Nanokapsüllenmiş Faz Değiştiren Madde İçeren Nanoakışkanın Dairesel Bir Boruda Akışında Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 113M133

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Osman Nuri ŞARA

Araştırmacılar:
Prof. Dr. Sinan YAPICI
Doç. Dr. Ali KARAİPEKLİ

Bursiyer(ler):
Semahat (BARLAK) DORUK

Ocak 2016
ÇANKIRI

ÖNSÖZ

Bu çalışma TÜBİTAK–MAG tarafından desteklenen 113M133 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında geçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a ve Çankırı Karatekin Üniversitesi Rektörlüğüne ve Mühendislik Fakültesi Dekanlığına, proje çalışmalarının tamamlanmasında katkı ve desteklerinden dolayı proje ekibine teşekkür ederim.

Proje kapsamında yapılan çalışmaları içeren, projede bursiyer olarak görev alan Semahat (Barlak) Doruk tarafından yürütülen, bir doktora çalışması devam etmektedir.

Özge Bildi ve kısa süreli bursiyer olarak çalışan Öznur Karhan ve Merve Demir'e katkılarından dolayı teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
ŞEKİL LİSTESİ iv
TABLO LİSTESİ vi
ÖZET vii
ABSTRACT viii
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ 3
2.1 Faz Değiştiren Maddeler 3
2.1.1 Kapsül Elde Etme (Enkapsülasyon) Yöntemleri 7
2.2 Nanoakışkanlar 8
3. DENEYSEL YÖNTEM 12
3.1. Nanokapsüllerin Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu 12
3.2. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi 13
3.2.1. Nanoakışkanların Hazırlanması 13
3.2.2. Nanoakışkanlarının Özelliklerinin Belirlenmesi 13
3.3. Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Ölçümleri 18
3.3.1. Deney sistemi 18
3.3.2. Hesaplamalar ve Değerlendirme 20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 22
4.1. Nanokapsül Sentezi ve Karakterizasyonu 22
4.1.1. Uygun Reaktan Oranının Belirlenmesi 22
4.1.2. Uygun Yüzey Aktif Madde Seçimi 22
4.1.3. SEM Analizleri ve Boyut Analizi 22
4.1.4. FTIR Analizleri 29
4.1.5. DSC Analizleri 29
4.2. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi 33
4.2.1. Nanoakışkanların Hazırlanması 33
4.2.2. Nanoakışkanların Özelliklerinin Belirlenmesi 34
4.3. Isı Transferi ve Basınç Düşüşü 54
4.3.1. Isı Transferi 54
4.3.2. Basınç Düşüşü ve Sürtünme Katsayısı 70
4.3.3. Isı Transferi Performans Analizi 73

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 78

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1. Termal enerji depolama yöntemleri 5

Şekil 2. 2. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması (Farid vd. 2004, Sharma vd. 2009, Li vd. 2012) 5

Şekil 2. 3. Kapsüllenmiş faz değiştiren madde (FDM) 6

Şekil 2. 4. Kapsül elde etme metotları (Umer vd.2011) 10

Şekil 2.5. Isı transferi performansına etki eden nanoakışkan parametreleri (Timofeeva 2011) 11

Şekil 3.1. Viskozite ölçümlerinin yapıldığı cihaz 14

Şekil 3. 2. Su için deneysel viskozite ölçümleri ile literatür verilerinin karşılaştırılması (Hata çubukları %1) 14

Şekil 3.3. Isı iletim katsayılarının ölçümünün yapıldığı deney sistemi 15

Şekil 3.4. Su için deneysel ısı iletim katsayısı ölçümleri ile literatür verilerinin karşılaştırılması (Hata çubukları % 5'i göstermektedir). 16

Şekil 3.5.Temel akışkan için ısı iletim katsayısı ölçümleri 17

Şekil 3.6. Isı transferi ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği 19

Şekil 4.1. Farklı TDI/DETA oranlarında sentezlenen nanokapsüllerin kuru ağırlık grafiği ve fotoğraf görüntüleri 23

Şekil 4.2. Farklı sürfaktanlar ile elde edilen kapsüllerin SEM görüntüleri 23

Şekil 4.3. PU/nonadekan nanokapsüllerin SEM fotoğrafı (a): örnek N1, (b): örnek N2 25

Şekil 4.3. PU/nonadekan nanokapsüllerin SEM fotoğrafı (c): örnek N3, (d): örnek N4 26

Şekil 4.5. PU/nonadekan nanokapsüllerinin boyut dağılım grafiği (a): örnek N1, (b): örnek N2 27

Şekil 4.6. TEM görüntüleri 28

Şekil 4.7. Örneklerin FTIR spektrumları 30

Şekil 4.9. PU/nonadekan nanokapsüllerin DSC termogramı 31

Şekil 4.10. Nanoakışkanların görünümleri 34

Şekil 4.11. Faz değiştiren madde içeren nanoakışkanların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi 38

Şekil 4.12. μ_{na} /μ_{ta} oranlarının sıcaklık ile değişimi 38

Şekil 4.13. Eş.(4.3)'den hesaplanan viskoziteler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması 39

Şekil 4.14. Farklı katı oranları için ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi 42

Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklar için k_{na}/k_{ta} oranlarını katı miktarı ile değişimi 43

Şekil 4.16. Mikrokapsüllenmiş FDM (n-Eicosane-UreaFormaldehyde) ile hazırlanmış süspansiyonların ısı iletim katsayısının farklı ağırlık oranları için sıcaklık ile değişimi (Ho vd. 2012) 43

Şekil 4.17a. Nanokapsülerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (boş kapsul ısıtma) 48
Şekil 4.17b. Nanokapsülerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (boş kapsul soğuma) 49
Şekil 4.17c. Nanokapsülerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (kapsul ısıtma) 50
Şekil 4.17d. Nanokapsülerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (kapsul soğuma) 51
Şekil 4.17e Nanokapsülerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (saf nonadekan ısıtma) 52
Şekil 4.17f. Nanokapsülerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (saf nonadekan soğuma) 53
Şekil 4.18. Sıcak ve soğuk akışkan tarafına ait ısı miktarının karşılaştırılması a) saf su, b) temel akışkan (Hata çubukları ± %3). 55
Şekil 4.19. Farklı *Q* esaslı hesaplanan *U* değerlerinin karşılaştırılması (Hata çubukları ±%1) 55
Şekil 4.20. Soğuk akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığının Re ile değişimi 58
Şekil 4.21. Temel akışkan için farklı giriş sıcaklıkları için ısı aktarım katsayılarının karşılaştırılması 59
Şekil 4.22. Aktarılan ısı transfer hızının Reynolds sayısı ve katı konsantrasyonu ile değişimi 59
Şekil 4.23. Nanoakışkanların tüm ısı aktarım katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi 60
Şekil 4.24. Aktarılan ısı transfer hızının Reynolds sayısı ile değişimi 60
Şekil 4.25. Nanoakışkanlar için iki farklı akışkan giriş sıcaklığıda ısı aktarım katsayısı ve akışkan çıkış sıcaklık değişimi (ϕ=% 0.84) 61
Şekil 4.26. Akışkan sıcaklık değişiminin şematik gösterimi 62
Şekil 4.27. Wilson grafik yöntemi korelasyon grafikleri (a) Eş.(4.8), (b) Eş.(4.14) 66
Şekil 4.28. Nusselt sayısı korelasyonlarının karşılaştırılması (Hata çubukları ±%10) 67
Şekil 4.29. İki farklı yöntem ile bulunan Nusselt sayılarının karşılaştırılması (WGY: Wilson grafik yöntemi, DBE: Dittus Boelter eşitliği) 67
Şekil 4.30 Nanoakışkanların Nusselt sayılarının Reynolds sayısı ile değişimi 69
Şekil 4.31. Basınç düşüşünün Reynolds sayısı ile değişimi 71
Şekil 4.32. Saf su için sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Hata çubuklar ±%3) 72
Şekil 4.33. Nanoakışkanlar için sürtünme faktörlerinin Reynolds sayısı ile değişimi 72
Şekil 4.34. Isı transferi iyileştirme etkinliği grafiği 74

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Bazı organik ve anorganik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları. (Zalba vd. 2003) 6
Tablo 2. 2. Kapsül elde etme yöntemleri (Tyagi vd. 2011, Umer vd.2011) 10
Tablo 3.1. Kapsül sentezinde kullanılan kimyasallar 12
Tablo 4.1: Şekil 4.3'de SEM görüntüleri verilen örneklerin deneysel koşulları 24
Tablo 4.2. Katı –sıvı süspansiyonların viskoziteleri için korelasyonlar 36
Tablo 4.3. Eş.(4.3) ve (4.4)'deki sabitlerin değerleri 39
Tablo 4.4. Nanoakışkanların ısı iletim katsayısı için teorik modeller 44
Tablo 4.5. Hazırlanan nanoakışkanların yoğunluklarının sıcaklık ve katı derişimi ile değişimi 47
Tablo 4.6. Hazırlanan nanoakışkanların özgül ısılarının sıcaklık ve katı derişimi ile değişimi 4
Tablo 4.7. Dairesel düz boru içerisinde türbülanslı akış için ısı transferi korelasyonları 68
Tablo 4.8. Nusslet sayısı korelasyon sabitleri 69
Tablo 4.9. Sürtünme katsayısı eşitliği katsayıları 71

ÖZET

Bu çalışmada, n-nonadekanın poliüretan içerisinde nano boyutta enkapsülasyonu ara yüzey polimerizasyon yöntemi ile gerçekleştirildi. Elde edilen nanokapsüllerin SEM, TEM, FTIR ve DSC ile karakterizasyonu gerçekleştirildi. Sentezlenen nanokapsüllerin erime ve katılaşma sıcaklıkları ve entalpileri sırasıyla 31.90 ^{o}C/30.34 ^{o}C ve 92.846 J/g /91.862 J/g şeklinde elde edilmiştir. Sentezlenen kapsüllerin SEM görüntülerinden ortalama boyutu yaklaşık 100 nm olarak hesaplandı. Su ve hacimce %0.42, %0.84 ve %1.68 kapsül içeren nanoakışkanlar hazırlanarak viskozite ve ısı iletim katsayıları ölçüldü. Katı oranının artması ile nanoakışkanların viskozitelerinin arttığı, ancak sıcaklık ile azaldığı tespit edildi. Isı iletim katsayısının katı miktarının artması ile arttığı görüldü. %0.42 ve %0.84 katı oranları için ısı iletim katsayıları temel akışkanın ısı iletim katsayısına yakın ve altında olduğu, %1.68 katı oranı için ise temel akışkanın ısı iletim katsayısından daha yüksek olduğu belirlendi. Nanoakışkanların ısı transferi davranışı ve basınç düşüşü ölçümleri bir çift borulu ısı değiştiricide gerçekleştirildi. %0.42 ve %0.84 katı oranları için ısı transferinde önemli bir iyileşme olmadığı, %1.68 katı oranı için ise sabit Reynolds sayısında Nusselt sayısında meydana gelen iyileşme %16-18 aralığında olduğu gözlemlendi. Basınç düşüşü ölçümlerinden nanoakışkanlar için sürtünme katsayılarının katı oranın artması ile arttığı görüldü. Son olarak sabit pompa gücünde yapılan performans analizi ile iyileşme oranı %0.42 ve %0.84 katı oranları için Re>10000 için birin altında kaldığı, %1.68 katı içeren akışkan için ise 1.15-1.17 aralığında olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: nanoakışkanlar, faz değiştiren madde, nanoenkapsülasyon, ısı transferi

ABSTRACT

In this study, nanoencapsulation of the n-nonadecane into polyurethane shell was synthesized by interface polymerization method. The characterization of the synthesized capsules was performed by SEM, TEM, FTIR and DSC analysis. The fusion and solidification temperature and enthalpy of samples were observed as 31.90 ^{o}C/30.34 ^{o}C and 92.846 J/g / 91.862 J/g, respectively. The average particle diameter of the nanocapsules was determined from SEM photographs as about 100 nm. The nanofluids were prepared with water as base fluid containing different volume fraction of the capsules, namely 0.42%, 0.84% and 1.68%, and the properties of the nanofluids such as thermal conductivity and viscosity were measured experimentally. It was observed that the effective viscosity of the nanofluids increase with increasing particle concentration while decrease with increasing temperature. It was found that the effective thermal conductivity of the nanofluids increase with increasing particle concentration. The effective thermal conductivity of the nanofluids with volume fraction of 0.42% and 0.84%is equal or lower than that of base fluid, but for nanofluids with volume fraction of 1.68% the effective thermal conductivity is higher than that of base fluid. Heat transfer and pressure drop behavior of the nanofluids were carried out by using a double pipe heat exchanger. The heat transfer experiments with volume fraction of 0.42% and 0.84% show that there is not a significant heat transfer enhancement in heat transfer, while it was found a 16-18 percent enhancement ratio to base fluid in Nusselt number at constant Reynolds number for nanofluids of 1.68% solid volume fraction. The pressure measurements show that the friction factors increase with increasing solid concentration. Finally, thermal performance analysis based on constant pumping power was done, and it was found that the enhancement ratio of Nusselt numbers is lower than 1 for Reynolds numbers higher than 10000 for 0.42% and 0.84% solid concentration, but for 1.68%, the enhancement ratio is in the range of 1.15-1.17 for all investigated Reynolds numbers.

Keyword: nanofluids, phase change materials (PCMs), nanoencapsulation, heat transfer

1. GİRİŞ

Endüstride karşılaşılan önemli problemlerden biri sistemlerin soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasıdır. Elektronik, iletişim ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, mikro ısı değiştirici ve mikro reaktör vb. sistemlerinin kullanımındaki artış, bu tür sistemlerde çok büyük miktarda ısının etkin biçimde uzaklaştırılmasını gerektirmektedir (Léal vd. 2013). Bu amaçla ısı transferini iyileştirmek için farklı teknikler geliştirilmektedir. Bu teknikler pasif ve aktif teknikler şeklinde sınıflandırılmaktadır (Bergles, 1999). Sıvı ve gazlara katı partiküllerin süspansiyon halinde ilavesiyle ısı/kütle transferi iyileştirme tekniği, oldukça eski bir yöntemdir (Caprani vd. 1988; Andersen vd. 1989; Sonneveld vd. 1990; Bergles, 1999). Isıl akışkanların (su, etilen glikol, yağ vb.) termal performansları, ısı iletim katsayısı ve özgül ısıları ile ilişkilidir. Akışkanların bu özelliklerinin iyileştirilmesi ile ısı transferi iyileştirilebilir. Son yıllardaki teknolojik gelişmeler ile nano boyutta partiküllerin üretilmesi ve kullanımı artmaktadır. İçerisinde 100 nm veya daha küçük boyutlarda tanecik içeren akışkanlara nanoakışkan denmektedir. Yapılan araştırmalar nanoakışkanların, su, yağ, etilen glikol gibi geleneksel akışkanlara göre oldukça yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip olduğunu, sonuçların önemli bir bölümü nanoakışkanların, yeni nesil ısı transfer akışkanı olarak kullanılabilme potansiyeli taşıdığını göstermektedir (Daungthongsuk ve Wongwises 2007; Kakaç ve Pramuanjaroenkij 2009; Ghadimi vd. 2011; Huminic ve Huminic 2012). Bu konudaki bilimsel çalışmalar gittikçe artmaktadır. Diğer taraftan, ısı aktarım/depolama sistemlerinde faz değiştiren maddelerin (FDM) kullanılması uygun sıcaklık aralığında yüksek enerji depolama yoğunluğu sağladığından caziptir. Faz değiştiren maddeler süspansiyon halinde temel akışkana katılarak hem hissedilir hem de gizli ısı aktarımı etkisi birlikte kullanılabilir. Bu şekilde enerji aktarım/depolama sisteminin etkinliği arttırılabilir. Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddeler süspansiyon halinde akışkanlara katılarak farklı sistemlerdeki ısı transferi etkileri incelenmiştir (Ho vd. 2010; Ho vd. 2011a; Ho vd. 2011b).

Bugüne kadar FDM içeren mikro/nanokapsüller üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı söz konusu kapsüllerin üretilmesi, karakterizasyonu ve termal enerji depolama uygulamalarında kullanılmaları üzerine odaklanmıştır. Ancak, nanokapsüllenmiş FDM'lerin ısı transfer akışkanı içerisine katılmasıyla ısı transfer verimini arttırmak amacıyla yapılan çalışmaların sayısı sınırlıdır. Isı transfer akışkanı içerisine nanokapsüllenmiş FDM'lerin süspansiyon oluşturacak şekilde ilavesiyle ısı transfer akışkanı (nanoakışkan) elde edilebilir. Nanokapsüllenmiş FDM içeren nanoakışkan teknolojisi nispeten yeni bir teknolojidir. Bu teknolojinin kullanılmasıyla elde edilecek nanoakışkanlar, enerji transferi veya depolanması için fonksiyonel bir ısıl akışkan olarak kullanılabilme potansiyeli taşımaktadırlar.

Bu projede faz değiştiren madde olarak n–nonadekan içeren nanokapsüller ile bir nano akışkan hazırlanması ve özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma başlıca üç aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada n-nonadekan içeren nanokapsüller sentezlendi. İkinci aşamada bu üretilen nanokapsüller ve temel akışkan olarak da su kullanılarak nanoakışkanlar hazırlandı ve ısı iletim katsayıları ve viskozite ölçümleri gerçekleştirildi. Üçüncü aşamada ise çift borulu bir ısı değiştiricide ısı transferi ölçümleri yapıldı.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 Faz Değiştiren Maddeler

Termal enerji depolama (TED) fiziksel ve kimyasal süreçler olmak üzere iki kategoride sınıflandırılır. Fiziksel süreç hissedilir ısı ve gizli ısı veya ikisinin bileşimi şeklinde gerçekleştirilir (Sharma vd. 2009) . Bu, Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir. Gizli enerji depolama sistemlerinde enerji, maddenin faz değişimi ile depolanır ve yüksek enerji depolama yoğunluğu sağladığından özellikle bu yöntem hissedilir ısı depolama yöntemine göre oldukça caziptir. Bir gizli ısı depolama sistemi aşağıda verilen üç temel bileşenden oluşmaktadır.

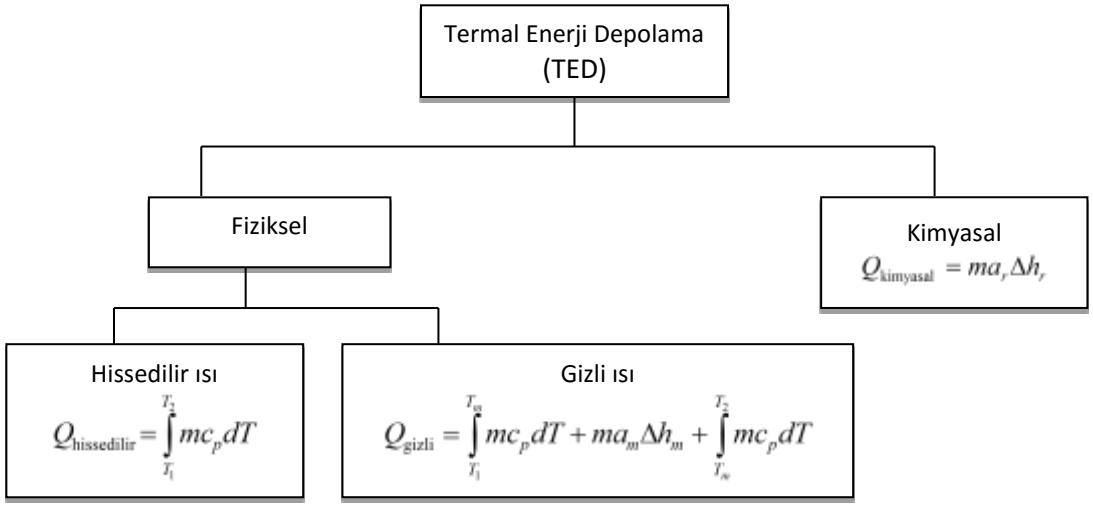
- İstenilen sıcaklık aralığına uygun bir faz değiştiren madde,
- Faz değiştiren maddelerin yerleştirildiği ortam,
- Isı transferini gerçekleştirmek için gerekli ısı transfer yüzey alanını sağlayan ısı değiştirici.

FDM'lerin sınıflandırılması, özellikleri ve kullanımları ile ilgili geniş bilgi birçok araştırmacı tarafından derlenmiştir (Zalba vd. 2003; Farid vd. 2004; Sharma vd. 2009; Agyenim vd. 2010; Kenisarin, 2010). FDM'lerin genel olarak sınıflandırılması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Faz değişimi katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı- gaz şeklinde olabilir. Ancak sıvı-gaz ve katı-gaz sistemleri yüksek hacim değişiminden dolayı tercih edilmez. Katı-sıvı sistemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tablo 2.1'de bazı organik ve anorganik FDM'lerin özellikleri karşılaştırılmıştır. FDM'lerin bazı temel fiziksel, kimyasal, çevresel ve ekonomik özellikleri sağlaması istenir. Bu özelliklerden önemli olanları aşağıda verilmiştir (Farid vd. 2004; Agyenim vd. 2010).

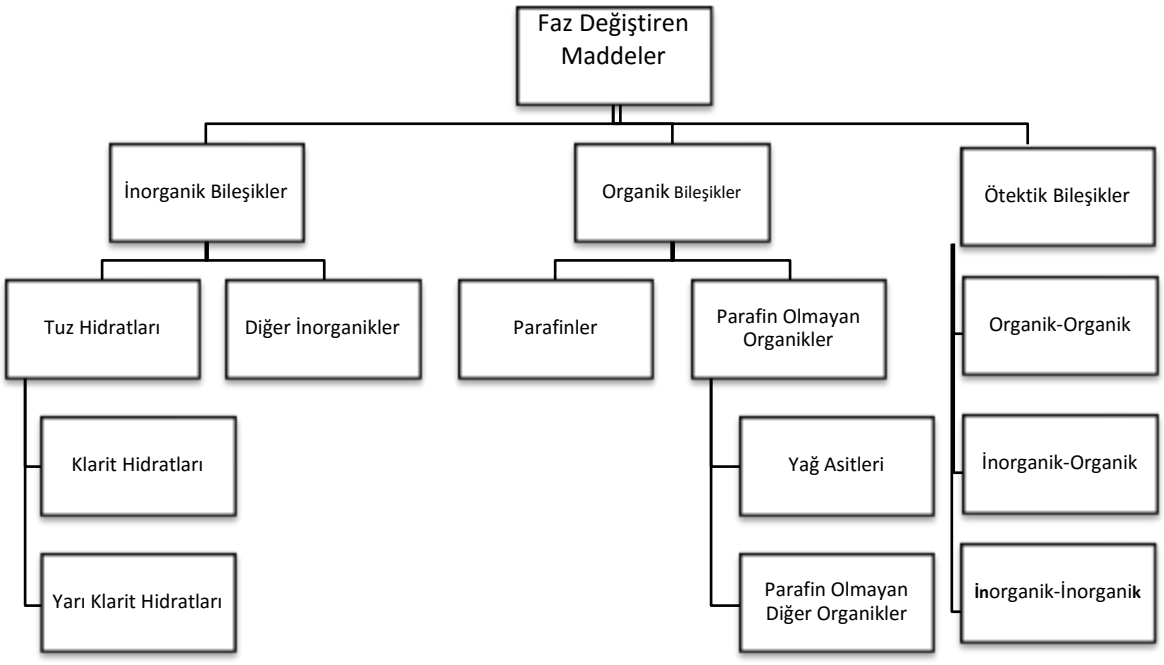
- İstenilen sıcaklık aralığında bir erime sıcaklığı olmalı,
- Birim kütle başına yüksek erime ısısı, dolayısıyla belli bir enerji için düşük miktarda madde gerekliliği,
- İlave hissedilir enerji depolama etkisi için yüksek özgül ısı kapasitesi,
- Yüksek ısı iletim katsayısı,
- Faz değişimi sırasında küçük hacim değişimi,
- Donma sırasında aşırı soğuma özelliği göstermemesi,
- Korozif olmamalı, kimyasal olarak kararlı olmalı,
- Patlayıcı, zehirli, tutuşabilir (alevlenebilir) bileşeni olmamalı,
- Düşük fiyat ve kolay temin edilebilirlik,

FDM'ler ısı transfer sistemlerinde direkt temaslı kullanılabileceği gibi bir ortam içerisinde sınırlandırılarak da kullanılabilmektedir. Bu amaçla kullanılan önemli proseslerden biri de kapsülleme (encapsulation) işlemidir. Kapsülleme işlemindeki amaç FDM'yi faz değişimi sırasında çevre etkilerinden korumaktır (Bayes-Garcia vd. 2010). Kapsülleme ilaç (Mora-Huertas vd. 2010), tekstil (Mondal, 2008; Salaun vd. 2009; Sanchez vd. 2010; Alay vd. 2011; Sarier ve Onder 2012), kozmetik (Cheng vd. 2009), gıda (Lu vd. 1999; Mozafari vd. 2008; Heidebach, Forst vd. 2012), termal enerji depolama (Alvarado, Marsh vd. 2007, Regin, Solanki vd. 2008; Alkan vd. 2009; Jegadheeswaran ve Pohekar 2009; Agyenim vd. 2010), inşaat (Regin vd. 2008; Zhao ve Zhang 2011) gibi birçok alanlarda da kullanılan önemli bir prosestir. Kapsüller boyutlarına göre makro, mikro ve nano olarak sınıflandırılırlar. 1μm-1mm aralığı mikro kapsül olarak kabul edilir. 1μm altı ise nano-kapsül olarak adlandırılır. Diğer taraftan elde edilen kapsülün yapısına göre matriks, tek çekirdekli ve çok çekirdekli olarak da sınıflandırılmaktadır (Tyagi vd. 2011). Mikrokapsülleme işlemi aktif maddelerin mikroskobik kapsüller içerisinde paketlenmesidir (Şekil 2.3).

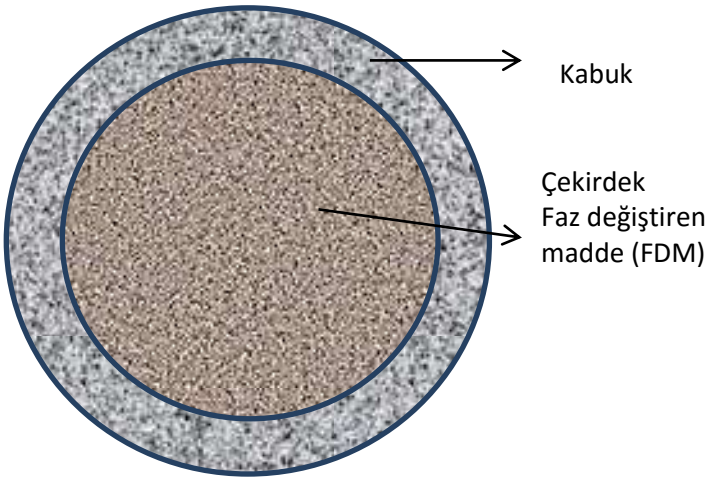
Makrokapsülleme, FDM'yi makroskopik boyuttaki kaba doldurma demektir. Makrokapsüllerin paneller, küre veya belirgin şekli olmayan küçük parçalar halinde farklı şekilleri bulunmaktadır. Isı değiştiriciler, güneş enerjisi uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve kullanım amacına yönelik olarak farklı uygulamaları bulunmaktadır (Farid vd. 2004; Al-Abidi vd. 2012). Makro kapsüllemede kullanılan küreler 5-15 cm çapta olup FDM'lerin ısıl iletkenliklerinin kötü olması nedeniyle etkin bir enerji depolama aracı olarak kullanılabilmeleri mümkün değildir. Büyük hacimli FDM'ler ile çok yüksek gizli ısı depolama kapasitesine ulaşılmasına rağmen, pratik uygulamalarda bu sistemlerin kullanılması kolay değildir. Bu sebeple FDM'lerin mikro ya da nano boyutta kapsüllenmesi bu maddelerin enerji depolama sistemlerinde daha etkin kullanılmalarına imkân tanır. Ayrıca, FDM'lerin kapsüllenmesi ile yüzey alanı/hacim oranı yükseltilip ısıl iletkenliği artırılabilir.



Şekil 2. 1. Termal enerji depolama yöntemleri



Şekil 2. 2. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması (Farid vd. 2004; Sharma vd. 2009; Li vd. 2012)



Şekil 2. 3. Kapsüllenmiş faz değiştiren madde (FDM) şematik gösterim

Tablo 2.1 Bazı organik ve anorganik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Zalba vd. 2003).

FDM	Avantajlar	Dezavantajlar
Organik Maddeler	• Kullanımı basittir • Korozif değildir • Aşırı soğuma göstermez veya çok azdır • Kimyasal ve termal anlamada karalıdırlar	• Genellikle daha pahalı • Daha düşük gizli ısı • Daha geniş erime sıcaklığı aralığı • Faz değişimi süresince yüksek hacim değişimi • Yanabilir olma • Termal iletkenlikleri düşük
Tuz Bazlı Maddeler	• Genellikle ucuz • İyi gizli ısı depolama yoğunluğu • Daha yüksek ısıl iletkenlik • Belirli faz değişim sıcaklığı • Yanmazlık	• Daha dikkatli hazırlama gerekliliği • Uzun süreli kullanım için kararlılık sağlayıcı gerekliliği • Aşırı soğuma eğilimi • Bazı metallere karşı korozif olma özelliği • Faz ayrışması oluştururlar

Mikro kapsüllemede polimerik yapı içerisinde kapsüllenecek miktar genellikle önceden kestirilememekle birlikte literatür çalışmalarında FDM'lerin %85'e kadar kapsülleme oranlarında elde edilebildiği rapor edilmiştir.

Mikrokapsülleme birçok gerekli özellikleriyle küçük kapsüller vermek üzere homojen veya heterojen matriks içine gömülmüş veya küçük partikül damlacıklarından oluşan bir tabaka ile çevrelenen bir proses olarak tanımlanır. Maddenin üç durumu da (katı, sıvı ve gaz) mikrokapsüllenebilir (Zhao ve Zhang 2011). Kapsül kalınlığı ve boyutu kullanılan yönteme göre değişiklik gösterir ve tanecik çapı, kabuk kalınlığı, ısıl iletkenlik, dayanıklılık ve maliyet başlıca değerlendirme faktörleridir.

2.1.1 Kapsül Elde Etme (Enkapsülasyon) Yöntemleri

Kapsül elde etme (enkapsülasyon) teknikleri ve üretim yöntemleri, kimyasal, fiziksel ve fizikokimyasal yöntemler içerir. Bu yöntemlerin bir sınıflandırması Şekil 2.4'de verilmiştir (Umer vd.2011). Mikro kapsül üretmede kullanılan yaygın yöntemler Tablo 2.2'de verilmiştir (Tyagi vd. 2011). Kimyasal teknikler kullanılarak fiziksel tekniklere kıyasla daha küçük kapsüller elde etmek mümkündür. Aşağıda Şekil 2.4 ve Tablo 2.2'de verilen yöntemlerden yaygın kullanılan yöntemler kısaca açıklanmıştır.

Fiziksel yöntemlerde sprey kurutma en eski yöntemlerden biridir. Bu yöntemde kabuk malzemesi içerisinde çekirdek maddesinin dağıldığı bir emülsiyon hazırlanır. Bu emülsiyon bir sprey kurutucunun ısıtma bölmesine püskürtülür. Genelde sulu emülsiyonlar kullanılır, kurutucuda su buharlaşarak çekirdek maddeyi içeren kapsüller oluşur. Yaygın olarak gıda ve ilaç sektöründe kullanılır. Birçok madde kabuk malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Yaygın olarak kullanılanlar aşağıda verilmiştir (Re, 1998).

- Karbon hidratlar (nişasta vd.),
- Selüloz ester ve eterler (carboxy methylcellulose, methylcellulose, ethylcellulose),
- Gums (gum acacia, agar. sodium alginate),
- lipidler (wax, parafin. fats, oils),
- proteinler (gelatin, soya protein, whey protein)

In-situ polimerizasyon yöntemi genel olarak iki tane birbirine karışmayan sıvının bir araya getirilmesini içeren bir yöntemdir. Örneğin su ve organik çözücü katı bir ön-kondensat oluşturmak üzere birbirleriyle reaksiyona girerler (Sarier ve Onder 2007; Zhao ve Zhang 2011). In-situ polimerizasyonu ve ara yüzey polimerizasyonu birbirine benzer yöntemlerdir.

Ancak Insitu polimerizasyonunun ayırt edici özelliği, çekirdek malzemesinde reaktant olmamasıdır. Bütün polimerizasyon, ara yüzey polimerizasyonunda olduğu gibi iki faz yerine sürekli fazda meydana gelir (Zhao ve Zhang 2011).

Ara yüzey polimerisazyonu (IFP) disperse olmuş çekirdek malzemesi damlacıklarının (veya partiküllerin) etrafında hızlıca polimerleşen bir monomer ile kabuk oluşumunu içerir. Monomer çekirdek malzemesi içerisinde çözülür (veya ikisi birlikte bir çözücü içerisinde) ve bu çözelti sulu faz içerisinde disperse edilir. Daha sonra bir polimerizasyon başlatıcı bu ortama ilave edilir ve damlacıkların etrafında polimer kabuk oluşturur.(Microteklabs). Ara yüzey polimerizasyonu kapsüllenmiş olan malzemenin yanı sıra organik bir fazın daha sulu bir faz içinde dağılmasını içerir. Ara yüzey polimerizasyonu daha büyük mikrokapsüllerin hazırlanmasında kullanılabilir ancak çoğu ticari IFP prosesleri (20-30 μm) veya (3-6 μm) aralığında daha küçük kapsüllerin üretimini sağlayabilirler (Zhao ve Zhang 2011).

1.2 Nanoakışkanlar

Nano boyutta partiküllerin bir sıvı içerisinde seyreltik dağılımı ile elde edilen akışkana nanoakışkan denir (Haddad vd. 2012). Nanoakışkanlar tek kademe ve çift kademe olmak üzere iki farklı metot ile hazırlanmaktadır. Çift kademede nanopartiküller farklı bir ortamda kuru olarak üretilmekte ve daha sonra temel akışkana ilave edilerek akışkan içerisinde dağıtılmaktadır. Bu mekanik karıştırıcı, ultrasonik titreşim veya homojenizatörler yardımı ile gerçekleştirilmektedir. İkinci yöntemde ise nano parçacıklar sıvı içerisinde dağılmış olarak tek basamakta üretilmektedir (Wen vd. 2009; Syam vd. 2013; Taylor vd. 2013). Nano akışkanların hazırlanmasında kararlığı sağlamak için başlıca sürfaktan ilavesi, pH kontrolü ve ultrasonik çalkalama olmak üzere üç yöntem uygulanır (Li vd. 2009; Ghadimi vd. 2011; Wusiman vd. 2013). Bu üç yöntemin tümünün uygulandığı çalışmalar olduğu gibi, sadece tek yöntemin uygulandığı çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak sürfaktan ilavesi ve ultrasonik çalkalama yönteminin birlikte kullanıldığı çalışmalar daha fazladır.

