaki mikro kanallar kullanılmıştır. Ayrıca, farklı giriş sıcaklığı, hacimsel debi (20, 35, 50 mL/dk) ve derişim oranlarına sahip nanoakışkanlar çalışma sıvısı olarak kullanılmıştır. Sıcaklık, debi ve basınç ölçümleri ile ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı, basınç düşüşü ve

ÖZET (devam ediyor)

sürtünme faktörü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar için gerekli olan ısıl iletkenlik ve viskozite değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Taguchi yöntemi kullanılarak hesaplanmış değerlerin yardımı ile optimum koşullar belirlenmiştir. Bu optimum koşullarda, deneyler saf su ve nanoakışkanlarla tekrarlanmıştır. Aynı optimum koşullar altında saf su ve nanoakışkanda elde edilen ısıl performans ve basınç düşüşü karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, ısıl performans ve basınç düşüşüne etki eden parametreler belirlenmiştir. Ayrıca tespit edilen bu parametrelerin sonuçları ne kadar etkilediği yüzdelik dilim olarak açıklanmıştır. Nanoakışkanların kullanıldığı ısı transferi uygulamalarında yüksek ısıl performans ve düşük basınç düşüşü için hangi parametrelere odaklanılması gerektiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak kararlılığı sağlanmış nanoakışkanlar arasında Al_2O_3 nanoakışkanı için en uygun değerler tespit edilmiştir. Al_2O_3 nanoakışkanı saf su ile karşılaştırıldığında, ısı transferi, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı değerlerinde sırasıyla ve %15.3, %21.7, %11.1 artış ve basınç düşüşünde %39.2 azalma belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mini/Mikro kanal, Nanoakışkan, Taguchi Yöntemi, Isı transferi.

Bilim Kodu: 625.04.03.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER OF NANOFLUIDS FLOWING INSIDE A CIRCULAR MINI/MICROCHANNELS

Beytullah ERDOĞAN

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Adnan TOPUZ

Co-Advisor: Prof. Dr. Tahsin ENGİN

Aralık 2016, 143 pages

In this study, the thermal performance and the pressure drops of Al_2O_3 , TiO_2 and ZnO nanofluids flowing through a horizontal circular microchannel under constant surface temperature boundary condition have been experimentally investigated. Al_2O_3 (13nm), TiO_2 (10-25nm) and ZnO (18nm) nanoparticles were added to deionized water used as base fluid in order to prepare nanofluids with 0.5%, 0.7% and 1.0% volume concentrations. The prepared nanofluids were mixed in Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) as surfactant to extend the stability time. An experimental setup has been made for the experimental study. For this purpose, a 20 cm length of microchannels made by both the different materials (Stainless steel, Poly Ether Ether Ketone (PEEK)) and the different inner diameter (400, 750, 1000 μm) have been used under the different surface temperatures (15, 25, 40°C). And also, the nanofluids had the different inlet temperature, the volume flow rates (20, 35, 50 mL/min) and the concentrations have been used as a work fluid. Heat transfer, convection heat transfer

ABSTRACT (continued)

coefficient, Nusselt number, pressure drop and friction factor results have been calculated by temperature, flow rate and pressure measurements. The thermal conductivity and viscosity values needed for the calculations have been measured separately. The optimum conditions have been determined from the calculated results being used Taguchi approach. Under those optimum conditions, the experiments have been conducted with deionized water, too. The thermal performance and the pressure drops of the nanofluid and the deionized water obtained under the same optimum conditions have been compared. This study has been showed that what parameters are effective or negligible on the thermal performance and the pressure drop. Furthermore, it has been explained how much those parameters affect the results as percent. For high thermal performance and low pressure drop at heat transfer applications with nanofluids, it has been highlighted what parameters it is necessary to be focused to. Consequently, the best result was obtained for Al_2O_3 nanofluid. When Al_2O_3 nanofluid is compared with deionized water, it is obtained that 15.3%, 21.7%, 11.1% increase and 39.2% decrease for heat transfer, convection heat transfer coefficient, Nusselt number and friction pressure drop, respectively.

Key Words: Mini/Micro Channels, Nanafluids, Taguchi Approach, Heat Transfer.

Science Code: 625.04.03.

TEŞEKKÜR

Çalışma hayatım boyunca bana her zaman destek olan, bilgilerini, deneysel tecrübelerini esirgemeyen ve Tübitak - 1505 Üniversite-Sanayi İşbirliği Destek Programı dahilinde bu projede bana yer veren Değerli Danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Adnan TOPUZ ve Prof. Dr. Tahsin ENGİN'e onsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin kurulumunda emeği geçen Sayın Makine Mühendisi Serdar MERT'e, Sayın Tekniker Ruhi OKUR'a teşekkürü borç bilirim.

Doktora eğitimim boyunca bana desteklerini esirgemeyen Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez, Bülent Ecevit Üniversitesi, Sakarya Üniversitesi, Uludağ Üniversitesi ve Kale Oto Radyatör Sanayi ve Ticaret A.Ş. işbirliği ile "Yeni Nesil Euro 5/6 Dizel Motorları için Nano Akışkanlı Radyatör Geliştirilmesi ve Prototip Uygulaması" isimli, 5140013 numaralı "TÜBİTAK 1505 – Üniversite-Sanayi İşbirliği Destek Programı" aracılığı ile yürütülen projenin deneysel bölümü kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ekonomik destekleri için TÜBİTAK ve Kale Oto Radyatör'e teşekkür ederim. Projenin sürdürülmesi sırasında fikir ve görüşlerini aldığım Kale Oto Radyatör AR-GE Direktörü Ahmet PERUT ve AR-GE Şefi Alper YETER'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak benim için çok değerli olan, her zaman yaşamımı kolaylaştıran ve hayatıma anlam katan aileme, hayatımda, iyi kötü günlerimde sürekli yanımda olan eşim Leyla'ya ve sevgisinden güç aldığım oğlum Hasan Eymen ve kızım Defne Melina'ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1
 BÖLÜM 2 KURAMSAL TEMELLER	 17
 2.1 ISI TRANSFERİ.....	 17
2.2 BOYUTSUZ SAYILAR.....	22
2.2.1 Reynolds Sayısı.....	22
2.2.2 Prandtl Sayısı	22
2.2.3 Nusselt Sayısı.....	23
2.2.4 Peclet Sayısı	23
2.3 MİKROKANALLAR.....	24
2.4 NANOAKIŞKANLAR.....	24
2.4.1 Nanoakışkan Türleri.....	25
2.4.1.1. Seramik Nanoakışkanlar	25
2.4.1.2. Saf Metal Nanoakışkanlar	25
2.4.1.3. Alaşım Nanoakışkanlar	25
2.4.1.4. Karbon Esaslı Nanoakışkanlar	26
2.4.2. Nanoakışkanların Hazırlama Yöntemleri	26
2.4.2.1. Tek Adım Yöntemi.....	26

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.4.2.2. İki Adım Yöntemi	26
2.4.3. Nanoakışkanların Kararlılığı.....	27
2.4.3.1. Nanoakışkanların Kararlılık Artırma Yöntemleri	28
2.4.3.2. Kararlılık değerlendirmesi.....	29
2.5. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	31
2.5.1. Isıl İletkenlik	31
2.5.2. Viskozite	36
 BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	 41
3.1. MİKROBORU DENEY SETİ.....	41
3.1.1. Deney Düzenekinde Kullanılacak Cihazların Seçimi ve Özellikleri.....	42
3.1.1.1. Pompa.....	42
3.1.1.2. Basınç Regülatörü	43
3.1.1.3. Isıtma ve Soğutma Banyosu.....	44
3.1.1.4. Paslanmaz Çelik Isı Değiştiricisinin Boyu (L _t)	46
3.1.2. Mikro Boru ve Bağlantı Elemanları.....	49
3.1.2.1. Bağlantı Elemanları (Fittings).....	49
3.1.2.2. Mikro Boru	50
3.1.3. Ultrasonik Homojenizatör.....	51
3.2. MİKROKANALDA DOĞRULAMA DENEYLERİ.....	52
3.2.1.Reynolds — Peclet Sayısı.....	55
3.2.2. Akış Türü	57
3.2.3. Hidrodinamik ve Isıl Gelişme Durumu.....	58
3.3.NANOAKIŞKAN HAZIRLANMASI, TEM SEM GÖRÜNTÜLERİ	67
3.3.1.Malzeme ve Yöntem	67
3.3.1.1.Nanopartikül özellikleri.....	67
3.3.1.2. Nanoakışkan hazırlama yöntemi	67
3.3.1.3. Nanoakışkan kararlılık parametreleri	70
3.3.2. Nanoakışkan kararlılık incelemesi.....	76

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

3.4.NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ	79
3.4.1. Isıl İletkenlik Ölçümü	79
3.4.2. Isıl İletkenlik Deneysel Veri Sonuçları.....	81
3.4.3. Viskozite Ölçümü	83
3.4.4. Dinamik Viskozite Deneysel Veri Sonuçları.....	85
3.4.5. Yoğunluk.....	87
3.4.6. Özgül Isı (c_p)	89
3.5. TAGUCHI YAKLAŞIMI İLE DENEY TASARIMI (TAGUCHI / DOE).....	91
3.5.1. Deneylerin Planlanması	91
3.5.2. Yapılacak Deneylerin Belirlenmesi	94
3.5.3. Deneylerin Yapılması	96
3.5.3.1. Isı Transferi	97
3.5.3.2. Isı Taşınım Katsayısı.....	97
3.5.3.3. Nusselt Sayısı	98
3.5.3.4. Sürtünme Faktörü	98
3.5.4. Sonuçların Analizi (Anova)	99
3.5.4.1. Isı Transferi S/N sonucu.....	101
3.5.4.2. Isı transferi için ortalama etkiler	103
3.5.4.3. Isı transferi için varyans analizi (ANOVA)	106
3.5.4.4. DOF değerleri.....	108
3.5.4.5. Karelerin toplamı.....	109
3.5.4.6. Varyans.....	111
3.5.4.7. F oranı	112
3.5.4.8. Saf toplam	112
3.5.4.9. Yüzde etki	113
3.5.4.10. Isı transferi için optimum seviyeler ve optimum performans	114
3.5.4.11. Isı Taşınım Katsayısı.....	117
3.5.4.12. Nusselt Sayısı	117
3.5.4.13. Sürtünme Faktörü.....	118
3.5.5. Sonuçların Doğrulanması.....	118
3.5.6. Taguchi Yöntemi İle Belirlenen Deneylerin Yapılması	119

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

3.5.6.1. Sonuçların Analizi.....	120
3.5.6.1.1. Isı Transferi için İşaret/Gürültü (Signal/Noise, S/N)* sonuçları.....	120
3.5.6.1.2. Isı transferi için ortalama etkiler.....	122
3.5.6.1.3. Isı transferi için varyans analizi (ANOVA, Analysis of Variance).....	123
3.5.6.1.4. Isı transferi için optimum seviyeler ve performans	124
3.5.6.1.5. Sürtünme Faktörü için S/N sonuçları	126
3.5.6.1.6. Sürtünme faktörü için ortalama etkiler.....	126
3.5.6.1.7. Sürtünme faktörü için optimum seviyeler ve performans	128
3.5.6.1.8. Sürtünme Basınç Kaybı için S/N sonuçları	129
3.5.6.1.9. Sürtünme basınç kaybı için ortalama etkiler	130
3.5.6.1.10. Sürtünme basınç kaybı için optimum seviyeler ve performans.....	131
3.6. TAGUCHI YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN VERİLER.....	132
3.6.1. Optimum Isı Transferi Şartlarında Sonuçların Karşılaştırılması	133
BÖLÜM 4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ	143

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Yıllara göre dizel motorlu araçlarda euro standartları.	2
Şekil 2.1 Bir boyutlu Isı İletimi.....	18
Şekil 2.2 Isı Taşınım Türleri	18
Şekil 2.3 İki Yüzey arasında ısı ışıınımı.....	19
Şekil 2.4 Laminar-Türbülanslı akışlarda akım çizgileri ve hız-zaman grafikleri.....	20
Şekil 2.5 Hidrodinamik Sınır Tabaka Gelişimi.....	21
Şekil 2.6 Isıl Sınır Tabaka Gelişimi	21
Şekil 2.7 Boru içi tam gelişmiş akışta Nu_D değerleri.....	23
Şekil 2.8 SEM Cihazının Çalışma Prensibi.....	30
Şekil 2.9 TEM Cihazının Çalışma Prensibi.	30
Şekil 2.10 Dinamik Işık Saçılım Spektrometresi (DLS) Çalışma Prensibi.....	31
Şekil 2.11 Su Bazlı Al_2O_3 için Deneysel Sonuçların Literatür denklemleri ile kıyaslanması .	34
Şekil 2.12 Su Bazlı TiO_2 için Deneysel Sonuçların Literatür denklemleri ile kıyaslanması. ..	34
Şekil 2.13 Su Bazlı ZnO için Deneysel Sonuçların Literatür denklemleri ile kıyaslanması. ..	35
Şekil 2.14 Su Bazlı Al_2O_3 için Deneysel Sonuçların Literatür ile kıyaslanması.	35
Şekil 2.15 Su Bazlı TiO_2 için Deneysel Sonuçların Literatür ile kıyaslanması.	35
Şekil 2.16 Su Bazlı ZnO için Deneysel Sonuçların Literatür ile kıyaslanması.....	36
Şekil 2.17 Su Bazlı Al_2O_3 için Deneysel Sonuçların Literatür denklemleri ile kıyaslanması.	38
Şekil 2.18 Su Bazlı TiO_2 için Deneysel Sonuçların Literatür denklemleri ile kıyaslanması. ..	38
Şekil 2.19 Su Bazlı ZnO için Deneysel Sonuçların Literatür denklemleri ile kıyaslanması. ..	39
Şekil 2.20 Su Bazlı Al_2O_3 için Deneysel Sonuçların Literatür ile kıyaslanması.	39
Şekil 2.21 Su Bazlı TiO_2 için Deneysel Sonuçların Literatür ile kıyaslanması.	40
Şekil 2.22 Su Bazlı ZnO için Deneysel Sonuçların Literatür ile kıyaslanması.....	40
Şekil 3.1 Mikro boru deney tesisatı.....	41
Şekil 3.2 Pistonlu Pompa	43
Şekil 3.3 Basınç Regülatörü.....	44
Şekil 3.4 Soğutucu ısı banyosundan gelen soğuk akışkan geçişi.	45
Şekil 3.5 Deneyde kullanılacak Isı Değiştiricisi.	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 3.6 Nanoakışkan sıcaklığının ısı değiştiricisi boyunca değişimi.	49
Şekil 3.7 Mikro boru, bağlantı elemanları ve istavroz.	50
Şekil 3.8 IVY Sistem Ultrasonik Homojenizatör.	52
Şekil 3.9 Doğrulama Deney parametreleri.	53
Şekil 3.10 Akışkan sıcaklığı ve akışkan debisi grafiği ($T-\dot{V}$).	53
Şekil 3.11 Nusselt ve Reynolds grafiği ($Nu-Re$).	54
Şekil 3.12 Nusselt ve Peclet grafiği ($Nu-Pe$).	55
Şekil 3.13 Hidrodinamik ve ısı giriş uzunluğu grafiği (L_h-L_t).	60
Şekil 3.14 Deneysel Nusselt ve teorik Nusselt grafiği ($Nu_{exp}-Nu_{the}$).	60
Şekil 3.15 Isı taşınım katsayısı ve Reynolds grafiği ($h-Re$).	61
Şekil 3.16 Isı transferi ve akışkan debisi grafiği ($Q-\dot{V}$).	61
Şekil 3.17 Sürtünme faktörü ve Reynolds logaritmik ölçekli grafik [$\log(f)-\log(Re)$].	61
Şekil 3.18 Sürtünme faktörü ve Reynolds grafiği ($f-Re$).	62
Şekil 3.19 Poiseuille ve Reynolds grafiği ($Po-Re$).	63
Şekil 3.20 Sürtünme basınç kaybı ve Reynolds grafiği (ΔP_f-Re).	64
Şekil 3.21 Nanopartikül TEM görüntüleri.	69
Şekil 3.22 Sıcaklık kontrollü nanoakışkan hazırlama.	70
Şekil 3.23 Yüzey aktif madde eklenip eklenmemesi durumunun belirlenmesi.	71
Şekil 3.24 SDS kütleli derişiminin belirlenmesi.	72
Şekil 3.25 Ultrasonik güç yoğunluğunun belirlenmesi.	72
Şekil 3.26 Ultrasonik karıştırma zamanının belirlenmesi.	73
Şekil 3.27 Banyo sıcaklığının belirlenmesi.	74
Şekil 3.28 Ultrasonik prob yüksekliğinin belirlenmesi.	74
Şekil 3.29 Cam beher çapının belirlenmesi.	75
Şekil 3.30 Nanopartikül çeşidinin etkisi.	76
Şekil 3.31 Optimum parametreler ile hazırlanan nanoakışkanlar.	77
Şekil 3.32 Seçilen nanoakışkanların kararlılık süreleri.	77
Şekil 3.33 ARTMER'deki STEM cihazı.	78
Şekil 3.34 Seçilen nanoakışkanların SEM görüntüleri.	78
Şekil 3.35 Seçilen nanoakışkanların TEM görüntüleri.	79

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 3.36 Isıl iletkenlik ölçümü	80
Şekil 3.37 Al_2O_3 nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ölçülen ısı iletkenlik değerleri.	81
Şekil 3.38 TiO_2 nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ölçülen ısı iletkenlik değerleri.....	82
Şekil 3.39 ZnO nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ölçülen ısı iletkenlik değerleri.	82
Şekil 3.40 Nanoakışkanların ölçülen ısı iletkenlik değerlerinin kıyaslanması.	83
Şekil 3.41 Viskozite ölçüm cihazının ısı banyosuna yerleştirilmesi.	84
Şekil 3.42 Al_2O_3 nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozite değerleri.	85
Şekil 3.43 TiO_2 nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozite değerleri.	86
Şekil 3.44 ZnO nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozite değerleri.....	86
Şekil 3.45 Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO farklı sıcaklıklarda ölçülen viskozitenin kıyaslanması.	86
Şekil 3.46 Al_2O_3 Nanoakışkanın sıcaklığa bağlı yoğunluk grafiği.....	88
Şekil 3.47 TiO_2 akışkanının sıcaklığa bağlı yoğunluk grafiği.	88
Şekil 3.48 ZnO akışkanının sıcaklığa bağlı yoğunluk grafiği.....	88
Şekil 3.49 Al_2O_3 Nanoakışkanın sıcaklığa bağlı özgül ısı grafiği.	89
Şekil 3.50 TiO_2 akışkanının sıcaklığa bağlı özgül ısı grafiği.....	90
Şekil 3.51 ZnO akışkanının sıcaklığa bağlı özgül ısı grafiği.	90
Şekil 3.52 Tüm faktörler ve seviyeleri.	93
Şekil 3.53 Yapılan deneylere göre S/N cinsinden ısı transferi değişimi.	102
Şekil 3.54 Isı transferi için faktör seviyelerinin ortalama etkisi	105
Şekil 3.55 Isı transferi için faktörlerin ANOVA grafikleri	108
Şekil 3.54 Optimum ısı transferi şartlarında S/N cinsinden beklenen ısı transferi aralığı.	115
Şekil 3.55 Yapılan deneylere göre ısı transferi değişimi.	121
Şekil 3.56 Isı transferi için faktörlerin ortalama etki grafikleri.....	123
Şekil 3.57 Isı transferi için faktörlerin ANOVA grafiği.	124
Şekil 3.58 Yapılan deneylere göre sürtünme faktörü değişimi.	126
Şekil 3.59 Sürtünme faktörü için faktörlerin ortalama etki grafikleri.....	126
Şekil 3.60 Yapılan deneylere göre sürtünme basınç kaybının değişimi	129
Şekil 3.61 Sürtünme basınç kaybı için faktörlerin ortalama etki grafikleri	130
Şekil 3.62 Optimum ısı transferi şartlarında ortalama ısı transferi sonuçları:	133
Şekil 3.63 Optimum ısı transferi şartlarında ortalama sürtünme basınç kaybı sonuçları:.....	134

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Kanal Boyutlarına göre sınıflandırılması.....	24
Çizelge 2.2 Literatürde kullanılan yüzey aktif maddeleri.....	29
Çizelge 3.1 Şekil-3.1.'deki deney tesisatı için malzeme ve cihazlar.....	42
Çizelge 3.2 Deney düzeneğinde kullanılacak mikro borularda oluşan basınç kayıpları.....	43
Çizelge 3.3 Literatürde Deneysel Kullanılan Pistonlu Pompalar.....	43
Çizelge 3.4 Mikro boru çeşitleri.....	51
Çizelge 3.5 400 µm iç çap için boyutsuz sayılar ve giriş uzunlukları.....	59
Çizelge 3.6 Mikrokanal Deney Tesisatı İçin Doğrulama Deneyleri.....	65
Çizelge 3.7 Nanopartikül özellikleri.....	67
Çizelge 3.8 Hacimsel derişim oranlarına göre nanoakışkanlar.....	69
Çizelge 3.9 Al ₂ O ₃ , TiO ₂ ve ZnO için farklı sıcaklıklarda ölçülen ısı iletkenlik değeri.....	81
Çizelge 3.10 Nanoakışkanlara ait elde edilen Isıl İletkenlik denklemleri.....	83
Çizelge 3.11 Nanoakışkanlarının farklı sıcaklıkta ölçülen dinamik viskozite değeri.....	85
Çizelge 3.12 Nanoakışkanlara ait elde edilen Isıl İletkenlik denklemleri.....	87
Çizelge 3.13 Nanoakışkanlara ait elde edilen yoğunluk denklemleri.....	89
Çizelge 3.14 Nanoakışkanlara ait Özgül Isı Denklemleri.....	90
Çizelge 3.15 Deney özeti.....	91
Çizelge 3.16 Tüm faktörler ve seviyeleri.....	92
Çizelge 3.17 Yaygın kullanılan mevcut ortogonal diziler.....	92
Çizelge 3.18 Kontrol edilebilen faktörler ve seviyeleri* ²	94
Çizelge 3.19 Kontrol edilemeyen faktörler (Gürültü Faktörleri)* ³	94
Çizelge 3.20 Deney sayıları.....	94
Çizelge 3.21 L-18 (2 ¹ , 3 ⁷) ortogonal dizisi.....	95
Çizelge 3.22 Faktörlerin ve seviyelerinin L-18 (2 ¹ , 3 ⁷) ortogonal dizisine yerleştirilmesi*....	96
Çizelge 3.23 Deney sonuçları.....	97
Çizelge 3.24 Isı transferi için S/N hesap Çizelgesi.....	102
Çizelge 3.25 Isı transferi için ortalama etkiler Çizelgesi.....	104

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.26 Isı transferi için ANOVA analiz çizelgesi.	108
Çizelge 3.27 Faktör, sütun, dizi ve deney için DOF değerleri.	109
Çizelge 3.28 Faktör, hata ve deney için DOF değerleri.	109
Çizelge 3.29 Isı transferi için optimum seviye ve optimum performans çizelgesi.	114
Çizelge 3.30 Beklenen optimum performans aralığı ve elde edilen ortalama performanslar.	118
Çizelge 3.31 Örnek Optimum performans için faktör seviyeleri.	118
Çizelge 3.32 Deney sonuçları.....	119
Çizelge 3.33 Isı transferi için S/N hesap Çizelgesi.	121
Çizelge 3.34 Isı transferi için ortalama etkiler Çizelgesi.	122
Çizelge 3.35 Isı transferi için ANOVA analiz çizelgesi.	123
Çizelge 3.36 Isı transferi için optimum seviye, faktör katkısı ve performans çizelgesi.	125
Çizelge 3.37 Sürtünme faktörü için optimum seviye, faktör katkısı ve performans çizelgesi.....	128
Çizelge 3.38 Sürtünme faktörü için faktör katkısı ve performans çizelgesi.	128
Çizelge 3.39 Basınç kaybı için optimum seviye, faktör katkısı ve performans çizelgesi.	131
Çizelge 3.40 Basınç kaybı için faktör katkısı ve performans çizelgesi.....	131
Çizelge 3.41 Optimum ısı transferi şartları için belirlenen faktör seviyeleri	132
Çizelge 3.42 Al_2O_3 için performans aralığı ve elde edilen ortalama performanslar.	132
Çizelge 3.43 Optimum ısı transferi şartlarında tüm sonuçlar ve baz akışkana göre değişim	133

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Yüzey alanı (m^2)
C_p	Özgül ısı (kJ/kgK)
C_{XL}	X faktörünün L seviyesinde performansa katkısı
d_{np}	Nanopartikülün çapı (nm)
D_h	Hidrolik çap (m)
f	Sürtünme faktörü ($-$)
F	Güven seviyelerine göre F çizelgeleri
F_X	X faktörünün F oranı
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_{mb}	Mikroboru çıkışındaki yükseklik (m)
h_{nt}	Nanotabaka kalınlığı (nm)
k	Isıl iletkenlik (W/mK)
K_i	i konumundaki yerel kayıp katsayısı ($-$)
L	Mikro boru uzunluğu (m)
L_{he}	Isı değiştiricisi boyu (m)
L_x	X faktörünün seviye sayısı
m	Baz akışkan kütlesi (kg)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
MSD	Karelerinin ortalamasının sapması
n	Birim hacimdeki partikül sayısı ($1/m^3$)
N	Yapılan toplam deney sayısı
Nu	Teorik ortalama Nusselt sayısı
n_1	Ortalama performansın DOF değeri
n_2	Hata teriminin DOF değeri
n_d	Deneyde tekrarlanan sonuçların sayısı
N_{SN}	Toplam sonuç sayısı veya toplam S/N sayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

N_{X1}	X faktörünün 1 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısı
N_{X2}	X faktörünün 2 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısı
N_{X3}	X faktörünün 3 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısı
N_{X4}	X faktörünün 4 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısı
N_{XL}	X faktörünün L seviyesine karşılık gelen S/N sayısı
N_{eff}	Etkin tekrar sayısını
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
P_X	X faktörünün yüzde etkisi
ΔP_h	Mikroboru çıkışındaki hidrostatik basınç (Pa)
$\Delta P_{K,i}$	Nanoakışkan çıkış yerine kadar yerel basınç kayıpları (Pa)
$\Delta P_{Total, Loss}$	Mikrokanal giriş-çıkışı arasındaki toplam basınç kaybı (Pa)
$\Delta P_{f,i}$	Tüm boruların uzunluğu boyunca sürtünme basınç kaybı (Pa)
ΔP	Basınç düşümü (Pa)
$\dot{Q}$	Isı transferi (W)
r	Nanopartikül yarıçapı (nm)
R_i	Bir deneyde i sırasındaki deney sonucu
R_o	Hedeflenen deney sonuçları
S_{Top}	Tüm deneylerin kareleri toplamı
S_X	X faktörünün kareleri toplamı
S'_X	X faktörünün saf toplamı
ΔT_{in}	Polimer girişinde, nanoakışkan ve ısı banyosu sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
ΔT_{ln}	Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
ΔT_{out}	Polimer çıkışında, nanoakışkan ve ısı banyosu sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
$\bar{T}$	Toplam performans ortalaması
U	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
V	Akışkanın ortalama hızı (m/s)
X_1	X faktörünün 1 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamı
X_2	X faktörünün 2 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamı
X_3	X faktörünün 3 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamı
X_4	X faktörünün 4 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

X_L	X faktörünün L seviyesinin S/N değerlerinin toplamı
$\bar{X}_L$	X faktörünün L seviyesindeki ortalaması
$X_{avg,L}$	X faktörünün L seviyesindeki ortalaması
ϑ_X	X faktörünün varyansı
ϑ_{err}	Hata teriminin varyansı
$\phi_{SDS,np}$	SDS / Nanopartikül kütleli derişimi (%)
$\phi_{equivalent}$	Nanotabaka kaplı nanopartikülün eşdeğer hacimsel derişimi (%)
$\forall$	Nanoakışkan hacmi (mL)
$\dot{\forall}$	Akışkan hacimsel debisi (m^3/s)
α	Isıl difüzyon (m^2/s)
μ	Dinamik viskozite ($Pa.s$)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
σ	Stefan-Boltzmann sabiti ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2K^4)]$)
ϑ	Kinematik viskozite (m^2/s)
ϕ	Hacimsel katkı oranı (%)
np	Nanopartikül
nf	Nanoakışkan
bf	Baz akışkan
hb	Isıtıcı akışkan
chb	Soğutucu akışkan
in	Giriş
out	Çıkış
s	Yüzey
ln	Logaritmik
the	Teorik
exp	Deneyisel

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ulaşım, elektronik, nükleer, savunma, uzay, enerji üretimi gibi birçok sektörde ihtiyaç duyulan ısıtma soğutma talepleri, yeni soğutma teknolojilerinin ortaya çıkmasında önemli bir etken olmuştur (Ghadimi 2011). Özellikle taşıt ve ağır iş makinalarında ısıнын önemli bir kısmının soğutma yoluyla motordan uzaklaştırılması gerekmektedir. Yüksek verimli, hafif ve çevre dostu motor tasarımına dönük çalışmalar motorların soğutma performansını doğrudan etkilemektedir. 2001 yılında başlayan Euro standartlarına göre dizel motorlu bir otomobilin egzozundan çıkan emisyon gazlarının miktarının (0,50 g/km→ 0,08 g/km) yıllar geçtikçe azaldığı Şekik 1.1.'de görölmektedir. Son olarak 2015 yılı Euro standartlarına göre egzozdan çıkan gazın miktarı 0,08 gr/km olmalıdır. Motor egzoz gazları; su buharı, karbondioksit ve azot dioksit gibi maddelerin yanında, insan ve çevre için tehlikeli olan karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC) ve azot oksit (NO_x) de içermektedir. Emisyon değerlerinin düşürölmesi için, araçların motor güçleri ve motor sıcaklıkları artmış, radyatör için ayrılan hacimler sabit kalmış ve radyatörlere ek soğutma yükü çıkmıştır.

Günümüz uygulamalarında bu talepleri karşılamak için, ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanlarında artış, daha fazla ısı transferi için daha yüksek sıcaklık farkları ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzeme kullanımı gibi yöntemler kullanılmaktadır. Fakat boyutsal sınırlar, malzeme dayanım sınırları ve üretim maliyeti gibi nedenlerle bu yöntemlerin kullanımında varılabilecek üst değerlere ulaşılmıştır. Ayrıca etilen glikollü su, motor yağı gibi mevcut iş akışkanlarının ısı transferindeki performans sınırları nedeniyle, bir çözüm olarak mili-mikrometre boyutunda partiküller içeren akışkanlar kullanılmaktaydı. Fakat bu partiküllerde topaklanma ve çökelme ile oluşan kararsızlık, mikro kanallarda tıkanmaya ve ısı transfer performansında istenen artışların elde edilememesine neden olmuştur (Hwang, 2008). Zamanla üretim teknolojisinin gelişmesi ile nanometre boyutunda partiküller ve bu sayede nanoakışkanlar elde edilmiştir. Yeni nesil radyatörlerde nanoakışkan ve mini/mikro kanal kullanımı ile;

- Mikrokanal kullanımı sayesinde daha geniş yüzey alanına sahip olması,
- Yüksek ısıl performanslı soğutucu akışkan (nanoakışkan) içermesi,
- Soğutma sisteminin boyutları, mevcut radyatör boyutlarından daha küçük olması,
- Soğutma sisteminin ağırlığının azaltılması,
- Araç yakıt tasarrufuna olumlu katkı sağlaması,

gibi yukarıdaki amaçlar doğrultusunda deneysel ve teorik araştırmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.1 Euro Standartlarına göre yıllara göre dizel motorlu araçlarda atmosfere salınabilecek egzoz gazı değerleri (URL-1).

Nanoakışkanların homojen olarak karıştırılması, kararlılık analizleri ve kararlılık için görüntü alma konularında teorik ve deneysel çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Xuan and Li (2000), Li and Xuan (2002), çalışmalarında CuO-H₂O ve CuO-Yağ nanoakışkanlarını iki adım yöntemini kullanarak hazırlamışlardır. Nanopartikülün topaklanmasını önlemek için ise ultrasonik karıştırıcı ve yüzey aktif madde kullanmışlardır. 2 adım yöntemi ile 1 adım yöntemine göre daha kararlı nanoakışkanlar elde edilmiştirğini vurgulamışlardır.

Şahin ve ark. (2006) tarafından literatür çalışmaları ve nanoakışkan uygulama alanları hakkında bilgi verilmiş. Nanoakışkanlar ile ısı transferinin iyileştirilmesi üzerine 5 maddede nedenler belirtilmiştir. Nanoakışkan hazırlamada dikkat edilmesi gerekenler, nanoakışkanların endüstriyel uygulamaları ve gerekliliğinden bahsetmiştir.

Peng ve Yu (2007) çalışmasında nanoakışkanların stabilitesine etki eden faktörleri incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre süspansiyonun stabilitesini etkileyen en önemli faktörlerin nanopartiküllerin konsantrasyonu, yüzey aktif madde, temel akışkanın viskozitesi

ve pH değeri olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca nanoakışkanın stabilitesini nanopartikül çapının, yoğunluğunun ve ultrasonik karıştırmanın da etkilediği tespit edilmiştir.

Karimzadehkhoei ve ark. (2015a) tarafından kullanılan nanopartiküllerin boyutları yaklaşık 20 nm olup, ağırlıkça 0.01–3 % derişim oranlarında saf su eklenerek Al₂O₃ ve TiO₂ nanoakışkanlarını elde etmişler ve Dynamic Light Scattering (DLS), Scanning Electron Microscopy (SEM) ve zeta potansiyel ölçümü ile homojenizasyonu ve kararlılığı tespit etmişlerdir.

Dilek (2008a) çalışmasında CuO, Al₂O₃ partiküllerinin su bazlı nanoakışkanları hazırlama, ultrasonik karıştırıcıda karıştırma, ısı iletkenlikleri ölçme, ısı iletkenlikleri teorik modellerle karşılaştırma işlemlerini yapmıştır. TEM görüntüleme ile kararlılıkları incelemiş ve seyreltici kullanımının kararlılığa etkisi araştırılmıştır. Nanoakışkan hazırlanmasında iki adım metodu ile CuO, Al₂O₃ nanopartikülleri ve saf su kullanılmıştır. Her iki nanoakışkan için hacimsel katkı oranları %0,5, %1,0, %2,0, %4,0 olarak belirlenmiştir. Nanoakışkan toplam hacmi 50 mL olarak belirlenmiştir. Nanoakışkanlar 20-24 saat, 300 W ve 28 kHz özellikli ultrasonik banyoda karıştırılmış, Transient Line Heat Source yöntemi ile oda sıcaklığında ısı iletkenlikleri ölçülmüş ve TEM görüntüleri ile kararlılıkları incelenmiştir.

Li ve ark. (2009) çalışmasında nanoakışkanın stabilitesini artırmak için birçok yöntem kullanmıştır. En basit ve en güvenilir yöntem sedimentasyon (çökelme) yöntemidir. Bu yöntemde çökelme zamanıyla konsantrasyonun değişimi veya yüzeydeki partikül boyutu özel cihazlarla elde edilmiştir. Test borusundaki kamerayla kaydedilen nanoakışkanın çökelme fotoğrafları, nanoakışkanın stabilitesini belirlemek için kullanılan diğer bir yöntemdir. Ayrıca zeta potansiyeli metodu da nanoakışkanın stabilitesini belirlemek için kullanılmış, fakat bu yöntemin nanoakışkanın viskozitesiyle ve konsantrasyonuyla kısıtlandığını belirtmiştir.

Turgut (2010a) çalışmasında 50 mL toplam hacimli SiO₂-Su, TiO₂-Su, Al₂O₃-Su, Al₂O₃-EG ve aktif yüzey katkılı birkaç nanoakışkan, ultrasonik karışımla elde etmiştir. Ultrasonik karıştırma zamanı, tüm nanoakışkan hazırlama işlemleri için 30 dakika olarak tespit edilmiş ve nanoakışkanların kararlılığı, hazırlandıktan sonra bekletme süresi olmadan zeta potansiyeli ölçümleri ile belirlenmiştir.

Chandrasekar ve ark. (2012) tarafından yapılan bu çalışma da nanoakışkanların ısı transferini artırma sebeplerinden birisi, nanopartikül eklenmesiyle cidar yakınında sınır tabaka kalınlığında azalma olmasıdır. Tel yay veya dalgalı boru kullanılması, bükülmüş şerit, düz

şerit veya yay şeklinde çubuk kullanılmasına göre daha iyidir. Çünkü tel yay veya dalgalı boru cidar yakınında akışı bozar. Oysaki bükülmüş şerit veya düz şeritin kullanılması tüm akış alanını bozar. Ayrıca tel yaylar veya üzerinde çukurlar bulunan borular basınç düşümünü azaltır, düşük maliyetlidir, kolay taşınır ve yerleştirilir.

Bhanvase ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada TiO_2 katkılı su (%60) ve Etilen Glikol (EG) (%40) karışımından oluşan baz akışkan ile elde edilen nanoakışkanın ısı transfer performansı deneysel olarak incelenmiştir. Nanoakışkan derişimi, debisi ve giriş sıcaklığının ısı transferi performansı üzerindeki etkileri de belirlenmiştir. TiO_2 nanopartikülleri Su-EG karışımına katılıp karıştırıldıktan sonra, üniform dağılım elde etmek için 30 dakika süre boyunca ultrasonik karıştırma yapılmış ve TiO_2 derişiminin 1/4'ü oranında Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) eklenerek yüzey katkı maddesinin nanoakışkanın viskozitesi ve yüzey gerilimi dışında fiziksel özelliklerinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı vurgulanmıştır.

Sıdık ve ark. (2014) tarafından kararlı nanoakışkanlar hazırlamak için uygun yöntemleri araştıran araştırmacıların yaptıkları çalışmalar; literatür çalışması olarak sunmuşlardır. Nanoakışkanlar, 1 adım ve 2 adım yöntemleri ile elde edilmiş ve 1 adım yöntemi ile elde edilenlerin 2 adımla üretilenlerden daha kararlı olduğunu belirlemişlerdir. Nanoakışkan kararlılığını sağlamada ultrasonik karıştırma, pH ayarlama veya yüzey katkı maddesi ekleme yöntemleri kullanılacağı ve nanoakışkanların kararlılığının, ısı iletkenlikle benzer özellik göstereceğini vurgulamışlardır. Akışkan ne kadar kararlı ise ısı iletkenliğinin de o kadar yüksek olacağını ve CuO , SiO_2 , Al_2O_3 nanoakışkan özgül ısılarının, baz akışkanınkinden küçük olacağı ve nanoakışkanların ticarileşmesinde kararlılık ve üretim maliyetlerinin temel sorun olarak görüleceğini belirtmişlerdir.

Nanoakışkan kullanılarak ve mini/mikro borularda ısı transferi, Nusselt sayısı, ısı taşınım katsayısı vb. konuları ile ilgili yapılan araştırmalar sunulmuştur:

Charyulu ve ark. (1999) çalışmasında turbo bataryalı dizel 232 V-12 tipi, 368 kW güçte, 147 kW soğutma ihtiyacı olan turbo-şarjlı gerçek bir dizel motoruna yerleştirilen radyatörün performansını incelemiştir. Sonuçlar, radyatörün gereğinden büyük tasarlandığını ve radyatörün özellikleri, değişken hava kütsel debileri, değişken soğutucu akışkan debileri, farklı boru düzenleri ve kanat-boru malzemeleri için, kirlenme faktörü hesaba katılarak ve ihmal edilerek incelemiştir. Bakır kanatlı bakır, pirinç ve karbon çeliği boruların aynı ısı transferi ve basınç düşümünü gösterdiklerini tespit etmiştir. Radyatör, soğutucu akışkan ve havanın karışmadığı, çapraz akışlı kompakt bir ısı değiştiricisidir. Hava ve soğutucu akışkan

tarafı için gereken denklemler belirlendikten sonra bir bilgisayar programı ile hesaplar yapılarak, bakır kanatlı, pirinç borulu radyatörde, soğutucu akışkandan havaya geçen ısı transferi, kirlenme faktörü yokken 191 kW, kirlenme faktörü ile 184 kW bulmuştur. Radyatör toplam ısı transfer katsayısının, ısı transferinin ve basınç düşümünün hava debisine, hava giriş sıcaklığına, soğutucu akışkan debisine, soğutucu akışkan giriş sıcaklığına, boru sayısına, malzeme tipine ve kirlenme ısı direncine göre değişimini göstermiştir.

Abbassi ve ark. (2006) tek aşamada ısı transferini incelemiş ve gözenekli ortam modeli esas almıştır ve hem akışkanın akışı hem de ısı transferi için iki denklem modeli kullanmıştır (Darcy). Isı transferi analizi için termal dağılım modeli benimsenmiş verimli termal iletkenlik araştırmıştır. Akışkan ve parçacık arasındaki kabuklu ara yüzün etkilerini göz önünde bulunmuştur. Termal dağılım katsayısıyla birlikte Reynolds sayısının ısı alan ve performans üzerine etkisi incelenmiştir. Mikrokanalın toplam boyu ve genişliği 1 cm. iken her bir kanalın yüksekliği 365 μm ve kanal genişliği 57 μm olup $\epsilon=0.5$ gözeneklilikte bir mikrokanal incelenmiştir. Isı transfer kazanımı için katkı sağlayabilecek dört faktör ele almıştır:

- Parçacıkların hareketi,
- Katı ve sıvı arasındaki yüzeyde sıvının tabakalaşması,
- Kümelenmiş nanoparçacıkların etkisi,
- Nanoparçacıkların ısı aktarım niteliği.

Yukarıdaki faktörlerin yanı sıra Reynolds, Peclet sayısı ve parçacığın hacim kesrine bağlı olarak ısı transfer kazanımını değerlendirmiştir. Li ve Xuan korelasyonu atfedilerek Nu sayısının Re sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı ve bu artışın akış hızını da aynı doğrultuda etkilediği belirlenmiştir. Termal dağılımın ortalama parçacık çapı ve yüzey geometrisine göre değiştiği belirlenmiştir. Cu-su nanoakışkanı için %0,3 ile 6 arasında nanoakışkanın hacimsel oranı arttıkça ısı transfer kazanımı ve Re sayısında artış olacağı belirlenmiştir.

Canay (2007) tarafından yapılan çalışmada bir ve iki fazlı akış için mikro etkiler ve ölçek etkileri dikkate alınarak, akış ve ısı geçişi üzerine yapılmış literatür araştırmaları incelenmiştir. Literatür çalışmalarında, aynı deneylerdeki çelişkiler vurgulanmış ve bu çelişkilerin çoğunlukla deneysel hatalardan kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, ilerleyen teknoloji ile yeni yapılan deneylerde, makro boyuttaki kanallarda geçerli olan süreklilik,

momentum, enerji denklemleri gibi geleneksel bağıntıların mikro boyuttaki kanallarda da geçerli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bhattacharya ve ark. (2009) çalışmasında mikrokanalda Al_2O_3 -su nanoakışkanının laminar zorlanmış taşınımın ısı transfer karakteristikleri için nümerik olarak çalışmıştır. Termal direnç özelliği ön planda tutulmuştur. Klasik fin teorisine analitik olarak yaklaşıldığı bu teoride genellikle, üniform akışkan sıcaklığı ve sabit ısı transfer katsayısı için sonuçlar belirlenmiştir. 57 μm genişlikte mikrokanal, 180 μm derinliğe sahip silikon bir tabaka üzerine imal edilmiştir. Mikrokanaillerin imal edilen üst bölgesi mikrokanaillerin kapalı formu için bir cam kaplama levhası ile bağlanmıştır. Termal iletkenlik sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmiş ve türetilmiştir. Gözenekli ortam modeli kullanılmıştır. Yüzey geometrisi ve nanoparçacık çapına bağlı termal dağılım katsayısı için 0.005'lik bir sabit değer alınmıştır. Reynolds sayısı sabit tutularak hacim kesir oranı azaldıkça termal direncin arttığı ve ısı transfer kazanımının azaldığı görülmüştür. Hacim kesri sabit tutulup Reynolds sayısı arttıkça ısı transfer kazanımının arttığı belirlenmiştir. Sabit tutulan Reynolds sayıları 250 için hacim kesir oranları %2 ile %0 (saf su) için kıyaslanmıştır. Kıyaslanan Reynolds sayıları ise 250 ile 500 arasındadır. Ancak nanoparçacık konsantrasyonu için limit %3 olarak belirlenmiştir. Reynolds sayısı için ise bu sınır değer 500'dür. Bu verimli nanoparçacık konsantrasyon olduğu söylenebilir.

Parlak (2010) çalışmasında mikro boruda saf su akışının laminar akış analizi ve ısı geçişi özellikleri, adyabatik ve sabit yüzey sıcaklığı sınır şartlarında, hem deneysel hem de bilgisayarlı simülasyon ile incelemiştir. Analizde mikro boru iç çapı, mikro boru boyu, mikro boru iç yüzey pürüzlülüğü, viskoz ısınma ve mikro boru giriş etkileri de parametreler olarak dikkate alınmıştır. Deneyler için paslanmaz çelik, ergimiş silis ve polimer malzemeden oluşan, dairesel kesitli, 5 ile 20 cm uzunluklarında, 50 ile 180 μm çaplarında mikro borular kullanılmıştır. 20 ile 3200 arasında değişen Reynolds sayılarıyla deneyler yapılmıştır. Kurulan deney düzenğinde mikro boru boyunca basınç düşüşü ölçülerek mikro borudaki akışkan için sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Adyabatik şartlar, mikro borudaki akışkan akışının viskoz ısınma etkisini göstermek için sağlanmıştır. Bunun için mikro boruya gönderilen akışkan, ortam sıcaklığında tutulmuş ve mikro boru yalıtım malzemeleri ile yalıtılmıştır. Mikro boru giriş çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Böylece akışkanın mikro boru boyunca akışı sırasında, akışkan katmanlarının birbirine sürtünmesi sonucu oluşan sıcaklık artışı belirlenmiştir. Bu sıcaklık artışı, adyabatik şartlar ile korunmuştur. Sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı, mikro

borudaki ısı geçişi deneyleri için sağlanmıştır. Bunun için mikro boru sabit sıcaklık banyosu içine yerleştirilmiştir. Debi ve dolayısı ile Reynolds sayısı değiştirilerek Nusselt sayısının değişimi incelenmiştir. Ayrıca, deneydeki aynı şartlarda CFD programı ile sayısal analiz gerçekleştirilmiş, Termodinamiğin II. yasası analizi ile de entropi üretimi üzerinden, adyabatik şartlarda mikro borudaki akışkan çıkış sıcaklığı hesaplanmıştır. Laminer bölgede, mikro boru pürüzlülüğünden bağımsız olarak, literatürde mevcut olan basınç kaybı ve sürtünme faktörü bağıntılarının kullanılabileceği belirtilmiştir. Pürüzlülük nedeniyle laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş daha düşük Reynolds sayılarında görülmüştür. Yapılan deneyler sonucu, 100~180 m hidrolik i çaplı mikro borularda tek fazlı zorlanmış saf su akışı için;

$$300 < Re < 1600 \text{ aralığında} \quad Nu = 0.0214Re^{0.67}Pr^{0.33}$$

$$2500 < Re < 5200 \text{ aralığında} \quad Nu = 0.0067Re^{0.87}Pr^{0.33} \text{ bağıntıları önerilmiştir.}$$

Duangthongsuk ve Wongwises (2010) ise zorlanmış konvektif ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan nanoakışkan hacimsel olarak %0.2-%2 TiO₂ nanopartikülleri su içerisine katılarak hazırlanmıştır. Nanoakışkan türbülanslı akış şartlarında yatay çift borulu çapraz akışlı ısı değiştiricisi içerisinde kullanılmıştır. Nanoakışkanın ısı transfer katsayısının temel akışkanınkinden yaklaşık olarak %26 daha fazla olduğu, Reynolds sayısındaki ve partikül konsantrasyonundaki artışla daha arttığı belirlenmiştir. Sonuçlar aynı zamanda, %2 hacimsel konsantrasyonunda nanoakışkanın ısı transfer katsayısının verilen şartlar için temel akışkanınkinden yaklaşık olarak %14 daha düşük olduğunu göstermiştir. Çalışmada, nanoakışkanın basınç düşümü temel akışkana kıyasla çok az yüksektir ve artan hacimsel oranla artmıştır.

Ho ve ark. (2010) alışmasında mikrokanal için 800 m yükseklik, 203 m genişliğinde bir kesit alanda 50 mm. boyundaki 25 paralel mikrokanal imal edilmiştir. 226'dan 1676'ya kadar değişen Reynolds sayılarıyla, maksimum duvar sıcaklığı, termal direnç, ortalama ısı transfer katsayısı, pompa gücü ve sürtünme faktörü için elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. İki tip 'thermocouple' mikrokanalın iki ucunda imal edilmiştir ve 6 küçük delik, mikrokanelerin temel yüzeyleri altında 6 mm'lik bir mesafede ölçüm sıcaklıkları için merkez boyunca delinmiştir. %99.95 saflıkta 33 nm civarında parçacık boyutu için deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir. %2 Hacimdeki alümina nanoakışkanının suyla karşılaştırıldığında yoğunluk ve termal iletkenliğin sırasıyla %5,2 ile %5,4 arttığı gözlenmiştir. Hacimsel debiye ve Reynolds sayısına bağlı olarak yapılan deneylerde akışın yoğunlaşmasına dayalı olarak

bazı mikrokanalların içerisinde tıkanma tespit edilmiştir. Buna göre tıkanmanın Reynolds sayısına bağlı olarak türbülanslı akıştan dolayı ve debi miktarıyla ilgili olduğu söylenebilir. Burada debi miktarı alümina-su nanoakışkanı için $663 \text{ cm}^3/\text{dk}$ olduğu belirlenmiştir. Suda alümina parçacıkların dağılımına bağlı dinamik viskozitedeki artış belirginleşmesine rağmen, nanoakışkan için sürtünme faktörünün konsantrasyona bağlı olarak çok az arttığı belirlenmiştir. %1-2 arasındaki hacimsel kesir için (ϕ) sürtünme faktöründe hafif bir artış olduğu tespit edilmiştir. %1 hacimdeki nanoakışkan için ortalama Nu sayısında $Re=332$ ve 1641 için %40 ile 53 arasında artış olduğu belirlenmiştir. %2 hacimdeki nanoakışkanda ise Nu sayısındaki artışın daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre dikkat edilmesi gerekenlerin mikrokanaldaki tıkanma, nanoparçacıkların kümelenmesi, çökmesi olduğu görülmektedir. İstenilen ısıdaki farklılığın ortalama ısı transfer katsayısı üzerine belirgin etkisi olduğu incelenmiştir. Dinamik viskozitedeki değişkenliğin ısı transfer kazanımında azalan bir faktör olduğu da görülmektedir.

Leong ve ark. (2010) çalışmalarında etilen glikol bazlı Cu katkılı nanoakışkan ile çalışan bir araç radyatöründeki ısı performans artışını, geleneksel soğutucu akışkanları kullanan radyatörler ile karşılaştırmıştır. Cu nanopartiküllerin hacimsel katkı oranının, ısı performans ve radyatör boyutundaki küçülmeye etkisi incelenmiştir. Cu nanopartiküller, Al_2O_3 gibi diğer nanopartiküllere göre daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu için çalışmada kullanılmıştır.

Özerinç (2010) çalışmasında nanoakışkan ısı transfer artışının, ısı iletkenlik artışı ile birlikte nanopartiküllerin rasgele hareketi sonucu oluşan ısı yayılımı gerçeğe geçtiğini belirtmiştir. Bu ısı yayılım modelinin geçerliliğini incelemek üzere bir analiz yapılmıştır. Bu analiz için, sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akısı sınır şartlarında, dairesel bir boru içinde, hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak gelişen laminar Al_2O_3 -Su nanoakışkan akışı sonlu fark yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu analiz sonucu elde edilen sayısal sonuçlar, literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve deneysel verilerle iyi bir uyum gözlenmiştir. Böylece bu ısı yayılım modelinin geçerli olduğu gösterilmiştir. Ayrıca teorik bir analiz de yapılarak, nanoakışkan ısı transfer artışı için kullanılan klasik bağıntıların uygun olmadığı gösterilmiştir.

Ahmet ve ark. (2011) ise izotermal olarak ısıtılmış kıvrımlı kanal yoluyla akan Cu- H_2O nanoakışkanının ısı transfer kazanımı ve basınç düşüş karakteristikleri üzerine nümerik olarak çalışmıştır. 100-1000 arası Reynolds sayısı ile hacim kesri %0-5 için belirlenmiştir. Basınç düşüşünde hafif bir artış varken Reynolds sayısı ve nanoparçacığın hacim orandaki artışa göre ısı transfer kazanımının arttığı bulunmuştur. Nanoparçacıkların etkisine bağlı olarak hacim

kesrindeki artışla duvara yakın sirkülasyon bölgesinde akım çizgilerinde artış olduğu gözlenmiştir. Yine hacim kesrindeki değişimle Nu sayısında da değişimin olduğu ve benzer trendin Re sayısında olduğu gözlemlenmiştir. Duvar boyunca genişleyen bölgeden daralan bölgeye doğru local Nu sayısının arttığı da belirlenmiştir. Sonuç olarak dar bölgede ısı transferinin maksimum olduğu görülmüştür. Kıvrımlı kanal için maksimum yükseklik 16 mm. iken en az yüksekliğin 10 mm. olduğu görülmüştür. Kıvrımlı kanal boyunca 6 döngü mevcuttur ve döngü eksenini de 20 mm dir. Kıvrımlı bölümden önce ve sonraki her adyabatik düz duvar boyu 40 mm.dir. Kıvrımlı kanal için kullanılan Cu-su nanoakışkanı için en yüksek ısı transfer artışının % 43,9 değerle $Re=200$ ve $\phi=5$ olduğu belirlenmiştir.

