

Manyetoreolojik (MR) Akışkanların Kapalı Durum Viskozitesinin İncelenmesi

Investigation of Off-State Viscosity of Magnetorheological (MR) Fluids

Seval GENÇ 

Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye.

Öz

Bu çalışmada silikon yağ ve demir (Fe) bazlı manyetoreolojik (MR) akışkanlarının kapalı durum (off-state) viskozite özellikleri incelenmiştir. Farklı oranlardaki manyetik faz miktarı (hacmen %5, 10, 20, 30 ve 40) ile hazırlanan MR akışkanlarının rölatif viskozitesinin (η_{rel}) – manyetik faz miktarına (ϕ) olan ilişkisi deneysel olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Mooney ve Krieger-Dougherty modelleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar MR akışkanın viskozitesinin manyetik faz miktarı ile önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Ayrıca viskozite profilleri Mooney modeli ile uyumlu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Manyetoreolojik (MR) akışkanlar, viskozite

Abstract

In this study the off-state viscosity characteristics of silicone oil and iron (Fe) based magnetorheological (MR) fluids were investigated. The relationship between relative viscosity (η_{rel}) and the amount of magnetic phase (ϕ) of MR fluids that were prepared with various concentrations of magnetic phase (5, 10, 20, 30, 40 vol%) was determined experimentally. The data obtained from experimental study were compared with Mooney and Krieger-Dougherty models. The experimental results showed that the viscosity had a shear thinning behavior and it increased significantly with increasing magnetic phase. Besides, the viscosity profile was found to be in good agreement with Mooney model.

Keywords: Magnetorheological (MR) Fluids, viscosity

I. GİRİŞ

Manyetoreolojik (MR) akışkanlar, manyetik alan altında hızla değişen reolojik özellikleri sebebiyle akıllı malzemeler sınıfına girmektedir. Manyetik alanın sıfır olduğu kapalı durumda serbest bir şekilde akarken, manyetik alanın uygulanması ile birlikte akma gerilmesi birkaç milisaniye içinde önemli ölçüde artar ($\sim 10^6$ kez). Bu değişim, manyetik alanın sıfırlandığı anda tersinir ve MR akışkanı tekrar sıvı hale geçer. Manyetik alan uygulandığı zaman mikro boyuttaki partiküller manyetik akı yönünde sıralanırlar. İki kutup arasında (genellikle 0,5-3 mm aralık) oluşan zincir, akışkanın hareketini manyetik alan yönünde engeller ve sonuç olarak viskozitesi ve akma gerilmesinde artışa sebep olur. Genç ve Phule %40 demir tozu içeren MR akışkanında akma gerilimini 100 kPa olarak ölçmüşlerdir [1].

MR akışkanları, tane boyutu 0,05-10 μm arasında değişen, manyetik olarak yumuşak, çok domainli manyetik partiküllerin taşıyıcı bir sıvı içerisinde dağıtılması ile elde edilirler. Kullanılan manyetik tozlar genellikle demir, kobalt, nikel, demir-kobalt alaşımı, mangan-çinko ferrit, kobalt ferrit, nikel ferrit gibi manyetik seramik malzemeler olarak sayılabilir. Doğunluk mknatıslanmasının yüksek olmasından dolayı, demir, en çok tercih edilen manyetik tozdur. Taşıyıcı faz, manyetik partiküllere sıvı bir ortam sağlar. Bu taşıyıcı fazın, kaynama noktası yüksek olmalı, reaktif ve toksik olmamalıdır. Ayrıca ucuz ve kolay erişilir olmalıdır. Sıcaklığa bağlı olarak taşıyıcı sıvının viskozitesinin değişmesi MR akışkanının uygulama alanları için önemli bir faktördür. Taşıyıcı sıvı olarak genellikle organik sıvılar kullanılır. Silikon yağı ve hidrokarbon yağlar, en

çok kullanılan taşıyıcı sıvılar arasındadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan LORD firması MR akışkanlarını genellikle hidrokarbon ve silikon yağı ile sentezlemektedirler.

Manyetoreolojik akışkanlar ilk olarak 1949 yılında Jacob Rabinow (Rabinow 1948) tarafından geliştirilse de bu konudaki araştırmalar 1990'lerden sonra önem ve hız kazanmıştır. MR akışkanların kullanım alanı genel olarak titreşim sönmüleyiciler üzerine olmuştur. Bu nedenle MR akışkanlarının birçok süspansiyon sistemlerinde, fren ve kavrama sistemlerinde kullanılmaya potansiyeli yaygın olarak araştırılmaktadır.