Nanoakışkanların ısı transferi cihazlarında kullanımı yanında tribolojik, surfaktan ve kaplama, çevre, eczacılık ve medikal gibi alanlarda da kullanılabilme potansiyeli bulunmaktadır (Sivashanmugam, 2012).

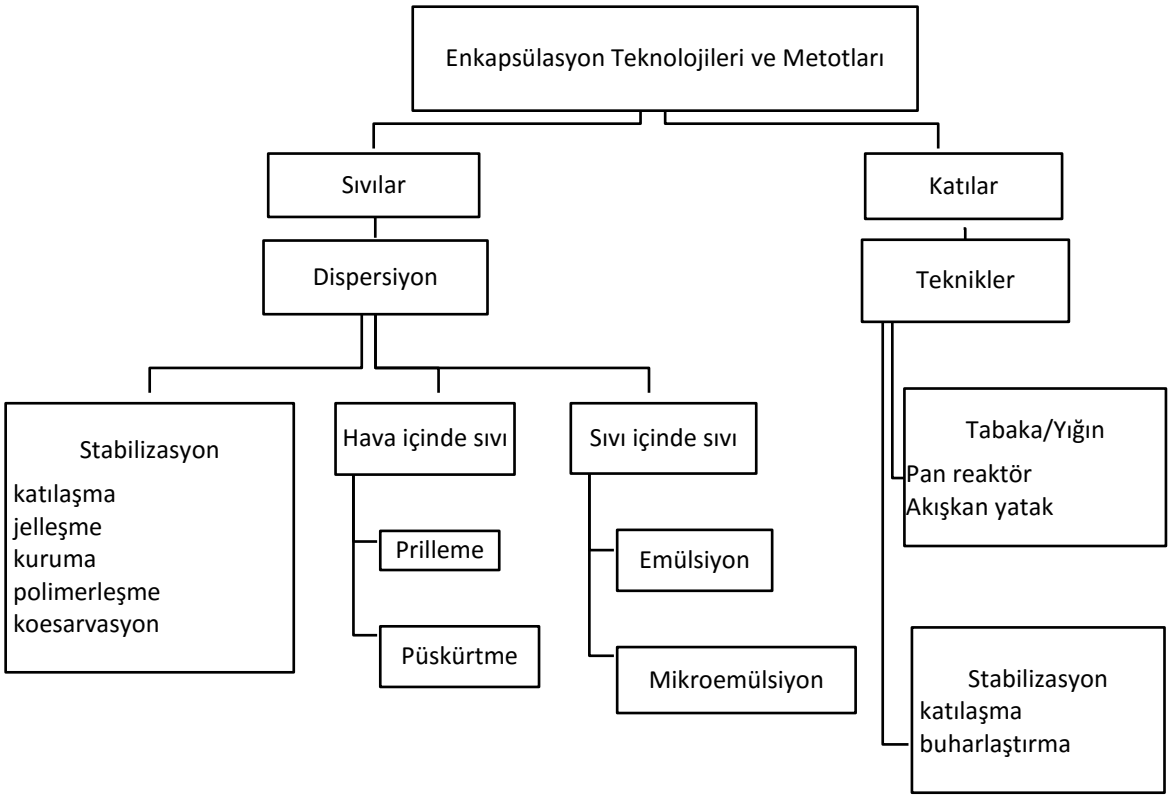
Metal oksitler, metalik olmayan ve polimer partiküller gibi çok farklı partiküller nanoakışkan hazırlanmasında kullanılmasına rağmen, CuO, Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, gibi oksitlerin kullanımı yaygındır. Bunun sebebi ısı iletim katsayılarının su, etilen glikol vb. ısıl akışkanlara göre yüksek olmasıdır (Saidur vd. 2011). Nanoakışkanların viskozite, ısı iletim katsayısı, yoğunluk

gibi özellikleri konvektif ısı transferini ve akışkan akışını etkileyen önemli özelliklerdir. Bundan dolayı birçok araştırmacı deneysel ve teorik olarak nanoakışkanların fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmalar farklı araştırmacılar tarafından derlenmiştir (Agyenim vd. 2010; Azmi vd. 2012; Chandrasekar vd. 2012; Dalkilic vd. 2012; Mahbubul vd. 2012; Taylor vd. 2013). Partikül konsantrasyonu, sıcaklık, partikül tipi ve partikül çapı araştırılan başlıca parametrelerdir.

Nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristikleri ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar farklı yazarlar tarafından derlenmiştir (Elias vd.2013;, Wen vd. 2009; Chandrasekarh vd. 2012; Huminic ve Huminic 2012; Liu ve Li 2012; Yu vd. 2012; Syam vd. 2013). Nanoakışkanların ısı değiştiricilerde kullanımı ile ilgili derleme Huminic ve Huminic (2012) tarafından verilmiştir. Bu araştırmada yapılan çalışmalar ve önerilen ısı transferi korelasyonlar tablo halinde verilmiştir. Temel akışkana göre nanoakışkanların ısı transfer katsayısını iyileştirdiği, iyileşmenin katı konsantrasyonu ve Reynolds sayısının artması ile arttığı belirtilmiştir.

Nanoakışkanların ısı transferi performansları birbirleri ile ilişkili birçok etkene bağlıdır. Genel olarak kullanılan nanopartikül ve temel akışkana ait özellikler hazırlanan nanoakışkanın yoğunluk, viskozite, ısı iletim katsayısı ve ısı kapasitesi gibi özelliklerini etkilemekte, bu özellikler de ısı performansını etkilemektedir. Bu durum Şekil 2.5'de şematik olarak gösterilmiştir. Metaller ve metal oksit gibi ısı iletim katsayıları yüksek nanopartiküller kullanıldığında akışkanın ısı iletim katsayısı artmaktadır. Ancak bu tür partiküllerin ısı kapasiteleri yaygın olarak kullanılan temel ısıl akışkanlara göre düşüktür.

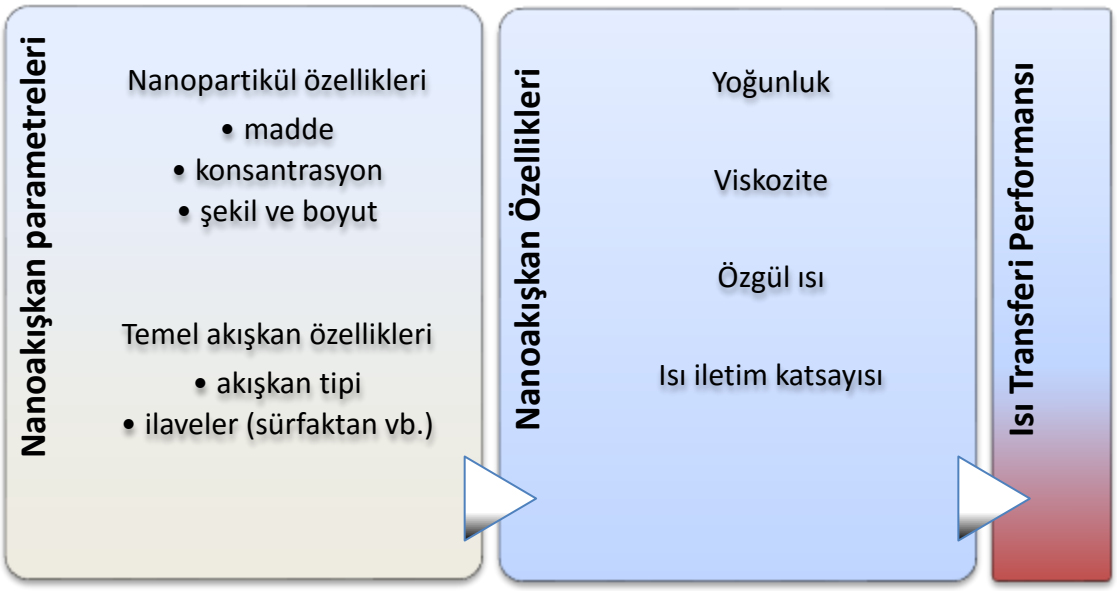
Kapsüllenmiş faz değiştiren madde (FDM) içeren nanokapsüller kullanılarak nanoakışkan hazırlanabilir. Böylece ısı transfer uygulamalarında hissedilir ısı transferi ve faz değişimi ile birlikte gizli ısı katkısından da yararlanılabilir. Bu çalışmada, faz değiştiren madde olarak n-nonadekan içeren nano boyutta kapsüller ile nanoakışkan hazırlanması ve özelliklerinin ölçülmesi ve elde edilen naoakışkanların ısı transfer performanslarının deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. 4. Kapsül elde etme metotları (Umer vd.2011)

Tablo 2. 2. Kapsül elde etme yöntemleri (Tyagi vd. 2011), Umer vd.2011)

Fiziksel yöntemler	**Kimyasal yöntemler**
• Kaplama kazanı ile kaplama • Hava süspansiyon kaplama • Santrifüj çekim • Titreşimli lüle • Püskürtmeli kurutma • Akışkan yatak kaplama • Dönen disk atomizasyon	• Arayüzey polimerizasyonu • In-situpolimerizasyon • Matriks polimerizasyonu • Çözücü evaporasyonu • Çözücü ekstraksiyonu • Koeservasyon • Liposome teknolojisi



Şekil 2.5. Isı transferi performansına etki eden nanoakışkan parametreleri (Timofeeva, 2011)

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Nanokapsüllerin Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu

Nanokapsülleme ara yüzey polimerizasyonu yöntemi ile gerçekleştirildi. Kapsüllerin çekirdeği faz değiştiren madde (n-nonadekan), kabuk kısmı ise poliüretandan oluşmaktadır. Monomer olarak TDI ve DETA kullanıldı. Kimyasal maddeler yüksek saflıkta alındı ve ilave bir saflaştırma işlemi uygulanmadı. Sürfaktan olarak NP-10 kullanıldı. Kapsül sentezinde kullanılan kimyasallar ile ilgili bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Kapsüllerin sentezi sulu ve organik faz olmak üzere iki fazın emülsiyonundan oluşmaktadır. Np-10 suda çözünerek sulu faz hazırlandı. TDI ve n-nonadekan ise siklohekzanda çözünerek organik faz hazırlandı. Bu işlemler oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Daha sonra bu iki faz karıştırılarak üzerine polimerizasyon başlatıcı olarak DETA ilave edildi. Kapsüller elde edildikten sonra çözücüler buharlaştırılarak ve su ile yıkama işlemi uygulanarak 40 ^{o}C sıcaklıkta etüvde kurutuldu. Kapsüller iki faz ara yüzeyinde TDI ile DETA arasındaki polimerizasyon reaksiyonu ile oluşmaktadır (Su vd. 2006). TDI/DETA'nın farklı oranları için denemeler gerçekleştirildi. Karıştırma için mekanik karıştırıcı ve manyetik karıştırıcı kullanıldı.

Tablo 3.1. Kapsül sentezinde kullanılan kimyasallar

Kimyasal Madde	**Saflık**	**Temin edilen Firma**
Siklohekzan	%99.8	SIGMA-ALDRICH
Toluen 2,4-diizosiyanat	%98.0	SIGMA-ALDRICH, TCI
NP-10	-	SIGMA-ALDRICH
n-Nonadekan	%99.0	SIGMA-ALDRICH, ALFA AESAR
Dietilentriamin	%99.0	SIGMA-ALDRICH
Aseton	%99.5	TEKKİM

3.2 Nanoakışkanların Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.1 Nanoakışkanların Hazırlanması

Elde edilen nanokapsüllerden 100 mL çözelti içerisinde 0.5 g, 1.0 g ve 2.0 g oranlarında katı içeren nanoakışkanlar hazırlandı. Hacimsel oran olarak bu değerler %0.42, %0.84 ve %1.68'e denk gelmektedir. Temel akışkan olarak saf su kullanıldı. Nanoakışkanların hazırlanmasında ultrasonik banyo kullanıldı. Nanoakışkanların kararlılıklarını artırmak için 1.5 g/100 mL sürfaktan ilavesi yapıldı.

3.2.2 Nanoakışkanlarının Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.2.1 Viskozite

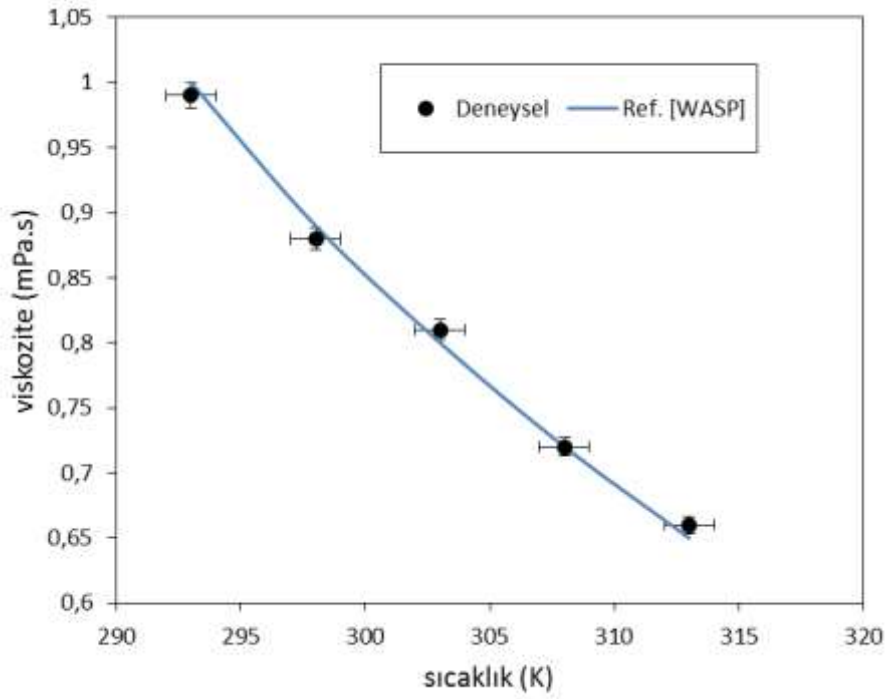
Nanoakışkanların viskozitesi deneysel veya bazı teorik modeller kullanılarak belirlenmektedir. Kullanılan temel akışkanın tipi, kullanılan nanopartiküllerin tipi, hazırlanan süspansiyon katı miktarı ve sıcaklık viskoziteyi etkileyen önemli parametrelerdir. Bu çalışmada hazırlanan nanoakışkanların viskoziteleri deneysel olarak ölçüldü. Viskozite ölçümleri için SV-10 viskozimetre kullanıldı (Şekil 3.1). Cihazın doğruluk değeri ± %1 olarak verilmektedir. Ölçüm sonuçlarının belirsizliğini tespit etmek amacıyla farklı sıcaklıklarda saf su için ölçümler yapıldı ve su için literatürde verilen değerler ile mukayese edildi. Sonuçlar Şekil 3.2'de grafik şeklinde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ölçülen değerler ile literatürde verilen değerler cihazın doğruluk aralığında uyuşmaktadır. Dolayısıyla viskozite ölçümlerindeki beklenen en yüksek belirsizlik ± %1 kabul edilmiştir. Sıcaklık ayarlamaları sirkülasyonlu su banyosu ile yapıldı.

3.2.2.2 Isı iletim Katsayısı

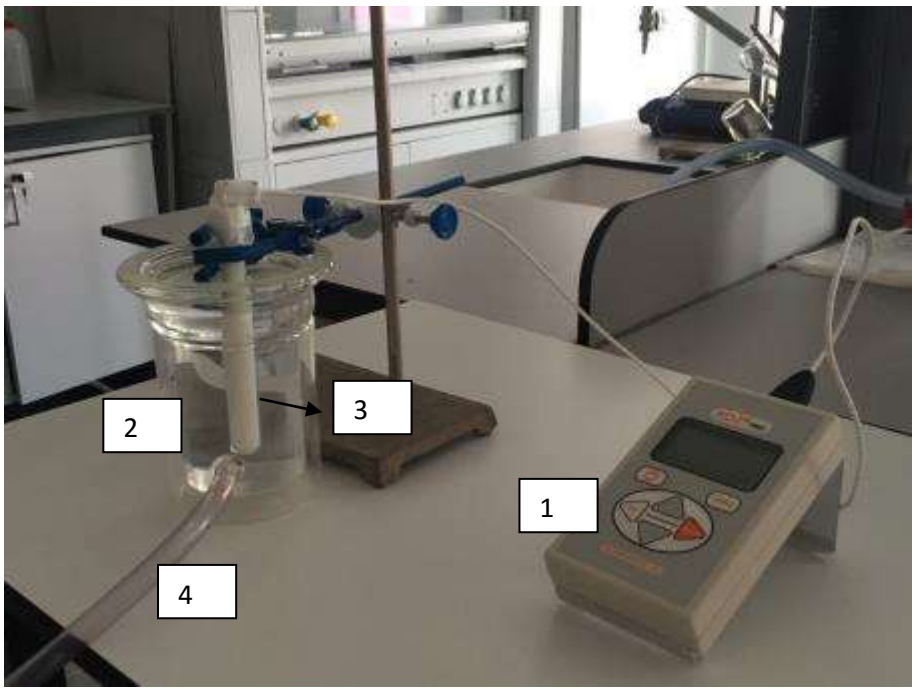
Nanoakışkanların fiziksel özelliklerini belirmek için pek çok deneysel ve teorik çalışma mevcuttur. (Kakaç ve Pramuanjaroenkij 2009; Li vd. 2009; Fan ve Khodadadi 2011; Ghadimi vd. 2011; Han ve Fina 2011; Kleinstreuer ve Feng 2011; Kleinstreuer ve Feng 2011b; Chandrasekar vd. 2012). Nanoakışkanlar ile ilgili ısı transferi çalışmalarında ısı iletim katsayısı, ya geliştirilen teorik modeller kullanılarak hesaplanmakta ya da deneysel olarak ölçülmektedir. Ancak tam olarak yeterli kabul edilen tek bir model yoktur (Kleinstreuer ve Feng 2011). Bu çalışmada ısı iletim katsayısı deneysel olarak ölçüldü. Deneysel ölçümlerde KD2 Pro (Decagon Devices Inc.) cihazı kullanıldı.



Şekil 3.1. Viskozite ölçümlerinin yapıldığı cihaz



Şekil 3. 2. Su için deneysel viskozite ölçümleri ile literatür verilerinin karşılaştırılması (Hata çubukları %1)

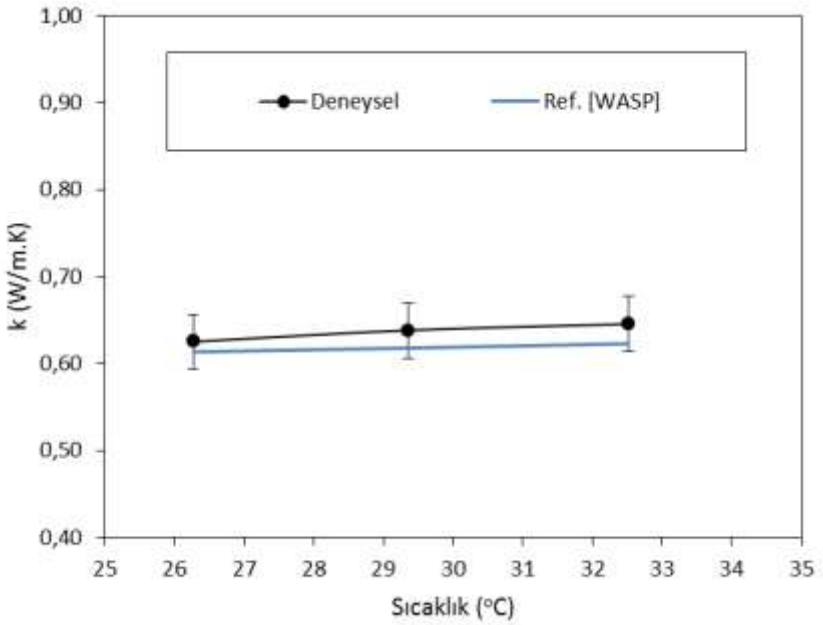


1. KD2 Pro, 2. Ceketli reaktör, 3. Örnek hücresi 4. Sirkülasyonlu su banyosu bağlantısı

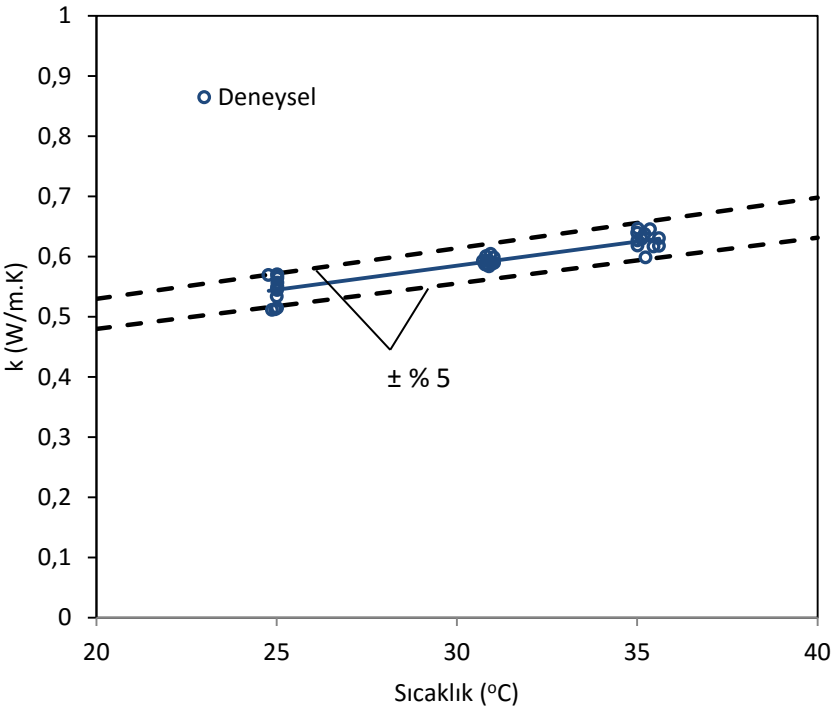
Şekil 3.3. Isı iletim katsayılarının ölçümünün yapıldığı deney sistemi

Cihaz birçok araştırmacı tarafından da nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ölçümü için kullanılmıştır (Hojjat vd. 2011; Lin vd. 2011; Azmi vd. 2012; Heyhat vd. 2012; Meng vd. 2012; Ruan ve Jacobi 2012; Suresh vd. 2012; Suresh vd. 2012a, Fauzir vd. 2013). Cihazın ölçüm doğruluğu, bu çalışmada kullanılan probu için ± %5 olarak verilmektedir.

Isı iletim katsayısı ölçümlerinde kullanılan düzenek Şekil 3.3'de verilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ölçümleri yapılmadan önce suyun ısı iletim katsayısı farklı sıcaklıklarda ölçülerek literatürdeki değerler ile karşılaştırıldı. Şekil 3.4'de su için ölçülen ve literatür değerleri grafik şeklinde verilmiştir. Deneysel ve teorik veriler arasındaki hata % 1.9- 3.6 aralığında değişmektedir. Bu cihazın doğruluk değeri olan %5 içerisinde kalmaktadır. Şekil 3.2'de hata çubukları %5'i göstermektedir. Viskozite ölçümlerinin aksine, ısı iletim katsayısı ölçümleri dış ortam koşullarından çok fazla etkilendiğinden, her bir numune için en az 10 ölçüm alınarak aritmetik ortalama alındı. Cihaz aynı zamanda numunenin sıcaklığını da ölçmektedir. Dolaysıyla her ölçümde hem sıcaklık hem de ısı iletim katsayısı birlikte ölçüldü. Temel akışkan için elde edilen ölçümler Şekil 3.5'de verilmiştir. Görüldüğü gibi sapmalar ± %5 aralığında kalmaktadır.



Şekil 3.4. Su için deneysel ısı iletim katsayısı ölçümleri ile literatür verilerinin karşılaştırılması (Hata çubukları % 5'i göstermektedir).



Şekil 3.5.Temel akışkan için ısı iletim katsayısı ölçümleri

3.2.2.3 Yoğunluk

Nanoakışkanların etkin yoğunluğu iki faz karışımı yaklaşımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Huminic ve Huminic 2012):

$$\rho_{na} = (1-\phi)\rho_{ta} + \phi\rho_{np} \tag{3.1}$$

Burada ρ_{ta} temel akışkanın ρ_{np} nanopartikülün yoğunluğunu, ϕ ise katı hacim derişimini göstermekledir. Bu çalışmada sentezlenen nanokapsüllerin yoğunlukları piknometre (Quantachrome) ile deneysel olarak ölçüldü. Bu ölçülen partikül yoğunlukları ile Eş.(3.1) kullanılarak süspansiyonların yoğunlukları hesaplandı. Sıcaklık ayarlamaları sirkülasyonlu su banyosu ile yapıldı. Ağırlık ölçümleri hassas analitik terazi yardımı ile gerçekleştirildi

3.2.2.4 Özgül ısı

Süspansiyonlara ait özgül ısı aşağıdaki ifade yardımı ile hesaplandı.

$$(c_p)_{na} = (1-w)(c_p)_{ta} + w(c_p)_{np} \tag{3.2}$$

Burada, w partikül katı oranı, $(c_p)_{ta}$ temel akışkanın ısı kapasitesi, $(c_p)_{np}$ nano partiküllerin ısı kapasitesi, $(c_p)_{na}$ ise nanoakışkanın ısı kapasitesidir. Elde edilen nanokapsüllerin c_p değerleri, DSC analizleri ODTU Merkezi laboratuvarlarında hizmet alımı ile gerçekleştirildi. Eş.(3.2) faz değişiminin olmadığı durumda nanoakışkanın özgül ısısını vermektedir. Faz değişimi olduğu durumda erime gizli ısısı da dikkate alınmalıdır. Hazırlanan nanoakışkanların toplam ısı kapasitesi, temel akışkanın hissedilir ısı kapasitesi, kapsüllerin hissedilir ısı kapasitesi ve erime ısılarından oluşmaktadır. T_1 sıcaklığında T_2 sıcaklığına değiştirdiğinde toplam entalpi aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir (Huang, Noeres vd. 2010).

$$\Delta h_t = \Delta h_{ta} + \Delta h_{np} + \Delta h_e = w_{ta}(c_p)_{ta}(T_2 - T_1) + w_{np}(c_p)_{np}(T_2 - T_1) + w_{np}\Delta h_e \tag{3.4}$$

Eş.(3.2) ve (3.4) birlikte yeniden düzenlenirse,

$$C_t = (1-w)(c_p)_{ta} + w(c_p)_{np} + \frac{w\Delta h_e}{\Delta T} \tag{3.5}$$

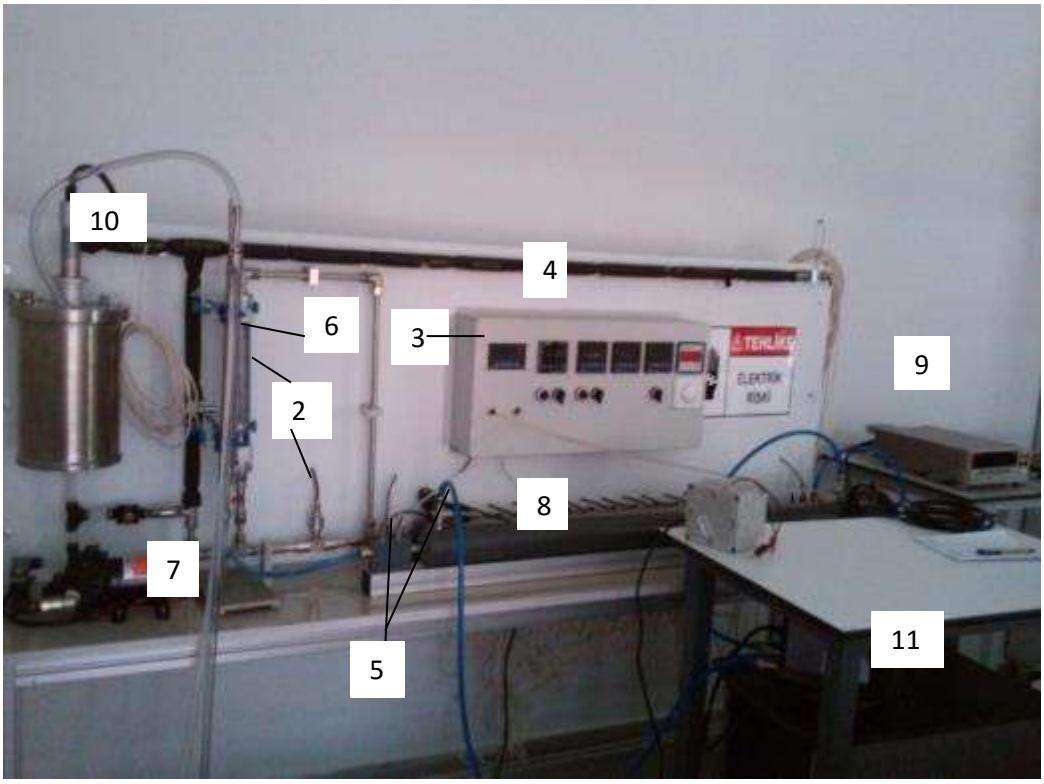
Burada C_t nanoakışkanın efektif ısı kapasitesi şeklinde düşünülebilir. Benzer bir ifade ağırlık fraksiyonu yerine hacim fraksiyonu kullanılarak Choi vd. (1994) tarafından da kullanılmıştır. Faz değişim sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda Eş.(3.5)'in sağ tarafındaki son terim düşer.

3.3 Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Ölçümleri

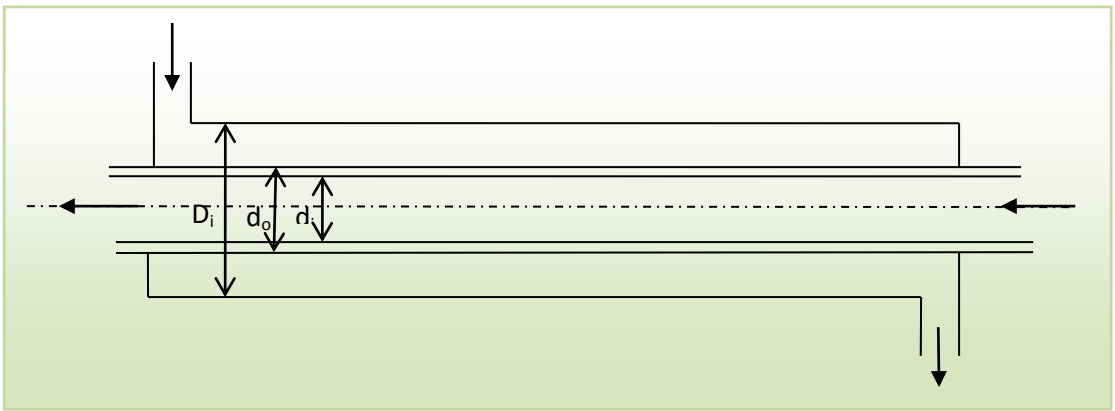
3.3.1 Deney sistemi

Isı transferi ölçümlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 3.6'da verilmiştir. Deney düzeneği başlıca çözelti tankı, test bölgesi, debi ölçer, basınç ve sıcaklık ölçerden oluşmaktadır. Ayrıca test bölgesinde çıkan çözeltinin soğutulması için ısı değiştirici bulunmaktadır. Çözelti tankının içerisine soğutma/ısıtma yapılabilmesi için serpantin yerleşilmiştir. Soğutma serpantini içerisinde soğutma özelliği olan sirkülasyonlu su banyosu yardımı ile su dolaştırılmıştır. Ayrıca devri ayarlanabilen mekanik karıştırıcı içermektedir. Akış debilerinin ölçümü için hem şamandıralı hem de türbin tipi debi ölçer (Flowtech KP500-10) bulunmaktadır. Akış ölçerin doğruluğu ± %1'dir. Çözelti akışı devri ayarlanabilen bir pompa yardımı ile sağlanmaktadır. Test bölgesi, 1100 mm uzunluğunda ve iç çapı 8 mm, dış çapı 10 mm olan bir çelik borudan oluşan çift borulu bir ısı değiştiriciden oluşmaktadır. Çift borunun iç kısmında test akışkanı (soğuk akışkan) dış bölgede ise sıcak akışkan geçirilerek ısı transferi ölçümleri gerçekleştirildi. Dış boru iç çapı 28 mm, dış çapı ise 32 mm olan çelik borudan oluşmaktadır. En dış kısım ise yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Sıcak akışkanı sağlamak için sıcaklığı ayarlanabilen sirkülasyonlu su banyosu kullanıldı. Sıcak ve soğuk akışkanların giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için K tipi termoçift kullanıldı. Sıcaklık sensörleri kullanılmadan önce su banyosu kullanılarak kalibre edildi. Sıcaklık ölçümleri için belirsizlik ± 0.1 ^{o}C'dır. Sıcaklık ölçümleri ve kaydedilmesi veri okuma kartı yardımı ile bilgisayarla gerçekleştirildi (KEITHLEY 2700/7700). Test bölgesinde basınç düşüşü de ayrıca ölçülebilmektedir. Basınç ölçümleri diferansiyel basınç ölçer (Ordel DPC100) ile gerçekleştirildi. Cihazın doğruluğu ± % 0.8 olarak belirtilmektedir.

Sıcak akışkanın debisi 6.0 ± % 1 L/dak'da sabit tutuldu. Soğuk akışkanın debisi ise 1.67-6.67 L/dak aralığında değiştirildi. Bu debilere tekabül eden Reynolds sayısı 5000-20000 aralığındadır.