Godson Asirvatham ve ark. (2011) çalışmasında 4.3 mm iç çaplı boru içerisinde Gümüş-Su nanoakışkanı ile çapraz akışlı ısı transfer test bölgesinde deneysel çalışma yapmışlardır. Aynı Reynolds sayısında, süspanse edilen nanopartiküllerin temel akışkan olarak kullanılan suyun ısı transferi performansını önemli bir şekilde artırdığı sonucu elde edilmiştir. Isı transfer katsayısında %69.3'e kadar artış sağlanmıştır. Hız, taşıma özelliği, nanopartikülün hacimsel oranı gibi nanoakışkanın konvektif ısı transferine etki eden faktörler düşünülerek, metal partiküllerin süspanse edilmiştir. nanoakışkanlar için yeni konvektif ısı transferi korelasyonları geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla, hesaplanan sonuçlar karşılaştırılarak, korelasyonlarla, ısı transferine etki eden temel faktörlerin dikkate alınabileceği ve $\pm\%10$ sapma ile tahmin yapılabileceği belirtilmiştir.

Mohammed ve ark. (2011) çalışmasında üçgen şeklindeki mikrokanal için $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de üst plakada 100 W/m^2 ısı akısı için $Re=100-1000$ arasındaki değerlerde %2 hacimsel konsantrasyon için 3 boyutlu simülasyon yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. $500\text{ }\mu\text{m}$ mikrokanal arasındaki boşluk olarak belirlenerek $230\text{ }\mu\text{m}$ hidrolik çapa sahip mikrokanalın tabandan yüksekliği $430\text{ }\mu\text{m}$, ve üçgenin kenarları da $280\text{ }\mu\text{m}$ ve $452\text{ }\mu\text{m}$ olup taban açısı 36° 'dir. Bu mikrokanala Al_2O_3 -su, SiO_2 -su, CuO -su, TiO_2 -su ile Ag-su nanoakışkanları gönderilerek değerler karşılaştırılmıştır. Elmas-su nanoakışkanının en düşük sıcaklık ve en yüksek ısı transfer katsayısına sahipken Al_2O_3 -su için tam tersi bir durum ortaya çıkmıştır. CuO -su nanoakışkanıyla TiO_2 -su nanoakışkanı ısı transfer katsayısı bakımından aynı performansı sergilemektedirler. Saf suyla karşılaştırılan tüm nanoakışkanlar için sürtünme faktörü ve basınç düşüşünde hafif bir artış olduğu belirlenmiştir. Ag-su nanoakışkanı diğer nanoakışkanlar arasında en düşük basınç düşüşüne sahipken SiO_2 -su nanoakışkanı en yüksek basınç düşüşüne sahiptir. Ag-su nanoakışkanı dışında saf suyla kıyaslandığında duvar kayma gerilmesinin arttığı görülür. En yüksek duvar kayma gerilmesi SiO_2 - H_2O iken, en düşüğü ise CuO - H_2O nanoakışkanındadır. Nanoakışkanların termal direnci saf

suda daha düşüktür. Elmas-su nanoakışkanı diğer nanoakışkanlar (çalışılan) arasında en düşük termal dirence sahiptir. Mevcut sonuçlara göre, suda dağıtılmış elmas nanoparçacıklar toplam ısı transfer kazanımını sağlamak için tercih edilebilir. Ayrıca elmas nanoparçacıklar düşük kayma gerilmesi ve düşük basınç düşüşüne sahiptir.

Peyghambarzadeh ve ark. (2011a) çalışmasında araç radyatöründe Al_2O_3 katkılı, Su, EG ve Su-EG bazlı nanoakışkanlar ile geleneksel soğutucu akışkanlar kullanılması durumlarına göre ısı transfer performansı deneysel olarak karşılaştırmıştır. Al_2O_3 , baz akışkanlara %0.1~%1 derişimlerinde katılmış ve nanoakışkan sıcaklığı 35~60 °C arasında değiştirilmiştir. 45 °C giriş sıcaklığında, 20nm boyutlu, %1 hacimsel katkılı, Al_2O_3 -Su (Re=23000) ve Al_2O_3 -EG (Re=1220) nanoakışkanların Nusselt sayısı, baz akışkana göre %40 artış göstermiştir. Su ve EG bazlı nanoakışkanların yanında, bunların karışımlarından oluşan nanoakışkanlar da denenmiştir. Elde edilen ısı transfer artışının sadece ısıl iletkenlik artışından değil, bunun yanında Brownian hareketlerinden de kaynaklandığı belirtilmiştir. Deney düzeneğinin doğru çalışıp çalışmadığı, yapılan ön deneylerin Dittus-Boelter ve Vajjha bağıntılarıyla karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Nusselt sayısı deneyleri ise Xuan ve Li (2000) tarafından önerilen bağıntılara göre karşılaştırılmıştır ve %10'a kadar sapma ile benzer sonuçlar bulunmuştur. Akışkan özelliklerinin değişmemesi için nanoakışkanlara herhangi bir kararlılık artırıcı madde katılmamıştır. Akışkanların termodinamik özellikleri ya denklemlerden ya da literatürdeki diğer çalışmalardan alınmıştır.

Peyghambarzadeh ve ark. (2011b) diğer çalışmasında türbülanslı akışta, saf su ve Al_2O_3 -Su nanoakışkanın zorlanmış taşınım ısı transfer katsayısında laminar akışa göre artış olduğu vurgulamıştır.

Aydoğan (2012) çalışmasında içten yanmalı motor soğutma sistemlerinde, nanoakışkan kullanımı sonucu soğutma performans artışı sayısal olarak incelemiştir. Literatürdeki TiO_2 ve elmas katkılı nanoakışkanların verileri ve sayısal bir model kullanılarak elde edilen sonuçlar, yine bu nanoakışkanların literatürdeki deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve bu sayede sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Bu model üzerinden %5 hacimsel katkı oranına kadar Al_2O_3 ve Hexagonal Bor Nitrit katkılı nanoakışkanların yatay bir boruda, türbülanslı rejim durumundaki ısıl performansları incelenmiştir. Nanoakışkanların soğutma performanslarını incelemek için bir araç radyatör kanalı modellenmiştir. Baz akışkan olarak %50-%50 Su-EG seçilmiştir. Partikül hacimsel katkı oranına, hava tarafı taşınımına ve radyatör ön alanına göre ısıl performans artışı incelenmiştir. Sonuçlar, Hexagonal Bor Nitrit

katkılı nanoakışkanın Al_2O_3 katkılı olandan daha iyi ısıl performansa sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca nanoakışkan kullanımı ile elde edilen soğutma performans artışının da sınırlı olduğu görülmüştür.

Azmi ve ark. (2014) çalışmasında su bazlı TiO_2 (50 nm) ve SiO_2 (22 nm) nanoakışkanları 16 mm dairesel çapa sahip tüp içinde $Re=5000\sim25000$ olacak şekilde türbülanslı akışta kullanmışlardır. Saf suya göre yapılan bu çalışmada TiO_2 -Saf su için %1 hacimsel derişim oranında maksimum ısı taşınım katsayısında %26, SiO_2 -saf su için %3 hacimsel derişim oranında maksimum ısı taşınım katsayısında %33 artış bulmuşlardır. Diğer konsantrasyon değerlerinde daha düşük ısı taşınım değerleri tespit edilmiştir.

Bhanvase ve ark. (2014) tarafından yapılan deneyler, sabit ısı akısı sınır şartını sağlayacak şekilde yapılmıştır. Nanoakışkan özellikleri literatürdeki bağıntılar ile belirlenmiş, TiO_2 nanopartikülleri yapısı için TEM cihazı kullanılmıştır. Deneyde, saf su ile elde edilen veriler Shah-London denklemi ile karşılaştırılarak deney düzeneğinin doğru ölçüm yaptığı gösterilmiştir. Deneyler, 750 mm uzunluğunda ve 8 mm iç, 10 mm dış çapı olan bakır boruda yapılmıştır. TiO_2 , baz akışkan su-EG karışımına % 0.1~0.5 derişimlerinde katılarak nanoakışkan sıcaklığı 30~60 °C, hızı 0.48~0.81 m/s, Reynolds sayısı 900~1500 (laminer) arasında değiştirilmiştir. 60 °C giriş sıcaklığında, < 100nm boyutlu, %0.50 hacimsel katkılı, TiO_2 -Su/EG ($Re=1500$) nanoakışkanı Nusselt sayısı, baz akışkana göre boru girişinde %105 artış göstermiş ve ortalama 25 olarak belirlenmiştir. Derişim, debi ve sıcaklık artışının, ısı transfer performansını arttırdığı belirtilmiştir.

Hussein ve ark. (2014) tarafından SiO_2 katkılı su bazlı nanoakışkanın, bir araç radyatöründeki sürtünme faktörü ve zorlanmış taşınım ısı transferi deneysel olarak ve CFD ile incelenmiştir. SiO_2 , baz akışkana %1~2.5 derişimlerinde katılmıştır. Nanoakışkan sıcaklığı 60~80 °C, debi 2~8 L/dk, Reynolds sayısı 250~1750 arasında değiştirilmiştir. İki farklı Nu sayısı artışı elde edilmiştir. Biri Re sayısına göre, diğeri debiye göredir. Reynolds sayısına göre, 80 °C giriş sıcaklığında, 30nm boyutlu, %2.5 hacimsel katkılı, SiO_2 -Su ($Re=1750$) nanoakışkanı Nusselt sayısı, baz akışkana göre %40 artış göstermiştir. Debiye göre ise, 80 °C giriş sıcaklığında, 30nm boyutlu, %1 hacimsel katkılı, SiO_2 -Su (8 L/dk) nanoakışkanı Nusselt sayısı, baz akışkana göre %50 artış göstermiş ve olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, simülasyon çalışmaları ve diğerk araştırmacıların çalışmaları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Kararlılığı sağlanmış nanoakışkanların farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı, viskozite, özgül ısı, yoğunluk vb. termodinamik özelliklerinin ölçülmesi ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Timofeeva ve ark. (2007b) çalışmasında su ve etilen glikol içerisinde Al_2O_3 nanopartiküllerinden oluşan nanoakışkanın ısı iletkenliğini ve viskozitesini deneysel ve teoriksel olarak incelemiştir. Çalışmada kullanılan Al_2O_3 nanopartiküllerinin ortalama boyutları 11.2nm ve 40nm'dir. Viskozite ölçümleri Ubbelohde kapiler viskozimetresi kullanılarak yapılmıştır. Tüm veriler 23°C de elde edilmiştir. Viskozite sonuçlarının Botchelor modelinin nanoakışkanların viskozitesini tahmin etmede başarısız olduğunu belirtmişlerdir.

Dilek (2008b) çalışmasında Al_2O_3 -Su (40-47nm) nanoakışkanı için, en fazla ısı iletkenlik artışı, %4,0 hacimsel katkı oranında %10 olarak elde edilmiştir. CuO-Su (33nm) nanoakışkanı için, en fazla ısı iletkenlik artışı, %4,0 hacimsel katkı oranında %15,3 olarak elde etmiştir. Sonuçlar literatürdeki teorik modellerle uyumlu çıkmış ve seyreltici kullanımının nanoakışkan kararlılığını olumsuz etkilediğini vurgulamıştır

Erken (2008) çalışmasında 254 µm çaplı paslanmaz çelik mikro boru ile farklı debi ve basınçlarda akışkan akışının hidrodinamik (f-Re) ve ısı özellikleri (T-L) belirlenmiş, bu özelliklere göre belirsizlik analizleri yapılmıştır.

Duangthongsuk ve Wongwises (2010) çalışmalarında TiO_2 -H₂O nanoakışkanının ölçüm yaptıkları termodinamik özelliklerini modellerle karşılaştırmışlardır. TiO_2 nanopartikülünün ortalama çapı 21nm ve nanoakışkan içerisindeki hacimsel oranı ise %0.2 ile %1 arasındadır. Isı iletkenlik kızgın tel (hot-wire) ile viskozite ise Bohlin reometresi ile ölçülmüştür. Nanoakışkanın Nusselt sayısını tanımlayabilmek için gerekli olan ısı iletkenlik ve viskoziteyi iyi bilinen korelasyonlarla hesaplamış ve bu hesaplamaları ölçüm yaptıkları sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hesaplanan termodinamik özelliklerin ölçüm verileriyle aynı sonucu verdiğini belirtmişlerdir. Isı iletkenlik için en iyi modelin Yu and Choi (2003), viskozite için ise en iyi modelin Wang ve ark. (1999) modeli olduğunu ifade etmişlerdir.

Turgut (2010b) çalışmasında 50 mL toplam hacimli SiO_2 -Su, TiO_2 -Su, Al_2O_3 -Su, Al_2O_3 -EG ve aktif yüzey katkılı nanoakışkanlar, ısı iletkenlikleri, hacimsel katkı oranına ve sıcaklığa göre incelemiştir. Sıcaklığın, ısı iletkenliği etkilemediği görülmüştür. Tüm ısı iletkenlik değerleri 3w yöntemi ile ölçülmüştür. Ayrıca nanoakışkanların viskoziteleri de Sinus-Wave

Vibro Viscometer cihazı ile ölçülmüş ve sonuçlar, ısı iletkenlik için teoriye göre Hamilton-Crosser modeli ile tutarlı çıkarken, viskozite için ilgili modeller aynı sonuçları vermemiştir. Literatür çalışmalarına göre ısı iletkenlik artışı daha az, viskozite artışının ise daha çok olduğunu görmüştür. Bu nanoakışkanların soğutma sistemlerinde kullanımı için, ısı iletkenlikteki artış ile sağlanan faydanın, viskozitedeki artış ile oluşan pompalama kayıpları ile karşılaştırılarak fizibilitesinin yapılmasını önermiştir. SiO₂-Su (12nm) nanoakışkanı için, en fazla ısı iletkenlik artışı, %4.0 hacimsel katkı oranında %2.2 olarak elde edilmiştir. TiO₂-Su (21nm) nanoakışkanı için, en fazla ısı iletkenlik artışı, %3.0 hacimsel katkı oranında %7.4 olarak elde etmiştir. Al₂O₃-Su (25nm) nanoakışkanı için, en çok ısı iletkenlik artışı, %5.0 hacimsel katkı oranında %6.5 olarak elde etmiştir. Al₂O₃-EG (25nm) nanoakışkanı için, en çok ısı iletkenlik artışı, %5.0 hacimsel katkı oranında %13.3 olarak elde etmiştir.

Pastorina- Gallego ve ark. (2011) çalışmasında 283.15 K'den 323.15 K'e kadar değişen sıcaklıklarda CuO-Su nanoakışkanının sıcaklık artışıyla viskozitesini incelemişlerdir. Çalışmada yapılan deneylerde, 323.15 K'e kadar olan sıcaklık artışıyla viskozitenin düştüğü görülmüştür. Ağırlıkça oran olarak %10 nanopartikül içeren nanoakışkanın viskozitesinin ise 288.15 K de suyun viskozitesiyle eşit duruma geldiğini belirtmiştir.

Chen ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışma da ise Al₂O₃-su nanoakışkanı için farklı nanoparçacık hacim kesrine sahip olmasıyla bir nanoparçacığın, ısı transfer karakteristikleri analiz edilmiştir. Gözenekli ortam modelinde doymuş sıvı olarak modellenmiştir. Toplam termal direnç, akış fazı ve duvar kanalı için boyutsuz sıcaklık profillerini belirlemiştir. Sonuçlar termal direncin deneysel verilerin kullanılması için kıyaslanmıştır. 25 mikrokana1 için toplam 5x1.6 cm boyutlarında ve 800 µm yükseklikte olup her bir mikrokana1 300 µm duvar kalınlığında, 283 µm kana1 genişliğindedir. ε=0.49 gözeneklilik için 33 nm parçacık çapına göre değerlendirmiştir. Isı emici mikrokana1 için tüm Nu sayılarında nanoparçacık hacim kesrinin etkisini değerlendirmiştir. Nu değerinin, hacim kesri arttıkça büyük bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Parçacık konsantrasyonu artarken, nanoakışkanın termal iletkenliğinin artmasına bağı1 olarak ısı transferinin arttığı gözlenmiştir.

Mahbubul ve ark. (2012) tasarladıkları radyatör deney düzeneğinde Reynolds sayısı hava için 6000, soğutucu akışkan için 5000 olarak alınmış ve EG baz akışkanına %2 Cu katkısı ile elde edilen nanoakışkan kullanılarak, sadece EG baz akışkana göre yaklaşık %3.8 ısı transferi artışı sağlanmış, hava tarafı toplam ısı transfer katsayısında yaklaşık %18.7 artış sağlanmıştır.

$\dot{Q} = U_{air} A_{s,air} \Delta T_{ln}$ ifadesi gereğı eğer toplam ısı transferinin aynı kalması istenirse, radyatör

hava tarafı yüzey alanında %18.7 azalma sağlanır. 0.2 m³/s soğutucu debisinde, %2 bakır partikülü içeren nanoakışkan kullanan radyatör için, saf EG kullanan aynı radyatöre göre %12.13 oranında pompalama gücü artışı gereklidir, sonucuna varılmıştır.

Philip ve ark. (2012) nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen parametreler üzerine, 2012 yılına kadar yapılan çalışmaları incelemiştir. Hacimsel katkı oranının ısı iletkenliğe etkisi: Nanoakışkanlardaki nanopartikül derişimi ile elde edilen en yüksek ısı iletkenliğinin baz akışkan ısı iletkenliğine göre artışı, Maxwell'in etkin ortam teorisi (EMT: Effective Medium Theory) ile elde edilen artışla karşılaştırmışlar. Isı iletkenliğinin her zaman artan hacimsel katkı oranı ile arttığı belirtilmiştir. Nanopartikül boyutunun ısı iletkenliğe etkisi: Nanopartikül malzemesi, yapısı, nanoakışkana katılan yüzey katkı maddesi, nanopartikül kümelenmesi, çökelme, kararlılık gibi birçok nedene göre nanopartikül boyutunun artışının, ısı iletkenliği azalttığı ya da arttırdığı gözlemlenmiştir. Sıcaklığın ısı iletkenliğe etkisi: Sıcaklıktaki artışla nanoakışkan ısı iletkenliğinin mutlak olarak arttığı fakat, nanoakışkan ısı iletkenliğinin baz akışkanınkine oranının ya arttığı ya da sabit kaldığı belirtilmiştir. Nanopartikül şekil oranının ısı iletkenliğe etkisi: Nanopartiküllerin şekil oranlarındaki artışla (çubuk şekilli olanların çap olarak küçülmesi veya uzunluk olarak büyümesi gibi) ısı iletkenliğini arttığını tespit etmiştir. Baz akışkanın ısı iletkenliğe etkisi: baz akışkan ve nanopartikül arasındaki ısı iletkenlik farkı arttıkça nanoakışkan ısı iletkenlik oranının arttığı görülmüştür. Yani, bir EG bazlı nanoakışkan ısı iletkenlik oranı, su bazlı ısı iletkenlik oranından daha büyük elde edilmiştir. Nanopartikül malzemesinin ısı iletkenliğe etkisi: Nanopartikül malzemesinin ısı iletkenliğinin artması nanoakışkan ısı iletkenliğini artırır. Fakat, yüksek ısı iletkenlikli bir nanopartikül ile elde edilen nanoakışkan, daha düşük ısı iletkenliği olan nanopartikül ile elde edilen nanoakışkana göre her zaman daha yüksek ısı iletkenlikte olmayabilir. Katkı maddelerinin ısı iletkenliğe etkisi: Nanoakışkan kararlılığını arttırmak için katılan bu katkı maddelerinin nanoakışkan ısı iletkenliğini, bazı çalışmalarda arttırdığı, bazılarında ise etkilemediğini tespit etmiştir. Asitliğin ısı iletkenliğe etkisi: Nanoakışkan pH değerinin azalması ile ısı iletkenlikte hem artış hem de azalış görülmüş ve bir optimum değer olduğu sonucuna varmıştır. Ultrasonik karıştırma işleminin ısı iletkenliğe etkisi: Nanoakışkan kararlılığını arttırmak, kümelenmeleri önlemek için kullanılan bu karıştırma işleminin süresine bağlı olarak ısı iletkenlik artıp azalarak bir tepe eğrisi çizer. Karıştırmanın hemen sonrası artan ısı iletkenlik, zamanla azalır ve dengeye gelerek sabit bir değerde kalır. Bu karıştırma işleminin, bazı nanoakışkan ısı iletkenliklerini etkilemediği de vurgulanmıştır. Kümelenmenin ısı iletkenliğe etkisi: Kümelenme ısı iletkenliği artırır fakat kararsızlık

nedeniyle ısı iletkenlikte zamanla azalma görülür. Kümelenme göstermeyen nanoakışkanların ısı iletkenliği sabit kalır ve uzun süre boyunca değişmez. Isı iletkenlikte ortaya çıkan çelişkilerin nedeni, nanoakışkan özelliklerinin tam olarak belirlenememesi, ölçümlerdeki belirsizlikler, kümelenme ve çökelmenin dikkate alınmaması gerektiğini belirtmiştir.

Kadırgama ve ark. (2014) çalışmasında TiO_2 ve SiO_2 katkılı su bazlı nanoakışkanların ısı transferi artışı deneysel olarak incelenmiş ve TiO_2 ve SiO_2 , baz akışkan suya %1~2 derişimlerinde katılmıştır. Nanoakışkan sıcaklığı 60~80 °C, debi 2~8 L/dk, Reynolds sayısı 250~2000 arasında değiştirilmiş ve laminer akış şartlarında analizler yapılmıştır. 80 °C giriş sıcaklığında, %1.0 hacimsel katkılı, SiO_2 -Su (Re=2000) ve TiO_2 -Su (Re=2000) nanoakışkanları Nusselt sayısı, baz akışkana göre sırasıyla %22.5 ve %11 artış göstermiş, 20.6 ve 18.1 olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçların, diğer araştırmaların sonuçlarıyla yaklaşık %4 sapma ile uyum sağladığını bulunmuştur. Hacimsel debi, derişim ve giriş sıcaklığının Nu sayısı üzerindeki etkisi incelenmiş ve Nu sayısının bu parametrelere yüksek derecede bağlı olduğu elde edilmiştir.

Karimzadehkhoei ve ark. (2015b) Su bazlı TiO_2 ve Al_2O_3 nanoakışkanların, 502 µm iç çapta paslanmaz çelik mini kanalda basınç düşüşü ve ısı transferi değerleri incelenmiştir. Akış özelliği olarak hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan akış türü ele alınmıştır. Yaklaşık Re=1500 de çalışılarak ısı transferi taşınım katsayısında %15, sürtünme katsayısı değerinde %10 artış olduğu tespit edilmiştir.

Zawrah ve ark. (2015) tarafından %0.1, %0.2, %0.3, %0.6, %1.0 ve %1.5 kütle derişim oranlarında Al_2O_3 - H_2O nanoakışkanının kararlılık analizleri yapılmıştır. Nanoakışkanın kararlılığını sağlamak için %0,3-1,0 derişim oranında sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) kullanılmış olup, karıştırıcı olarak ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır. Nanoakışkan hazırlama evresinden sonra optik mikroskop, Geçişli elektron mikroskop (TEM) ve Zeta potansiyel yöntemleri kullanılarak nanoakışkanın homojenliği tespit edilmiştir. En iyi kararlılık sonucu %1 derişim oranında sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) kullanılması ile elde edilmiştir.

Azmi ve ark. (2016) Bu çalışmada literatürde kullanılan denklemler kullanılarak Al_2O_3 (10 nm) nanoparikülüne ait pH ve partikül boyutunun ısı iletkenlik üzerine etkisi ile özgül ısı ve yoğunluğun dinamik viskozite üzerine etkisi incelenmiştir. Artan partikül boyutunun dinamik viskoziteyi artırırken, özgül ısı da azalma olduğunu vurgulamıştır.

Bu çalışmanın diğer çalışmalara göre özgün tarafı farklı boru malzemeleri (paslanmaz çelik ve PEEK), mini/mikro çaplar (400, 750, 1000 μm), derişim oranlarında (%0.5, %0.7 ve %1.0) nanoakışkanlar Al_2O_3 (13nm), TiO_2 (10-25nm) ve ZnO (18nm), hacimsel debiler (20, 35, 50 mL/dk) ve nanoakışkan sıcaklıklarında taguchi yöntemi kullanılarak optimum ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı ve basınç düşüşü değerleri için en uygun mini/mikro çap ve nanoakışkan değerleri hesaplanmıştır.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1 ISI TRANSFERİ

Isı transferi sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkan enerji geçişidir. Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, bir sıcaklık farkının mevcut olduğu her durumda ısı transferi mutlaka gerçekleşir. Bir katı veya durgun akışkan ortam içinde, sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı transferi için, iletim terimi kullanılır (Şekil 2.1). Buna karşın, bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise, aralarında gerçekleşen ısı transferi, taşınım terimi ile anılır. Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler elektromanyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı sıcaklıktaki iki yüzey arasında, birbirlerini görmeye engel bir ortam yoksa meydana gelen ısı alış verişine ışıınım denir. Kanatçıklı bir hava ısı değiştiricisi dizayn ve analizi yapılırken bu üç ısı transferi mekanizması göz önüne alınır (Canay 2007).

$$\dot{Q}_{iletim} = -k A \frac{dT}{dx} (W), \quad (2.1)$$

k : malzemenin ısı iletkenliği $W/(m K)$,

A : ısı transfer yönüne dik olan alan (m^2),

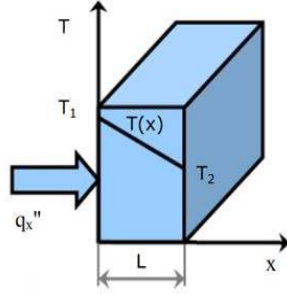
T : sıcaklık ($^{\circ}C$).

x : sıcaklığın değişim yönü (m).

L kalınlığına sahip düzlemsel bir tabakadan birim zamanda iletimle geçen ısı 17 enerji aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\dot{Q}_{iletim} = -k A \frac{\Delta T}{L} (W) \quad (2.2)$$

Burada ($\Delta^{\circ}C \equiv \Delta K$) tabakanın iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıdır.



Şekil 2.1 Bir boyutlu Isı İletimi (Canay 2007).

Taşıyım, katı bir yüzey ve ona komşu olan hareket halindeki akışkan arasında gerçekleşen ısı transferi şeklidir (Şekil 2.2). Taşıyım, içinde hem iletimden hem de akışkan hareketinden gelen bileşik etkileri içerir. Birim zamandaki taşıyım ile olan ısı transferi “Newton Soğuma Yasası” ile aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$\dot{Q}_{\text{taşıyım}} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad (2.3)$$

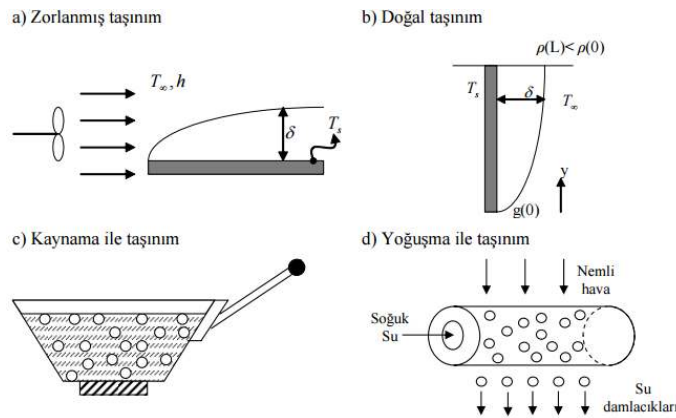
Burada;

h , ısı taşıyım katsayısıdır ve birimi $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ile verilir.

A_s ise, taşıyımın gerçekleştiği yüzeyin alanıdır (m^2).

T_s yüzey sıcaklığı ($^\circ C$),

T_{∞} ise yüzeyden yeteri kadar uzakta akışkanın sıcaklığıdır ($^\circ C$).



Şekil 2.2 Isı Taşıyım Türleri (Incropera 2002).

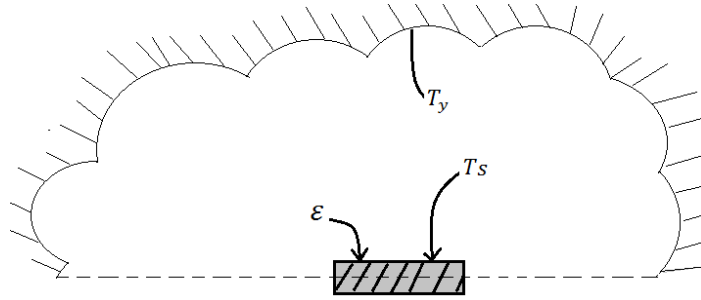
İşınım bir maddeden, yapısındaki atomların veya moleküllerinin elektronik şekillerinde meydana gelen değişimler sonucunda enerjinin elektromanyetik dalgalar (veya fotonlar) halinde yayılmasıdır. T_s mutlak sıcaklığına (K) sahip bir yüzeyin yayabileceği maksimum ışıyım miktarı “Stefan-Boltzmann Yasası” ile verilir. Buna göre;

$$\dot{Q}_{yayılan\ max} = \sigma \cdot A_s \cdot [T_s^4] (W) \quad (2.4)$$

yazılabilir. Burada σ : Stefan-Boltzmann sabitidir, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2K^4)]$. ε yayma katsayısına (-) ve A_s alanına (m^2) sahip T_s sıcaklığında (K) bir yüzey çok daha büyük (veya siyah) T_y sıcaklığına (K) sahip bir yüzey tarafından tamamıyla sarılmışsa ve aralarında ışıınımı engellemeyen bir gaz (hava gibi) varsa bu iki yüzey arasındaki net ışıınım transferi aşağıda verildiği gibidir:

$$\dot{Q}_{ışıınım} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_y^4)(W) \quad (2.5.)$$

İşınım bu durumda küçük yüzeyi saran yüzeyin, yayma katsayısının ve alanının net ısı transferine etkisi yoktur (Şekil 2.3). Bir yüzeyin ne kadar ışıınım yuttuğu denklem 2.5 ile belirlenebilir (Canay 2007).

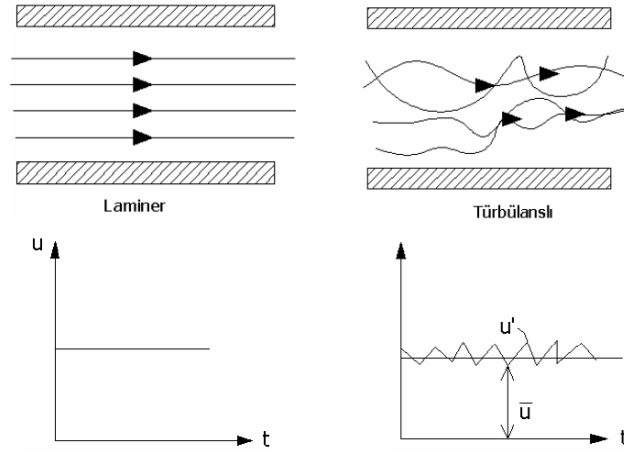


Şekil 2.3 İki Yüzey arasında ısı ışıınımı (Canay 2007).

Endüstriyel uygulamaların birçoğunda ısı transferinin bu üç şekilde mevcuttur. Bununla birlikte uygulamadaki çalışma şartlarına ve baskın ısı transferi türüne göre biri veya bir kaçını ihmal edilebilir. Isı transferi hızını artırma normal olarak ısı transfer katsayısını artırma ile ilgilidir. Örneğin yüzey alanı artırılmış veya işlem görmüş bir yüzey, düz ve pürüzsüz bir yüzeye göre daha yüksek ısı transferi katsayısı verir. Isı taşınım katsayısını artırmak için genellikle boru veya kanal içinde türbülans artırıcı yollar denir. Zira, akışkan ile kanal duvarı arasındaki ısı transferinde ısı sınır tabaka önem taşımaktadır. Sınır tabaka akış türü ile ilgili olup laminar akışta daha kalın, türbülanslı akışta daha incedir. Bu nedenle türbülanslı akışta ısı transferi laminar akışa göre daha iyidir. Sınır tabaka kalınlığı incelidikçe akışkan ile kanal/boru arasındaki ısı transferi daha iyi olmaktadır (Incropera 2002).

Laminer akışta, akış yapısı, akış tabakalarının hareketi ile tanımlanır. Komşu tabakalar birbirlerine karışmaz ve tek yönde hareket eder. Türbülanslı akışta ise, akış yapısı üç yönde

hareket eden partiküllerle tanımlanır. Hız dalgalanmaları nedeniyle tabakalar arası akışkan transferi söz konusudur. Her iki akış karakteri Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Akım çizgileri ve hız-zaman grafikleri (Incropera 2002).

Laminer akışta ısı, akışa dik doğrultuda sadece iletimle geçerken, türbülanslı akışta her doğrultuda gerçekleşen titreşimlerle ısı taşınır. Bu nedenle, türbülanslı akışta ısı geçişi, laminer akışa göre çok daha büyük değerler alır.

Şekil 2.5.’teki gibi r_o yarı çaplı bir dairesel borudaki laminer akışı göz önüne alalım. Akışkan boruya sabit hızla girsin. Akışkan yüzeye temas ettiğinde, sürtünme etkileri önem kazanmakta ve boru içinde ilerledikçe sınır tabaka gelişmektedir. Bu gelişme akış bölgesinin giderek küçülmesi ve boru ekseninde sınır tabakaların birleşmesiyle sona erer. Bu birleşme noktasından sonra, sürtünme tüm kesit boyunca etkili olur ve hız profili artık x ile değişmez. Bu noktadan sonra akış hidrodinamik olarak tam gelişmiştir. Girişten bu koşulun gerçekleştiği noktaya kadar olan uzaklık hidrodinamik giriş uzunluğu, x_h olarak tanımlanır. Tam gelişmiş hız profili şekilden de görüldüğü gibi laminer akış için paraboliktir. Türbülanslı akış durumunda radyal doğrultudaki türbülanslı karışımından dolayı hız profili daha düzdür (Incropera 2002).

$$\left[\frac{x_h}{D}\right]_{laminar} = 0,05 Re_D \quad (2.6.)$$

$$\left[\frac{x_h}{D}\right]_{türbülans} \geq 10 \quad (Re_D \text{ bağımsız}) \quad (2.7.)$$

2.2 BOYUTSUZ SAYILAR

2.2.1 Reynolds Sayısı

Akışkanlar Mekaniğinde Reynolds Sayısı bir akışkanın atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine olan oranıdır ve sonuç olarak bu değer bu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine olan göreceli önemini verir (Yeşilata 2014).

$$Re_D = \frac{U D_h}{\nu} = \frac{\text{Atalet Kuvveti}}{\text{Viskoz Kuvveti}} \quad (2.10)$$

U : Akışkan Hızı (m/s),

D_h : Hidrolik Çap/Uzunluk (m),

ν : Kinematik Viskozite (m^2/s).

$Re_D \leq 2300$ laminar akış

$2300 \leq Re_D \leq 4000$ Geçiş Bölgesi Akışı

$Re_D \geq 4000$ türbülanslı akış

2.2.2 Prandtl Sayısı

Hız ve ısı tabakaların birbirlerine göre kalınlıklarını en iyi tanımlayan boyutsuz parametre olan Prandtl sayısıdır. Prandtl sayısı viskozite ve ısı iletkenlik katsayıları yanında sabit basınçta özgül ısıya bağlı olarak tanımlanır (Incropera 2002).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{\text{Momentum Difüzyonu}}{\text{Isıl Difüzyon}} \quad (2.11)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2.13)$$

C_p : Özgül Isı ($kJ/kg^\circ C$)

μ : Dinamik Viskozite ($Pa \cdot s$)

k : Isıl iletkenlik katsayısı ($W/(mK)$)

α : Isıl Yayınma katsayısı (m^2/s)

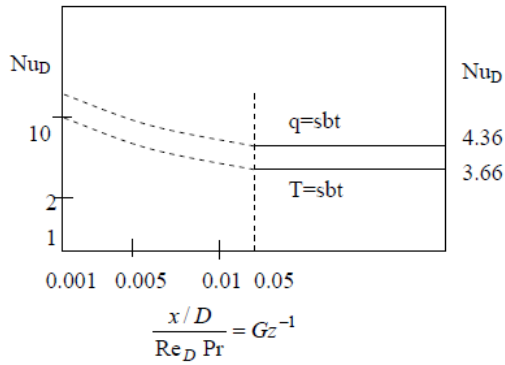
ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

2.2.3 Nusselt Sayısı

Yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanına eşittir ve yüzeyde oluşan taşınım ile ısı geçişinin bir ölçüsünü verir. Akışkan tabakasındaki ısı transferi, akışkan bir miktar hareket içerdiği zaman taşınım ile, akışkan tabakası hareketsiz olduğu zaman iletimle olur. Dolayısıyla Nusselt sayısı, bir akışkan tabakası üzerinde taşınımın iletime oranının sonucu olarak (Şekil 2.7), o akışkan tabakasındaki ısı transferi iyileşmesini gösterir (Incropera 2002).

$$Nu = \frac{h D_h}{k} = \frac{\text{Akışkanın Taşınım ile Isı Aktarımı}}{\text{Akışkanın iletim ile Isı Aktarımı}} \quad (2.14)$$



Yüzeyde ısı akısı sabit (q_s)

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = 4,36$$

Yüzeyde sıcaklık sabit (T_s)

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = 3,66$$

Şekil 2.7 Boru içi tam gelişmiş akışta Nu_D değerleri

h : Isı taşınım katsayısı (W/m^2K),

D_h : Hidrolik Çap/Uzunluk (m),

k : Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m K$).

2.2.4 Peclet Sayısı

Prandtl sayıları çok küçük olan akışkanlar (sıvı metaller) için Peclet sayısından yararlanılır. Bununla beraber bu durum için ısı sınır tabakanın oluşumu hız sınır tabakanın oluşumundan daha hızlıdır. Boyutsuz bir ısı geçişi parametresi olarak tanımlanır (Yeşilata 2014).

$$Pe = Pr.Re = \frac{U D_h}{\alpha} = \frac{\text{Zorlanmış taşınım ile difuzyon}}{\text{Isıl Difüzyon}} \quad (2.15)$$

U : Akışkan Hızı (m/s),

D_h : Hidrolik Çap/Uzunluk (m),

α : Isıl Yayınma katsayısı (m^2/s).

2.3 MİKROKANALLAR

Son zamanlarda mikro kanallarda ısı ve kütle aktarımı önemli bir ilgi alanı olmuştur. Mikro sistemlerdeki teknolojik gelişmelere paralel olarak, mikro sistemlerde ısı ve kütle aktarımı karakteristiklerinin incelenmesi ön plana çıkmış ve bu konudaki çalışmalar artmıştır. Küçük ölçekli kanallardan oluşmuş sistemlerin avantajları,

- Yüksek ısı akıları,
- Küçük boyutlar ve ağırlıklar
- Çalışma akışkanı miktarının az olması
- Taşınabilir olmaları,
- İleride seri üretimleri yapılarak ekonomikliklerinin sağlanabilmesi olasılığı, özellikleri söylenebilir.

Çizelge 2.1 Kanal Boyutlarına göre sınıflandırılması.

Mini Kanallar	$3 \text{ mm} > D > 200 \text{ }\mu\text{m}$
Mikro kanallar	$200 \text{ }\mu\text{m} > D > 10 \text{ }\mu\text{m}$
Geçiş Bölgesi Kanalları	$10 \text{ }\mu\text{m} > D > 1 \text{ }\mu\text{m}$

Mikrokanal üretilmesi için başlıca teknikler; mikro mekanik işleme (elmas işleme, lazer işlemleri, odaklanmış iyonu dikişi, mikro delme), X-ışınıyla Mikro işleme (LIGA), Fotolitografik tabanlı işleme (Isı ile kimyasal aşındırma), Yüzey ve yüzeye yakın mikro işlem yöntemleridir (Canay 2007).

2.4 NANOAKIŞKANLAR

Nanoakışkan, nanometre boyutundaki metal veya metal olmayan partiküllerin saf su, etilen glikol, motor yağı gibi geleneksel bir akışkan içine katılarak elde edilmiştir. İkili bir karışımdır.

Nanoakışkanlar; kritik boyutları nm olan katı ile akışkan süspansiyonudur. Yapılan araştırmalarda nanoakışkanlar geleneksel akışkanlardan çok daha iyi ısı transferi artışı sağlamıştır. Bu artış, partikül boyutu, partikül boyut dağılımı, nanopartikülün hacimsel oranı, sıcaklık, pH, nanopartikülün ve temel akışkanın ısı iletkenliğine bağlıdır (Goharshadi, 2013). Nanoakışkanlardan yüksek ısı iletkenlik, yüksek ısı transfer performansı, iyi kararlılık gibi özellikler istenir. Fakat kümelenme ve çökelme nedeniyle mikrokannallarda tıkanma, büyük viskozite artışı ve basınç düşümü nedeniyle pompalama kayıplarında artış istenmez. Bu olumsuz sonuçlar çoğunlukla nanoakışkan kararlılığı ile ilgilidir.

2.4.1 Nanoakışkan Türleri

Hem temel akışkan hem de nanopartikül çeşitliliği çok fazladır. Nanopartikül türüne göre nanoakışkanlar dört gruba ayrılır (Akyürek 2014).

2.4.1.1. Seramik Nanoakışkanlar

Nanoakışkan hazırlamak için kullanılan ilk partikül türü seramiktir. Çünkü üretimi kolaydır ve solisyon içerisinde stabildir. Oksitli (Al_2O_3 , CuO), oksitsiz (SiC) veya oksitli oksitsiz bileşimi şeklinde üç gruba ayrılır. Seramik nanoakışkanlar: SiC , Al_2O_3 , CeO_2 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , SiO_2 , TiO_2 , ZnO_2 , WO_3 .

2.4.1.2. Saf Metal Nanoakışkanlar

Oksit seramik nanopartikülleriyle hazırlanan nanoakışkanlara kıyasla saf metal nanoakışkanlar çalışmalarda daha az kullanılmıştır. Aynı hacimsel oranlı oksit seramik nanoakışkanlarına kıyasla saf metal nanoakışkanların ısı iletkenlikleri daha fazladır. Saf metal nanoakışkanlar: Ag , Au , Cu , Fe , Ni .

2.4.1.3. Alaşım Nanoakışkanlar

Metalleri farklı metallerle alaşımlamak, uygulamalar için farklı meteryaller geliştirmek için bir yoldur. Alaşım nanoakışkanlarla ilgili yapılan sadece birkaç çalışma vardır. Alaşım nanoakışkanlar: $Ag-Cu$, $Ag-Al$, $Al-Cu$.

2.4.1.4. Karbon Esaslı Nanoakışkanlar

Metale kıyasla büyük, ısı iletkenlikleri düşük yoğunluklarıyla birleştirildiğinde karbon esaslı maddelerin nanoakışkanlarda kullanılmasını cazip kılar. Metal ve metal oksitleriyle kıyaslandığında, Karbon nano tüplerin daha yüksek ısı iletkenlikleri vardır. Karbon nanotüplerin ısı iletkenliğinin grafitte benzemesi sebebiyle, oda sıcaklığında en iyi ısı iletken olan doğal elması bile geçtiği belirtilmiştir. İkinci neden olarak ise nanotüplerin en iyi en/boy oranına sahip olması gösterilmiştir. Karbon esaslı nanoakışkanlar: karbon nano tüp, elmas, grafit (Akyurek 2014).

2.4.2. Nanoakışkanların Hazırlama Yöntemleri

Nanoakışkanın hazırlanması akışkanın ısı iletkenliği artırmak için ilk adımdır. Nanoakışkanın hazırlanması sırasında kullanılan iki yöntem vardır. Nanoakışkanlar 1-adım veya 2-adım yönteminden biri ile hazırlanır (Akyürek 2014).

2.4.2.1. Tek Adım Yöntemi

Nanopartikülün üretimi ile nanoakışkanın üretilmesini birleştiren bir yöntemdir. 1-adım yönteminde nanoakışkan kimyasal reaksiyonla tek adımda elde edilir. Bu yöntemle, nanopartikülün kurutulması, depolanması, taşınması ve dağılması önlendiği için nanopartikülün topaklanması engellenmiş ve daha kararlı bir nanoakışkan hazırlanmış olunur. 1-adım yöntemi ile elde edilen nanoakışkanlar, 2-adım yönteminden elde edilene göre daha kararlıdır. Fakat, 1-adım yönteminde partikül boyutu kontrol edilemez. Bu yöntemin bir diğer dezavantajı ise sadece düşük basınçlı akışkanlar için uygun olmasıdır. Bu durum da bu metodun kullanımını sınırlamaktadır (Li 2009).

2.4.2.2. İki Adım Yöntemi

Nanopartiküller öncelikle kuru toz halinde üretilir. İkinci adımda nanopartiküller temel akışkan içerisine katılır. Bu yöntemde nanopartiküllerin üretilmesi nanoakışkanların hazırlanmasından ayrılır. Bu nedenle nanopartiküller hem üretim aşamasında hem de nanoakışkan hazırlanması aşamasında topaklanabilir. Kümelenme, hem kanallarda tıkanma ve tortulaşmaya hem de ısı iletkenliğin düşmesine neden olur. Bu nedenle bu yöntem

kullanılırken çözülmesi gereken en büyük problem, süspansiyonun stabilitesidir. 2-adım yöntemi için gereken nanopartiküller, istenen boyut ve özelliklerde birçok üreticide bulunabilir (Mukherjee 2013). 2-adım yönteminde nanoakışkanlar, birçok alt yöntemle hazırlanabilir: Manyetik karıştırıcı, kesmeli karıştırıcı, bilyeli değirmen, ultrasonik banyo, prob tipi ultrasonik homojenizatör, yüzey aktif madde katılması, pH değiştirme, yüzeye kimyasal işlem (Mondragon 2012). İki adım yöntemi çalışmalarda oldukça çok kullanılmaktadır. Bunun nedeni, nanopartikülleri günümüzde üretilmiş halde hazır alabilmenin mümkün olmasıdır. Çünkü nanopartiküllerin üretimine olanak sağlayan fiziksel, kimyasal ve lazer esaslı metotlar çok çeşitlidir (Akyürek 2014).

2.4.3. Nanoakışkanların Kararlılığı

Nanoakışkanlarda kararlılık, yüzey aktif madde kullanımı, pH değiştirme, partiküle yüzey işleme gibi yöntemlerle sağlanır (Ghadimi 2011). Nanoakışkan kararlılığını sağlamak için nanoakışkan ısı özelliklerinin değişmesini istemeyen araştırmacılar yüzey aktif madde kullanmadılar (Heyhat 2013). Bu maddeyi kullananlar ise kararlılık sorununu önlemek için kullandılar (Bhanvase 2014). Sadece ultrasonik karıştırma sonrasında bile partiküller arasında var olan çekim kuvvetleri, partiküllerin kümelenmesine neden olur. Bu kümelenme sonucu oluşan mikrometre ve üzeri boyutta büyük nanopartikül grupları, makro boyuttaki partiküller gibi davranmaya başlar ve baz akışkandan büyük yoğunlukları nedeniyle akışkan içinde dibe çökerek kararsızlık oluştururlar. Bu çökmeyi önlemek için yüzey aktif maddeler kullanılır. Bu maddeler, nanopartikül yüzeyini kaplar ve partiküller arasında itme kuvveti oluşturur. Böylece, partiküllerin kümelenmesi önemli ölçüde önlenir. Kararlılığın sağlanması için tek başına yüzey aktif madde kullanımı yeterli değildir. Çünkü nanopartiküller, baz akışkan içinde ilk karıştırıldığında kümelenmiş oldukları için aralarına yüzey aktif maddeler etki edemez, bu kümeler de ultrasonik ile parçalanabilir (Hwang 2008). Literatürde, aynı nanoakışkan için kararlılığı bir saatten bir yıla kadar değişen çok farklı sonuçlar vardır (Sidik 2014). Kararlı nanoakışkan hazırlama parametreleri ve bunların standart hale getirilmesini belirten az sayıda çalışma bulunur (Turgut 2010). Bu çalışmada, kararlı nanoakışkan elde etmede etkili olan parametreleri belirlemeye, bu parametreleri standart hale getirmeye ve kararlı nanoakışkan elde etme konularına değinilmiştir.

2.4.3.1. Nanoakışkanların Kararlılık Artırma Yöntemleri

Stabil nanoakışkan hazırlayabilmek için çeşitli yöntemler vardır.

a) **pH değerini kontrol ederek yüzey yükünü kontrol etmek:** Nanoakışkanın stabilitesi direkt olarak elektro kinetik özelliğiyle ilgilidir. Yüksek yüzey yükü yoğunluğu sayesinde, güçlü itici güçler iyi dağılmış süspansiyonu stabilize edebilir. Süspansiyonun pH değerinin izo elektrik noktadan uzak durmalıdır. İzo elektrik nokta zeta potansiyeli sıfır olan potansiyel kontrol iyonlarının konsantrasyonudur. Bu nedenle izoelektrik noktada yüzey yükü sıfırdır (Akyurek 2014).

b) **Bazı yüzey aktif maddeleri katarak yüzeyi değiştirmek:** En çok kullanılan yöntemlerdendir. Yüzey aktif maddeler partikül süspansiyon ortamı ara yüzeyini değiştirip uzun zaman topaklanmayı engelleyebilir. Uygun yüzey aktif veya dağıtıcı seçimi solüsyonun ve partikülün özelliğine bağlıdır. Nanopartikülün yüzeyinde absorbe edilen yüzey aktif madde moleküllerin yüzey enerjisini düşürür ve bu da yüzeyin topaklanmasını engeller. Sodyum Dodesil Sülfat (SDS), Sodyum Dodesil Benzen Sülfanat (SDBS), Setil Trimetil Amonyum Bromit (CTAB) en yaygın kullanılan yüzey aktif maddelerdir. Yüzey aktif maddelerin katılması nanoakışkanların yüksek sıcaklıklarda çalışılmasını sınırlar. Nanopartikül ile yüzey aktif madde arasındaki bağ zarar gördüğü zaman nanoakışkan stabilitesini kaybeder ve nanopartiküller çöker. (Akyurek 2014).

c) **Ultrasonik Titreşim Kullanmak:** Ultrasonik banyolar, işlemciler ve homojenizatörler diğer metotlarla kıyaslandığında, topaklanmayı engellemek için en etkili yöntemlerdendir. Partikül topaklanmasını engellemek ve dağılım davranışlarını iyileştirmek için yukarıdaki yöntemlerin biri veya bazen birkaçı birlikte kullanılır. Nanoakışkanların tek adım yöntemiyle hazırlanması bazen en etkili yoldur. Nanopartikül ve nanoakışkan birlikte hazırlandığından topaklanma ihtimali azalır (Akyurek 2014).

Çizelge 2.2 Literatürde kullanılan yüzey aktif maddeleri.

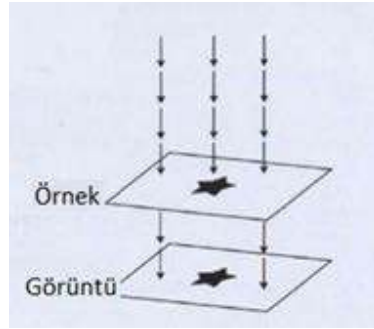
Makale	Bilgi
Farbod (2014)	*Katkı Maddeleri: HCl, HNO ₃ , H ₂ SO ₄ .%0.1, %0.25, %0.5 hacimsel derişimli Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT) nanoakışkanlar kullanılmıştır. 80 gün çökelme görülmemiştir. MWCNT, HCl asitte 1 saat ultrasonik ile karıştırılarak, pH 7 olana kadar saf su ile yıkanmış, kurutulmuştur. Saf hale gelen MWCNT, HNO ₃ ve H ₂ SO ₄ ile 30 dk ultrasonik ile karıştırılmış, yıkanmış, kurutulmuştur.
Ghadimi (2011)	*Katkı Maddeleri: SDS, SDBS, Oleic Acid, CTAB, DTAB, SOCT, HCTAB, PVP, Gum Arabic.Literatürde kullanılan yüzey aktif maddeler (surfactant) verilmiştir. 60 °C üzerinde surfactant etkisinin ortadan kalkacağı belirtilmiştir.
Jarque (2012)	*Katkı Maddeleri: HCl, NaOH. Saf su bazlı İslı silika nanoakışkan kullanılmıştır. HCl ve NaOH, karışımın pH değerini değiştirmek için kullanılmıştır. 3-5 dk gibi sürelerde ultrasonik ile karıştırılmıştır. Kararlılığı etkileyen her bir parametre Taguchi yöntemi ile incelenerek, 48 saat kararlılık sağlanmıştır.
Kim (2008)	*Katkı Maddeleri: SDS, Oleic Acid. Saf su bazlı karbon ve gümüş nanoakışkanlar kullanılmıştır. Kararlılık için kütlelesel olarak %1 SDS ve oleic asit katılarak, homojenizasyon için farklı cihazların etkileri TEM görüntüleri ile karşılaştırılmıştır.
Lee (2007)	*Katkı Maddeleri: SDS. Saf su, EG, yağ baz akışkanlarında MWCNT, CuO, SiO ₂ nanoakışkan kullanılmıştır.
Metselaa (2013)	*Katkı Maddeleri: SDS. %0.1 kütlelesel derişimli su bazlı TiO ₂ nanoakışkan kullanılmıştır. SDS ve saf su manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak, bu karışıma TiO ₂ eklenerek 15 dk ultrasonik ile karıştırılmıştır. Birkaç güne kadar kararlılık sağlanmıştır.
Mukherjee (2013)	*Katkı Maddeleri: SDS, Oleic Acid, DTAB, HCTAB, PVP, Gum Arabic. Literatürde kullanılan yüzey aktif maddeler (surfactant) verilerek, Al ₂ O ₃ için en iyi pH değeri 8 olarak verilmiştir.
Xia (2014)	*Katkı Maddeleri: SDS, PVP. Saf su bazlı Al ₂ O ₃ nanoakışkan kullanılmıştır.