MR akışkanlarının özelliklerini anlamak ve kontrol etmek, cihaz tasarımını geliştirmek, üretim maliyetini azaltmak ve ürünün mikro-yapısını koşullara uygun hale getirmek için birinci derecede önemlidir. MR akışkanlarının uygulamaları açısından birkaç önemli anahtar konu vardır. Bu konulardan bir tanesi bu akışkanların manyetik alana duyarlı kayma gerilimini arttırmak, ikinci kritik konu ise kapalı durumda viskoziteyi düşürmektir. Manyetik alan altındaki akma geriliminin kapalı durumdaki viskoziteye oranı "yükseltme oranı (turn-up ratio)" olarak ifade edilir. Kontrol edilebilir sıvı aktüatörlerin tasarımında amaç, bu yükseltme oranını belirlenen çalışma koşulları altında maksimuma çıkartmaktır. MR akışkanlarının bu reolojik özellikleri, manyetik süspansiyonların optimum üretim koşullarını belirlemede çok önemlidir.

Nano-partikül bazlı manyetik akışkanların viskoziteleri çeşitli bilim adamlarınca incelenmiştir. Düşük konsantrasyonlu manyetik sıvıların viskoziteleri, topaklanma durumları incelenmiş ve Mooney ve Krieger-Dougherty gibi modellerle karşılaştırılmıştır [2, 3]. Jeon ve Koo poliakrilik sıvıların içerisine monodispers manyetik partiküllerin dağıtılması ile elde edilmiş seyreltik dispersiyonların viskozite ve dağılılablme durumlarını incelemiştir [4]. Sundar ve çalışma arkadaşları Fe_3O_4 nanopartiküllerinin etilen glikol içerisine dağıtılmasıyla elde edilen seyreltik dispersiyonların reolojik özelliklerini incelemiştir. Yapılan çalışmada viskozitenin manyetik faz miktarının artması ile arttığı görülmüştür [5]. Nano partikül bazlı seyreltik manyetik akışkanların viskoziteleri ile ilgili birçok çalışma yapıldıysa da, yüksek konsantrasyonlu, mikron boyutta manyetik partiküller ile sentezlenen MR akışkanlarının kapalı durum viskozite modelleme çalışmaları fazlaca yapılmamıştır. MR akışkanları için temel araştırma konuları, partiküllerin manyetik alan altındaki etkileşimleri ve akma gerilimleri ve sönmüleme özelliklerinin belirlenmesi konularında olmaktadır [6-9].

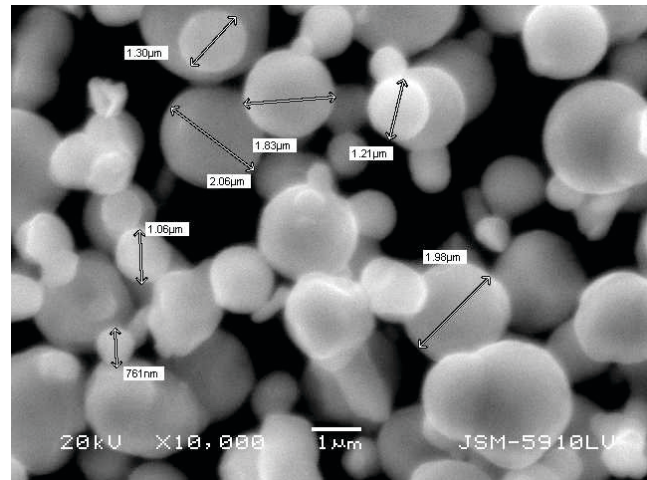
Fakat yukarıda da bahsedildiği gibi kapalı durum viskoziteleri uygulamalarda araştırılması gereken anahtar konulardan biridir.

MR akışkanlarının süspansiyon özelliklerinin değerlendirilmesinde açık durum akma gerilmesi ve kapalı durum viskozitesi çok yararlı olduğu için ve ayrıca bir başarı ölçütü olarak kabul edildiği için bu makalede MR akışkanlarının kapalı durum viskozitesi ile manyetik faz miktarı arasındaki ilişki incelenmiş ve sonuçlar çeşitli modellerle karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

