

# NANOAKIŞKANLARIN ISIL İLETKENLİK VE VİSKOZİTESİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ: TANECİK BOYUTU ETKİSİ

Alpaslan TURGUT<sup>1</sup>, Şahika SAĞLANMAK<sup>2</sup>, Serkan DOĞANAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Buca, 35397, İzmir

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği A.B.D., Buca, 35397, İzmir

[alpaslan.turgut@deu.edu.tr](mailto:alpaslan.turgut@deu.edu.tr), [sahikasaglanmak@gmail.com](mailto:sahikasaglanmak@gmail.com), [serkan.doganay@outlook.com](mailto:serkan.doganay@outlook.com)

(Geliş/Received: 17.11.2014; Kabul/Accepted: 05.11.2015)

## ÖZET

Yeni nesil ısı transfer akışkanı olma potansiyeli taşıyan nanoakışkanlar ile ilgili araştırmalar on yılı aşkın bir süre önce başlamasına rağmen, yayınlanan çalışmaların sonuçları arasında birçok tutarsızlık ve çelişkiler mevcuttur. Bunlardan birisi tanecik boyutunun nanoakışkanın ısı performansına olan etkisidir. Bu çalışmada, 10 nm ve 30 nm tanecik boyutuna sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanların, hacimce % 1, 2, 3 ve 6,33 katkı oranlarında, ısı iletkenlik ve viskozite değerleri deneysel olarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde yer alan efektif ısı iletkenlik ve efektif viskozite modelleri ile karşılaştırılmıştır. Isıl iletkenliğin, tanecik boyutu ile ilişkili olmadığı ve deneysel sonuçlarımızın klasik efektif ısı iletkenlik modellerinden biri olan Maxwell ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Reolojik ölçümler sonucunda, numunelerin Newton tipi akışkan davranışı gösterdikleri ve aynı tanecik katkı oranında, daha büyük tanecik boyutuna sahip numunelerin viskozitelerindeki artış oranının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Klasik efektif viskozite modellerinden Einstein modeli, deneysel sonuçlarımız ile karşılaştırıldığında çok düşük değerlere sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkan, ısı iletkenlik, viskozite, tanecik boyutu etkisi

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THERMAL CONDUCTIVITY AND VISCOSITY OF NANOFLUIDS: PARTICLE SIZE EFFECT

### ABSTRACT

Although, it has been more than a decade since research started on nanofluids, potential heat transfer fluids of next generation, there are still inconsistent and contradictory results between studies. Among these results, one is the effect of particle size on thermal performance of a nanofluid. In this study, thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – deionized water nanofluids with different particle size (10 and 30 nm) and concentration (1 to 6.33 % vol.) were studied experimentally, and the results were compared with the effective thermal conductivity and effective viscosity models from the literature. It is observed that, particle size has no effect on the thermal conductivity of nanofluid and our experimental results are in a good agreement with Maxwell model, one of the classical effective thermal conductivity models. The results of the rheological measurements indicate that, nanofluid samples show a Newtonian fluid behavior and for the given particle volume concentration, bigger particle size gives a higher increase on the viscosity of the sample. Einstein model, one of the classical effective viscosity model, fails to predict the viscosity of nanofluid samples.

**Keywords:** Nanofluid, thermal conductivity, viscosity, particle size effect

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nanotanecekler ve taşıyıcı bir akışkandan oluşan iki fazlı sistemler nanoakışkan olarak adlandırılmaktadır. Literatürdeki çalışmaların tamamına yakınında

taşıyıcı akışkan olarak sıvılar kullanılmasına rağmen, gaz akışkan ile yapılmış çalışmalarda mevcuttur. Rudyak [1], özellikle yüksek yoğunluklu gazların taşıyıcı akışkan olarak kullanıldığı ve gaz nano-süspaniyon olarak adlandırdıkları sistemlerin, sıvı

bazlı nanoakışkanlar ile pek çok benzer özellik gösterdiğini vurgulamıştır. Nanoakışkan adlandırmasını ilk kullanan Choi [2] olmasına rağmen, bu adı kullanmadan nanotanecek katkılı sıvı süspansiyonların ısı iletkenlik ve viskoziteleri ile ilgili ilk deneysel çalışmayı Masuda ve ark. [3] gerçekleştirmiştir. Elde edilen ilk sonuçlar, düşük ısı iletkenlik değerlerine sahip geleneksel ısı transferi akışkanlarına (su, etilen glikol, mineral yağ, vb.) daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip seramik, metal ve benzeri taneciklerin ilave edilmesiyle oluşturulan nanoakışkanların, yeni nesil ısı transfer akışkanı olarak kullanılabilme potansiyeli taşıdığı yönünde olmuştur. Choi ve ark.'nın [4, 5] ısı iletkenlikte deneysel olarak gözlediği yüksek artışlara sahip sonuçlar, araştırmacıları nanoakışkanlar konusunda teorik ve deneysel yeni çalışmalara teşvik etmiş ve geçen on yılı aşkın bir sürede nanoakışkanlara olan ilgi sürekli artmıştır [6]. Yakın tarihli derlemelere bakıldığında nanoakışkanların; hazırlanma yöntemleri ve karşılaşılan zorluklar ele alınmıştır [7, 8]. Nanoakışkanların; mikro boyutlu tüplerde ve kanallarda [9], ısı borularında [10], güneş enerjisi sistemlerinde [11] ve ısı değiştiricilerinde [12], kullanımlarıyla ilgili derleme çalışmalar literatürde yer almaktadır. Dalkılıç ve ark. [13] zorlanmış, Haddad ve ark. [14] ise doğal taşınım uygulamalarında nanoakışkan kullanılmasıyla ilgili çalışmaları gözden geçirmişlerdir. Ayrıca literatürde, nanoakışkanların faz değişim malzemesi [15] ve manyetik akışkan [16] olarak kullanımı ile ilgili derleme çalışmalar da bulunmaktadır. Son dönemde yayınlanan iki derleme çalışmada ise nanoakışkanların viskozite [17, 18] ve ısı [18] özellikleri incelenmiştir. On yılı aşkın bir süredir devam eden çalışmalar sonucunda, literatürde konuyla ilgili birçok çelişkili sonuç ve yorumlar yer almaktadır. Bunlardan birisi tanecik boyutunun nanoakışkanın ısı transfer performansına olan etkisidir. Nanoakışkanlar ile ilgili yayınlanan 100'den fazla derleme içinde tanecik boyutu etkisini doğrudan ele alan çalışma bulunmamaktadır. Bunun nedeni, tanecik boyutunun nanoakışkanların termofiziksel özelliklerine olan etkisini sistematik olarak inceleyen çalışma sayısının yetersizliğidir. Çalışmaların bir kısmında, tanecik boyutunun sadece ısı iletkenlik [19-27] veya sadece viskozite [28-34] değerine etkisi incelenmiştir. Her iki özelliği birlikte inceleyen çalışma sayısı sınırlıdır [35-38]. Bu özellikleri incelemeyen, tanecik boyutu büyüklüğünün sadece sistemin ısı performansına etkisini inceleyen çalışmalar da mevcuttur [39, 40]. Isıl iletkenlik açısından bakıldığında, farklı tip nanoakışkanlar için küçülen tanecik boyutu ile iletkenlikteki artış oranının yükseldiğini [19-23] veya düştüğünü [24-27] ifade eden çalışmalar bulunmaktadır. Viskozite ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ise, küçülen tanecik boyutu ile viskozitedeki artış oranının yükseldiğini [28-31] veya azaldığını [32, 34] belirten çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca, tanecik boyutunun viskozite