*HCl – Hydrochloric Acid, HNO₃ – Nitric Acid, H₂SO₄ – Sulfuric Acid, SDS – Sodium Dodecyl Sulfate , SDBS – Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, CTAB – Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide, DTAB – Dodecyl Trimethyl Ammonium Bromide, SOCT – Sodium Octanoate, HCTAB – Hexadecyl Trimethyl Ammonium Bromide, PVP – Poly Vinyl Pyrrolidone, NaOH – Sodium Hidroksit, EG – Etilen Glikol.

2.4.3.2. Kararlılık değerdendirmesi

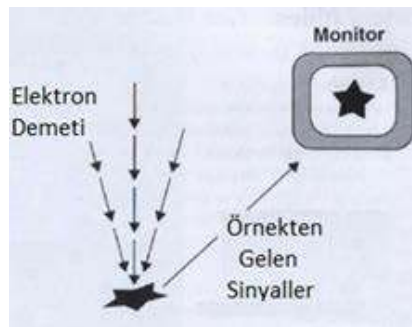
Hacimsel derişim hesabı yapıldıktan sonra bir beher içerisinde nanoakışkan hazırlanarak ultrasonik homojenizatör cihazında nanoakışkan homojen hale getirilir. Karışımın homojenliğinin belirlenmesi kısmında 4 farklı nanoakışkan literatürde yapılan çalışmalar ışığında 1-5 saat arası karıştırılarak kararlılığı belirlenir. Yapılan karışımlardan belirli miktarda numuneler alınarak SEM (Scanning Electron Microscope), TEM (*Transmission Electron Microscope*) ve Dinamik Işık Saçılım Spektrometresi (DLS) cihazlarından görüntü alınarak en uygun karıştırma süresi ve derişim oranı belirlenir.

a) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM: Scanning Electron Microscope): Elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır.



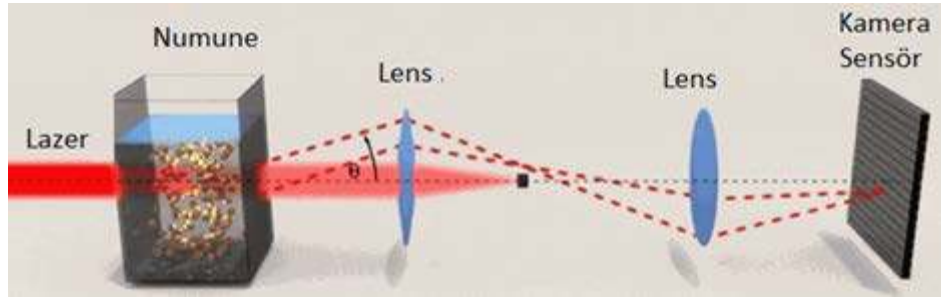
Şekil 2.8 SEM Cihazının Çalışma Prensibi.

b) Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM: Transmission Electron Microscope): Elektron tabancasından elde edilen elektronlar 200-100 kV değerinde hızlandırma voltajı ile numuneye yönlendirilirler. Elektronların yönlendirilmesi elektromanyetik lensler kullanılarak yapılır. Numuneden geçebilen elektronlar gözlem ekranının üzerine düşer ve görüntü elde edilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 TEM Cihazının Çalışma Prensibi.

c) Dinamik Işık Saçılım Spektrometresi (DLS: Dynamis Light Scattering): Dinamik ışık saçılımı methodu (DLS) seyreltik çözelti içerisindeki küçük parçacıklardan saçılan ışığın şiddetinin ve değişiminin ölçülmesi temeline dayanır (Şekil 2.10). Dinamik ışık saçılımı yöntemi dağılım indeksi ve parçacık büyüklüğü dağılımının elde edilmesinde kullanılır.



Şekil 2.10 Dinamik Işık Saçılım Spektrometresi (DLS) Çalışma Prensibi (URL-2).

2.5. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

2.5.1. Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik akışkanın ısı transferi performansını artırmada önemli bir parametredir. Katı metallerin ısı iletkenliği akışkanların ısı iletkenliğinden daha yüksek olduğu için, süspanse edilmiştirirği akışkanın ısı iletkenliğini ve ısı transferi performansını artırabileceği düşünülmektedir. (Li 2000);

- Maxwell Etkin Ortam Teorisi (1881): İkili karışımlar için verilen ilk denklemdir. Sadece küresel partiküller için geçerlidir.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (2.16)$$

k_{nf} : Nanoakışkanın ısı iletkenliği ($W/m K$)

k_{np} : Nanopartikülün ısı iletkenliği ($W/m K$)

k_{bf} : Baz akışkanın ısı iletkenliği ($W/m K$)

ϕ : Hacimsel katkı oranı (%).

- Hamilton&Crosser (1962): Partiküllerin şekil etkilerini de içeren geliştirilmiş Maxwell ifadesidir. Partiküllerin ısı iletkenliğinin baz akışkan ısı iletkenliğinden 100 kat ve daha büyük olması durumunda (n) şekil faktörü etkisi görülür (Hamilton, Crosser, 1962).

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (n-1)(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (2.17)$$

$n = 3/\psi$: Şekil faktörü. ψ küresellik: Partikül hacmine eşit hacimli bir kürenin yüzey alanının, partikül yüzey alanına oranıdır. Partikül, küresellikten uzaklaştıkça bu değer azalır. Küresel partikül için $\psi = 1$, silindirik $\psi = 0.5$

- Bruggeman (1935): Rasgele dağılmış partiküller arasındaki etkileşimleri içerir.

$$k_{nf} = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)k_{np} + (2 - 3\phi)k_{bf}] + \frac{k_{bf}}{4}\Delta^{0.5} \quad (2.18)$$

$$\Delta = (3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right) \quad (2.19)$$

- Yu&Choi (2003): Sabit ısı iletkenlikli nanotabaka içeren geliştirilmiş Maxwell ifadesidir. Bu ifade, nanopartikül etrafında h kalınlığında nanotabaka dikkate alınarak elde edilmiştir. Bu nanotabakanın ısı iletkenliği sabit olup, değeri, baz akışkan ve nanopartikül arasındadır. Nanopartikül çapı $<10\text{nm}$ olduğunda bu ifadenin etkisi görülür (Choi 2003).

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np,eq} + 2k_{bf} + 2(k_{np,eq} - k_{bf})\phi_{eq}}{k_{np,eq} + 2k_{bf} - (k_{np,eq} - k_{bf})\phi_{eq}} \quad (2.20)$$

$$\phi_{equivalent} = \frac{4}{3}\pi(r+h)^3n = \frac{4}{3}\pi r^3n(1+h/r)^3 = \phi(1+\beta)^3 \quad (2.21)$$

$$\beta = h/r, \quad \gamma = k_{nl}/k_{np} \quad (2.22)$$

$$k_{np,eq} = \frac{2(1-\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)}{-(1-\gamma) + (1+\beta)^3(1+2\gamma)} \cdot k_{nl} \quad (2.23)$$

k_{nl} : Nanotabakanın ısı iletkenliği (W/mK),

$k_{np,eq}$: Nanotabaka kaplı nanopartikülün eşdeğer ısı iletkenliği (W/mK),

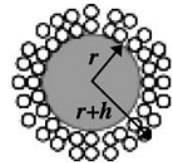
h : Nanotabaka kalınlığı (nm),

n : Birim hacimdeki partikül sayısı ($1/m^3$),

r : Nanopartikül yarıçapı (nm),

β : Esfahany 2007 ve Bhimani 2013'te 0.1,

$\phi_{equivalent}$: Nanotabaka kaplı nanopartikülün eşdeğer hacimsel derişimi (%).



- Xie (2005): Değişken ısı iletkenlikli nanotabaka içeren geliştirilmiş Yu&Choi ifadesidir. Değişken ısı iletkenlikte, nanotabakanın baz akışkan sınırında baz akışkanın ısı iletkenliği, nanotabakanın partikül sınırında partikül ısı iletkenliği geçerlidir. Nanotabaka ısı iletkenliği, baz akışkan sınırından partikül sınırına doğrusal artar (Özerinç ve Turgut 2010).

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 3\Theta\phi_{eq} + \frac{3\Theta^2\phi_{eq}^2}{1 - \Theta\phi_{eq}} \quad (2.24)$$

$$\Theta = \frac{(1 + \beta)^3 - \beta_{np-nl}/\beta_{bf-nl}}{(1 + \beta)^3 + 2\beta_{nl-bf}\beta_{np-nl}} \cdot \beta_{nl-bf} \quad (2.25)$$

$$\beta_{np-nl} = \frac{k_{np} - k_{nl}}{k_{np} + 2k_{nl}}, \quad \beta_{bf-nl} = \frac{k_{bf} - k_{nl}}{k_{bf} + 2k_{nl}}, \quad \beta_{nl-bf} = \frac{k_{nl} - k_{bf}}{k_{nl} + 2k_{bf}} \quad (2.26)$$

$$k_{nl} = \frac{M^2}{(M - \beta)\ln(1 + M) + \beta M} \cdot k_{bf} \quad (2.27)$$

$$\phi_{eq} = \phi(1 + \beta)^3, \beta = h/r \quad (2.28)$$

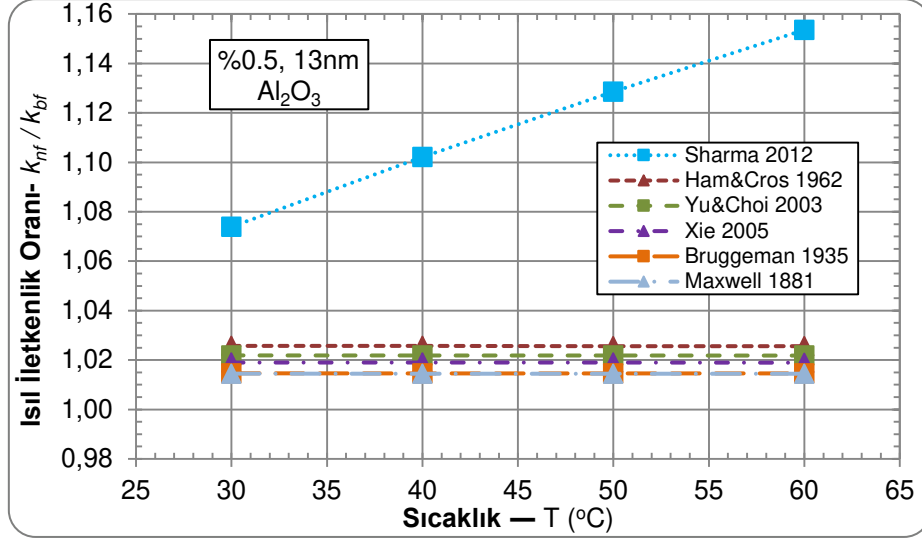
- Sharma (2012): Bu ifade, birçok araştırmacının deneysel olarak bulduğu 252 veriye eğri uydurma ile elde edilmiştir. Bu denklemin şartları: a. Küresel nanopartiküller, b. 20 – 150 nm çaplı nanopartiküller, c. 20 – 70 °C sıcaklık aralığı, d. %4'ten küçük nanoakışkan hacimsel derişimi. Maksimum sapma %11'dir (Sharma 2012).

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0.8938 \cdot (1 + \phi)^{1.37} \cdot \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{0.2777} \cdot \left(1 + \frac{d_{np}}{150}\right)^{-0.0336} \cdot \left(\frac{\alpha_{np}}{\alpha_{bf}}\right)^{0.01737} \quad (2.29)$$

T_{nf} : Nanoakışkanın sıcaklığı (°C),

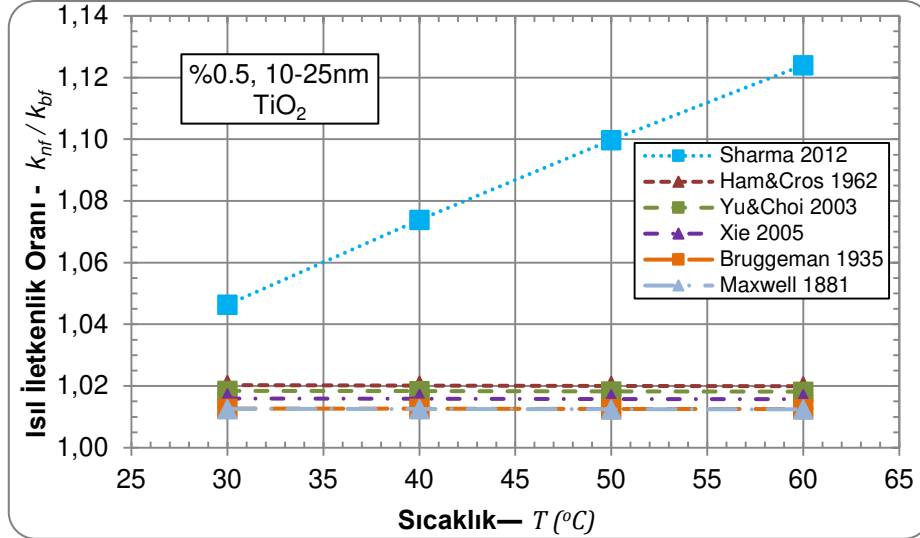
d_{np} : Nanopartikülün çapı (nm),

α : Isıl difüzyon (m^2/s).

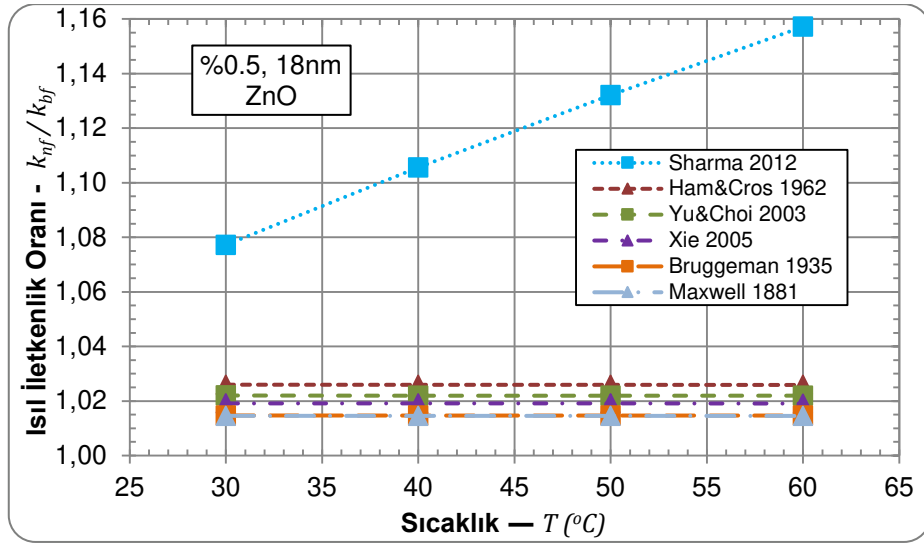


Şekil 2.11 Su Bazlı Al_2O_3 için Literatür denklemlerinin kıyaslanması

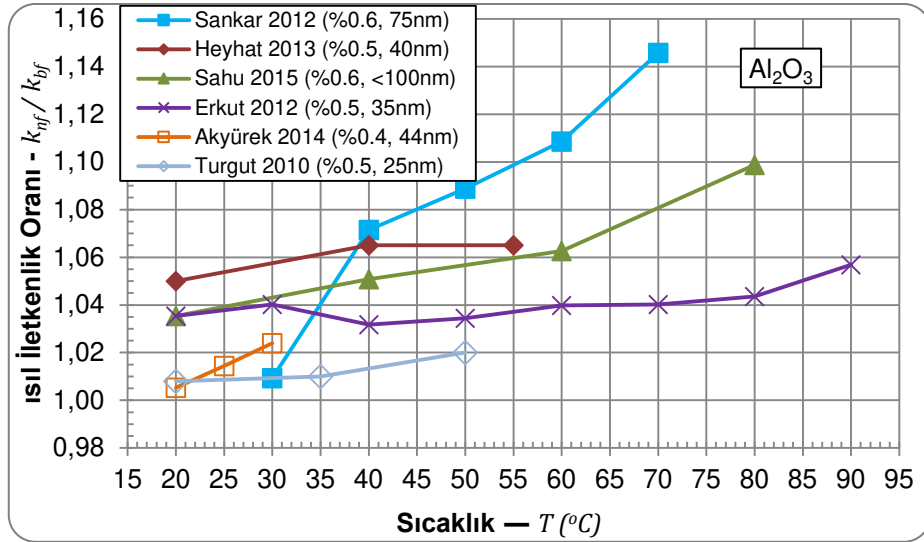
Şekil 2.11, 2.12 ve 2.13'te % 0.5 hacimsel derişime sahip su bazlı Al_2O_3 (~13 nm) TiO_2 (~10-25 nm) ve ZnO (~18 nm) nanoakışkanlarına ait farklı sıcaklıklarda literatürde kullanılan denklemlere ait ısı iletkenlik değeri görölmektedir.



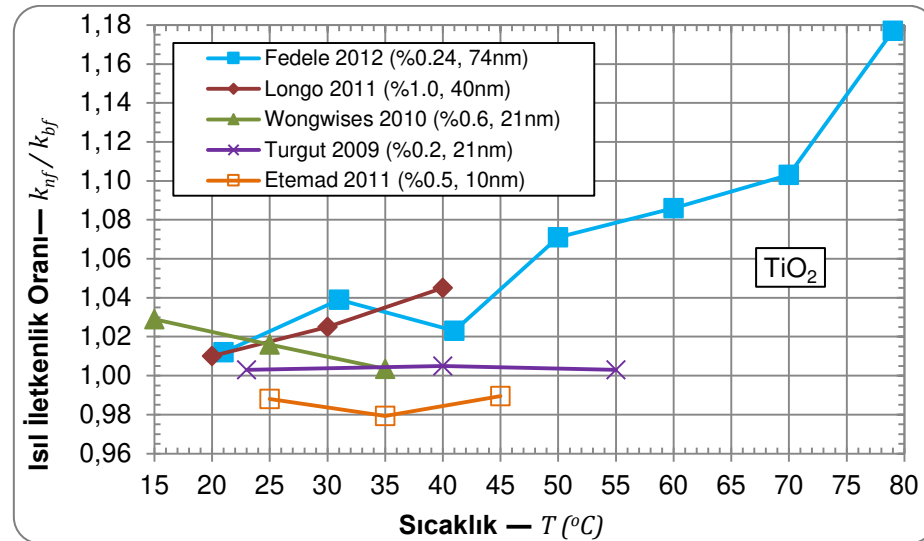
Şekil 2.12 Su Bazlı TiO_2 için literatür denklemlerinin kıyaslanması



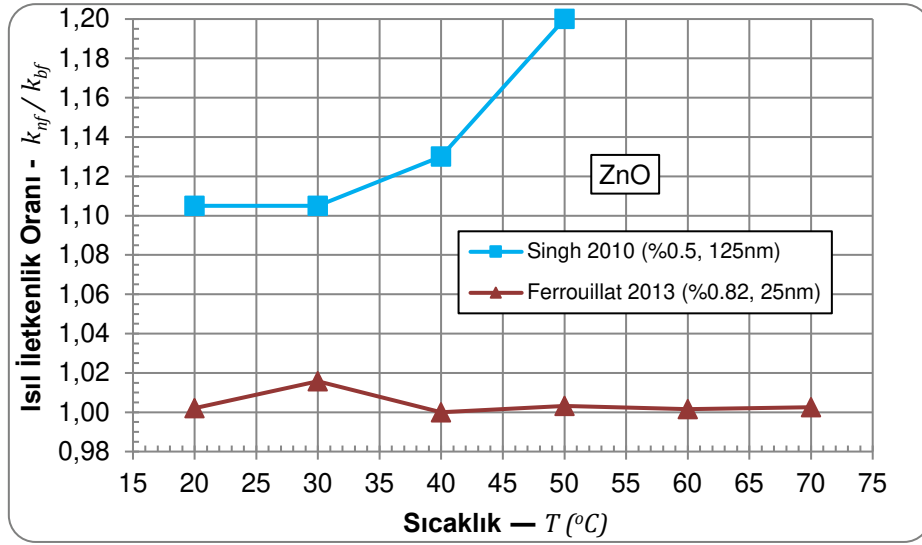
Şekil 2.13 Su Bazlı ZnO için literatür denklemlerinin kıyaslanması



Şekil 2.14 Su Bazlı Al_2O_3 için deneysel literatür sonuçlarının kıyaslanması.



Şekil 2.15 Su Bazlı TiO_2 için deneysel literatür sonuçlarının kıyaslanması.



Şekil 2.16 Su Bazlı ZnO için deneysel literatür sonuçlarının kıyaslanması.

Şekil 2.14, 2.15 ve 2.16’da % 0.5 hacimsel derişime sahip su bazlı Al_2O_3 (~13 nm) TiO_2 (~10-25 nm) ve ZnO (~18 nm) nanoakışkanlarına ait farklı sıcaklıklarda deneysel çalışan literatür sonuçlarına ait ısı iletkenlik değeri görölmektedir.

2.5.2. Viskozite

Nanoakışkanların reolojik davranışları, uygulamalar için çok önemlidir. Nanoakışkanların reolojik yapılarının çalışılması aynı zamanda nanoakışkanın yapısını anlamaya yardımcı olur (Goharshadi 2013). Reolojik araştırmalarda ölçülen nicelikler; kuvvet, sapma, hız ve viskozitedir. Nanoakışkanın akışını düzenlemek için viskozite önemli bir parametredir. Ayrıca ısı değıştiricisi ve soğutma sistemleri gibi ısı iletkenlik cihazlarında da viskozitenin önemi çok fazladır. Çünkü pompalama gücü viskoziteye bağlıdır. Laminer akışta pompalama gücü direkt olarak viskoziteyle orantılıdır. Bu yüzden ısı iletkenlik gibi viskozite de mühendislik sistemleri için önemlidir. Viskozite için literatürde en çok kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

- Einstein (1906) :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi \quad (2.30)$$

μ_{nf} : Nanoakışkan viskozitesi (Pa.s)

μ_{bf} : Baz akışkan viskozitesi (Pa.s)

ϕ : Hacimsel katkı oranı (%)

$\phi < \%5$ gibi düşük katkı oranları için geçerlidir (Kakaç 2009).

- Brinkman (1952): $\phi > \%5$ gibi yüksek katkı oranları için de geçerlidir.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 - \phi)^{-2.5} \quad (2.31)$$

- Lundgren (1972), Batchelor (1977): Partiküllerin Brownian hareketi etkisini içerir.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + 6.25\phi^2 \quad (\text{Ghadimi 2011}) \quad (2.32)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2 \quad (\text{Batchelor 1977}) \quad (2.33)$$

- Nguyen (2004): Nguyen, 3 çalışmadaki (Masuda, Choi, Wang) verilere eğri uydurma ile bu ifadeyi elde etmiştir.

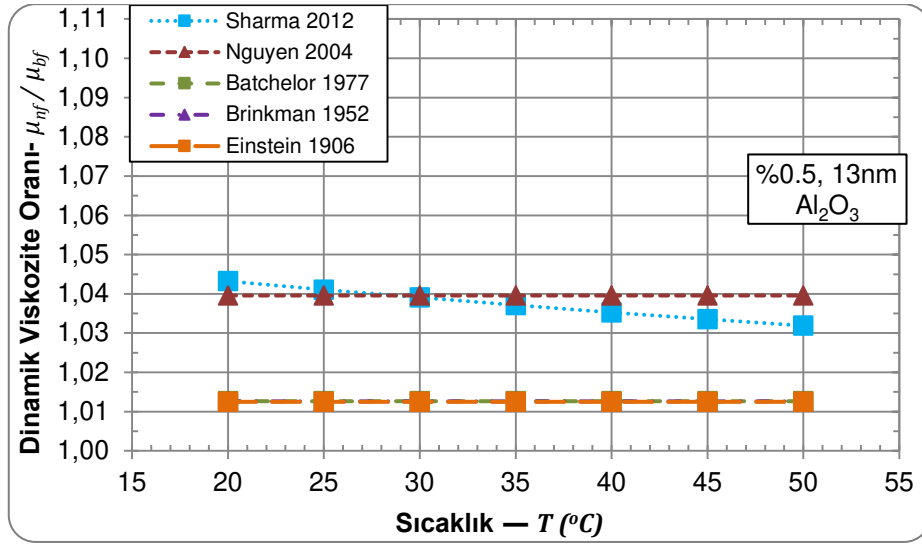
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 7.3\phi + 123\phi^2 \quad (2.34)$$

- Sharma (2012): Bu ifade, birçok araştırmacının deneysel olarak bulduğu 233 veriye eğri uydurma ile elde edilmiştir. Bu denklemin şartları: a. Küresel nanopartiküller, b. 20 – 150 nm çaplı nanopartiküller, c. 20 – 70 °C sıcaklık aralığı, d. %4'ten küçük nanoakışkan hacimsel derişimi. Maksimum sapma %13'tür (Sharma 2012).

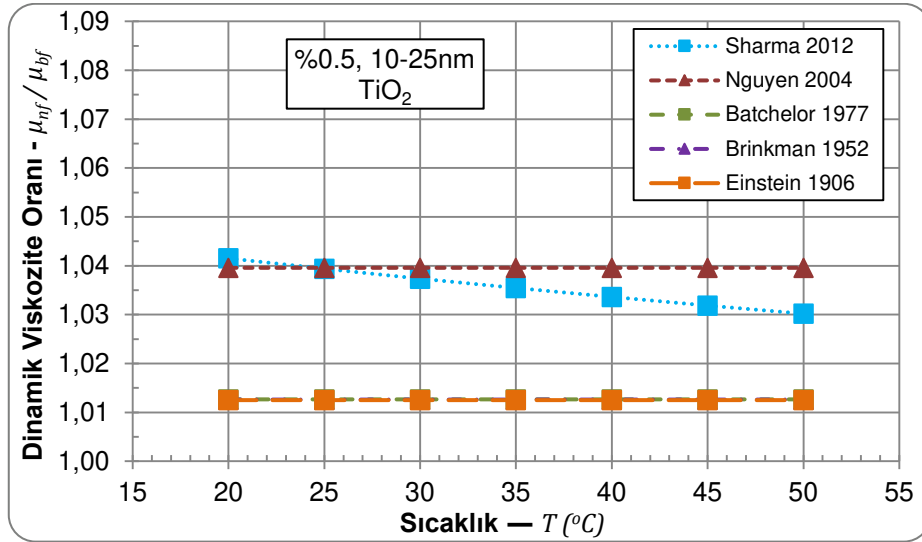
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + \phi)^{11.3} \cdot \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{-0.038} \cdot \left(1 + \frac{d_{np}}{170}\right)^{-0.061} \quad (2.35)$$

T_{nf} : Nanoakışkanın sıcaklığı (°C),

d_{np} : Nanopartikülün çapı (nm).

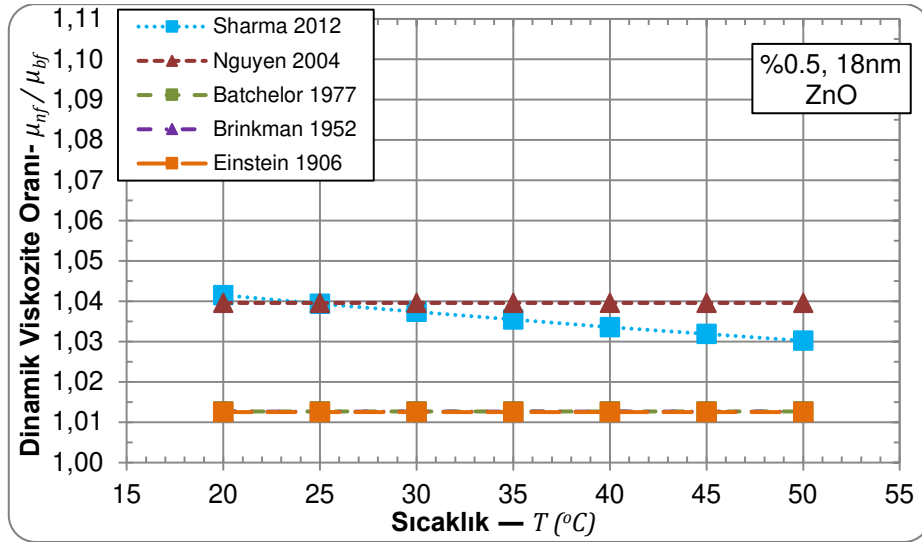


Şekil 2.17 Su Bazlı Al_2O_3 için literatür denklemlerinin kıyaslanması.

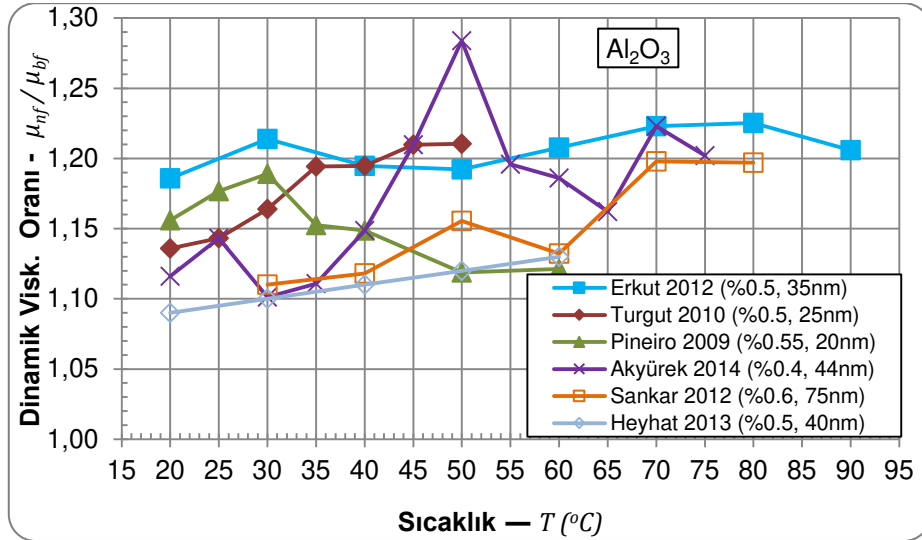


Şekil 2.18 Su Bazlı TiO_2 için literatür denklemlerinin kıyaslanması.

Şekil 2.17, 2.18 ve 2.19’de % 0.5 hacimsel derişime sahip su bazlı Al_2O_3 (~13 nm), TiO_2 (~10-25 nm) ve ZnO (~18 nm) nanoakışkanlarına ait farklı sıcaklıklarda literatürde kullanılan denklemlere ait viskozite değerleri görölmektedir.

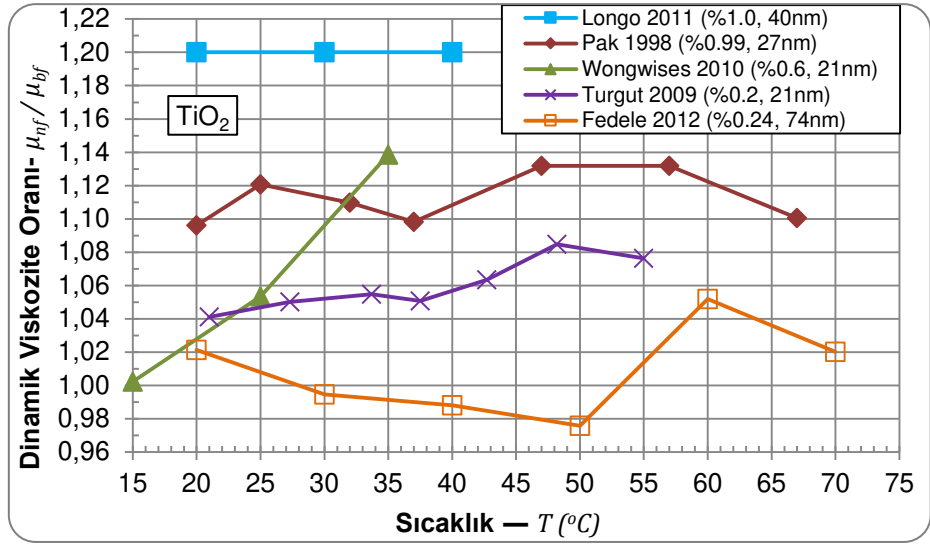


Şekil 2.19 Su Bazlı ZnO için literatür denklemlerinin kıyaslanması.

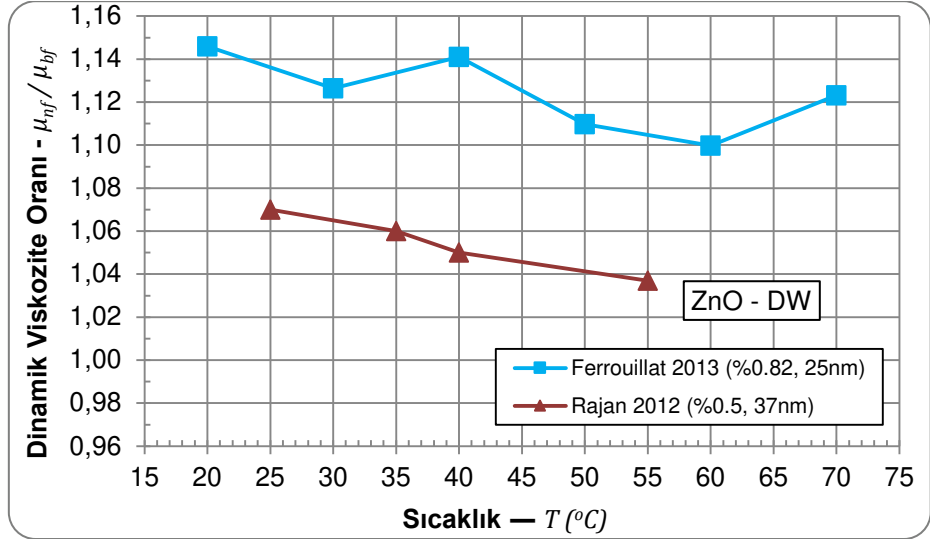


Şekil 2.20 Su Bazlı Al_2O_3 için deneysel literatür sonuçlarının kıyaslanması.

Şekil 2.20, 2.21 ve 2.22’de % 0.5 hacimsel derişime sahip su bazlı Al_2O_3 (~13 nm), TiO_2 (10-25 nm) ve ZnO (~18 nm) nanoakışkanlarına ait farklı sıcaklıklarda deneysel çalışan literatür sonuçlarına ait viskozite değerleri görölmektedir.



Şekil 2.21 Su Bazlı TiO₂ için deneysel literatür sonuçlarının kıyaslanması.



Şekil 2.22 Su Bazlı ZnO için deneysel literatür sonuçlarının kıyaslanması.

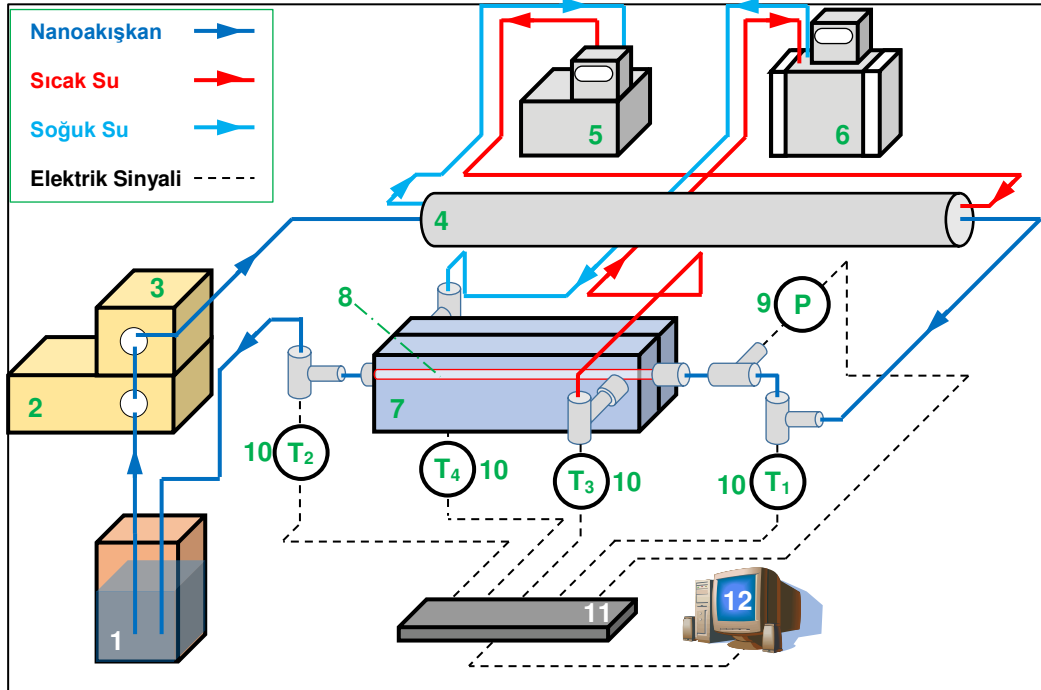
BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MİKROBORU DENEY SETİ

Nanoakışkanlı radyatör tasarımına temel teşkil edecek olan deneysel çalışmada öncelik Şekil 3.1’de gösterilen deney düzeneğini kurarak aşağıda belirtilen parametreleri elde etmek olmalıdır.

- Çeşitli nanoakışkanlar kullanarak, en uygun ısı transferi performansı, bununla beraber minimum basınç düşüşü ortaya koyan nanoakışkan çeşidini belirlemek,
- Katı partikül konsantrasyonunun basınç düşüşüne, sürtünmeye ve ısı transferi katsayısına etkisini belirlemek ve soğutma sistemleri için uygun mini/mikrokanal ve nanoakışkan çiftini elde etmek.



Şekil 3.1 Mikro boru deney seti.

Çizelge 3.1 Şekil 3.1’deki deney setindeki malzeme ve cihazlar.

1: Nanoakışkan Tankı	7: Polimer Isı Değiştirici
2: Pompa	8: Mikro boru
3: Basınç Regülatörü	9: Basınç Sensörü
4: Paslanmaz Çelik Isı Değiştirici	10: Sıcaklık Sensörü
5: Isı Banyosu (Isıtma)	11: Veri Toplayıcı
6: Isı Banyosu (Soğutma)	12: Bilgisayar

3.1.1. Deney Düzenğinde Kullanılacak Cihazların Seçimi ve Özellikleri

3.1.1.1. Pompa

Pompa debisinin belirlenmesi için, proje önerimizde belirtilen dairesel boruda $Re \leq 2000$ değerini sağlayacak debi ve 100 μm - 1000 μm iç çaplı mini/mikro borular kullanılmıştır. Debi projede başarı ölçütü olarak tanımlanan 400 μm iç çaplı borulara göre yaklaşık 50 mL/dk olarak belirlenmiştir. Artan iç çaplarla, Re çalışma aralığımızın aynı kalabilmesi için debinin de artması gerekir. Pompanın yüksek basınçta çalışması, debide istenen artışı kısıtlamıştır. Pompa debisinin yükseltilmesi mümkündür fakat ek parçalar gerektirmesi ve pompa fiyatının artması nedeniyle debi üst sınırı değiştirilmemiştir. Böylece pompa özellikleri 50 mL/dk debi ve 140 bar basınç olarak belirlenmiştir. Pompanın karşılaması gereken basınç düşüşü denklem 3.1’de verilmiştir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.1)$$

ΔP : Basınç Düşüşü (Pa)

f : Sürtünme Faktörü (-)

L : Mikro Boru boyu (m)

D_h : Mikro Boru çapı (m)

V : Hız (m/s).

Çizelge 3.2 Deney düzeneğinde kullanılan mikro borularda oluşan basınç kayıpları.

Mikro Boru çapı	Mikro Boru boyu	Debi ($V_{\max}=50$)	Hız	Reynolds Sayısı $Re_{\max}=2000$	Sürtünme Faktörü $Re<2300$ için	Basınç Düşümü
$D_i (\mu m)$	$L_i (m)$	$\dot{V} (mL/dk)$	$V = \dot{V}/A (m/s)$	$Re = VD/\eta$	$f = 64/Re$	$\Delta P [bar]$
100	0,20	11,00	23,355	1981	0,0323	189
200	0,30	23,00	12,208	2071	0,0309	37
400	0,30	46,00	6,104	2071	0,0309	5
750	0,30	50,00	1,887	1200	0,0533	0
1000	0,30	50,00	1,062	900	0,0711	0

Pistonlu pompalarda emme ve basmada kuvvet dağılımı çok değişkendir. Bu elverişsiz durumun önüne geçmek, kuvvetlerin daha iyi dağılımını temin etmek ve eşit hacim akımı temin etmek için iki, üç ve daha fazla piston yan yana konularak kranka gelen kuvvetler dengelenir, homojen bir dağılım sağlanmaya çalışılır. Bu şekilde çok silindirli pompalar, özellikle yüksek basınçlı durumlarda kullanılmaktadır. Yapılan literatür araştırmasında benzer deney düzeneği olan çalışmalar Çizelge 3.3.de gösterilmiştir. Genel olarak Gilson 305 Pistonlu pompa (0-600 bar) kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Pistonlu Pompa (0-600 bar).

Çizelge 3.3 Literatürde deneysel çalışmada kullanılan pistonlu pompalar.

Sıra	Marka, Model	Özellikler	Referans
1	Gilson 305	Basınç: 0.1-60MPa Debi: 0.050-50mL/dk	Parlak, 2010
2	Gilson 305	Basınç: 0.1-60MPa, Debi: 0.050-50mL/dk	McPhail, 2008
3	Tuthill V2DC	Basınç: 17.2bar (177°C), Debi: 0.19mL/dk	Eason, 2006
4	NS Type NP-KX-110	Basınç: 1-600 bar, Debi: 0.050-50 mL/dk	Lelea, 2004

3.1.1.2. Basınç Regülatörü

Pistonlu pompanın çevrimi sırasında oluşan süreksizlik nedeniyle nanoakışkan basıncında süreklilik sağlamak ve tesisat boru hatlarında sızdırma ve patlatma sorunlarını engelleyerek, kullanılan bağlantı elemanlarının zarar görmemesini sağlamak için kullanılmıştır. Basınç regülatörü seçiminde çalışma basıncı (0-600 bar) ve debi (0.050-50 mL/dk) aralığına göre Gilson 805/806 modülü seçilmiştir.



Şekil 3.3 Basınç Regülatörü.

3.1.1.3. Isıtma ve Soğutma Banyosu

Isı banyosunun nanoakışkanı ısıtmak için vereceği güç, en kötü sınır koşullar dikkate alınarak belirlenebilir. Bu sınır koşulları, 50 mL/dk debili nanoakışkanı 0°C'den 100°C'ye çıkarmak olabilir. Buna göre gövde boru tipi bir ısı değiştiricisinde nanoakışkanın borudan, ısı banyosundan gelen sıcak suyun gövdeden geçtiği bir paralel akışlı ısı değiştiricisi düşünülmüştür.

Nanoakışkanın borudan geçişi sırasında, nanoakışkanı istenen sıcaklığa çıkarmak için gereken ısı gücünün hesabı:

$$\dot{Q}_n = \dot{m}_n c_{p,n} \Delta T = \dot{m}_n c_{p,n} (T_{n,out} - T_{n,in}) \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_n = \rho_n \dot{V}_n \quad (3.3)$$

$$\rho_n = \rho_p \phi + \rho_b (1 - \phi) \quad (3.4)$$

$$\rho_n c_n = \rho_p c_p \phi + \rho_b c_b (1 - \phi) \quad (3.5)$$

$\dot{Q}_n$: Nanoakışkanı ısıtmak için gereken ısı gücü (W)

$\dot{m}_n$: Kütlesel debi (kg/s)

$c_{p,n}$: Özgül ısı (kJ/kgK)

$T_{hb,in}$: Isıtıcı giriş sıcaklığı (°C)

$T_{hb,out}$: Isıtıcı çıkış sıcaklığı (°C)

$T_{n,in}$: Nanoakışkanın mikrokanala giriş sıcaklığı (°C)

$T_{n,out}$: Nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığı (°C)

$\dot{V}_n$: Akışkan hacimsel debi (m³/s)

ϕ : Hacimsel derişim (%)

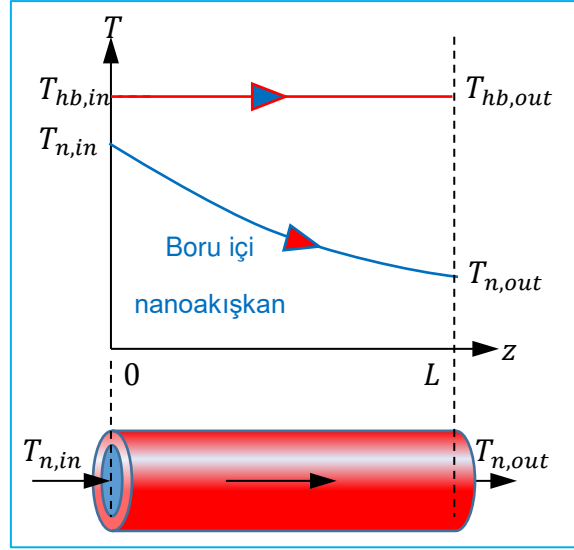
ρ_n : Nanoakışkan yoğunluğu (kg/m³)

ρ_b : Baz akışkan yoğunluğu (kg/m³)

ρ_p : Nanopartikül yoğunluğu (kg/m³)

$\dot{m}_n$: Baz Akışkan kütlesel debisi (kg/s).

Yukarıdaki denklemler kullanılarak nanoakışkanı ısıtmak için gereken ısı banyosu gücü: $\dot{Q}_n \cong 345.00 \text{ W}$ bulunmuştur. Polimer ısı değiştiricisindeki nanoakışkanın sıcaklığı 10-20°C gibi küçük miktarlarda azaltılacağından, soğutucu ısı banyosu gücü için, ısıtıcı ısı banyosu gücünün yarısı alınmış ve soğutucu ısı banyosu akışkanının polimer ısı değiştiricisi gövdesine giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki farkın 0.3°C (sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı için <0.5°C olmalıdır) olması durumunda soğutucu ısı banyosundan gelen sirkülasyon debisi aşağıda hesaplanmıştır.



Şekil 3.4 Soğutucu ısı banyosundan gelen soğuk akışkan geçişi.

$$\dot{Q}_{chb} = \dot{m}_{chb} c_{p,hb} \Delta T_{chb} = \dot{m}_{chb} c_{p,chb} (T_{chb,out} - T_{chb,in}) \quad (3.6)$$

$\dot{Q}_{chb}$: Nanoakışkanı soğutmak için gereken ısı banyosu gücü (W),

$\dot{m}_{chb}$: Soğutucu akışkan kütleli debisi (kg/s),

$c_{p,hb}$: Soğutucu Akışkan Özgül Isısı (kJ/kgK),

$T_{chb,out}$: Soğutucu akışkan çıkış sıcaklığı (°C),

$T_{chb,in}$: Soğutucu akışkan giriş sıcaklığı (°C),

Nanoakışkanı soğutmak için gereken ısı banyosu gücü $\dot{Q}_{chb} = \dot{Q}_n / 2 = 345 / 2 = 172,50 \text{ W}$ hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{chb} = \rho_{chb} \dot{V}_{chb} \quad (3.7)$$

ρ_{chb} : Soğutucu akışkan yoğunluğu (kg/m^3),

$\dot{V}_{chb}$: Soğutucu akışkan hacimsel debisi (m^3/s).

$\dot{m}_{chb}$: Soğutucu akışkan kütleli debisi (kg/s),

Denklem 3.6. ve 3.7. kullanılarak nanoakışkanı soğutmak için gereken ısı banyosu debisi $\dot{V}_{chb} = 1.3917 \times 10^{-4} m^3/s \cong 8.355 L/dk$ bulunur. Yani, soğutucu ısı banyosundan polimer ısı değiştiricisine dakikada en az 8.355 L debi gönderilirse, soğutucu ısı banyosu akışkanının polimer ısı değiştiricisi gövdesindeki giriş çıkış sıcaklıkları hemen hemen aynı (fark $0.3^\circ C$) olur. Hesap olarak 345 W ısıtma gücü için yaklaşık 16 L/dk ısıtıcı ısı banyosu debisi gerekli görülebilir. Fakat nanoakışkanı ısıtma sırasında sabit yüzey sıcaklığı sınır şartına gerek olmadığından, ısıtıcı ısı banyosu akışkanının daha büyük sıcaklık farkı oluşturması ile sorun aşılabılır. Yani 345 W ısıtma için $0.3^\circ C$ sıcaklık farkında 16 L/dk debi gerekiyorsa, $0.6^\circ C$ sıcaklık farkı için yine 8.355 L/dk debi yeterli olur. Hatta daha yüksek sıcaklık farkı da mümkündür ve böylece <8 L/dk sağlanır. Fakat nanoakışkan sıcaklığının istenen değere kolayca getirilebilmesi için sıcaklık farkının çok da büyük olmaması gerekir.

3.1.1.4. Paslanmaz Çelik Isı Değiştiricisinin Boyu (L_t)

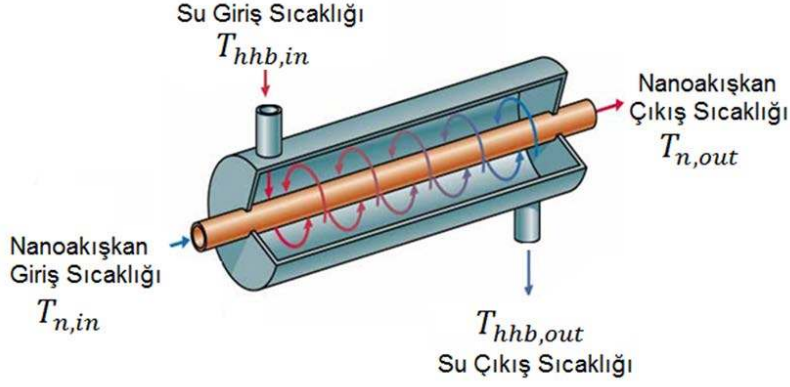
Mikro kanal deney düzeneğinde mikro kanaldan geçecek nanoakışkanın sıcaklığını istenilen sıcaklığa getirmek için ısı değiştiricisine ihtiyaç duyulmuştur. İstenilen basınç ve sıcaklık için paslanmaz çelik ısı değiştiricisi boyu için aşağıdaki örnek hesaplama yapılmıştır.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_n \cong 350 W \text{ (Nanoakışkanı ısıtmak için gereken güç)}$$

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{ln} \quad (3.8)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{in} &= T_{n,in} - T_{h,hb,in} \\ \Delta T_{out} &= T_{n,out} - T_{h,hb,out} \end{aligned} \quad (3.10)$$



Şekil 3.5 Deneyde kullanılacak Isı Değiştiricisi.

Q : Nanoakışkanı ısıtmak için gerekli ısı güç (W),

U : Toplam ısı transfer katsayısı (W/m^2K),

$T_{n,in}$: Nanoakışkanın mikrokanalet giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$),

$T_{n,out}$: Nanoakışkanın mikrokanaletten çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$),

$T_{hhb,in}$: Su giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$),

$T_{hhb,out}$: Su çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$),

D_h : Isı değiştiricisi iç çapı (m),

L_{he} : Isı değiştiricisi boyu (m),

T_s : $100^{\circ}C$ (Kabul edilmiştir, boru girişinden çıkışına $50^{\circ}C$ 'den $98.9^{\circ}C$ 'ye),

h_{in} : Isı Değiştiricisi giriş ısı taşınım katsayısı (W/m^2K).

$$\Delta T_{in} = T_{n,in} - T_{hb,in} = 0 - 100 = -100^{\circ}C$$

$$\Delta T_{out} = T_{n,out} - T_{hb,out} = 99.9 - 100 = -0.1^{\circ}C$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{-100 - (-0.1)}{\ln(-100/-0.1)} = -14.5 \text{ bulunur.}$$

Bu ifadede sıcak akışkan, borudan geçecek şekilde tanımlandığı için işaret ters çıkmıştır, soğuk olan nanoakışkan borudan geçmektedir. Bu nedenle pozitif kabul edip işlemlere devam edilmiştir. Yüksek sıcaklıklı akışkanın ısı değiştiricisinden geçişi sırasında ısı değiştirici yüzeyinden ısı kayıplarını azaltmak için borudan geçmesi uygun olsa da, nanoakışkanın mikro boru girişinden önceki borular boyunca çok yüksek basınçta olması nedeniyle nanoakışkanın, basınca dayanımı daha iyi olan borudan geçmesi gerekir.

$$350 = UA_s \times 14.5 \rightarrow UA_{s,in} = 24.138 \text{ W/K}$$

Bu çarpım ifadesini sağlayan kapasitede bir ısı değiştiricisi seçilebilir. Isı değiştiricisi kataloglarından inceleme ile toplam ısı transfer katsayısına bakılarak gereken ısı değiştiricisi boyu hesaplanır. Örneğin sudan suya basit bir ısı değiştirici için toplam ısı transfer katsayısı (Çengel 2002) $850 \text{ W/m}^2\text{K}$ ise, bu ısı değiştiricinin boyu;

$$A_{s,in} = \pi D_{tube,in} L_{he} \quad (3.11)$$

$A_{s,in}$: Yüzey Alanı (m^2),

$D_{tube,in}$: Isı değiştiricisi iç çapı (m),

L_{he} : Isı Değiştiricisi boyu (m).