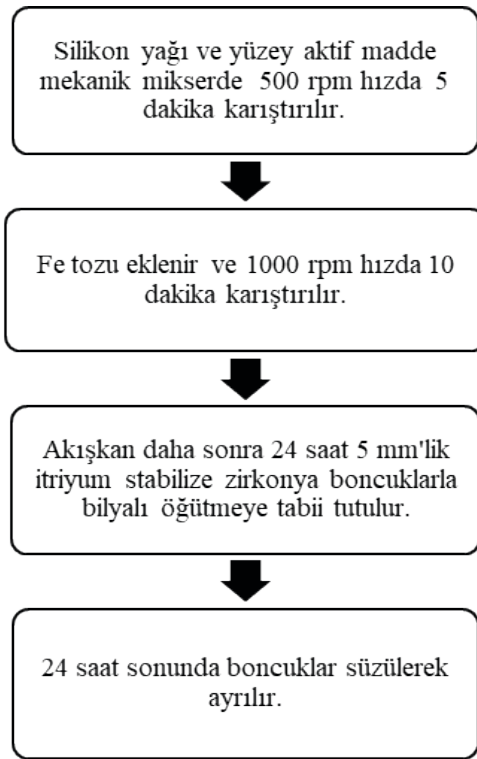
2.1. MR Akışkanının Sentezlenmesi

Bu çalışmada BASF firmasından temin edilen 99,5 saflıktaki, partikül boyutu ortalama 3,0-4,0 μm olan SQ sınıf karbonil demir tozu kullanıldı. Şekil 1'de demir partiküllerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) (JEOL, JSM-5910LY) ile elde edilmiş görüntüsü yer almaktadır. Görüldüğü üzere, demir tozu küresel ve polidisperse bir morfolojiye sahiptir. Aynı zamanda bir miktar topaklanma da görülmektedir. Taşıyıcı sıvı olarak kinematik viskozitesi 100 cSt olan silikon yağı kullanılmıştır. Demir tozunun çökmesini engellemek için yüzey aktif madde eklendi.



Şekil 1. Demir tozunun morfolojisi

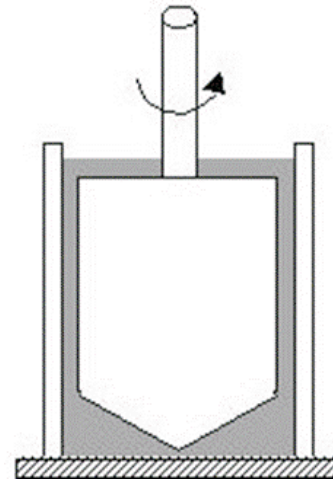
MR akışkanları hacmen %5, 10, 20, 30, ve 40'lük demir tozu kullanılarak hazırlandı. Bu akışkanlar geleneksel seramik üretim yöntemleri kullanılarak üretildi. Üretim akış şekli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. MR akışkanı sentezleme akış şeması

2.2. Viskozite Ölçümleri

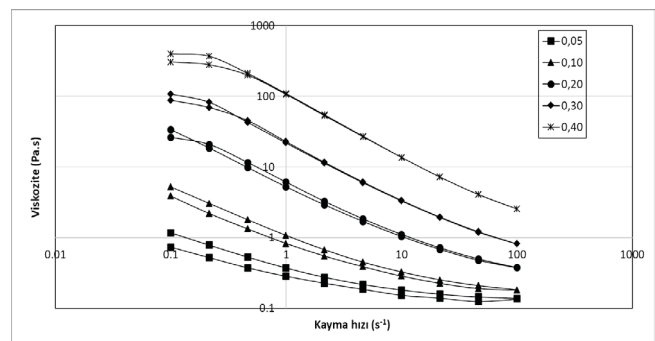
Sentezlenen MR akışkanlarının kapalı durum viskoziteleri Şekil 3'de fotoğrafı ve çizimi verilen konsantrik silindirik geometrisi (Bohlin Gemini Reometre) kullanılarak ölçüldü. Ölçümler 25 °C'de ve 0,1-100 s⁻¹ ve 100-0,1 s⁻¹ kayma hızı aralığında gerçekleştirildi. MR akışkanlar ölçüm yapılacak silindirin içerisine bir şırınga yardımı ile konulduktan sonra, homojen ve kararlı hale gelebilmesi için 50 s⁻¹ hızda 10 saniye karıştırıldı.



Şekil 3. (a) Bohlin Gemini Reometre (b) Konsantrik Silindirik Geometrisi

III. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Çeşitli seramik süspansiyonlar için konsantrasyona bağlı viskozite modelleri 20. yüzyılın başından beri incelenmektedir. Einstein aynı boy küresel sert partiküllerden oluşan süspansiyon için bir model geliştirdi. Lakin bu model seyreltilmiş (hacmen <2%) süspansiyonlar için geçerliydi. Daha sonra yapılan çalışmalarda bu model orta derecedeki konsantrasyonlar için modifiye edildi. Fakat, viskozite ile partikül konsantrasyonunun arasındaki ilişkinin belirlenmesi yüksek konsantrasyonlu süspansiyonlar için çok daha zor olmaktadır. Bu uyumsuzluk da, süspansiyona yüklenebilecek maksimum katı fazın dikkate alınmasıyla giderildi [10]. Şekil 4'de farklı demir tozu konsantrasyonundaki MR akışkanlarının viskozite eğrileri verilmiştir. Tablo 1'de ise en düşük ve en yüksek kayma hızlarındaki viskoziteler verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi kayma hızı ile viskozitenin azaldığı, yani kayma incelmeye gösterdiği gözlemlendi. Kayma incelmeye derecesi demir konsantrasyonu azaldıkça düşüş göstermiştir. Hacmen $\phi = 0,05$ olan MR akışkanı Newtonian özellik göstermiştir.