artış oranına sistematik bir etkisinin olmadığı vurgulayan çalışmaya da rastlanmaktadır [33]. Tanecik boyutunun hem viskozite hem de ısı iletkenliğe etkisini inceleyen çalışmalara göz attığımızda, küçülen tanecik boyutu ile birlikte; ısı iletkenlik ve viskozite artış oranlarının yükseldiğini [35, 36], iletkenlik artış oranının azaldığını ve viskozitedeki artış oranının yükseldiğini [37], iletkenlik artış oranının yükseldiğini ve viskozitedeki artış oranının azaldığını [38], belirten çalışmalar görülmektedir. Her iki özelliği birlikte inceleyen sınırlı sayıda çalışmadan görüldüğü üzere, sonuçlar birbirleri ile çelişmektedir ve bu konuda daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaca bağlı olarak, çalışmamızda 10 nm ve 30 nm tanecik boyutuna sahip, iki farklı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanın ısı iletkenlik ve viskozite değerleri deneysel olarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde yer alan efektif ısı iletkenlik ve efektif viskozite modelleri ile karşılaştırılmıştır.

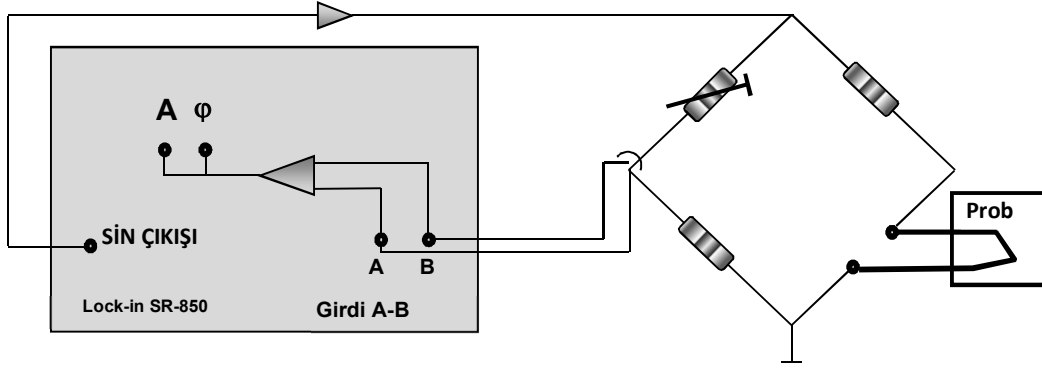
## 2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1 Numuneler (Samples)

10 nm ve 30 nm tanecik boyutuna sahip olmak üzere iki farklı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkan NanoAmor (A.B.D.) firmasından temin edilmiştir. Numuneler, kütlece % 20 (hacimce % 6,33) tanecik konsantrasyonuna sahip olup, saf su kullanılarak hacimce % 1, 2 ve 3' e seyreltilmiştir. Her bir numune 50 ml miktarında üretilmiş ve 2 dakika boyunca 70 W gücünde ses dalgaları yardımıyla karıştırılmıştır [34, 41].

### 2.2 $3\omega$ Yöntemi ( $3\omega$ Method)

Numunelerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde  $3\omega$  yöntemi kullanılmıştır.  $3\omega$  yöntemi ilk olarak Cahill [42] tarafından 1990'da sunulmuş ve nanoteknolojideki ilerlemeye paralel olarak ısı özelliklerinin karakterizasyonu açısından önem kazanmıştır. Özellikle mikron ölçüsünde kalınlığa sahip ince filmlerde ve katı numunelerde hassas sonuçlar alınabilmesi bu yöntemle olan ilgiyi arttırmıştır. Bu ilgi, nanoakışkanların ısı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, araştırmacıları  $3\omega$  yönteminin süspansiyonlarda uygulanmasına yöneltmiştir. Nanoakışkan konusunda, çok tartışılan başlıklardan biri de ısı iletkenlik ölçüm sonuçlarıdır. Literatürdeki sonuçların çok geniş bir aralıkta yer alması ve aynı numuneler için farklı ölçüm yöntemleriyle, birbiriyle çelişen sonuçlar verilmesi ölçüm yöntemlerinde arayışlara yol açmıştır [43]. Eş zamanlarda, farklı gruplar [44-46],  $3\omega$  yöntemi prensibine dayanarak fakat birbirlerinden farklı modeller kullanarak geliştirdikleri deneysel sistemler ile nanoakışkanlar için ısı iletkenlik, ısı yayılım ve özgül ısı sonuçları yayınlamışlardır.



Şekil 1.  $3\omega$  yöntemi şematik gösterimi (Schematic of  $3\omega$  method) [47]

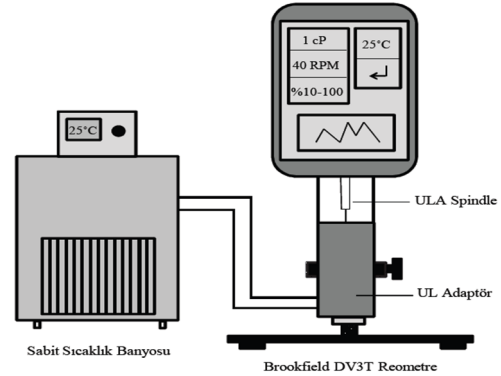
Bu çalışma kapsamında kullandığımız  $3\omega$  yöntemi [45], alternatif akım uyarımlı sıcak tel ve kilitlemeli yükselticinin birlikte kullanılarak, üçüncü harmoniğin [47] tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Genel olarak, aynı anda hem ısı kaynağı hem de ısı sensör olarak kullanılan metal bir tel, numune içine yerleştirilir. Ardından tele  $\omega$  frekansında bir alternatif akım uygulanır, oluşan ısı numuneyi periyodik olarak ısıtır ve telin direncinde  $2\omega$  frekansında salınım üretir. Salınan direnç bileşeni, ısıtıcı üzerinde üçüncü harmonik ( $3\omega$ ) gerilim bileşeni oluşturmak için sürüş akımı ile birleştirilir.  $3\omega$  geriliminin genlik ve frekans bağıllığı sayesinde, numunenin ısı özellikleri elde edilebilir. Yöntem ile ilgili geniş bilgi daha önceki çalışmalarda [45, 48-50] detaylı olarak verildiği için burada kısaca bahsedilmiştir. Sistemin şematik görünüşü Şekil 1'de verilmiştir. Sistem; prob olarak adlandırılan  $40\ \mu\text{m}$  çapında  $19\ \text{mm}$  uzunluğunda nikel tel, Wheatstone köprüsü ve kilitlemeli yükselticiden oluşmaktadır. Sürüş akımı, ısıtıcı tele kilitlemeli yükselticinin sinüzoidal çıkışından gönderilir.