1. çözelti tankı,
2. akış ölçerler
3. basınç göstergesi
4. akış ölçer göstergesi
5. akışkan sıcaklık sensörleri
6. soğutucu
7. çözelti pompası
8. test bölgesi
9. veri okuma kartı,
10. karıştırıcı
11. sirkülâsyonlu su banyosu



Şekil 3.6. Isı transferi ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği

3.3.2 Hesaplamalar ve Değerlendirme

Akış debileri Eş.(3.6) kullanılarak Reynolds sayısına dönüştürüldü.

$$\mathrm{Re} = \frac{4\dot{m}}{\pi d_i \mu} \tag{3.6}$$

Test bölgesi için ısı aktarım eşitliği aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$Q = UA\Delta T_{LM} \tag{3.7}$$

İç borudan ve dış halkasal alandan akan akışkanlar için ısı eşitliği aşağıdaki denklemler ile verilir.

$$Q_c = \dot{m}_c\, c_p \left(T_{c2} - T_{c1}\right) \tag{3.8}$$

$$Q_h = \dot{m}_h\, c_p \left(T_{h2} - T_{h1}\right) \tag{3.9}$$

Burada, U tüm ısı aktarım katsayısı A ısı transfer alanı, ΔT_{LM} logaritmik ortalama sıcaklık farkı, T_2, T_1: sırasıyla soğuk/sıcak akışkanların çıkış ve giriş sıcaklığını, $\dot{m}$ ise akışkan debisini göstermektedir.

Eş.(3.7)-(3.9)'dan tüm ısı aktarım katsayısı Eş.(3.10) yardımı ile hesaplanabilir.

$$U = \frac{Q}{A\Delta T_{LM}} \tag{3.10}$$

Tüm ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile verilmektedir.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(d_o / d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_{io}} \tag{3.11}$$

Burada; h_i ve h_o sırası ile iç ve dış akışkan tarafına ait taşınım ısı transfer katsayısını, k boru malzemesinin ısı iletim katsayısını göstermektedir.

Test bölgesindeki basınç düşüşleri aşağıdaki denklem yardımıyla sürtünme faktörüne dönüştürüldü.

$$f = \frac{\Delta P}{(L/d_i)\frac{1}{2}\rho u^2} \tag{3.12}$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Nanokapsül Sentezi ve Karakterizasyonu

4.1.1 Uygun Reaktan Oranının Belirlenmesi

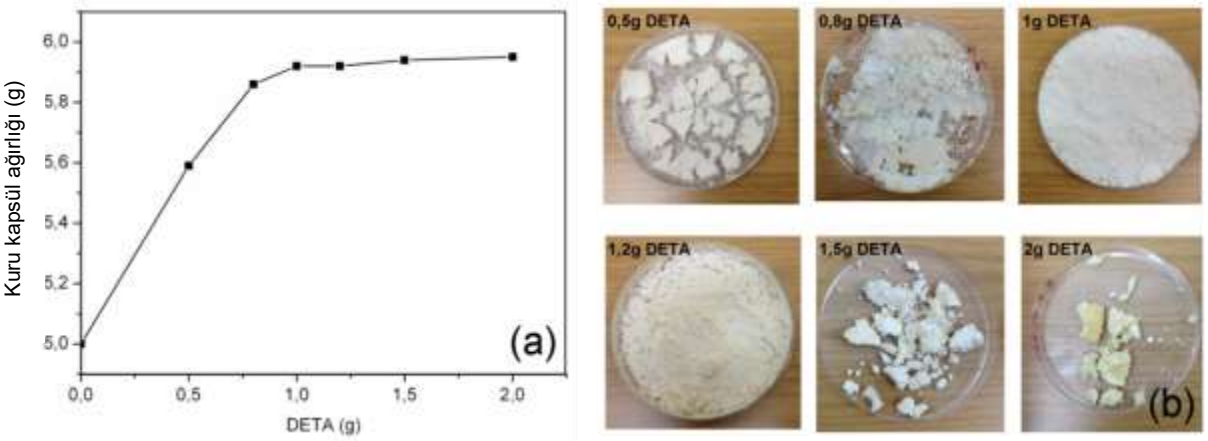
Uygun TDI/DETA oranın belirlenmesi için 1000 rpm karıştırma hızı altında TDI'nın sabit miktarına karşı farklı miktarlarda DETA kullanılarak nanokapsül sentezi yapıldı. Sentez esnasında TDI/DETA oranın dışındaki parametreler sabit tutuldu. Polimerizasyon işlemlerinden sonra poliüretan ve n-nonadekandan oluşan nanokapsüllerin kuru ağırlıklarını belirlemek için siklohekzan tamamen uzaklaştırıldı ve kalan katı kısımlar tartıldı. Nanokapsüllerin kuru ağırlık grafiği ve fotoğraf görüntüleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1a'dan görülebileceği gibi nanokapsüllerin kuru ağırlıkları, DETA miktarı 0'dan 0.8'e artıyorken doğrusal olarak artmaktadır. Fakat DETA ağırlığı 0.8 g'den 2 g'a artıyorken çok az bir artış görülmektedir. Bu sonuç TDI ara yüzeyde tükendiğinde aşırı miktarda ilave edilen DETA'nın reaksiyona girmediği anlamına gelir. Diğer taraftan 1.0 g'ın üzerinde DETA ilavesinden sonra elde edilen nanokapsüllerin bazı kısımları kırılgan camsı yapıya ve wax kıvamına sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.1b). Bu durum, aşırı DETA ilavesiyle kapsüllerin koagüle olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.1'de verilen deney sonuçlarından en uygun TDI/DETA oranın 3/1 (a/a) olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.2 Uygun Yüzey Aktif Madde Seçimi

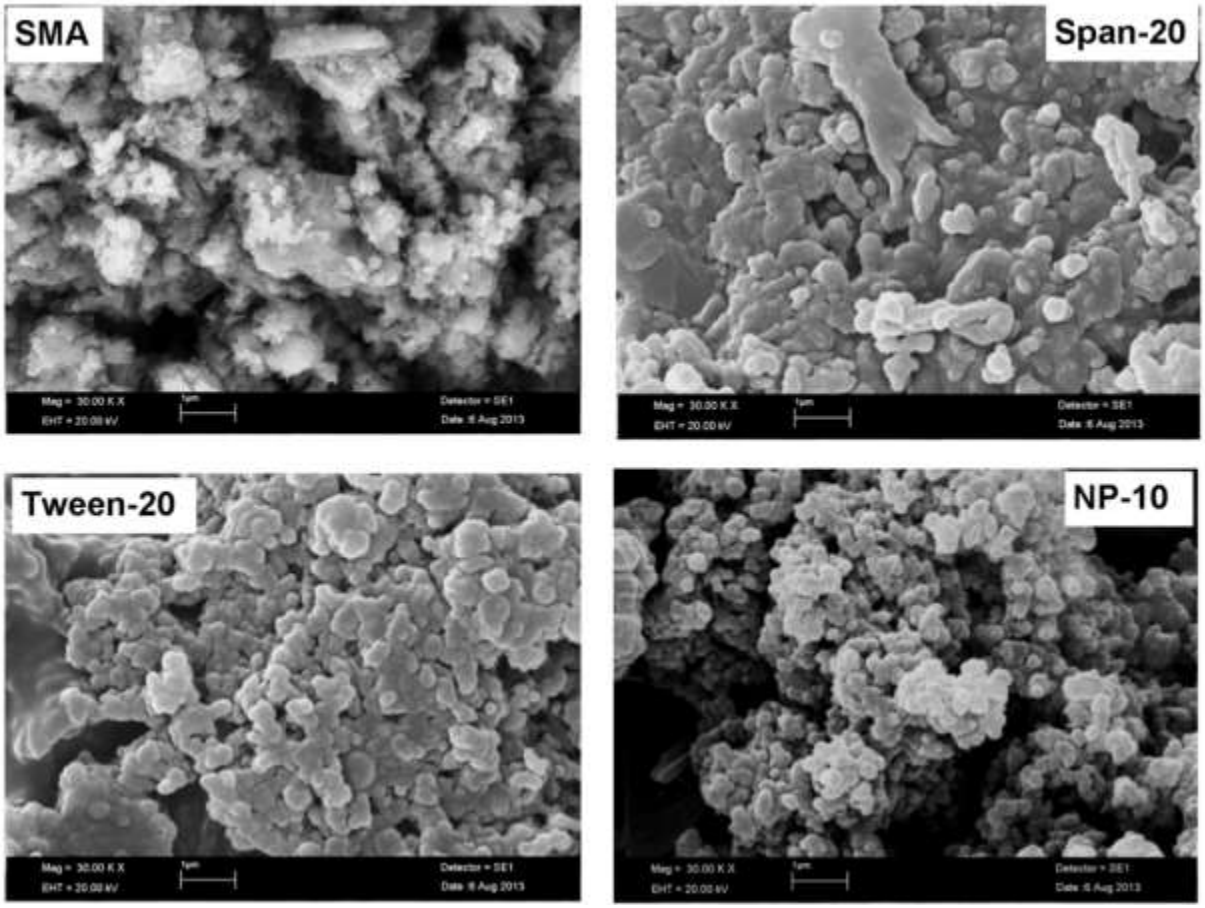
Proje sunum aşamasında sürfaktan olarak SMA planlanmıştı. Fakat yapılan ön denemeler ile SMA ile iyi sonuç alınamadığı görüldü ve yüzey aktif madde olarak SMA, Tween 20, Span 20 ve NP 10 gibi farklı sürfaktanlar ile çok sayıda deneme yapıldı. Deneylerde TDI/DETA oranı 3/1 şeklinde sabit tutuldu. Elde edilen ürünlerin SEM görüntüleri Şekil 4.2'de verilmiştir. SMA dışındaki yüzey aktif maddeler ile kapsül üretilebildiği Şekil 4.2'den görülmektedir. En iyi sonuç veren sürfaktan olarak NP-10 belirlendi ve diğer çalışmalarda kullanıldı.

4.1.3 SEM Analizleri ve Boyut Analizi

Üretilen nanokapsüllerin yıkama ve kurutma işlemlerinden sonra yüzey morfolojisinin ve tanecik büyüklüğünün belirlenmesi için SEM analizleri yapıldı. SEM görüntüleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde ve ODTU merkezi araştırma laboratuvarlarında hizmet alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'de dört farklı örneğe ait SEM görüntüleri verilmiştir. Deney koşulları, kullanılan kimyasalların miktarı, karıştırma hızı elde edilen kapsüllerin şeklini önemli derecede etkilemektedir.



Şekil 4.1. Farklı TDI / DETA oranlarında sentezlenen nanokapsüllerin kuru ağırlık grafiği ve fotoğraf görüntüleri



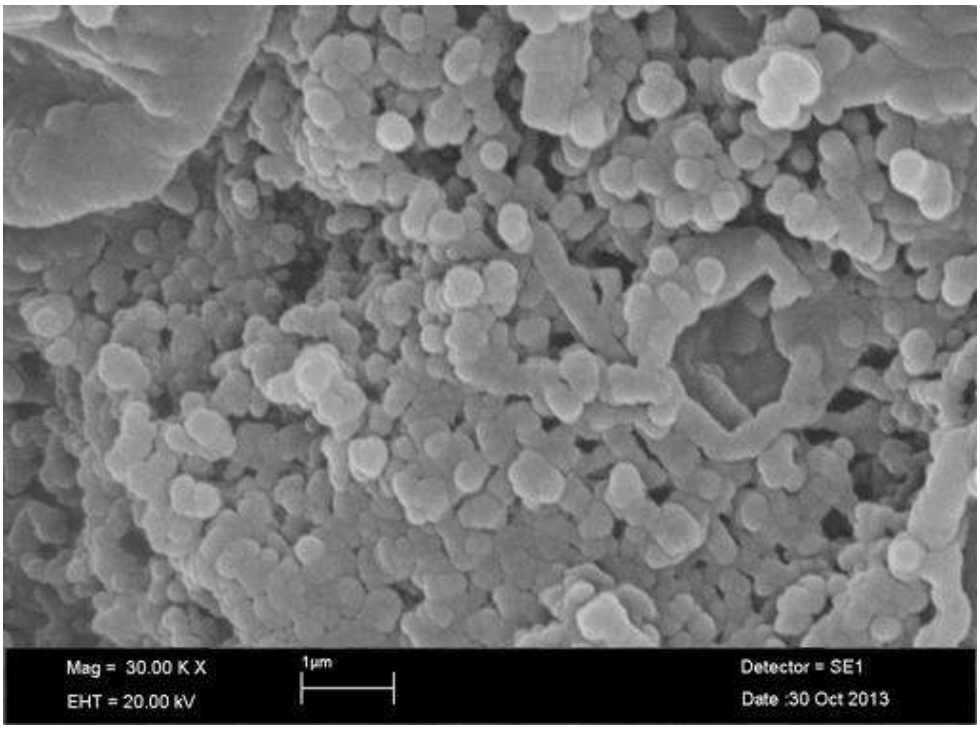
Şekil 4.2. Farklı sürfaktanlar ile elde edilen kapsüllerin SEM görüntüleri

Görüntüleri verilen örneklere ait bazı deneysel koşullar Tablo 4.1'de verilmiştir. N1 ve N2 örnekleri için diğer koşullar sabit tutularak sadece DETA oranı değiştirilmiştir. N1 numunesinde DETA miktarı 1 g, N2 numunesinde ise 1.5 g'dır. Görüldüğü gibi N2 numunesinde topaklanma artmıştır. N1 ve N3 numunesinde elde edilen kapsüller daha düzgün geometride ve topaklanma daha azdır. N1, N3 ve N4 numuneleri için diğer koşullar aynı fakat karıştırma hızı farklıdır. Kapsül sentezi iki farklı fazın emülsiyonuna dayandığı için karıştırma şekli ve hızı önemli bir faktördür. Manyetik karıştırma ile karıştırma hızı 1000 rpm'den 1250 rpm artırıldığında daha düzgün kapsüller elde edildiği görülmektedir. Ancak mekanik karıştırıcı ile aynı sonuç elde edilemediği görülmektedir (Şekil 4.3d).

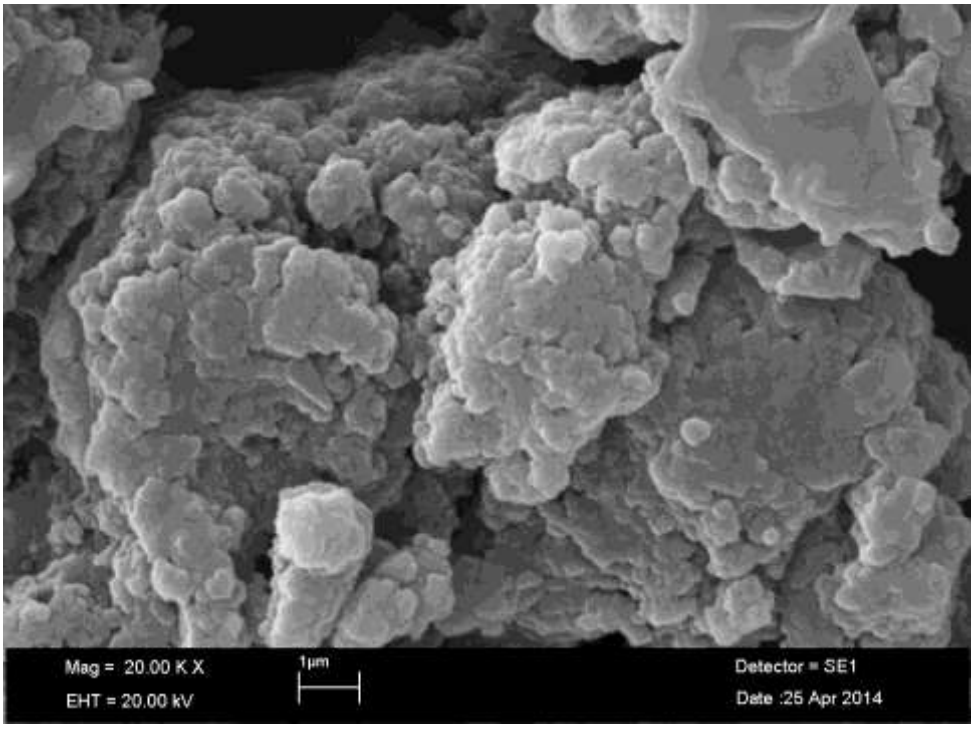
SEM görüntülerinden elde edilen kapsüllerin nanometre boyutunda olduğu görülmektedir. Katı partiküllerin boyut dağılımı ve boyut analizi için faklı cihazlar kullanılmaktadır. Kullanılan diğer bir yöntem ise SEM görüntülerinde kullanılan skala esas alınarak tanecik sayarak boyutların ölçülmesidir. Bu çalışmada elde edilen SEM görüntüleri ve ticari bir program yardımı ile taneciklerin boyutları belirlenmiştir. Bu yöntem belli oranda belirsizlik içermesine rağmen yaygın olarak başvurulan bir yöntemdir. Bu program vasıtasıyla elde edilen veriler grafiğe geçirilerek nanokapsüllere ait parçacık büyüklüğü dağılım grafiği N1 ve N3 örneği için Şekil 4.4 'de gösterilmiştir. Ölçülen tanecik sayısı 200'ün üzerindedir. Ortalama değer aritmetik ortalamadan hesaplandı. Şekil 4.4'den görülebileceği gibi nanokapsüllerin boyutları N1 örneği için 100-400 nm aralığında ve ortalama çapı ise 213 nm'dir . N3 örneği için ise partikül çapları 50-170 nm aralığında ve ortalama çap ise 103 nm dir. SEM görüntüleri ve diğer analiz sonuçları N3 örneğinde elde edilen kapsüllerin ısı transferi çalışmalarının yapılabileceği boyut ve özelliklerde olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı diğer deneysel çalışmalarda N3 örneğinde sentezlenen kapsüller kullanıldı. Çok az sayıda büyük tanecikler Şekil 4.5b'de gösterilmemiştir. Şekil 4.6'da örneğe ait TEM görüntülerinden de elde edilen kapsüllerin büyük oranda küresel yapıda olduğu görülmektedir. Ayrıca büyük taneciklerin yüzeyinde daha küçük taneciklerin topaklaşma eğilimi de görülmektedir.

Tablo 4.1: Şekil 4.3'de SEM görüntüleri verilen örneklerin deneysel koşulları

Örnek	TDI/g	DETA/g	Karıştırma şekli	Karıştırma hızı/rpm
N1	3	1.0	Manyetik karıştırıcı	1000
N2	3	1.5	Manyetik karıştırıcı	1000
N3	3	1.0	Manyetik karıştırıcı	1250
N4	3	1.0	Mekanik karıştırıcı	1500

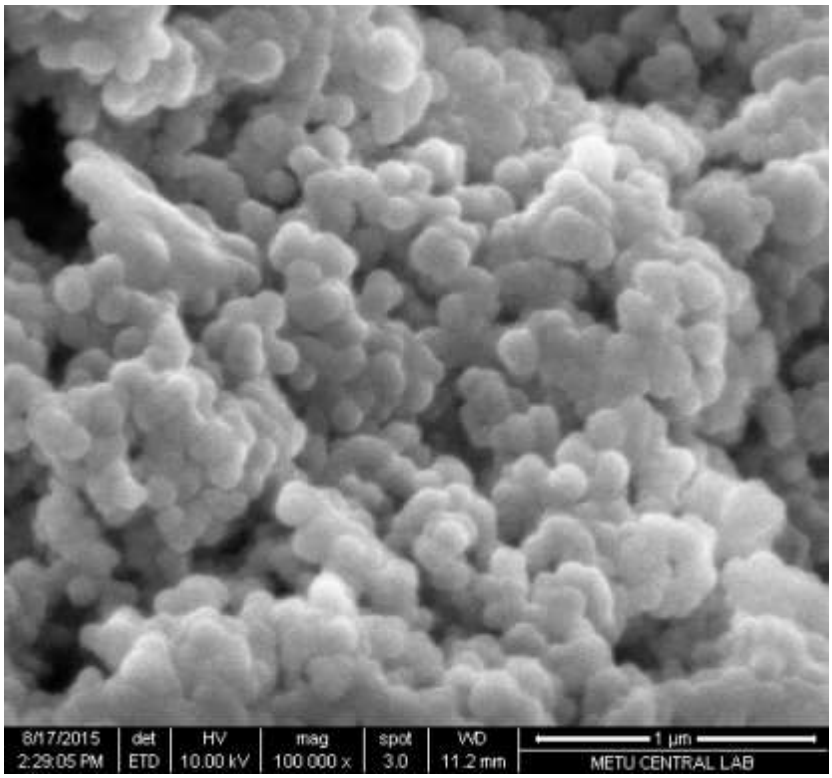


(a)

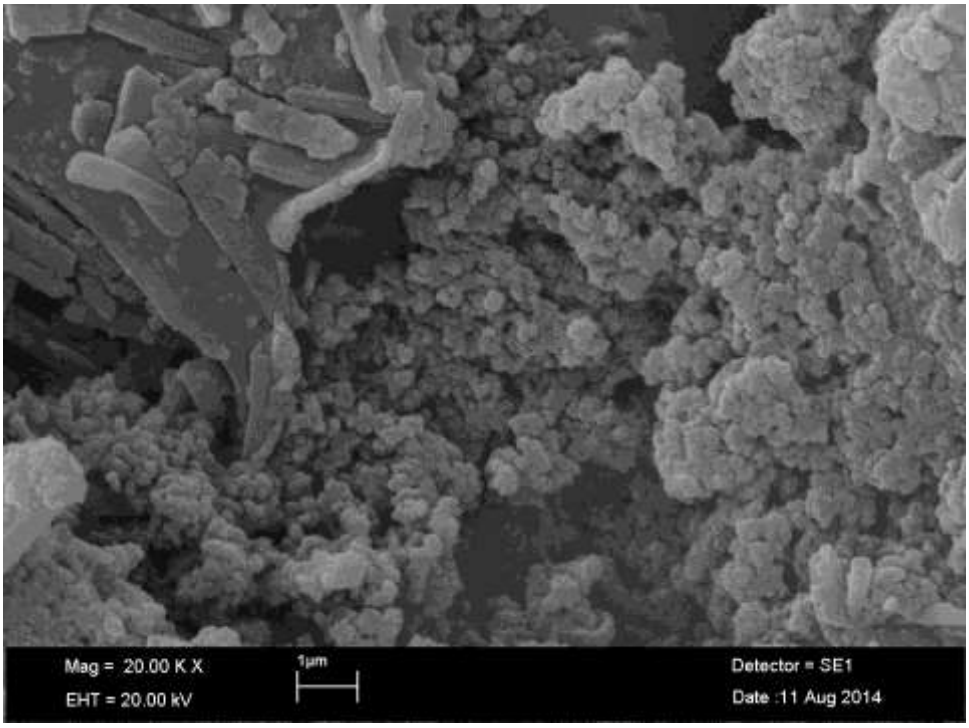


(b)

Şekil 4.3. PU/nonadekan nanokapsüllerin SEM fotoğrafı (a): örnek N1, (b): örnek N2

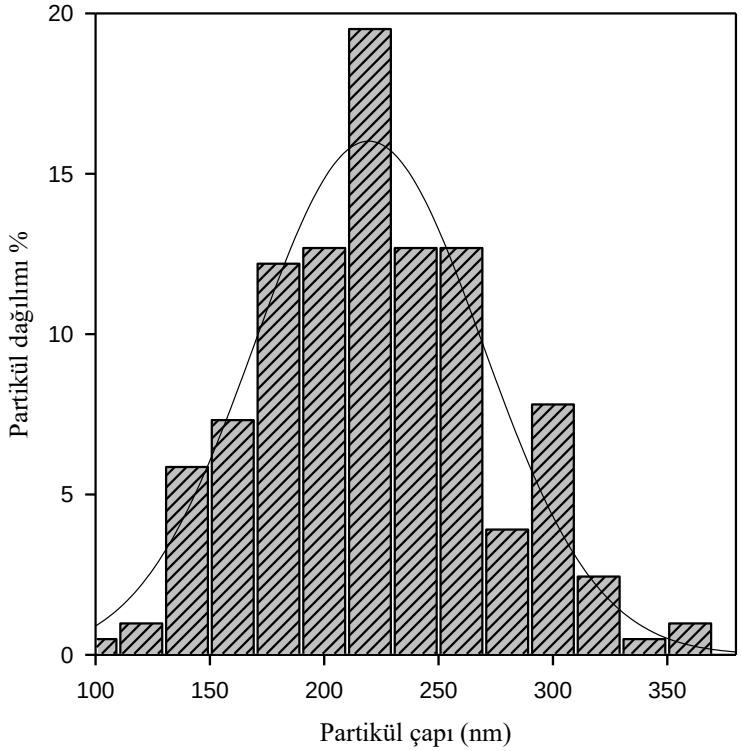


(c)

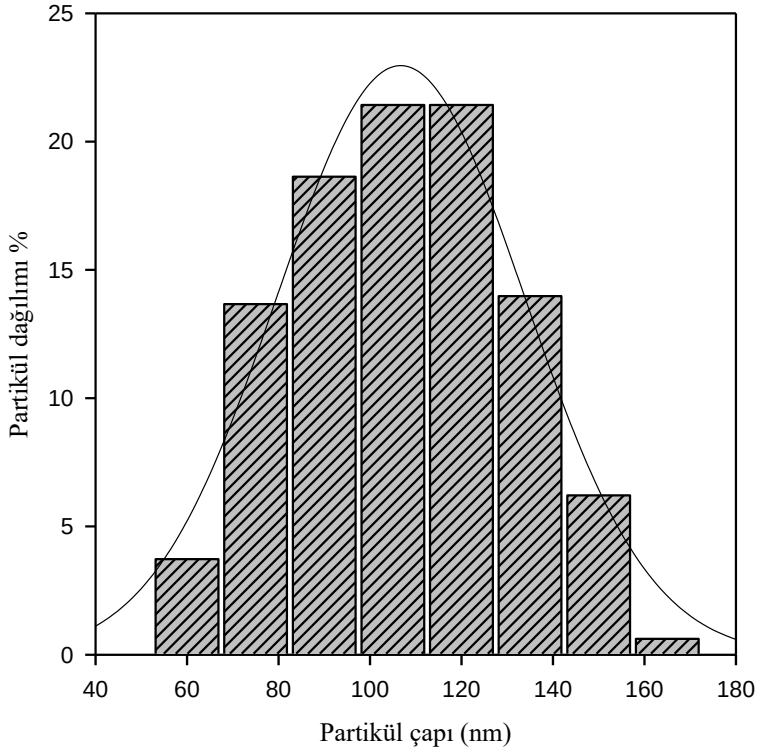


(d)

Şekil 4.3. PU/nonadekan nanokapsüllerin SEM fotoğrafı (c): örnek N3, (d): örnek N4

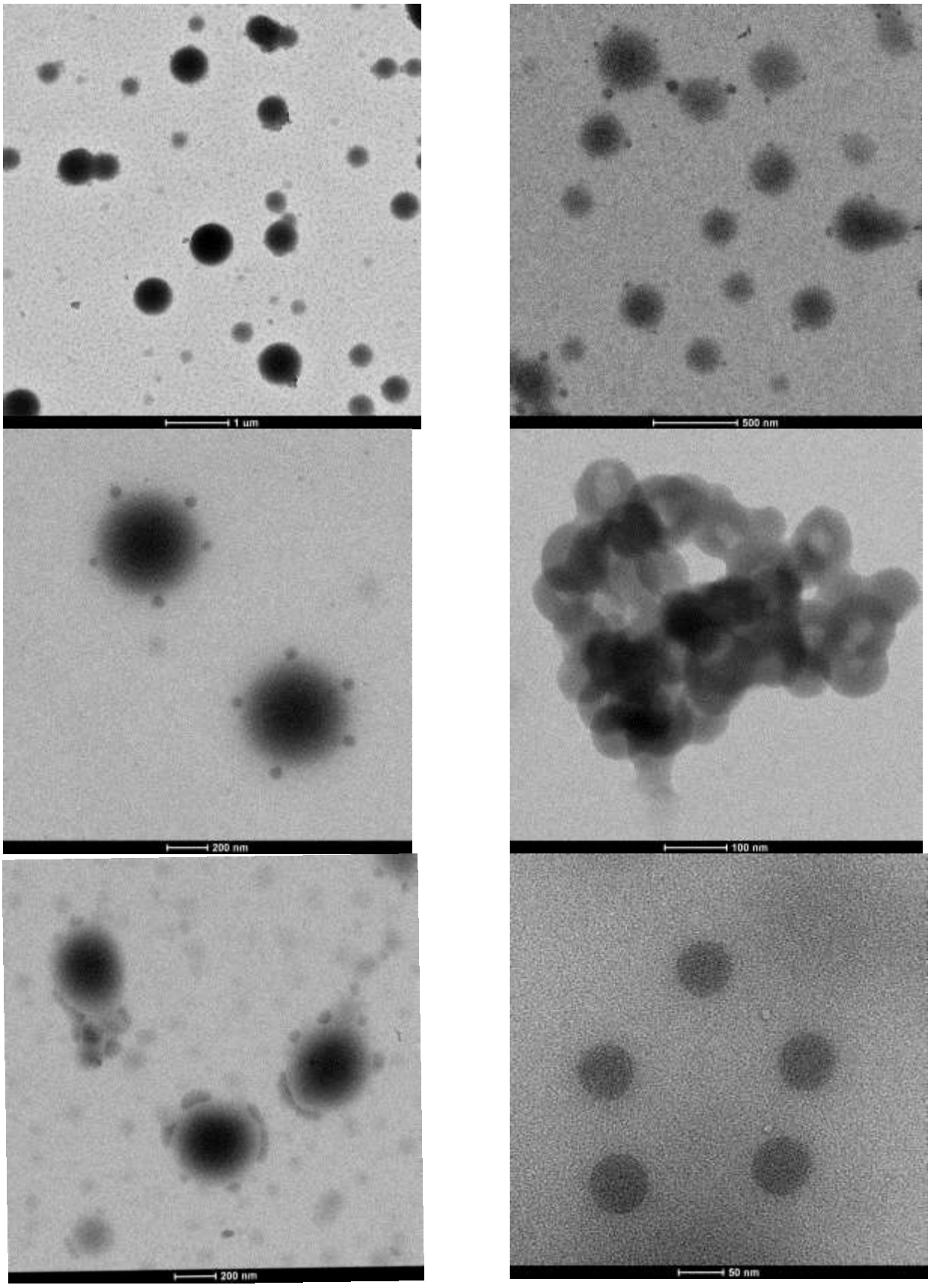


(a)



(b)

Şekil 4.5. PU/nonadekan nanokapsüllerinin boyut dağılım grafiği (a):örnek N1, (b): örnek N2



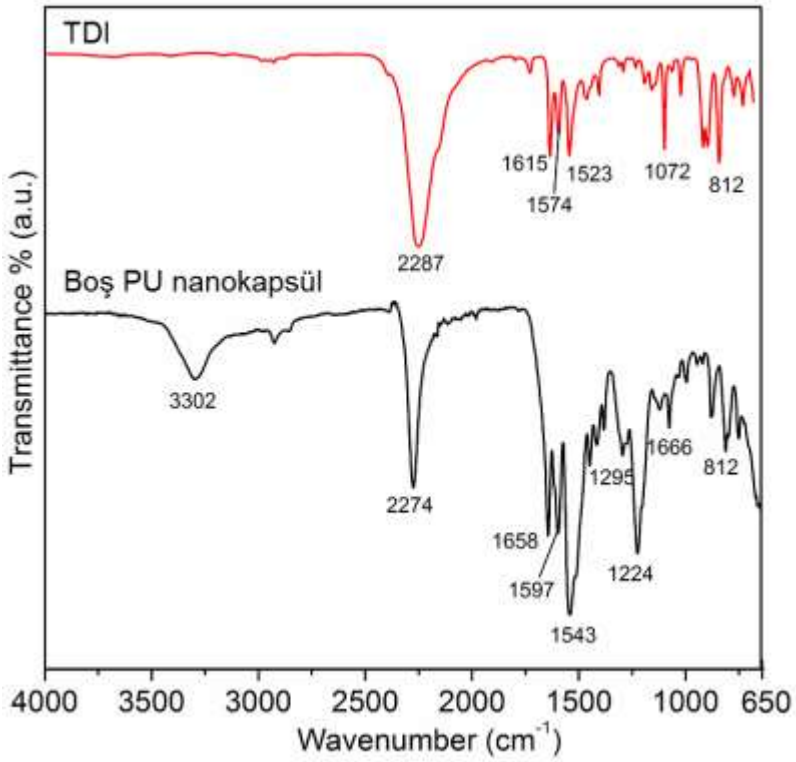
Şekil 4.6. TEM görüntüleri

4.1.4 FTIR Analizleri

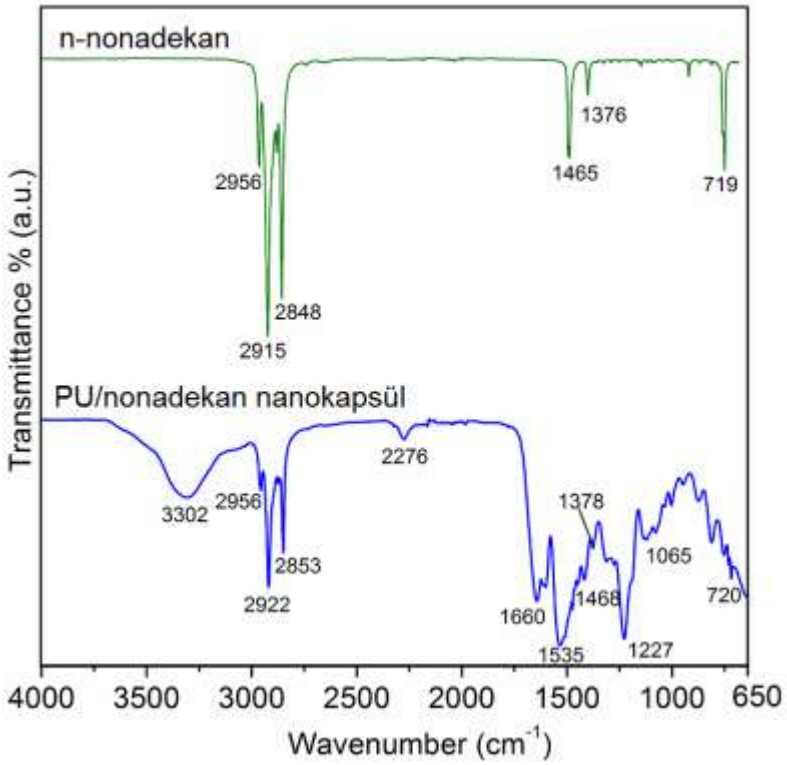
FTIR analizleri polimer kabuk malzemesinin kimyasal yapısının ve nanokapsüllerin içeriklerinin belirlenmesine olanak sağlar. Ayrıca FTIR analizleri TDI'nın gerçek reaksiyon derecesinin belirlenmesi için gereklidir. Şekil 4.7'de TDI, PU (poliüretan, faz değiştiren madde içermeyen, diğer bir ifade ile boş kapsüller), saf n-nonadekan ve kapsüllenmiş nonadekan (PU/nonadekan) örneklerine ait FTIR spektrumları verilmiştir. TDI'nın FTIR spektrumunda, TDI'nın izosiyanat (-NCO) gruplarına ait absorpsiyon bantları 2287 cm^{-1} ve 1523-1574 cm^{-1}aralığında gözlenmektedir. Şekil 4.7a'dan görülebileceği gibi boş PU nanokapsüller 812, 1224, 1295, 1543, 1597, 1643, 2274 ve 3302 cm^{-1}'de bir çok karakteristik pike sahiptir. Bu FTIR spektrumunda 2274 and 1543-1597 cm^{-1}'de gözlenen pikler TDI'nın reaksiyona girmeden kalan izosiyanat guruplarından gelmektedir. Bu sonuç nanokapsüllerin; PU polimerinin uç kısımlarında bulunan reaksiyona girmemiş izosiyanat guruplarına sahip olduğunu göstermektedir. 3302 cm^{-1}'de N–H gerilme titreşimine ve 1533 cm^{-1} N-H eğilme titreşimine ait pikler üretan bağının oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, 1643 cm^{-1}'de PU'nın karbonil grubundan (–CO) gelen ve 1066 cm^{-1}'de ester grubuna (C-O=C) ait pikler nanokapsüllerde üretan bağının bulunduğunu doğrulamaktadır. Bu sonuç nanokapsüllerin kabuk yapısının poliüretan olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 4.7b'de n-nonadekanın FTIR spektrumunda 2956, 2915 ve 2848 cm^{-1}'de gözlenen pikler C–H gerilme pikleri ve 1465, 1376 ve 719 cm^{-1}'de gözlenen pikler ise n-alkanlar için karakteristik piklerdir. N-nonadekan ve PU/nonadekan nanokapsüllerinin FTIR spektrumları mukayese edildiğinde PU/nonadekan nanokapsüllerinin n-nonadekan ve PU'a ait pikleri içerdiği açıkça görülmektedir. PU/nonadekan nanokapsüllerinin spektrumunda gözlenen n-nonadekana ait spesifik pikler PU nanokapsüller içerisinde nonadekanın başarılı bir şekilde hapsedildiğini gösterir.