Toplam ısı transfer katsayısı $850 \text{ W/m}^2\text{K}$ için $L_{he} = 0.904 \text{ m} = 90 \text{ cm}$ ısı değiştirici boyu bulunur. Fakat bu katsayının gerçek değerinin bilinmesi gerekir. Bazı bilinmeyen veriler nedeniyle, kabuller yapılarak aşağıdaki gibi hesaplamalar yapılmıştır. Nanoakışkanın Paslanmaz Çelik Isı Değiştiricisinden Çıkış Sıcaklığı ($T_{n,out}$), boru (nanoakışkan) tarafı taşınım katsayısına bağlıdır ve yukarıdaki hesaplamalardan farklı bir sonuç (daha küçük boru boyu) çıkmaktadır. Sonucu, gerçekte boru tarafı akışkan sıcaklığına yaklaşan boru iç yüzey sıcaklığının etkilediği düşünülmektedir. Aşağıdaki hesaplarda boru iç yüzey sıcaklığı, boru dışında akan suyun sıcaklığına eşit alınmıştır. Cidar kalınlığına göre iç yüzey sıcaklığının, dış yüzey sıcaklığından $1-2^\circ\text{C}$ düşük olması gerekirken, aynı zamanda boru içindeki akışkan sıcaklığına da yakın olmalıdır. Denge sıcaklığı olarak, borunun ekseni boyunca her konumu için, boru ve gövde tarafı akışkan sıcaklıklarının ortalaması alınabilir (Çengel 2002).

$$T_{n,out} = T_s - (T_s - T_{n,in}) e^{\left(-\frac{h_{in} A_{s,in}}{\dot{m}_n c_n}\right)} \quad (3.12)$$

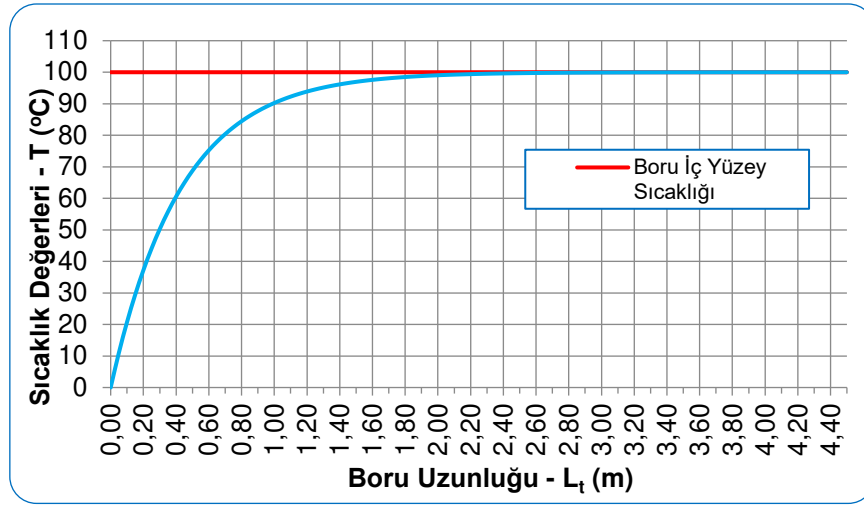
$$\dot{m}_n = \rho_n \dot{V}_n \quad (3.13)$$

$$T_{n,out} = 99.9 \cong 100^\circ\text{C}$$

Bu sonuca göre $NTU > 5$ olduğu sürece nanoakışkan çıkış sıcaklığı, boru iç yüzey sıcaklığına (ısıtıcı ısı banyosu sıcaklığına) yaklaşık olarak eşit olacaktır. O halde NTU değeri, istenen değere azaltılarak boru boyu bulunabilir. Örneğin buradaki hesapta aynı çıkış sıcaklığı için boru boyu yarıya ($L_t > 2.25 \text{ m}$) düşürülebilir.

Yine, nanoakışkanın herhangi bir konumdaki sıcaklığı ise boru iç yüzey alanı için $A_{s,in} = \pi D_{in} x$ yazılarak bulunabilir. Bu sayede, ekonomik açıdan daha uygun boru boyu belirlenebilir. Buna göre yeni denklem aşağıdaki gibi olur. Bu denkleme göre sıcaklık-boru boyu arasındaki ilişki grafiği Şekil 3.6’da olduğu gibidir. Farklı parametreler değiştirilerek optimum çıkış sıcaklığı ve boru boyu belirlenebilir.

$$T_{n,out}(x) = T_s - (T_s - T_{n,in})e^{\left(-\frac{h_{in}\pi D_{in}x}{\dot{m}_n c_n}\right)} \quad (3.14)$$



Şekil 3.6 Nanoakışkan sıcaklığının ısı değiştiricisi boyunca değişimi.

3.1.2. Mikro Boru ve Bağlantı Elemanları

3.1.2.1. Bağlantı Elemanları (Fittings)

Bağlantı elemanları, bir somun (nut) ve bir ferrule'den (halka, yüksük, bilezik, konik burç) oluşan yapıdır. Bir fitting iki amaç için kullanılır; akışkanın akış yolundan sızmasını önlemek ve mikro boruyu zıt basınca karşı yerinde tutmaktır. Bir sistemde kullanılacak bağlantı elemanları aşağıdaki parametrelere göre belirlenir:

- Kullanılan mikro borunun boyutu (dış çap ve uzunluk) ve malzemesi,
- Alıcı ucun (konektör) diş tipi, dişli kısmın uzunluğu ve malzemesi,
- Beklenen maksimum işletme basınç değeri,
- Beklenen maksimum çalışma sıcaklığı,
- Akışkanın kimyasal özellikleri (kullanılan malzemelerle reaksiyona girme durumu).



Şekil 3.7 Mikro boru, bağlantı elemanları ve istavroz.

3.1.2.2. Mikro Boru

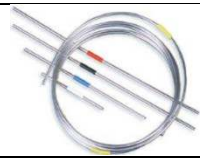
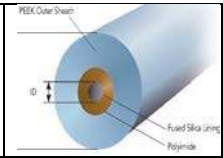
Mikro boru iç çapları proje önerisinde 100, 200, 400, 750, 1000 μm şeklinde belirlenmiş olup, en yüksek basınç düşüşü 100 μm iç çaplı boruda görülmüştür. 1 mL/dk gibi çok düşük debilerde bile, 100 μm iç çapında ve 5 cm boyunda mikro boru için yapılan hesap sonucu yaklaşık 189 bar değerinde basınç düşüşü bulunmuştur (Çizelge 3.1). Burada, deneylerde kullanılacak mikro borular için önemli bir durum tespit edilmiştir: Mikro boru ile pompa birbiriyle doğrudan ilişkilidir ve bu ikilinin uyumlu olması gerekir. Çünkü hesaplanan değerlerden de görüldüğü üzere, hem küçük çaplar için çok düşük debiyi ve çok yüksek basıncı, hem de artan çaplarla birlikte yüksek debileri sağlayabilecek bir pompa ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Hem yüksek basınç, hem de büyük debi sağlayabilecek pompalar mevcut olup, aşırı yüksek maliyetleri nedeniyle bunlardan vazgeçilmiş, daha düşük maliyetli olan ya yüksek basınçlı ya da yüksek debili pompa kullanmak arasında karar verilmesi gerekmiştir. Eğer yüksek basınçlı pompa kullanılırsa, pompanın verebileceği debi değeri düşük olacağı için, büyük iç çaplı mikro borulara gidildikçe, çok dar ve küçük Reynolds sayıları görülecek ve anlamlı grafiksel sonuçların elde edilmesi mümkün olmayacaktır. Eğer yüksek debili pompa kullanılırsa, bu durumda da küçük iç çaplı mikro borulara gidildikçe, pompanın sağlayabileceği basınç değeri sınırlı olacağı için küçük iç çaplı mikro borularda basınç kayıplarının karşılanamamasına neden olacak ve bu mikro borularda deney yapılamayacaktır. Sonuç olarak, debi ve basınç özellikleri olarak öne çıkan iki farklı pompa alınmaması da, uygun bir pompa – mikro boru ikilisini seçmeye zorlamıştır. Bu seçim ise, proje önerimizdeki 400 μm başarı ölçütünü, $Re \leq 2000$ çalışma aralığını ve mikro borulardaki basınç kayıplarını dikkate alarak, kullanılacak mikro boru iç çap aralığını daraltmayı gerektirmiştir. Mikro boru boylarının seçiminde ise, standart uzunlukta mikro boru üretimleri, meydana gelebilecek basınç kayıpları, pratik olarak deneye uygulanabilirlik ve radyatör kanal boyları etkili olmuştur.

Bu parametrelerin belirlenmesinin ardından, mikro boru iç çapları 400,750 ve 1000 µm öncelikli olmak üzere birkaç farklı çap; mikro boru boyu 20 cm; mikro boru malzemeleri ise paslanmaz çelik ve PEEK olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.4. incelenerek iç çapa göre mikro boru seçilmiştir. Seçim işlemi şu adımlarla belirlenir:

1. İlgili parametrelerin (nanoakışkan termodinamik özellikleri, mikro boru çapı ve boyunun) gerçek ve tahmini değerleri kullanılarak borudaki basınç kaybı ifadesi denklem 3.1.'de sonucu elde edilen basınç değerlerine, hangi malzeme türünün dayanıklı olabildiği belirlenir.
2. Çalışma sıcaklığına hangi malzemenin dayanıklı olabildiği belirlenir.
3. Uzun boydaki mikro boruları kesmek için gereken kesici araçlar belirlenir.

Çizelge 3.4 Mikro boru çeşitleri.

					
PLS $P_{max}=1200\text{bar}$ $T_{max}=100^{\circ}\text{C}$	SS $P_{max}=400\text{-}1523\text{bar}$ $T_{max}=289^{\circ}\text{C}$	PEEK $P_{max}=138\text{-}690\text{bar}$ $T_{max}=100^{\circ}\text{C}$	FS $P_{max}=690\text{bar}$ $T_{max}=350^{\circ}\text{C}$	PEEKsil $P_{max}=414\text{-}1723\text{bar}$ $T_{max}=100^{\circ}\text{C}$	RADEL $P_{max}=310\text{-}862\text{bar}$ $T_{max}=100^{\circ}\text{C}$
PLS : PEEK-Lined Stainless Steel (Paslanmaz Çelik kaplı PEEK boru) SS : Stainless Steel (Paslanmaz Çelik) PEEK : Poly Ether Ether Ketone (Çoğu kimyasal solvente dayanıklı polimer boru) FS : Fused Silica (Ergimiş Silika) PEEKsil: PEEK Silica (PEEK kaplı Fused Silica boru) RADEL: Poli Fenil Sülfan (PEEK malzemeye çok benzer özellikli, Şeffaf)					

3.1.3. Ultrasonik Homojenizatör

Nanopartiküllerin baz akışkanda homojen şekilde dağılması için 20 kHz frekansında, 500W gücünde ve 500 mL numune alabilen ultrasonik karıştırıcı cihaz belirlenmiştir. Bu cihazın seçiminde, literatür çalışmaları sonucu "1 mL hacimdeki nanoakışkana uygulanan ultrasonik güç (W/mL)" için minimum 1 W/mL dikkate alındı. Cihaza konulan nanoakışkan hacmi ve ultrasonik çıkış gücü değiştirilerek farklı W/mL değerleri elde etmek mümkündür.

Ultrasonik homojenizasyonda, 50 Hz'lik voltajı 20 kHz'lik yüksek frekansa dönüştüren bir ultrasonik jeneratör (IVYMEN SYSTEM) kullanılmıştır. Örnek hacmi istenilen hacimde alınarak (0-500 ml), işlem farklı ses dalgası seviyelerinde (%20-90) 1-5 saat süreyle gerçekleştirilecektir. Farklı derişim oranlarında elde edilen nanoakışkanı partikül boyutuna göre değişen problar akışkan içine 3 cm kadar daldırılarak karışımı homojen hale getirmektedir.



Şekil 3.8 IVY Sistem Ultrasonik Homojenizatör.

3.2. MİKROKANALDA DOĞRULAMA DENEYLERİ

Kurulumu tamamlanan deney tesisatından alınan verilerin doğruluğunu göstermek için saf su ile doğrulama deneyleri yapılmıştır. Grafikler, sabit giriş sıcaklığında (45°C), sabit yüzey sıcaklığında (10°C), farklı su debileri ($10\sim 50 \text{ mL/dk}$) ve $400 \mu\text{m}$ ($381 \mu\text{m}$) iç çaplı paslanmaz çelik mikro kanal için elde edilmiştir. Bu deneylerden alınan sonuçlar Şekil 3.10. – 3.12. arasında verilmiştir.

Doğrulama Deney parametreleri;

Akışkan: Saf su,

Akışkan debisi: $\dot{V} = 10\sim 50 \text{ mL/dk}$,

Akışkan giriş sıcaklığı: $T_{in} = 45^{\circ}\text{C}$,

Akışkan çıkış sıcaklığı: $T_{out} = 30^{\circ}\text{C}$,

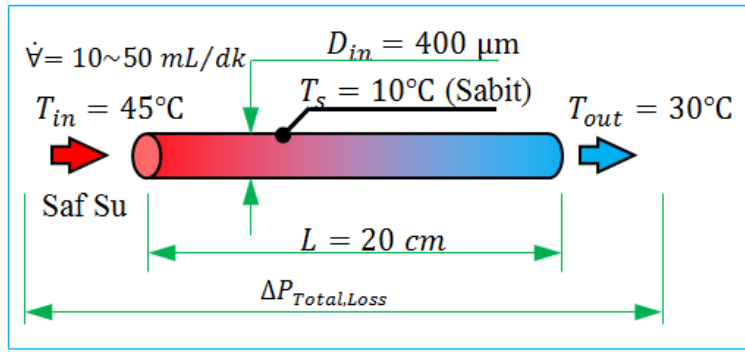
Kanal yüzey sıcaklığı: $T_s = 10^{\circ}\text{C}$,

Kanal tipi: Dairesel,

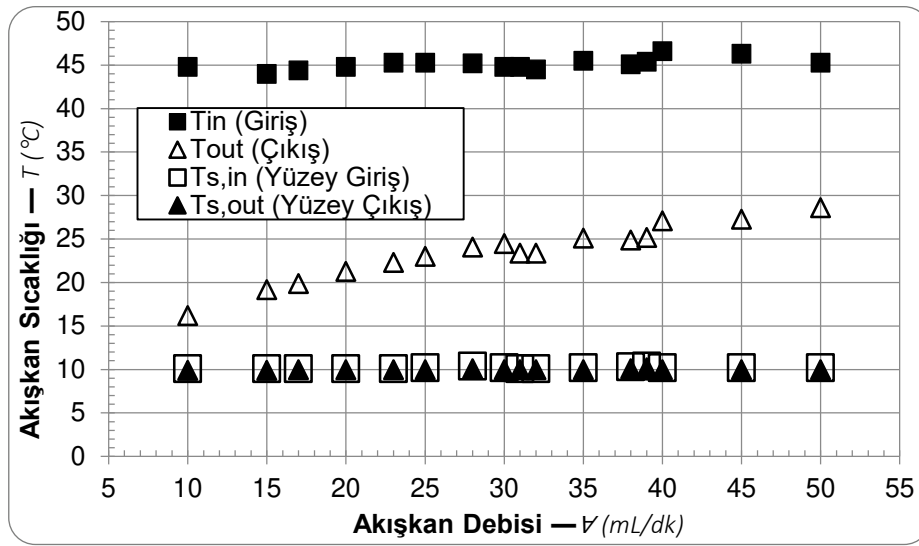
Kanal iç çapı: $D_h = 400 \mu\text{m}$,

Kanal boyu: $L = 20 \text{ cm}$,

Sıcaklık sınır şartı: Sabit yüzey sıcaklığı.

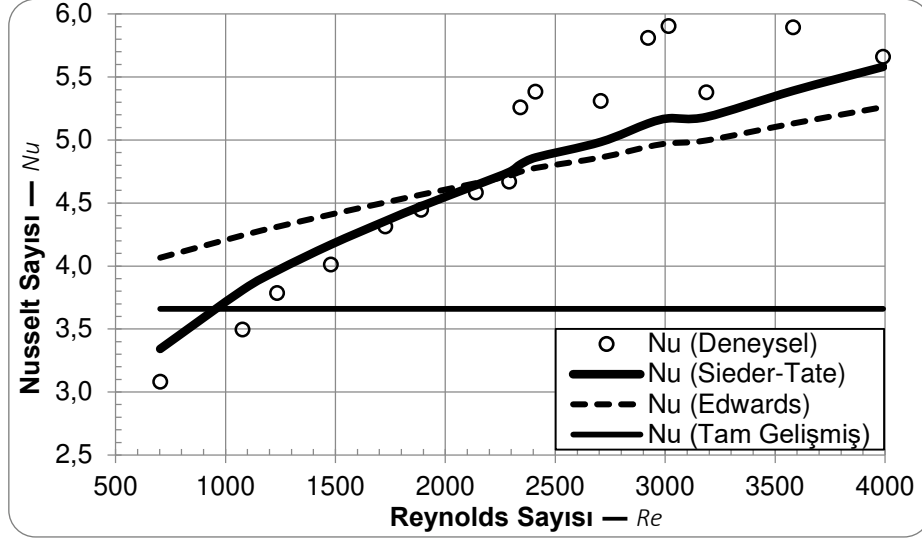


Şekil 3.9 Doğrulama Deney parametreleri.



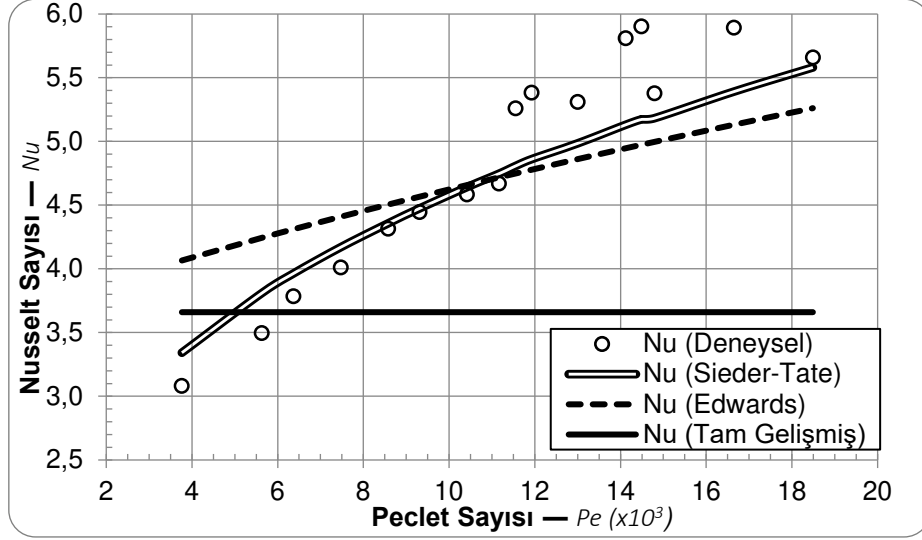
Şekil 3.10 Akışkan sıcaklığının debisine göre değişimi ($T—V$). ($T_{s, in} \cong T_{s, out}$)

Şekil 3.10'da mikrokanaal boyunca akışkanın çıkış sıcaklığının değişimi ve yüzey sıcaklığının sabitliği gösterilmiştir. Tüm veriler için giriş sıcaklığı 45°C'de, yüzey sıcaklığı 10°C'de sabit tutulmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.11 Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi ($Nu—Re$).

Şekil 3.11 incelendiğinde her ne kadar Sieder-Tate denklemine daha iyi uyum gösterse de, bu denklemin hidrodinamik ve ısı transferi için geçerli olması nedeniyle dikkate alınmamıştır. İlk veri dışında sonuçların yaklaşık %15 sapmayla Edwards denklemine uyduğu görülmüştür (Şekil 3.14). Sonuçlar, İlk veri ve kısmen de ikinci veri, tam gelişmiş akışa uyduğu için bu verilere referans $Nu=3.66$ değeridir. Grafikte $Re>2300$ değerinden itibaren Edwards ve Sieder-Tate denklemlerinde salınımlar görülmüştür. Benzer durum deneysel sonuçlarda da vardır. Bunun sebebi akışın geçiş bölgesine girmesi, burada laminar ve türbülans arasında değişkenlik göstermesi nedeniyle daha etkin soğuma gerçekleşmesi ve çıkış sıcaklığının düşmesidir. Böylece mikrokanalda artan giriş-çıkış sıcaklık farkı sonucu daha yüksek ısı transferi, ısı taşınım katsayısı ve Nu değerleri elde edilmiştir. $2300<Re<4000$ bölgesinde akış geçiş bölgesinde bile olsa, Nu sayısında anormal bir artış gözlenmemesi, akışın laminar ağırlıklı özelliğe sahip olduğunu gösterir.



Şekil 3.12 Nusselt sayısının Peclet sayısına göre değişimi ($Nu—Pe$).

Şekil 3.12'de ise yatay eksen Peclet (Pe) sayısı ile verilmiştir. Burada geçiş bölgesinde denklemlerde salınım görülmemiştir. Çünkü bu bölgede akışın çıkış sıcaklığındaki değişimler Pr sayısını etkiler. $Pe=RePr$ olduğu için Pe sayısı değişir ve Nu sayısındaki salınımı dengeler. Değişim olarak söylemek gerekirse, akış geçiş bölgesine girdiğinde mikrokanaleden çıkış sıcaklığı biraz düşer. Çıkış sıcaklığının azalması ortalama sıcaklığı azaltır. Ortalama sıcaklık üzerinden hesaplanan Pr sayısı ($Pr=\eta/\alpha$), artan viskozite azalan ısı difüzyon ($\alpha=k/\rho c$, ısı iletkenlik azalır, yoğunluk ve özgül ısı artar) nedeniyle artar. Pr sayısı artışı Pe sayısını artırır (Pr sayısındaki artış, ısı difüzyondaki azalma nedeniyle, sadece viskozite artışı sonucu Re sayısındaki azalmadan büyüktür). Böylece sadece Re sayısı durumunda meydana gelen Nu sayısı azalması, Pe sayısı kullanımı ile dengelenir ve düzgün bir eğri elde edilmesini sağlar. Bu sonuç, Şekil 3.15 ısı taşınım katsayısı ve Şekil 3.16 ısı transferinde de görülmektedir.

3.2.1. Reynolds — Peclet Sayısı

Şekil 3.11 ve 3.12 özellikle iki farklı eksenle verilmiştir. Normal şartlarda akışkanın Prandtl sayısı sabit kalsaydı, yatay eksen için Reynolds sayısı yeterli olacaktı. Burada Pr sayısı sabit değildir. Çünkü bu grafiklerin elde edilmesinde sabit debide çalışılmadığı için Re sayısı değişmiştir. Re sayısının değişmesi, mikrokanalet içindeki akışkanın sabit yüzey sıcaklığı ile temas süresini değiştirmiş, bu da akışkanın mikrokanaleden çıkış sıcaklığını değiştirmiştir (Şekil 3.10). Akışkanın çıkış sıcaklığının değişmesi ise ortalama sıcaklığın değişmesine neden olmuş ve ortalama sıcaklık üzerinden belirlenen ısı özellikler de değişmiştir. Bu nedenle farklı Re sayılarında farklı Pr sayıları ortaya çıkmıştır. Pr sayısındaki değişim çok büyük olmamakla

birlikte en küçük akışkan debisinden en büyüğe doğru 5,3'ten 4,6'ya değişmiştir. Re sayısının verilme amacı, akış türündeki değişimin Nu sayısını nasıl etkilediğini daha açık olarak göstermektir.

Referans Denklemler

Bu çalışmada laminar durumda akışın hidrodinamik olarak gelişmiş ve ısı olarak gelişen olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ana referans olarak "Edwards" denklemi ile elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır. Bu referansa göre sapmalar ayrıca Şekil 3.14'te verilmiştir.

Isı transferi ile ilgili grafiklerde, akışın hidrodinamik ve ısı gelişme özelliğine göre 3 farklı referans dikkate alınmıştır. Bunlar:

1. Tam gelişmiş akış (Sabit Yüzey Sıcaklığı),

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = 3,66 \quad (3.14)$$

2. Isıl ve hidrodinamik olarak gelişen akış (Seider-Tate denklemi),

$$Nu_{the} = 1.86 \left(\frac{RePrD}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14}, \quad \begin{matrix} 0.60 \leq Pr \leq 5 \\ 0.0044 \leq \mu_b/\mu_s \leq 9.75 \end{matrix} \quad (3.15)$$

Nu_{the} : Teorik ortalama Nusselt sayısı,

V : Akışkanın ortalama hızı (m/s),

D_h : Kanal hidrolik çapı (m),

ϑ : Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s),

μ : Akışkanın dinamik (mutlak) viskozitesi ($Pa \cdot s$),

ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3),

Pr : Prandtl sayısı,

α : Isıl difüzyon (m^2/s),

k : Akışkanın ısı iletkenliği (W/mK),

c : Akışkanın özgül ısı (J/kgK),

L : Tüp uzunluğu (m),

μ_b : Kanal giriş çıkışı sıcaklık ortalaması viskozitesi ($Pa \cdot s$),

μ_s : Akışkanın yüzey sıcaklığındaki viskozitesidir ($Pa \cdot s$).

3. Hidrodinamik olarak gelişmiş fakat ısı olarak gelişen akıştır (Edwards denklemi, bazı kaynaklarda Hausen olarak da geçmektedir), ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen), ($Pr \geq 5$) ise (Hidro ve Isıl gelişen).

$$Nu_{the} = 3.66 + 0.065Gz / (1 + 0.04Gz^{2/3}) \quad (3.16)$$

$$Gz = RePrD_{in}/L \text{ (Graetz Sayısı)} \quad (3.17)$$

3.2.2. Akış Türü

Reynolds sayısına göre, hem akış türünün hem de ısı gelişme durumunun değişkenlik göstermesi, hesap yapmayı zorlaştırmakta ve her bir Re aralığı için farklı bir referans alınmasını gerektirmektedir. Örn. $0 < Re < 1000$ bölgesinde akış hidrodinamik ve ısı olarak tam gelişmiştir. Bu nedenle referans $Nu=3.66$ değerini veren "Tam Gelişmiş" akış referansıdır. $1000 < Re < 2300$ bölgesinde akış hidrodinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişen akıştır. Bu nedenle "Edwards" denklemi ile elde edilen sonuçlar referans alınmalıdır. $2300 < Re$ için ise akış geçiş bölgesine doğru ilerler. Bu bölgede akış, hem laminar hem de türbülans özellikler arasında geçiş göstereceği için "Ghajar 2006" gibi çalışmalarda verilen geçiş bölgesi denklemleri kullanılmalıdır. Bu çalışmada her iki şekilden de görüldüğü gibi, $Re > 2300$ bölgesinde akışın geçiş bölgesinde tam türbülans özellik gösteremediği, hatta laminar yakını bir eğilim sergilediği görülebilir. Çünkü tam türbülanslı bölge için "Dittus-Boelter" denklemi ile ($Re > 10000$) Nu sayısının 30 civarında olması, geçiş-türbülans bölgesi için "Gnielinski" denklemi ile ($Re > 3000$) Nu sayısının 60, "Tam-Ghajar" denklemi ile ($Re > 1600$) Nu sayısının 23 civarında olması beklenir. Laminar bölgede, bu çalışmanın referanslarla uyumlu çıkması, elde edilen sonuçların doğruluğunu gösterirken, geçiş bölgesinde benzer çıkmaması yanlış sonuçlar olduğunu göstermez. Çünkü mikrokanal pürüzlülüğü, çapı, referans denklemlerin kullanım şartları gibi diğer faktörler, sonuçların beklenenden farklı çıkmasına yol açar. Bu durum sürtünme faktöründe de görülmüştür (Şekil 3.17. ve 3.18.). Sonuç olarak bu çalışmada, akışın tüm Re aralığı boyunca laminar karakterli olduğundan hareketle işlemler yapılmıştır.

3.2.3. Hidrodinamik ve Isıl Gelişme Durumu

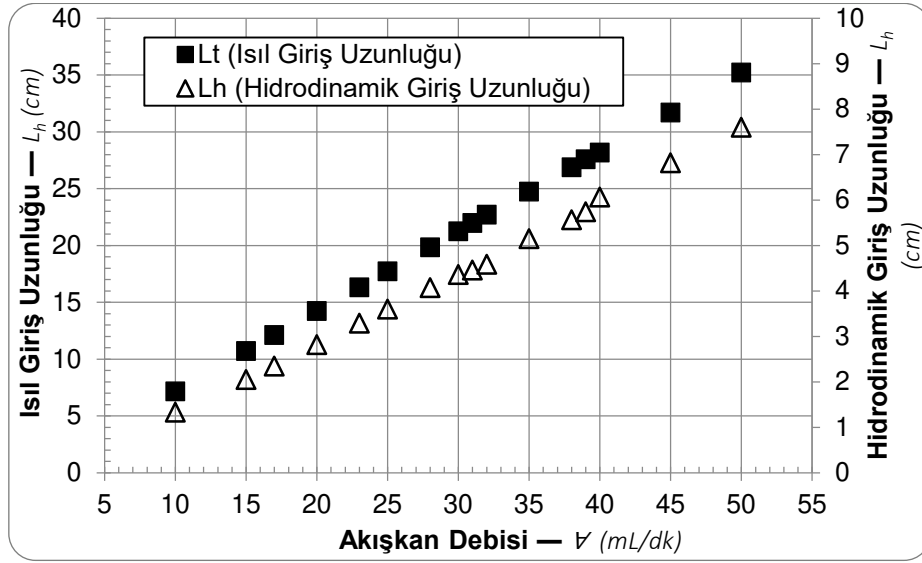
Hangi denklemin referans olarak kullanılacağı, Re , Pr gibi boyutsuz sayıların yanında, hidrodinamik (L_h) ve ısı girişi uzunluğu (L_t), Graetz (Gz) boyutsuz uzunluk sayısı gibi parametreler dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.13). Bu çalışmada akış, tüm Re aralığı boyunca hidrodinamik olarak gelişmiş olduğu için ısı gelişme durumu önem kazanmıştır. Akışın ısı olarak gelişip gelişmediğini gösteren parametre kritik Graetz sayısıdır. Kritik Gz sayısını Çengel, Incropera gibi bazı araştırmacılar 20 alırken, Celata gibi bazı araştırmacılar 10 almıştır. Her iki sınır değeri de çalışmalarımızda kontrol edilmiştir. Kritik Gz sayısının 20 alınması durumunda, hesaplanan ısı girişi uzunluğu, mikrokanal boyu ile karşılaştırılır. Çünkü $Gz_{cr}=20$ için kritik uzunluk, mikrokanal boyu çıkmıştır. Hesaplanan ısı girişi uzunluğu, kanal boyundan küçük ise akış ısı gelişmiştir. Kritik Gz sayısının 10 alınması durumunda ise, hesaplanan ısı girişi uzunluğu mikrokanal boyunun %50'si ile karşılaştırılır. Çünkü $Gz_{cr}=10$ için kritik uzunluk, mikrokanal boyunun %50'si çıkmıştır. Bu durumda hesaplanan ısı girişi uzunluğu, kanal boyunun %50'sinden küçük ise akış ısı gelişmiştir. Buna göre $Gz_{cr}=20$ için, $L_t=18$ cm bulunmuştuğunda $L_t=18\text{cm}<20\text{cm}=L$ olduğu için ısı gelişmiştir. Fakat $Gz_{cr}=10$ için, $L_t=18\text{cm}>10\text{cm}=\%50$ olduğu için ısı gelişendir. Çalışmamızdaki çoğu ısı girişi uzunluğu böyle ara değerlerde bulunur. Örnekte verildiği gibi 20 cm boyunda mikrokanal için ısı gelişme durumunun 20 cm boyuna göre referans alınması, 18 cm elde edilen ısı girişi uzunluğunu 20 cm mikrokanal boyundan küçük çıkması nedeniyle ısı gelişmiş kabul etmeyi gerektirir. Bu durumda 18 cm'ye kadar kararlı hale gelmeyen ve gelişen boyutsuz sıcaklık profilinin, kalan 2 cm içinde kararlı hale gelmesiyle, ısı olarak "gelişmiş" denmesi aslında yanlış bir yoruma neden olur. Çünkü sabit bir debi için yerel Nu sayısının konuma göre değişimi dikkate alındığında, 18 cm uzunluk boyunca kararlı hale gelmeyen sıcaklık profili, toplam boy için ortalama Nu değerlerinin tam gelişmiş 3.66 değerinden daha büyük çıkmasına neden olur. Bu amaçla akışın ısı gelişmişliği için en doğru sonuç, 18 cm değere kadar ısı gelişen kalan 2 cm için ısı gelişmiş alınmasıdır. Fakat bu da, yerel Nu sayısını belirleyebilmek için kanal boyunca akışın sıcaklık dağılımını bilmeyi gerektirdiği için uygulamada zorluk çıkarmaktadır. Bu nedenle bu amaca daha yakın sonuç almak için kritik Gz sayısının 10 alınması uygun görülmüştür. Bu değer, ısı girişi uzunluğunu mikrokanal boyunun %50'si ile karşılaştırır. Örneğin ısı girişi uzunluğu 12 cm çıkarsa, $L_t=12\text{cm}>10\text{cm}=\%50L$ olduğu için akış ısı gelişen özelliktedir. Bu durum için Gz_{cr} 20 alınsaydı $L_t=12\text{cm}<20\text{cm}=L$ olacağı için ısı gelişmiş denecekti. Böylece, $Gz_{cr}=10$ alınarak akışın ısı gelişme durumu için kritik boy, mikrokanal boyunun %50'si olarak alınmıştır.

$Gz_{cr}=20$ alınması, ısı girişi uzunluğunun mikrokanal boyuna göre çok küçük ya da çok büyük olması durumu için doğrudur. Bu değeri alan çalışmalar, bu tip uç noktalarda çalıştıkları için doğru sonuç elde ederler. Re , Pr , Gz ve giriş uzunluklarını gösteren birkaç sonuç Çizelge 3.5.'de verilmiştir. Şekil 3.13.'te ise, Çizelge 3.5. te hesaplaması gösterilen hidrodinamik ve ısı girişi uzunlukları tüm debiler için gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Isıl ve hidrodinamik gelişme durumu için boyutsuz sayılar ($D_h=400 \mu m$).

ISIL GELİŞME DURUMU	
Peclet Sayısı	$Pe=RePr$
Graetz Sayısı	$Gz=RePrD_h/L$
Nusselt Sayısı (Sieder Tate) ($0.6 < Pr < 5$) ($0.0044 < \mu_b/\mu_s < 9.75$) ($Re < 2300$) (Hidro ve Isıl gelişen)	$Nu_{the} = 1.86 Gz^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$
Nusselt Sayısı (Edwards) ($Re < 2300$) (Hidro gelişmiş, Isıl gelişen) ($Pr \geq 5$)	$Nu_{the} = 3.66 + 0.065 Gz / (1 + 0.04 Gz^{2/3})$
Nusselt Sayısı (Sieder Tate, Türbülanslı) ($0.7 \leq Pr \leq 16700$) ($Re \geq 10000$)	$Nu_{the} = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$
Nusselt Sayısı Nu_{lam} (Ghajar için)	$Nu_{lam} = 1.24 (Gz + 0.025 (GrPr)^{0.75})^{1/3} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$
Nusselt Sayısı Nu_{turb} (Ghajar için)	$Nu_{turb} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.385} (L/D)^{-0.0054} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$

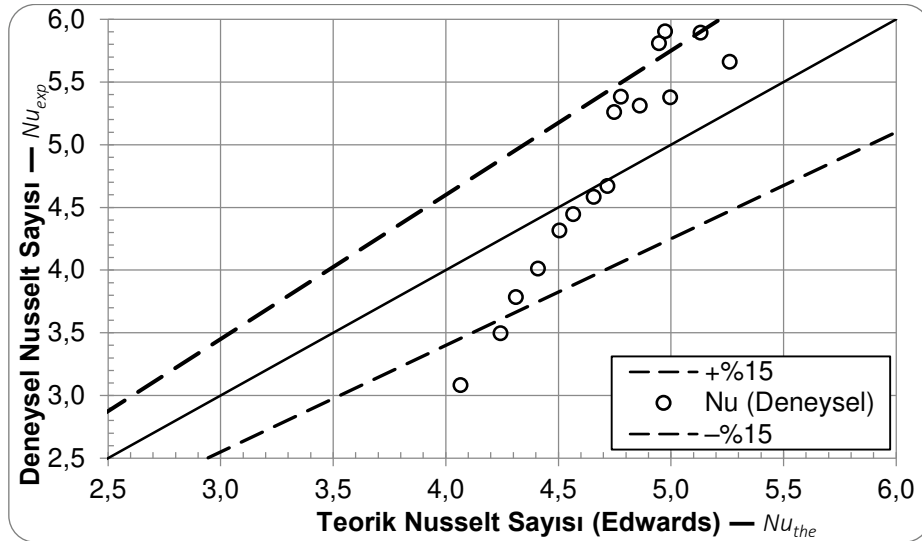
AKIŞ TÜRÜ VE HİDRODİNAMİK GELİŞME DURUMU	
Sürtünme Faktörü (Haaland) ($Re > 4000$ ve pürüzlü boru)	$f_{the} = (1 / (-1.8 \log(6.9/Re + (\epsilon/D_h/3.7)^{1.11})))^2$
Sürtünme Faktörü (Blasius) ($Re > 4000$ ve pürüzsüz boru)	$f_{the} = 0.3164 Re^{-0.25}$
Sürtünme Faktörü (Tam&Ghajar) ($3400 \leq Re \leq 6900$) ($12 \leq Pr \leq 29$) ($6800 \leq Gr \leq 104500$) ($1.11 \leq \mu_b/\mu_s \leq 1.80$)	$f_{the} = 4(1 + (Re/4230)^{-0.16})^{-6.57} (\mu_b/\mu_s)^{0.14}$
Poiseuille Sayısı	$Po_{the} = f_{the} \cdot Re$
Reynolds Sayısı	$Re = VD_h/\nu$
Darcy Denklemi	$f = 64/Re$



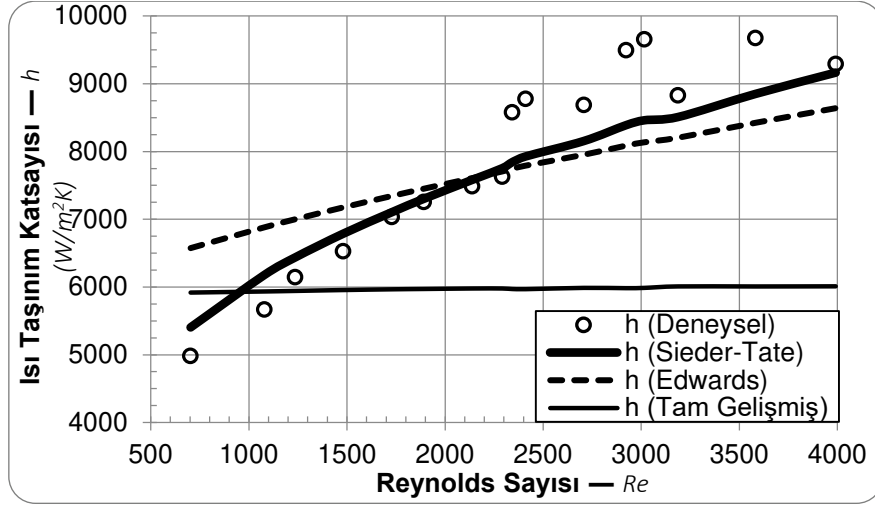
Şekil 3.13 Hidrokinamik ve ısı giriş uzunluğunun debiye göre değişimi (L_h — L_t).

Özetlemek gerekirse, çalışmamızda akışın ısı gelişme durumunu incelemek için $Gz_{cr}=10$ alınmıştır. Hidrokinamik olarak gelişmiş, ısı olarak gelişen akış için referans denklem "Edwards" denklemi seçilmiştir. Akış türü laminar ve geçiş bölgesi için laminare yakın kabul edilmiştir.

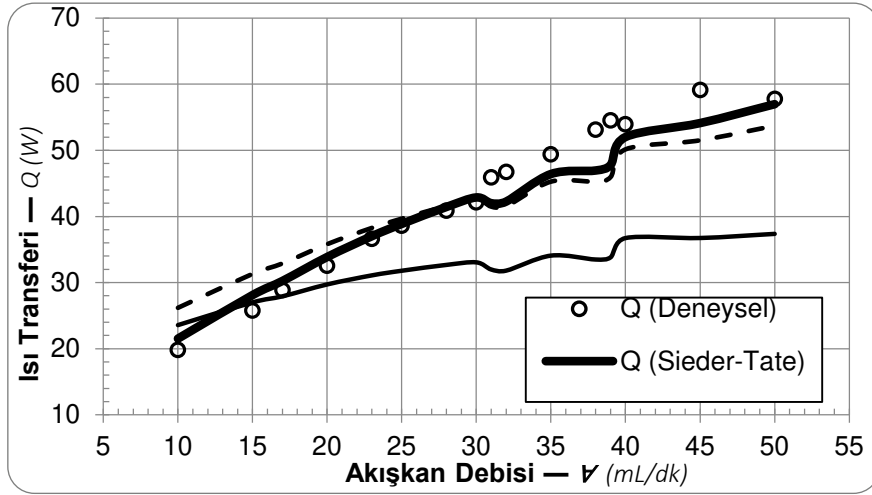
Şekil 3.15'te görülen mikrokanal içindeki ısı taşınım katsayısı, Nu sayısı ($Nu = hD/k$)  zerinden elde edilmiştir i için Nu grafikleri ile benzer eğilim göstermiştir. Nu için verilen açıklamalar bu grafik için de geçerlidir.



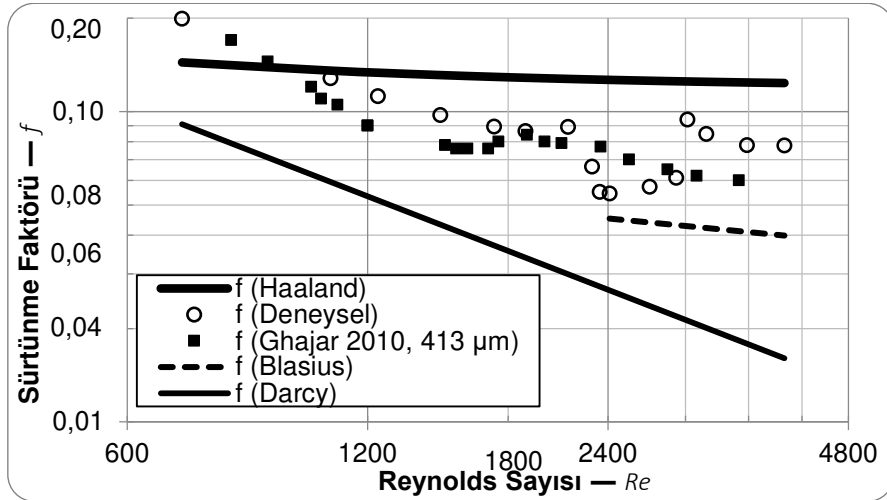
Şekil 3.14 Deneyisel Nusselt ve teorik Nusselt grafiği (Nu_{exp} — Nu_{the}).



Şekil 3.15 Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi ($h—Re$).

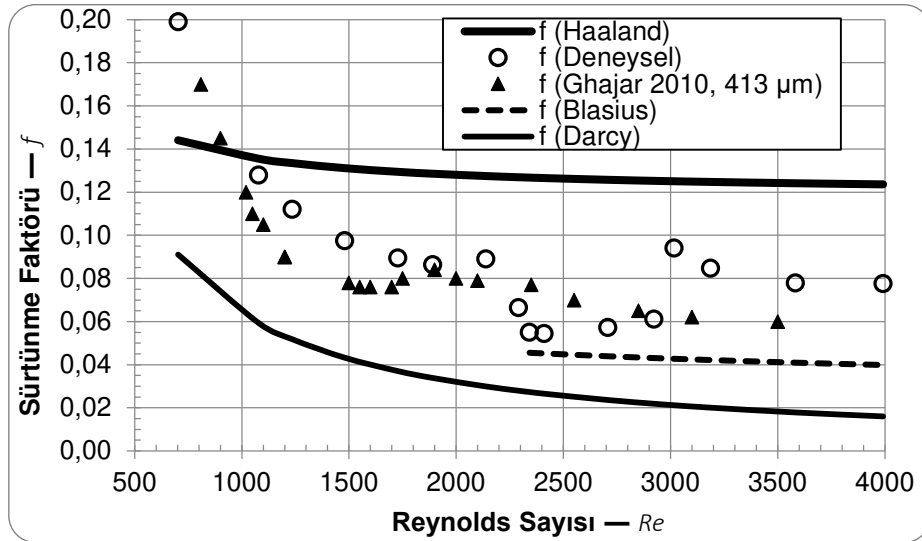


Şekil 3.16 Isı transferinin akışkan debisine göre değişimi ($Q—v$).



Şekil 3.17 Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre logaritmik ölçekli değişimi [$\log(f)—\log(Re)$].

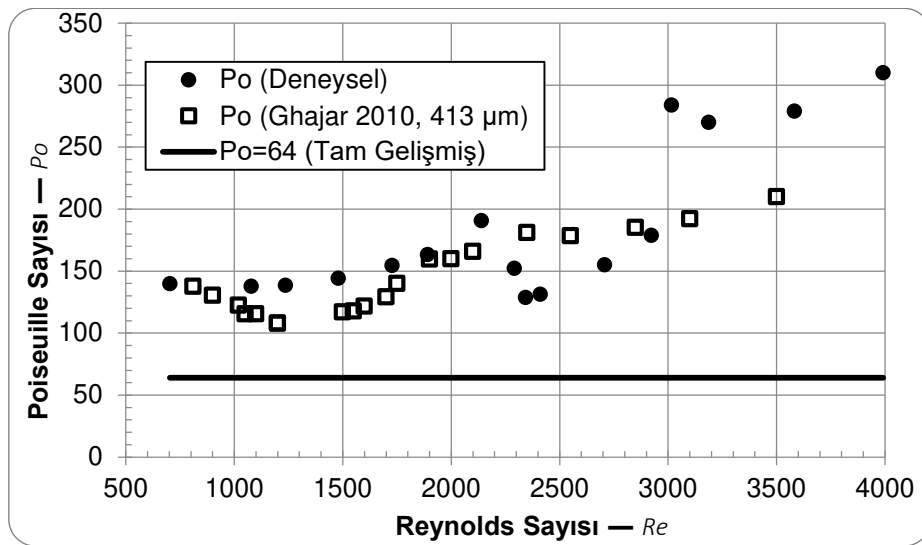
Şekil 3.17 ve 3.18 'de mikrokana1 boyunca sürtünme faktörü değeri1eri verilmiştir. Her iki grafik de aynı olup biri logaritmik ölçekte verilmiştir. Logaritmik grafik1e, sonuçların Moody diyagramı ve Darcy sürtünme faktörü ile daha kolay karşılaştırılması ve genel eğilimin gösterilmesi amaçlanmıştır. Ara değeri1er için normal ölçekte ikinci bir grafik eklenmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi, sonuçların laminer akış boyunca ($Re < 2300$) Darcy sürtünme faktöründen büyük fakat onunla benzer eğilime sahip olduğı görülmüştür. $2200 < Re < 3100$ bölgesinde geçiş etkileri nedeniyle sürtünme faktöründe önemli düşüşler görülmüştür. $Re > 3100$ bölgesinde sonuçların, pürüzsüz borularda tam gelişmiş türbülanslı akış için verilen Blasius sonuçlarından büyük, fakat tam gelişmiş türbülanslı akışta pürüzlü borular için verilen Haaland sonuçlarından küçük olduğı görülmüştür. Kullanılan mikrokana1 pürüzsüz olmadığı için sonuçların Blasius sonuçlarından büyük çıkması, fakat tam türbülanslı akış olmadığı için de Haaland sonuçlarından küçük çıkması normal karşılanmıştır. Fakat, elde edilen sonuçların ne ölçüde doğru olduğunu değeri1endirebilmek için benzer şartlarda bir referans daha gerekli olmuştur. Bu referans ise mikrokana1 çapı, pürüzlülük ve akış türünün etkilerini inceleyen Afshin J. Ghajar olmuştur. Ghajar'ın (2010) 413 μm iç çaplı mikrokana1 için elde ettiğı sonuçlar yaklaşık olarak Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Çalışmamızda elde edilen sürtünme faktörü sonuçlarının Ghajar ile uyumlu olduğı görülmüştür. Ghajar'ın sonuçlarına göre görülen sapmaların sebebi, mikrokana1 çapı, pürüzlülüğü, yerel kayıpların oluşturduğu belirsizlikler, çalışılan sıcaklık ve basınç sensörünün geçiş bölgesini algılama hassasiyeti olarak tahmin edilmiştir.



Şekil 3.18 Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değeri1imi ($f-Re$).

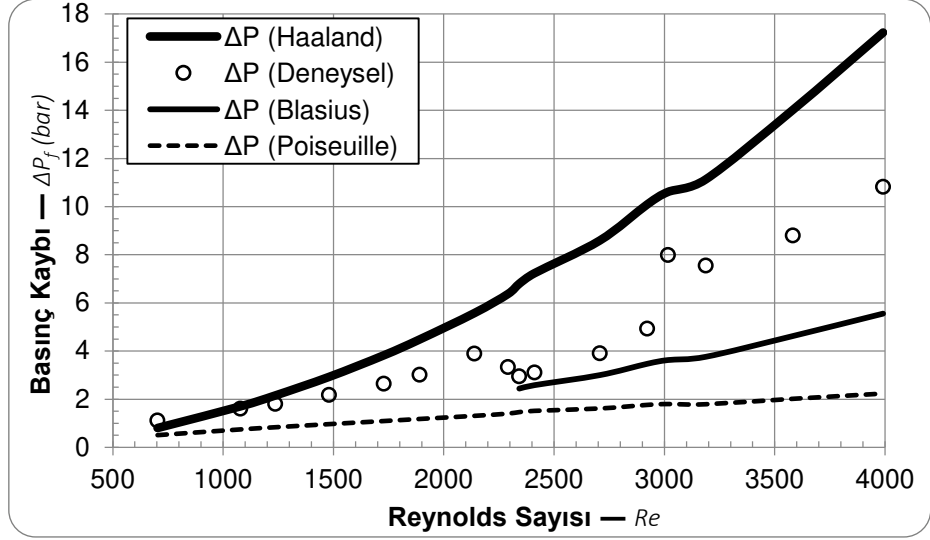
Bu grafiklerden şu sonuçlar çıkarılmıştır:

Mikro çaplara inildiğinde laminer akış için sürtünme faktörü sonuçları, klasik Darcy sürtünme faktöründen büyük çıkmaktadır. $Re < 2200$ bölgesi için sürtünme faktörü sonuçlarının Haaland denkleminde yaklaşması, mikrokanal pürüzlülük değerlerinin laminer bölgede bile etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca burada verilmemekle birlikte, çalışma aralığından daha büyük kapasiteli basınç sensörleri ile çalışıldığında, sensör doğruluğu nedeniyle geçiş bölgesinin daha erken başlaması ve sürtünme faktörü sonuçlarında artışlar görülmüştür. Bu sonuçlar "Ghajar 2010" çalışmasında verilenlerle örtüşmektedir.



Şekil 3.19 Poiseuille sayısının Reynolds sayısına göre değişimi ($Po-Re$).

Yukarıdaki grafikte ise $Po=f.Re$ ifadesi ile elde edilen Poiseuille sayısı verilmiştir. $Re < 2200$ laminer bölgesi için $Po=64$ değerinden sapmalar gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Sürtünme basınç kaybının Reynolds sayısına göre değişimi (ΔP_f — Re).

Yukarıdaki grafikte sürtünme faktörleri ile elde edilen sürtünme basınç kayıpları verilmiştir. Ghajar'ın çalışması, farklı çap ve debi nedeniyle farklı akışkan hızında elde edilmiştir için, hızın karesini içeren boyutlu basınç kaybı sonuçlarını önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu nedenle karşılaştırmada verilmemiştir.

Çizelge 3.6 Mikrokanal Deney Tesisatı İçin Doğrulama Deneyleri ($D_h=400 \mu m$).