Numune içindeki telin istenilen frekans ve harmonikteki genlik ve faz değerleri, kilitlemeli yükselticinin A ve B girişlerinden sisteme aktararak elde edilebilir. Bu yöntemin uygulamasında çok az miktarlarda ( $>25\ \mu\text{l}$ ) numune yeterli olmakla birlikte, çalışmamızda yaklaşık  $16\ \text{ml}$ 'lik numuneler kullanılmıştır.

Yöntemin süspansiyonlara uygulanmasında, katılara uygulanmasına göre bir avantajı bulunmaktadır. Katı numunelerdeki uygulamada, ölçüm için kullanılan tel, ölçümü yapılacak malzeme içine, malzeme eriyik halinde yerleştirilmektedir ve yeni bir numune ölçümünde kullanılamamaktadır. Süspansiyonların ölçümünde ise, aynı tel gerekli temizliklerin yapılması koşuluyla farklı numunelerde defalarca kullanılabilir. Bu da, karşılaştırmalı veya bağıl ölçüm yapılması durumunda, ölçüm hassasiyetini ve doğruluğunu arttırmaktadır. Yöntemin kalibrasyonu su, etanol, metanol ve etilen glikol kullanılarak yapılmıştır. Isıl iletkenlik değerleri  $\pm\% 2$  hata ile belirlenmiştir. Kurulan sistemin, ısı iletkenlik ölçüm sonuçlarındaki tekrarlanabilirliği  $\% 0,3$  hassasiyeti ise  $\% 0,1$ 'dir [45].

### 2.3 Viskozite Ölçümü (Viscosity Measurement)

Viskozite ölçümleri, Brookfield marka DV3T model reometre (Brookfield Eng. Lab.) ile  $5-50^\circ\text{C}$  sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Cihaz  $15-6.000.000\ \text{cP}$  aralığında ölçüm yapabilmektedir.  $15\ \text{cP}$ 'den daha düşük viskozite değerlerinin ölçülebilmesi amacıyla, cihaza UL adaptör ve ULA spindle bağlanmıştır. UL adaptör numune kapasitesi  $16\ \text{ml}$  olup, buradaki numunenin sıcaklığı sabit sıcaklık banyosu (Polyscience M9712,  $0,01^\circ\text{C}$  hassasiyet) ile  $5-50^\circ\text{C}$  arasındaki değerlere ayarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Brookfield DV3T Reometre ile viskozite ölçüm şeması (Schematic of viscosity measurement with Brookfield DV3T Rheometer)

Viskozite ölçüm sonuçlarının güvenilir olması amacıyla uygulanan tork değerinin  $\% 10-100$  aralığında kalması sağlanmıştır. Her bir numune, tüm sıcaklık aralığında, üç farklı günde birer defa test edilmiş ve ortalama değerler alınmıştır. Tekrarlı ölçüm sonuçlarında, viskozite değerlerindeki standart sapma maksimum  $\% 5$  olarak bulunmuştur.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

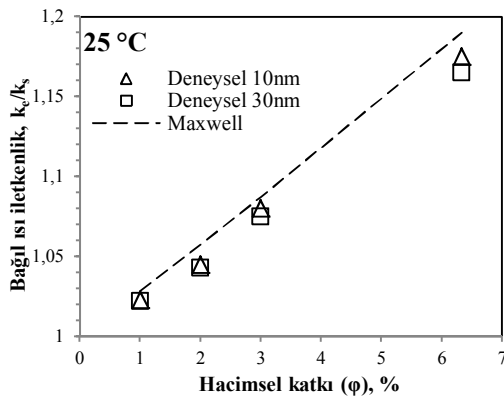
### 3.1 Isıl İletkenlik (Thermal Conductivity)

Hacimce  $\% 1, 2, 3$  ve  $6,33$  katkı oranlarında ve  $10$  ile  $30\ \text{nm}$  boyutundaki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tanecik içeren su bazlı nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri  $3\omega$  yöntemi

ile 25 °C’ de ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar, nanoakışkanın efektif ısıl iletkenliğinin ( $k_e$ ), baz akışkanın ısıl iletkenliğine ( $k_s$ ) oranı ( $k_e/k_s$ ) biçiminde, Şekil 3’te gösterilmiştir. Tanecik katkı oranına bağlı olarak her iki numunede de ısıl iletkenlik artışı söz konusudur. En düşük tanecik katkı oranında artış oranı %2 iken, en yüksek katkı oranında bu artış %17’ler mertebesindedir. Sonuçları tanecik boyutu etkisi açısından değerlendirdiğimizde ise, % 1 ve % 2 hacimsel katkı oranlarında farklı tanecik boyutunun ısıl iletkenlik değerine bir etkisi görülmemektedir. % 3 ve % 6,33 hacimsel katkı oranlarında, 10 nm’ lik numunenin 30 nm’ lik numuneye göre artış oranının, sırasıyla % 0,5 ve % 0,9 daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. % 1’ den daha düşük olan bu farklı deneysel şartlar göz önüne alındığında çok anlamlı değildir. Sonuçlarımızdan, ısıl iletkenliğin tanecik boyutu ile ilişkili olmadığı söylenebilir. Bu sonucumuz, küçülen tanecik boyutu ile iletkenlikteki artış oranının yükseldiğini [19-23] veya düştüğünü [24-27] belirten çalışmalar ile çelişmektedir. Daha önceki çalışmalarda da [19-27] belirtildiği gibi literatürde yer alan deneysel verilerde belirgin bir tutarsızlık söz konusudur. Çok geniş aralığa dağılmış olan deneysel sonuçlar, efektif ısıl iletkenlik ile ilgili birçok yeni teorik modeli de beraberinde getirmiştir. Bu modeller ile ilgili daha geniş bilgi literatürde bulunmaktadır [51]. Katı sıvı karışımlar için önerilen efektif ısıl iletkenlik modellerinin bir bölümü Maxwell [52] modeline dayanmaktadır.

$$k_e = k_s + 3\phi \frac{k_p - k_s}{2k_s + k_p - \phi(k_p - k_s)} k_s \quad (1)$$