4.1.5 DSC Analizleri

Saf nonadekan ve PU/nonadekan'ın erime-katılaşma sıcaklıkları ve faz değişim entalpileri DSC analizleriyle belirlendi. DSC analizleri 5-10 mg numune kullanılarak 5ºC/dak ısıtma ve soğutma hızında argon atmosferinde gerçekleştirildi. Sonuçların güvenirliği açısından her bir DSC ölçümü 2 kez tekrarlandı ve elde edilen DSC termogramları sırasıyla Şekil 4.8-4.9'da gösterilmiştir. Bu DSC termogramlarından erime ve katılaşma sıcaklıkları nonadekan için 30.9 ve 35.4°C, PU/nonadekan için 29.6 ve 35.1°C, olarak belirlenmiştir. Erime ve katılaşma gizli ısıları n-nonadekan için 185.8 ve 182.5 J/g, PU/nonadekan için 83.3 ve 82.2 J/g olarak ölçülmüştür.

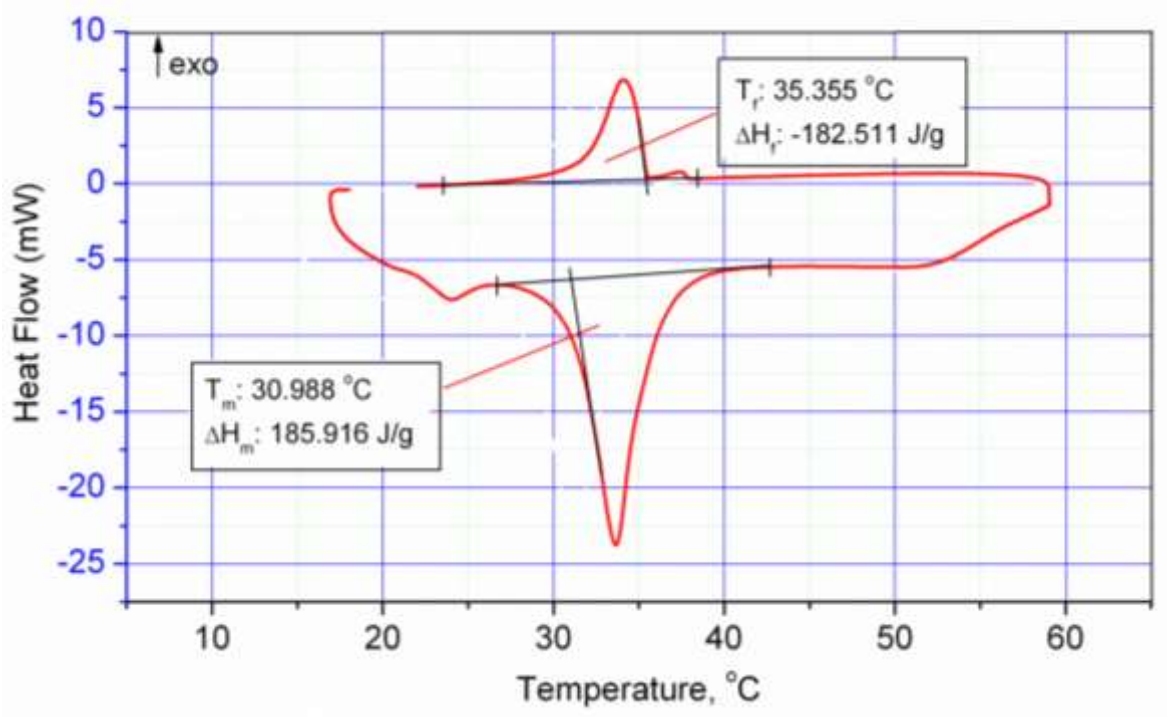


(a)

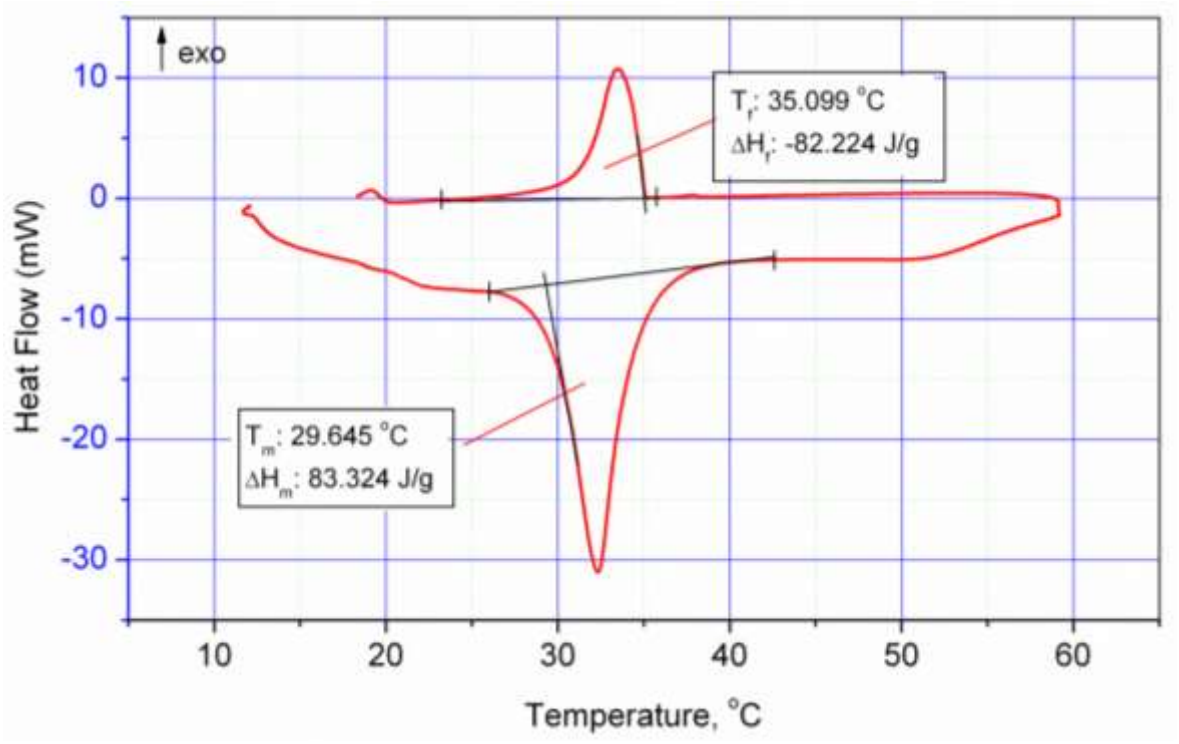


(b)

Şekil 4.7. Örneklerin FTIR spektrumları



Şekil 4.8. Saf n-nonadekanın DSC termogramı



Şekil 4.9. PU/nonadekan kapsüllerin DSC termogramı

PU/nonadekan nanokapsüllerinin faz değişim sıcaklıkları saf nonadekanınkinden biraz düşüktür. Nanokapsüller içerisindeki nonadekan içeriği entalpi ölçümüne göre aşağıdaki Eş.(4.1) ile belirlenmiştir. Buna göre n-nonadekan içeren PU nanokapsüllerinin bileşimi %45 nonadekann/% 55 PU olarak belirlenmiştir.

$$\%\, n\text{-}nonadekan\ \ içeriği\ (a/a) = \frac{\Delta H_{NEPCM}}{\Delta H_{PCM}} x100 \qquad (4.1)$$

Burada ΔH_{NEPCM} n-nonadekan içeren nanokapsüllerin erime ısısı (J/g), ve ΔH_{PCM} ise saf nonadekanın erime ısısıdır (J/g).

Şekil 4.17'den üretilen nanokapsüllerin özgül ısılarını belirlemek amacı ile elde edilen DSC termogramlarına bakıldığında kapsüllerin ve saf n-nonadekanın erime entalpileri için sırasıyla 92.846 J/g ve 212.179 J/g değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Sırasıyla saf nonadekan ve kapsüller için erime/katılaşma için onset değerleri 32.12/31.9 ^{o}C ve 30.34/3.78 ^{o}C şeklindedir. Bu değerler Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilen değerlerden biraz faklı olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin iki numune için kullanılan n-nonadekanların farklı firmalardan temin edilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda termogramlar farklı cihazlardan elde edilmiştir. Benzer şekilde Eş.(4.1)'den kapsüllenme oranı ise %44 şeklinde hesaplanmıştır. Isı transferi deneylerinde son elde edilen kapsüller kullanılmıştır.

Kapsüllenme oranı için literatürde mikrokapasül sentezinde daha yüksek oranlar verilmektedir. Bunun sebebi bu çalışmada elde edilen kapsül boyutlarının küçük olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

4.2 Nanoakışkanların Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi

4.2.1 Nanoakışkanların Hazırlanması

Nanoakışkanların özelliklerinin ölçümü için 100 mL çözeltide 0.5, 1.0 ve 2.0 gram nanokapsül içerecek şekilde üç farklı katı derişimde süspansiyonlar hazırlandı. Bu hacimce %0.42, %0.84 ve %1.68 katı oranlarına karşılık gelmektedir. Aynı oranlar ısı transferi ölçümlerinde de kullanıldı. Nanoakışkanların hazırlanmasında ultrasonik banyo kullanıldı. Nanoakışkanların kararlılıklarını artırmak için sürfaktan ilavesi yapıldı. Hazırlanan nanoakışkanlara ait görüntüler Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu görüntüler 10 gün bekletilmiş örneklere ait görüntülerdir. Bir ay bekletilen örneklerde belirgin bir şekilde faz ayrılmasının olduğu görüldü. Bu ısı transfer çalışmalarının yürütülmesi için yerlidir. Nanoakışkanların kullanımdaki önemli dezavantajlarından biri uzun süre kararlıklarını koruyamamalarıdır. Nanoakışkanların karalılıkları tanecik çapı, akışkan yoğunluğu, partiküllerin yüzey yükü gibi farklı etkenlere bağlıdır. Bir sıvı içerisinde dağılmış bir partikül için yatışkın hal durumunda çökelme hızı Eş. (4.2)'de belirtilen Stokes yasası ile verilir (Hiemenz ve Rajagopalan 1997; Ghadimi vd. 2011; Wusiman vd. 2013).

$$\upsilon = \frac{D^2(\rho_p - \rho_L)g}{18\mu} \tag{4.2}$$

Burada υ çökelme hızı, *D* partikül çapı, μ akışkan viskozitesi, ρ_L partikülün yoğunluğu ve ρ_p ise akışkanın yoğunluğudur. Eş.(4.2)'e göre çökelme hızını azaltmak için partikül çapı küçültülebilir, akışkanın viskozitesi artırılabilir ve partikül ve akışkan yoğunluk farkı artırılabilir. En etkin parametre ise partikül çapı görünmektedir. Dolayısıyla küçük çaplı partikül kullanmak elde edilen nanoakışkanın kararlığını artırmaktadır. Ancak partikül çapının küçülmesi ile yığışma ile çökme meydana gelebilir.



Şekil 4.10. Nanoakışkanların görünümleri

Bu çalışmada kullanılan nanokapsüllerin ortalama çapı 100 nm civarındadır. Nanoakışkan hazırlamak için kullanılan ve ticari olarak satılan CuO, TiO_2 ve ZnO gibi maddelerin 50 nm boyutu altında üretimleri mevcuttur. Bundan dolayı bu maddeler ile hazırlanan nanoakışkanlar için daha yüksek kararlık belirten çalışmalar mevcut olmasına rağmen tüm çalışmalarda kararlılık önemli bir sorun olarak görülmektedir.

Bu çalışmada sentezlenen kapsüller ile hazırlanan nanoakışkanların kararlılıklarının artırılması ile ilgili ilave çalışmalar yapılabilir, su yerine temel akışkan olarak farklı akışkanlar kullanılarak kararlılık çalışmaları yapılması mümkündür. Ancak projenin kapsamı ve takvimi göz önünde bulundurularak bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

4.2.2 Nanoakışkanların Özelliklerinin Belirlenmesi

4.2.2.1 Viskozite Ölçümleri

Şekil 4.11'de hazırlanan nanoakışkanların viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amacı için temel akışkan- nanopartikülleri içermeyen akışkan- viskozite değerleri de verilmiştir. Temel akışkan su olmakla beraber içerisine sürfaktan katıldığı için saf suyun viskozite değerlerinden farklıdır. Şekil 4.11'den tüm katı oranları için viskozite değerleri temel akışkanın viskozite değerlerinden yüksek olduğu ve sıcaklığın artması ile azaldığı görülmektedir. Temel akışkana göre nanoakışkanların viskozitelerinde meydana gelen artış, μ_{na}/μ_{ta} oranları, 1.05-1.22 aralığında değişmektedir ve

Şekil 4.12'de grafik olarak verilmiştir. Şekil 4.12'den viskozitede meydana gelen artışın katı hacim oranı ile arttığı sıcaklık ile ise hemen hemen değişmediği görülmektedir.

Nanoakışkanların viskoziteleri için literatürde farklı eşitlikler türetilmiştir, bunlardan bazıları mikrometre boyutundaki partiküller için türetilmiş olmalarına rağmen bazı nanoakışkan çalışmalarında da kullanılmıştır. Bu konuda farklı derlemeler bulunabilir. Geniş bir tablo Wang ve Mujumdar (2008) tarafından verilmiştir. Tablo 4.2'de bazı korelasyonlar verilmiştir.

Sıvıların viskozitelerinin sıcaklık ile değişiminin matematiksel ifadesinde farklı gösterimler kullanılmaktadır (Seeton 2006). Bu çalışmada ölçülen deneysel viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimini ifade etmek için Eş.(4.3)'de verilen yaklaşım kullanıldı (Seeton 2006).

Farklı katı konsantrasyonları için ölçülen deneysel sonuçlar Eş.(4.4) formunda korele edildi. Eş.(4.3) ve (4.4)' deki sabitlerin değerleri ve istatistik parametreleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

$$\mu = Ae^{-BT} \tag{4.3}$$

$$\mu = \left(1 + C\phi + D\phi^2\right)Ae^{-BT} \tag{4.4}$$

Burada ϕ hacimce yüzde katı derişimi, T ise [K] olarak sıcaklığı göstermektedir. μ'nün birimi ise [mPa.s]'dir. Eşitliğin geçerlilik aralığı ise $0.42 \leq \phi \leq 1.68$, $20\ ^oC \leq T \leq 40\ ^oC$ dir. Şekil 4.13'de deneysel değerler ile Eş.(4.4)'den hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ile hesaplanan sonuçlar iyi uyuşmaktadır. Eş.(4.4)'ün sol tarafı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım katı etkisini, ikinci kısım ise sıcaklık etkisini göstermektedir.

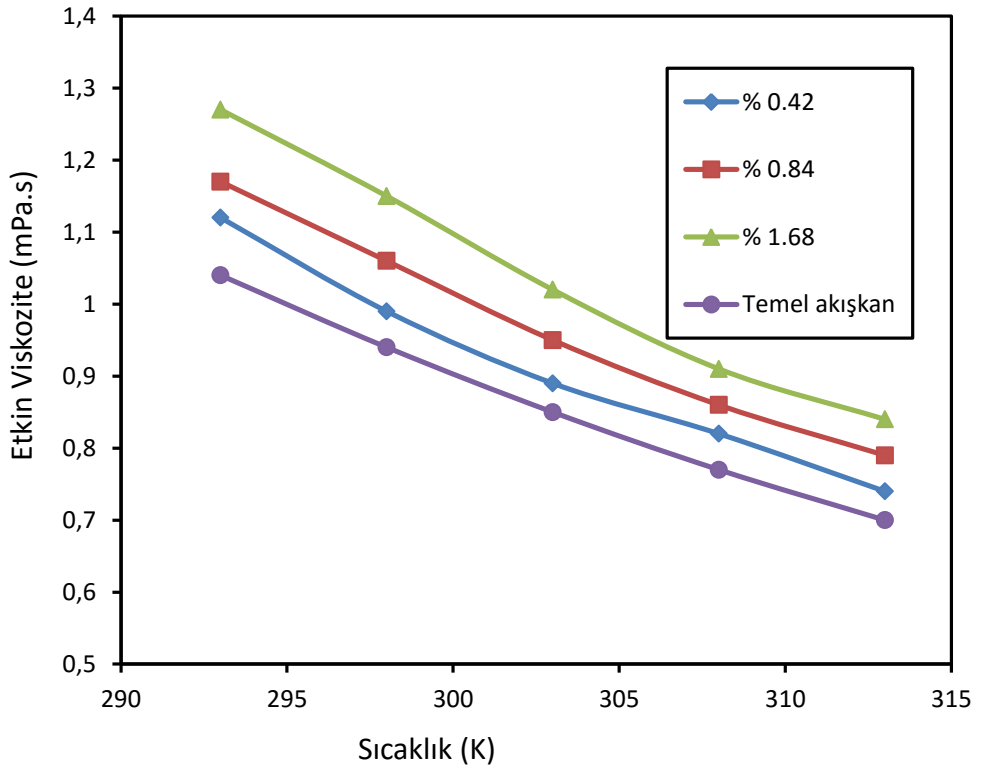
Tablo 4.3'deki değerler incelendiğinde Eş.(4.3)'deki A ve B katsayılarının temel akışkan ile aynı olduğu görülmektedir. Bu incelenen katı derişim aralığında katı ilavesinin temel akışkanın viskozitesinin sıcaklık ile değişim davranışını etkilemediğini göstermekledir. Ayrıca katı ilavesi ile viskozitede meydana gelen artışın sıcaklığa bağlı olmadığı sonucu Tablo 4.3'deki sonuçlardan da görülmekledir.

Tablo 4.2. katı –sıvı süspansiyonların viskoziteleri için korelasyonlar

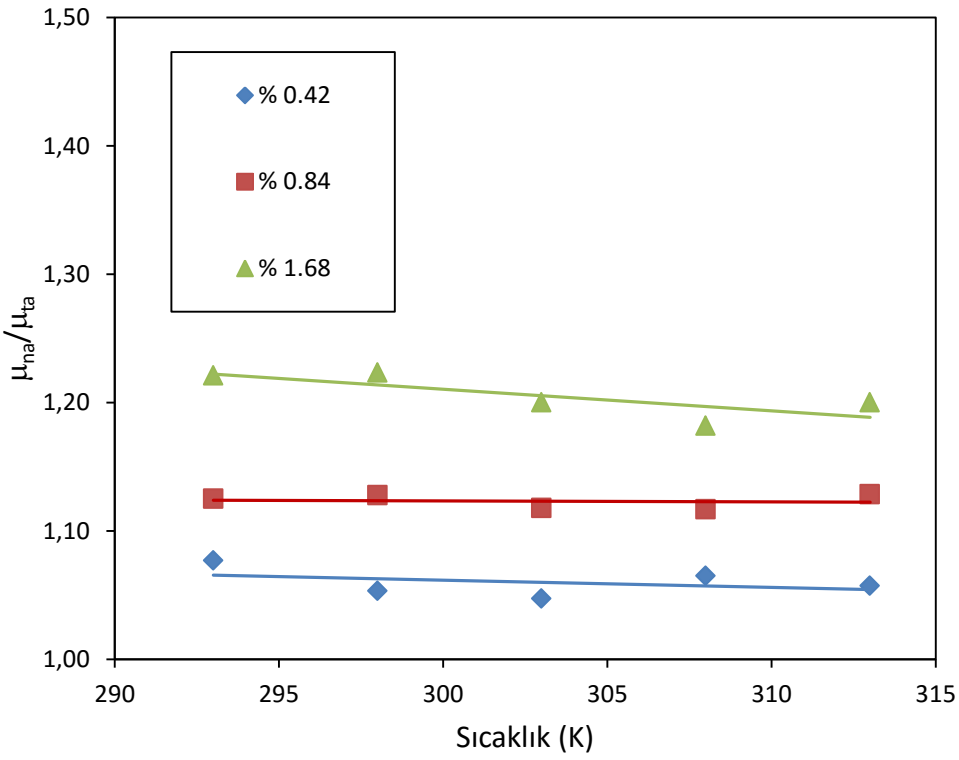
Model	Önerilen Eşitlik	Referans
Einstein (1906)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1+2.5\phi\right)$ μ_{nf} = nanoakışkanın viskozitesi μ_{bf} = baz sıvının viskozitesi ϕ = nanoparçacığın hacim fraksiyonu	(Bobbo vd. 2012)
Brinkman (1952)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}\frac{1}{\left(1-\phi\right)^{2.5}}$	(Bobbo vd. 2012)
Batchelor (1977)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1+\eta\phi+k_H\phi^2+\right)$ η = iç viskozite, küresel parçacıklar için 2.5 k_H = Huggins katsayısı, küresel parçacıklar için 6.5	(Bobbo vd. 2012)
Gueet.al.(2006)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1+2.5\phi+6.5\phi^2\right)\left(1+350\phi/d\right)$ d = nanoparçacığın çapı	(Yang vd. 2012)
Graham (1981)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1+2.5\phi+\frac{4.5}{\left(l/d\right)\left(2+l/d\right)\left(1+l/d\right)^2}\right)$ l = iki nanoparçacık arasındaki minimum ayırma mesafesi	(Yang vd. 2012)
Brenner ve Condiff (1974)	$\mu_{nf} = \mu_{bf}\left(1+\eta\phi\right)$ $\eta = \frac{0.312r}{\ln 2r-1.5}+2-\frac{0.5}{\ln 2r-1.5}-\frac{1.872}{r}$	(Aladag vd. 2012)

Tablo 4.2. devamı

Masoumi vd.(2009)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} + \rho_p V_B d \big/ (72Cl)$ $\rho_p =$ nanopartikül yoğunluğu, $V_B =$ Brownian hızı $C =$ düzeltme faktörü	(Yang vd. 2012)
Krieger-Dougherty (1959)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi_a}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m}$ $\varphi_m =$ maksimum konsantrasyon $\varphi_a =$ kümelerin etkili hacim konsantrasyonu $[\eta] =$ iç viskozite (tek dağılımlı sistemler için değeri 2.5)	(Bobbo vd. 2012)
Chen vd.(2007)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\left(\frac{a_a}{a}\right)^{1.2}\right)^{-[\eta]\varphi_m} \quad \varphi_a = \varphi\left(\frac{a_a^{3-D}}{a}\right)$ $a_a =$ kümelerin yarıçapı $a =$ primernanopartiküllerin yarıçapı $D =$ fraktal indeks (değeri nanopartiküller için 1.8)	(Bobbo vd. 2012)
Franken ve Acrivos (1967)	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \frac{9}{8}\left[\frac{(\phi/\phi_m)^{\frac{1}{3}}}{1-(\phi/\phi_m)^{\frac{1}{3}}}\right]$ $\phi_m =$ maksimum partikül hacim fraksiyonu	(Kole ve Dey 2011)



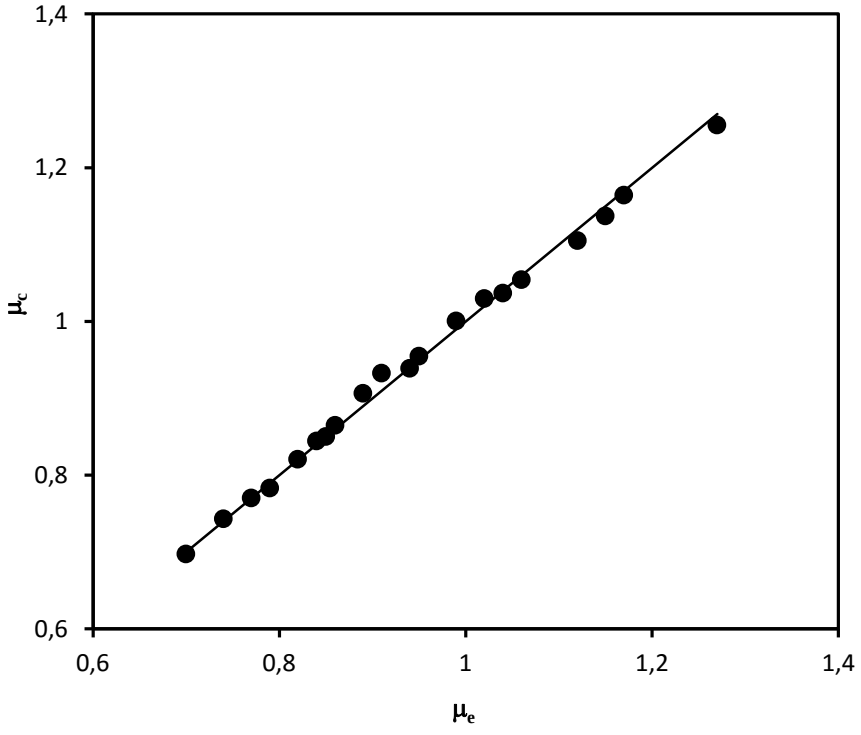
Şekil 4.11. Faz değiştiren madde içeren nanoakışkanların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.12. μ_{na} /μ_{ta} oranlarının sıcaklık ile değişimi

Tablo 4.3. Eş.(4.3) ve (4.4)'deki sabitlerin değerleri

	% ϕ	A	B	C	D	r^2
Eş.(4.3)	0.0	346.03	0.0198	-	-	0.9999
	0.42	429.28	0.0203	-	-	0.9953
	0.84	396.40	0.0199	-	-	0.9983
	1.68	635.56	0.0212			0.9961
Eş.(4.4)		346.00	0.0198	0.167	-0.0248	0.9961



Şekil 4.13. Eş.(4.3)'den hesaplanan viskoziteler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması

4.2.2.2 Isı İletim Katsayısı

Şekil 4.14'de ölçülen ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi verilmiştir. Grafik üzerinde karşılaştırma amacıyla temel akışkanın ısı iletim katsayıları da verilmiştir. Şekil 4.14'den ısı iletim katsayısının sıcaklık ile arttığı görülmektedir. Katı oranının % 0.42 olduğu durum için ısı iletim katsayıları tüm ölçülen sıcaklıklar için temel akışkanın ısı iletim katsayısından küçüktür. Isı iletim katsayısı oranı 0.92-0.96 aralığındadır. % 0.84 'lik akışkan için ise 30 ^{o}C altında yine temel akışkandan düşük, sıcaklığın artması ile temel akışkan değerlerine yaklaşmaktadır. Isı iletim katsayısı oranı (temel akışkana göre) 0.97-1 aralığındadır. Ancak katı oranı % 1.68'e çıktığında ısı iletim katsayıları temel akışkan değerlerinden yüksek olmaktadır. %1.68 katı içeren süspansiyon için k_{na}/k_{ta} oranı 1.04-1.12 aralığında olmaktadır. Isı iletim katsayısı oranlarının k_{na}/k_{ta}, katı yüzdesi ile değişimi Şekil 4.15'de grafik olarak verilmiştir.

Nanoakışkanların fiziksel özellikleri içerisinde en kompleksi ısı iletim katsayısıdır. Bundan dolayı deneysel çalışmaların sonuçlarında farklılıklar bulunmaktadır ve tam teorik modeller geliştirilmemiştir (Kleinstreuer ve Feng 2011). Nanoakışkanların hazırlanmasında yaygın olarak kullanılan metal veya oksitlerin ısıl iletkenliği genel olarak temel akışkanınkinden (su, etilen glikol vb.) yüksek olduğu için temel akışkan içerisine süspansiyon olarak katılan katı partiküller akışkanın ısıl iletkenliğini artırmakta ve dolayısıyla da ısı transferinde iyileşme sağlanabilmektedir. Ancak meydana gelen iyileşmenin tek sebebi katı partiküllerin ısı iletim katsayısın yüksek olması değildir ve farklı faktörleri de içerecek şekilde karmaşıktır (Wang ve Mujumdar 2008, Kleinstreuer ve Feng 2011, Kleinstreuer and Feng 2011a, Azizian vd. 2012). Çünkü deneysel çalışmalarda ısı iletim katsayısında çok yüksek artışlar gözlenmiştir. Nanoakışkanların ısı iletim katsayısında oluşan artış için aşağıdaki mekanizmalar önerilmiştir (Michaelides,.2013).

- partiküllerin yüksek ısı iletim katsayısı,
- partiküllerin bir araya gelerek nanoakışkan içerisinde yüksek ısı iletim yolu oluşturması,
- katı-sıvı ara yüzeyinde akışkanın termodinamik özelliklerinde önemli değişmeler ve ara yüzeyde "katı tabaka" oluşumu,
- partiküllerin yüzeyindeki elektrik yükü,
- partiküllerin Brownian hareketi,
- yerel zamana bağlı (transient) ısı transfer etkileri,

Nanoakışkanların ısı iletim mekanizmasının açıklanması ile ilgili geniş bir araştırma Kleinstreuer ve Feng (2011b) tarafından yapılmıştır. Katı pariküllerin bir sıvı içerisnde

süspasiyonunda, ısı iletim mekanizmasının modellenmesi ile ilgili klasik yaklaşım ve dinamik model olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır.