ÖLÇÜLEN	Hacimsel Debi (mL/dk)	10	15	17	20	23	25	28	30	31	32	35	38	39	40	45	50
	Giriş Sıcaklığı T_{in} ($^{\circ}C$)	44.8	44.0	44.4	44.8	45.3	45.3	45.2	44.8	44.8	44.5	45.5	45.1	45.4	46.6	46.3	45.3
	Çıkış Sıcaklığı T_{out} ($^{\circ}C$)	16.2	19.2	19.9	21.3	22.3	23.0	24.1	24.5	23.4	23.4	25.1	24.9	25.2	27.1	27.3	28.6
	Yüzey Giriş S. $T_{s,in}$ ($^{\circ}C$)	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.2	10.4	10.2	10.1	10.1	10.2	10.3	10.4	10.2	10.2	10.2
	Yüzey Çıkış S. $T_{s,out}$ ($^{\circ}C$)	9.9	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.1	10.0	10.0	10.0	10.0	10.1	10.2	10.0	10.0	10.0
	Basınç Kaybı ΔP_{Total} (bar)	1.150	1.680	1.900	2.300	2.800	3.200	4.130	3.600	3.100	3.270	4.100	5.150	8.220	7.800	9.100	11.200
HESAPLANAN	Reynolds Sayısı (Re)	703	1078	1236	1480	1728	1891	2138	2291	2342	2411	2707	2922	3016	3187	3582	3991
	Peclet Sayısı (Pe)	3765	5630	6370	7475	8578	9315	10419	11163	11553	11930	13000	14126	14486	14795	16647	18489
	Poiseuille T. Geliş. (Po_{the})	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
	Poiseuille DeneySEL (Po_{exp})	140	138	139	144	155	163	191	152	129	131	155	179	284	270	279	310
	Nusselt Sayısı Nu	Sieder—Tate	3.342	3.809	3.964	4.171	4.357	4.475	4.642	4.747	4.808	4.862	4.985	5.131	5.172	5.183	5.391
		Edwards	4.066	4.244	4.311	4.409	4.505	4.567	4.658	4.718	4.749	4.778	4.861	4.947	4.974	4.997	5.132
		Tam Gelişmiş	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66
		DeneySEL	3.081	3.496	3.785	4.011	4.314	4.446	4.583	4.670	5.260	5.382	5.310	5.810	5.904	5.379	5.894
	Sürtünme Faktörü f_{he}	Darcy	0.091	0.059	0.052	0.043	0.037	0.034	0.030	0.028	0.027	0.027	0.024	0.022	0.021	0.020	0.018
		Haaland	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12
		Blasius	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
		DeneySEL	0.199	0.128	0.112	0.098	0.089	0.086	0.089	0.066	0.055	0.054	0.057	0.061	0.094	0.085	0.078

Çizelge 3.6 Mikrokanal Deney Tesisatı İçin Doğrulama Deneyleri ($D_h=400 \mu m$) (devam ediyor).

ÖLÇÜLEN	Hacimsel Debi (mL/dk)		10	15	17	20	23	25	28	30	31	32	35	38	39	40	45	50
	Giriş Sıcaklığı T_{in} ($^{\circ}C$)		44.8	44.0	44.4	44.8	45.3	45.3	45.2	44.8	44.8	44.5	45.5	45.1	45.4	46.6	46.3	45.3
	Çıkış Sıcaklığı T_{out} ($^{\circ}C$)		16.2	19.2	19.9	21.3	22.3	23.0	24.1	24.5	23.4	23.4	25.1	24.9	25.2	27.1	27.3	28.6
	Yüzey Giriş S. $T_{s,in}$ ($^{\circ}C$)		10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.2	10.4	10.2	10.1	10.1	10.2	10.3	10.4	10.2	10.2	10.2
	Yüzey Çıkış S. $T_{s,out}$ ($^{\circ}C$)		9.9	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.1	10.0	10.0	10.0	10.0	10.1	10.2	10.0	10.0	10.0
	Basınç Kaybı ΔP_{Total} (bar)		1.15	1.68	1.90	2.30	2.80	3.20	4.13	3.60	3.10	3.27	4.10	5.15	8.22	7.80	9.10	11.20
HESAPLANAN	Basınç Kaybı $\Delta P_{f,the}$ (bar)	Poiseuille	0.51	0.75	0.84	0.97	1.09	1.18	1.31	1.40	1.47	1.52	1.62	1.76	1.80	1.79	2.02	2.24
		Haaland	0.81	1.70	2.15	2.93	3.82	4.48	5.58	6.37	6.80	7.23	8.59	10.09	10.61	11.13	14.02	17.23
		Blasius	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	Turb. değil	2.44	2.58	3.00	3.47	3.62	3.76	4.62	5.55
		Deneysel	1.11	1.61	1.81	2.18	2.64	3.01	3.90	3.34	2.95	3.11	3.91	4.93	7.99	7.56	8.80	10.83
	Taşınım Kats. h_{the} ($W/m^2 K$)	Sieder—Tate	5404	6177	6436	6786	7103	7301	7582	7753	7843	7928	8155	8388	8461	8509	8850	9165
		Edwards	6574	6881	7000	7175	7343	7450	7608	7706	7746	7792	7953	8087	8137	8204	8424	8640
		Tam Gelişmiş	5918	5934	5942	5955	5966	5971	5978	5978	5970	5968	5987	5983	5987	6009	6008	6010
		Deneysel	4982	5668	6146	6527	7033	7254	7486	7627	8580	8777	8686	9497	9658	8830	9675	9294
	Isı Transferi Q_{the} (W)	Sieder—Tate	21.5	28.1	30.2	33.9	37.0	38.9	41.4	42.9	42.0	42.3	46.4	47.0	47.8	52.0	54.1	57.0
		Edwards	26.2	31.3	32.9	35.8	38.3	39.7	41.6	42.6	41.5	41.5	45.3	45.3	46.0	50.1	51.5	53.7
		Tam Gelişmiş	23.6	27.0	27.9	29.7	31.1	31.8	32.7	33.1	32.0	31.8	34.1	33.5	33.8	36.7	36.7	37.4
		Deneysel	19.8	25.8	28.9	32.6	36.6	38.6	40.9	42.2	46.0	46.8	49.4	53.2	54.5	54.0	59.2	57.8
	Hidr. Giriş Uzunluğu L_h (cm)		1.3	2.1	2.4	2.8	3.3	3.6	4.1	4.4	4.5	4.6	5.2	5.6	5.7	6.1	6.8	7.6
	Isıl Giriş Uzunluğu L_t (cm)		7.2	10.7	12.1	14.2	16.3	17.7	19.8	21.3	22.0	22.7	24.8	26.9	27.6	28.2	31.7	35.2

3.3. NANOAKIŞKAN HAZIRLANMASI, TEM SEM GÖRÜNTÜLERİ

3.3.1. Malzeme ve Yöntem

3.3.1.1. Nanopartikül özellikleri

Nanoakışkan hazırlamak için Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanopartiküller kullanılmıştır. Bu partiküllerin ortalama boyutları sırasıyla 20 nm, 10-25 nm ve 18 nm'dir. Nanopartiküller "Nanografi – Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti." firmasından alınmıştır. Nanopartiküllerin tüm özellikleri Çizelge 3.7.'de, üretici TEM görüntüleri Şekil 3.21'de verilmiştir. Nanopartiküllerin kümelenip çökmesini önlemek ve nanoakışkan kararlılığını sağlamak için yüzey aktif madde olarak Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) kullanılmıştır. SDS, "Merck İlaç Ecza ve Kimya Tic. A.Ş." firmasından alınmıştır. Bu maddenin yoğunluğu 1.1 g/cm^3 olup, pH değeri 6-9 arasındadır.

Çizelge 3.7 Nanopartikül özellikleri.

Nano partikül	Tür	Yoğunluk (kg/m^3)	Suda Çözünme	Saflık	Boyut	Yüzey Alanı	Şekil
Al_2O_3	Gamma	3890	Hidrofilik	>%99	20 nm	$138 \text{ m}^2/\text{g}$	Küresel
TiO_2	Anatase	3900	—	>%99	10-25 nm	$200\text{-}240 \text{ m}^2/\text{g}$	Küresel
ZnO	—	5606	—	>%99	18 nm	$40\text{-}70 \text{ m}^2/\text{g}$	Küresel

* Değerler, üreticiden alınmıştır.

3.3.1.2. Nanoakışkan hazırlama yöntemi

Bu çalışmada tüm nanoakışkanlar 2-adım yöntemi ile hazırlanmıştır. Nanopartikülleri, saf su içinde dağıtmak için prob tipi ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır (Marka/Model: Optic Ivymen System / CY-500, Güç: 500W, Frekans: 20kHz, Prob Çapı/Uzunluğu: Ø5.6/60mm).

İlk olarak Çizelge 3.8.'den, istenen nanoakışkan hacimsel derişimi, nanoakışkan hacmi ve SDS kütleli derişimine göre nanopartikül, saf su ve SDS kütleli miktarları hesaplandı. Bu miktarlar hassas terazi ile tartılmıştır (AND GX-600, Max Kütle: 610g, Sapma: 0.001g). Sonra, nanoakışkan kararlılığında etkili olduğu düşünülen birçok parametre dikkate alınarak cam beherlerde nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Cam beherin dip kısmından pipet ile çekilen nanoakışkan kapaklı 16x160 mm boyutlarında cam tüplere dolduruldu. Nanoakışkanların

kararlılıkları, zamana göre çökelme şekilleri ile incelenmiştir. Bu şekiller ile en uygun parametreler belirlendi. Bu parametrelere göre en kararlı nanoakışkanlar hazırlanmıştır.

Nanoakışkanların hazırlanması için Çizelge 3.8'de kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{nf}} = \frac{\rho_{nf} - \rho_{bf}}{\rho_{np} - \rho_{bf}} \quad (3.15)$$

$$V_{nf} = V_{np} + V_{bf} \quad (3.16)$$

$$m_{nf} = m_{np} + m_{bf} \quad (3.17)$$

$$\rho = m/V \quad (3.18)$$

$$\phi_{SDS,np} = \frac{m_{SDS}}{m_{np}} \quad (3.19)$$

Burada,

V_{np} : Nanopartikül hacmi (mL),

V_{nf} : Nanoakışkan hacmi (mL),

ϕ : Hacimsel derişim (%),

$\phi_{SDS,np}$: SDS / Nanopartikül kütleli derişimi (%),

ρ_{nf} : Nanoakışkan yoğunluğu (kg/m^3),

ρ_{bf} : Baz akışkan yoğunluğu (kg/m^3),

ρ_{np} : Nanopartikül yoğunluğu (kg/m^3),

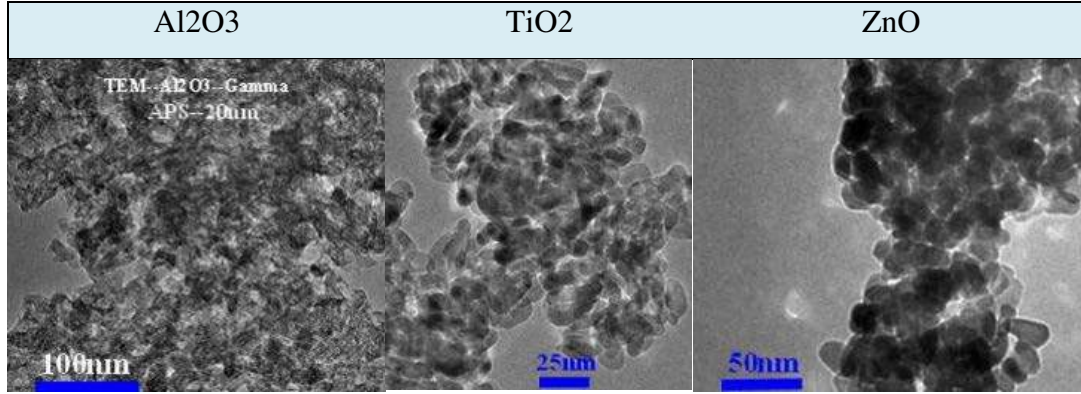
m_{nf} : Nanoakışkan kütlesi (kg),

m_{bf} : Baz Akışkan kütlesi (kg),

m_{np} : Nanopartikül kütlesi (kg),

Nanoakışkanların ultrasonik homojenizatörde karıştırılması sırasında, herhangi bir önlem alınmadığında, numunede aşırı sıcaklık artışı görülmüştür. Öyle ki, bu sıcaklık artışı 10 dakikada 60 derecelere kadar çıkmıştır. Karıştırma sırasında artan sıcaklık, hem nanoakışkanın kimyasal ve ısı özelliklerini etkiler, hem de ultrasonik homojenizatörün verimsiz çalışmasına neden olur (Turgut 2008). Yapılan deneylerde, kontrolsüz sıcaklık artışının, homojenizatörün ultrasonik titreşimlerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Bu durum, ultrasonik sesteki değişim ile ve numunedeki çalkalanmada azalma ile fark edilmiştir. Bu nedenle nanoakışkan sıcaklığını sabit tutabilmek için bir ısı banyosu kullanıldı

(Marka/Model: Cole Parmer / EW-12108-25, Sıcaklık: -20~200°C, Sıcaklık Kararlılığı: $\pm 0.01^\circ\text{C}$, Banyo Kapasitesi: 6L, Isıtma Gücü: 1kW, Soğutma Gücü: 200W, Debi: 11~24L/dk). Nanoakışkan içeren cam beher, sabit sıcaklıkta tutulan ısı banyosu içine yerleştirilmiştir. 100 mL numune içeren tüm nanoakışkan karışımları, ısı banyosu içinde Şekil 3.22'deki gibi elde edilmiştir. Ayrıca, ultrasonik homojenizatörün probunda da yüksek sıcaklıklar görülmüştür. Bunun için prob, fan ile soğutulmuştur.



Şekil 3.21 Nanopartikül TEM görüntüleri.

Çizelge 3.8 Hacimsel derişim oranlarına göre nanoakışkanlar.

Nanoakışkan	Nanoakışkan Hacimsel Derişimi	Nanoakışkan Hacmi	Baz Akışkan Yoğunluğu	Partikül Yoğunluğu	Partikül Hacmi	Baz Akışkan Hacmi	Partikül Kütlesi	Baz Akışkan Kütlesi	SDS-Partikül Kütlesel Derişimi	SDS Kütlesi
	ϕ (%)	V_{nf} (mL)	ρ_{bf} (kg/m ³)	ρ_{np} (kg/m ³)	V_{np} (mL)	V_{bf} (mL)	m_{np} (g)	m_{bf} (g)	$\phi_{w,SDS}$ (%)	m_{SDS} (g)
Al ₂ O ₃	0,10%	100	998,0	3890	0,10	99,90	0,389	99,700	50,00	0,195
	0,30%	100	998,0	3890	0,30	99,70	1,167	99,501	25,00	0,292
	0,50%	100	998,0	3890	0,50	99,50	1,945	99,301	15,00	0,292
	0,70%	100	998,0	3890	0,70	99,30	2,723	99,101	15,00	0,408
	1,00%	100	998,0	3890	1,00	99,00	3,890	98,802	15,00	0,584
TiO ₂	0,10%	100	998,0	3900	0,10	99,90	0,390	99,700	50,00	0,195
	0,30%	100	998,0	3900	0,30	99,70	1,170	99,501	25,00	0,293
	0,50%	100	998,0	3900	0,50	99,50	1,950	99,301	15,00	0,293
	0,70%	100	998,0	3900	0,70	99,30	2,730	99,101	15,00	0,410
	1,00%	100	998,0	3900	1,00	99,00	3,900	98,802	15,00	0,585
ZnO	0,10%	100	998,0	5606	0,10	99,90	0,561	99,700	50,00	0,280
	0,30%	100	998,0	5606	0,30	99,70	1,682	99,501	50,00	0,841
	0,50%	100	998,0	5606	0,50	99,50	2,803	99,301	25,00	0,701
	0,70%	100	998,0	5606	0,70	99,30	3,924	99,101	15,00	0,589
	1,00%	100	998,0	5606	1,00	99,00	5,606	98,802	15,00	0,841



Şekil 3.22 Sıcaklık kontrollü nanoakışkan hazırlama.

3.3.1.3. Nanoakışkan kararlılık parametreleri

Nanoakışkanların kararlılığını etkileyen parametreler aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- a) Yüzey aktif madde eklenmesi,
- b) Ultrasonik güç yoğunluğu,
- c) Ultrasonik karıştırma zamanı,
- d) Banyo sıcaklığı,
- e) Ultrasonik prob yüksekliği,
- f) Cam beher çapı,
- g) Nanopartikül çeşidi.

a) Yüzey aktif madde eklenmesi

Çalışmada, yüzey aktif madde kullanmanın gerekip gerekmediği, gerekli ise derişim değerinin ne olması gerektiği incelenmiştir. Bu amaçla, yüzey aktif madde içeren ve içermeyen nanoakışkanlar hazırlanmıştır (Şekil 3.23). Yüzey aktif madde kullanmadan hazırlanan nanoakışkanların 20 dakika içinde kümelenip çöktüğü görülmüştür (Şekil 3.23-a,b,c). Bu sonuç görüldükten sonra nanoakışkan kararlılığını sağlamak için, literatürde yaygın bir şekilde kullanılan yüzey aktif madde olarak SDS seçilmiştir (Ghadimi 2011). SDS kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlarda, kümelenmenin önlenildiği ve kararlılık sağlandığı görülmüştür (Şekil 3.23-d,e,f). Sonuç olarak tüm nanoakışkanlar için SDS kullanmaya karar verilmiştir. SDS derişimini belirlemek için, kütsel olarak SDS/Nanopartikül şeklinde %1 ile %100 arasında SDS içeren nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Şekil 3.24'te %0.5 hacimsel derişimli nanoakışkan için, %15 ve üzeri kütsel derişimlerdeki SDS kararlılık sağlarken;

aynı SDS derişimi, %0.2 hacimsel derişimdeki nanoakışkan için yetersiz kalmıştır. Buradan farklı hacimsel derişimde nanoakışkanlar için, farklı kütleel derişimde SDS gerektiğı sonucu çıkarılmıştır. Genel eğilim olarak, nanoakışkan hacimsel derişimi azaldıkça kullanılması gereken SDS kütleel derişiminin arttığı görülmüştür (Şekil 3.24'd,e,f). Böylece, birkaç deney ile tüm nanoakışkanlar için SDS kütleel derişimi alt sınırı, %15'ten %50'ye değışen şekilde belirlenmiştir (Çizelge 3.8). Literatürde, kütleel oranını genellikle "Yüzey Aktif Madde kütleli / Partikül kütleli " şeklinde verildiğı (Maqsood 2015), ayrıca kütleel oranı SDS kütleli / Nanoakışkan kütleli şeklinde verenlerin de olduğı görülmüştür (Xia 2014). Bu nedenle derişim değıerlerinin hangi referansa göre verildiğine dikkat edilmelidir. SDS kullanımında bir alt sınır belirlenmeye çalışılmıştır. Çünkü SDS miktarı, nanoakışkan kararlılığını sağlayacak kadar çok; nanoakışkanda meydana gelen geçici katılaşmayı azaltacak, maliyeti yükseltmeyecek ve ısıl özellikleri olumsuz yönde etkilemeyecek kadar az kullanılmalıdır.

%0.5 Al ₂ O ₃ SDS (yok) 10 dk	%0.2 TiO ₂ SDS (yok) 20 dk	%0.5 ZnO SDS (yok) 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ SDS (var) 1 gün	%0.2 TiO ₂ SDS (var) 1 gün	%0.5 ZnO SDS (var) 1 gün
					
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)

Şekil 3.23 Yüzey aktif madde eklenip eklenmemesi durumunun belirlenmesi.

%0.5 TiO ₂ %1 SDS 10 dk	%0.5 TiO ₂ %5 SDS 10 dk	%0.5 TiO ₂ %10 SDS 10 dk	%0.5 TiO ₂ %15 SDS 10 dk	%0.2 TiO ₂ %15 SDS 10 dk	%0.2 TiO ₂ %25 SDS 10 dk	%0.2 TiO ₂ %50 SDS 10 dk	%0.2 TiO ₂ %75 SDS 10 dk	%0.2 TiO ₂ %100 SDS 10 dk
								
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)

Şekil 3.24 SDS kütlelesel derişiminin belirlenmesi.

b) Ultrasonik güç yoğunluğu

Nanoakışkanın birim hacmi başına uygulanan ultrasonik titreşim gücü (W/mL) incelenmiştir. Bu amaçla ultrasonik güç yoğunluğu 3, 4, 5 W/mL olacak şekilde üç çeşit nanoakışkan hazırlanmıştır (Şekil 3.25). Ultrasonik güç yoğunluğu arttıkça, kararlılık süresinin arttığı görülmüştür (Şekil 3.25-d,e,f). Sonuç olarak, ultrasonik gücün tüm nanoakışkanlara tam güçte uygulanması (500 W) ve bu gücün sabit parametre olarak kalması uygun görülmüştür.

%0.5 Al ₂ O ₃ 3 W/mL 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 4 W/mL 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 5 W/mL 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 3 W/mL 3 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 4 W/mL 3 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 5 W/mL 3 gün
					
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)

Şekil 3.25 Ultrasonik güç yoğunluğunun belirlenmesi.

c) Ultrasonik karıştırma zamanı

Nanoakışkanın ne kadar süre ultrasonik titreşime maruz kalması gerektiği incelenmiştir. Bunun için karıştırma süresi 5 dakikadan 240 dakikaya kadar değişen nanoakışkanlar hazırlanmıştır (Şekil 3.26). 30 dakikadan fazla karıştırma süresinin, nanoakışkan kararlılık süresi üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir (Şekil 3.26-e,f,g). Bu nedenle, tüm nanoakışkanların 30 dk süreyle ultrasonik titreşimde karıştırılmasına karar verilmiştir. Bu süre, literatürdeki birçok çalışma ile aynıdır (Karimzadehkhoei 2015).

%0.5 Al ₂ O ₃ 5 dk 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 10 dk 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 15 dk 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 30 dk 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 45 dk 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 60 dk 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 240dk 7 gün
						
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)

Şekil 3.26 Ultrasonik karıştırma zamanının belirlenmesi.

d) Banyo sıcaklığı

Nanoakışkanın ultrasonik homojenizatör ile karıştırılması sırasında hangi sıcaklıkta bulunması gerektiği incelenmiştir. Bu amaçla karıştırma sırasında, sıcaklıkları 20, 30, 40 ve 50 °C'de sabit tutulan nanoakışkanlar hazırlanmıştır (Şekil 3.27). Sıcaklığın kararlılık üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir (Şekil 3.27-e,f,g,h). Sonuç olarak, karıştırma sırasında aşırı sıcaklık artışını önlemek için, ısı banyosunun herhangi bir sıcaklıkta sabit tutulması gerektiği görülmüştür. Fakat yüksek sıcaklıkta, ultrasonik homojenizatör veriminin azalması ve buharlaşan saf su sonucu hacimsel derişimin değişmesi (yükselmesi) nedeniyle, ısı banyosunun 20-25°C ortam sıcaklığında sabit tutulmasına karar verilmiştir.

%0.5 Al ₂ O ₃ 20°C 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 30°C 20 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 40°C 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 50°C 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 20°C 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 30°C 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 40°C 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 50°C 7 gün
							
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)

Şekil 3.27 Banyo sıcaklığının belirlenmesi.

e) Ultrasonik prob yüksekliği

Ultrasonik homojenizatör, nanoakışkana verdiği ultrasonik gücü, ağırlıklı olarak probun uç kısmından verir. Probun uç alanının oluşturduğu, ultrasonik titreşime maruz kalan konik alan büyüklüğünün değişmesi nedeniyle, probun cam beher tabanından ne kadar yüksekte olması gerektiği incelenmiştir. Bu amaçla prob, 1, 2, 3, 4 ve 5 cm yükseklikte tutularak nanoakışkanlar hazırlanmıştır (Şekil 3.28). Prob yüksekliğinin kararlılık üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. Sonuç olarak prob, cam beher tabanından itibaren herhangi bir yükseklikte tutulabilir. Fakat az da olsa, prob yan yüzey alanlarından yayılan ultrasonik titreşimi de kullanabilmek ve çalışma sırasındaki ses şiddetini azaltabilmek için, probun cam beher tabanından 1-2 cm yükseklikte tutulmasına karar verilmiştir.

%0.5 Al ₂ O ₃ 1 cm 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 2 cm 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 3 cm 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 4 cm 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 5 cm 7 gün
				
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

Şekil 3.28 Ultrasonik prob yüksekliğinin belirlenmesi.

f) Cam beher çapı

Ultrasonik prob yüksekliğinde anlatılan nedenlerle cam beher çapının ne kadar olması gerektiği incelenmiştir. Bu amaçla 5, 7 ve 9 cm çaplarında cam beherler kullanılarak nanoakışkanlar hazırlanmıştır (Şekil 3.29). Prob yüksekliğine benzer şekilde, cam beher çapının kararlılık üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir (Şekil 3.29-d,e,f). Sonuç olarak, herhangi bir çapta cam beher kullanılabilir.

%0.5 Al ₂ O ₃ 5 cm 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 7 cm 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 9 cm 20 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 5 cm 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 7 cm 7 gün	%0.5 Al ₂ O ₃ 9 cm 7 gün
					
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)

Şekil 3.29 Cam beher çapının belirlenmesi.

h) Nanopartikül çeşidi

Farklı nanopartikül içeren nanoakışkanların farklı kararlılık sürelerine sahip olmaları nedeniyle, nanopartikül çeşidinin kararlılık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Amaç, farklı nanoakışkanlar arasında en uzun kararlılık süresi eğilimi olan nanoakışkanı belirlemektir. Yapılan çalışmada Al₂O₃, TiO₂ ve ZnO nanopartiküller kullanılmıştır. Hazırlanan nanoakışkanların kararlılık süresi, büyükten küçüğe ZnO, TiO₂ ve Al₂O₃ şeklinde belirlenmiştir (Şekil 3.30).

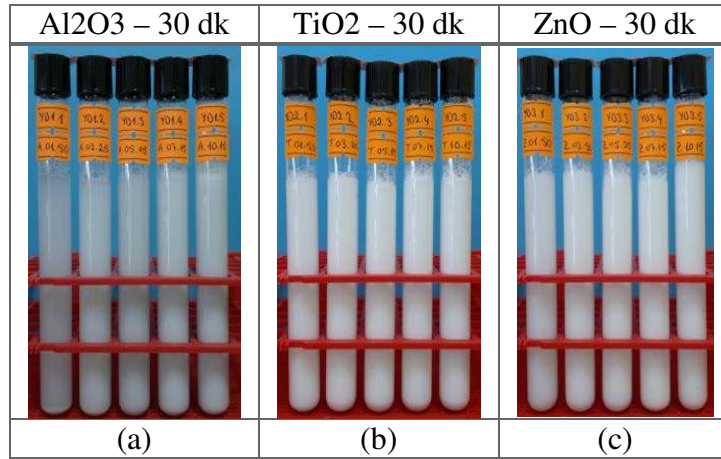
%0.5 Al ₂ O ₃ 10 dk	%0.5 TiO ₂ 10 dk	%0.5 ZnO 10 dk	%0.5 Al ₂ O ₃ 7 gün	%0.5 TiO ₂ 7 gün	%0.5 ZnO 7 gün
					
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)

Şekil 3.30 Nanopartikül çeşidinin etkisi.

3.3.2. Nanoakışkan kararlılık incelemesi

Nanoakışkan kararlılığını etkileyen parametrelerin en uygun değerleri dikkate alınarak nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Kararlı nanoakışkan elde etmek için incelenen optimum parametreler ile aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- Nanoakışkanın kümelenip çökmesini önlemek için yüzey aktif madde olarak SDS eklemek gerekir. SDS kütsel derişimleri Çizelge 3.8.'de verilmiştir.
- Ultrasonik homojenizatörün 5 W/mL güçte çalıştırılması gerekir.
- Ultrasonik karıştırma zamanı 30 dakika olarak belirlenmiştir.
- Banyo sıcaklığı 25°C seçilmiştir.
- Ultrasonik prob yüksekliği, cam beher tabanından 1-2 cm mesafede tutulmuştur.
- Optimum parametreler ile hazırlanan, her biri %0.5, %0.7 ve %1.0 hacimsel derişimde Al₂O₃, TiO₂ ve ZnO nanoakışkanların, sırasıyla ortalama olarak 120, 7 ve 21 güne kadar önemli bir çökme içermedikleri görülmüştür.
- Optimum parametreler ile hazırlanan Al₂O₃, TiO₂ ve ZnO nanoakışkanların kendi içlerinde en yüksek kararlılık gösterenler: %0.5 Al₂O₃ için 120 gün, %0.3 TiO₂ için 26 gün, tüm derişimlerde ZnO için 21 gün olduğu görülmüştür.
- Optimum parametreler ile hazırlanan nanoakışkanların SEM ve TEM görüntüleri alınmıştır. Görüntülerde homojen dağılım görülmüştür.



Şekil 3.31 Optimum parametreler ile hazırlanan nanoakışkanlar.

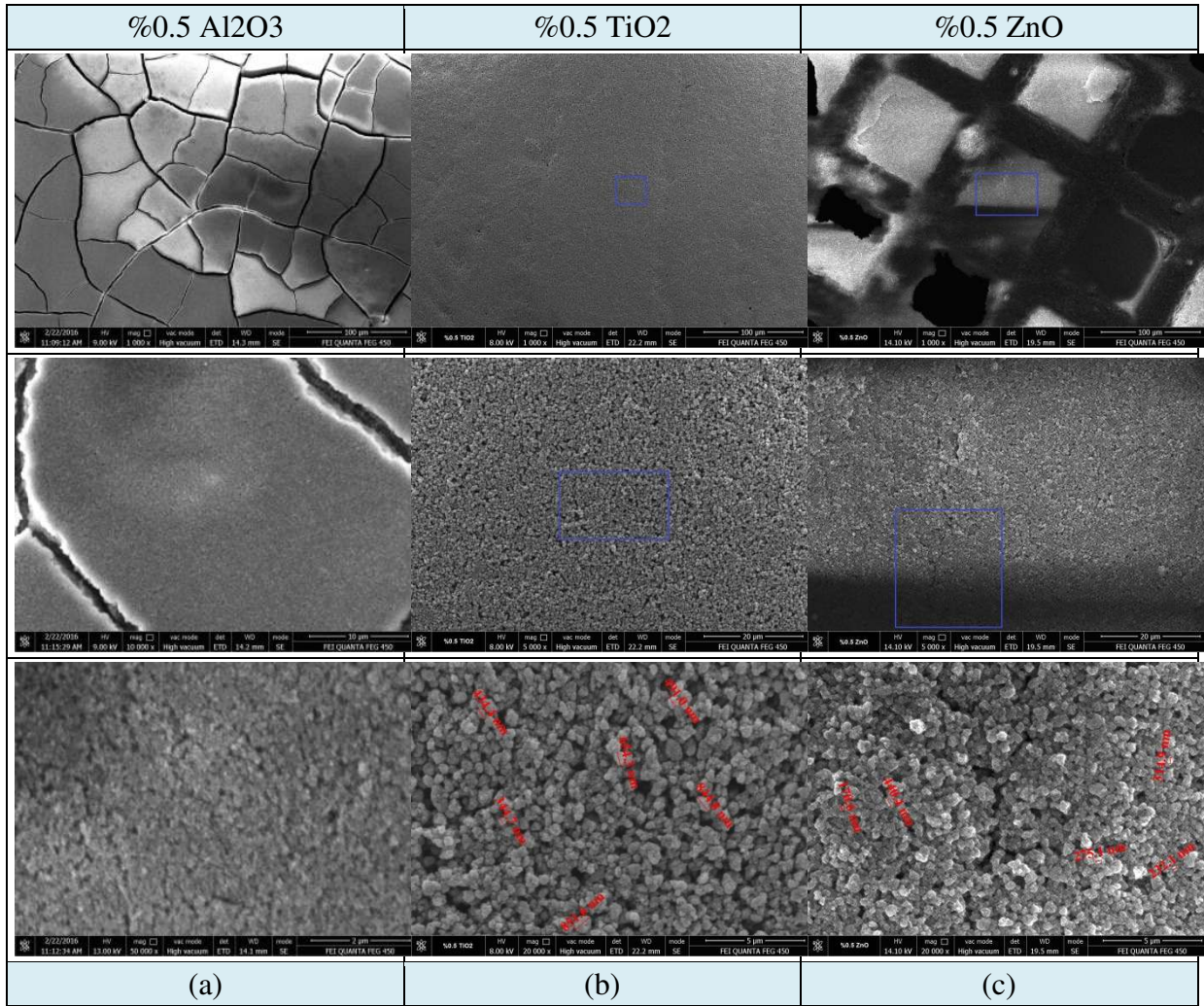
%0.5 Al ₂ O ₃ 120 gün	%0.3 TiO ₂ 26 gün	%0.5 ZnO 19 gün
		
(a)	(b)	(c)

Şekil 3.32 Seçilen nanoakışkanların kararlılık süreleri.

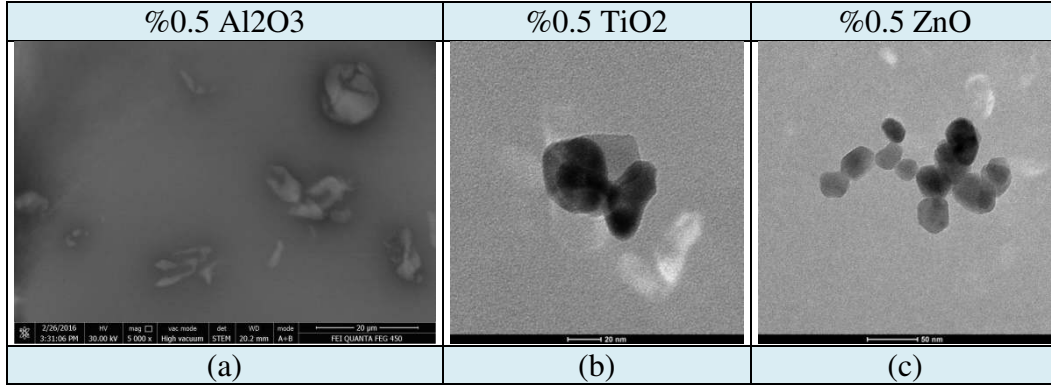
Şekil 3.31'deki nanoakışkanlarda en uzun süre kararlı kalanlar, Al₂O₃ için %0.5, %0.7 ve %1.0; TiO₂ için %0.3; ZnO için tüm derişimler şeklinde belirlenmiştir. Bu derişimlerde sırasıyla Al₂O₃ için 120 gün, TiO₂ için 26, ZnO için 21 güne kadar belirgin bir çökme olmadan kararlılık sağlanmıştır (Şekil 3.32). Diğer derişimlerde, birkaç günden 2 haftaya kadar değişen sürelerde kararlılık görülmüştür. Hazırlanan kararlı nanoakışkanların, homojen dağılım gösterdiğini ve kümelenme içermediğini doğrulamak için SEM ve TEM görüntüleri alınmıştır. Örnek olarak seçilen %0.5 hacimsel derişimli Al₂O₃, TiO₂ ve ZnO nanoakışkanların SEM ve TEM görüntüleri Şekil 3.34 ve 3.35'te verilmiştir. SEM görüntüleri için, Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezi'nde (ARTMER) SEM cihazı (FEI Quanta FEG 450, STEM Detector, 30 kV) kullanılmıştır (Şekil 3.33). TEM görüntüleri için ise, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, AR&GE Eğitim ve Ölçüm Merkezi'ndeki TEM cihazı (FEI Tecnai G2 Spirit BioTwin, CTEM, 120 kV) kullanılmıştır.



Şekil 3.33 ARTMER'deki STEM cihazı.



Şekil 3.34 Seçilen nanoakışkanların SEM görüntüleri.



Şekil 3.35 Seçilen nanoakışkanların TEM görüntüleri.

3.4. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

3.4.1. Isıl İletkenlik Ölçümü

Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri DECAGON KD2-Pro (KS-1 Prob: 0.02 – 2 W/mK, Ø1.27mm) ısı iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Isıl iletkenlik, sıcaklığa bağlı olduğu için sabit sıcaklıkta ölçüm işlemi yapılması gerekmiştir. Bu amaçla ısı iletkenliği ölçülecek nanoakışkan, 15 mL'lik plastik bir tüpe doldurulmuş ve tüp, ısı banyosuna koyulmuştur. Isıl iletkenlik ölçüm cihazının probu ise bu plastik tüpün üst kapağı delinerek yerleştirilmiştir. Kapak, 1.27 mm çaplı prob iğnesine uyacak kadar küçük delinmiştir (Şekil 3.36). Bu mavi kapak vidalı olup plastik tüpe takıldığında sabit, titreşimsiz ve sağlam bir yapı oluşturmuştur. Sıcaklık değeri de aynı prob ile ölçülmüştür. Isı banyosu ile kontrol edilen nanoakışkan sıcaklığı, istenen sıcaklıktan birkaç derece fazlasına kadar ısıtılmıştır. Sonra plastik tüp ısı banyosundan çıkarılmıştır. Isıl iletkenlik ölçümü sırasında, tüpten ısı kaybını önlemek ve tüp sıcaklığının değişmesini en aza indirmek için tüp, ayrı büyük bir plastik şişeye konulmuştur. Etrafı yalıtım malzemesi ile sarılan bu şişeye, nanoakışkan sıcaklığındaki ısı banyosundan alınan su doldurulmuştur. Böylece, ölçüm sırasında, nanoakışkan sıcaklık değişimi en düşük seviyeye indirgenerek, hem hızlı sıcaklık değişimlerinin neden olduğu hatalı ölçüm değerleri azaltılmış, hem de istenen sıcaklıklara yakın değerlerde ısı iletkenlik ölçümü yapılmıştır.



Şekil 3.36 Isıl iletkenlik ölçümü

Her bir nanoakışkanın ısı iletkenliğinin ölçümünde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

1. Bir nanopartikül çeşidi için üç farklı derişimde (%0.5, %0.7, %1.0 hacimsel) nanoakışkan hazırlanmıştır.
2. 15 mL'lik 6 adet plastik tüpe 15'er mL saf su (1 tüp) ve nanoakışkan (5 tüp) konuldu. Tüpler, tüp rafı ile ısı banyosuna yerleştirilmiştir.
3. Isı banyosu sıcaklığı ayarlanarak akışkanların istenen sıcaklığa gelmesi beklenmiştir.
4. Tüplerdeki akışkan sıcaklıkları kararlı hale geldikten sonra, ölçüm probu saf su içeren plastik tüpe yerleştirilmiştir. Probu ısı dengeye gelmesi için 1 dakika beklendi ve tüp, ısı banyosundan çıkarılmıştır. Tüp ters çevrilerek* daha büyük plastik bir şişeye konulmuştur. Etrafı yalıtımlı bu şişe içine saf su ile aynı sıcaklıktaki ısı banyosundan su doldurulmuştur. Bu işlemin hemen ardından saf suyun ısı iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Bu işlem en az 3 kez tekrarlanmıştır. Ekrandan okunan saf su ısı iletkenlik sonuçlarının %5 doğruluk** içinde kalması sağlanmıştır. Ölçüm yapıldıktan sonra saf su tüpü tekrar ısı banyosuna konulmuştur. Saf su ile doğru ölçüm değerleri alındıktan sonra nanoakışkan ölçümlerine geçilmiştir.
5. Ölçüm probu nanoakışkan içeren plastik tüpe yerleştirilmiştir. Probu ısı dengeye gelmesi için 1 dakika beklenmiştir ve tüp, ısı banyosundan çıkarılmıştır. Tüp ters çevrilerek daha büyük plastik bir şişeye konulmuştur. Etrafı yalıtımlı bu şişe içine nanoakışkan ile aynı sıcaklıktaki ısı banyosundan su doldurulmuştur. Bu işlemin hemen ardından nanoakışkanın ısı iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Bu işlem en az üç kez tekrarlanmıştır. Ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Ölçüm yapıldıktan sonra nanoakışkan tüpü tekrar ısı banyosuna yerleştirilmiştir.
6. Aynı sıcaklıkta, farklı derişimdeki nanoakışkanlar için ısı iletkenlik ölçümü 5. adımdaki gibi tekrarlanmıştır.
7. Farklı sıcaklıkta, farklı derişimdeki nanoakışkanlar için ısı iletkenlik ölçümü 3. adımdan 6. adıma kadar tekrarlanmıştır.

8. Farklı derişimlerdeki diğer nanoakışkanlar için ısıl iletkenlik ölçümü 1. adımdan 7. adıma kadar tekrarlanmıştır.

*DECAGON KD2-Pro Kullanım Kılavuzu, Sf.50 (Prob iğnesinin tamamının sıvı ile temas etmesi ve hava kabarcıklarının iğneden uzaklaşması için).

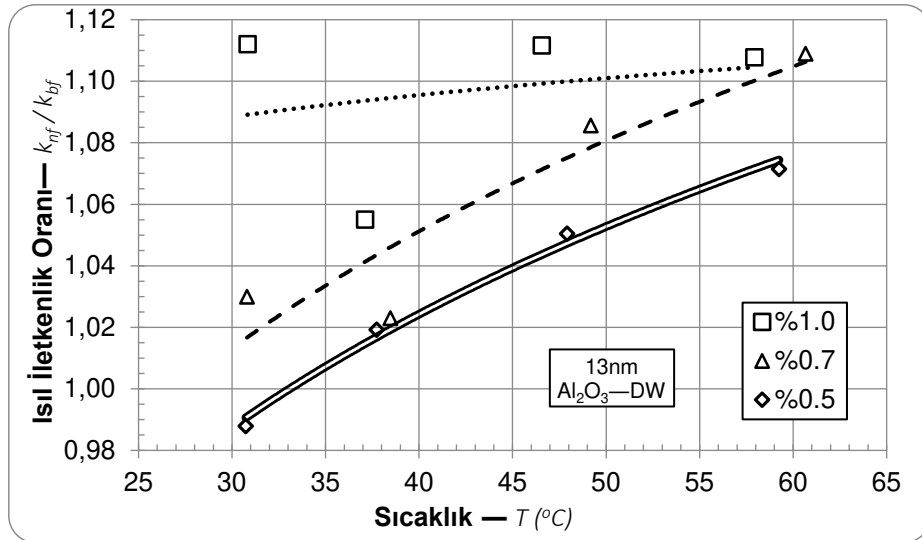
**DECAGON KD2-Pro Kullanım Kılavuzu, Sf.5-6.

3.4.2. ısıl İletkenlik DeneySEL Veri Sonuçları

Çizelge 3.9’da farklı derişim oranlarında ve farklı sıcaklık değerlerinde nanoakışkanlara ait ısıl özellik değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin baz akışkana göre oranları çizelge 3.9’da verilmiştir.

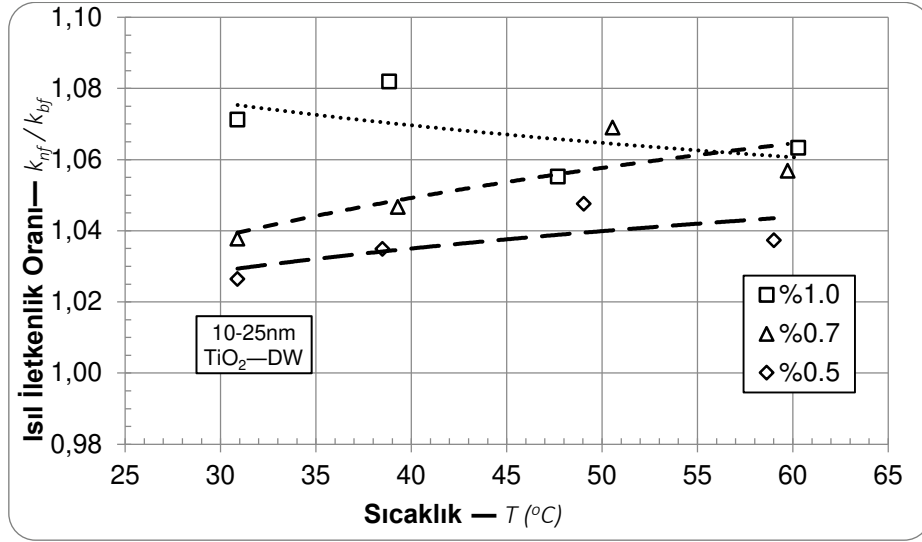
Çizelge 3.9 Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO için farklı sıcaklıklarda ölçülen ısıl iletkenlik değerleri

Derişim	Sıcaklık $T (^{\circ}\text{C})$			ısıl İletkenlik $k_{nf} (\text{W/mK})$			Oran k_{nf}/k_{bf}		
	Al_2O_3	TiO_2	ZnO	Al_2O_3	TiO_2	ZnO	Al_2O_3	TiO_2	ZnO
0,5%	30,74	30,88	30,66	0,609	0,633	0,623	0,988	1,026	1,011
	37,73	38,48	40,39	0,639	0,650	0,655	1,019	1,035	1,039
	47,92	49,04	51,82	0,673	0,672	0,657	1,050	1,048	1,019
	59,24	59,00	60,04	0,700	0,677	0,696	1,071	1,037	1,064
0,7%	30,80	30,88	30,43	0,635	0,640	0,637	1,030	1,038	1,034
	38,47	39,29	42,34	0,642	0,658	0,661	1,023	1,047	1,044
	49,18	50,55	50,99	0,697	0,688	0,680	1,086	1,069	1,056
	60,67	59,74	62,77	0,726	0,691	0,702	1,109	1,057	1,069
1,0%	30,83	30,89	30,45	0,686	0,661	0,666	1,112	1,071	1,081
	37,12	38,84	42,30	0,660	0,680	0,681	1,055	1,082	1,076
	46,57	47,69	49,40	0,710	0,675	0,682	1,112	1,055	1,063
	57,93	60,28	61,15	0,722	0,696	0,715	1,108	1,063	1,092

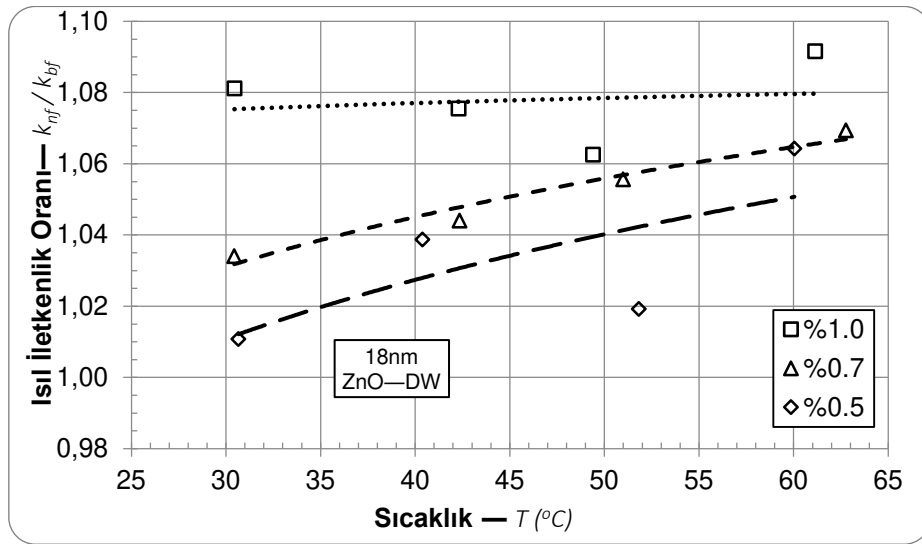


Şekil 3.37 Al_2O_3 nanoakışkanının farklı sıcaklıklarda ölçülen ısıl iletkenlik değerleri.

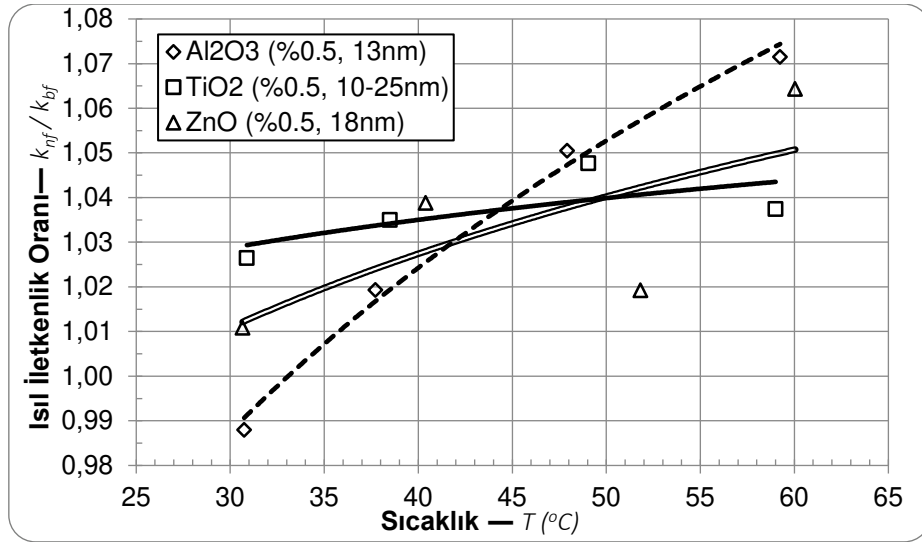
Şekil 3.37, 3.38, ve 3.39’da farklı sıcaklık ve farklı derişim oranlarında nanoakışkanlara ait ısıl iletkenlik değęrlerinin değışimleri görölmektedir. Nanoakışkanları birbiri arasında kıyaslayabilmek için Şekil 3.40 incelendiğinde yüksek sıcaklıklarda Al_2O_3 nanoakışkanın daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğu görölmektedir. Çizelge 3.10’da nanoakışkanlara ait ısıl iletkenlik değęrlerinin denklemleri bulunmaktadır.



Şekil 3.38 TiO_2 nanoakışkanının farklı sıcaklıklarda ölçőlen ısıl iletkenlik değęrleri.



Şekil 3.39 ZnO nanoakışkanının farklı sıcaklıklarda ölçőlen ısıl iletkenlik değęrleri.



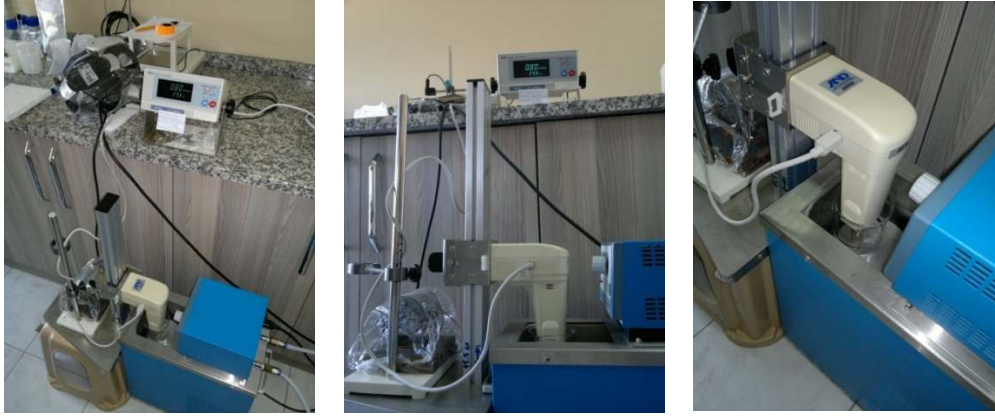
Şekil 3.40 Nanoakışkanların ölçülen ısıl iletkenlik değerlerinin kıyaslanması.

Çizelge 3.10 Nanoakışkanlara ait elde edilen ısıl iletkenlik denklemleri.

Nanoakışkan	Derişim Oranı	Denklem
Al ₂ O ₃	%0.5	$k = -0,000005173T^2 + 0,006465725T - 0,873479845$
	%0.7	$k = -0,000005360T^2 + 0,006715433T - 0,917203301$
	%1.0	$k = -0,000003007T^2 + 0,003749475T - 0,190256115$
TiO ₂	%0.5	$k = -0,000002632T^2 + 0,003288023T - 0,120304224$
	%0.7	$k = -0,000003074T^2 + 0,003844304T - 0,242193993$
	%1.0	$k = -0,000001685T^2 + 0,002110674T + 0,177788474$
ZnO	%0.5	$k = -0,000003541T^2 + 0,004431173T - 0,394436183$
	%0.7	$k = -0,000003262T^2 + 0,004103548T - 0,307879392$
	%1.0	$k = -0,000002462T^2 + 0,003088688T - 0,048287725$

3.4.3. Viskozite Ölçümü

Nanoakışkanların viskoziteleri AND-SV10 (1 – 1000 mPa.s) viskozite ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Viskozite, sıcaklığa bağlı olduğu için sabit sıcaklıkta ölçüm işlemi yapılması gerekmiştir. Bu amaçla, viskozitesi ölçülecek nanoakışkan, 250 mL'lik bir cam behere 100 mL doldurularak ısı banyosuna koyulmuştur. Viskozite ölçüm cihazının ölçüm ucu ise bu cam behere uyacak şekilde şekil 3.41'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Nanoakışkan sıcaklığı, ısı banyosu ile kontrol edilmiştir. Böylece istenen sıcaklıklarda nanoakışkan viskozitesi ölçülmüştür.



Şekil 3.41 Viskozite ölçüm cihazının ısı banyosuna yerleştirilmesi.

Her bir nanoakışkanın viskozitesinin ölçümünde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

1. Bir nanopartikül çeşidi için üç farklı derişimde (%0.5, %0.7, %1.0 hacimsel) nanoakışkan hazırlanmıştır.
2. 250 mL'lik bir cam behere 100 mL saf su konuldu ve ısı banyosuna yerleştirilmiştir.
3. Isı banyosu sıcaklığı ayarlanarak saf suyun istenen sıcaklığa gelmesi beklenmiştir.
4. Sıcaklık kararlı hale geldikten sonra, viskozite cihazının saf su ile kalibrasyon özelliği kullanılarak ilgili sıcaklıkta kalibrasyon yapılmıştır.
5. Saf suyun viskozite ölçümü yapıldı, cihazın ölçüm ucu kaldırılarak, plakaları temizlenmiş, tekrar saf suya daldırılarak ve ölçüm yapılmıştır. Bu işlem en az üç kez tekrarlanmıştır. Ekrandan okunan sonuçların %3 doğruluk* içinde kalması sağlanmıştır.
6. Nanoakışkanlardan her biri, viskozite ölçümü öncesi manyetik karıştırıcıda (250 rpm**, ~30 dk) karıştırılarak homojenliğinin devam etmesi sağlanmıştır.
7. Manyetik karıştırıcıda karıştırılan nanoakışkan, ısı banyosu içine yerleştirilmiştir.
8. Isı banyosu sıcaklığı ayarlanarak nanoakışkanın istenen sıcaklığa gelmesi beklenmiştir.
9. Sıcaklık kararlı hale geldikten sonra, nanoakışkanın viskozite ölçümü yapılmış, cihazın ölçüm ucu kaldırılarak, plakaları temizlenmiştir. Tekrar nanoakışkana daldırılmış ve ölçüm yapılmıştır. Bu işlem de en az 3 kez tekrarlanarak, ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

*AND SV-10 Kullanım Kılavuzu, Sf.58 (20-30°C arası yoğunlaşmaz durum için).