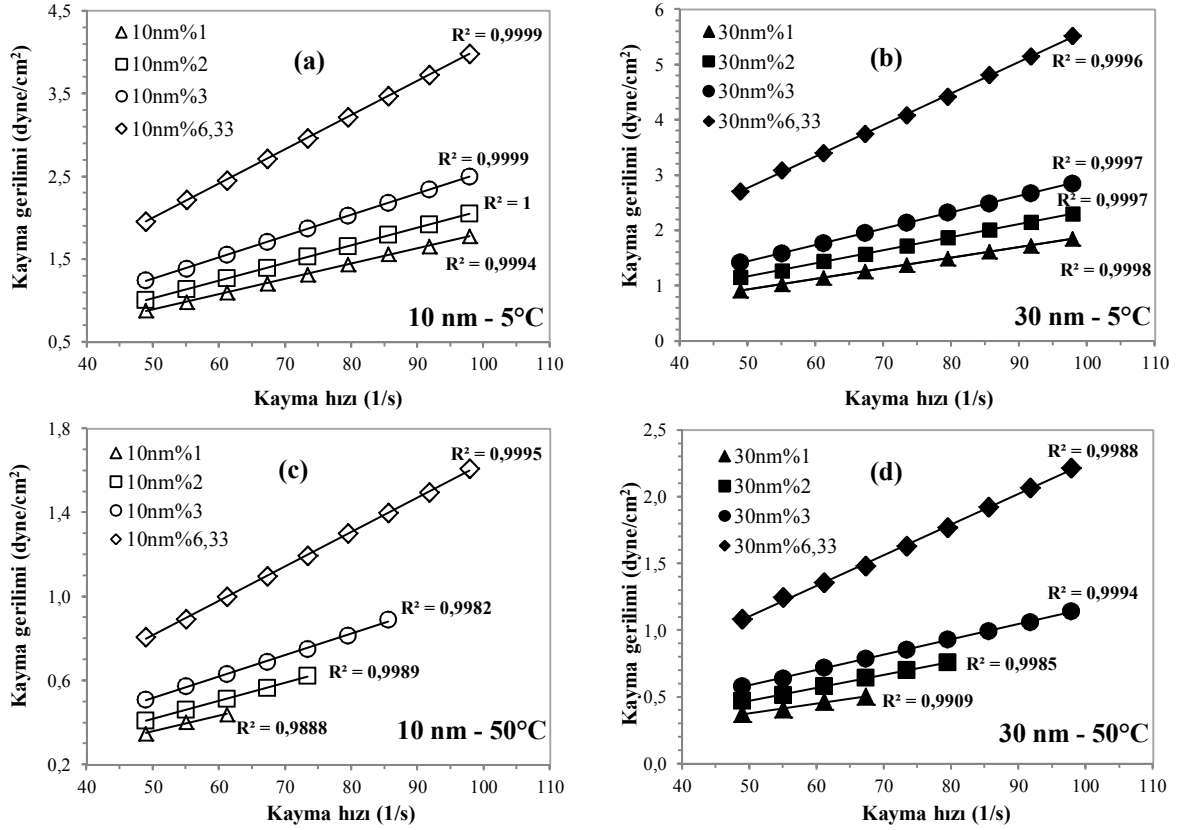
Maxwell, düşük hacimsel katkı oranlarında, katı tanecik ( $k_p$ ) ile baz akışkanın ( $k_s$ ) ısıl iletkenliklerini ve tanecik katkı oranını ( $\phi$ ) göz önüne alan basit bir modeldir. Şekil 3’te görüldüğü gibi deneysel iletkenlik sonuçlarımız, % 1 katkı oranında % 0,5, % 6,33 katkı oranında ise % 2,2 fark ile Maxwell modeline uygunluk göstermektedir.



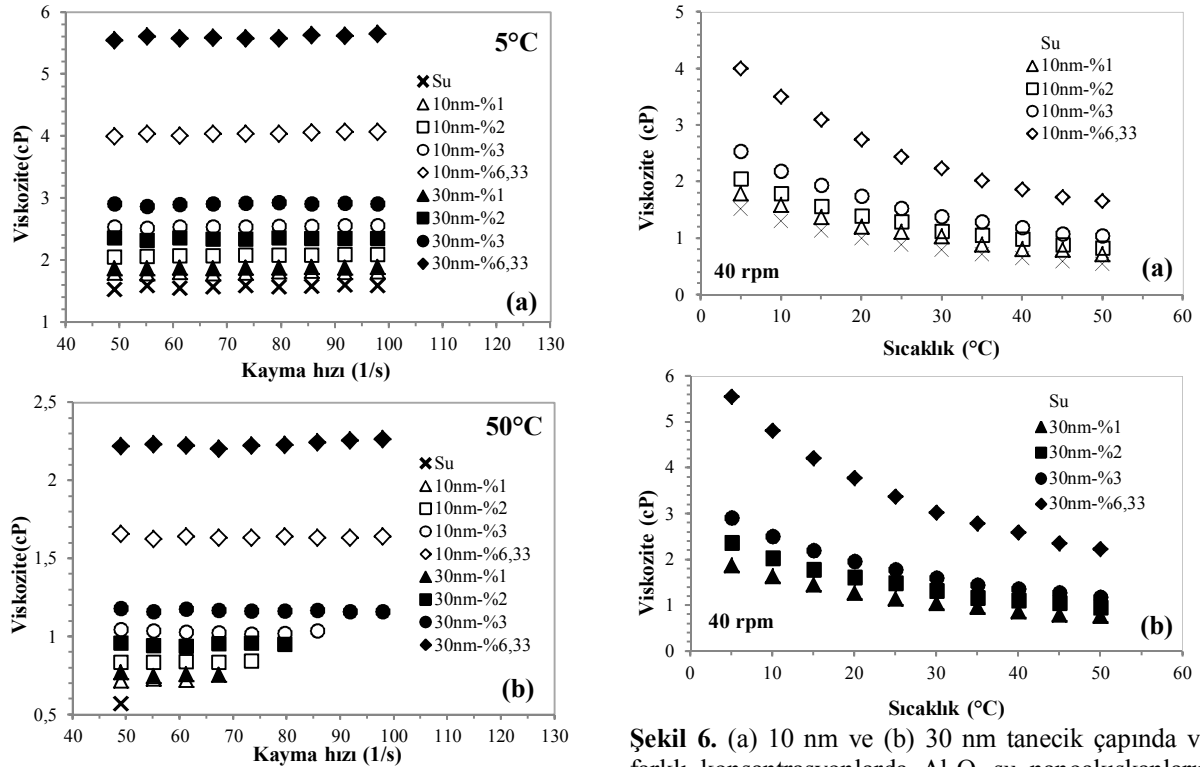
**Şekil 3.** 10 nm ve 30 nm tanecik boyutları için 25 °C’ de deneysel ısıl iletkenlik oranı ( $k_e/k_s$ ) sonuçlarının Maxwell modeli ile karşılaştırılması (Comparison of the experimental thermal conductivity ratio ( $k_e/k_s$ ) results with the Maxwell model at 25 °C for the particle size of 10 nm and 30 nm)