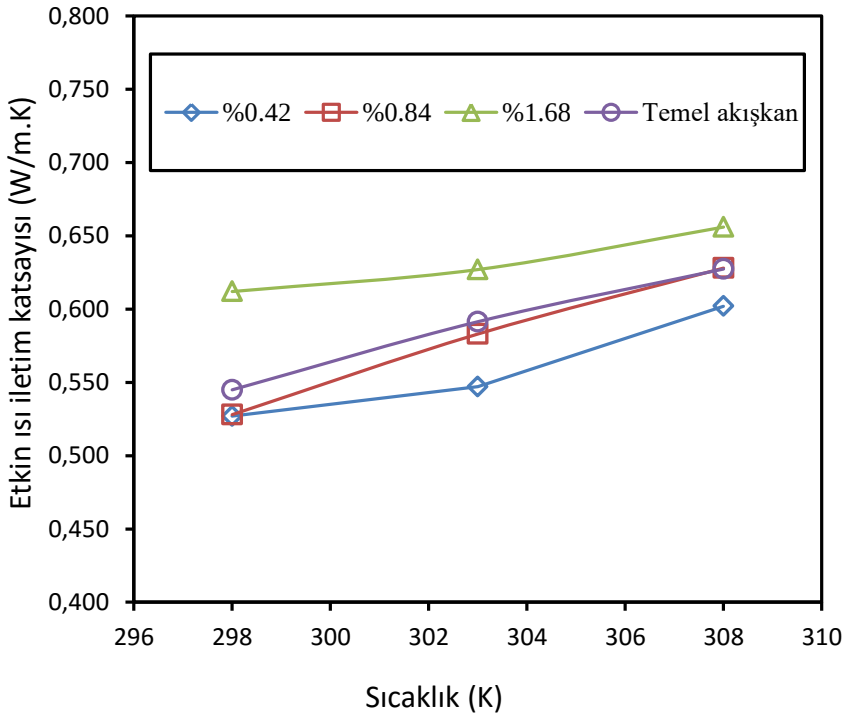
Klasik yaklaşımda statik model öngörülmekte katıların sıvı içerisinde süspansiyonları için bu kapsamda, Maxwell ve Hamilton ve Crosser gibi modeller kullanılmaktadır. Bazı modeller Tablo 4.4'de verilmiştir. Bu yaklaşım, sürekli ortam kabulü ile sıvı ve katı fazda ısı yayılımını içermektedir ve partikül çapı/şekli ve hacim fraksiyonu etkenlerini içermektedir. Ancak bu yaklaşım mikrometre boyutundaki partiküller için iyi sonuç vermesine rağmen nanoakışkanlar için yetersiz kalmaktadır (Wang ve Mujumdar 2008, Kleinstreuer ve Feng 2011). Dinamik modelleme yaklaşımında ise partiküllerin rastgele hareketi dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda partikül boyutu ve hacim fraksiyonu yanında Reynolds sayısı, akışkanın özellikleri, Prandatl sayısı gibi özellikleri de dikkate alınmaktadır. Geniş bilgi (Kleinstreuer ve Feng 2011)'de bulunabilir. Ayrıca nanoakışakanlar için partikül hareketinden kaynaklan "nanokonveksiyonnun" ısı difüzyonu katkısı ile karşılaştırılabilecek büyüklükte ve önemli olduğu belirtilmektedir (Azizian vd. 2009). (Koo ve Kleinstreuer 2005) nanoakışkanların efektif ısı iletim katsayısını Eş.(4.5)'deki gibi iki kısımda değerlendirmiştir. Dolaysıyla görünür ısı iletim katsayısı bu iki katkıyı yansıtmaktadır.

$$k_{efektif} = k_{statik} + k_{Brownian} \tag{4.5}$$

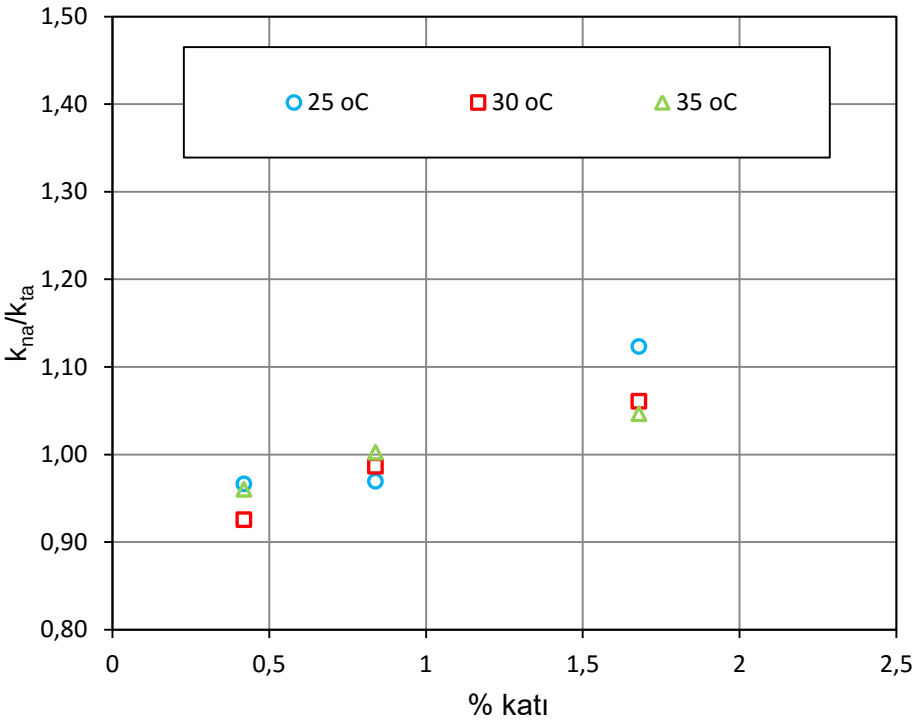
Kapsülleşen FDM'nin- n-nonadekan - ısı iletim katsayısı ve kabuk maddesi –poliüretanın-ısı iletim katsayısı temel akışkanın ısı iletim katsayısından düşüktür. Dolayısıyla temel akışkana katıldığında, ısı difüzyonu dikkate alınırsa, ısı iletim katsayısının düşürmesi beklenir. Mikrokapsüllenmiş FDM içeren süspansiyonlar ilgili çalışmalarda artan partikül oranı ile ısı iletim katsayısının azaldığının rapor edildiği çalışmalar bulunmaktadır. Delgado vd. (2014) tarafından parafinin kapsülleri ile % 14-20 katı oranlarında su ile hazırlan süspansiyonların (slurry) termal ve reolojik özelikleri deneysel incelenmiştir. Katı oranının artması ile ısı iletim katsayısının azaldığı, sıcaklığın artması ile ısı iletim katsayısının arttığı kaydedilmektedir. (Ho vd. 2012) tarafından ağırlık miktarının % 2-10 aralığında (n-Eiconase-Urea Formaldehit) mikro kapsüller ve su ile hazırlanan süspansiyon için katı miktarının artması ile yoğunluğun azaldığı, ısı iletim katsayısının sıcaklık ile değişiminin lineer olmadığı (Şekil 4.16) ve katı miktarının artması ile azaldığı belirtilmektedir. Örneğin 30 ^{o}C sıcaklıkta % 2 ağırlık oranı için temel akışkana göre ısı iletim katsayısında meydan gelen azalmanın % 8 olduğu belirtilmektedir. Yine (Howard ve Walsh 2013) tarafından %5-30 ağırlık oranlarında mikrokapsüllenmiş FDM ve su ile hazırlan süspansiyonlar için katı oranın artması ile ısı iletim

katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Örneğin % 5' lik süspansiyon için ısı iletim katsayısının temel akışkanın ısı iletim katsayısına oran 0.96'dır.

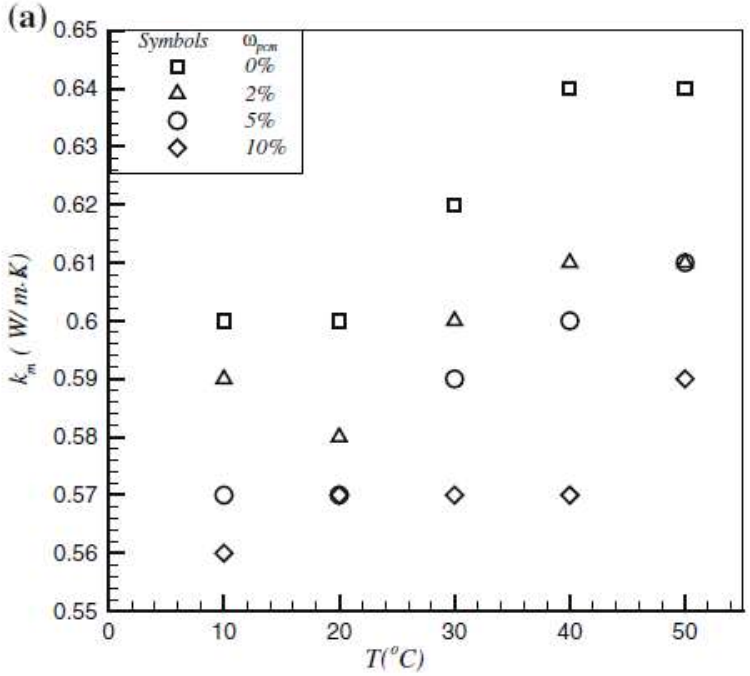
Sonuç olarak bu çalışmada % 0.42 ve %0.84 ağırlık oranları için ısı iletim katsayıları temel akışkana göre düşük %1.68'lik süspansiyon için ise yüksek çıkmıştır. Isı iletim katsayısında meydana gelen iyileşmenin nanopartiküllerin hareketi ile oluşan etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu etkinin yukarıda verilen FDM kullanan çalışmalarda gözlenmemesinin sebebi çalışmalarda kullanılan kapsül boyutlarının mikrometre boyutunda olması, ve partikül hareketi etkisinin az olmasından kaynaklanabilir (Azizian vd. 2009).



Şekil 4.14. Farklı katı oranları için ısı iletim katsayılarının sıcaklık ile değişimi



Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklar için k_{na}/k_{ta} oranlarının katı miktarı ile değişimi



Şekil 4.16.Mikrokapsüllenmiş FDM (n-Eicosane-Urea Formaldehyde) ile hazırlanmış süspansiyonların ısı iletim katsayısının farklı ağırlık oranları için sıcaklık ile değişimi (Ho vd. 2012)

Tablo 4.4. Nanoakışkanların ısı iletim katsayısı için teorik modeller

Model	**Eşitlik**	**Refernas**
Maxwell (1873)	$k_{nf} = k_b \dfrac{k_p + 2k_b + 2\phi\left(k_b - k_p\right)}{k_p + 2k_b + \phi\left(k_b - k_p\right)}$ $k_b =$ baz sıvı termal iletkenliği $k_p =$ katı partikülün termal iletkenliği $\phi =$ süspansiyonun partikül hacim fraksiyonu $k_{nf} =$ nanoakışkanın termal iletkenliği	(Colla vd. 2012)
Bruggeman (1935**)**	$k_{nf} = k_b \dfrac{(3\phi - 1)k_p / k_b + \left[3(1-\phi) - 1\right] + \sqrt{\Delta}}{4}$ $\Delta = \left\{(3\phi - 1)\dfrac{k_p}{k_b} + \left[3(1-\phi) - 1\right]\right\}^2 + 8\dfrac{k_p}{k_b}$	(Colla vd. 2012)
Lu ve Lin (1996)	$k_{nf} = k_b\left(1 + a\phi + b\phi^2\right)$ Küresel partiküller için $a = 2.25$ $b = 2.27$	(Colla vd. 2012)

Tablo 4.4'ün devamı

Xuan vd. (2003)	$k_{nf} = k_b \left[\frac{k_p + 2k_b + 2\phi\left(k_b - k_p\right)}{k_p + 2k_b + \phi\left(k_b - k_p\right)} + \frac{\rho_p \phi c_{p,p}}{2k_b} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi\mu r_c}} \right]$ $T =$ sıcaklık $\rho_p =$ partikülün yoğunluğu $c_{p,p} =$ partikülün özgül ısı kapasitesi $k_b =$ Boltzman sabiti $r_c =$ kümelerin yarıçapı	(Colla vd. 2012)
Hamilton ve Crosser (1962)	$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{\left[k_p + (n-1)\phi\left(k_b - k_p\right)\right]}{k_p + (n-1)k_b + \phi\left(k_b - k_p\right)}$ $n =$ deneysel şekilfaktörü $n = 3/\psi$ $\psi =$ küresellik	(Colangelo vd.2012)
Jang ve Choi (2007)	$k_{nf} = k_{bf}(1-\phi) + k_p\phi + 3C1\frac{d_{bf}}{d_p} k_{bf} \ \mathrm{Re}_{d_p} \ \mathrm{Pr}\,\phi$	(Kleinstreuer ve Feng 2011)

4.2.2.3 Yoğunluk

Nanoakışkanlar su bazlı hazırlandı. Ancak kararlığını artırmak için içerisine 100 mL de 1.5 g içerecek şekilde NP-10 ilave edildi. NP-10'nun 20 ^{o}C sıcaklıktaki yoğunluğu 1060 kg/m^3 olarak verilmektedir (Dow chem.com.). Temel akışkanın yoğunluğu 20 ^{o}C'de Eş.(3.1) kullanılarak su ve NP-10'un yoğunlukları ile hesaplandığında 999.28 kg/m^3 değeri elde edilmektedir. Aynı karışımın yoğunluğu piknometere kullanılarak deneysel ölçüldüğünde 1008.83 kg/m^3 elde edilmiştir. Bu iki sonuç arasındaki fark %1'den azdır. Diğer sıcaklıklarda NP-10'nun yoğunlukları teorik olarak elde edilemediğinden, temel akışkanın yoğunlukları piknometere kullanılarak farklı sıcaklıklar için deneysel ölçüldü. Üretilen nanokapsüllerin yoğunlukları piknometere (Quantachrome) yardımı ile ölçüldü. Katı kapsüllerin oda sıcaklığında yoğunlukları, 22 ±0.5 ^{o}C, 1.19 g/cm^3 olarak ölçüldü. Hazırlanan nanoakışkanların yoğunlukları ise Eş.(3.1) yardımı ile hesaplandı. Sonuçlar Tablo 4.5'de verilmiştir.

4.2.2.4 Özgül ısı

Nanokapsüllerin özgül ısı tespitleri için kullanılan DSC termogramları Şekil 4.17'de verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amacı ile boş kapsül ve saf nonadekana ait grafikler de verilmiştir. Kapsüllere ait c_p değerleri kullanılarak süspansiyonlar için Eş.(3.2)'den hesaplanabilir. Temel akışkan su olmakla birlikte belli oranda sürfakatan (NP-10) içerdiğinden ısı kapsitesi Eş.(3.2)'i yardımı ile teorik hesaplandı. NP-10'nun ısı kapasitesi literatürde elde edilemediğinden DSC analizi ile denysel belirlenerek sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki eşitlik türetilmiştir.

$$c_{p(NP-10)} = -6124.1 + 44.439x - 0{,}0596x^2 \quad r^2 = 0.9972$$

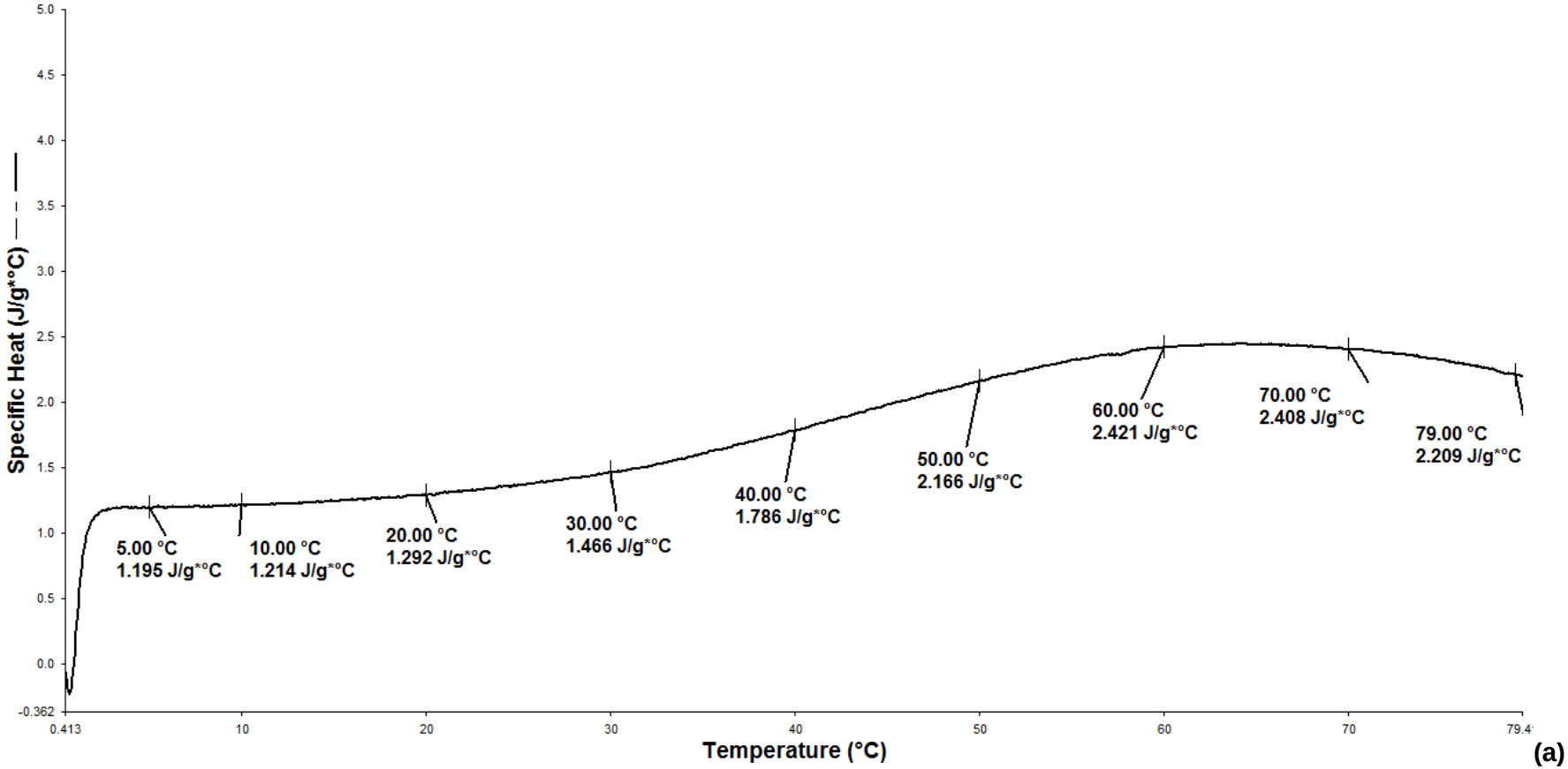
Tablo 4.6'da örnek olarak hesaplanan ısı kapasitesi değerleri verilmiştir. Eş.(3.2)'den beklenildiği gibi katı miktarının artması ile ısı kapasitesi azalmaktadır. 25 ^{o}C sıcaklığa kadar olan veriler nonadekanın katı olduğu duruma ait değerlerdir. 30 ^{o}C sonra faz değişimi başaldığından (Şekil 4.17c) bu sıcaklığın üzerinde ısı kapasitesi hesaplanmalarında faz değişim entalpisi de dikkate alınmalıdır. 40 ^{o}C üzerindeki sıcaklıklarda ise nonadekanın sıvı olduğu durumdaki ısı kapasitelerini göstermektedir.

Tablo 4.5. Hazırlanan nanoakışkanların yoğunluklarının sıcaklık ve katı derişimi ile değişimi

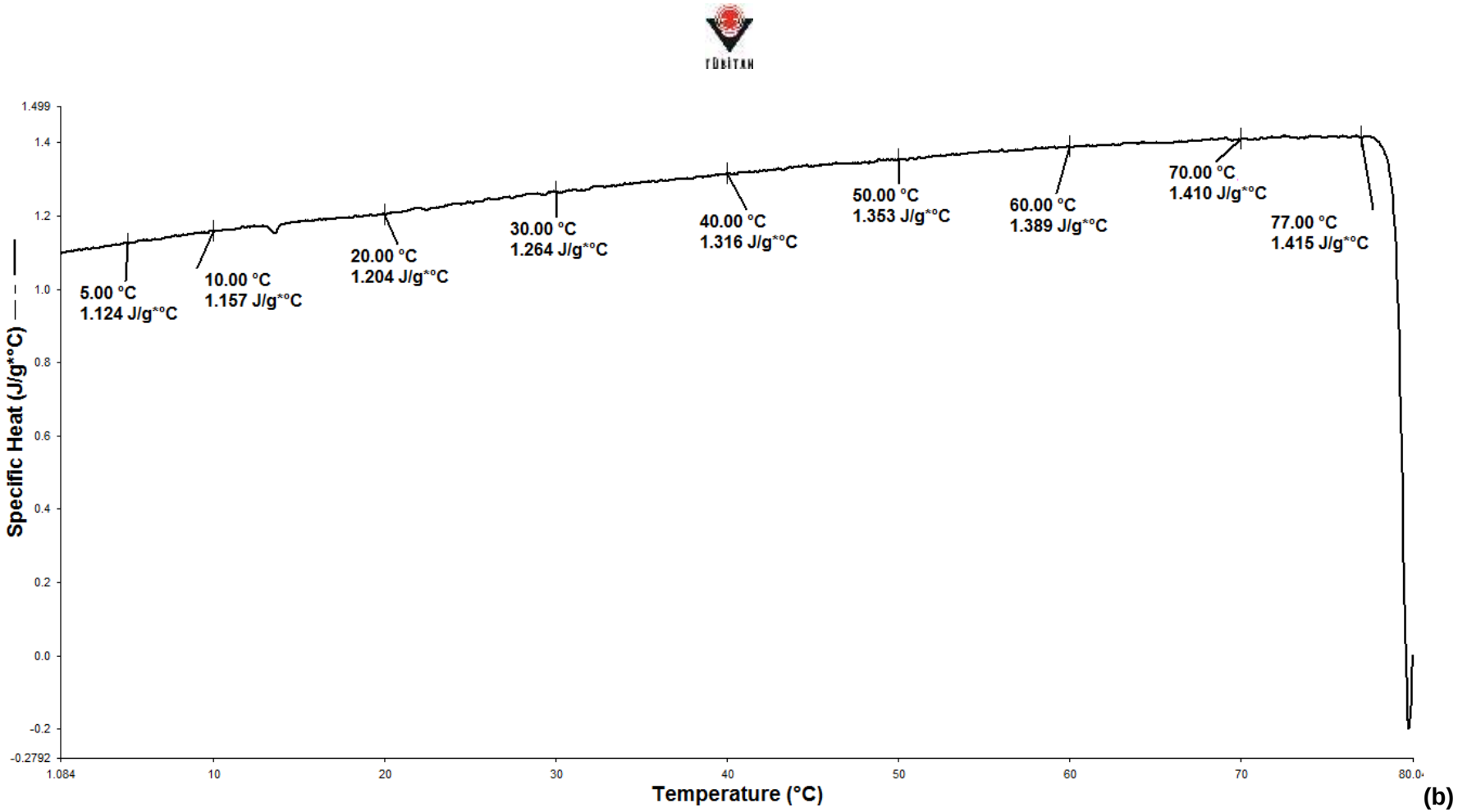
	ρ (kg/m^3)	Hacimsel katı derişimi % ϕ		
Sıcaklık (K)	**Temel Akışkan**	**0.42**	**0.84**	**1.68**
293	1008.83	1009.59	1010.35	1011.87
298	1007.84	1008.60	1009.37	1010.90
303	1006.52	1007.29	1008.06	1009.60
308	1004.90	1005.68	1006.46	1008.01
313	1003.62	1004.40	1005.18	1006.75

Tablo 4.6. Hazırlanan nanoakışkanların özgül ısılarının sıcaklık ve katı derişimi ile değişimi

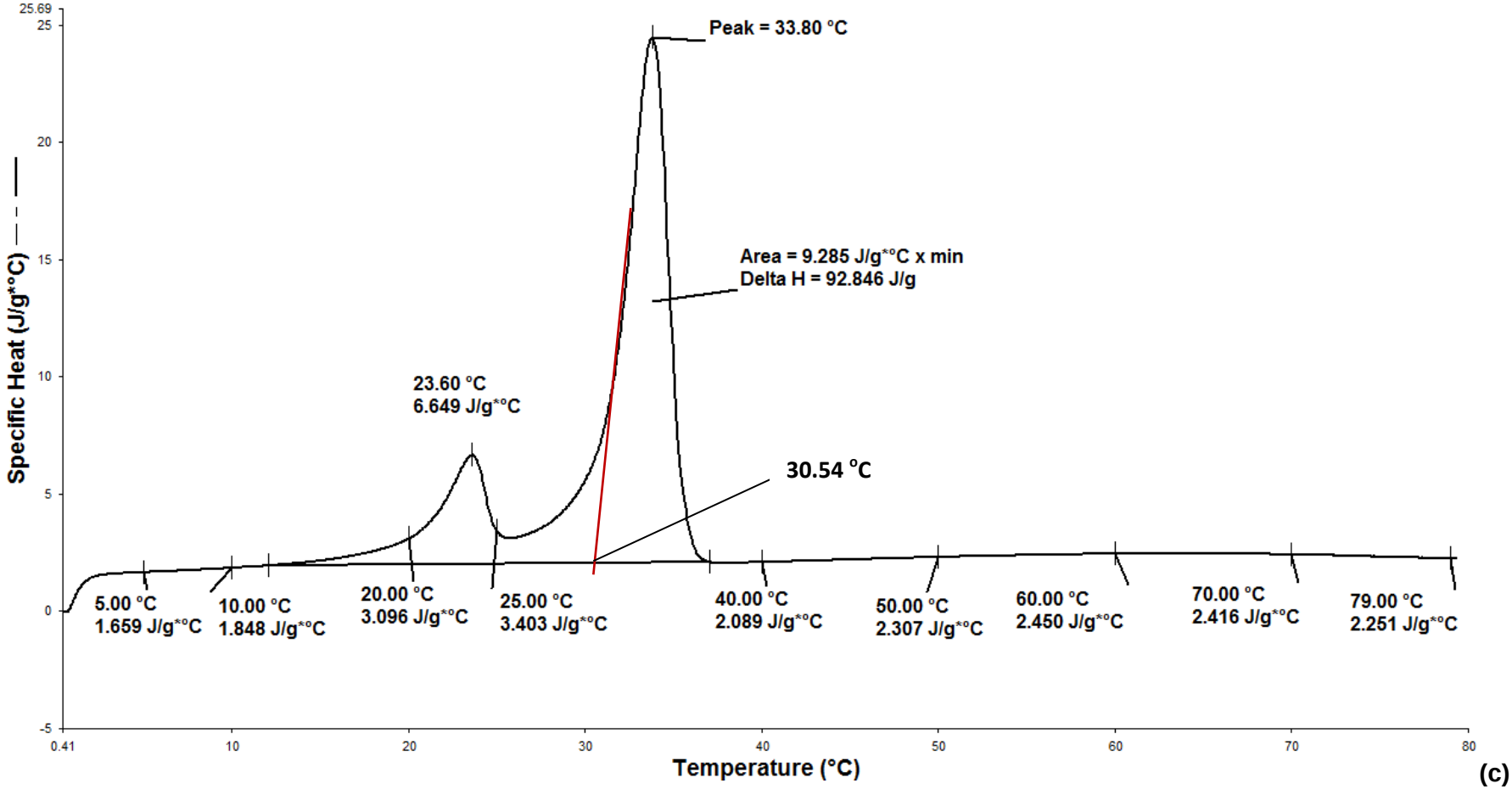
	C_p(J/kg.^{o}C)	Hacimsel katı derişimi % ϕ		
Sıcaklık (K)	**Temel Akışkan**	**0.42**	**0.84**	**1.68**
293	4146,21	4141,01	4135,82	4125,52
298	4143,94	4140,27	4136,61	4129,34
313	4144,75	4133,42	4123,27	4103,12



Şekil 4.17a. Nanokapsüllerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (boş kapsül ısıtma)

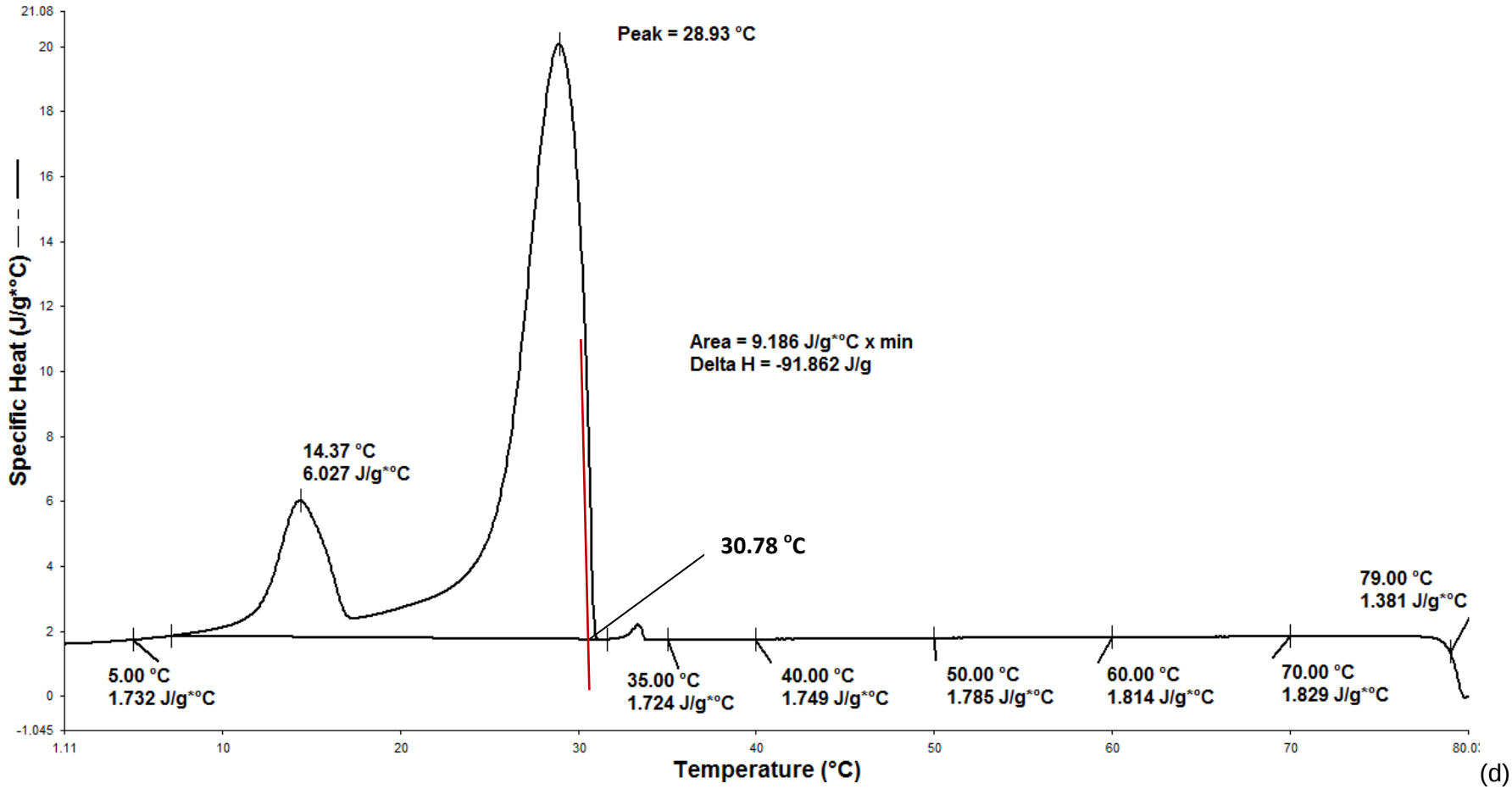


Şekil 4.17b. Nanokapsüllerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (boş kapsül soğutma)



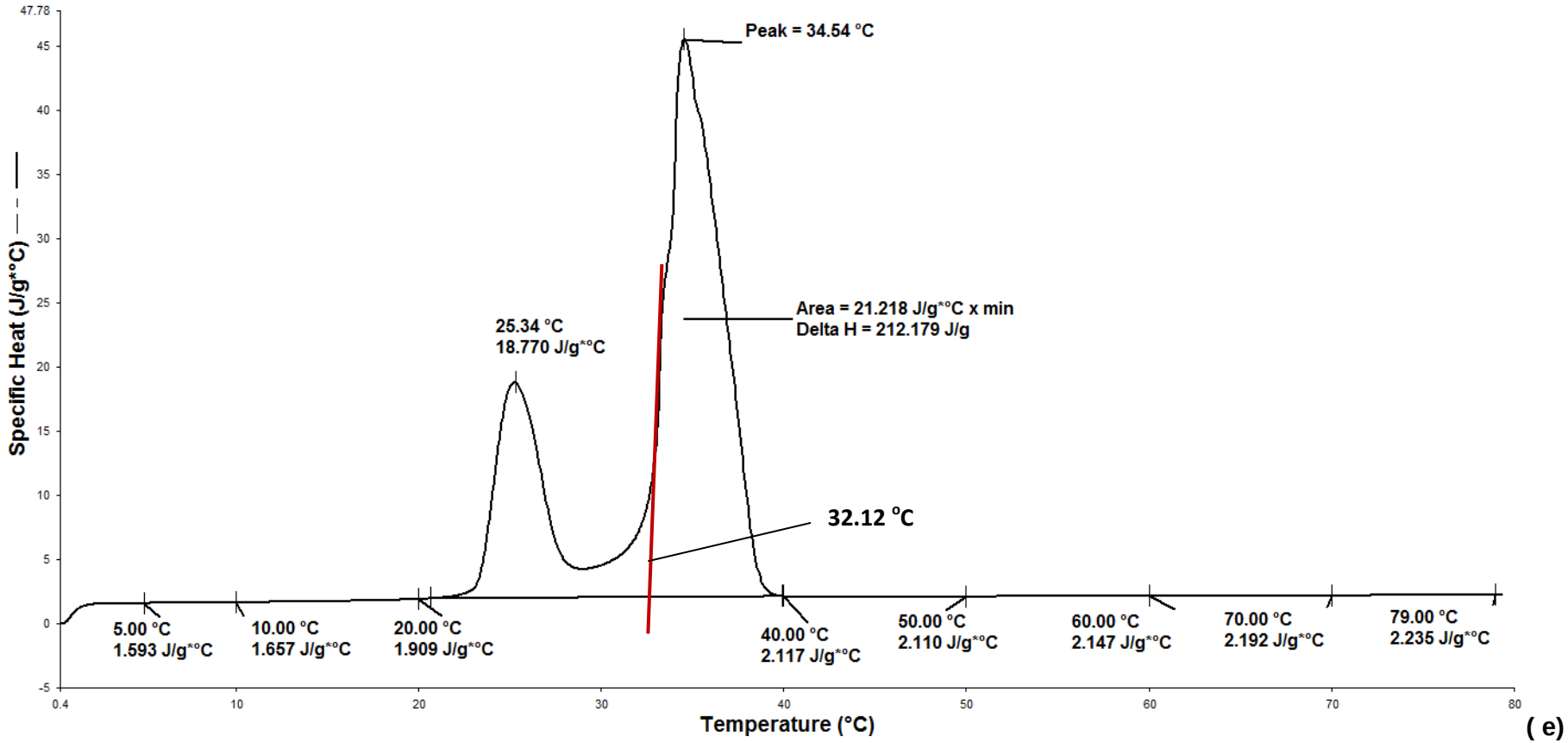
(c)

Şekil 4.17c. Nanokapsüllerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (kapsül ısıtma)



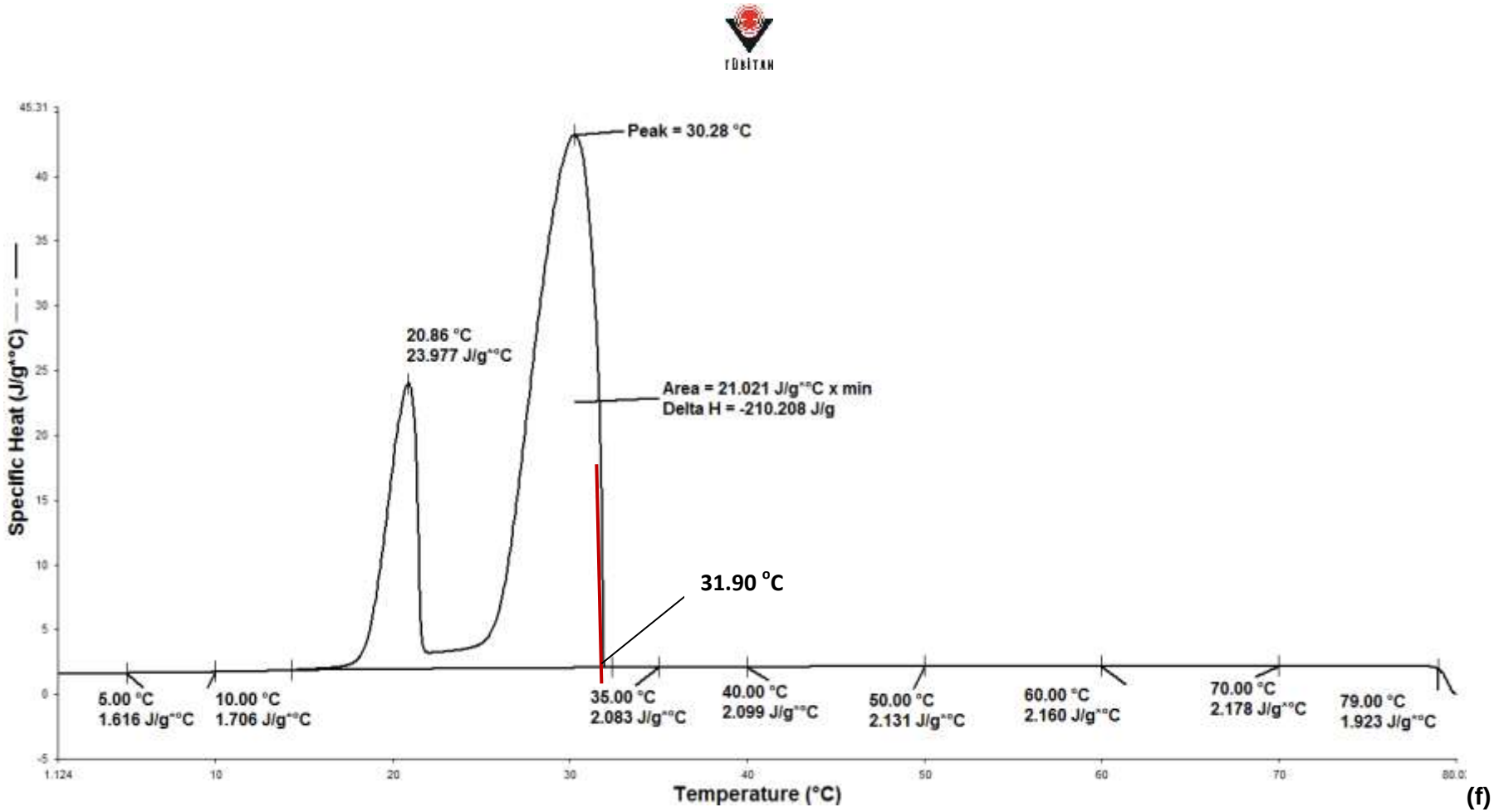
(d)

Şekil 4.17d. Nanokapsüllerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (kapsül soğutma)



(e)

Şekil 4.17e. Nanokapsüllerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (saf nonadekan ısıtma)



(f)

Şekil 4.17f. Nanokapsüllerin DSC termogramları ve özgül ısı değerleri (saf nonadekan soğutma)

4.3 Isı Transferi ve Basınç Düşüşü

4.3.1 Isı Transferi

Isı transferi ölçümlerinin gerçekleştirildiği deney sistemini test etmek için hem soğuk akışkan hem de sıcak akışkan olarak su kullanarak ölçümler yapılmıştır. Sıcak suyun debisi 6 ± %2 L/dak giriş sıcaklığı ise 50 ± 0.1 ^{o}C sabit tutuldu. Bu değerler tüm ısı transferi deneylerinde kullanıldı. İç borudan akan suyun debisi ise 100 L /h- 400 L/h aralığında değiştirildi. Eş.(3.8)-(3.9)'dan sıcak ve soğuk akışkan için hesaplanan ısı değerleri Şekil 4.18a'da grafik edilmiştir. Şekil 4.18a'da ayrıca soğuk ve sıcak akışkan için hesaplanan ısı değerleri aritmetik ortalamaları da verilmiştir. Enerji denkliğinden aşağıdaki ifade yazılır.