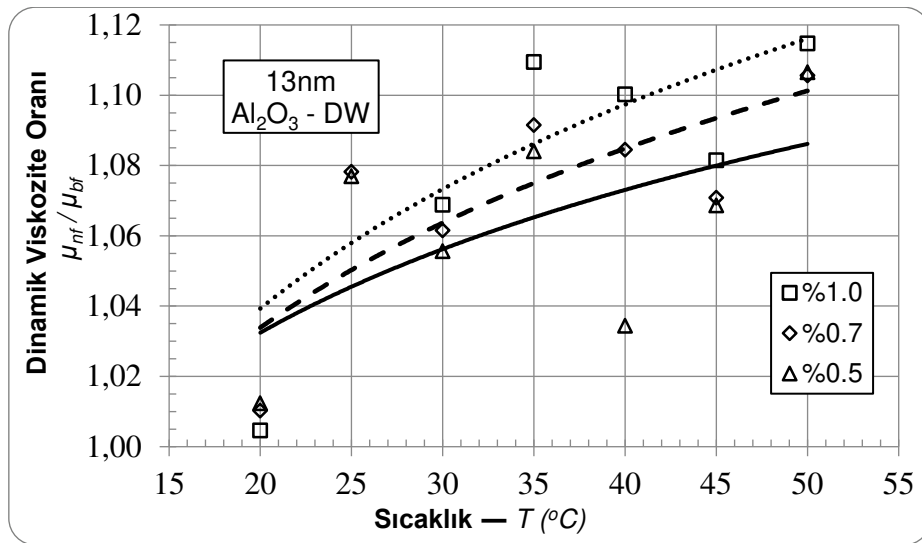
**Nanoakışkan 500 rpm ve üzeri devirlerde karıştırmak, SDS katkısından dolayı köpüklenmeye neden oluyor. Nanoakışkan üzeri köpüklü kısmın ölçüme girmesi ise viskozite ölçümünde düşük değerlerle sonuçlanıyor.

3.4.4. Dinamik Viskozite Deneysel Veri Sonuçları

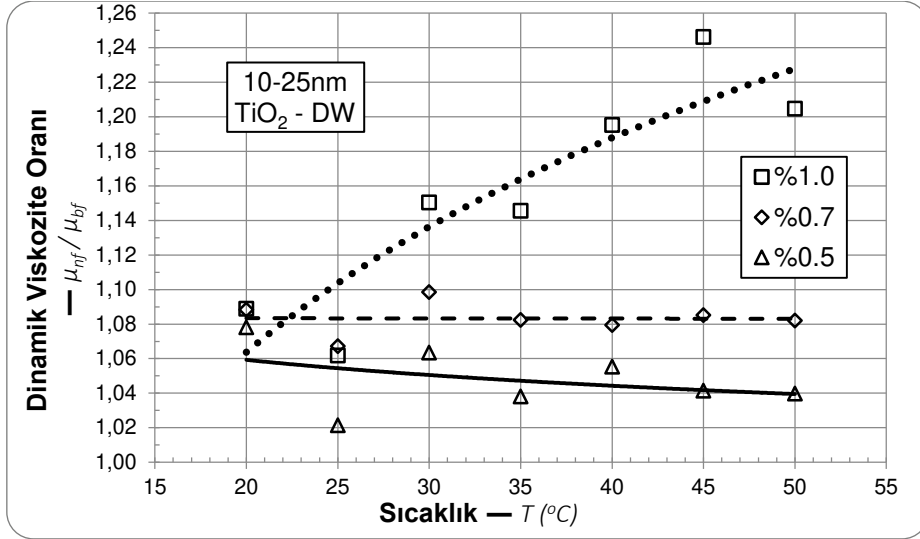
20-50 °C sıcaklık aralığında farklı derişim oranlarında nanoakışkanlara ait ölçülen viskozite verileri Çizelge 3.11.'de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Nanoakışkanlarının farklı sıcaklıkta ölçülen dinamik viskozite değerleri.

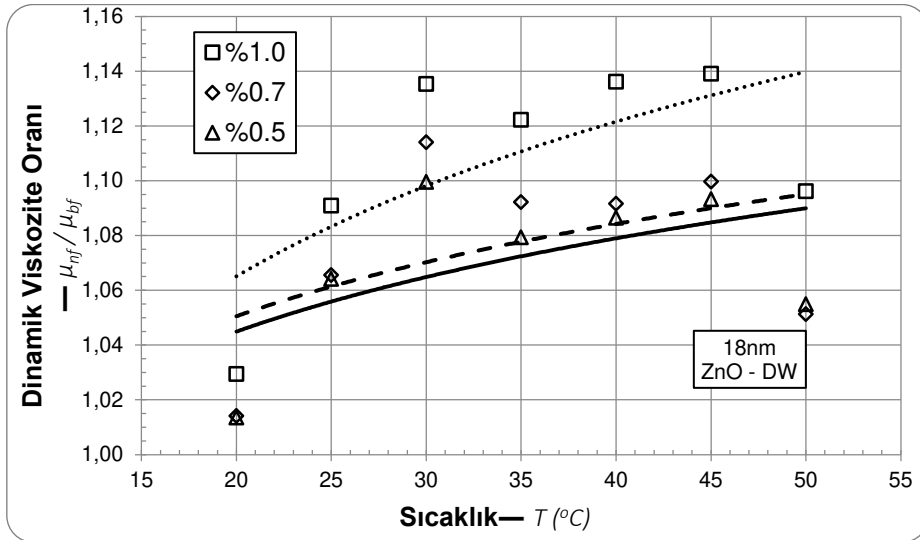
Nano Akışkan	Hacimsel Derişim		Sıcaklık $T (^{\circ}C)$						
	ϕ		20	25	30	35	40	45	50
Al_2O_3	Dinamik Viskozite $\mu_{nf} (mPa.s)$	0,5%	1,014	0,960	0,842	0,780	0,675	0,637	0,605
		0,7%	1,012	0,961	0,847	0,786	0,708	0,638	0,605
		1,0%	1,007	0,979	0,853	0,799	0,718	0,645	0,610
	Dinamik Viskozite Oranı — μ_{nf} / μ_{bf}	0,5%	1,012	1,077	1,056	1,084	1,034	1,069	1,107
		0,7%	1,010	1,078	1,062	1,092	1,085	1,071	1,106
		1,0%	1,005	1,098	1,069	1,109	1,100	1,081	1,115
TiO_2	Dinamik Viskozite $\mu_{nf} (mPa.s)$	0,5%	1,080	0,910	0,849	0,747	0,689	0,621	0,569
		0,7%	1,090	0,951	0,877	0,779	0,705	0,647	0,592
		1,0%	1,091	0,946	0,918	0,825	0,780	0,743	0,659
	Dinamik Viskozite Oranı — μ_{nf} / μ_{bf}	0,5%	1,078	1,021	1,063	1,038	1,055	1,041	1,040
		0,7%	1,088	1,067	1,098	1,082	1,079	1,085	1,082
		1,0%	1,089	1,062	1,150	1,146	1,195	1,246	1,205
ZnO	Dinamik Viskozite $\mu_{nf} (mPa.s)$	0,5%	1,016	0,948	0,878	0,777	0,710	0,652	0,577
		0,7%	1,016	0,949	0,889	0,786	0,713	0,655	0,575
		1,0%	1,032	0,972	0,906	0,808	0,742	0,679	0,600
	Dinamik Viskozite Oranı — μ_{nf} / μ_{bf}	0,5%	1,014	1,064	1,100	1,079	1,087	1,093	1,055
		0,7%	1,014	1,066	1,114	1,092	1,092	1,100	1,051
		1,0%	1,030	1,091	1,135	1,122	1,136	1,139	1,096



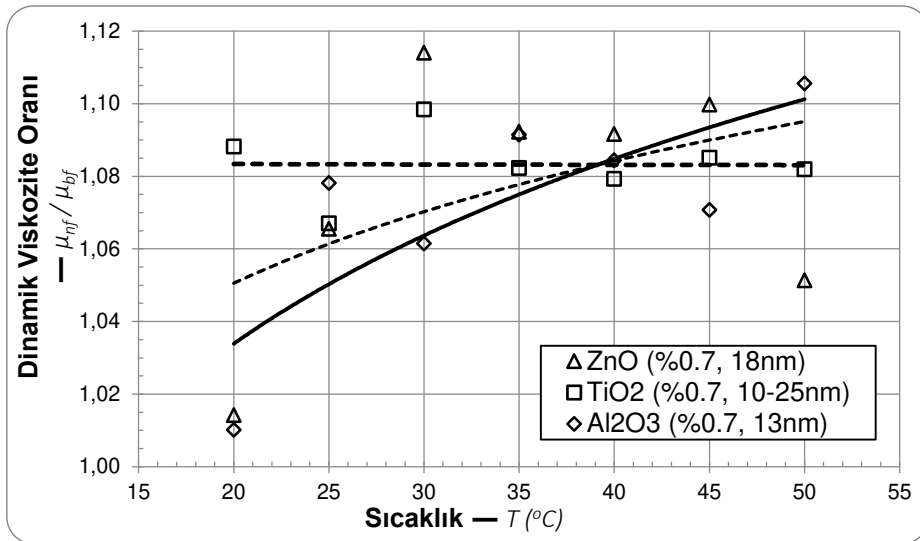
Şekil 3.42 Al_2O_3 nanoakışkanının farklı sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozite değişimi.



Şekil 3.43 TiO₂ nanoakışkanının farklı sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozite değişimi.



Şekil 3.44 ZnO nanoakışkanının farklı sıcaklıklarda ölçülen dinamik viskozite değişimi.



Şekil 3.45 Al₂O₃, TiO₂ ve ZnO farklı sıcaklıklarda ölçülen viskozite değişimi.

Şekil 3.42, 3.43, 3.44’te nanoakışkanlara ait farklı sıcaklıklarda ve derişim oranlarında dinamik viskozite değeri görölmektedir. Şekil 3.45’te ise üç faklı nanoakışkanın %0.7 derişimde sıcaklığa bağılı değışimleri görölmektedir. Al₂O₃ ve ZnO nanoakışkanları sıcaklık arttıkça dinamik viskozite değeri azaldığı, TiO₂ ise sabit kaldığı görölmektedir.

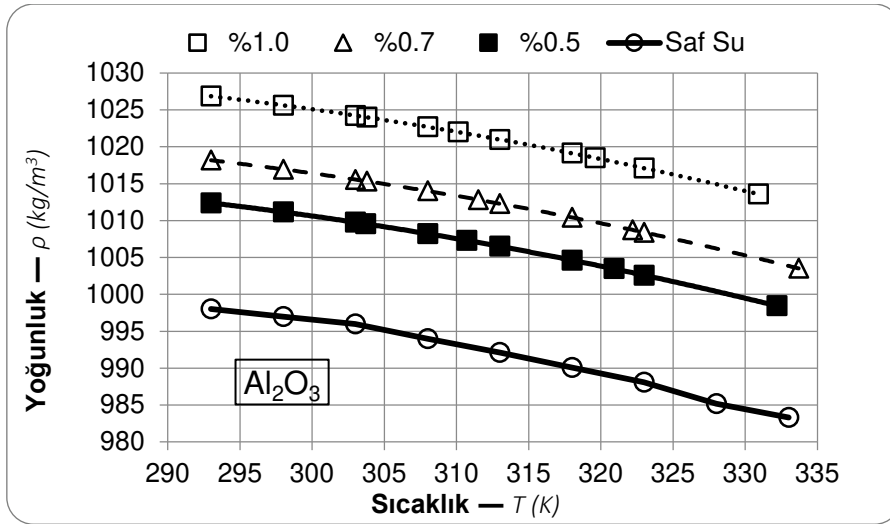
Çizelge 3.12 Nanoakışkanlara ait elde edilen viskozite denklemleri

Nanoakışkan	Hacimsel Derişim Oranı	Denklem
Al ₂ O ₃	%0.5	$\mu = 0,0001414899T^2 - 0,1016966799T + 18,6735327192$
	%0.7	$\mu = 0,0001352661T^2 - 0,0976876855T + 18,0359962673$
	%1.0	$\mu = 0,0001379276T^2 - 0,0992770159T + 18,2800017976$
TiO ₂	%0.5	$\mu = 0,0001717475T^2 - 0,1219104790T + 22,0182952230$
	%0.7	$\mu = 0,0001475758T^2 - 0,1070441193T + 19,7606149284$
	%1.0	$\mu = 0,0001095645T^2 - 0,0806023279T + 15,2720134174$
ZnO	%0.5	$\mu = 0,0001298656T^2 - 0,0950168388T + 17,7271169694$
	%0.7	$\mu = 0,0001441253T^2 - 0,1039485326T + 19,1285477083$
	%1.0	$\mu = 0,0001212646T^2 - 0,0895084517T + 16,8714955956$

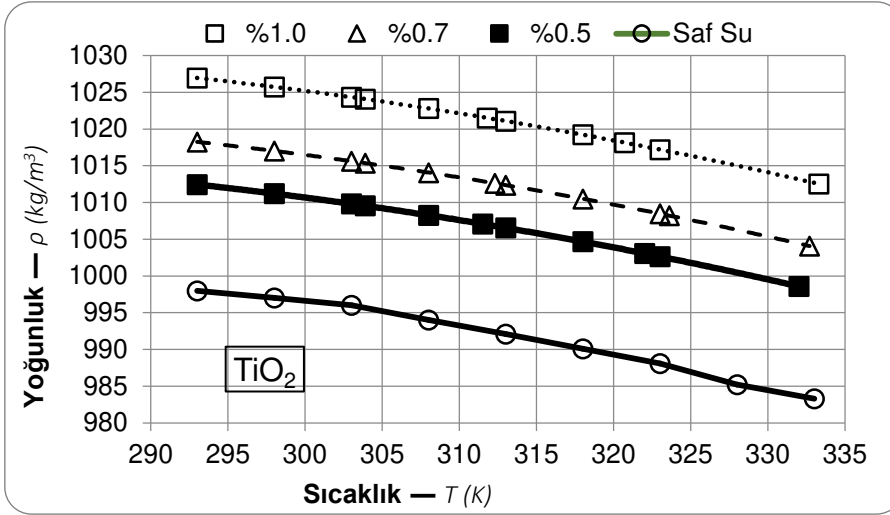
3.4.5. Yoğunluk

Tedarikçi firmadan alınan nanopartiküllere ait yoğunluk değeri ve denklem 3.20 kullanılarak nanoakışkanlara ait yoğunluklar elde edilmiştir. Şekil 3.46, 3.47 ve 3.48’de denklem 3.20 kullanılarak elde edilen nanoakışkanların ve baz akışkanın yoğunluk grafikleri verilmiştir. Farklı derişim ve farklı sıcaklık değeriinde hesaplanan yoğunluk değeri derişim oranı arttıkça attığı, sıcaklık arttıkça azalan bir eğilim gösterdiği görölmektedir. Çizelge 3.13’te grafiklerden elde edilen değeriye ait denklemler bulunmaktadır.

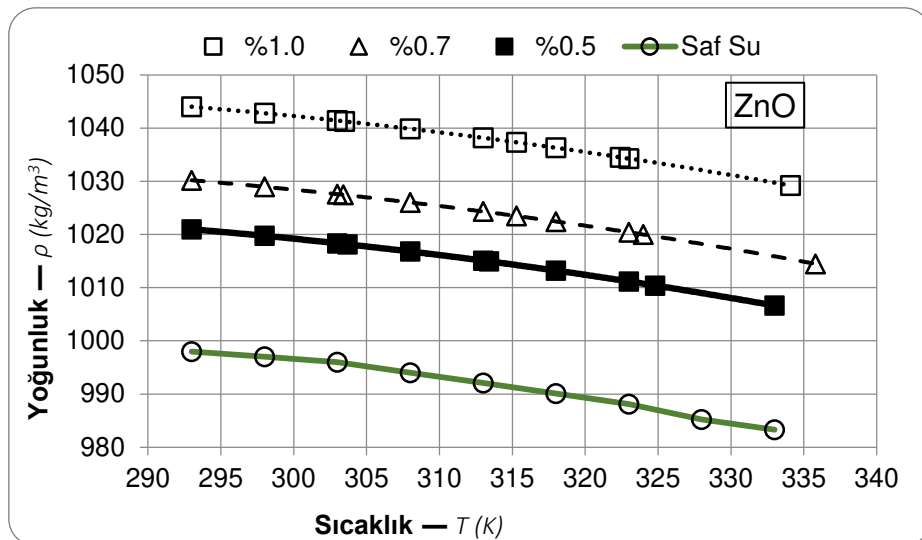
$$\rho_{nf} = \rho_{np}\phi + \rho_{bf}(1 - \phi) \quad (3.20)$$



Şekil 3.46 Al_2O_3 nanoakışkanının sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.



Şekil 3.47 TiO_2 nanoakışkanının sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.



Şekil 3.48 ZnO nanoakışkanının sıcaklığa bağlı yoğunluk değişimi.

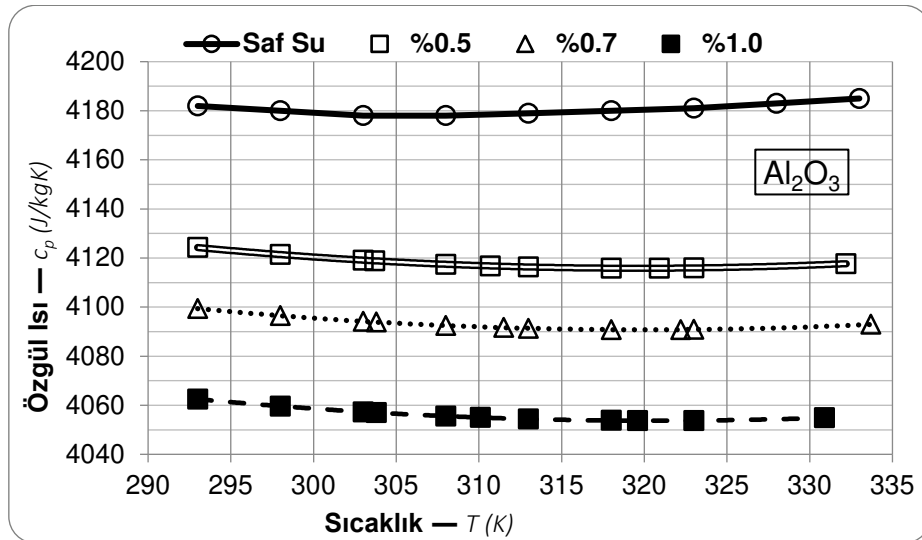
Çizelge 3.13 Nanoakışkanlara ait elde edilen yoğunluk denklemleri

Nanoakışkan	Hacimsel Derişim Oranı	Denklem
Al ₂ O ₃	%0.5	$\rho = -0,0032T^2 + 1,647T + 804,89$
	%0.7	$\rho = -0,0032T^2 + 1,6437T + 811,09$
	%1.0	$\rho = -0,0032T^2 + 1,6387T + 820,39$
TiO ₂	%0.5	$\rho = -0,0032T^2 + 1,647T + 804,94$
	%0.7	$\rho = -0,0032T^2 + 1,6437T + 811,16$
	%1.0	$\rho = -0,0032T^2 + 1,6387T + 820,49$
ZnO	%0.5	$\rho = -0,0032T^2 + 1,647T + 813,47$
	%0.7	$\rho = -0,0032T^2 + 1,6437T + 823,1$
	%1.0	$\rho = -0,0032T^2 + 1,6387T + 837,55$

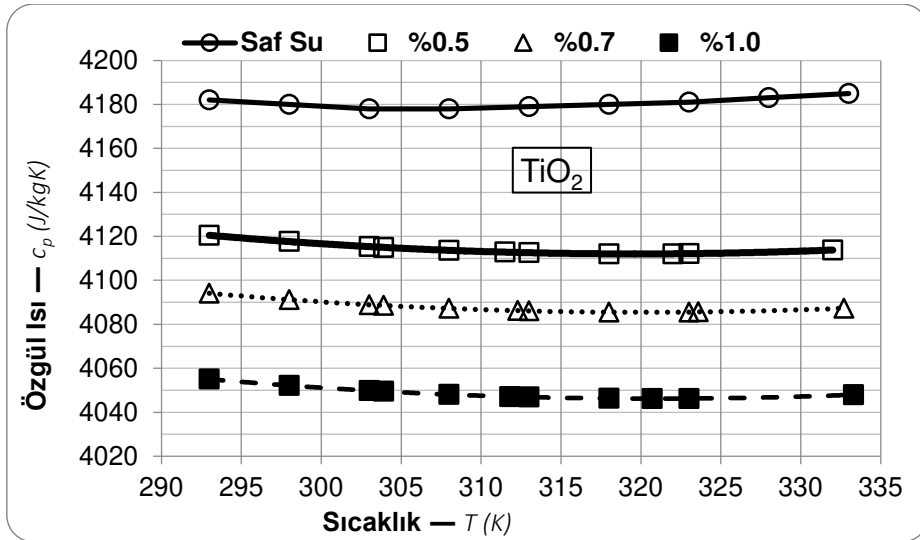
3.4.6. Özgöl Isı (c_p)

Tedarikçi firmadan alınan nanopartiküllere ait özgöl ısı değerleri denklem 3.21 kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.49, 3.50 ve 3.51’de farklı derişim oranlarında ve sıcaklıkta baz akışkan ve nanoakışkanlara ait özgöl ısı değerlerindeki değişimler görölmektedir. Derişim oranının özgöl ısı ile ters orantılı olduğu görölmektedir. Çizelge 3.14’te grafiklerden elde edilen denklemler bulunmaktadır.

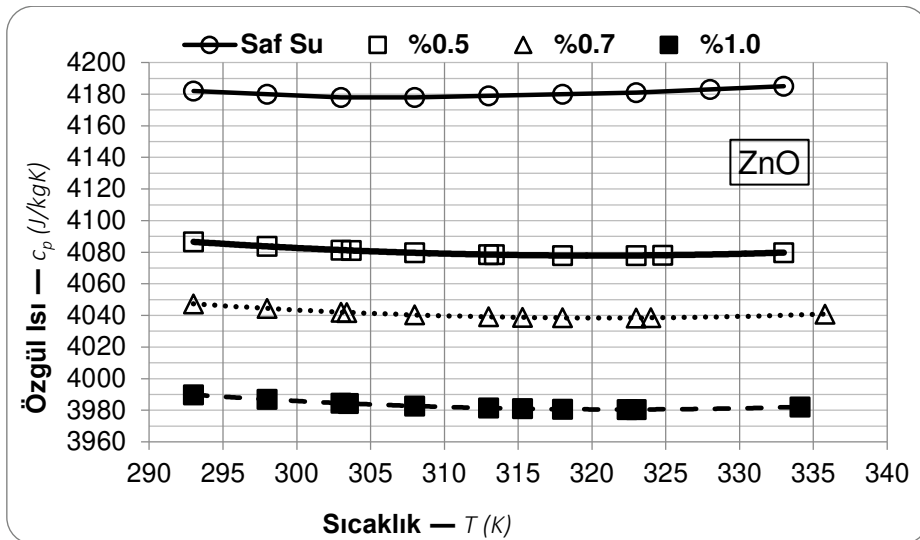
$$\rho_{nf}c_{nf} = \rho_{np}c_{np}\phi + \rho_{bf}c_{bf}(1 - \phi) \quad (3.21)$$



Şekil 3.49 Al₂O₃ Nanoakışkanının sıcaklığa bağılı özgöl ısı değışımi.



Şekil 3.50 TiO₂ akışkanının sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.



Şekil 3.51 ZnO akışkanının sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.

Çizelge 3.14 Nanoakışkanlara ait Özgül Isı Denklemleri

Nanoakışkan	Hacimsel Derişim Oranı	Denklem
Al ₂ O ₃	%0.5	$C_p = 0,0119T^2 - 7,6021T + 5330,8$
	%0.7	$C_p = 0,0117T^2 - 7,5005T + 5291,1$
	%1.0	$C_p = 0,0115T^2 - 7,3534T + 5232,9$
TiO ₂	%0.5	$C_p = 0,0119T^2 - 7,5952T + 5326,2$
	%0.7	$C_p = 0,0117T^2 - 7,4913T + 5284,7$
	%1.0	$C_p = 0,0114T^2 - 7,3389T + 5223,5$
ZnO	%0.5	$C_p = 0,0117T^2 - 7,4734T + 5274,7$
	%0.7	$C_p = 0,0114T^2 - 7,3237T + 5213,8$
	%1.0	$C_p = 0,011T^2 - 7,1096T + 5125,2$

3.5. TAGUCHI YAKLAŞIMI İLE DENEY TASARIMI (TAGUCHI / DOE)

Taguchi metodu, kalite geliştirme konusunda Genichi Taguchi tarafından deneysel tasarıma dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu tekniğin temel felsefesi kalitenin tasarım aşamasında ürün veya prosese kazandırılmasıdır (Aydın 1994). Taguchi, tek yanıtlı problemlerin optimizasyonunu sağlamaya çalışmış, çok yanıtlı problemler üzerinde pek fazla durmamıştır. Fakat ihtiyaçların ve bu alanda çalışmaların artması ile beraber çok yanıtlı problemler üzerinde çalışılması gereği ortaya çıkmıştır (Baynal 2003). Çok yanıtlı bir deneyden elde edilen verilerin analizi, verilerin çok değişkenli yapısının dikkatli bir şekilde ele alınmasını gerektirmektedir. Yanıtlar arasında var olabilecek ilişkiler, bu tip tek değişkenli incelemelerin anlamsız olmasına neden olur. Bu durumda, birkaç yanıt fonksiyonu olarak optimize edilmek isteniyorsa, ayrı ayrı optimumlarının elde edilmesi anlamsızdır. Bir yanıt için optimal olan koşullar, diğer yanıtlar için optimumdan uzak, hatta fiziksel olarak uygulanması olanaksız olabilir. Keşifsel bir yaklaşım olarak, tüm yanıtların eş yükselti eğrilerinin üst üste koyularak, koşulların tüm yanıtlar için yaklaşık optimum olduğu bir bölge belirlenebilir. Bununla birlikte, bu prosedür çok sayıda girdi değişkeni ve yanıt içeren sistemlerde sınırlıdır (Tong 1997). Çok yanıtlı mühendislik problemlerine bir yaklaşım da tek tek yanıtları birleştirici hedefte kombine etmektir. Yarar teorisinde çoklu hedef tekniklerini mukayese etmek ve tenkit etmek için bazı karakteristikler kullanılır. Bunlar riski önlemek, marjinal ikame oranları ve birleştirilmiş fonksiyondaki yanıtların ilişkileridir (Kros 2001).

3.5.1. Deneylerin Planlanması

Hedefler, gösterilmek istenen sonuçlar ve bu sonuçların elde edilmesinde kullanılacak ifadeler Çizelge 3.15'de verilmiştir.

Çizelge 3.15 Deney özeti.

Hedef	Mini/Mikro kanalın soğutma performansını (Q) %20 arttırmak
İstenen sonuçlar	Q, h, Nu, f
Kullanılacak ifadeler	$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T$, $\dot{Q} = hA\Delta T$, $Nu = hx/k$, $\Delta P_{Total, Loss} = \sum \Delta P_{f, Loss} + \sum \Delta P_{K, Loss}$
Performans (Kalite) tipi*	Q, h ve Nu için " <i>Bigger is better</i> "; f için " <i>Smaller is better</i> "

* Hızlı hesaplama için Nutek Inc. firmasının "Qualitek 4 v17.1" programı kullanıldı.

Programda optimum seviyeler için performans tipinin belirlenmesi gerekir. Taguchi Deney Tasarımı yaklaşımında performans tipi, elde edilmek istenen sonucun hangi tipinin (büyük, küçük veya nominal) iyi olduğunu belirtir. Bu özellik incelenerek, sonuçlar için optimum

seviyeler belirlenir. Nanoakışkanlı ısı transferi deneyleri için sonuçlar üzerinde etkisi olduğu düşünülen tüm parametreler (faktörler) ve seviyeleri (alabileceği değerler) Çizelge 3.16'daki gibi belirlendi.

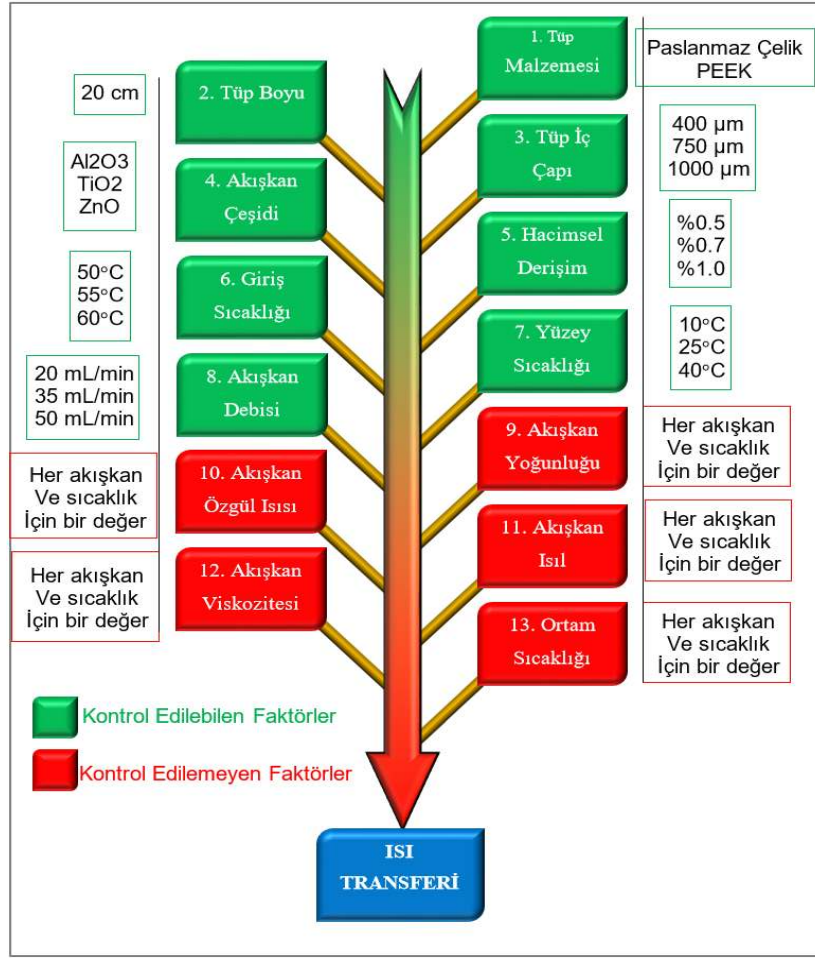
Çizelge 3.16 Tüm faktörler ve seviyeleri.

Sıra	Faktör	Seviyeler
1.	Mini/Mikro kanal malzemesi	Paslanmaz çelik, PEEK
2.	Tüp boyu	20 cm
3.	Tüp iç çapı	400, 750, 1000 μm
4.	Akışkan çeşidi	Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO
5.	Akışkan hacimsel derişimi	%0.5, %0.7, %1.0
6.	Akışkan giriş sıcaklığı	50, 55, 60 $^{\circ}\text{C}$
7.	Mikrokanal yüzey sıcaklığı	10, 25, 40 $^{\circ}\text{C}$
8.	Akışkan debisi	20, 35, 50 mL/dk
9.	Akışkan yoğunluğu	Her akışkan çeşidi ve sıcaklığı için bir değer
10.	Akışkan özgül ısısı	Her akışkan çeşidi ve sıcaklığı için bir değer
11.	Akışkan ısıl iletkenliği	Her akışkan çeşidi ve sıcaklığı için bir değer
12.	Akışkan viskozitesi	Her akışkan çeşidi ve sıcaklığı için bir değer
13.	Ortam sıcaklığı	Hava sıcaklıkları örn. 10, 20, 30, 40 $^{\circ}\text{C}$

Bu parametrelerden kontrol edilemeyenler ayrıldı: 9, 10, 11, 12, 13 numaralı parametreler. Kalan parametreler özetlendi: 1 adet iki seviyeli, 6 adet üç seviyeli faktör. Taguchi Deney Tasarımında belirlenen faktör ve seviyeler, ya mevcut ortogonal dizilerden (birden fazla faktörün aynı anda değiştirilmesini sağlayan ve deney kombinasyonlarını içeren sayı dizileri) birinin seçimini (Çizelge 3.17) ya da mevcut diziler kullanılarak yeni bir ortogonal dizi elde edilmesini gerektirir.

Çizelge 3.17 Yaygın kullanılan mevcut ortogonal diziler (ROY R.K. 2001).

DİZİ TİPİ	FAKTÖR	SEVİYE
L4 (2^3)	3	2
L8 (2^7)	7	
L12 (2^{11})	11	
L16 (2^{15})	15	
L32 (2^{31})	31	
L64 (2^{63})	63	
L9 (3^4)	4	3
L18 ($2^1 \times 3^7$)	1 adet 2 seviyeli, 7 adet 3 seviyeli	
L27 (3^{13})	13	
L54 ($2^1 \times 3^{25}$)	1 adet 2 seviyeli, 25 adet 3 seviyeli	
L81 (3^{40})	40	
M16 (4^5)	5	4
M32 ($2^1 \times 4^9$)	1 adet 2 seviyeli, 9 adet 4 seviyeli	



Şekil 3.52 Tüm faktörler ve seviyeleri.

Çizelge 3.17'deki parametrelerin seviyelerinde 3 farklı durum vardır: 2, 3 ve 4 seviyeli faktörler. Parametre seviyesindeki değişimin sonuç üzerinde, doğrusal bir etkisi olması durumunda 2 seviyeli faktörler; doğrusal olmayan bir etkisi olması durumunda 3 seviyeli faktörler; sinüzoidal bir etkisi olması durumunda 4 seviyeli faktörler kullanılır.

Çizelge 3.17'de, nanoakışkan deneyleri için belirlenen 1 adet iki seviyeli, 1 adet üç seviyeli, 3 adet dört seviyeli, 2 adet beş seviyeli, 1 adet altı seviyeli faktöre uygun ortogonal dizi (bu bir karışık seviyeli faktör grubudur) olmadığı için deney parametrelerinde bu çizelgedeki dizilerden birine uyacak şekilde değişiklikler yapılmıştır. Bunun için bazı parametrelerde ve seviyelerinde azaltmaya gidilmiştir. Buna göre, nanoakışkan deneylerinde literatürdeki çalışmalar (Özerinç 2010, Peyghambarzadeh 2011, Hussein 2014, Saidur 2010, Bhimani 2013, Aydoğan 2012) dikkate alındığında doğrusal olmayan sonuçlar beklendiği için, 3 seviye üzerindeki parametreler 3 seviye olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir. Son durumda nanoakışkan deneyleri 1 adet iki seviyeli, 7 adet üç seviyeli faktöre dönüşmüştür. Bu faktör ve

seviyelere en uygun ortogonal dizi olarak, 1 adet iki seviyeli ve 7 adet üç seviyeli faktör içeren L-18 ($2^1, 3^7$) dizisi belirlendi. Son durumda faktörler ve seviyeleri Çizelge 3.18 ve 3.19'te verilmiştir.

Çizelge 3.18 Kontrol edilebilen faktörler ve seviyeleri*².

Sıra	Faktör	Seviyeler	Seviye Sayısı
A.	Tüp malzemesi	a1=SS, a2=PEEK	2 seviye
B.	Tüp iç çapı	b1=400, b2=750, b3=1000	3 seviye
C.	Akışkan çeşidi	c1=Al ₂ O ₃ , c2=TiO ₂ , c3=ZnO	3 seviye
D.	Hacimsel derişim	d1=%0.5, d2=%0.7, d3=%1.0	3 seviye
E.	Giriş sıcaklığı	e1=50, e2=55, e3=60	3 seviye
F.	Yüzey sıcaklığı	f1=10, f2=25, f3=40	3 seviye
G.	Akışkan debisi	g1=20, g2=35, g3=50	3 seviye

Çizelge 3.19 Kontrol edilemeyen faktörler (Gürültü Faktörleri)*³.

Sıra	Faktör
N1.	Akışkan yoğunluğu
N2.	Akışkan özgül ısısı
N3.	Akışkan ısıl iletkenliği
N4.	Akışkan viskozitesi

*² Tüm deneyler için 20 cm boyundaki tüpler seçildi. PEEKsil, tüm tüp çaplarında bulunmadığı için deneylerden çıkarıldı. Ortam sıcaklığı, ısı banyosu sıcaklığı olarak kontrol edilebilen faktörlere dahil edilmiştir.

*³ Uygulamada kontrol edilemeyen faktörler laboratuvar koşullarında kontrol edilebiliyorsa deneylere katılır. Kontrol edilemiyorsa dikkate alınmaz. Bu faktörlerin sonuçlara etkisi, güven aralığı ile elde edilen toleransın azalması şeklinde görülür. Yani, elde edilen optimum seviyeler tekrarlandığında daha doğru ve daha küçük standart sapması olan sonuçlar elde edilir. Bu deneylerde, nanoakışkan ısıl özelliklerini (yoğunluk, özgül ısı, ısıl iletkenlik, viskozite) kontrol etmek mümkün olmadığı için dikkate alınmadı.

3.5.2. Yapılacak Deneylerin Belirlenmesi

Taguchi yaklaşımı ile deney tasarımı, klasik yaklaşımla karşılaştırıldığında gereken deney sayısı Çizelge 3.20'deki gibi belirlenmiştir:

Çizelge 3.20 Deney sayıları.

ŞART	Yapılması Gereken Toplam Deney Sayısı
Faktör ve seviyeleri klasik yaklaşımda* ⁴ olduğu gibi kullanılırdı	$3 \times 2 \times 6 \times 4 \times 5 \times 4 \times 4 \times 5 = 57600$
Azaltılan faktör ve seviyeler DOE/Taguchi yaklaşımı ile kullanılırsa* ⁵	$L-18 (2^1, 3^7) = 18$

*⁴ Klasik yaklaşımda, bir deneyde bir faktörün seviyesi değiştirilerek sonuç elde edilir.

*⁵ DOE/Taguchi yaklaşımında, bir deneyde birden çok faktör ve seviye değiştirilerek sonuçtaki değişim kontrol edilir.

Çizelge 3.21 L-18 ($2^1, 3^7$) ortogonal dizisi.

Deney	Faktörler							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Gerektiğinde, çıkarılan faktör ve seviyeler diğerlerinin yerine kullanılarak 18 deneyden oluşan birkaç grup deney yürütülebilir veya tüm faktörleri içeren daha büyük ortogonal diziler seçilebilir. L18 ($2^1, 3^7$) ortogonal dizisi Çizelge 3.21'de verildi. Çizelge 3.18'de belirlenen kontrol edilebilen faktörler ve seviyeleri L-18 ($2^1, 3^7$) ortogonal dizisine Çizelge 3.22'deki gibi yerleştirilmiştir. Faktörlerin yerleştirme işleminde, L-18 ($2^1, 3^7$) ortogonal dizinin özelliği gereği, 1 adet iki seviyeli faktör ilk sütuna yerleştirilir. 6 adet üç seviyeli faktör ise dizinin kalan 7 sütununa rasgele yerleştirilir. Dizinin bir sütunu Çizelge 3.22'de görüldüğü gibi boş kalır. Bu sütuna sıfır yazılır ya da hiçbir şey yazılmayabilir. Deneylere herhangi bir etkisi olmaz.

Çizelge 3.22 Faktörlerin ve seviyelerinin L-18 ($2^1, 3^7$) ortogonal dizisine yerleştirilmesi*

DENEY	FAKTÖRLER							
	A	B	C	D	E	F	G	-
	Tüp Malzemesi	Tüp İç Çapı (µm)	Akışkan Çeşidi	Hacimsel Derişim (%)	Giriş Sıcaklığı (°C)	Yüzey Sıcaklığı (°C)	Akışkan Debisi (mL/dk)	-
1	SS	400	Al ₂ O ₃	0.5	50	10	20	0
2	SS	400	TiO ₂	0.7	55	25	35	0
3	SS	400	ZnO	1.0	60	40	50	0
4	SS	750	Al ₂ O ₃	0.5	55	25	50	0
5	SS	750	TiO ₂	0.7	60	40	20	0
6	SS	750	ZnO	1.0	50	10	35	0
7	SS	1000	Al ₂ O ₃	0.7	50	40	35	0
8	SS	1000	TiO ₂	1.0	55	10	50	0
9	SS	1000	ZnO	0.5	60	25	20	0
10	PEEK	400	Al ₂ O ₃	1.0	60	25	35	0
11	PEEK	400	TiO ₂	0.5	50	40	50	0
12	PEEK	400	ZnO	0.7	55	10	20	0
13	PEEK	750	Al ₂ O ₃	0.7	60	10	50	0
14	PEEK	750	TiO ₂	1.0	50	25	20	0
15	PEEK	750	ZnO	0.5	55	40	35	0
16	PEEK	1000	Al ₂ O ₃	1.0	55	40	20	0
17	PEEK	1000	TiO ₂	0.5	60	10	35	0
18	PEEK	1000	ZnO	0.7	50	25	50	0

* Çizelge 3.22'deki 18 deney, deneysel hataları (değer okuma, deney tesisatı, ortam şartları) en aza indirmek için rasgele seçilerek yürütülür.

3.5.3. Deneylerin Yapılması

Rasgele seçilen deneylerden her biri için elde edilen ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü deney sonuçları çizelge 3.23'e yazılmıştır. Daha anlamlı sonuç elde etmek için her bir deney üç defa tekrarlanmıştır. Çizelgedeki birinci satır sonuçları için yapılan hesaplar aşağıda gösterilmiştir. Diğer hesaplar daha hızlı hesap için Excel ile yapılmıştır.

Çizelge 3.23 Deney sonuçları

DENEY	SONUÇLAR											
	Isı Transferi $Q (W)$			Isı Taşınım Katsayısı $h (W/m^2K)$			Nusselt Sayısı Nu			Sürtünme Faktörü f		
	Test1	Test2	Test3	Test1	Test2	Test3	Test1	Test2	Test3	Test1	Test2	Test3
1	37.349			7155			4.327			0.058		
2												

3.5.3.1. Isı Transferi

Isı transferi sonuçları,

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T = \dot{m}_{nf}c_{nf}(T_{nf,out} - T_{nf,in}) \quad (3.22)$$

ifadesi ile belirlendi. Burada,

$\dot{Q}$: Isı transferini (W)

$\dot{m}_{nf}$: Nanoakışkan kütleli debisini (kg/s)

c_{nf} : Nanoakışkan özgül ısısını (kJ/kgK)

$T_{nf,in}$: Nanoakışkanın mikrokanala giriş sıcaklığını ($^{\circ}C$)

$T_{nf,out}$: Nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığını ($^{\circ}C$) gösterir.

3.5.3.2. Isı Taşınım Katsayısı

Isı taşınım katsayısı sonuçları,

$$\dot{Q} = hA\Delta T = h_{in,mic}A_{in,mic}\Delta T_{ln} \quad (3.23)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln(\Delta T_{in}/\Delta T_{out})} \quad (3.24)$$

$$\Delta T_{in} = T_{nf,in} - T_{s,in} \quad (3.25)$$

$$\Delta T_{out} = T_{nf,out} - T_{s,out}$$

Burada,

$\dot{Q}$: Isı transferini (W),

$h_{in,mic}$: Mikrokanal içi nanoakışkan ısı taşınım katsayısını (W/m^2K),

$A_{in,mic}$: Mikrokanal iç yüzey alanını (m^2),

ΔT_{ln} : Logaritmik ortalama sıcaklık farkını ($^{\circ}C$),

ΔT_{in} : Polimer malzeme girişinde, nanoakışkan ve ısı banyosu akışkanı arasındaki sıcaklık farkını ($^{\circ}C$),

ΔT_{out} : Polimer malzeme çıkışında, nanoakışkan ve ısı banyosu akışkanı arasındaki sıcaklık farkını ($^{\circ}\text{C}$),

$T_{s,in}$: Mikrokanal girişindeki iç yüzey sıcaklığını* ($^{\circ}\text{C}$),

$T_{s,out}$: Mikrokanal çıkışındaki iç yüzey sıcaklığını* ($^{\circ}\text{C}$),

$T_{nf,in}$: Nanoakışkanın mikrokanala giriş sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$),

$T_{nf,out}$: Nanoakışkanın mikrokanaldan çıkış sıcaklığını gösterir. ($^{\circ}\text{C}$),

*Mikrokanal dışında yüksek debi ve ince kanal kalınlığı nedeniyle ısı banyosu sıcaklığına eşit kabul edilmiştir.

3.5.3.3. Nusselt Sayısı

Nusselt sayısı sonuçları,

$$Nu = hx/k = h_{in,mic}D_{in,mic}/k_{nf} \quad (3.25)$$

Burada ;

Nu : Nusselt sayısı (–),

$h_{in,mic}$: Mikrokanal içi nanoakışkan ısı taşınım katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$),

$D_{in,mic}$: Mikrokanal iç çapı (m),

k_{nf} : Nanoakışkan ısıl iletkenliğini (W/mK) gösterir.

3.5.3.4. Sürtünme Faktörü

Sürtünme faktörü sonuçları,

$$\begin{aligned} \Delta P_{Total, Loss} &= \sum \Delta P_{f,i} + \sum \Delta P_{K,i} + \Delta P_h \\ &= \sum f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{\rho_{nf} V_{nf,i}^2}{2} + \sum K_i \frac{\rho_{nf} V_{nf,i}^2}{2} + \rho_{nf} g z \end{aligned} \quad (3.26)$$

Burada,

$\Delta P_{Total, Loss}$: Basınç transmitteri ile ölçülen mikrokanal giriş-çıkışı arasındaki toplam basınç kaybını (Pa),

$\Delta P_{f,i}$: Tüm boruların (mikrokanal ve diğer borular) uzunluğu boyunca sürtünme basınç kaybını (Pa),

$\Delta P_{K,i}$: Basınç transmittlerinden nanoakışkan çıkış yerine kadar yerel basınç kayıplarını (Pa),

ΔP_h : Mikro boru çıkışındaki hidrostatik basıncı (Deney tesisatı içindeki havanın kolayca atılabilmesi için belirli noktalarda borulara eğim verildi ve yükseltme yapıldı) (Pa),

f : Sürtünme faktörünü $(-)$,

L_i : i borusu boyunu (m)

ρ_{nf} : Nanoakışkan yoğunluğunu (kg/m^3)

$V_{nf,i}$: i borusundaki ortalama nanoakışkan hızını (m/s)

D_i : i borusu iç çapını (m) ,

K_i : i konumundaki yerel kayıp katsayısını $(-)$,

z : Mikro boru çıkışındaki yüksekliği (m) gösterir.

$$\begin{aligned}\Delta P_{Total,L} &= \sum \Delta P_{f,i} + \sum \Delta P_{K,i} + \Delta P_h \\ &= \Delta P_f + (\Delta P_{K1} + \Delta P_{K2} + \Delta P_{K3} + \Delta P_{K4} + \Delta P_{K5} (giriş etkisi)) + \Delta P_h\end{aligned}$$

$$\Delta P_f = f_{mic} \frac{L_{mic}}{D_{mic}} \frac{\rho_{nf} V_{nf,mic}^2}{2}$$

3.5.4. Sonuçların Analizi (Anova)

Aynı deneyin birden fazla tekrarlanması ile sonuçların hedef (ortalama değer) etrafında dağılımı (standart sapma) da gösterilir. Bu dağılım ise deney sonuçlarının performansının (kalitesinin) daha doğru değerlendirilmesini sağlar. Sonuçlardan istenen değerlere göre "Daha Büyük, Daha Küçük veya Nominal Daha İyi" performans tipi seçilir. Isı transferi, ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı sonuçlarının büyük olması istendiği için "Daha büyük daha iyi", sürtünme faktörü sonuçlarının daha küçük olması istendiği için "Daha küçük daha iyi" performans tipi seçilmiştir. Bu performans özellikleri, "Karelerinin Ortalamasının Sapması, Mean-Squared Deviation, MSD" denen 3 çeşit ifade ile karşılaştırılır. Bunlar aşağıda verilmiştir:

Nominal daha iyi performans tipi için MSD ifadesi:

$$\begin{aligned}MSD_{nominal} &= \frac{(R_1 - R_0)^2 + (R_2 - R_0)^2 + (R_3 - R_0)^2 + \dots + (R_n - R_0)^2}{n} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - R_0)^2\end{aligned} \quad (3.27)$$

Daha küçük daha iyi performans tipi için MSD ifadesi:

$$MSD_{smaller} = \frac{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + \dots + R_n^2}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2 \quad (3.28)$$

Daha büyük daha iyi performans tipi için MSD ifadesi:

$$MSD_{bigger} = \frac{(1/R_1)^2 + (1/R_2)^2 + (1/R_3)^2 + \dots + (1/R_n)^2}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/R_i)^2 \quad (3.29)$$

Burada,

MSD : Karelerinin ortalamasının sapmasını (Mean-Squared Deviation)

R_i : Bir deneyde i sırasındaki deney sonucunu

R_o : Hedeflenen deney sonuçlarını

n : Deneyde tekrarlanan sonuçların sayısını gösterir (örn. bir deneyde 3 sonuç elde edilmesi).

Bu üç ifade, çok sayıda sonuçtan oluşan deney gruplarının birbirleri ile karşılaştırılmasını ve hangi grubun daha iyi performans gösterdiğini belirlemek için kullanılır. Bir deneyden elde edilen sonuçların MSD değeri, sonuçların istenen değerden sapmasını gösterdiği için, sonuçların büyük veya küçük olması istenmesinden bağımsız olarak MSD değerinin her zaman küçük olması gerekir. "Daha büyük daha iyi" performans tipinde, MSD değerlerinin küçük çıkabilmesi için deney sonuçlarının tersi alınır. Bu sayede deney sonuçlarının büyük ya da küçük olması durumuna bakılmadan, her zaman en küçük MSD değerine sahip olan deneyin en iyi performansa sahip olduğu belirlenir.

Deney sonuçlarının analizinde 3 yöntem kullanılır:

1. Sonuçların ortalamaları kullanılarak analiz (R_{avg})

Her deney bir kez yapılır ve bir sonuç elde edilir. Bu durumda ölçülen sonuçların ortalaması yani dönüştürülmeyen mutlak değerleri kullanılacağı için sonucun olması istenen "Kalite Karakteristiği, Performans Tipi" kullanılır.

2. Sonuçların standart sapmaları kullanılarak analiz (MSD)

Her deney birkaç kez tekrarlanır ve birden çok sonuç elde edilir. Bu durumda sonuçların sapmasını üzerinden elde edilen MSD değerleri kullanılır. Sapmanın (MSD'nin) küçük olması istendiği için her zaman "*Smaller is better*" kalite karakteristiği kullanılır.

3. Sonuçların Sinyal/Gürültü değerleri kullanılarak analiz (S/N)

MSD gibi her deney birkaç kez tekrarlanır ve birden çok sonuç elde edilir. Bu durumda sonuçların MSD dönüşümü üzerinden elde edilen S/N değerleri kullanılır. S/N, MSD ne kadar küçük ise o kadar büyük olur. MSD'nin küçük olması ve bu nedenle S/N'nin büyük olması istendiği için her zaman "*Bigger is better*" kalite karakteristiği kullanılır.

Sinyal/Gürültü (Signal/Noise, S/N) oranının ifadesi:

$$S/N = -10\log_{10}MSD \quad 3.30$$

MSD değerlerinin daha küçük olması daha iyi performans anlamına gelir. S/N ile elde edilen değer ise daha büyük olanı tercih edilir. Bu nedenle ifadeye negatif işaret eklendi. 10 çarpanı, desibel sonuç elde etmek için ölçekleme faktörü olarak kullanılır.

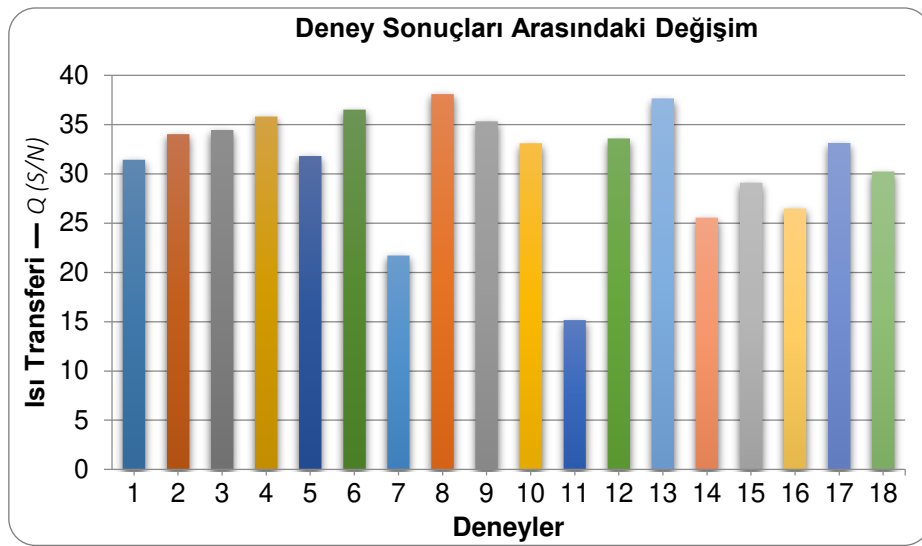
2. ve 3. analiz yöntemleri, bir deneyin birden fazla tekrar edilerek birden fazla sonuç içermesi durumunda kullanılabilir. Fakat 3. analiz yönteminin birkaç avantajı vardır: Sonuçların analizi logaritmik olarak yapıldığı için, daha geniş bir alanda dağılan sonuçların grafik olarak gösterilmesini sağlar. Hem ortalama hem de standart sapma etkilerini içerir. S/N analizde MSD değerlerinin tersine, analiz sonuçlarının büyük olanlarının seçimini sağlar.