### 3.2 Viskozite (Viscosity)

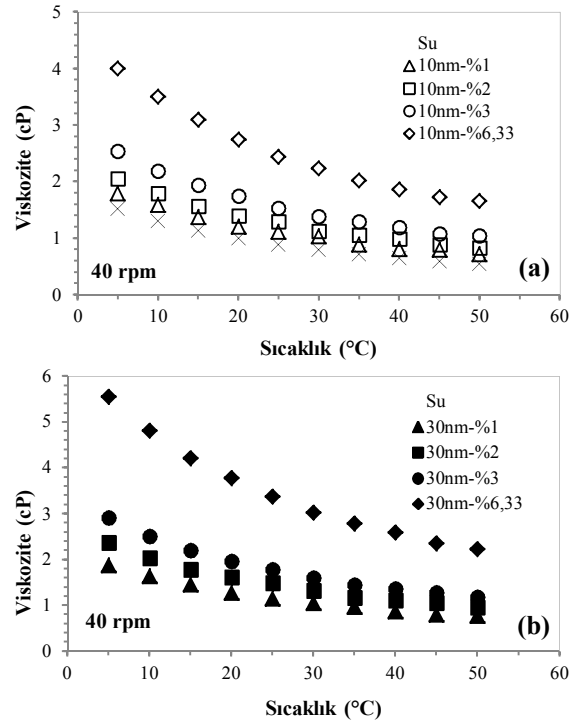
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkan numunelerin viskoziteleri 5 ve 50°C sıcaklık aralığında ölçülmüştür. En düşük (5 °C) ve en yüksek (50 °C) sıcaklıklara ait kayma hızı ve kayma gerilimi değerleri Şekil 4’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her iki sıcaklıkta ve tanecik boyutunda tüm numuneler için kayma hızı ile kayma gerilimi arasında doğrusal bir ilişki ( $0,9888 \leq R^2 \leq 1,0000$ ) bulunmaktadır ve ölçümü yapılan tüm numuneler Newton tipi akışkan davranışı göstermektedir. Numunelere ait kayma hızı ve viskozite değerleri en düşük (5 °C) ve en yüksek (50 °C) sıcaklıklar için Şekil 5’te verilmiştir. Her iki sıcaklıkta da, tanecik boyutu ve konsantrasyonu açısından benzer bir ilişki vardır. Düşük katkı oranında (% 1), 10 ve 30 nm’ lik tanecik boyutuna sahip nanoakışkanların viskozite değerleri suya göre birbirlerine yakın artış oranları göstermektedir ve bu oranlar 5 °C için sırasıyla, % 18 ve % 22, 50°C için ise sırasıyla, % 26 ve % 35’tir. Aynı şekilden, yüksek katkı oranını (% 6,33) incelediğimizde 10 ve 30 nm tanecik boyutuna sahip numunelerde 5 °C için sırasıyla, % 161 ve % 263, 50 °C için ise sırasıyla, % 191 ve % 289’luk artışlar bulunmuştur. Grafikten görüldüğü üzere, 10 nm’lik numuneye 30 nm’lik numune arasındaki viskozitedeki artış oranı farkı, artan tanecik katkı oranı ile birlikte, daha belirgin hale gelmektedir. Bölüm 2.3’te belirtildiği gibi viskozite verilerinin güvenilirliği, uygulanan tork değerinin % 10-100 aralığında kalması ile mümkün olmaktadır. Numunenin ölçülen viskozitesinin yaklaşık 1 cP veya altında bir değere düşmesi durumunda (Şekil 5-b) uygulanan tork değeri kayma hızına bağlı olarak % 10’un altında kalmaktadır ve alınan güvenilir veri sayısı azalmaktadır. Sonuçlarımızı, tanecik boyutunun viskozitedeki artış oranına etkisi açısından değerlendirdiğimizde, azalan tanecik boyutu ile birlikte viskozite değerindeki artış oranı düşmektedir. Elde ettiğimiz bu sonuç, [32, 35-37] nolu çalışmalar ile uyumlu olup, [28-31, 38] nolu referanslar ile çelişmektedir. Şekil 6.’ da nanoakışkan numunelerin ve baz akışkan suyun 40 rpm dönüş hızındaki viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmektedir. Tüm numunelerin viskoziteleri sıcaklıkla birlikte azalmaktadır. Nanoakışkanlar ile ilgili literatürde, pek çok çelişkili sonuç ve yorum yer almasına rağmen, üzerinde uzlaşılan ender sonuçlardan birisi nanoakışkanların efektif viskozitesinin klasik modeller ile açıklanamadığıdır [17, 53]. Nanoakışkanların ortaya çıkması ile birlikte klasik modeller ile açıklanamayan viskozite artışlarının, yeni model ve korelasyonlar ile açıklanabilmesi için araştırmacıların farklı önerileri olmuştur. Bu konudaki geniş bilgi [17, 53] nolu referanslarda ayrıntıları ile bulunmaktadır. Çalışmamızda, klasik bir model olan Einstein [54] ve daha yeni dönemlerde elde edilmiş ve deneysel sonuçlarımız ile belli bir uyum gösterdiği için seçtiğimiz üç adet model [32, 55, 56] ele alınmış ve Şekil 7’de değerlendirilmiştir.



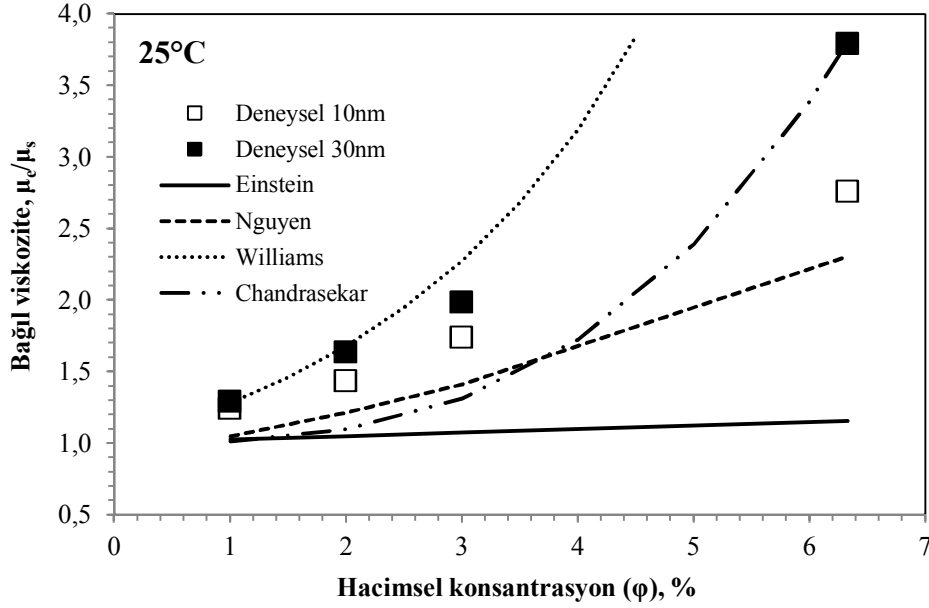
Şekil 4. Farklı konsantrasyonlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanların kayma hızı ile kayma gerilimi değişimi (a) 5 °C-10 nm, (b) 5 °C-30 nm, (c) 50 °C-10 nm, (d) 50 °C-30 nm (Shear rate vs. shear stress for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids at various concentrations (a) 5 °C-10 nm, (b) 5 °C-30 nm, (c) 50 °C-10 nm, (d) 50 °C-30 nm)