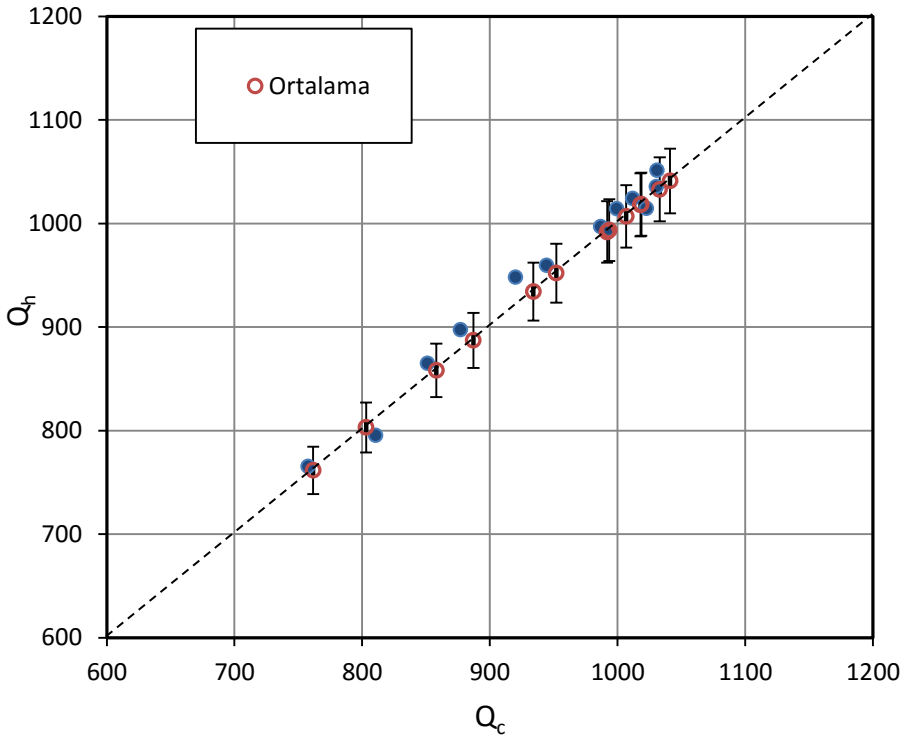
$$Q_h = Q_c + Q_{kayıp} \tag{4.6}$$

Sıcak ve soğuk tarafa ait ısılar arasındaki fark, $(Q_h - Q_c)x100/Q_h$, maksimum % 3 oranındadır.

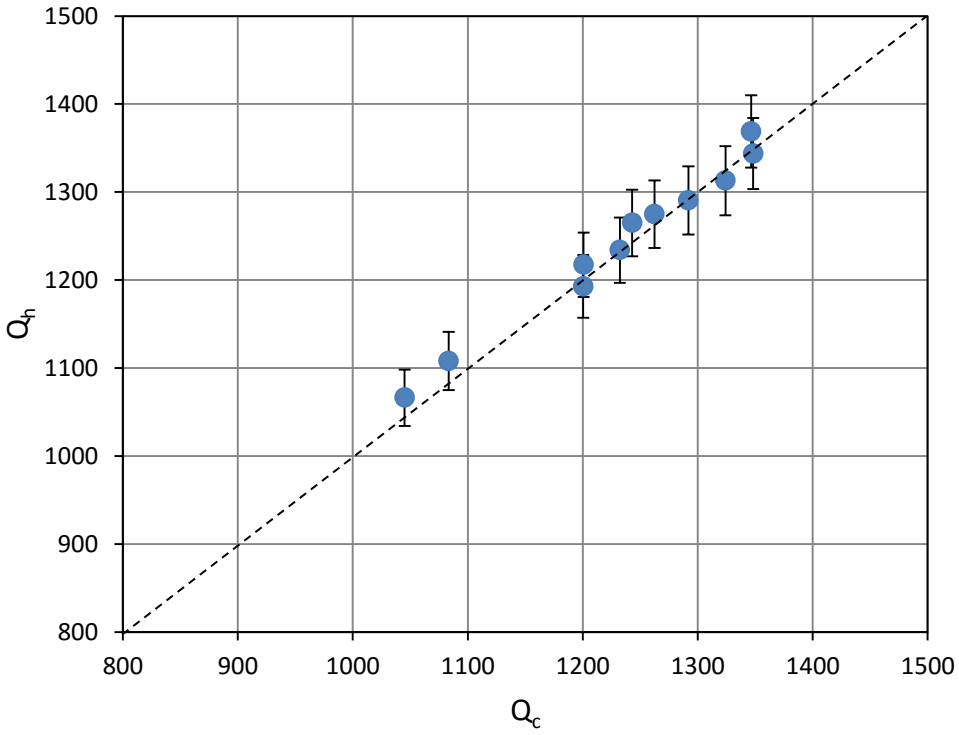
Tüm ısı aktarım katsayısının, *U*, hesaplanması için kullanılan Eş.(3.10)'da *Q* değeri için sıcak ve soğuk akışkan tarafına ait ısı miktarlarının ortalaması kullanılmaktadır (Ramahlingam ve Raghavan 2011). Bazı durumlarda ise, ısı değiştiricinin sadece bir tarafındaki parametreleri ölçmek mümkün olduğunda, sadece sıcak veya soğuk akışkan tarafına ait *Q* değeri esas alınarak hesaplama yapılmaktadır (Kong, Yu vd. 2015). Bu çalışmada sıcak akışkan tarafı için hesaplanan *Q* değeri esas alınmıştır. Tüm deneysel çalışma aynı ortam koşullarında yapıldığından ve dış kısımdan akan sıcak akışkanın debisi sabit olduğundan ve sıcaklığı çok az değiştiğinden Eş.(4.6)'ün sağ tarafındaki son terimin aynı olması beklenir. Saf su için yapılan ölçümler esas alınarak ortalama ve sıcak akışkan tarafına ait ısı transfer hızı esas alınarak hesaplanan *U* değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 4.19'da grafik edilmiştir. İki değer arasındaki maksimum fark %1'den azdır.

Şekil 4.18b'de ise temel akışkanın iç boruda aktığı durum için sıcak ve soğuk akışkan tarafına ait ısı miktarları karşılaştırılmıştır. Yine sıcak ve soğuk tarafa ait ısı değerleri arasındaki farkın % 3'e yakın olduğu görülmeketdir. Temel akışkan su olmakla birlikte bir miktar sürfaktan (NP-10) içerdiği için ısı kapasitesi Eş.(3.2) yardımı ile hesaplandı.

Soğuk akışkanın sıcaklığı faz değiştiren maddenin erime noktasına ulaştığında faz değişimi başlayacağından soğuk akışkanın özgül ısısının tespitindeki belirsizlikler artacağından, ısı aktarım katsayısı hesaplamalarında sıcak akışkan tarafındaki aktarılan ısı, Q_h, esas alınarak tüm deneysel çalışmalardaki *U* değeri hesaplamalarında kullanıldı.

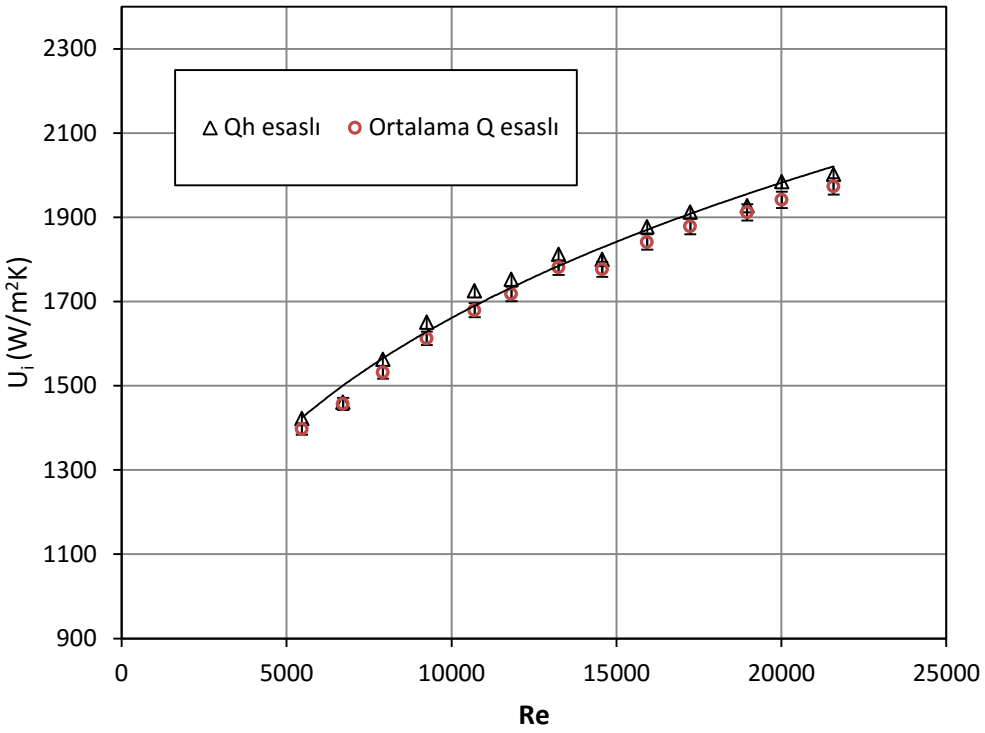


(a)



(b)

Şekil 4.18. Sıcak ve soğuk akışkan tarafına ait ısı miktarının karşılaştırılması. a) saf su, b) temel akışkan (Hata çubukları ± %3).



Şekil 4.19. Farklı *Q* esaslı hesaplanan *U* değerlerinin karşılaştırılması (Hata çubukları ±%1)

Eş.(3.7)'de ısı transfer alanı iç boru iç çapı esas alınarak hesaplandı ve U_i şeklinde gösterildi. Soğuk akışkanın Reynolds sayısı 5000-20000 aralığında değiştirildi.

Nanoakışkanların kullanıldığı deneylerde sıcak akışkanın debisi ve sıcaklığı yukarıda verilen değerlerde sabit tutuldu, ancak iki farklı soğuk akışkan giriş sıcaklığı için ölçüm gerçekleştirildi. Birinci durumda soğuk akışkanın giriş sıcaklığı yaklaşık 21 ^{o}C'ye ayarlanarak ve akışkanın debisi değiştirilerek ölçüm yapıldı. Bu koşullarda akışkanın çıkış sıcaklıkları faz değişim sıcaklığının altında olmaktadır. Dolaysıyla sadece hissedilir ısı transferi söz konusudur. İkincisinde ise giriş sıcaklığı 27 ^{o}C'ye ayarlandı ve çıkış sıcaklığı Re<14000 için faz değişim sıcaklığının üzerindedir. Soğuk akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları Şekil 4.20'de grafik edilmiştir. Bunu sıcak akışkanının debisini ve sıcaklığını değiştirmek ile de sağlamak mümkündür. Ancak mevcut deney düzeneği için daha uygun olduğu için birinci alternatif kullanıldı. Bundan sonraki kısımlarda birinci ve ikinci deney koşulları için #1 ve #2 indisleri kullanılmıştır.

Şekil 4.21'de iki farklı deney koşulu için temel akışkan ve su için hesaplanan tüm ısı aktarım katsayıları karşılaştırılmıştır. Temel akışkan için elde edilen tüm ısı aktarım katsayılarının saf su için elde edilen değerlerden yüksek olduğu görülmektedir. Temel akışkan için ise iki farklı akışkan giriş sıcaklığı için elde edilen tüm ısı aktarım katsayılarının birebirlerine yakın çıktığı görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur temel akışkan için bu koşullarda bir faz değişimi olmadığından, sıcak ve soğuk akışkan debileri aynı olduğundan ısı aktarım katsayısı yaklaşık çıkmıştır. Akışkan giriş sıcaklıklarının farklı olması ortalama logaritmik sıcaklık farkını etkilemekledir.

Şekil 4.22'de faz değişiminin olmadığı deneysel koşullarda Q_h değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi aktarılan ısı miktarı katı partikül oranının artması ile artmaktadır. Ancak %0.42 katı hacim oranı için Q_h değerleri temel akışkan için elde edilen değerlere yakındır. Şekil 4.23'de tüm ısı aktarım katsayılarının Reynolds sayısı ve katı partikül konsantrasyonu ile değişimi grafik edilmiştir. Karşılaştırma amacı ile temel akışkan için elde edilen değerlerde bu grafik üzerinde verilmiştir.

Grafik incelendiğinde Reynolds sayısının ve katı konsantrasyonun artması ile tüm ısı aktarım katsayısının arttığı görülmektedir. Ancak, temel akışkan elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında katı hacim oranın % 0.42 olduğu durumda elde edilen *U* değerlerinin daha düşük olduğu ve %0.84 için ise belirgin bir artış olmadığı görülmektedir. Bu durum Bölüm 4.2'de verilen ısı iletim katsayısı ölçümleri ile örtüşmektedir. Çünkü %.0.42 katı hacim oranı için ısı iletim katsayıları temel akışkanın ısı iletim katsayılarının altında, % 0.84 için ise temel akışkan değerleri civarında olduğu görülmektedir. Bundan dolayı % 0.42 ve %0.84 katı hacim oranındaki nanoakışkanlar için ısı aktarım katsayısındaki azalmanın ısı iletim katsayısındaki azalmadan kaynaklandığı düşülmektedir. Katı hacim oranının %1.68 olduğu durumda ise tüm Re değerleri için *U* değerleri temel akışkana göre yüksek çıkmıştır.

Faz değişim etkisini görmek için akışkanın giriş sıcaklığı erime sıcaklığında veya üzerinde olacak şekilde deneyler yapıldı. Şekil 4.24'de Q_h'ın Reynolds sayısı ile değişimi grafik edilmiştir. Görüldüğü gibi aktarılan ısı, katı hacim fraksiyonunun artması ile artmaktadır.

Eş.(3.10)'de verilen logaritmik ortama sıcaklık farkı (LMTD) yönteminin uygulanması ile ilgili bazı kısıtlamalar vardır. Denklemin türetilmesinde tüm ısı aktarım katsayısı, *U*, sabit kabul edilmektedir. Ayrıca akışkanların ısı kapasiteleri de sabit kabul edilmektedir. Bu durumu görmek açısından Şekil 4.25'de %0.84 katı oranı içeren nanoakışkan için iki farklı koşulda *U* değerleri ve çıkış sıcaklıkları grafik edilmiştir. #1 koşullarında akışkanın çıkış sıcaklığı tüm kütle debileri için faz değişim sıcaklığının altındadır. #2 koşulları için ise düşük akışkan

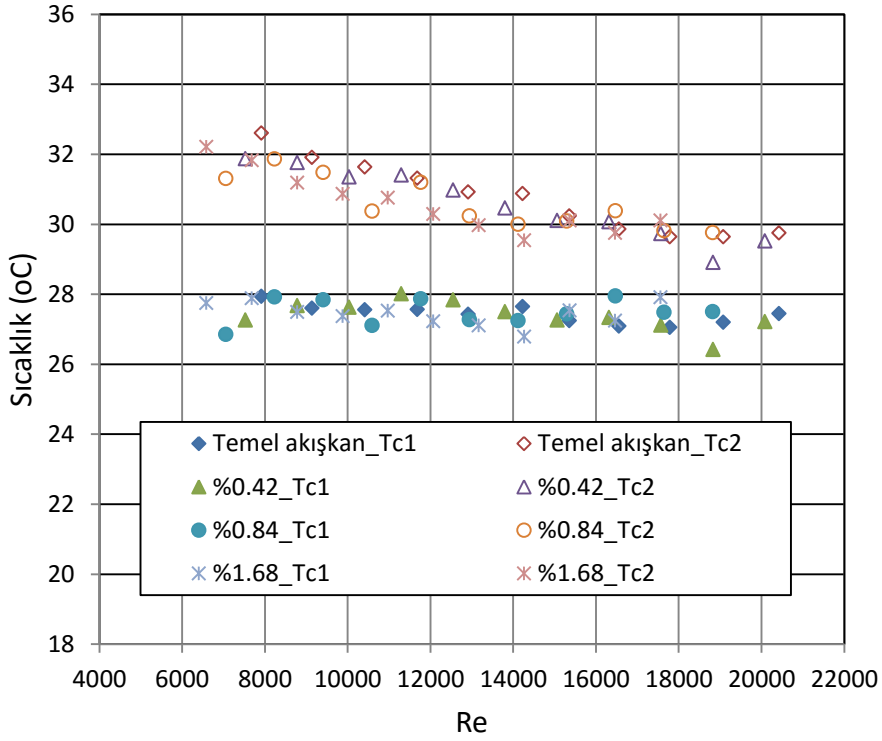
debileri için çıkış sıcaklıkları faz değişim sıcaklığının üzerinde (Re≤11000), debinin artması ile çıkış sıcaklıkları faz değişim sıcaklığı civarında kalmaktadır. Şekil 4.25b'de ise bu koşullara karşılık gelen *U* değerleri grafik edilmiştir. Görüldüğü gibi Re>11000 için iki farklı durum için hesaplanan *U* değerleri aynı olmaktadır. Fakat Re ≤11000 için ikinci koşullarda elde edilen *U* değerleri daha düşüktür. Bunun nedeni, daha önce söylenildiği gibi, faz değişimi içeren sistemlere Eş.(3.10) uygulanması ile ilgili kısıtlamalardır. İkinci durumda Eş.(3.10) kullanılan LMTD değeri gerçek değerinden büyük olduğu için *U* değeri düşük çıkmaktadır. Bu durum Şekil 4.26'da şematik gösterilmiştir. Ayrıca temel akışkan için Şekil 4.21'de verilen grafikte bunu desteklemektedir. Bundan dolayı ikinci deneysel koşullar için tüm ısı aktarım katsayılarının hesaplanması yerine sadece Q_h değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Yukarıda verilen sonuçlar kapsül içerisinde bulunan n-nonadekanın faz değişimi etkisinin ısı transferi davranışını etkilediğini açıkça göstermekledir.

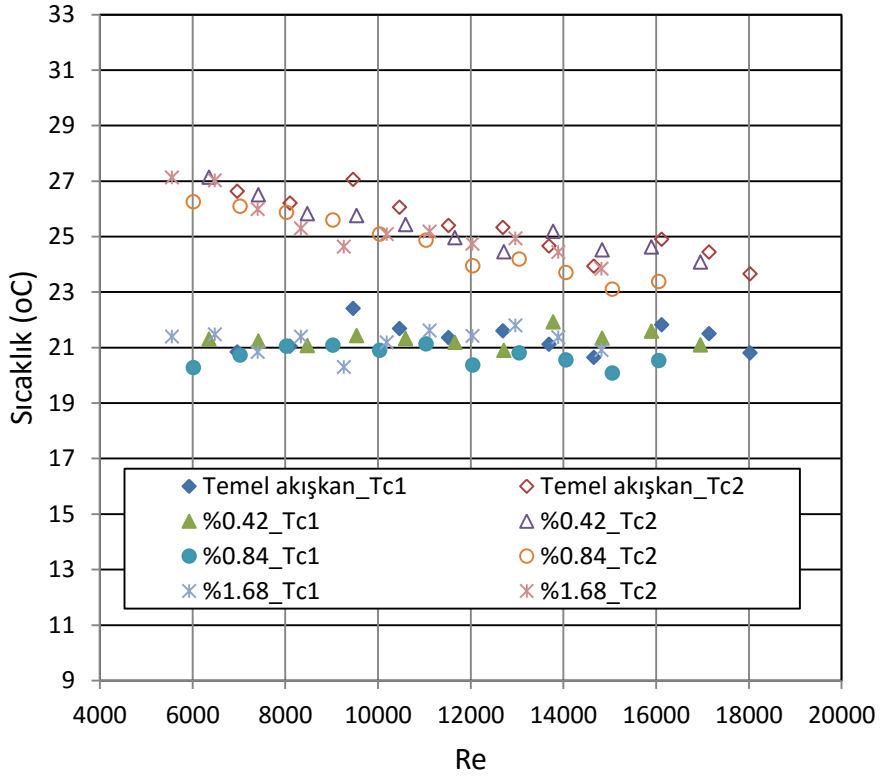
4.3.1.1 Isı Transferi Korelâsyonları

Bu çalışmada ısı transfer deneylerinde temel amaç, elde edilen nanoakışkanların ısı transfer performanslarını belirlemek ve temel akışkana göre bir iyileşme olup olmadığını gözlemlemektir. Tüm ısı aktarım katsayılarının karşılaştırması bu konuda yeterli bilgiyi vermektedir. Ancak ısı transferi korelasyonlarının elde edilmesi faydalı olacaktır. Bu bölümde kullanılan deney sistemi için ısı transferi korelasyonlarının elde edilmesi tartışılmıştır. Genel olarak zorlanmış taşınımda taşınım katsayıları, *h,* Nusselt sayısına ($Nu = hd/k$) dönüştürülerek akış ve geometrik parametrelerin fonksiyonu olarak ifade edilir.

Tüm ısı aktarım katsayısından iç borudan akan akışkana ait taşınım katsayısını, h_i, hesaplamak için Eş.(3.11)'de boru dışında, halkasal alanda akan akışkana ait taşınım katsayısına, h_o, ihtiyaç vardır. Çift borulu ısı değiştiriciler ile yapılan çalışmalarda, boru içerisindeki akış için ısı transferi korelasyonu elde etmek için kullanılan yaklaşımlardan biri, dış tarafa ait taşınım katsayısını Dittus-Boelter gibi klasik ısı transfer eşitliklerinden hesaplamaktır. Bu yöntem farklı araştırmacılar tarafından uygulanmıştır. (Kumaresan vd. 2012). Bu yöntem bu çalışmada da kullanıldı. Eş.(3.7) ve (3.11) yeniden düzenlenerek Eş.(4.7) elde edilir.

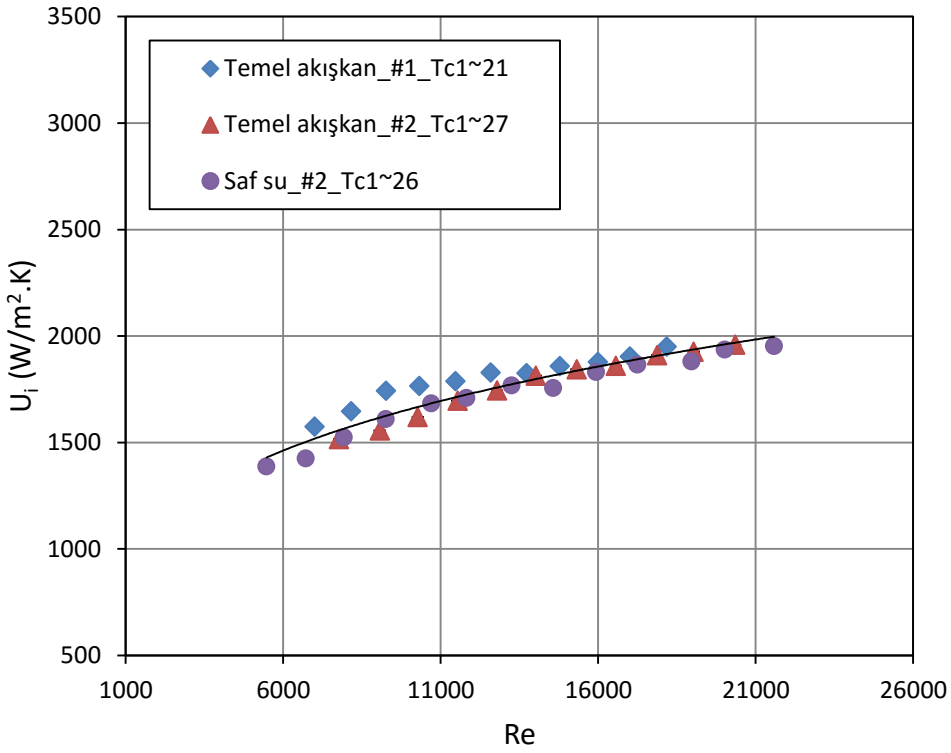


(a)

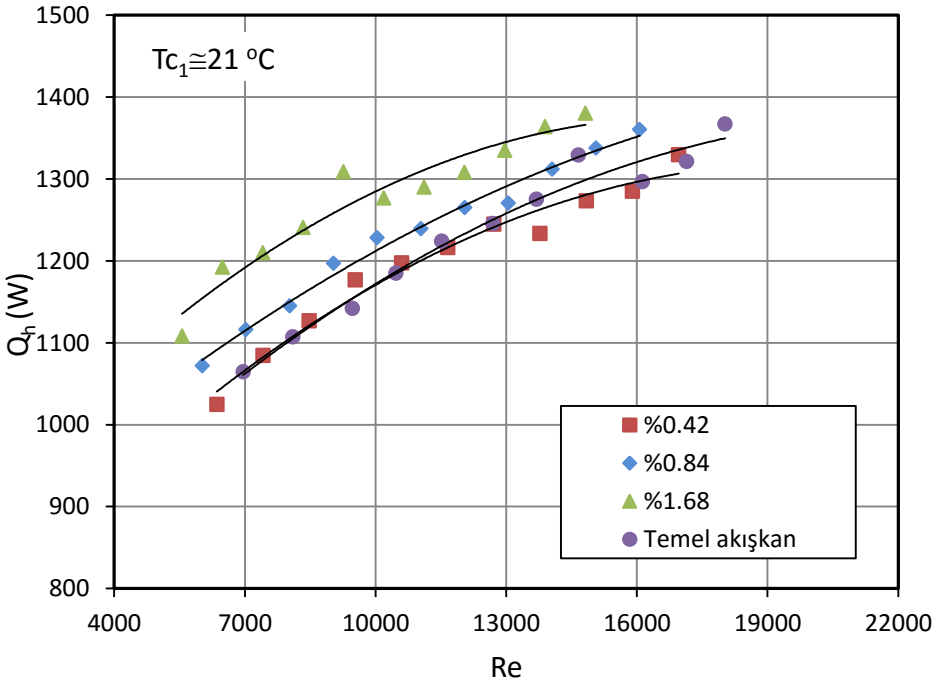


(b)

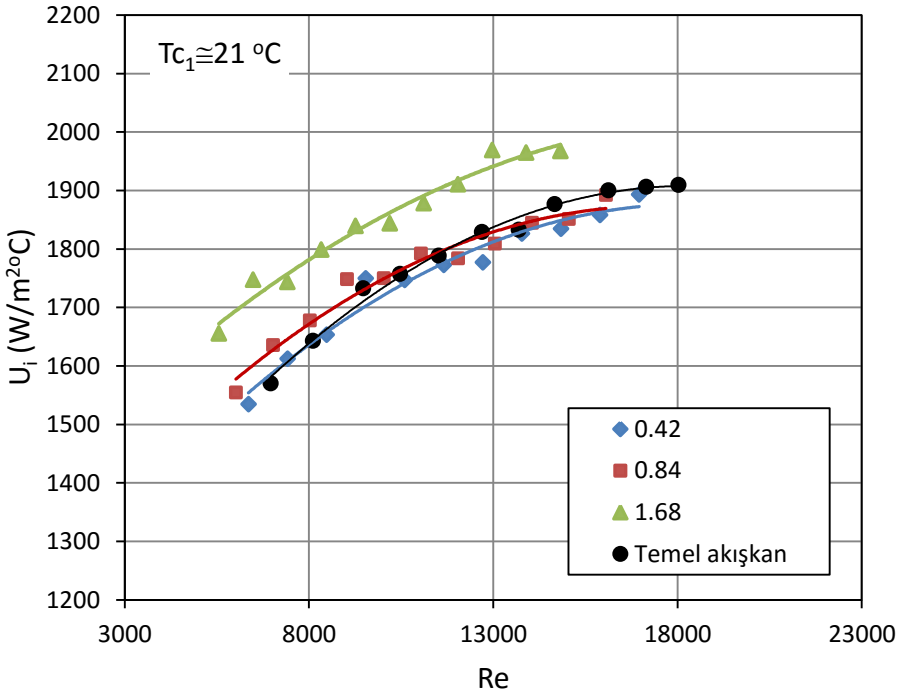
Şekil 4.20. Soğuk akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığının Re ile değişimi



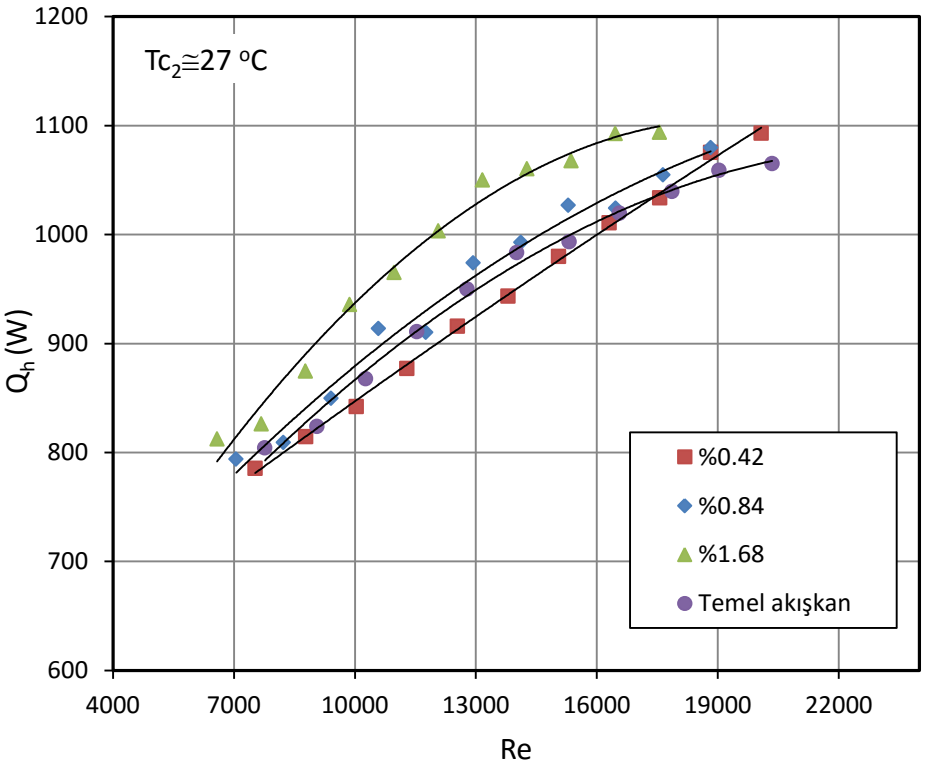
Şekil 4.21. Temel akışkanın farklı giriş sıcaklıkları için ısı aktarım katsayısının karşılaştırılması



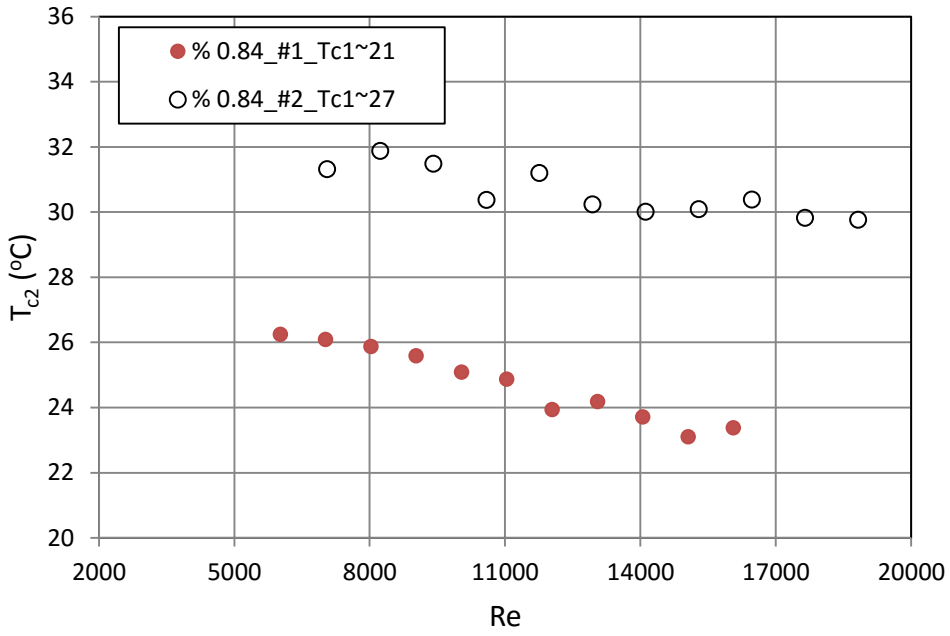
Şekil 4.22. Aktarılan ısı transfer hızının Reynolds sayısı ve katı konsantrasyonu ile değişimi