3.5.4.1. Isı Transferi S/N sonucu

Isı transferi sonuçlarından elde edilen S/N değerleri Çizelge 3.24'de verilmiştir. İlk satır için hesaplar aşağıda ayrıca verilmiştir. Diğer satırlar da benzer şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.24 Isı transferi için S/N hesap Çizelgesi.

DENEY	FAKTÖRLER							SONUÇLAR				
	A-Tüp Malzemesi	B-Tüp İç Çapı (µm)	C-Akışkan Çeşidi	D-Hacimsel Derişim(%)	E-Giriş Sıcaklığı (°C)	F-Yüzey Sıcaklığı (°C)	G-Akışkan Debisi (L/dk)	Isı Transferi — Q			MSD Değeri	S/N Oranı
								Test 1	Test 2	Test 3		
1	1	1	1	1	1	1	1	R11	R12	R13	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	R21	R22	R23	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	R31	R32	R33	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	R41	R42	R43	4	4
5	1	2	2	2	3	3	1	R51	R52	R53	5	5
6	1	2	3	3	1	1	2	R61	R62	R63	6	6
7	1	3	1	2	1	3	2	R71	R72	R73	7	7
8	1	3	2	3	2	1	3	R81	R82	R83	8	8
9	1	3	3	1	3	2	1	R91	R92	R93	9	9
10	2	1	1	3	3	2	2	R101	R102	R103	10	10
11	2	1	2	1	1	3	3	R111	R112	R113	11	11
12	2	1	3	2	2	1	1	R121	R122	R123	12	12
13	2	2	1	2	3	1	3	R131	R132	R133	13	13
14	2	2	2	3	1	2	1	R141	R142	R143	14	14
15	2	2	3	1	2	3	2	R151	R152	R153	15	15
16	2	3	1	3	2	3	1	R161	R162	R163	16	16
17	2	3	2	1	3	1	2	R171	R172	R173	17	17
18	2	3	3	2	1	2	3	R181	R182	R183	18	18
Performans Toplamı: T												T
Toplam Performans Ortalaması: T _{avg}												T _{avg}



Şekil 3.53 Yapılan deneylere göre S/N cinsinden ısı transferi değişimi.

1. deney grubu (R11, R12, R13) için MSD değeri;

$$MSD_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/R_i)^2 = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{1}{R_{11}} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_{12}} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_{13}} \right)^2 \right]$$

1. deney grubu için S/N değeri:

$$S/N_1 = -10 \log MSD_1$$

S/N değerleri için performans toplamı:

$$T = \sum_{i=1}^N S/N_i \quad (3.31)$$

S/N değerleri için toplam performans ortalaması:

$$T_{avg} = \bar{T} = \frac{T}{N} \quad (3.32)$$

Burada,

$\bar{T}$: Toplam performans ortalamasını (tüm deney sonuçlarının ortalaması)

N : Yapılan toplam deney sayısını

3.5.4.2. Isı transferi için ortalama etkiler

Her bir faktörün belli bir seviyede alacağı ortalama etki değerleri Çizelge 3.25'te verildi. İlk satır için hesaplar aşağıda ayrıca verilmiştir. Diğer satırlar da benzer şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 3.25 Isı transferi için ortalama etkiler.

SEVİYE	FAKTÖRLER							
	A Tüp Malzemesi	B Tüp İç Çapı (µm)	C Akışkan Çeşidi	D Hacimsel Değişim (%)	E Giriş Sıcaklığı (°C)	F Yüzey Sıcaklığı (°C)	G Akışkan Debisi (mL/dk)	-
1	Aavg1	Bavg1	Cavg1	Davg1	Eavg1	Favg1	Gavg1	0
2	Aavg2	Bavg2	Cavg2	Davg2	Eavg2	Favg2	Gavg2	0
3	—	Bavg3	Cavg3	Davg3	Eavg3	Favg3	Gavg3	0

Her faktörün bir seviyedeki ortalama etkisi, faktörün seviyelerine karşılık gelen S/N değerlerinin ortalamasıdır. Herhangi bir faktör için ortalama etki aşağıdaki ifade ile verilir:

$$X_{avg,L} = \overline{X_L} = \frac{X_L}{N_{XL}} \quad (3.33)$$

$$X_L = \sum S/N_i \quad (3.34)$$

Burada,

$X_{avg,L} = \overline{X_L}$: X faktörünün L seviyesindeki ortalamasını

X_L : X faktörünün L seviyesine karşılık gelen S/N değerlerinin toplamını

N_{XL} : X faktörünün L seviyesine karşılık gelen S/N sayısını gösterir.

B faktörünün seviye 1 durumundaki ortalama etkisi (Bavg1), bu faktörün Çizelge 3.25.'de seviyesinin 1 olduğu S/N değerlerinin ortalaması alınarak bulunur.

$$A_{avg1} = \overline{A_1} = \frac{A_1}{N_{A1}} = \frac{S/N_1 + S/N_2 + \dots + S/N_9}{9}$$

$$B_{avg1} = \overline{B_1} = \frac{B_1}{N_{B1}} = \frac{S/N_1 + S/N_2 + S/N_3 + S/N_{10} + S/N_{11} + S/N_{12}}{6}$$

$$C_{avg1} = \overline{C_1} = \frac{C_1}{N_{C1}} = \frac{S/N_1 + S/N_4 + S/N_7 + S/N_{10} + S/N_{13} + S/N_{16}}{6}$$

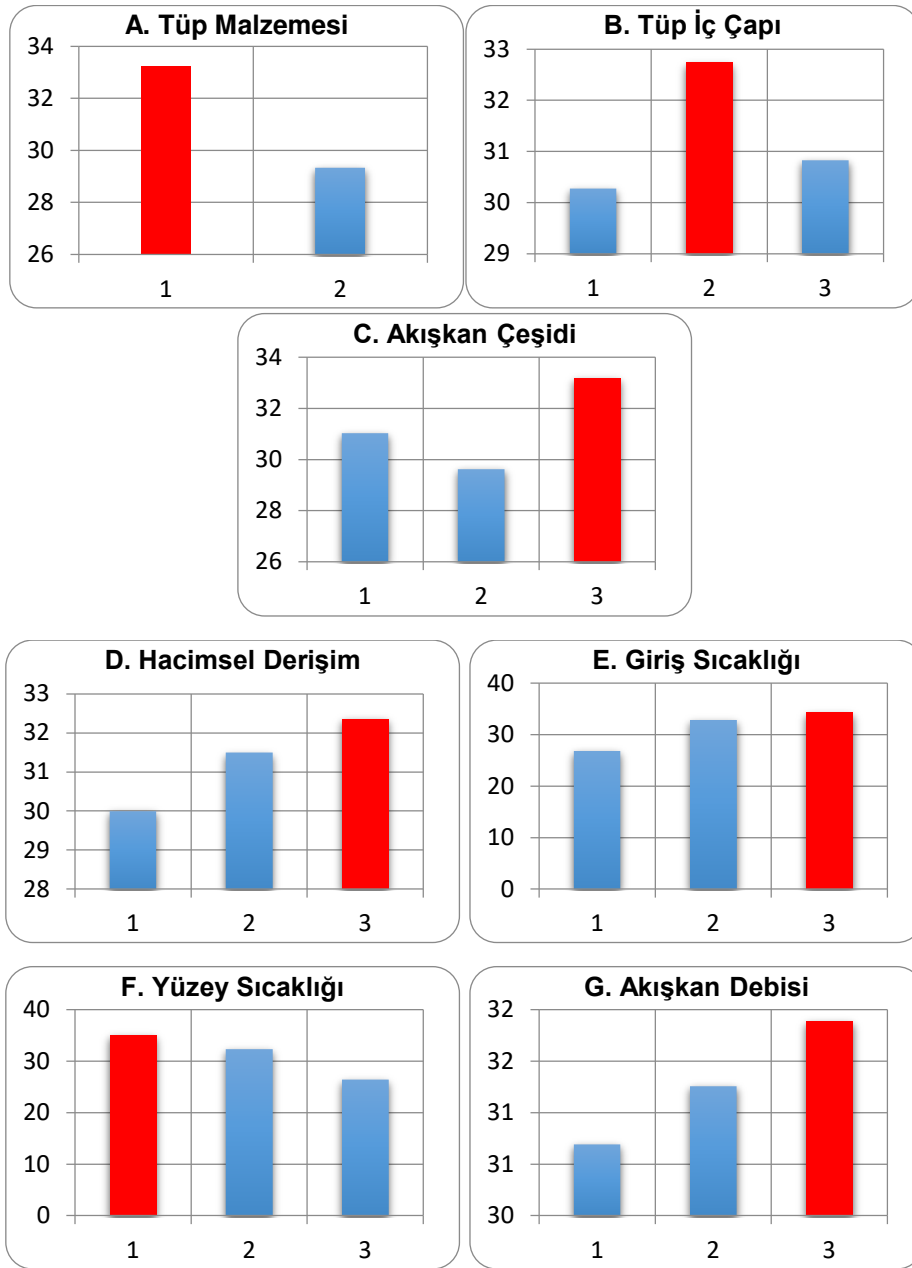
$$D_{avg1} = \overline{D_1} = \frac{D_1}{N_{D1}} = \frac{S/N_1 + S/N_4 + S/N_9 + S/N_{11} + S/N_{15} + S/N_{17}}{6}$$

$$E_{avg1} = \overline{E_1} = \frac{E_1}{N_{E1}} = \frac{S/N_1 + S/N_6 + S/N_7 + S/N_{11} + S/N_{14} + S/N_{18}}{6}$$

$$F_{avg1} = \bar{F}_1 = \frac{F_1}{N_{F1}} = \frac{S/N_1 + S/N_6 + S/N_8 + S/N_{12} + S/N_{13} + S/N_{17}}{6}$$

$$G_{avg1} = \bar{G}_1 = \frac{G_1}{N_{G1}} = \frac{S/N_1 + S/N_5 + S/N_9 + S/N_{12} + S/N_{14} + S/N_{16}}{6}$$

Çizelge 3.25'in grafik çizimi Şekil 3.54'te gösterilmiştir. Bu grafikler üzerinden faktörlerin optimum seviyeleri daha kolay tespit edilir.



Şekil 3.54 Isı transferi için faktör seviyelerinin ortalama etkisi

3.5.4.3. Isı transferi için varyans analizi (ANOVA)

Her bir faktörün ANOVA analizleri çizelge 3.27'de verilmiştir. Her bir sütun için bazı hesaplar başlıklar olarak ayrıca verilmiştir. Bu çizelgede, sonuçların ortalamaları ile analiz yerine S/N ile analiz yapıldığı için, R_i kullanılarak elde edilmesi gereken hesapların tümünde sadece çizelge 3.25'deki S/N_i değerleri dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

ANOVA analizinin amacı, hangi faktörün önemli, hangisinin önemsiz olduğunu, bunların sonuç üzerindeki bağıl etkilerini belirlemektir. Bir faktörün önemli olup olmama durumu ise "*önem testi, test of significance*" ile belirlenir. Bu testi geçemeyen faktörler önemsiz kabul edilir. Önem testi, önemli olup olmadığı kontrol edilecek faktörün güven seviyesi (veya önem seviyesi), istenen güven seviyesi ile karşılaştırarak yapılır. Faktörün güven seviyesi, istenen güven seviyesinden küçük ise bu faktör önemsizdir***. Bir faktörü önemsiz kabul etme işlemine "*birleştirme, pooling*" denir. Birleştirme ile faktörün etkisi hata terimine katılır. Önemsiz faktörlere birleştirme işlemi yapılması mutlaka tavsiye edilir. Bu yapılmadığında önemsiz faktörler önemli gibi görülür. Fakat aşırı yapılırsa da önemli faktörler önemsiz gibi görülebilir. Bu nedenle birleştirme işleminde, hatanın DOF (Degree of Freedom) değerinin, toplam deney DOF değerinin yaklaşık yarısı oluncaya kadar yapılması önerilir. Fakat önem testi, hata teriminin DOF değeri sıfırdan farklı olduğunda yapılabilir. Yine de, hatanın DOF değerinin sıfır olduğu durumda da birleştirme işlemi yapılabilir. Bunun için "Karelerin Toplamı" sütununda en küçük S değerine sahip olan faktörün etkisi, en büyük S değerine sahip faktörün etkisinin %10'u ve altında ise bu faktör kaldırılabilir (pooling). Bu işlem rasgele yapılmamalıdır. Bu şart yoksa kaldırılmamalıdır. Önem testi mümkünse, hangi faktörün kaldırılacağını belirlemede bu teste güvenilebilir. Hata terimi, birleştirilen faktör ile doğrudan bağlantılı olmadığı için, birleştirme işlemi sonucu hata teriminin yüzde etkisinde, kaldırılan faktörün yüzde etkisine eşit bir artış beklenmemelidir. Önem testi F çizelgeleri ile de yapılabilir. Bir faktörün hesapla elde edilen F değeri, F_α değeri ile karşılaştırılır. Bu F_α değeri, ilgili faktörün DOF değeri ve hatanın DOF değeri kullanılarak F_α çizelgelerinden (Faktörün DOF'u sütun, hata DOF'u satır) belirlenir. Faktörün F değeri, çizelgeden bulunan F_α değerinden küçükse faktör önemsizdir. F_α çizelgeleri farklı önem seviyelerinde hazırlanmıştır. Örn. $F_{0.1}$ çizelgesi $\alpha=0.10$ önem seviyesi veya $1-\alpha=0.90$ güven seviyesinde F çizelgesi olarak söylenir. Bu şekilde farklı güven seviyelerinde $F_{0.05}$, $F_{0.025}$, $F_{0.01}$ gibi birçok F_α çizelgesi bulunur (Roy 2010).

***Bu işlem Qualitek programı arka planında (Gamma fonksiyonu ile) yapıldığı için hesaplamaların nasıl yapıldığı belirtilmedi. ANOVA çizelgesindeki F oranı sütunu güven seviyesi hesabı için kullanılır (Roy 2001).

Yüzde etki kabaca "Karelerin Toplamı" sütunu incelenerek de belirlenebilir. Bu sütun aslında, her bir faktörün bireysel olarak ortalamadan sapmasının karesini gösterir. Fakat hata terimi bulunması nedeniyle, S_x/S_{Top} yaklaşık bir yüzde etki gösterir. Her bir faktörün karelerinin toplamının bu hatadan arındırılması gerekir. Karelerin toplamından hatanın neden olduğu etki çıkarılarak "Saf Toplam" bulunur. Böylece S'_A/S_{Top} ile yüzde etki belirlenir.

Son olarak "Güven Aralığı, *Confidence Interval*" ile optimum performansın alt ve üst sınırları belirlenir. Güven aralığı seçimi kişiye göre değişir fakat genellikle %85 – %95 alınır. Güven aralığı ne kadar küçük (örn. %50) ise optimum performans alt ve üst sınırları o kadar yakın (dar çan eğrisi), aralık ne kadar büyük (örn. %99) ise alt ve üst sınırlar o kadar genişir (geniş çan eğrisi). Doğrulama deneyleri ile elde edilen sonuçların ortalamasının bu sınırlar arasında kalıp kalmadığı güven aralığı ile kontrol edilir. %99 güven aralığı, doğrulama deneyleri ile elde edilen ortalama sonuçlar %99 olasılıkla bu istenen aralıkta olacak demektir. Bu da geniş bir alt ve üst sınır gerektirir. %50 güven aralığı ise, elde edilen ortalama sonuçların %50'sinin bu aralıkta olacağı demektir. Yani, daha net (nokta) ve dar aralıkta bir sonuç elde etmek için bir çeşit risk artışıdır. Doğrulama sonuçları sınırlar içinde ise seçilen faktörler ve varsa etkileşimler yeterli kabul edilir. Sonuçlar, sınırlar dışında çıkarsa ya seçilen faktörler yeterli değildir ya da bazı faktörler birbiri ile etkileşim oluşturup sonucun tutarsız çıkmasına neden olur. Böyle bir durumda önce mevcut faktörler için etkileşim faktörleri dikkate alınır, istenen doğrulama yine sağlanamazsa yapılabilirse ek faktörler de dikkate alınır. Güven aralığı çok yüksek alındığında (örn. %99), faktörleri birleştirme işleminde çoğunluk önemsiz hale geleceği için Qualitek programı yüksek güven aralığı seçildiği uyarısı yapar. Bu güven aralığının seçimi, hata DOF değerinin, toplam DOF değerinin yarısını çok geçmeyecek şekilde yapılmalıdır (Birleştirme işlemindeki gibi).

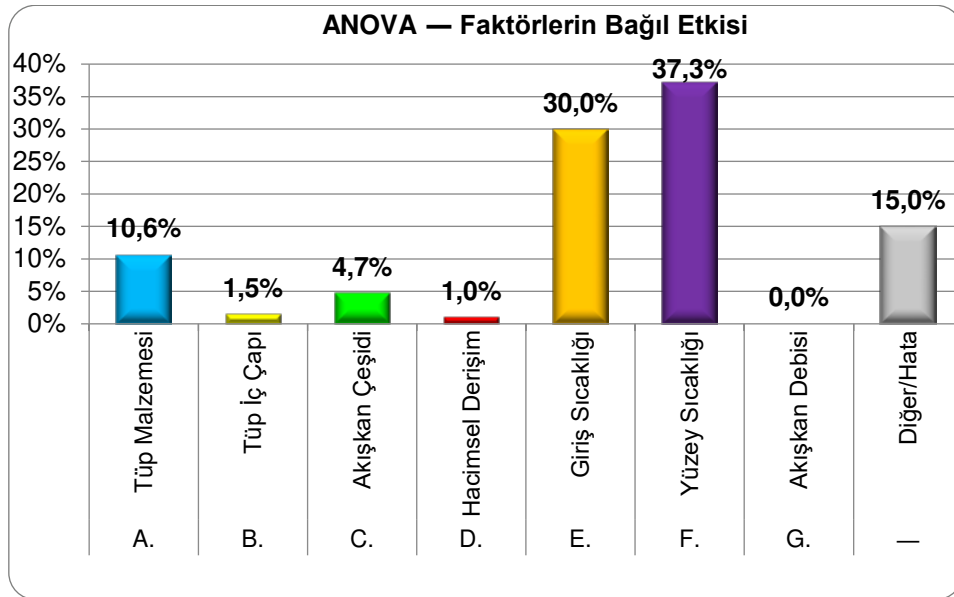
Güven aralığı hesabında "F çizelgeleri" kullanılır. Qualitek 4, F değeri hesabı için yaklaşık yöntem kullanır. Hata teriminin DOF değeri 3'ten büyük ise programın verdiği değerler doğrudur. Hata teriminin DOF değeri 3'ten küçük ise, bu bölgede F değerleri doğrusal durumdan uzaklaştığı için doğru F değeri hesaplanamaz. Hata teriminin DOF 3 sınırı, Qualitek programı kullanılıyorsa önem testi için de geçerlidir.

ANOVA çizelgesinde görülen hata terimi 3 nedenle oluşur: 1. Deneylere katılmayan faktörler (bütçe, zaman, dizi sınırı gibi nedenlerle), 2. Kontrol edilemeyen faktörler (ortam şartları, deney yapan kişinin uzmanlığı, maliyet), 3. Deneysel hatalar (deney tesisatı, kalibrasyon,

sensör, veri toplama ve işleme hataları). Hata sonuçları sadece deneysel hatalardan oluşmadığı için ANOVA çizelgesinde son satır "Hata" yerine "Diğer/Hata" ile gösterildi (Roy 2001).

Çizelge 3.26 Isı transferi için ANOVA analiz çizelgesi.

FAKTÖR		DOF	Karelerin Toplamı	Varyans	F Oranı	Saf Toplam	Yüzde Etki
		f_X	S_X	$g_X = \sigma_x^2$	F_X	S'_X	P_X
A.	Tüp Malzemesi	f_A	S_A	g_A	F_A	S'_A	P_A
B.	Tüp İç Çapı	f_B	S_B	g_B	F_B	S'_B	P_B
C.	Akışkan Çeşidi	f_C	S_C	g_C	F_C	S'_C	P_C
D.	Hacimsel Derişim	f_D	S_D	g_D	F_D	S'_D	P_D
E.	Giriş Sıcaklığı	f_E	S_E	g_E	F_E	S'_E	P_E
F.	Yüzey Sıcaklığı	f_F	S_F	g_F	F_F	S'_F	P_F
G.	Akışkan Debisi	f_G	S_G	g_G	F_G	S'_G	P_G
—	Diğer/Hata	f_{err}	S_{err}	g_{err}	F_{err}	S'_{err}	P_{err}
TOPLAM		f_{Top}	S_{Top}	g_{Top}	F_{Top}	S'_{Top}	P_{Top}



Şekil 3.55 Isı transferi için faktörlerin ANOVA grafiği

3.5.4.4. DOF değerleri

DOF, serbestlik derecesi (Degree of Freedom) olup sonuçların birbiri ile karşılaştırılması, ortogonal dizi seçimi ve varyans, saf toplam hesapları için kullanılır. 4 türü vardır (Çizelge 3.27).

Çizelge 3.27 Faktör, sütun, dizi ve deney için DOF değerleri.

Bir faktörün DOF değeri	Faktörün seviye sayısı 1 (örn. 2 seviyeli faktörün DOF değeri 1)
Bir sütunun DOF değeri	Sütunun seviye sayısı – 1 (örn. 4 seviyeli sütunun DOF değeri 3)
Bir dizinin DOF değeri	Dizideki tüm sütun DOF değerleri toplamı (örn. L4 dizisi DOF değeri 3)
Bir deneyin DOF değeri (Ortalama analiz)	Tüm deney sonuçlarının sayısı – 1 (örn. 3 tekrarlı 4 deney için DOF değeri 11)
Bir deneyin DOF değeri (S/N analiz)	Tüm S/N sonuçlarının sayısı – 1 (örn. 3 tekrarlı 4 deney için DOF değeri 3)
Hatanın DOF değeri	Toplamın DOF değeri – Tüm faktörlerin DOF değeri toplamı

Buna göre DOF değerleri Çizelge 3.28'te verildi.

Çizelge 3.28 Faktör, hata ve deney için DOF değerleri.

FAKTÖR	DOF (f)
A. Tüp Malzemesi	2-1 = 1
B. Tüp İç Çapı (µm)	3-1 = 2
C. Akışkan Çeşidi	3-1 = 2
D. Hacimsel Derişim (%)	3-1 = 2
E. Giriş Sıcaklığı (°C)	3-1 = 2
F. Yüzey Sıcaklığı (°C)	3-1 = 2
G. Akışkan Debisi (mL/dk)	3-1 = 2
Diğer/Hata	17-13 = 4
TOPLAM	18-1 = 17

3.5.4.5. Karelerin toplamı

Yüzde değerleri aynı olan faktörlerde, karelerin toplamı değerine bakılarak hangisinin eleneceğini belirlemek ve diğer sütundaki hesaplar için kullanılır.

Toplam satırı için karelerin toplamı aşağıdaki ifade ile verilir:

$$S_{Toplam} = \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{T})^2 = \left(\sum_{i=1}^N R_i^2 \right) - \frac{T^2}{N} \quad (3.35)$$

S/N değerleri için sonuçların toplamı,

$$T = \sum_{i=1}^N S/N_i \quad (3.36)$$

Burada,

S_{Top} : Tüm deneyin kareleri toplamını

R_i : S/N analizi için S/N değerlerini

N : Yapılan toplam deney sayısını (örn. L18 ile 3 tekrarlı 18 deney yapılması sonucu 54 fakat, S/N için 18)

T : Sonuçların toplamını gösterir.

Herhangi bir faktör için karelerin toplamı aşağıdaki ifade ile verilir:

$$S_X = \frac{X_1^2}{N_{X1}} + \frac{X_2^2}{N_{X2}} + \frac{X_3^2}{N_{X3}} + \frac{X_4^2}{N_{X4}} - \frac{T^2}{N} = \sum_{i=1}^L \frac{X_i^2}{N_{Xi}} - \frac{T^2}{N} \quad (3.37)$$

Burada,

S_X : X faktörünün kareleri toplamını

X_1 : X faktörünün 1 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamını

X_2 : X faktörünün 2 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamını

X_3 : X faktörünün 3 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamını

X_4 : X faktörünün 4 seviyesinin bulunmuşturğu sonuçların toplamını

N_{X1} : X faktörünün 1 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısını

N_{X2} : X faktörünün 2 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısını

N_{X3} : X faktörünün 3 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısını

N_{X4} : X faktörünün 4 seviyesinin bulunmuşturğu deney sayısını

L : X faktörünün seviye sayısını gösterir (Genellikle en fazla 4 olur, en az 2 seviye olabilir).

Bu ifadeye göre A faktörü için kareleri toplamı,

$$S_A = \frac{A_1^2}{N_{A1}} + \frac{A_2^2}{N_{A2}} - \frac{T^2}{N}$$

$$A_1 = S/N_1 + S/N_2 + S/N_3 + \dots + S/N_9$$

$$A_2 = S/N_{10} + S/N_{11} + S/N_{12} + \dots + S/N_{18}$$

$$N_{A1} = 9$$

$$N_{A2} = 9.$$

B faktörü için kareleri toplamı,

$$S_B = \frac{B_1^2}{N_{B1}} + \frac{B_2^2}{N_{B2}} + \frac{B_3^2}{N_{B3}} - \frac{T^2}{N}$$

$$B_1 = S/N_1 + S/N_2 + S/N_3 + S/N_{10} + S/N_{11} + S/N_{12}$$

$$B_2 = S/N_4 + S/N_5 + S/N_6 + S/N_{13} + S/N_{14} + S/N_{15}$$

$$B_3 = S/N_7 + S/N_8 + S/N_9 + S/N_{16} + S/N_{17} + S/N_{18}$$

$$N_{B1} = 6$$

$$N_{B2} = 6$$

$$N_{B3} = 6$$

$S_{err} = S_{Top} - \sum_{i:Faktörler} S_i$ şeklinde olur ve diğer faktörler için de benzer şekilde hesaplanır.

3.5.4.6. Varyans

Varyans, standart sapmanın karesidir ve bir deney grubunun hedef etrafındaki dağılımını (değişimini) gösterir. Herhangi bir faktör için varyans aşağıdaki ifade ile verilir:

$$\vartheta_X = \frac{S_X}{f_X} \quad (3.38)$$

Burada,

ϑ_X : X faktörünün varyansını

S_X : X faktörünün kareleri toplamını

f_X : X faktörünün DOF değerini gösterir.

Buna göre A faktörü için varyans,

$$\vartheta_A = \frac{S_A}{f_A},$$

B faktörü için varyans,

$\vartheta_B = \frac{S_B}{f_B}$, şeklinde olur ve diğer faktörler için de benzer şekilde hesaplanır.

3.5.4.7. F oranı

F oranı, bağımsız deney sonuçlarının varyansını ilişkilendiren istatistiksel bir değerdir. Güven seviyesi karşılaştırması ile faktörün önemli olup olmadığının belirlenmesini sağlar.

Herhangi bir faktör için F oranı aşağıdaki ifade ile verilir:

$$F_X = \frac{\vartheta_X}{\vartheta_{err}} \quad (3.39)$$

Burada,

F_X : X faktörünün F oranını

ϑ_X : X faktörünün varyansını

ϑ_{err} : Hata teriminin varyansını gösterir.

Buna göre A faktörü için F oranı,

$$F_A = \frac{\vartheta_A}{\vartheta_{err}}$$

B faktörü için F oranı,

$$F_B = \frac{\vartheta_B}{\vartheta_{err}}$$

şeklinde olur ve diğer faktörler için de benzer şekilde hesaplanır.

3.5.4.8. Saf toplam

Herhangi bir faktör için saf toplam aşağıdaki ifade ile verilir:

$$S'_X = S_X - \vartheta_{err} \times f_X \quad (3.40)$$

Burada,

S'_X : X faktörünün saf toplamını

S_X : X faktörünün kareleri toplamını

ϑ_{err} : Hata teriminin varyansını

f_X : X faktörünün DOF değerini gösterir.

Buna göre A faktörü için saf toplam,

$$S'_A = S_A - \vartheta_{err} \times f_A$$

B faktörü için saf toplam,

$$S'_B = S_B - \vartheta_{err} \times f_B$$

şeklinde olur ve diğer faktörler için de benzer şekilde hesaplanır.

3.5.4.9. Yüzde etki

Deneylere katılan faktörlerin birbirlerine göre bağlı etkilerini yüzde değer olarak gösterir. Deneye katılmayan faktörler için bilgi içermez. Bu sayede mevcut faktörler arasında hangisinin diğerine göre baskın olduğu, sonuca daha büyük etki yaptığı belirlenir. Belli bir güven seviyesi kabulü ile düşük yüzde etkiye sahip faktörlerin deneyden çıkarılabilmesini sağlar.

Herhangi bir faktör için yüzde etki aşağıdaki ifade ile verilir:

$$P_X = \frac{S'_X}{S_{Top}} \times 100 \quad 3.41$$

Burada,

P_X : X faktörünün yüzde etkisini

S'_X : X faktörünün saf toplamını

S_{Top} : Tüm deneyin kareleri toplamını gösterir.

Buna göre A faktörü için yüzde etki,

$$P_A = \frac{S'_A}{S_{Top}} \times 100$$

B faktörü için yüzde etki,

$$P_B = \frac{S'_B}{S_{Top}} \times 100$$

şeklinde olur ve diğer faktörler için de benzer şekilde hesaplanır. Ayrıca, toplam ve hata için yüzde etki,

$$P_{Top} = 100$$

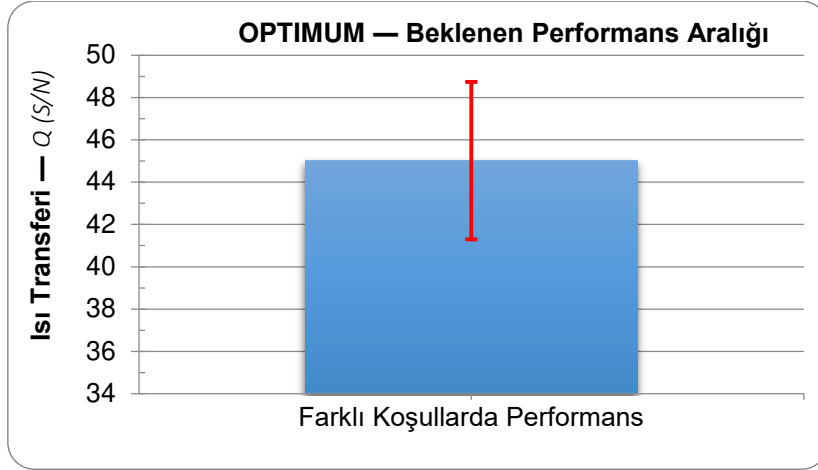
$$P_{err} = P_{Top} - \sum_{i=faktörler} P_i , \text{ şeklinde olur.}$$

3.5.4.10. Isı transferi için optimum seviyeler ve optimum performans

Şekil 3.54 incelenerek, her bir faktörün en iyi sonucu verdiği seviyeleri çizelge 3.29'a yazılmıştır. Bir faktörün katkısı, sonuç üzerinde elde edilebilen iyileşme miktarıdır.

Çizelge 3.29 Isı transferi için optimum seviye ve optimum performans çizelgesi.

FAKTÖR		Optimum Seviye	Seviye Açıklaması	Katkı
A.	Tüp Malzemesi			C_{A1}
B.	Tüp İç Çapı			C_{B2}
C.	Akışkan Çeşidi			C_{C1}
D.	Hacimsel Değişim			C_{D1}
E.	Giriş Sıcaklığı			C_{E1}
F.	Yüzey Sıcaklığı			C_{F2}
G.	Akışkan Debisi			C_{G3}
Tüm Faktörlerden Gelen Toplam Katkı				C_{Total}
Geçerli Toplam Performans Ortalaması				$\bar{T}$
Optimum Seviyelerde Beklenen Optimum Performans (S/N)				R_{opt}
Güven Aralığı			C.L.	$\pm C.I.$
Optimum Performans			Minimum	Maksimum
Optimum Performans Aralığı: $Q (S/N)$			$R_{opt} - C.I.$	$R_{opt} + C.I.$
Optimum Performans Aralığı: $\sim Q (W)$			Q_{min}	Q_{max}



Şekil 3.56 Optimum ısı transferi şartlarında S/N cinsinden beklenen ısı transferi aralığı.

Herhangi bir faktörün belirlenen seviyedeki katkısı,

$$C_{XL} = \bar{X}_L - \bar{T} \quad (3.42)$$

şeklinde verilir. Burada,

C_{XL} : X faktörünün L seviyesinde performansa katkısını

$\bar{X}_L$: X faktörünün L seviyesindeki ortalamasını (Denklem 3.31)

$\bar{T}$: Tüm deneylerin performans ortalamasını gösterir (Denklem 3.30).

Buna göre A faktörünün 1 seviyesindeki katkısı,

$$C_{A1} = \bar{A}_1 - \bar{T}$$

Buna göre B faktörünün 2 seviyesindeki katkısı,

$$C_{B2} = \bar{B}_2 - \bar{T}$$

şeklinde olur ve diğer faktörler için de benzer şekilde hesaplanır.

Tüm faktörlerden gelen toplam katkı,

$$C_{Total} = \sum_{i=faktörler} C_i$$

Optimum seviyelerde beklenen optimum performans ise, toplam performans ortalamasına tüm faktörlerden gelen toplam katkı eklenerek belirlenir.

$$R_{opt} = \bar{T} + C_{Total} \quad (3.43)$$

Buradan elde edilen "Optimum Seviyelerde Beklenen Optimum Performans", belli bir tolerans (güven aralığı) ile birlikte verilir. Güven aralığı, optimum seviyeler kullanılarak doğrulama deneyleri yapıldığında, elde edilen sonuçların ortalama performansının hangi aralık içinde olacağını belirler.

Güven aralığı aşağıdaki gibi verilir:

$$C.I. = \left[\frac{F(n_1, n_2) \times \vartheta_{err}}{N_{eff}} \right]^{0.5} \quad (3.44)$$

$$N_{eff} = \frac{N_{SN}}{1 + DOF_{optimum faktörler}} \quad (3.45)$$

Burada,

$C.I.$: Güven aralığını (Confidence Interval)

$F(n_1, n_2)$: İki DOF değerine göre hazırlanmış belli güven seviyelerine göre F çizelgelerini,

n_1 : Ortalama performansın DOF değerini (burada her zaman 1 olur)

n_2 : Hata teriminin DOF değerini

ϑ_{err} : Hata teriminin varyansını

N_{eff} : Etkin tekrar sayısını

N_{SN} : Toplam sonuç sayısını veya toplam S/N sayısını (adedini)

$DOF_{optimum faktörler}$: Optimum seviyede ortalama performansı veren faktörlerin DOF değerleri toplamını gösterir.

Böylece "Optimum Performans $\pm$ C.I." şeklinde alt ve üst sınırı olan bir "Optimum Performans Aralığı" elde edilir.

$$R_{opt,CI} = R_{opt} \pm C.I. \quad (3.46)$$

Bu sonuç yeterli olmakla birlikte, S/N cinsinden sonuç içerdiği için, ya doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar S/N değerine çevrilmeli ya da sonuçların yaklaşık olarak ne seviyede çıkması gerektiğini öğrenmek için Çizelge 3.30.'da elde edilen optimum performans değeri, önce 3.27 denklemi ile MSD değerine, sonra 3.26 denklemi ile R sonucuna dönüştürülür. Elde edilen MSD değeri, 3.3 denklemi ile R (deneyde elde edilecek ortalama performans) sonucuna dönüştürülür (**Not:** Sürtünme faktörü durumunda "*Smaller is better*" performans tipi nedeniyle 3.27 denklemi kullanılır).

Her bir deney sonucu için birçok R değeri bulunacağından çözüm yapılamaz. Bu nedenle şöyle bir kabul yapılır: Doğrulama deneyleri ile elde edilen sonuçlar belli bir ortalama (performans ortalaması) etrafında dağılır. Deney yapmadan bu sonuçlar bilinemeyeceği için, tüm değerlerin beklenen performans ortalaması (R_{epa}) değerine sahip olduğu kabul edilerek MSD ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/R_{epa})^2 = \frac{1}{n} \times n \times (1/R_{epa})^2 = (1/R_{epa})^2$$

$$1/R_{epa} = MSD^{0.5}$$

$$R_{epa} = 1/MSD^{0.5} = (1/10^{-(S/N)/10})^{0.5}$$

Doğrulama deneyleri ile elde edilen sonuçların ortalamasının bu R_{epa} sonucu etrafında dağılması beklenir. Dağılım alt ve üst sınırları ise, denklem 3.20'deki (optimum performans aralığı) üst ve alt limitler için, yukarıdaki S/N'den MSD'ye ve MSD'den R_{epa} 'ya benzer işlemler yapılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir. Isı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörleri için tekrar yapılmadı.

3.5.4.11. Isı Taşınım Katsayısı

Isı transferi için yapılan aynı işlemler ısı taşınım katsayısı için de yapılmıştır.

3.5.4.12. Nusselt Sayısı

Isı transferi için yapılan aynı işlemler Nusselt sayısı için de yapılmıştır.

3.5.4.13. Sürtünme Faktörü

Isı transferi için yapılan aynı işlemler sürtünme faktörü için de yapılmıştır.

3.5.5. Sonuçların Doğrulanması

Tolerans (güven) aralığında bulunan optimum performans değerlerinin doğrulanması için son deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelge 3.30'da verilmiştir.

Çizelge 3.30 Beklenen optimum performans aralığı ve elde edilen ortalama performanslar.

DENEY	Optimum Performans Aralığı	Doğrulama Deneyleri Ortalaması	Doğrulama Deneyleri Ortalaması (S/N Sonuçlar)
Isı Transferi – Q (W)	$R_{opt,Q} \pm C.I.$		
Isı Taşınım Katsayısı – h (W/m ² K)	$R_{opt,h} \pm C.I.$		
Nusselt Sayısı– Nu	$R_{opt,Nu} \pm C.I.$		
Sürtünme Faktörü– f	$R_{opt,f} \pm C.I.$		

Doğrulama deneyleri ile elde edilen sonuçların ortalaması, %95 güven seviyesi* ile optimum performans aralığı içinde kalırsa elde edilen sonuçlar doğrudur. %20 ısı transferi artışı için faktörlerin optimum seviyeleri Çizelge 3.31'de verilmiştir.

*%5 önem seviyesi de denir ve 100 deneyin 95'inin ortalaması optimum performans aralığı içinde kalır anlamına gelir.

Çizelge 3.31 Örnek Optimum performans için faktör seviyeleri.

FAKTÖR		Optimum Seviye	Seviye Açıklaması
A.	Tüp Malzemesi	1	SS
B.	Tüp İç Çapı	2	750 µm
C.	Akışkan Çeşidi	3	ZnO
D.	Hacimsel Derişim	3	%1.0
E.	Giriş Sıcaklığı	3	60 °C
F.	Yüzey Sıcaklığı	1	10 °C
G.	Akışkan Debisi	3	50 mL/dk

Çizelge 3.31 şartlarında en iyi sonuç elde edilir. Aynı şartlarda saf su ile de deney yapılır. Bu iki sonuç karşılaştırılarak % değişim belirlenir.

3.5.6. Taguchi Yöntemi İle Belirlenen Deneylerin Yapılması

Deneyler yapılmadan önce deney tesisatından alınan verilerin doğruluğunu göstermek için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Yukarıdaki çizelge 3.31’de belirlenen deneyler, hesaplamalara deneysel hataları ve gürültü faktörlerini dahil etmek için rasgele bir sırada yapılmış, sıcaklık, basınç, debi ölçümleri ile elde edilen ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü deney sonuçları aşağıdaki çizelge 3.32’ye yazılmıştır. Daha anlamlı sonuç elde etmek, standart sapmayı da dikkate almak için her bir deney farklı zaman aralıklarında üç defa tekrarlanmıştır.

Çizelge 3.32 Deney sonuçları.

DENEY	Isı Transferi Q (W)			Isı Taşınım Katsayısı h (W/m ² K)			Nusselt Sayısı Nu			Sürtünme Faktörü f			Sürtünme Basınç Kaybı ΔP (bar)		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 3
1	39,019	38,603	38,755	7191	7069	7103	4,351	4,276	4,296	0,12082	0,12082	0,12126	2,74	2,75	2,67
2	45,250	44,889	45,899	10660	10553	10741	6,075	6,015	6,120	0,08001	0,08001	0,07879	5,56	5,48	5,58
3	33,147	33,901	33,490	10741	11105	10908	5,859	6,059	5,950	0,08598	0,08598	0,08156	12,45	11,81	12,24
4	55,997	55,380	55,723	5862	5825	5855	6,728	6,690	6,722	0,03911	0,03911	0,04069	0,17	0,18	0,17
5	27,246	27,548	27,149	7019	7069	6817	7,860	7,916	7,633	0,08409	0,08409	0,07561	0,06	0,05	0,06
6	46,156	45,535	46,062	3368	3354	3377	3,794	3,780	3,805	0,07227	0,07227	0,08123	0,16	0,18	0,16
7	12,563	12,347	12,347	2650	2648	2596	3,926	3,923	3,845	0,09683	0,09683	0,08711	0,05	0,04	0,05
8	115,274	115,279	115,233	7469	7506	7414	11,303	11,360	11,216	0,02406	0,02406	0,01936	0,03	0,02	0,03
9	38,730	38,468	38,730	3464	3446	3483	5,339	5,311	5,367	0,19929	0,19929	0,22892	0,03	0,04	0,04
10	38,448	38,402	38,686	6320	6361	6323	3,393	3,416	3,393	0,02964	0,02964	0,02935	2,07	2,05	2,09
11	22,969	22,145	24,311	14218	14047	14915	8,184	8,090	8,582	0,03203	0,03203	0,03175	4,52	4,48	4,57
12	36,723	36,957	36,916	5394	5445	5439	3,109	3,139	3,135	0,02354	0,02354	0,02310	0,54	0,53	0,55
13	69,057	69,538	68,782	3758	3775	3731	4,138	4,157	4,109	0,03645	0,03645	0,03622	0,16	0,16	0,16
14	23,152	22,946	23,138	3059	3026	3052	3,449	3,412	3,441	0,08574	0,08574	0,08294	0,06	0,06	0,06
15	13,594	13,738	13,690	2309	2321	2311	2,616	2,628	2,617	0,06531	0,06531	0,06992	0,14	0,15	0,13
16	16,906	17,044	17,043	3956	4071	4053	5,698	5,864	5,837	0,18088	0,18088	0,16315	0,03	0,03	0,03
17	40,804	40,422	41,019	1559	1551	1563	2,365	2,353	2,371	0,23453	0,23453	0,21887	0,12	0,11	0,11
18	29,032	29,478	29,306	2447	2478	2473	3,730	3,775	3,768	0,09732	0,09732	0,10014	0,22	0,20	0,20

3.5.6.1. Sonuçların Analizi

3.5.6.1.1. Isı Transferi için İşaret/Gürültü (Signal/Noise, S/N)* sonuçları

Isı transferi sonuçlarından elde edilen S/N değerleri çizelge 3.33'te verilmiştir. Bu çizelgeden elde edilen deney sonuçları arasındaki değişim grafiği de şekil 3.55'te verilmiştir.

*Taguchi ile deney analizinde, optimum seviyelerin belirlenmesi için üç yöntem bulunur:

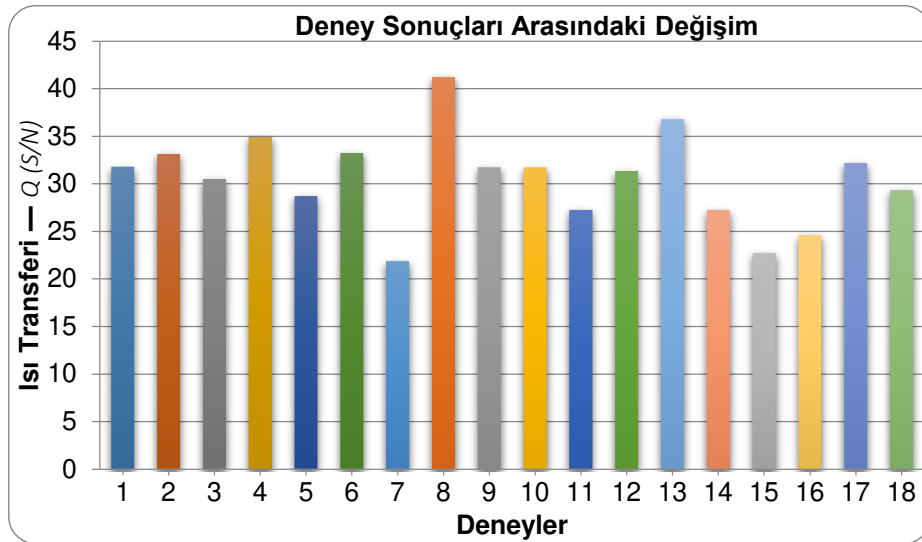
1. Deney sonuçlarının ortalaması,
2. Deney sonuçlarının standart sapması,
3. Deney sonuçlarının işaret/gürültü (S/N) oranı.

Birinci yöntemde her deney bir kez yapılır, sonuçlar doğrudan kullanılır. Dar aralıkta yayılan basit sonuçlar ve tekrarı mümkün olmayan deneyler için uygundur. Belirsizlik ve sapma büyük çıkabilir. İkinci yöntemde her deney birkaç kez yapılır, standart sapma üzerinden işlem yapılır. İyi sonuç verir. Sadece deney sonucu ortalaması değil, sonuçların ortalama etrafında dağılımı da dikkate alınır. Fakat standart sapmanın mümkün olduğu kadar küçük olması istendiği için ondalık sayı yuvarlamaları nedeniyle sapma artabilir.

Üçüncü yöntemde her deney birkaç kez yapılır. İşaret/Gürültü (S/N) oranı üzerinden işlem yapılır. Standart sapmanın logaritmik bir dönüşümle dönüştürülmesi ile elde edilir. S/N cinsinden daha geniş aralıkta yayılan sonuçlar elde edilir. Her zaman büyük olan S/N oranı daha iyidir. Böylece standart sapma gibi çok küçük sayılarla işlem yapılmaz. En iyi yakınsama bu yöntemle elde edilir.

Çizelge 3.33 Isı transferi için S/N sonuçları.

DENEY	FAKTÖRLER ve SEVİYELER							SONUÇLAR			HESAPLAR	
	A	B	C	D	E	F	G	Isı Transferi – Q (W)			MSD Değerleri	S/N Oranı
	Tüp Malzemesi	Tüp İç Çapı	Akışkan Çeşidi	Hacimsel Derişim	Giriş Sıcaklığı	Yüzey Sıcaklığı	Akışkan Debisi	Test 1	Test 2	Test 3		
1	1	1	1	1	1	1	1	R11 39,019	R12 38,603	R13 38,755	MSD1 6,65E-04	SN1 31,775
2	1	1	2	2	2	2	2	45,250	44,889	45,899	4,86E-04	33,130
3	1	1	3	3	3	3	3	33,147	33,901	33,490	8,91E-04	30,503
4	1	2	1	1	2	2	3	55,997	55,380	55,723	3,22E-04	34,917
5	1	2	2	2	3	3	1	27,246	27,548	27,149	1,34E-03	28,727
6	1	2	3	3	1	1	2	46,156	45,535	46,062	4,74E-04	33,239
7	1	3	1	2	1	3	2	12,563	12,347	12,347	6,48E-03	21,881
8	1	3	2	3	2	1	3	115,274	115,279	115,233	7,53E-05	41,234
9	1	3	3	1	3	2	1	38,730	38,468	38,730	6,70E-04	31,741
10	2	1	1	3	3	2	2	38,448	38,402	38,686	6,74E-04	31,712
11	2	1	2	1	1	3	3	22,969	22,145	24,311	1,88E-03	27,269
12	2	1	3	2	2	1	1	36,723	36,957	36,916	7,36E-04	31,332
13	2	2	1	2	3	1	3	69,057	69,538	68,782	2,09E-04	36,793
14	2	2	2	3	1	2	1	23,152	22,946	23,138	1,88E-03	27,264
15	2	2	3	1	2	3	2	13,594	13,738	13,690	5,35E-03	22,718
16	2	3	1	3	2	3	1	16,906	17,044	17,043	3,46E-03	24,607
17	2	3	2	1	3	1	2	40,804	40,422	41,019	6,02E-04	32,202
18	2	3	3	2	1	2	3	29,032	29,478	29,306	1,17E-03	29,329
Performans Toplamı: T												550,371
Toplam Performans Ortalaması: Tavg												30,576



Şekil 3.57 Yapılan deneylere göre ısı transferi değişimi.

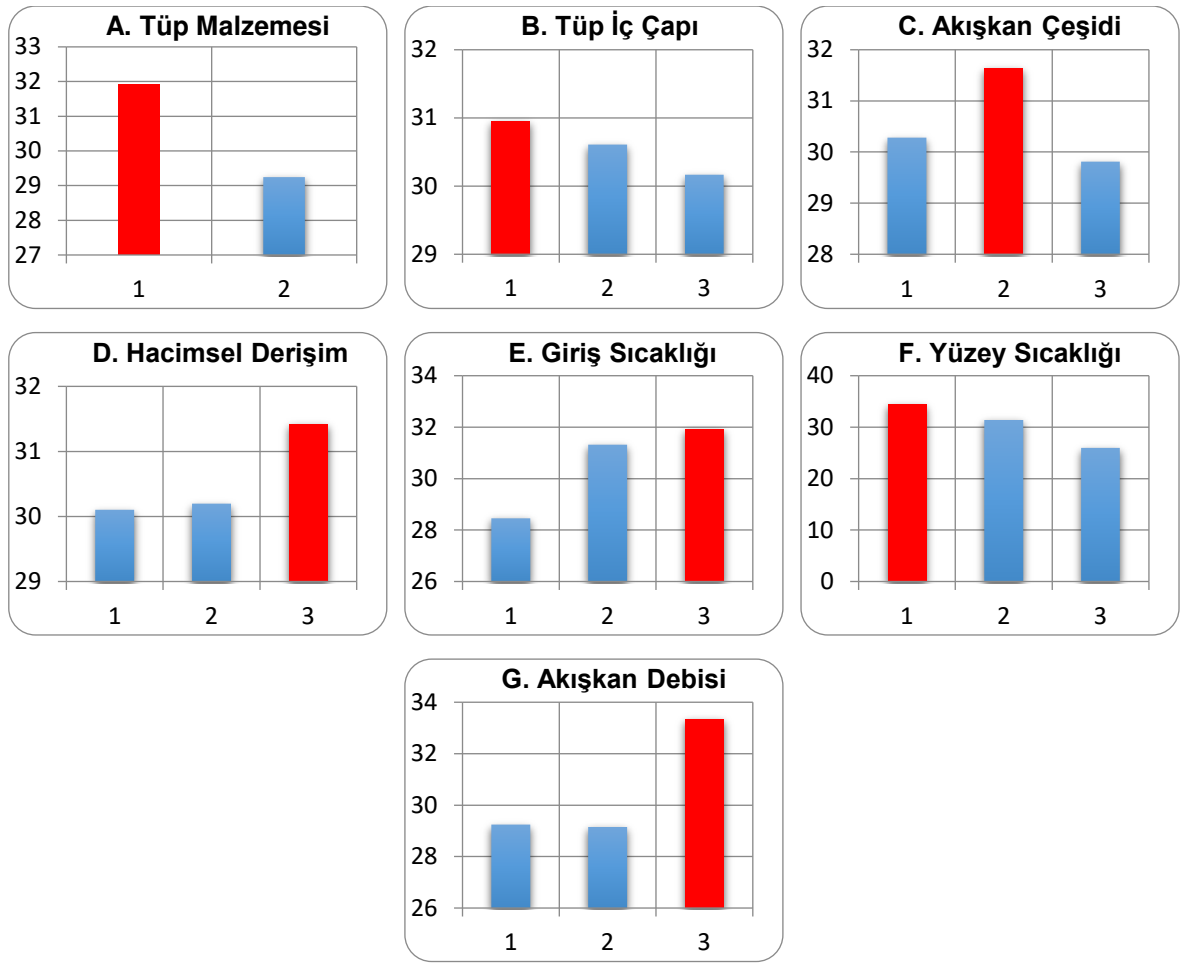
3.5.6.1.2. Isı transferi için ortalama etkiler

Her bir faktörün belli bir seviyede yapacağı ortalama etki değerleri çizelge 3.34'de verilmiştir.

Çizelge 3.34 Isı transferi için ortalama etkiler.

SEVİYE	FAKTÖRLER							
	A	B	C	D	E	F	G	-
	Tüp Malzemesi	Tüp İç Çapı	Akışkan Çeşidi	Hacimsel Derişim	Giriş Sıcaklığı	Yüzey Sıcaklığı	Akışkan Debisi	-
1	Aavg1 31,905	Bavg1 30,953	Cavg1 30,281	Davg1 30,103	Eavg1 28,459	Favg1 34,429	Gavg1 29,241	0
2	29,247	30,610	31,638	30,199	31,323	31,349	29,147	0
3	—	30,166	29,810	31,427	31,946	25,951	33,341	0

Çizelge 3.34'ün grafik çizimi aşağıda gösterilmiştir. Bu grafikler üzerinden faktörlerin optimum seviyeleri daha kolay tespit edilebilir. S/N cinsinden sonuçlarda ilgili parametrenin performans tipine (ısı transferi için büyük, sürtünme faktörü için küçük değer daha iyi şeklinde) bakılmasına gerek kalmadan, büyük olan değer her zaman en iyi seviyeyi gösterir. Bu nedenle aşağıdaki grafiklerde performans tipinden bağımsız olarak en büyük değerler seçilmiştir.