Şekil 5. (a) 5 °C ve (b) 50 °C 'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarının kayma hızı ile viskozite değişimi (Shear rate vs. viscosity for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids at (a) 5 °C and (b) 50 °C)



Şekil 6. (a) 10 nm ve (b) 30 nm tanecik çapında ve farklı konsantrasyonlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanların 40 rpm hızındaki sıcaklık ile viskozite değişimi (Temperature vs. viscosity for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids at 40 rpm and various concentrations for (a) 10 nm and (b) 30 nm)



**Şekil 7.** 25 °C’ de deneysel viskozite sonuçlarının çeşitli model ve korelasyonlar ile karşılaştırılması (Comparison of the experimental viscosity results with different models and correlations at 25 °C)

Tanecik katkılı akışkanların efektif viskozitesinin tahmin edilebilmesi amacıyla kullanılan ve klasik modeller arasında öncü sayılabilecek Einstein [54] modeli, düşük hacimsel katkı oranına (<% 5) ve küresel taneciklere sahip akışkanların bağıl viskozitesi için önerilse de, nanoakışkanlar söz konusu olduğunda yetersiz kalmaktadır.

$$\frac{\mu_e}{\mu_s} = (1 + 2,5\phi) \quad (2)$$

$\mu_e$  nanoakışkanın efektif viskozitesini,  $\mu_s$  baz akışkanın viskozitesini, ve  $\phi$  tanecik hacimsel katkı oranını belirtmektedir.

Nguyen ve ark. [32], 47 nm tanecik boyutuna sahip  $Al_2O_3$ -su nanoakışkan ile 22 °C sıcaklıkta ve % 1 - % 13 hacimsel katkı oranında yapılan deneysel ölçümler sonucunda aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir.

$$\frac{\mu_e}{\mu_s} = 0,904e^{(0,148\phi)} \quad (3)$$

Williams ve ark. [55] ise, 46 nm tanecik boyutuna sahip  $Al_2O_3$ -su nanoakışkan için % 1,5 - % 6 hacimsel katkı oranında yapılan deneysel ölçümler sonucunda aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir.

$$\frac{\mu_e}{\mu_s} = e^{[4,91\phi/(0,2092-\phi)]} \quad (4)$$

Chandrasekar ve ark. [56], 43 nm tanecik boyutuna sahip  $Al_2O_3$ -su nanoakışkan için % 1 - % 5 hacimsel katkı oranında yapılan deneysel ölçümler sonucunda aşağıdaki ifadeyi elde etmişlerdir.

$$\frac{\mu_e}{\mu_s} = 1 + b \left( \frac{\phi}{1 - \phi} \right)^n \quad b=5300 \text{ ve } n=2,8 \quad (5)$$

Bu model, ilk olarak Noni [57] tarafından, Fullman’ın [58] ortalama serbest yol eşitliğinden yararlanarak, sıvı ortam içerisinde yer alan katı taneciklerden oluşan süspansiyonların bağıl viskozitelerinin tahmini için önerilmiştir. Noni [57], 1,20  $\mu m$  boyutlu  $Al_2O_3$  tanecikler için “b” ve “n” katsayılarını sırasıyla, 1631 ve 2,8 olarak hesaplamıştır. Chandrasekar ve ark. [56] ise, nanometre boyutlu  $Al_2O_3$  tanecik için, “b” katsayısını, sıvı faz ve taneciklerin kompozisyonu ve özelliklerine bağlı olarak değişen elektromanyetik etki ve taneciğin özgül yüzey alanı, yoğunluğu ve şeklini dikkate alan mekanik-geometrik etkileri göz önüne alarak 5300 olarak önermişlerdir.

Şekil 7’de görüldüğü üzere, 30 nm’lik tanecik boyutuna sahip nanoakışkan ile elde ettiğimiz deneysel sonuçlar, % 1 ve % 2 katkı oranlarında Williams ve ark.’nın [55] önerdiği 4 nolu eşitlik ile uyumludur, ancak katkı oranı arttıkça, modelin bağıl viskozite tahminleri, deneysel sonuçlardan daha yüksek değerlere sahip olmaktadır. Chandrasekar ve ark.’nın [56] önerdiği korelasyon ise, düşük katkı oranlarında, deneysel sonuçlarımızdan daha düşük değerler verirken, % 6,33’lük katkı oranında ise, deneysel sonucumuzla uyumludur. Belirtildiği gibi, Einstein modeli [54], nanoakışkanların viskozitelerindeki artış oranlarının tahmin edilmesinde sağlıklı sonuçlar vermektedir. Einstein modeli ile % 6,33 katkı oranında viskozitedeki artış yaklaşık % 15 olarak tahmin edilirken, % 1 katkı oranındaki deneysel sonuçlar bile, her iki tanecik boyutundaki nanoakışkan için de % 25’den fazladır. Nguyen’in [32] korelasyonu ise düşük katkı oranlarında 10 nm’lik tanecik boyutuna sahip