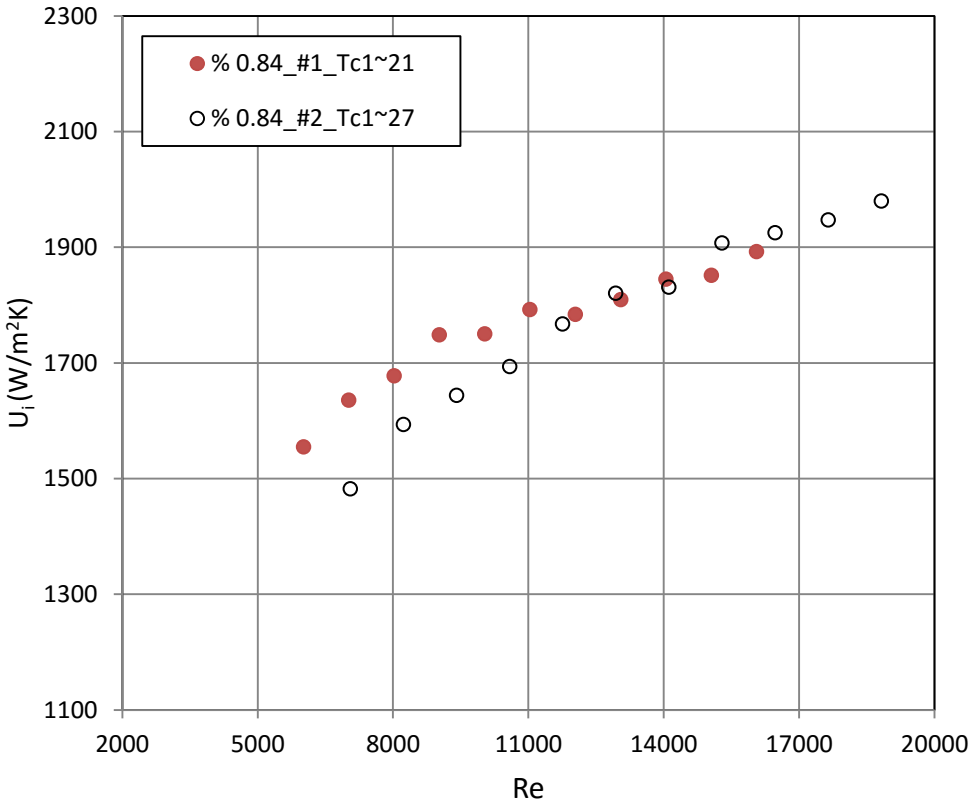
Şekil 4.23. Nanoakışkanların tüm ısı aktarım katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4.24. Aktarılan ısı transfer hızının Reynolds sayısı ile değişimi

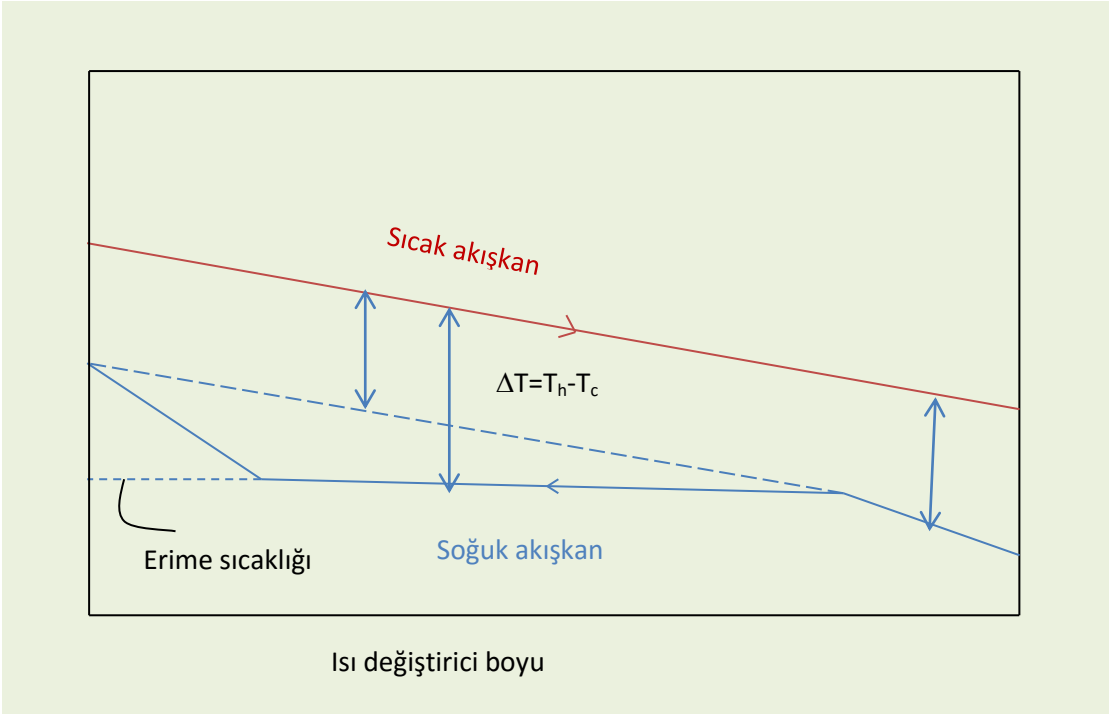


(a)



(b)

Şekil 4.25. Nanoakışkanlar için iki farklı akışkan giriş sıcaklığıda ısı aktarım katsayısı ve akışkan çıkış sıcaklık değişimi (ϕ=% 0.84)



Şekil 4.26. Akışkan sıcaklık değişiminin şematik gösterimi

$$R_{top} = \frac{\Delta T_{LM}}{Q} = R_i + R_w + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{ln(d_o / d_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \tag{4.7}$$

Burada R_{top} toplam ısıl direnci, R_i, R_w ve R_o ise sırasıyla iç tarafa, boru malzemesi ve dış tarafa ait ısıl dirençleri göstermektedir. Boru malzemesinin ısı iletim katsayısı ortalama sıcaklıktaki değeri alınarak sabit ve dolayısıyla R_w sabit kabul edilebilir. Dış tarafa, iki borunun sınırladığı halkasal kısımda akan akışkan saf sudur ve debisi ve giriş sıcaklığı tüm deneylerde sabit tutulmuştur. h_o'ın hesaplanmasında aşağıdaki korelasyon kullanıldı:

$$Nu_{Dh} = \frac{h_o D_h}{k} = 0.023\, Re^{0.8}\, Pr^{0.3} \tag{4.8}$$

Eş.(4.8) denkleminden h_o = 2303.824 W/m^{2o}C şeklinde bulunmuştur.

Ancak halkasal alanda akışta ısı transferi çap oranına bağlıdır. Halkasal alanda akış için Eş.(4.7) yanında farklı eşitliklerde mevcuttur (Dirker ve Meyer 2005, van Zyl vd. 2013). Bundan dolayı Eş.(4.8)'tan hesaplanan dış tarafa ait taşınım katsayısını teyit etmek için h_o modifiye Wilson grafik yöntemi uygulanarak hesaplanmıştır. Yöntemin uygulanışı aşağıda verilmiştir (Fernandez-Seare vd. 2005).

Isı değiştiricide sıcak akışkanın debisi sabit olduğundan ve akışkanın sıcaklık değişimi çok olmadığından akışkanın özellikleri sabit kabul edilebilir. Bu kabul ile Eş.(4.7) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$R_{top} = \frac{1}{h_i A_i} + C1 \tag{4.9}$$

Diğer taraftan iç borudaki türbülanslı akış için ısı transferi korelasyonu yaygın olarak

$$h_i = C_o \left(\frac{k}{d_i} \right) \mathrm{Re}^a \, \mathrm{Pr}^{1/3} \tag{4.10}$$

şeklinde verilmektedir. Eş.(4.9) ve Eş.(4.10)'dan

$$R_{top} = C_2 \frac{1}{\mathrm{Re}^a} + C_1 \tag{4.11}$$

elde edilir. Burada C_1 ve C_2 sabitlerdir. Eş.(4.11)'de R_{top} $1/Re^a$ karşı grafik edildiğinde eğim C_2 ekseni kestiği nokta ise C_1'i vermektedir. C_1 ve C_2 sabitleri yardımı ile h_o, h_1 ve C_o değerleri aşağıdaki ifadeler ile hesaplanır.

$$h_o = \frac{1}{(C_1 - R_w) A_o} \tag{4.12}$$

$$h_i = \frac{\mathrm{Re}^a}{C_2 A_i} \tag{4.13}$$

$$C_o = \frac{1}{C_2 \left(\frac{k_i}{d_i} \right) \mathrm{Pr}^{1/3} A_i} \tag{4.14}$$

Regresyon işleminin yapılabilmesi için *a* değerinin bilinmesi veya kabul edilmesi gerekir. Düz borular içerisindeki türbülanslı akışta *Re* ve *Pr* sayısına bağlı olarak a değerinin 0.70-0.9 aralığında değiştiği bilinmektedir. Eş.(4.11) aşağıdaki gibi yeniden düzenlenerek iki tarafın logaritması alınırsa,

$$ln\left(\frac{1}{\left(R_{top}-C_1\right)}\right)=ln\left(\frac{1}{C_2}\right)+a\,ln\,Re \tag{4.15}$$

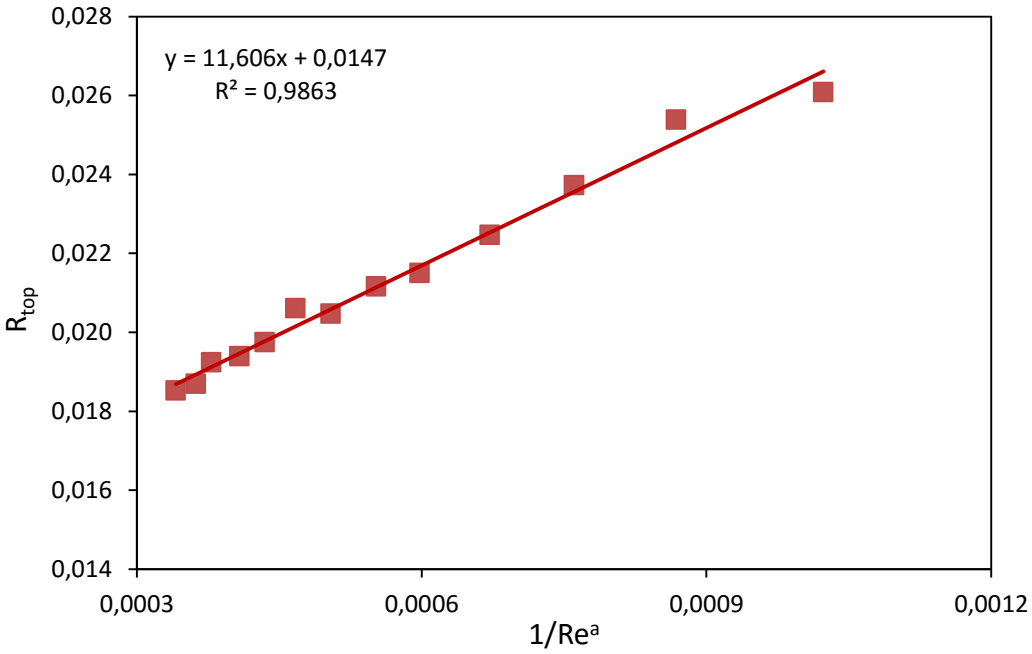
elde edilir. Eş.(4.15) lineer formda olup, doğrunun eğimi *a* katsayısına eşittir. Eş.(4.11) ve Eş.(4.15) birlikte kullanılarak *a* ve C_o sabitleri bulunabilir. Önce Eş.(4.11)'de a için bir değer atanır ve elde edilen doğru denkleminden C_1 bulunur. Bu değer Eş.(4.15)'de kullanılarak elde edilen doğru denkleminden *a* değeri bulunur. Kabul edilen ve bulunan *a* değerleri karşılaştırılır, eğer farklı ise işlem tekrarlanır.

Yöntemin uygulanmasıyla ve Eş.(4.12)'in yardımı ile dış tarafa ait taşınım katsayısının değeri h_o = 2346.742 W/m^{2o}C olarak hesaplandı. Korelasyon grafikleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Bu yöntem ile hesaplanan h_o değeri ile daha önce hesaplanan değer arasındaki fark %1.86'dır. Bu kabul edilebilir bir değerdir.

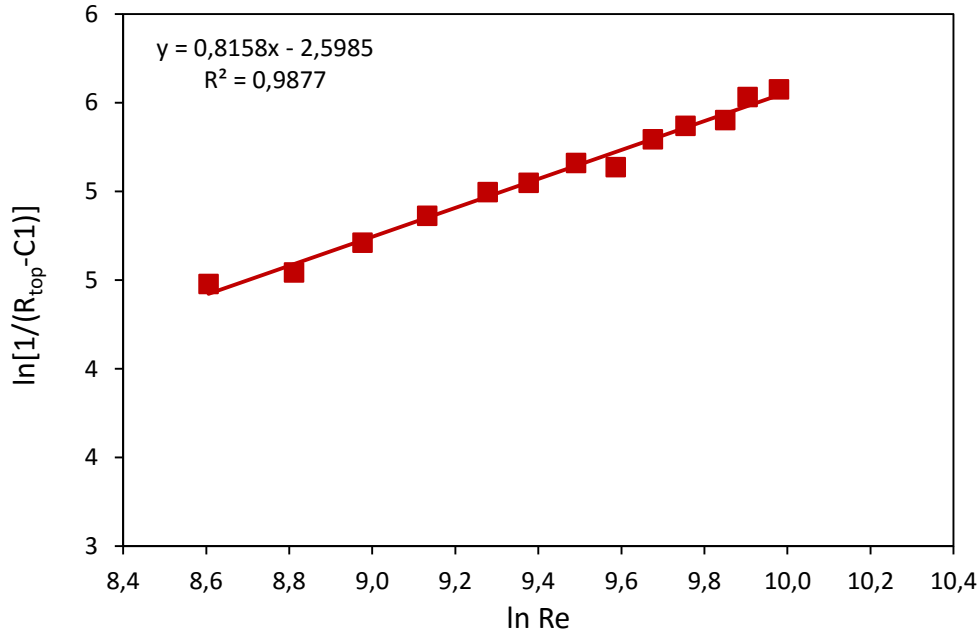
Eş.(4.8) kullanılarak hesaplanan h_o değerleri ve Eş.(4.7)'den hesaplanan h_i değerlerinden hesaplanan Nu_i değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 4.28'de grafik edilmiştir. Aynı grafik üzerinde dairesel borularda türbülanslı akış için literatürde mevcut korelasyonlar da karşılaştırma amaçlı verilmiştir. Kullanılan korelasyonlar Tablo 4.7'de verilmiştir. Bu çalışmada su için elde edilen Nusselt sayıları sonuçları Whitaker eşitliğine daha yakın çıkmıştır, sapma % 0.2-8 aralığında değişmektedir. Dittus–Boelter eşitliği için ise maksimum sapma %15' dir. Bu sonuçlar kabul edilebilir aralıklardadır. Çünkü bu korelasyonların kendi aralarındaki sapma ±%25 kadar olabilmektedir (Ji vd. 2012). Saf su için elde edilen korelasyonlar aşağıda verilmiştir:

$$Nu_i=\frac{h_i d_i}{k}=0.01697\,\mathrm{Re}^{0.83}\,\mathrm{Pr}^{1/3}\qquad \mathrm{r}^2=0.9875$$
$$5000<\mathrm{Re}<20000\;\mathrm{Pr}=5.644 \tag{4.16}$$

Şekil 4.29'da Yukarıda verilen iki farklı yöntem ile iç boruda akan su için elde edilen Nusselt sayıları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi değerler yakın çıkmıştır. Ancak Şekil 4.27(b)'den görüldüğü gibi Reynolds sayısının üssü 0.8158 bulunmuştur.

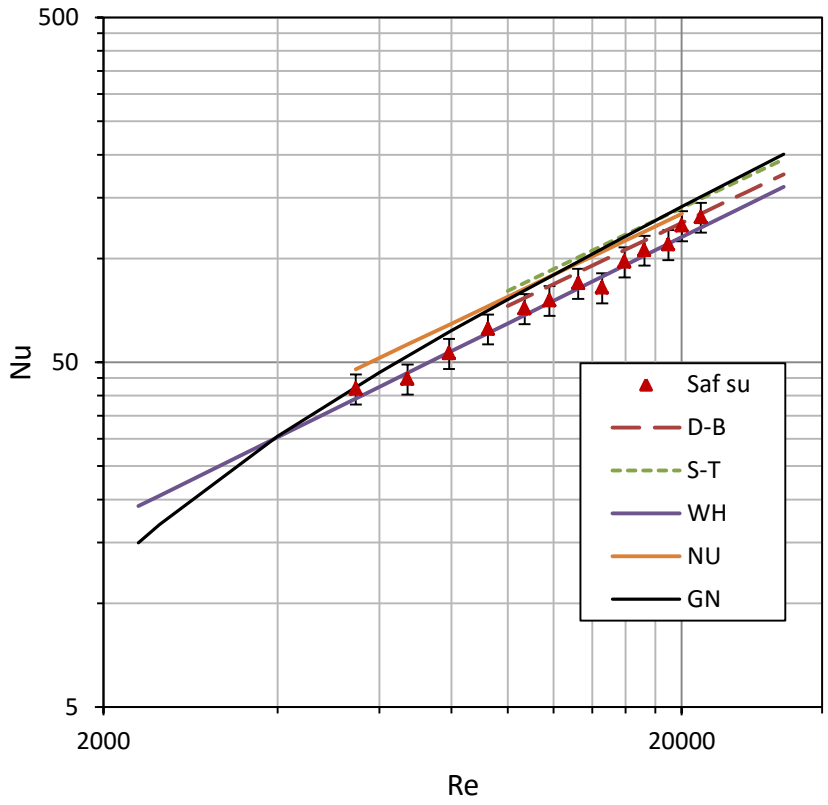


(a)

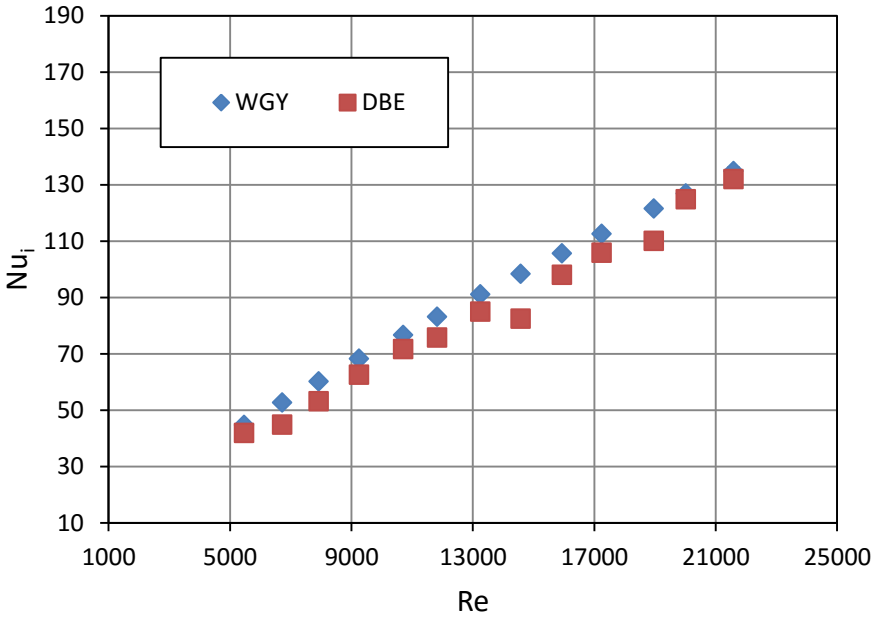


(b)

Şekil 4.27. Wilson grafik yöntemi korelasyon grafikleri (a) Eş.(4.8), (b) Eş.(4.14)



Şekil 4.28. Nusselt sayısı korelasyonlarının karşılaştırılması (Hata çubukları ±%10)

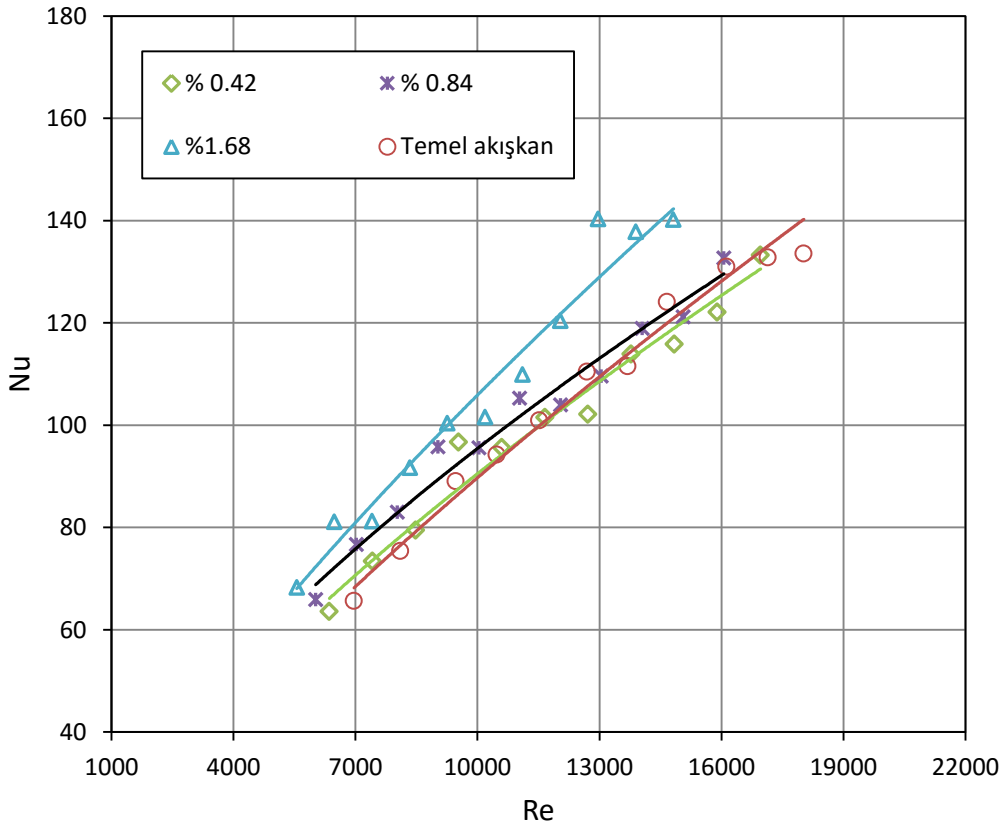


Şekil 4.29. İki farklı yöntem ile bulunan Nusselt sayılarının karşılaştırılması
(WGY: Wilson grafik yöntemi, DBE: Dittus Boelter eşitliği)

Tablo 4.7. Dairesel düz boru içerisinde türbülanslı akış için ısı transferi korelasyonları

		Korelasyon	Koşul	Ref.
D-B	Dittus–Boelter	$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{n}$ $n = \begin{cases} 0.4 \text{ Isıtılan akışkan} \\ 0.3 \text{ Soğutulan akışkan} \end{cases}$	0.7≤Pr≤160, Re≥10,000, L/D≥10	(Tosun, 2002)
S-T	Sieder–Tate.	$Nu = 0.027\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{1/3}\left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0.14}$	0.7≤Pr≤16,700, Re≥10,000, L/D≥10	(Tosun, 2002)
GN	Gnielinski	$Nu = \frac{(f/8)(\mathrm{Re}-1000)\mathrm{Pr}}{1+12.7(f/8)^{1/2}\left(\mathrm{Pr}^{2/3}-1\right)}\left[1+\left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right]\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_w}\right)^{0.11}$ $f = [(1.82\log(Re)-1.64)]^{-2}$	2300≤Re≤5.10^6, 0.6≤Pr≤10^5	(Ji vd. 2012)
NU	Nusselt	$Nu = 0.036\,Re^{0.8}\,Pr^{1/3}\left(\frac{d}{L}\right)^{0.055}$	10<L/d<400	(Holman, 2009)
WH	Whitaker.	$Nu = 0.015\,\mathrm{Re}^{0.83}\,\mathrm{Pr}^{0.42}\left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0.14}$	0.48≤Pr≤592,2300≤Re≤100,000 0.44≤μ_f/μ_w≤2.5	(Tosun, 2002)

Nanoakışakanlar için yukarıda verilen yöntem ile #1 deney koşulları için elde edilen Nu değerlerinin Re ile değişimi Şekil 4.30'da grafik edilmiştir. Nanoakışkanlar için deneysel Nu değerleri Eş.(4.16) formunda ifade edildiğinde Tablo 4.8 verilen değerler elde edilmiştir. Temel akışkana göre aynı Reynolds sayısı için Nusselt sayısında %1.68 katı oranı için meydana gelen iyileşme % 18 'dir.



Şekil 4.30. Nanoakışkanların Nusselt sayılarının Reynolds sayısı ile değişimi

Tablo 4.8. Nusslet sayısı korelasyon sabitleri

$$Nu = a\,\mathrm{Re}^{b}\,\mathrm{Pr}^{1/3}$$

Akışkan	a	b	r^2	Pr
%0.42	0.0756	0.693	0.9695	8.28
%0.84	0.1217	0.645	0.9742	8.72
%1.68	0.0519	0.752	0.9698	8.15
Temel akışkan	0.0428	0.758	0.9852	7.37

4.3.2 Basınç Düşüşü ve Sürtünme Katsayısı

Basınç düşüşü ölçümleri 23 ± 1 ^{o}C sıcaklıkta, ısıtma işlemi uygulanmadan ölçüldü. Şekil 4.31'de basınç düşüşünün Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Ayrıca mukayese etmek için saf su ve temel akışkan için ölçülen değerler de grafik üzerinde verilmiştir. Katı hacim oranın ve Reynolds sayısının artması ile basınç düşüşü artmaktadır. Nanoakışkanlar için ölçülen basınç düşüşleri temel akışkan ve su için elde edilen değerlerden yüksektir. Basınç düşüşleri Eş.(3.12) yardımı ile sürtünme katsayısına dönüştürüldü. Saf su ve temel akışkan için sürtünme katsayılarının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 4.32'de görülmektedir. Şekil üzerinde ayrıca türbülanslı akış için bilinen Blasius eşitliğinden (Eş.4.17a) ve Swamee-Jain (Eş.4.17b) eşitliklerinden saf su için hesaplanan değerler de verilmiştir. Bilinen Colbrook-White eşitliği iteratif çözüm gerektirdiği için Swamee-Jain eşitliği tercih edilmiştir. Ancak bu iki eşitlik arasındaki fark %1 oranındadır.

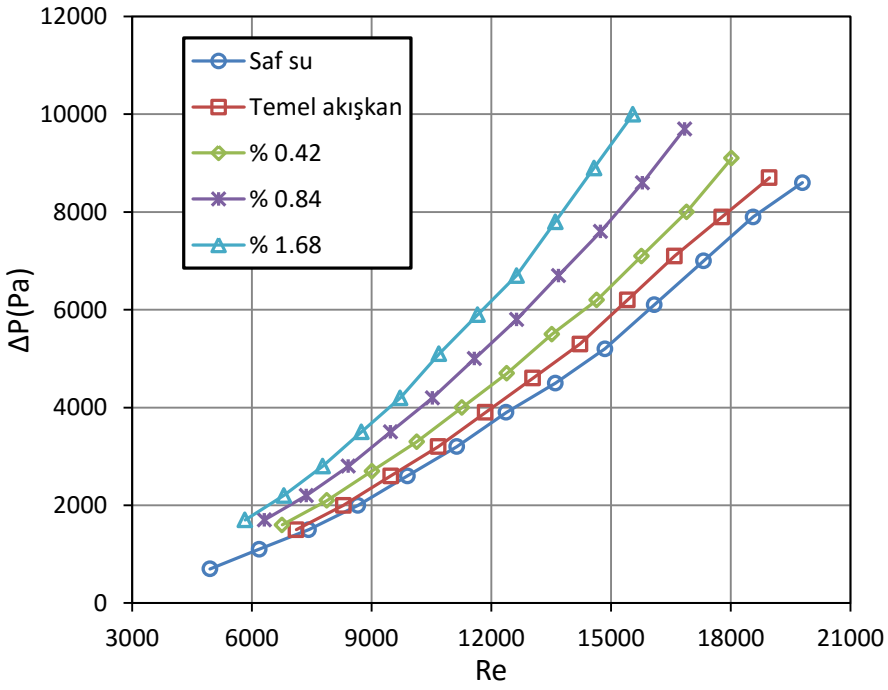
$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \tag{4.17a}$$

$$f = \frac{0.25}{\left\{ log\left(\frac{e}{3.7.D_i}\right) + \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right\}^2} \tag{4.17b}$$

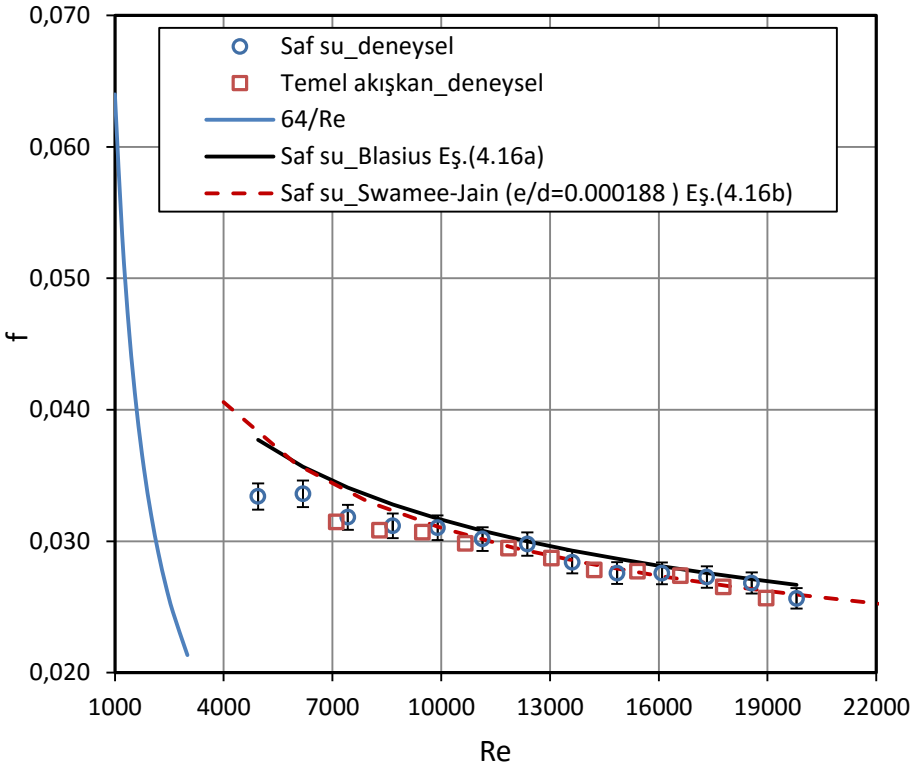
Şekil 4.32'den Re > 10000 değerleri için Eş.(4.17a ve b)'den hesaplanan ve deneysel değerlerin yakın olduğu aralarındaki sapmanın %3'den az olduğu görülmektedir. Ancak daha düşük Reynolds sayıları için sapma daha yüksektir. Eş.(4.17a) ve Eş.(4.17b) türbülanslı akış koşulları için kullanılan eşitliklerdir. 2300 < Re < 10000 ise geçiş bölgesi olarak kabul edilmektedir. Deneysel sonuçlar bu yaklaşım ile uyuşmaktadır. Aynı zamanda temel akışkan ve saf su için elde edilen değerlerin de aynı sapma oranı içerisinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.33'de nanoakışkanlar için sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi katı oranının artması ile sürtünme katsayısı artmakta ve Reynolds sayısının artması ile azalmaktadır. Ayrıca temel akışkana göre nanoakışkanların sürtünme faktörleri daha yüksektir. Deneysel veriler Eş.(4.17) formunda korele edildiğinde elde edilen katsayılar Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.9. Sürtünme katsayısı eşitliği katsayıları

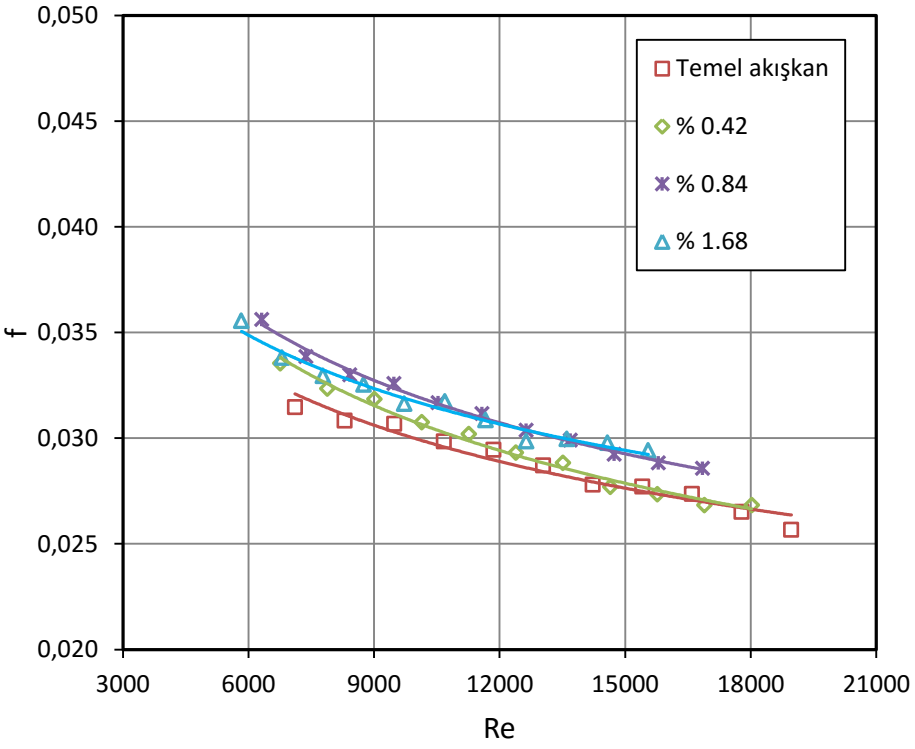
$f = a\,\mathrm{Re}^{b}$			
a	**b**	**r^2**	**Akışkan**
0.1707	-0.188	0.9440	Saf su
0.1829	-0.196	0.9525	Temel akışkan
0.2824	-0.240	0.9882	%0.42
0.2421	-0.220	0.9932	%0.84
0.177	-0.187	0.9737	%1.68



Şekil 4.31. Basınç düşüşünün Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4.32. Saf su için sürtünme katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (Hata çubukları ±%3)



Şekil 4.33. Nanoakışkanlar için sürtünme faktörlerinin Reynolds sayısı ile değişimi

4.3.3 Isı Transferi Performans Analizi

Isı transferi iyileştirme teknikleri ısı transferini artırmaları yanında basınç düşüşünü ve sürtünme faktörünü de artırmaktadır. Bundan dolayı meydana gelen artışın anlamlı olup olmadığının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla performans değerlendirme kriterleri geliştirmiştir.