Şekil 3.58 Isı transferi için faktörlerin ortalama etki grafikleri.

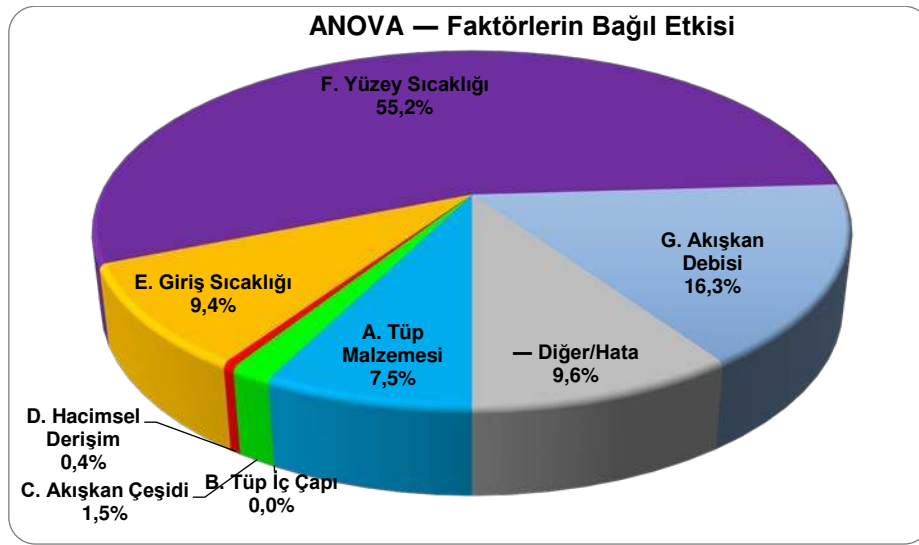
3.5.6.1.3. Isı transferi için varyans analizi (ANOVA, Analysis of Variance)

Her bir faktörün ANOVA analizleri Çizelge 3.35'de verilmiştir.

Çizelge 3.35 Isı transferi için ANOVA analiz çizelgesi.

FAKTÖR		DOF	Karelerin Toplamı	Varyans	F Oranı	Saf Toplam	Yüzde Etki
		f_X	S_X	$\vartheta_X = \sigma_x^2$	F_X	S_X'	P_X
A.	Tüp Malzemesi	1	31,791	31,791	13,317	29,404	7,50%
B.	Tüp İç Çapı	2	1,872	0,936	0,392	0,000	0,00%
C.	Akışkan Çeşidi	2	10,802	5,401	2,262	6,027	1,54%
D.	Hacimsel Derişim	2	6,535	3,268	1,369	1,761	0,45%
E.	Giriş Sıcaklığı	2	41,495	20,747	8,691	36,720	9,37%
F.	Yüzey Sıcaklığı	2	221,007	110,503	46,288	216,232	55,18%
G.	Akışkan Debisi	2	68,803	34,401	14,410	64,028	16,34%
—	Diğer/Hata	4	9,549	2,387	—	—	9,62%
TOPLAM		17	391,853	—	—	—	100,00%

Yüzde etki sütunu, ısı transferi sonuçlarının faktör seviyelerindeki değişime ne kadar duyarlı olduğunu gösterir. Yine buradaki "Diğer/Hata" ile gösterilen yüzde değer ise deneylere dahil edilmeyen faktörleri (bütçe, zaman, dizi boyutları nedeniyle), kontrol edilemeyen faktörleri (ortam şartları, deney yapan kişinin uzmanlığı, maliyet) ve varsa deneysel hataların (deney tesisatı, veri toplama ve işleme hataları) bağıl etkisini gösterir. Hata sonuçları sadece deneysel hatalardan oluşmadığı için ANOVA çizelgesinde "Diğer/Hata" ile gösterildi. Sonuç olarak ısı transferi sonuçlarına %9,6 etki eden bir hata terimi mevcuttur. Buradan (eğer varsa) deneysel hatanın %9,6'dan küçük olduğu yorumu çıkarılabilir. Çizelge 3.35'in grafik gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.59 Isı transferi için faktörlerin ANOVA grafiği.

Bu grafikten görüldüğü gibi tüm faktörlerin yüzde etkileri toplamı %100 olur. Seçilen faktör ve seviye şartları için, ısı transferinde en etkili faktörün yüzey sıcaklığı olduğu, en az etkili olan faktörün ise tüp iç çapı olduğu görülmüştür. Fakat buradaki değerler deneylere katılan faktörlere ve seviyelere göre değişeceği için bağıl değerlerdir ve dikkatli değerlendirilmelidir. Örneğin yüzey sıcaklığı seviyeleri 10-25-40°C yerine 10-15-20°C alınsaydı, bağıl etki nedeniyle yüzey sıcaklığının yüzde etkisi azalacak, azalan değer diğer faktörlere dağılacaktır.

3.5.6.1.4. Isı transferi için optimum seviyeler ve performans

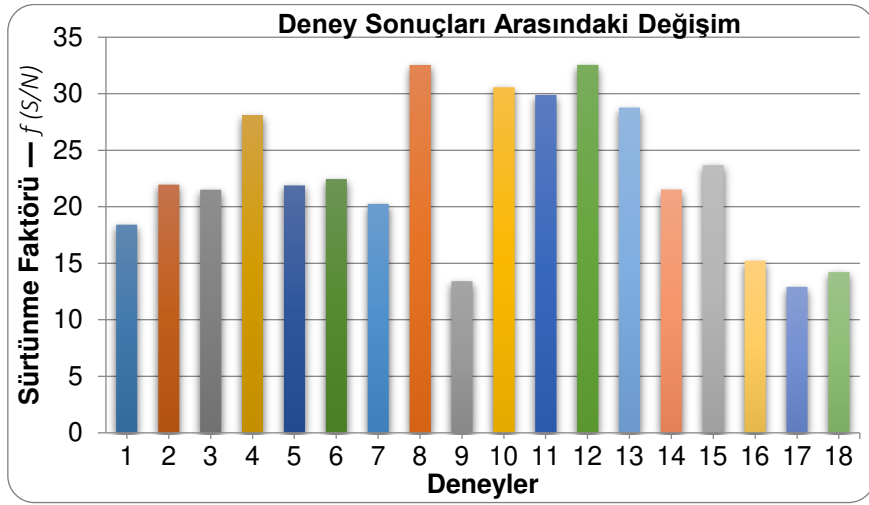
Isı transferinde en iyi sonucu elde etmek için her bir faktörün alması gereken optimum seviyeler çizelge 3.36'da verilmiştir.

Çizelge 3.36 Isı transferi için optimum seviye, faktör katkısı ve performans çizelgesi.

FAKTÖR		Optimum Seviye	Seviye Açıklaması	Katkı
A.	Tüp Malzemesi	1	SS	1,329
B.	Tüp İç Çapı	1	400 µm	0,377
C.	Akışkan Çeşidi	2	TiO ₂	1,061
D.	Hacimsel Derişim	3	%1.0	0,850
E.	Giriş Sıcaklığı	3	60°C	1,370
F.	Yüzey Sıcaklığı	1	10°C	3,853
G.	Akışkan Debisi	3	50 mL/dk	2,764
Tüm Faktörlerden Gelen Toplam Katkı				11,605
Geçerli Toplam Performans Ortalaması				30,576
Optimum Seviyelerde Beklenen Performans (S/N)				42,181
Güven Aralığı			90%	2,905
Optimum Seviyelerde			Minimum	Maksimum
Performans Aralığı: $\bar{Q}$ (S/N)			39,276	45,086
Performans Aralığı: $\sim Q$ (W)			92,007	179,603

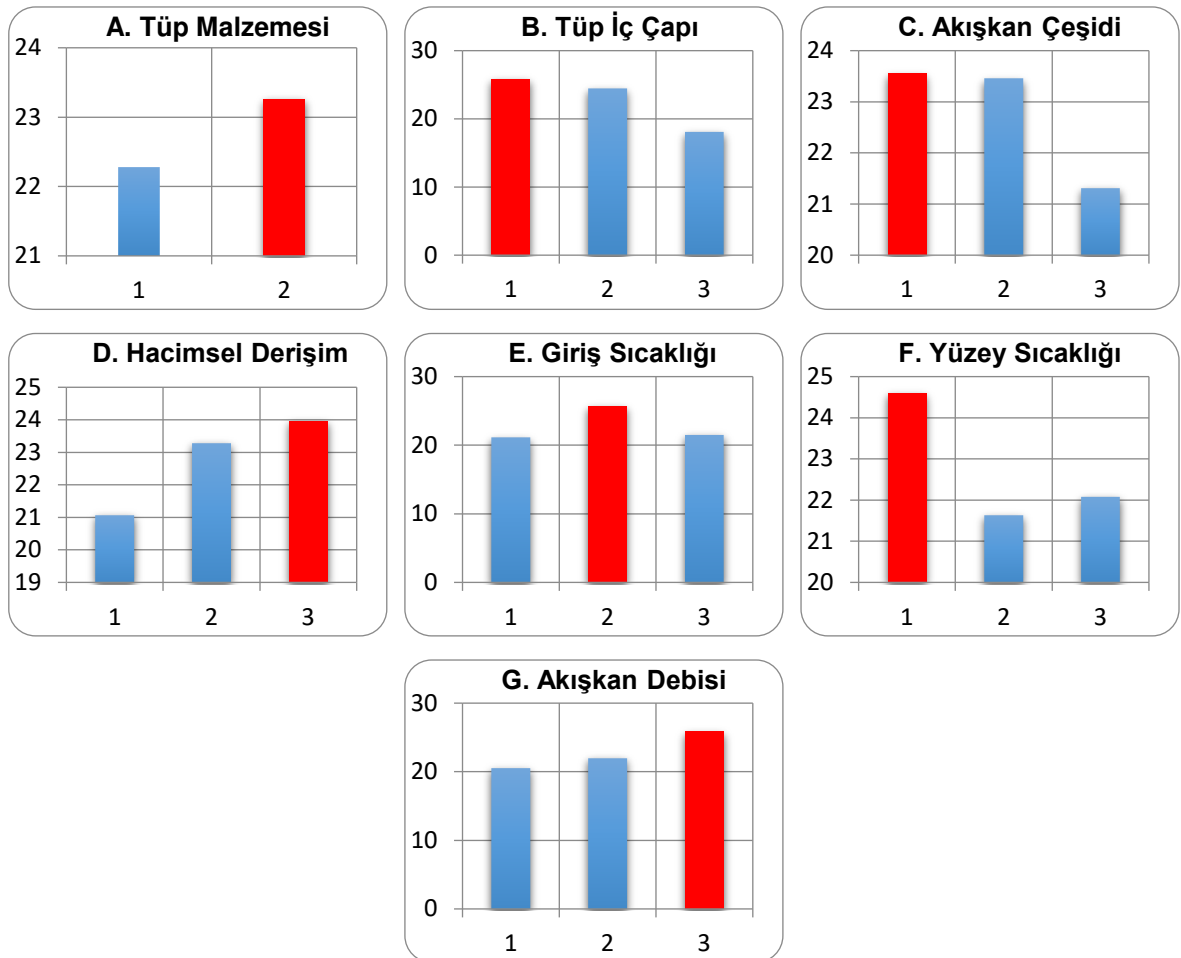
Çizelge 3.36'ya göre optimum seviyelerden gelen katkı ile performans ortalaması artırılır ve optimum seviyelerde beklenen performans elde edilir. Bu performans sonucuna belli güven aralığı limitleri eklenerek, bu şartlarda yapılan bir deneyin sonucunun hangi aralıkta çıkması gerektiği tahmin edilir. Burada güven aralığı %90, bu sonuçların sağlanıp sağlanmadığının kontrolünde yapılan 100 deneyin 90 tanesinin performans aralığı içinde kalacağı anlamına gelir. Yapılan doğrulama deneylerinde belli bir ortalama etrafında dağılan çan eğrisi oluşur. Güven aralığını arttırmak, performans aralığını arttıracığı için çok yüksek değer seçmek doğrulama deneylerinin bu aralık içinde kalma şansını artırır. Fakat çok geniş bir aralık elde edileceği için anlamsız olabilir. Güven aralığını azaltmak ise, performans aralığını daraltır. Daha dar bir alanda sonuçların yığılması beklentisini oluşturur. Fakat dar aralık nedeniyle sonuçların aralık dışına dağılımını yanlış olarak değerlendirmeye yol açabilir. Bu nedenle deneye özgü olarak belirlenir. Kesin bir kural olmamakla birlikte genellikle %80 ve %99 arası tercih edilir. Çalışmalarımızda güven seviyesi için %90 kabul edilmiştir. Çizelge 3.36 ile elde edilen beklenen performans aralığı grafiği aşağıda verilmiştir. Çizelge 3.36'ya göre, %90 güven aralığı ve optimum seviyelerde doğrulama deneyleri yapılması durumunda, ısı transferi için S/N cinsinden beklenen performans ortalaması 42.181 olurken, sonuçların bu ortalama etrafında ± 2.905 bandında dağılması beklenir. Bu S/N değerlerin gerçek birimlere çevrilmesi durumunda, beklenen performans aralığı yaklaşık olarak 92.007 ile 179.603 W arasında olacaktır.

3.5.6.1.5. Sürtünme Faktörü için S/N sonuçları



Şekil 3.60 Yapılan deneylere göre sürtünme faktörü değişimi.

3.5.6.1.6. Sürtünme faktörü için ortalama etkiler



Şekil 3.61 Sürtünme faktörü için faktörlerin ortalama etki grafikleri.

Şekil 3.61 incelendiğinde, düşük sürtünme faktörü için beklenmedik optimum seviyelerin elde edilmiştirği görülmüştür. Bunlardan özellikle "B. Tüp İç Çapı" ve "G. Akışkan Debisi" faktörlerinin optimum seviyeleri için daha küçük çap olan 400 µm ve daha büyük debi olan 50 mL/dk öne çıkmaktadır. Bu durumda daha yüksek basınç kaybı oluşacağı halde neden böyle bir sonuç çıktığı ve çözüm yolu aşağıda açıklanmıştır:

Neden: Laminer bölgede Moody diyagramı veya $f=64/Re$ ifadesinden, debi arttıkça Re sayısı artar ve sürtünme faktörü azalır. Türbülanslı bölgeye doğru ilerledikçe sürtünme faktöründeki azalma geçiş bölgesindeki dalgalanmalar dışında yeni bir referans değerden itibaren azalmaya devam eder. Grafiklerde debi yüksek çıkmıştır. Çünkü debi arttıkça sürtünme faktörü artar. Çap küçük çıkmıştır. Çünkü aynı debi için çap küçüldükçe akışın türbülans eğilimi artar ve sürtünme faktörü azalır. İşte bu nedenlerle yukarıdaki grafikler doğrudur. Fakat, bu seviyeler uygulamada yüksek basınç kayıplarına neden olacağı için anlamlı değildir.

Çözüm: Sürtünme faktörünün belirlenmesinde kullanılan sürtünme basınç kaybı verilerini dikkate almak gerekir. Debi arttıkça veya çap azaldıkça basınç kaybı sürekli artar. Bu sayede elde edilen optimum seviyelerle daha anlamlı sonuçlar elde edilir.

Taguchi yönteminde faktör seviyelerinin sonuçlara, doğrusal olmayan fakat sürekli artan veya azalan şekilde etki edeceği düşünülerek, faktör seviyeleri üç seviye olarak seçilmiştir. Sürtünme faktörünün sürekli azalma göstermemesi bu seçilen seviyelerin yetersiz gelmesine neden olmuştur. Eğer mutlaka sürtünme faktörü kullanmak istenirse faktör seviye sayısı arttırılmalıdır. Fakat bu durumda deney matrisi büyüyeceği için yapılacak deney sayısı artmaya başlar. Bu nedenle ikinci alternatif, mevcut şartlarda sürtünme basınç kaybıdır ve daha anlamlı sonuç verir. Aşağıda sürtünme faktörü grafikleri ardından sürtünme basınç kaybı grafikleri verilmiş ve yukarıda görülen seviyelerin uygun olup olmadığı incelenmiştir.

3.5.6.1.7. Sürtünme faktörü için optimum seviyeler ve performans

Çizelge 3.37 Sürtünme faktörü için optimum seviye, faktör katkısı ve performans çizelgesi.

FAKTÖR	Optimum Seviye	Seviye Açıklaması	Katkı
A. Tüp Malzemesi	2	PEEK	0,490
B. Tüp İç Çapı	1	400 µm	3,047
C. Akışkan Çeşidi	1	Al ₂ O ₃	0,782
D. Hacimsel Derişim	3	%1.0	1,198
E. Giriş Sıcaklığı	2	55°C	2,906
F. Yüzey Sıcaklığı	1	10°C	1,837
G. Akışkan Debisi	3	50 mL/dk	3,061
Tüm Faktörlerden Gelen Toplam Katkı			13,320
Geçerli Toplam Performans Ortalaması			22,771
Optimum Seviyelerde Beklenen Performans (S/N)			36,091
Güven Aralığı		90%	15,148
Optimum Seviyelerde		Minimum (En iyi)	Maksimum
Performans Aralığı: $f(S/N)$		51,239	20,943
Performans Aralığı: $\sim f$		0,00274	0,08971

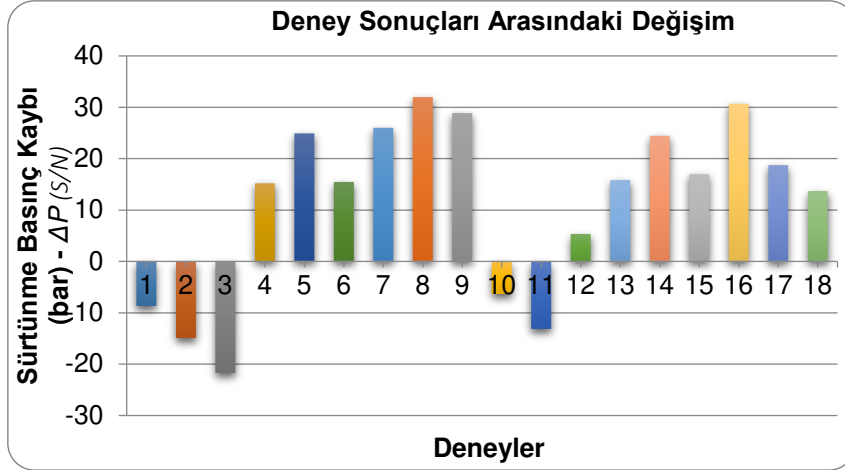
Isı transferi ve sürtünme faktörü şartları farklı optimum seviyeler içerdiği için, optimum ısı transferi şartlarında, sürtünme faktörü performansı tekrar hesaplanmış, Çizelge 3.38 ve Şekil 3.62 aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.38 Sürtünme faktörü için faktör katkısı ve performans çizelgesi.

FAKTÖR	Optimum Seviye	Seviye Açıklaması	Katkı
A. Tüp Malzemesi	1	SS	-0,490
B. Tüp İç Çapı	1	400 µm	3,047
C. Akışkan Çeşidi	2	TiO ₂	0,681
D. Hacimsel Derişim	3	%1.0	1,198
E. Giriş Sıcaklığı	3	60°C	-1,261
F. Yüzey Sıcaklığı	1	10°C	1,837
G. Akışkan Debisi	3	50 mL/dk	3,061
Tüm Faktörlerden Gelen Toplam Katkı			8,072
Geçerli Toplam Performans Ortalaması			22,771
Optimum Seviyelerde Beklenen Performans (S/N)			30,843
Güven Aralığı		90%	15,148
Farklı Seviyelerde		Minimum (En iyi)	Maksimum
Performans Aralığı: $f(S/N)$		45,991	15,695
Performans Aralığı: $\sim f$		0,00502	0,16415

Çizelge 3.38 ile elde edilen beklenen performans aralığı grafiği aşağıda verilmiştir.

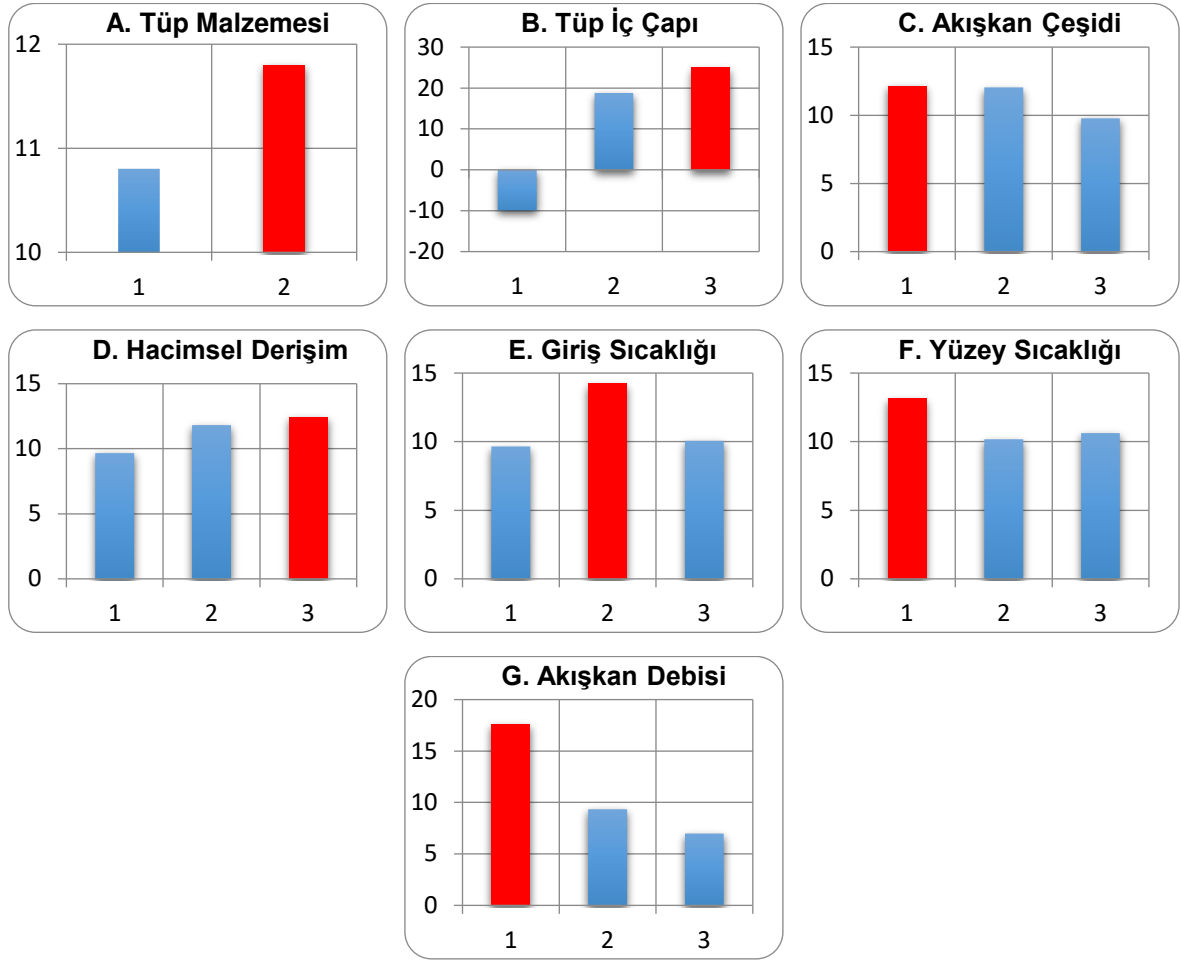
3.5.6.1.8. Sürtünme Basınç Kaybı için S/N sonuçları



Şekil 3.62 Yapılan deneylere göre sürtünme basınç kaybının değişimi

S/N değerleri her zaman pozitif çıkmak zorunda değildir. S/N'nin negatif değerleri, MSD değerlerin 1'den büyük olduğu durumlarda görülür. Negatif değerleri değerlendirme, sayı doğrusu bazında yapılır. Yani örn. S/N değeri 5 olan bir deney, -22 olan deneyden daha iyi performansa sahiptir.

3.5.6.1.9. Sürtünme basınç kaybı için ortalama etkiler



Şekil 3.63 Sürtünme basınç kaybı için faktörlerin ortalama etki grafikleri

Şekil 3.63 incelendiğinde, düşük sürtünme basınç kaybı için beklendiği gibi büyük tüp çapı ve düşük akışkan debisi optimum olarak elde edilmiştir. Böylece uygulanabilirlik açısından daha anlamlı sonuçlar elde edilmiş, sürtünme faktöründe belirtilen ifadeler doğrulanmıştır.

3.5.6.1.10. Sürtünme basınç kaybı için optimum seviyeler ve performans

Çizelge 3.39 Basınç kaybı için optimum seviye, faktör katkısı ve performans çizelgesi.

FAKTÖR	Optimum Seviye	Seviye Açıklaması	Katkı
A. Tüp Malzemesi	2	PEEK	0,500
B. Tüp İç Çapı	3	1000 µm	13,691
C. Akışkan Çeşidi	1	Al ₂ O ₃	0,819
D. Hacimsel Derişim	3	%1.0	1,124
E. Giriş Sıcaklığı	2	55°C	2,910
F. Yüzey Sıcaklığı	1	10°C	1,820
G. Akışkan Debisi	1	20 mL/dk	6,284
Tüm Faktörlerden Gelen Toplam Katkı			27,147
Geçerli Toplam Performans Ortalaması			11,304
Optimum Seviyelerde Beklenen Performans (S/N)			38,451
Güven Aralığı		90%	15,161
Optimum Seviyelerde		Minimum (En iyi)	Maksimum
Performans Aralığı: ΔP (S/N)		53,612	23,290
Performans Aralığı: $\sim \Delta P$ (bar)		0,00209	0,06847

Isı transferi ve sürtünme basınç kaybı şartları farklı optimum seviyeler içerdiği için, optimum ısı transferi şartlarında, sürtünme basınç kaybı performansı tekrar hesaplanmış, Çizelge 3.40 ve Şekil 3.63'te verilmiştir.

Çizelge 3.40 Basınç kaybı için faktör katkısı ve performans çizelgesi.

FAKTÖR	Optimum Seviye	Seviye Açıklaması	Katkı
A. Tüp Malzemesi	1	SS	-0,500
B. Tüp İç Çapı	1	400 µm	-21,193
C. Akışkan Çeşidi	2	TiO ₂	0,715
D. Hacimsel Derişim	3	%1.0	1,124
E. Giriş Sıcaklığı	3	60°C	-1,247
F. Yüzey Sıcaklığı	1	10°C	1,820
G. Akışkan Debisi	3	50 mL/dk	-4,315
Tüm Faktörlerden Gelen Toplam Katkı			-23,596
Geçerli Toplam Performans Ortalaması			11,304
Optimum Seviyelerde Beklenen Performans (S/N)			-12,293
Güven Aralığı		90%	15,161
Farklı Seviyelerde		Minimum (En iyi)	Maksimum
Performans Aralığı: ΔP (S/N)		2,868	-27,453
Performans Aralığı: $\sim \Delta P$ (bar)		0,72	23,59

Çizelge 3.40 ile elde edilen beklenen performans aralığı grafiği aşağıda verilmiştir.

Beklendiği gibi optimum ısı transferi şartlarından olan 400 µm iç çap ve 50 mL/dk debi sürtünme basınç kaybını olumsuz etkilemiştir. S/N cinsinden değer ne kadar küçükse basınç kaybı o kadar büyük olacaktır.

3.6. TAGUCHI YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN VERİLER

Elde edilen ve belli bir tolerans (güven) aralığında bulunan beklenen performans sonuçlarının doğrulanması için son deneyler yapılmıştır. Bu deneyler için optimum ısı transferi şartlarında faktör seviyeleri aşağıdaki çizelge 3.41’de verilmiştir.

Çizelge 3.41 Optimum ısı transferi şartları için belirlenen faktör seviyeleri

	FAKTÖR	Optimum Seviye	Seviye Açıklaması
A.	Tüp Malzemesi	1	SS
B.	Tüp İç Çapı	1	400 µm
C.	Akışkan Çeşidi	2	TiO ₂
D.	Hacimsel Derişim	3	%1.0
E.	Giriş Sıcaklığı	3	60°C
F.	Yüzey Sıcaklığı	1	10°C
G.	Akışkan Debisi	3	50 mL/dk

Optimum ısı transferi şartlarında doğrulama deneyleri ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelge 3.42’de verilmiştir.

Çizelge 3.42 Al₂O₃ için performans aralığı ve elde edilen ortalama performanslar.

DENEY	Beklenen Performans Aralığı	Doğrulama Deneyleri Ortalaması	Doğrulama Deneyleri Ortalaması
Isı Transferi – Q	39.276 ~ 45.086 (S/N) 92 ~ 180 (W)	105.1 (W)	40.433 (S/N)
Isı Taşınım Katsayısı – h	79.005 ~ 89.448 (S/N) 8917 ~ 29674 (W/m ² K)	13413 (W/m ² K)	82.551 (S/N)
Nusselt Sayısı – Nu	14.013 ~ 24.372 (S/N) 5.019 ~ 16.543 (-)	7.313 (-)	17.282 (S/N)
Sürtünme Faktörü – f	45.991 ~ 15.695 (S/N)* 0.00502 ~ 0.16415 (-)	0.046 (-)	26.723 (S/N)
Sürtünme Basınç Kaybı – ΔP	2.868 ~ -27.453 (S/N)* 0.72 ~ 23.59 (bar)	6.59 (bar)	-16.376 (S/N)

*Faktör performans tipi (*Smaller is better*) nedeniyle, S/N cinsinden değeri büyük olan sonuç en iyi değeri alır.

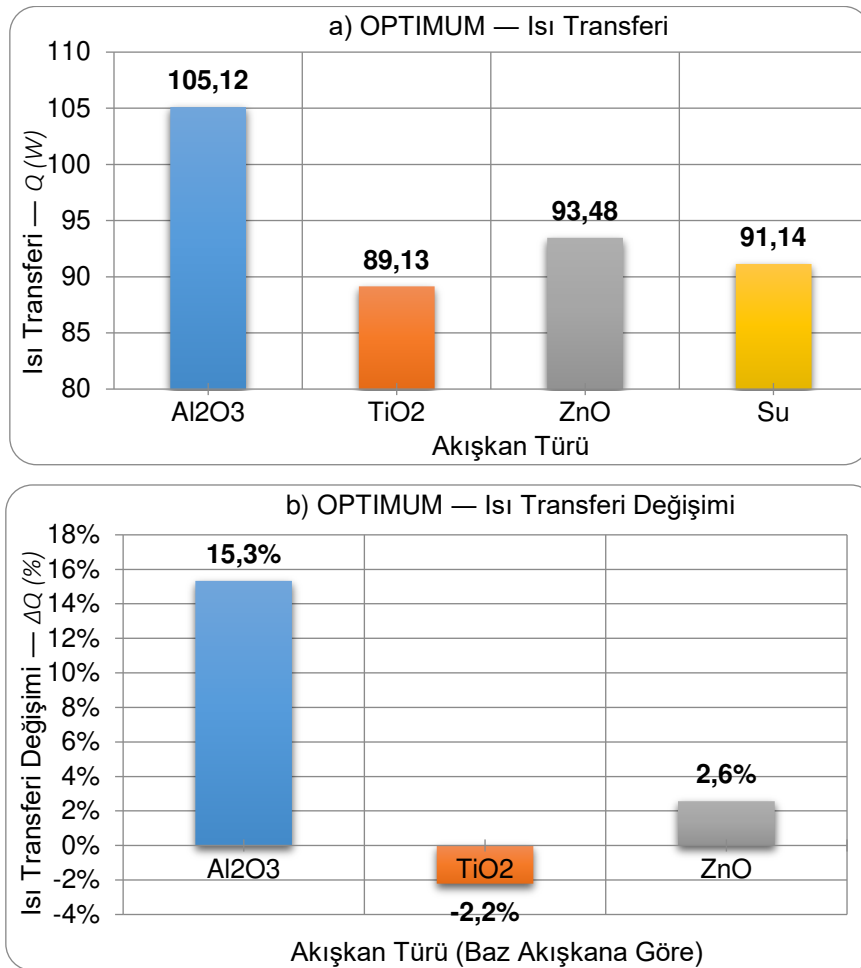
Çizelge 3.42’de görüldüğü gibi, özellikle ısı transferi ve sürtünme basınç kaybı için optimum ısı transferi şartlarında, doğrulama deneyleri ile belirlenen sonuçların S/N cinsinden ortalaması, beklenen performans aralığı içinde kaldığı için elde edilen sonuçlar doğrudur. Faktörlerin etkileşimini, ek faktör eklemeyi dikkate almaya gerek kalmamıştır.

3.6.1. Optimum Isı Transferi Şartlarında Sonuçların Karşılaştırılması

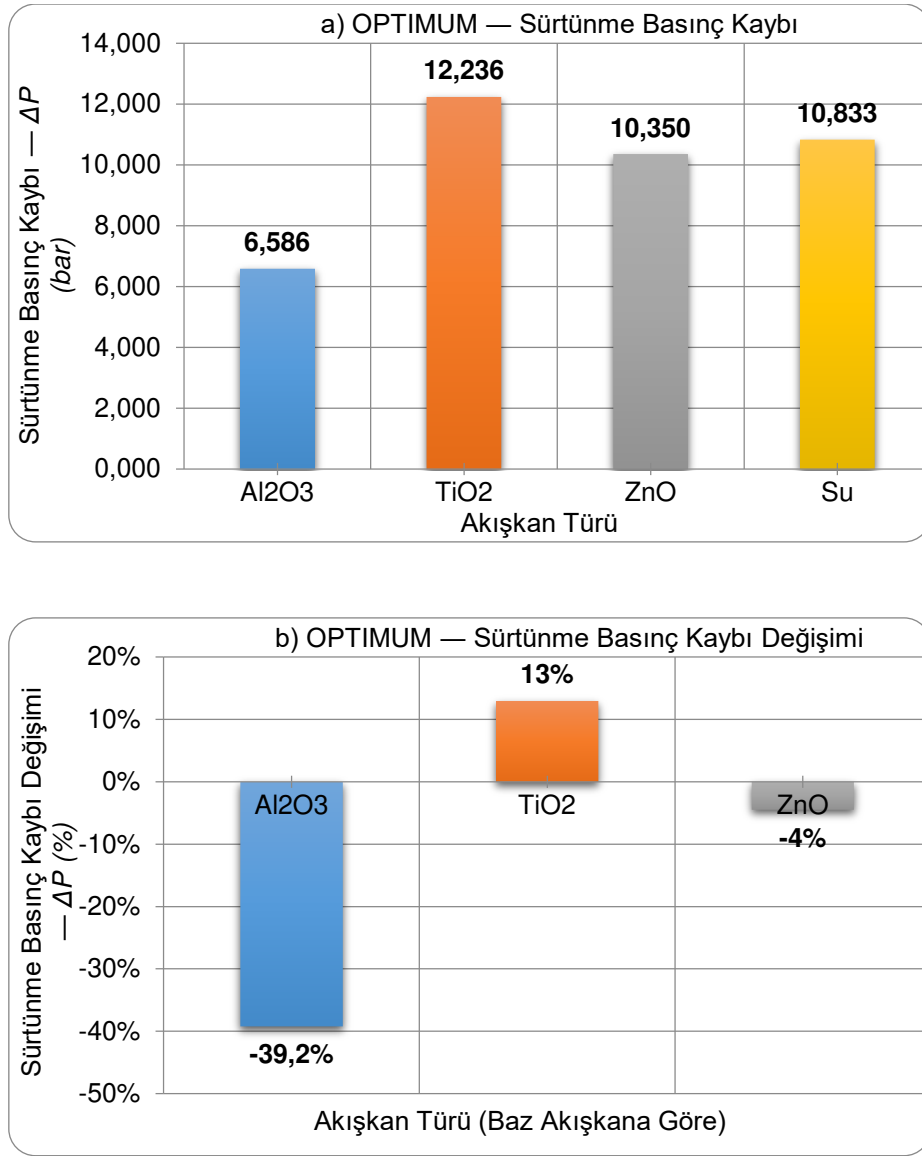
Optimum ısı transferi şartlarında, her bir nanoakışkan ve saf su için deneyler yapılmış olup, aşağıdaki sonuçlar ve grafikler elde edilmiştir.

Çizelge 3.43 Optimum ısı transferi şartlarında tüm sonuçlar ve baz akışkana göre değişim

Optimum Isı Transferi Şartlarında Sonuçlar		Mutlak Sonuçlar				Suya Göre Değişim		
Isı Transferi	Q (W)	Al ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO	Su	Al ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO
		105,12	89,13	93,48	91,14	15,34%	-2,21%	2,57%
Sürtünme Basınç Kaybı	ΔP_f (bar)	6,586	12,236	10,350	10,833	-39,21%	12,95%	-4,46%



Şekil 3.64 Optimum ısı transferi şartlarında ortalama ısı transferi sonuçları.



Şekil 3.65 Optimum ısı transferi şartlarında ortalama sürtünme basınç kaybı sonuçları: a) Mutlak sonuçlar, b) Baz akışkana göre değişimler

Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü gibi, sabit yüzey sıcaklığında Al₂O₃ nanoakışkan kullanılarak baz akışkan suya göre sıvıdan sıvıya yaklaşık %15 ısı transfer artışı sağlanırken, mikrokanalda yaklaşık % 39 sürtünme basınç kaybı azalması gerçekleşmiştir.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada su bazlı Al_2O_3 (13nm), TiO_2 (10-25nm) ve ZnO (18nm) nanoakışkanları 0.5%, 0.7% ve 1.0% hacimsel derişim oranlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan bu nanoakışkanlar manyetik karıştırıcı ile ön karıştırma işleminden sonra ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılarak kararlılık analizleri yapılmıştır. Kararlılık analizlerinde yüzey aktif madde eklenmesi, ultrasonik güç miktarı, karıştırma zamanı, banyo sıcaklığı ve prob (karıştırıcı uç) yüksekliği parametrelerinin kararlılığa etkisi incelenmiştir. Karışımı sağlanan nanoakışkanların daha sonra TEM (geçirimli elektron mikroskobu) ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri alınarak nanopartiküllerin baz akışkan içindeki homojen dağılımları incelenmiştir. Daha sonra nanoakışkanlar cam tüplere konularak gün-gün izlenmiş ve kararlılık süreleri tespit edilmiştir. Kararlılık analizleri yapılan nanoakışkanların farklı derişim oranlarında ve farklı sıcaklıklarda (20-60 °C) termofiziksel özellikleri; viskozite ve ısı iletkenlik değeleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler yardımıyla ve literatürde kullanılan denklemler ile özgül ısı ve yoğunlukları hesaplanmıştır. Deney düzeneği için uygun pistonlu pompa, basınç regülatörü, ısıtıcı-soğutucu banyolar, ısı değıştiricisi, sıcaklık ölçer (NTC Sensör) ve basınç transmitterler için hesaplamalar yapılarak deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan deney düzeneğinin uygunluğunu tespit etmek için farklı debilerde 10~50 mL/dk, 400 µm, 750 µm ve 1000 µm mikro boru çapları ve farklı çalışma sıcaklıklarında saf su ile doğrulama deneyleri yapılmıştır. Doğrulama çalışmalarından sonra yapılacak deneylerde çok fazla değışken olmasından dolayı daha efektif deneyler yapabilme adına Taguchi yöntemi kullanılarak mikrokanal deney düzeneğinde 400 µm, 750 µm ve 1000 µm mikro boru çapları, 0,5%, 0,7% ve 1,0% derişim oranlarında su bazlı Al_2O_3 (13 nm), TiO_2 (10-25 nm) ve ZnO (18 nm) nanoakışkanları, farklı debi (20, 35, 50 mL/dk), farklı yüzey sıcaklığı (15, 25, 40°C) ve nanoakışkan sıcaklığı (50, 55, 60 °C) değerlerinde ısı taşınım katsayısı, sürtünme faktörü, nusselt sayısı ve ısı transfer değeri hesaplanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmayı özetlersek;

- 100 mL hacimli kararlı nanoakışkanların hazırlanmasında aşağıdaki optimum parametre olarak; nanoakışkanlara uygulanan ultrasonik gücü 5 W/mL, nanoakışkanların ultrasonik karıştırma süresi 30 dk, ultrasonik probun nanoakışkan tabanından yüksekliği 1-2 cm, nanoakışkan sıcaklığı 25°C belirlenmiştir. Optimum parametrelere göre su bazlı Al_2O_3 kararlılığın yaklaşık 4 aydan uzun sürdüğü, TiO_2 nanoakışkanlar arasında en iyi kararlılığı %0.3 ve %0.5 hacimsel derişimli nanoakışkanlar gösterdiği ve kararlılığın 7 günden fazla sürdüğü, ZnO nanoakışkanlar arasında en iyi kararlılığı tüm hacimsel derişimli nanoakışkanlar için 21 güne kadar sürdüğü Şekil 3.32’de görülmektedir. Kararlılığı sağlanan nanoakışkanların homojen dağılımı için alınan SEM ve TEM görüntüleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’te görülmektedir.
- Homojen dağılımı ve kararlılığı sağlanan nanoakışkanların farklı sıcaklıklarda termofiziksel özellikleri ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Nanoakışkanların mutlak ısı iletkenlik değerlerinin artan sıcaklık ve artan hacimsel derişimle arttığı görülmüştür. Nanopartikül ısı iletkenliklerinin (Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO için sırasıyla 46, 10 ve 54 W/mK) baz akışkan sudan (30–60°C sıcaklık aralığında 0.615–0.654 W/mK) çok büyük olması nedeniyle, hacimsel derişimle artış beklenmektedir. En yüksek ısı iletkenlik artışları Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanoakışkanlar için yaklaşık olarak sırasıyla %11, %8 ve %9 şeklinde belirlenmiştir. Nanoakışkanların mutlak (dinamik) viskozite değerlerinin artan sıcaklıkla azaldığı, artan hacimsel derişimle arttığı görülmüştür. Fakat viskozite değerleri, birbirine çok yakın ölçülmüştür. En yüksek viskozite artışı Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanoakışkanlar için yaklaşık olarak sırasıyla %11, %24 ve %14 şeklinde belirlenmiştir.

Çizelge 4.1 Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanoakışkanlarının saf suya göre ısı transferi, ısı taşınım katsayısı, Nusselt Sayısı, Sürtünme Faktörü ve Sürtünme Basınç Kaybı Değerlerinin Kıyaslanması

SONUÇ		Al_2O_3	TiO_2	ZnO	Saf Su	Suya Göre Değişim		
						Al_2O_3	TiO_2	ZnO
Isı Transferi	$Q (W)$	105.12	89.13	93.48	91.14	15%	-2.2%	2.57%
Isı Taşınım Katsayısı	$h (W/m^2K)$	13413	10614	11194	11023	21%	-3.7%	1.55%
Nusselt Sayısı	Nu	7.313	5.942	6.201	6.581	11%	-9.7%	-5.78%
Sürtünme Faktörü	f	0.046	0.086	0.071	0.078	-40%	9.8%	-8.59%
Sürtünme Basınç Kaybı	$\Delta P (bar)$	6.59	12.24	10.35	10.83	-39%	12.9%	-4.46%

- Taguchi yöntemi sonucunda yapılan 18 deneyde optimum parametre çizelge 3.41’de gösterilmiştir. Belirlenen optimum parametreler ile diğer nanoakışkanlar için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek su bazlı Al_2O_3 ’te %15 ısı transferi artışı elde edilmiştir. Isı transferinde ZnO nanoakışkanında %2,57 artma, TiO_2 nanoakışkanında ise %2,2 ısı transferinde azalma olmuştur. Isı taşınım katsayısında ise Al_2O_3 için % 21 artma, ZnO için %1.55 artma ve TiO_2 ise %3,7 azalma görülmüştür. Basınç düşüşü ise en çok Al_2O_3 ’te % 40 olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla soğutma sistemleri için en uygun mikrokana1 çapı 400 μm ve en uygun nanoakışkan ise su bazlı Al_2O_3 nanoakışkan1 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanın diğer nanoakışkanlara göre daha uzun süre kararlı kalması için gerekli optimum parametreler ve mikro kanal akışında en yüksek ısı geçişi ile en düşük basınç kaybı için gereken optimum parametrelerde elde edilmiştir. Aynı zamanda nanoakışkanlara ait viskozite, yoğunluk, ısıl iletkenlik ve özgül ısı gibi termofiziksel özellikler sıcaklığa bağı1 olarak deneysel ölçümler yardımıyla denklem bazında ifade edilmiştir. Tüm bu veriler bu çalışmaya da esas teşkil eden “ Yeni Nesil Euro 5/6 Dizel Motorları için Nano Akışkanlı Radyatör Geliştirilmesi ve Prototip Uygulaması” adlı projede bir sonraki aşama olan mini kanallı radyatör tasarımı ve performans analizlerinde hem deneysel hem de nümerik çalışmalarda kullanılabilecektir. Bu bağlamda yeni nesil soğutma sistemlerinde kullanılmak üzere optimum nanoakışkan ve kanal boyutları konusunda literatüre önemli bir kazanım sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Ali H M, Ali H, Liaquat H, Maqsood H T B, and Nadir M A** (2015) Experimental Investigation Of Convective Heat Transfer Augmentation for Car Radiator Using Zn-Water Nanofluids, *Energy*, 84: 317–324.
- Aydın M E** (1994) Taguchi Deneysel Tasarım Metodu ve Segman Sanayiinde Bir Uygulama, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7: 61-69.
- Batchelor G K** (1977) Effect of Brownian-Motion on Bulk Stress in A Suspension of Spherical-Particles, *Journal of Fluid Mechanics*, 83: 97-117
- Baviere R, Marinnet M F, and Le Person S** (2006) Bias Effect on Heat Transfer Measurmenrts In Microchannel Flows, *Int. J. Heat And Mass transfer*, 49: 3325-3337.
- Baynal K** (2003) Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile En iyilemesi ve Bir Uygulama, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 16: 2-18.
- Bejan A** (1995) *Convection Heat Transfer*, Second Edition, ISBN: 978-0-470-90037-6, Wiley, New York, 696 s.
- Bhanvase B A, Sarode M R, Putterwar L A, Abdullah K A, Deosarkar M P, and Sonawane S H** (2014) Intensification of Convective Heat Transfer In Water/Ethylene Glycol Based Nanofluids Containing TiO₂ Nanoparticles, *Chemical Engineering And Processing*, 82: 123–131.
- Brinkman H C** (1952) The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *The Journal of Chemical Physics*, 20: 571-580.
- Bruggeman D A G** (1935) The Calculation of Various Physical Constants of Heterogeneous, *Annalen Der Physik*, 416: 636-664.
- Cengel Y A, Cimbala J M, ve Engin T (Ed.)** (2008) *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, 1. Baskı, ISBN 978-9-756-24018-2, Güven Yayıncılık, İzmir, 938 s.
- Chung S J, Leonard J P, Nettleship I, Lee J K, Soong Y, Martello D V, and Chyu M K** (2009) Characterization Of ZnO Nanoparticle Suspension In Water: Effectiveness Of Ultrasonic Dispersion, *Powder Technology*, 194: 75–80.
- Dilek E F** (2008) Nanoakışkanların Hazırlanması ve Isıl İletkenliklerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 97 s.
- Ghadimi A, and Metselaar I H** (2013) Thermal Conductivity and Viscosity of Titania Nanofluids, *Experimental Thermal And Fluid Science*, 51: 1–9.
- Ghadimi A, Saidur R, and Metselaar I H** (2011) A Review of Nanofluid Stability Properties and Characterization in Stationary Conditions, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 54: 4051–4068.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hamilton R L, and Crosser O K** (1962) Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1: 187-191.
- Heris S Z, Esfahany M N, and Etemad S G** (2007) Experimental Investigation Of Convective Heat Transfer Of Al_2O_3 /Water Nanofluid In Circular Tube, *Int. J. of Heat And Fluid Flow*, 28: 203–210.
- Heyhat M M, Kowsary F, Rashidi A M, Momenpour M H, and Amrollahi A** (2013) Experimental Investigation of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Water-Based Al_2O_3 Nanofluids In Fully Developed Flow Regime, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44: 483–489.
- Hwang Y, Lee J K, and Jeong Y M, Cheong S, Ahn Y C, and Kim S H** (2008) Production and Dispersion Stability Of Nanoparticles In Nanofluids, *Powder Technology* 186:145 – 153.
- Kakaç S, and Pramuanjaroenkij A** (2009) Review of Convective Heat Transfer Enhancement with Nanofluids, *Int. J. Of Heat And Mass Transfer*, 52: 3187–3196
- Kandlikar S G** (2002) Fundamental Issues Related To Flow Boiling In Minichannels and Microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26: 389-407.
- Karimzadehkhoei M, Yalçın S E, Şendur K, Mengüç M P, and Koşar A** (2015) Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids In Horizontal Microtubes Under Thermally Developing Flow Conditions, *Experimental Thermal And Fluid Science*, 67: 37–47.
- Kros J F, and Mastrangel C M** (2001) Comparing Methods for the Multi-Response Design Problem, *Qual. Reliab. Engng. Int.*, 17: 323-331.
- Lee J, Han K, and Koo J** (2014) A Novel Method To Evaluate Dispersion Stability of Nanofluids, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 70: 421–429.
- Liu D, and Garimella S** (2004) Investigation of Liquid Flow in Microchannels, *Thermophysics and Heat Transfer*, 18: 65-72.
- Maiga S E B, Nguyen C T, Galanis N, and Roy G** (2004) Heat Transfer Behaviours of Nanofluids In A Uniformly Heated Tube, *Superlattices and Microstructures*, 35: 543–557.
- Maxwell J C** (1891) *A Treatise on Electricity & Magnetism*, 3rd Edition, ISBN 978-0-486-60636-1, Dover Publications Inc., New York, 440 s.
- Michaelides E E S** (2014) *Nanofluidics Thermodynamic and Transport Properties*, 1st Edition, ISBN 978-3-319-05621-0, Springer International Publishing, New Delhi, 335 pp/s.
- Mondragon R, Julia J E, Barba A, and Jarque J C** (2012) Characterization of Silica–Water Nanofluids Dispersed With An Ultrasound Probe: A Study of Their Physical Properties and Stability, *Powder Technology*, 224: 138–146.
- Morini G L, Lorenzini M, and Salvigini S** (2006) Friction Characteristics of Compressible Gas Flows In Microtubes, *Exp. Thermal And Fluid Science*, 30: 733-744.
- Mukherjee S, and Paria S** (2013) Preparation and Stability of Nanofluids, *Journal Of Mechanical and Civil Engineering*, 9: 63-69.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Naraki M, Peyghambarzadeh S M, Hashemabadi S H, and Vermahmoudi Y** (2013) Parametric Study of Overall Heat Transfer Coefficient of CuO/Water Nanofluids In A Car Radiator, *Int. Journal of Thermal Sciences*, 66: 82-90.
- Parlak N** (2010) Mikro Kanallarda Akış ve Isı Geçişinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 129 s.
- Pastoriza-Gallego M J, Casanova C, Páramo R, Barbés B, Legido J L, and Piñeiro M M** (2009) A Study On Stability And Thermophysical Properties (Density And Viscosity) of Al₂O₃ In Water Nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 106: 064301-064308.
- Pfund D, Rector D, and Shekarritz A** (2000) Pressure Drop Measurements in A Microchannel, *Aiche Journal*, 46: 1496-1507.
- Philip J, and Shima P D** (2012), Thermal Properties of Nanofluids, *Advances In Colloid And Interface Science*, 183: 30–45.
- Rands C, Webb B W, and Maynes D** (2006) Characterization of Transition To Turbulence in Microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 49: 2924-2930.
- Sharma K V, Sarma P K, Azmi W H, Mamat R, and Kadirgama K** (2012) Correlations To Predict Friction And Forced Convection Heat Transfer Coefficients Of Water Based Nanofluids For Turbulent Flow In A Tube, *International Journal of Microscale and Nanoscale Thermal and Fluid Transport Phenomena*, 3: 283-308.
- Sharp K V, and Adrian R J** (2004) Transition From Laminar To Turbulent Flow In Liquid Filled Microtubes, *Experiments in Fluids*, 36: 741-747.
- Sidik N A C, Mohammed H A, Alawi O A, Samion S** (2014) A Review On Preparation Methods And Challenges Of Nanofluids, *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 54: 115–125.
- Tong L I, Su C T, and Wang C H** (1997) The Optimization of Multi-response design problem in The Taguchi Method, *Int. J. of Quality & Reliability Management*, 14: 367-380.
- Turgut A** (2010) Investigation of Thermophysical Properties of Nanofluids, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 88 s.
- URL-1** < <http://www.sustainabledirection.com/motor-industry-backlash-against-the-demonisation-of-diesel> >, Ziyaret Tarihi: 26.09.2016.
- URL-2** < http://www.lsinstruments.ch/technology/dynamic_light_scattering_dls/ >, Ziyaret Tarihi: 12.02.2016.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Karaman 'da doğdu. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini Karaman'da tamamladı. 2002 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde üniversite öğrenim hayatına başladı ve 2006 yılında Makine Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 2008 yılında Milli Eğitim Bakanlığı Yurt Dışı Yüksek Lisans programını kazanarak University of New Hampshire Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2010'de yüksek lisansını tamamlayarak 2011 yılında doktora eğitimine başladı. Ekim 2010 tarihinden itibaren Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Dalı Enerji Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres: Bülent Ecevit Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü
67100 Merkez/ZONGULDAK

Tel: (+90) 372 291 11 00/

E-posta: beytullaherdogan@hotmail.com