nanoakışkan ile elde ettiğimiz deneysel sonuçlarımızla yaklaşık benzer bir artış eğilimi göstermekte, fakat hesaplanan değerler deneysel sonuçlarımızın bir miktar altında yer almaktadır. Daha önceki çalışmalarda da belirtildiği üzere, nanoakışkanların viskozitelerindeki artış miktarını belirleyebilecek genel bir denklem henüz mevcut değildir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yeni nesil ısı transfer akışkanı olarak nitelendirilen nanoakışkanlara olan ilgi güncelliğini korumaktadır. On yılı aşkın bir süredir devam eden çalışmalar sonucunda, literatürde konuyla ilgili birçok çelişkili sonuç ve yorum yer almaktadır. Bunlardan birisi tanecik boyutunun nanoakışkanın ısı transfer performansına olan etkisidir. Literatürde, tanecik boyutunun nanoakışkanların ısı iletkenlik ve viskozite özelliklerine olan etkisini birlikte inceleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, 10 nm ve 30 nm tanecik boyutuna sahip, iki farklı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanın, hacimce % 1, 2, 3 ve 6,33 katkı oranlarında, ısı iletkenlik ve viskozite değerleri deneysel olarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde yer alan efektif ısı iletkenlik ve efektif viskozite modelleri ile karşılaştırılmıştır. Nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri  $3\omega$  yöntemi ile 25 °C’ de ölçülmüş ve belirtilen tanecik katkı oranlarında ısı iletkenlik artış oranı % 2 ile % 17 arasında bulunmuştur. 10 ve 30 nm’lik numuneler karşılaştırıldığında, ısı iletkenlik artış oranları arasındaki fark, en yüksek katkı oranında bile, % 1’ den daha düşük olarak bulunmuştur. Isıl iletkenliğin, tanecik boyutu ile ilişkili olmadığı ve deneysel sonuçlarımızın klasik efektif ısı iletkenlik modellerinden biri olan Maxwell ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Nanoakışkanların reolojik özellikleri 5 ve 50 °C sıcaklık aralığında incelenmiştir. Tüm numuneler için, kayma hızı ile kayma gerilimi arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu ve Newton tipi akışkan davranışı gösterdikleri sonucuna varılmıştır. Düşük katkı oranında (% 1), 10 ve 30 nm’ lik tanecik boyutuna sahip nanoakışkanların viskozite değerleri, suya göre, birbirlerine yakın artış oranları gösterirken, yüksek katkı oranında (% 6,33) bu farkın büyüdüğü ve tanecik boyutundaki artış ile birlikte viskozitedeki artış oranının yükseldiği görülmüştür. Einstein’ın efektif viskozite modeli ile yapılan hesaplamalar, deneysel sonuçlarımız ile karşılaştırıldığında çok düşük değerlere sahiptir. Ayrıca, tüm numunelerin viskozite değerleri, sıcaklık artışına bağlı olarak, baz akışkan suya benzer biçimde azalmaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü tarafından 2013. KB. FEN. 016 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

#### SİMGELER (NOMENCLATURE)

$k_e$	Efektif ısı iletkenlik (W/mK)
$k_s$	Baz akışkan ısı iletkenliği (W/mK)
$k_p$	Katı tanecik ısı iletkenliği (W/mK)
$\phi$	Hacimsel konsantrasyon (%)
$\mu_r$	Relatif viskozite
$\mu_{nf}$	Nanoakışkan viskozitesi (cP)
$\mu_{bf}$	Baz akışkan viskozitesi (cP)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rudyak, Ya. V., “Viscosity of nanofluids. Why it is not described by the classical theories”, **Advances in Nanoparticles**, Cilt 2, 266-279, 2013.
2. Choi, S. U. S., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles.", **ASME-Publications**, Cilt 231, 99-106, 1995.
3. Masuda, H., Ebata, A., Teramea, K. ve Hishinuma, N., “Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersions of  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , and  $TiO_2$  ultrafine particles)”, **Netsu Bussei**, 4, 227-233, 1993.
4. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E. ve Grulke, E. A., “Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions”, **Applied Physics Letters**, Cilt 79, No 14, 2252-2254, 2001.
5. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W. ve Thompson, L. J., “Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles”, **Applied Physics Letters**, Cilt 78, No 6, 718-720, 2001.
6. Buschmann, M. H., “Nanofluids in thermosyphons and heat pipes: Overview of recent experiments and modelling approaches”, **International Journal of Thermal Sciences**, Cilt 72, 1-17, 2013.
7. Sidik, N. A. C., Mohammed, H. A., Alawi, O. A. ve Samion, S., “A review on preparation methods and challenges of nanofluids”, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Cilt 54, 115-125, 2014.
8. Haddad, Z., Abid, C., Oztop, H. F. ve Mataoui, A., “A review on how the researchers prepare their nanofluids”, **International Journal of Thermal Sciences**, Cilt 76, 168-189, 2014.
9. Salman, B. H., Mohammed, H. A., Munisamy, K. M. ve Kherbeet, A. S., “Characteristics of heat transfer and fluid flow in microtube and microchannel using conventional fluids and nanofluids: A review”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 28, 848-880, 2013.
10. Sureshkumar, R., Mohideen, S. T. ve Nethaji, N., “Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review”, **Renewable and**

- Sustainable Energy Reviews**, Cilt 20, 397-410, 2013.
11. Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I. ve Wongwises, S., "A review of the applications of nanofluids in solar energy", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 57, No 2, 582-594, 2013.
  12. Huminic, G. ve Huminic, A., "Application of nanofluids in heat exchangers: a review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 16, No 8, 5625-5638, 2012.
  13. Dalkilic, A. S., Kayaci, N., Celen, A., Tabatabaei, M., Yildiz, O., Daungthongsuk, W. ve Wongwises, S., "Forced convective heat transfer of nanofluids-A review of the recent literature", **Current Nanoscience**, Cilt 8, No 6, 949-969, 2012.
  14. Haddad, Z., Oztop, H. F., Abu-Nada, E. ve Mataoui, A., "A review on natural convective heat transfer of nanofluids", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 16, No 7, 5363-5378, 2012.
  15. Khodadadi, J. M., Fan, L. ve Babaei, H., "Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: a review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 24, 418-444, 2013.
  16. Nkurikiyimfura, I., Wang, Y. ve Pan, Z., "Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids-A review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 21, 548-561, 2013.
  17. Elçioğlu, E. B., Yazıcıoğlu, A. G. ve Kakaç, S., "Nanoakışkan viskozitesinin karşılaştırmalı değerlendirmesi", **Journal Of Thermal Science & Technology**, Cilt 34, No 1, 137-151, 2014.
  18. Ilyas, S. U., Pandyala, R., Shuib, A. S. ve Marneni, N., "A review on the viscous and thermal transport properties of nanofluids", **Advanced Materials Research**, Cilt 917, 18-27, 2014.
  19. Lee, J. H., Lee S. H. ve Jang S. P., "Do temperature and nanoparticle size affect the thermal conductivity of alumina nanofluids?", **Applied Physics Letters**, Cilt 104, No 16, 161908, 2014.
  20. Kwek, D., Crivoi, A. ve Duan, F., "Effects of temperature and particle size on the thermal property measurements of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids", **Journal of Chemical & Engineering Data**, Cilt 55, No 12, 5690-5695, 2010.
  21. Beydokhti, A. K., Heris, S. Z., Moghadam M. N., Niasar S. ve Hamidi A., "Experimental investigation of parameters affecting nanofluid effective thermal conductivity", **Chemical Engineering Communications**, Cilt 201, 593-611, 2014.
  22. Kim, S. H., Choi, S. R. ve Kim, D., "Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation", **Journal of Heat Transfer**, Cilt 129, No 3, 298-307, 2007.
  23. Li, C. H. ve Peterson, G. P., "The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids", **Journal of Applied Physics**, Cilt 101, No 4, 044312, 2007.
  24. El-Brollosy, T. A. ve Saber, O., "Non-intrusive method for thermal properties measurement of nanofluids", **Experimental Thermal and Fluid Science**, Cilt 44, 498-503, 2013.
  25. Warriar, P. ve Teja, A., "Effect of particle size on the thermal conductivity of nanofluids containing metallic nanoparticles", **Nanoscale Research Letters**, Cilt 6, No 1, 1-6, 2011.
  26. Beck, M. P., Yuan, Y., Warriar, P. ve Teja, A. S., "The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids", **Journal of Nanoparticle Research**, Cilt 11, No 5, 1129-1136, 2009.
  27. Chen, G., Yu, W., Singh, D., Cookson, D. ve Routbort, J., "Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids", **Journal of Nanoparticle Research**, Cilt 10, No 7, 1109-1114, 2008.
  28. Shanker, N. S., Reddy, M. C. S. ve Rao, V. B., "On prediction of viscosity of nanofluids for low volume fractions of nanoparticles", **International Journal of Engineering Research and Technology**, Cilt 1, No 8, 1-10, 2012.
  29. Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Legido, J. L. ve Piñeiro, M. M., "CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity", **Fluid Phase Equilibria**, Cilt 300, No 1, 188-196, 2011.
  30. Namburu, P. K., Kulkarni, D. P., Dandekar, A. ve Das, D. K., "Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids", **Micro and Nano Letters**, Cilt 2, 67-71, 2007.
  31. Chevalier, J., Tillement, O. ve Ayela, F., "Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels", **Applied Physics Letters**, Cilt 9, No 1, 233103, 2007.
  32. Nguyen, C. T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S. ve Angue Mintsa, H., "Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid-hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable", **International Journal of Thermal Sciences**, Cilt 47, No 2, 103-111, 2008.
  33. Prasher, R., Song, D., Wang, J. ve Phelan, P., "Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications", **Applied Physics Letters**, Cilt 89, No 13, 133108, 2006.
  34. Elçioğlu, E.B., **Experimental and theoretical investigations on alumina-water nanofluid viscosity with statistical analysis**, Master Tezi,



- Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
35. Timofeeva, E. V., Smith, D. S., Yu, W., France, D. M., Singh, D. ve Routbort, J. L., "Particle size and interfacial effects on thermo-physical and heat transfer characteristics of water-based  $\alpha$ -SiC nanofluids", **Nanotechnology**, Cilt 21, No 21, 215703, 2010.
  36. Anoop, K. B., Sundararajan, T. ve Das, S. K., "Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 52, No 9, 2189-2195, 2009.
  37. He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D. ve Lu, H., "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 50, No 11, 2272-2281, 2007.
  38. Lu, W. Q. ve Fan, Q. M., "Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method", **Engineering Analysis with Boundary Elements**, Cilt 32, No 4, 282-289, 2008.
  39. Davarnejad, R., Barati, S. ve Kooshki, M., "CFD simulation of the effect of particle size on the nanofluids convective heat transfer in the developed region in a circular tube", **SpringerPlus**, Cilt 2, No 1, 1-6, 2013.
  40. Ji, Y., Ma, H., Su, F., ve Wang, G., "Particle size effect on heat transfer performance in an oscillating heat pipe", **Experimental Thermal and Fluid Science**, Cilt 35, No 4, 724-727, 2011.
  41. Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Hadjov, K., Fudym, O. ve Tavman, S., "Experimental study on thermal conductivity and viscosity of water-based nanofluids", **Heat Transfer Research**, Cilt 41, No 3, 339-351, 2010.
  42. Cahill, D. G., "Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the  $3\omega$  method", **Review of Scientific Instruments**, Cilt 61, No 2, 802-808, 1990.
  43. Paul G., Chopkar M., Manna I. ve Das P. K., "Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 14, 1913-1924, 2010.
  44. Wang, Z. L., Tang, D. W., Liu, S., Zheng, X. H. ve Araki, N., "Thermal-conductivity and thermal-diffusivity measurements of nanofluids by  $3\omega$  method and mechanism analysis of heat transport", **International Journal of Thermophysics**, Cilt 28, No 4, 1255-1268, 2007.
  45. Turgut, A., Sauter, C., Chirtoc, M., Henry, J. F., Tavman, S., Tavman, I. ve Pelzl, J., "AC hot wire measurement of thermophysical properties of nanofluids with  $3\omega$  method", **The European Physical Journal-Special Topics**, Cilt 153, No 1, 349-352, 2008.
  46. Oh, D. W., Kwon, O. ve Lee, J. S., "Transient thermal conductivity and colloidal stability measurements of nanofluids by using the  $3\omega$  method", **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, Cilt 8, No 10, 4923, 2008.
  47. Dames, C. ve Chen, G., " $1\omega$ ,  $2\omega$ , and  $3\omega$  methods for measurements of thermal properties", **Review of Scientific Instruments**, Cilt 76, No 12, 124902, 2005.
  48. Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H. P., Sauter, C. ve Tavman, S., "Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluids", **International Journal of Thermophysics**, Cilt 30, No 4, 1213-1226, 2009.
  49. Tavman, I., ve Turgut, A., "An investigation on thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids", **Microfluidics Based Microsystems**, 0, 139-162, 2010.
  50. Turgut, A., Tavman, I. ve Bakan, F., "Bor Nitrür-Su nanoakışkanın ısı iletkenliğinin  $3\omega$  yöntemi ile belirlenmesi", **18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Zonguldak, 07-10 Eylül 2011.
  51. Özerinç, S., Kakaç, S. ve Yazıcıoğlu, A. G., "Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review", **Microfluidics and Nanofluidics**, Cilt 8, No 2, 145-170, 2010.
  52. Maxwell, J. C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", 1, **Clarendon Press**, İngiltere, 1873.
  53. Mahbulbul, I. M., Saidur, R. ve Amalina, M. A., "Latest developments on the viscosity of nanofluids", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 55, No 4, 874-885, 2012.
  54. Einstein, A., "Eine neue bestimmung der moleküldimensionen", **Annalender Physik**, Cilt 19, 289-306, 1906.
  55. Williams, W.C., Buongiorno, J. ve Hu, L.V., "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Cilt 130, 042412, 2008.
  56. Chandrasekar, M., Suresh, S. ve Chandra Bose, A., "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid", **Experimental Thermal and Fluid Science**, Cilt 34, No 2, 210-216, 2010.
  57. R.L. Fullman, "Measurement of particle sizes in opaque bodies", **Journal of Metals**, Cilt 5, 1447-1452, 1991.
  58. De Noni Jr, A., Daniel, G.E., and Dachamir, H., "A modified model for the viscosity of ceramic suspensions", **Ceramics International**, Cilt 28, 731-735, 2002.