Isı transferi iyileştirme teknikleri uygulanırken farklı amaç ve tasarım hedefleri doğrultusunda farklı değerlendirme kriterleri uygulanmaktadır. Değerlendirme kriterleri termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına dayanmaktadır (Yilmaz vd. 2005). Sistemi sabit pompa gücünde değerlendirme yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sabit pompa gücünde değerlendirme kriteri için farklı gösterimler kullanılmaktadır (Yilmaz vd. 2001; Karwa vd. 2013).

Nanoakışkanlar ısı transferini iyileştirmeleri yanında sürtünme faktörünü de artırmaktadır. Bundan dolayı ısı transferinde meydana gelen iyileşmeyi sabit pompa gücünde değerlendirmek faydalı olacaktır. Bu çalışmada kullanılan katı oranları için sürtünme katsayısında fazla bir artış olmadığı Şekil 4.30'da görülmektedir. Sabit pompa gücünde nanoakışkanlar ve temel akışkan için iyileştirme etkinliği Nusslet sayıları oranı şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta = \left.\frac{h_{nf}}{h_{ta}}\right|_{\substack{sabit\\pompa\\gücü}} = \left.\frac{Nu_{nf}}{Nu_{ta}}\right|_{\substack{sabit\\pompa\\gücü}} \tag{4.18}$$

Sabit pompa gücü Eş.(4.19) ile ifade edilebilir.

$$\Delta P_{nf}\, \dot{V}_{nf} = \Delta P_{ta}\, \dot{V}_{ta} \tag{4.19}$$

Burada $\dot{V}$ hacimsel akış debisini göstermektedir. Eş.(3.6), Eş.(3.12) ve Eş.(4.19) birlikte değerlendirilirse,

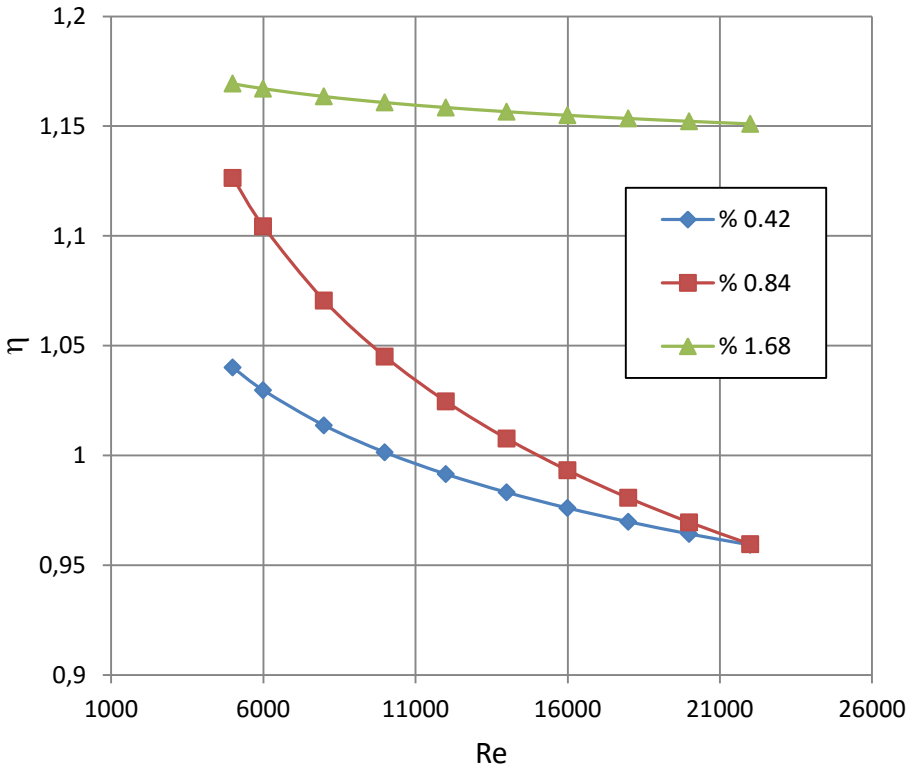
$$f_{nf}\, Re_{nf}{}^{3} = f_{ta}\, Re^{3}{}_{ta} \tag{4.20}$$

eşitliği elde edilir. Eş.(4.20) yeniden düzenlenerek aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\mathrm{Re}_{ta} = \left(\frac{f_{nf}}{f_{ta}}\right)^{1/3} \mathrm{Re}_{nf} \tag{4.21}$$

Eğer Re_{ta} değerindeki Nu_{ta} değerleri Eş.(4.18)'de yerine konulursa sabit pompa gücünde iyileşme oranı, η, hesaplanır. Isı transferinde meydana gelen iyileşmenin anlamlı olması için iyileşme oranının 1'in üzerinde olması gerekir.

Şekil 4.34'de iyileştirme etkinliklerinin Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi katı oranının %0.42 ve 0.84 olduğu durumda iyileştirme oranı Re>10000 için 1'in altındadır. %1.68 katı oranı için ise tüm Re değerleri 1'in üzerinde olup 1.15- 1.17 aralığındadır. Bu sabit pompa gücünde ısı transferinde meydana gelen iyileşmenin %15-17 aralığında olduğu anlamına gelir.



Şekil 4.31. Isı transferi iyileştirme etkinliği grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu proje kapsamında gerçekleştirilen çalışma başlıca üç ana aşamadan oluşmaktadır.

- Birinci aşama faz değiştiren madde olarak n-nonadekanın nano boyutta kapsüllenmesidir. Kapsüllerin dış kabuğu poliüretandan oluşmakladır. Enkapsülasyon yöntemi arayüzey polimerizasyonu olup monomer olarak TDI ve DETA kullanıldı.
- İkici aşamada sentezlenen nanokapsüller ile nanoakışkanlar hazırlanarak fiziksel özellikleri belirlendi. Temel akışkan sudur, ancak nanoakışkanların kararlılıklarını artırmak için NP-10 sürfaktan ilavesi yapıldı. Katı hacim oranı %0.42, %0.84 ve %1.68'dir. Nanoakışkanlar ultrasonik banyo kullanılarak hazırlandı.
- Son aşamada hazırlanan nanoakışkanların çift borulu bir ısı değiştiricide ısı transferi çalışmaları yapıldı. Ayrıca basınç düşüşü ölçümleri gerçekleştirilerek sabit pompa gücünde performans analizi gerçekleştirildi. Isı ve basınç düşüşü ölçümleri için Renolds sayısı 5000-20000 aralığında değişmektedir.

Elde edilen bulgular ile aşağıdaki sonuçlar vurgulanabilir.

- Nanokapsüller başarılı bir şekilde sentezlendi ve FTIR, DSC, SEM ve TEM analizleri ile karakterize edildi. En uygun TDI/DETA oranının 3/1 olduğu belirlendi. Farklı sürfaktanlar denendi ve en iyi kapsül NP-10 kullandığında elde edildi.
- Karıştırma hızı ve yöntemi kapsül yapısını ve büyüklüğünü etkilemektedir. Mekanik karıştırıcıya göre manyetik karıştırıcı ile daha iyi kapsül üretildi. SEM görüntülerinden kapsüllerin aritmetik ortalama çapı 100 nm olarak hesaplanmıştır.
- DSC analizleri ile erime/katılaşma sıcaklıkları ve faz değişim entalpileri PU-nonadekan kapsülleri için sırasıyla 31.90 ^{o}C/30.34 ^{o}C ve 92.846 J/g/91.862 J/g şeklinde elde edilmiştir.
- Nanoakışkanların viskoziteleri katı oranın artması ile artmakta sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Nanoakışkanların viskoziteleri sıcaklığın ve katı hacim oranı yüzdelerinin fonksiyonu olarak korele edilmiştir. Ayrıca incelenen katı oranlarında, katı ilavesinin temel akışkanın viskozitelerinin sıcaklıkla değişim davranışını etkilemediği görülmüştür.
- Isı iletim katsayıları kapsül miktarının ve sıcaklığın artması ile artmaktadır. %0.42 ve %0.84 katı oranları için ısı iletim katsayıları temel akışkanın ısı iletim katsayısına yakın ve daha düşük elde edilmiştir.

- Tüm ısı transferi katsayısının katı kapsül hacim oranının artması ile arttığı, temel akışkan ile mukayese edildiğinde %0.42 ve %0.84 katı hacim oranları için bir belirgin ısı transferi iyileşmesinin oluşmadığı görülmüştür. %1.68 katı hacim fraksiyonunda ise temel akışkana göre tüm ısı aktarım katsayısında artış olduğu görülmüştür. Sabit Reynolds sayısında ısı transferinde meydana gelen artış yaklaşık %16-18 aralığındadır.
- Sürtünme faktörü katı oranının artması ile artmaktadır.
- Sabit pompa gücünde yapılan performans analizi ile ısı transfer iyileşme oranı %0.42 ve %0.84 katı hacim oranları için birin altında, %1.68 için ise tüm Re değerleri için birin üzerinde ve 1.15-1.17 aralığında elde edilmiştir.

Bu çalışma, bu konuda yapılan ilk çalışmalardan biridir ve daha sonra yapılacak çalışmalar için önemli bir alt yapı oluşturmuştur. Çalışma sonuçları nanoakapsüllenmiş faz değiştiren maddeler ile hazırlanmış nanoakışkanlarının enerji depolama ve ısı transferi sistemlerinde kullanılabilene potansiyeli olduğunu göstermiştir. Çalışma sonuçlarına göre daha sonraki çalışmalar için aşağıdaki hususlar vurgulanabilir.

- Bu çalışmada nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan kapsüller laboratuar ortamında sentezlendiğinden dolayı incelenen katı oranı miktarları düşük tutulmuştur. Daha yüksek katı oranlarında deneysel çalışma yapılabilir.
- Isı transferi deneysel çalışması çift borulu ısı değiştirici yardımı ile gerçekleştirildi. Dolayısıyla lokal sıcaklık ölçümü yapılamadı. Sabit ısı akısında lokal yüzey sıcaklığı veya akışkan sıcaklığı ölçümüne imkan sağlayan bir deney düzeneği ile faz değişim etkisi daha ayrıntılı araştırılabilir.
- Nanoakışkanların kararlılıkları ile ilgili ilave çalışmalar yapılarak su yerine etilen glikol gibi ısıl akışkanlar ile deneysel çalışmalar yapılabilir.
- Kapsüllenme oranını artırmak için ilave çalışmalar yapılabilir.

Semboller

A	ısı transfer alanı [m^2]
a_r	reaksiyon fraksiyonu [-]
a_m	erime fraksiyonu [-]
Cp	özgül ısı [J/kg ^oC]
d	boru çapı [m]
f	sürtünme katsayısı [-]
h	taşınım katsayısı [$W/m^2.^oC$]
ΔH_r	reaksiyon entalpisi [J/mol]
ΔH_m	erime entalpisi [J/kg]
k	ısı iletim katsayısı [$W/m.^oC$]
Nu	Nusselt sayısı [-]
ΔP	basınç düşüşü [Pa]
Pr	Prandtl sayısı [-]
Q	aktarılan ısı [W],
Re	Reynolds sayısı [-]
U	tüm ısı aktarım katsayısı [$W/m^2.^oC$]
$\dot{m}$	kütle akış hızı [kg/s]
ρ	yoğunluk [kg/m^3]
ΔT_{LM}	logaritmik ortalama sıcaklık farkı [^oC]
μ	viskozite [kg/m.s]
ϕ	katı hacim fraksiyonu [%]
$\dot{V}$	hacimsel akış hızı [m^3/s]

İndisler

c	soğuk
e	erime
h	sıcak
i	iç taraf
o	dış taraf
ta	temel akışkan
nf	nanoakışkan

KAYNAKLAR

Agyenim, F., N. Hewitt, P. Eames and M. Smyth 2010. "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)." Renewable & Sustainable Energy Reviews 14(2): 615-628.

Al-Abidi, A. A., S. Bin Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, C. H. Lim and A. Th. 2012. "Review of thermal energy storage for air conditioning systems." Renewable & Sustainable Energy Reviews 16(8): 5802-5819.

Aladag, B., S. Halelfadl, N. Doner, T. Mare, S. Duret and P. Estelle 2012. "Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures." Applied Energy 97: 876-880.

Alay, S., F. Gode and C. Alkan 2011. "Synthesis and Thermal Properties of Poly(n-butyl acrylate)/n-Hexadecane Microcapsules Using Different Cross-Linkers and Their Application to Textile Fabrics." Journal of Applied Polymer Science 120(5): 2821-2829.

Alkan, C., A. Sari, A. Karaipekli and O. Uzun 2009. "Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage." Solar Energy Materials and Solar Cells 93(1): 143-147.

Alvarado, J. L., C. Marsh, C. Sohn, G. Phetteplace and T. Newell 2007. "Thermal performance of microencapsulated phase change material slurry in turbulent flow under constant heat flux." International Journal of Heat and Mass Transfer 50(9-10): 1938-1952.

Andersen, P. K., R. H. Muller and C. W. Tobias 1989. "The Effect of Suspended-Solids on Mass-Transfer to a Rotating-Disk." Journal of the Electrochemical Society 136(2): 390-399.

Azizian, M. R., H. S. Aybar and T. Okutucu 2009. "Effect of Nanoconvection due to Brownian Motion on Thermal Conductivity of Nanofluids." Proceedings of the 7th Iasme/Wseas International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (Hte'09): 53-56.

Azizian, R., E. Doroodchi and B. Moghtaderi 2012. "Effect of Nanoconvection Caused by Brownian Motion on the Enhancement of Thermal Conductivity in Nanofluids." Industrial & Engineering Chemistry Research 51(4): 1782-1789.

Azmi, W. H., K. V. Sharma, R. Mamat, A. B. S. Alias and I. I. Misnon 2012. "Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids." 1st International Conference on Mechanical Engineering Research 2011 (Icmer2011) 36.

Bayes-Garcia, L., L. Ventola, R. Cordobilla, R. Benages, T. Calvet and M. A. Cuevas-Diarte 2010. "Phase Change Materials (PCM) microcapsules with different shell compositions: Preparation, characterization and thermal stability." Solar Energy Materials and Solar Cells 94(7): 1235-1240.

Bergles, A. E. 1999. "Enhanced heat transfer: Endless frontier, or mature and routine?" Journal of Enhanced Heat Transfer 6(2-4): 79-88.

Bobbo, S., L. Fedele, A. Benetti, L. Colla, M. Fabrizio, C. Pagura and S. Barison 2012. "Viscosity of water based SWCNH and TiO2 nanofluids." Experimental Thermal and Fluid Science 36: 65-71.

Caprani, A., M. M. Deficquelmontloizos, L. Tamisier and P. Peronneau 1988. "Mass-Transfer in Laminar-Flow at a Rotating-Disk Electrode in Suspensions of Inert Particles .2. Theoretical Evaluation of Experimental Results." Journal of the Electrochemical Society 135(3): 635-642.

Chandrasekar, M., S. Suresh and T. Senthilkumar 2012. "Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids - A review." Renewable & Sustainable Energy Reviews 16(6): 3917-3938.

Cheng, S. Y., C. W. M. Yuen, C. W. Kan, K. K. L. Cheuk, C. H. Chui and K. H. Lam 2009. "Cosmetic textiles with biological benefits: Gelatin microcapsules containing Vitamin C." International Journal of Molecular Medicine 24(4): 411-419.

Choi, E. S., Y. I. Cho and H. G. Lorsch 1994. "Forced-Convection Heat-Transfer with Phase-Change-Material Slurries - Turbulent-Flow in a Circular Tube." International Journal of Heat and Mass Transfer 37(2): 207-215.

Colangelo, G., E. Favale, A. de Risi and D. Laforgia 2012. "Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications." Applied Energy 97: 828-833.

Colla, L., L. Fedele, M. Scattolini and S. Bobbo 2012. "Water-Based Fe2O3 Nanofluid Characterization: Thermal Conductivity and Viscosity Measurements and Correlation." Advances in Mechanical Engineering.

Dalkilic, A. S., N. Kayaci, A. Celen, M. Tabatabaei, O. Yildiz, W. Daungthongsuk and S. Wongwises 2012. "Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids - A Review of the Recent Literature." Current Nanoscience 8(6): 949-969.

Daungthongsuk, W. and S. Wongwises 2007. "A critical review of convective heat transfer of nanofluids." Renewable and Sustainable Energy Reviews 11(5): 797-817.

Delgado, M., A. Lazar, C. Penalosa and B. Zalba 2014. "Experimental analysis of the influence of microcapsule mass fraction on the thermal and rheological behavior of a PCM slurry." Applied Thermal Engineering 63(1): 11-22.

Dewettinck, K. and A. Huyghebaert 1999. "Fluidized bed coating in food technology." Trends in Food Science & Technology 10(4-5): 163-168.

Dirker, J. and J. P. Meyer 2005. "Convective heat transfer coefficients in concentric annuli." Heat Transfer Engineering 26(2): 38-44.

Dow Chemecial company: http://www.dow.com/assets/attachments/business/pcm/tergitol/tergitol_np-10/tds/np-10.pdf. Son eririşm tarihi:01.01.2016

Elias, M. M., M. Miqdad, I. M. Mahbubul, R. Saidur, M. Kamalisarvestani, M. R. Sohel, A. Hepbasli, N. A. Rahim and M. A. Amalina 2013. "Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell and tube heat exchanger." International Communications in Heat and Mass Transfer 44: 93-99.

Fan, L. W. and J. M. Khodadadi 2011. "Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review." Renewable & Sustainable Energy Reviews 15(1): 24-46.

Farid, M. M., A. M. Khudhair, S. A. K. Razack and S. Al-Hallaj 2004. "A review on phase change energy storage: materials and applications." Energy Conversion and Management 45(9-10): 1597-1615.

Fauzi, H., H. S. C. Metselaar, T. M. I. Mahlia, M. Silakhori and H. Nur 2013. "Phase change material: Optimizing the thermal properties and thermal conductivity of myristic acid/palmitic acid eutectic mixture with acid-based surfactants." Applied Thermal Engineering 60(1-2): 261-265.

Ghadimi, A., R. Saidur and H. S. C. Metselaar 2011. "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions." International Journal of Heat and Mass Transfer 54(17–18): 4051-4068.

Haddad, Z., H. F. Oztop, E. Abu-Nada and A. Mataoui 2012. "A review on natural convective heat transfer of nanofluids." Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(7): 5363-5378.

Han, Z. and A. Fina 2011. "Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review." Progress in Polymer Science 36(7): 914-944.

Heidebach, T., P. Forst and U. Kulozik 2012. "Microencapsulation of Probiotic Cells for Food Applications." Critical Reviews in Food Science and Nutrition 52(4): 291-311.

Heyhat, M. M., F. Kowsary, A. M. Rashidi, S. A. V. Esfehani and A. Amrollahi 2012. "Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime." International Communications in Heat and Mass Transfer 39(8): 1272-1278.

Hiemenz, P. C. and R. Rajagopalan 1997. " Principles of Colloid and Surface Chemistry Third Edition, CRC Press.

Ho, C. J., J. B. Huang, C. P. Chen, P. S. Tsai and Y. M. Yang 2012. "Forced convection performance of a MEPCM suspension through an iso-flux heated circular tube: an experimental study." Heat and Mass Transfer 48(3): 487-496.

Ho, C. J., J. B. Huang, P. S. Tsai and Y. M. Yang 2010. "Preparation and properties of hybrid water-based suspension of Al2O3 nanoparticles and MEPCM particles as functional forced convection fluid." International Communications in Heat and Mass Transfer 37(5): 490-494.

Ho, C. J., J. B. Huang, P. S. Tsai and Y. M. Yang 2011. "On laminar convective cooling performance of hybrid water-based suspensions of Al2O3 nanoparticles and MEPCM particles in a circular tube." International Journal of Heat and Mass Transfer 54(11–12): 2397-2407.

Ho, C. J., J. B. Huang, P. S. Tsai and Y. M. Yang 2011. "Water-based suspensions of Al2O3 nanoparticles and MEPCM particles on convection effectiveness in a circular tube." International Journal of Thermal Sciences 50(5): 736-748.

Hojjat, M., S. G. Etemad, R. Bagheri and J. Thibault 2011. "Turbulent forced convection heat transfer of non-Newtonian nanofluids." Experimental Thermal and Fluid Science 35(7): 1351-1356.

Holman, J.P 2010. “Heat Transfer”, Tenth Edition, McGraw Hill.

Howard, J. A. and P. A. Walsh 2013. "An Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement Mechanisms in Microencapsulated Phase-Change Material Slurry Flows." Heat Transfer Engineering 34(2-3): 223-234.

Huang, L., P. Noeres, M. Petermann and C. Doetsch 2010 "Experimental study on heat capacity of paraffin/water phase change emulsion." Energy Conversion and Management 51(6): 1264-1269.

Huminic, G. and A. Huminic 2012. "Application of nanofluids in heat exchangers: A review." Renewable & Sustainable Energy Reviews 16(8): 5625-5638.

Jegadheeswaran, S. and S. D. Pohekar 2009. "Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 13(9): 2225-2244.

Ji, W. T., D. C. Zhang, Y. L. He and W. Q. Tao 2012. "Prediction of fully developed turbulent heat transfer of internal helically ribbed tubes - An extension of Gnielinski equation." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(4): 1375-1384.

Kakaç, S. and A. Pramuanjaroenkij 2009. "Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids." International Journal of Heat and Mass Transfer 52(13–14): 3187-3196.

Karwa, R., C. Sharma and N. Karwa 2013. "Performance Evaluation Criterion at Equal Pumping Power for Enhanced Performance Heat Transfer Surfaces." Journal of Solar Energy 2013: 9.

Kenisarin, M. M. 2010. "High-temperature phase change materials for thermal energy storage." Renewable & Sustainable Energy Reviews 14(3): 955-970.

Kleinstreuer, C. and Y. Feng 2011. "Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review." Nanoscale Research Letters 6.

Kleinstreuer, C. and Y. Feng 2011a. "Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review (vol 6, pg 229, 2011)." Nanoscale Research Letters 6.

Kole, M. and T. K. Dey 2011. "Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide-gear oil nanofluids." International Journal of Thermal Sciences 50(9): 1741-1747.

Kong, M.-S., K. Yu, J. L. Alvarado and J. W. Terrell (2015). "Thermal Performance of Microencapsulated Phase Change Material Slurry in a Coil Heat Exchanger." Journal of Heat Transfer 137(7): 071801-071801.

Koo, J. and C. Kleinstreuer 2005. "Laminar nanofluid flow in microheat-sinks." International Journal of Heat and Mass Transfer 48(13): 2652-2661.

Kumaresan, V., R. Velraj and S. K. Das 2012. "Convective heat transfer characteristics of secondary refrigerant based CNT nanofluids in a tubular heat exchanger." International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid 35(8): 2287-2296.

Léal, L., M. Miscevic, P. Lavieille, M. Amokrane, F. Pigache, F. Topin, B. Nogarède and L. Tadrist 2013. "An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials." International Journal of Heat and Mass Transfer 61(0): 505-524.

Li, G., Y. H. Hwang and R. Radermacher 2012. "Review of cold storage materials for air conditioning application." International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid 35(8): 2053-2077.

Li, Y., J. e. Zhou, S. Tung, E. Schneider and S. Xi 2009. "A review on development of nanofluid preparation and characterization." Powder Technology 196(2): 89-101.

Lin, C. Y., J. C. Wang and T. C. Chen 2011. "Analysis of suspension and heat transfer characteristics of Al2O3 nanofluids prepared through ultrasonic vibration." Applied Energy 88(12): 4527-4533.

Liu, Z. H. and Y. Y. Li 2012. "A new frontier of nanofluid research - Application of nanofluids in heat pipes." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(23-24): 6786-6797.

Lu, W. and S. A. Tassou "Characterization and experimental investigation of phase change materials for chilled food refrigerated cabinet applications." Applied Energy.112: 1376-1382.

Mahbubul, I. M., R. Saidur and M. A. Amalina 2012. "Latest developments on the viscosity of nanofluids." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(4): 874-885.

Meng, Z. G., D. X. Han, D. X. Wu, H. T. Zhu and Q. L. Li 2012. "Thermal Conductivities, Rheological Behaviors and Photothermal Properties of Ethylene Glycol-based Nanofluids Containing Carbon Black Nanoparticles." Iumrs International Conference in Asia 2011 36: 521-527.

Microteklabs,http://www.microteklabs.com/technical_overview.pdf.
Son erişim tarihi:16.01.2016

Mondal, S. 2008. "Phase change materials for smart textiles - An overview." Applied Thermal Engineering 28(11-12): 1536-1550.

Mora-Huertas, C. E., H. Fessi and A. Elaissari 2010. "Polymer-based nanocapsules for drug delivery." Int J Pharm 385(1-2): 113-142.

Mozafari, M. R., K. Khosravi-Darani, G. G. Borazan, J. Cui, A. Pardakhty and S. Yurdugul 2008. "Encapsulation of Food Ingredients Using Nanoliposome Technology." International Journal of Food Properties 11(4): 833-844.

Ramahlingam, T., Raghavan, V.R., 2011. The Tube Side Heat Transfer Coefficient for Enhanced Double Tube by Wilson Plot Analysis. *Journal of Applied Sciences, 11: 1725-1732.*

Re, M. I. 1998. "Microencapsulation by spray drying." Drying Technology 16(6): 1195-1236.

Regin, A. F., S. C. Solanki and J. S. Saini 2008. "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 12(9): 2438-2458.

Ruan, B. L. and A. M. Jacobi 2012. "Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions." Nanoscale Research Letters 7: 1-14.

Saidur, R., K. Y. Leong and H. A. Mohammad 2011. "A review on applications and challenges of nanofluids." Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(3): 1646-1668.

Salaun, F., E. Devaux, S. Bourbigot and P. Rumeau 2009. "Application of Contact Angle Measurement to the Manufacture of Textiles Containing Microcapsules." Textile Research Journal 79(13): 1202-1212.

Sanchez, P., M. V. Sanchez-Fernandez, A. Romero, J. F. Rodriguez and L. Sanchez-Silva 2010. "Development of thereto-regulating textiles using paraffin wax microcapsules." Thermochimica Acta 498(1-2): 16-21.

Sarier, N. and E. Onder 2007. "The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics." Thermochimica Acta 452(2): 149-160.

Sarier, N. and E. Onder 2012. "Organic phase change materials and their textile applications: An overview." Thermochimica Acta 540: 7-60.

Seeton, C. J. 2006. "Viscosity-temperature correlation for liquids." Tribology Letters 22(1): 67-78.

Sharma, A., V. V. Tyagi, C. R. Chen and D. Buddhi 2009. "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications." Renewable & Sustainable Energy Reviews 13(2): 318-345.

Sivashanmugam, P. 2012. 14. “Application of Nanofluids in Heat Transfer. An Overview of Heat Transfer Phenomena. Editor: Salim N. K. Intech.

Sonneveld, P. J., W. Visscher and E. Barendrecht 1990. "The Influence of Suspended Particles on the Mass-Transfer at a Rotating-Disk Electrode - Nonconducting Particles." Journal of Applied Electrochemistry 20(4): 563-574.

Su, J. F., L. X. Wang, L. Ren, Z. Huang and X. W. Meng 2006. "Preparation and characterization of polyurethane microcapsules containing n-octadecane with styrene-maleic

anhydride as a surfactant by interfacial polycondensation." Journal of Applied Polymer Science 102(5): 4996-5006.

Suresh, S., K. P. Venkitaraj, P. Selvakumar and M. Chandrasekar 2012. "A comparison of thermal characteristics of Al2O3/water and CuO/water nanofluids in transition flow through a straight circular duct fitted with helical screw tape inserts." Experimental Thermal and Fluid Science 39: 37-44.

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

Syam Sundar, L. and M. K. Singh 2013. "Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 20: 23-35.

Taylor, R., S. Coulombe, T. Otanicar, P. Phelan, A. Gunawan, W. Lv, G. Rosengarten, R. Prasher and H. Tyagi 2013. "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids." Journal of Applied Physics 113(1).

Timofeeva, E.V., 2011. 19. “Nanofluids for Heat Transfer– Potential and Engineering Strategies”. Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling. Editor: Ahsan, A. InTech.

Tosun, İ. 2002. Modeling in Transport Pehenomena. Elsevier.

Tyagi, V. V., S. C. Kaushik, S. K. Tyagi and T. Akiyama 2011. "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review." Renewable & Sustainable Energy Reviews 15(2): 1373-1391.

van Zyl, W. R., J. Dirker and J. P. Meyer 2013. "Single-Phase Convective Heat Transfer and Pressure Drop Coefficients in Concentric Annuli." Heat Transfer Engineering 34(13): 1112-1123.

WASP - Water And Steam Properties,http://www.katmarsoftware.com/wasp.htm.

Wang, X. Q. and A. S. Mujumdar 2008. "A Review on Nanofluids - Part I: Theoretical and Numerical Investigations." Brazilian Journal of Chemical Engineering 25(4): 613-630.

Wen, D., G. Lin, S. Vafaei and K. Zhang 2009. "Review of nanofluids for heat transfer applications." Particuology 7(2): 141-150.

Wusiman, K. E. B. J., H. S. Chung, J. N. Md, A. Handry, Y. S. Eom, J. H. Kim and H. M. Jeong 2013. "Heat transfer characteristics of nanofluid through circular tube." Journal of Central South University 20(1): 142-148.

Yang, L., K. Du, Y. H. Ding, B. Cheng and Y. J. Li 2012. "Viscosity-prediction models of ammonia water nanofluids based on various dispersion types." Powder Technology 215-16: 210-218.

Yilmaz, M., O. Comakli, S. Yapici and O. N. Sara 2005. "Performance evaluation criteria for heat exchangers based on first law analysis." Journal of Enhanced Heat Transfer 12(2): 121-157.

Yilmaz, M., O. Sara and S. Karsli 2001. "Performance evaluation criteria for heat exchangers based on second law analysis." Exergy, an International Journal 1(4): 278-294.

Yu, W. H., D. M. France, E. V. Timofeeva, D. Singh and J. L. Routbort (2012). "Comparative review of turbulent heat transfer of nanofluids." International Journal of Heat and Mass Transfer 55(21-22): 5380-5396.

Zalba, B., J. M. Marin, L. F. Cabeza and H. Mehling 2003. "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications." Applied Thermal Engineering 23(3): 251-283.

Zhao, C. Y. and G. H. Zhang 2011. "Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(8): 3813-3832.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. OSMAN NURİ ŞARA
Proje No:	113M133
Proje Başlığı:	Nano Kapsüllenmiş Faz Değiştiren Madde İçeren Nanoakişkanin Dairesel Bir Boruda Akişinda Isi Transferinin Deneysel İncelenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	27
Araştırmacılar:	ALİ KARAİPEKLİ, SİNAN YAPICI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ÇANKIRI KARATEKİN Ü. MÜHENDİSLİK F. KİMYA MÜHENDSİLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2013 - 01/01/2016
Onaylanan Bütçe:	245569.0
Harcanan Bütçe:	177085.95
Öz:	Bu çalışmada, n-nonadekanın poliüretan içerisinde nano boyutta enkapsülasyonu ara yüzey polimerizasyon yöntemi ile gerçekleştirildi. Elde edilen nanokapsüllerin SEM, TEM, FTIR ve DSC ile karakterizasyonu gerçekleştirildi. Sentezlenen nanokapsüllerin erime ve katılaşma sıcaklıkları ve entalpileri sırasıyla 31.90 oC/30.34 oC ve 92.846 J/g /91.862 J/g şeklinde elde edilmiştir. Sentezlenen kapsüllerin SEM görüntülerinden ortalama boyutu yaklaşık 100 nm olarak hesaplandı. Su ve hacimce %0.42, %0.84 ve %1.68 kapsül içeren nanoakışkanlar hazırlanarak viskozite ve ısı iletim katsayıları ölçüldü. Katı oranının artması ile nanoakışkanların viskozitelerinin arttığı, ancak sıcaklık ile azaldığı tespit edildi. Isı iletim katsayısının katı miktarının artması ile arttığı görüldü. %0.42 ve %0.84 katı oranları için ısı iletim katsayıları temel akışkanın ısı iletim katsayısına yakın ve altında olduğu, %1.68 katı oranı için ise temel akışkanın ısı iletim katsayısından daha yüksek olduğu belirlendi. Nanoakışkanların ısı transferi davranışı ve basınç düşüşü ölçümleri bir çift borulu ısı değiştiricide gerçekleştirildi. %0.42 ve %0.84 katı oranları için ısı transferinde önemli bir iyileşme olmadığı, %1.68 katı oranı için ise sabit Reynolds sayısında Nusselt sayısında meydana gelen iyileşme %16-18 aralığında olduğu gözlemlendi. Basınç düşüşü ölçümlerinden nanoakışkanlar için sürtünme katsayılarının katı oranın artması ile arttığı görüldü. Son olarak sabit pompa gücünde yapılan performans analizi ile iyileşme oranı %0.42 ve %0.84 katı oranları için Reynols sayısının 10000'dan büyük olduğu değerler için birin altında kaldığı, %1.68 katı içeren akışkan için ise 1.15-1.17 aralığında olduğu belirlendi.
Anahtar Kelimeler:	nanoakışkan, ısı transferi, nanoenkapsülasyon, faz değiştiren madde
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Progress in Clean EnergyVolume 1Analysis and Modeling (Kitap - Kitapta Bölüm),

TÜBİTAK