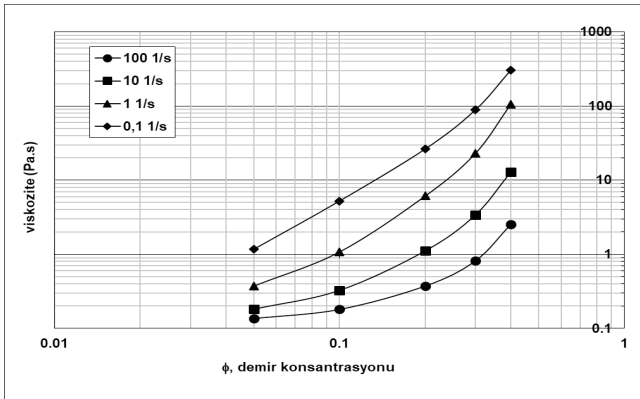
Şekil 4. Farklı Fe konsantrasyonundaki MR akışkanlarının viskozite eğrileri

Tablo 1. 0,1 and 100 s⁻¹ kayma hızlarında viskozite değerleri

Hacim oranı (%)	Viskozite (Pa.s)	
	0,1 s ⁻¹	100 s ⁻¹
5	0,173	0,14
10	5,24	0,18
20	26,36	0,38
30	88,40	0,82
40	305,79	2,56

3.1. Viskozitenin Modellenmesi

Katı fazın konsantrasyonu süspansiyonun viskozitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Şekil 5’de görüldüğü gibi demir tozunun konsantrasyonun artması ile viskozite de artmaktadır. Bu artışlar 4 farklı kayma hızında verilmiştir.



Şekil 5. Farklı kayma hızlarında viskozitenin demir konsantrasyonu ile ilişkisi

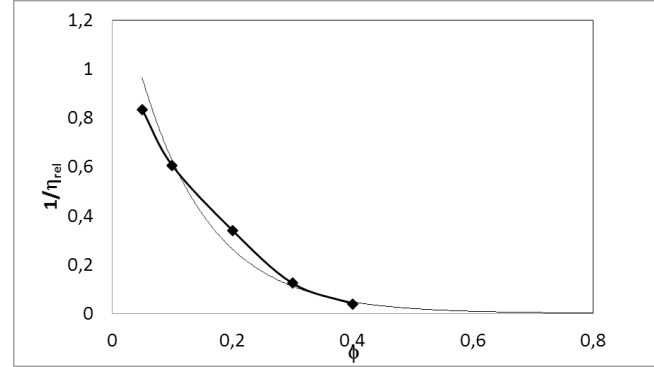
Rölatif viskozite (η_{rel}) belli bir kayma hızında süspansiyonun viskozitesinin taşıyıcı sıvının viskozitesine (η) oranı olarak tanımlanır. Kayma hızı 100 s⁻¹ ‘de $1/\eta_{rel}$ ‘nin manyetik faz konsantrasyonuna göre değişimi Şekil 6’da verilmiştir. Demir yüklemesi arttıkça $1/\eta_{rel}$ deki eksponansiyel azalma Eşitlik 1’de gösterilmiştir.

$$1/\eta_{rel} = 1.4879 \exp(-8.65 \phi) \quad (1)$$

ve korelasyon faktörü R = 0.9791’dir.

Eksponansiyel eğri, ϕ yaklaşık olarak 0,7’yi aştığı zaman asimptotik olarak sıfıra yaklaşmakta, bunun sebebi ise, partiküllerin paketlenme konfigürasyonundan ve birbirleriyle kontak halde bulunmalarından kaynaklanan direncin süspansiyonun akmasına engel teşkil etmesidir. Böylece maksimum katı faz oranı ϕ_m , η_{rel} sonsuza ya da $1/\eta_{rel}$ sıfıra yaklaştığı noktadaki katıların hacimsel oranıdır. Şekil 6’da 100 s⁻¹ kayma hızında $1/\eta_{rel}$ ile ϕ arasındaki ilişki verilmektedir. Aynı boydaki küreler için en yüksek paketlenme faktörü 0,74 olduğu için ve grafikte de 0,7’yi aştığı zaman asimptotik olarak sıfıra yaklaştığı için bu çalışmadaki hesaplamalar sırasında maksimum katı faz yüklemesi 0,74 olarak

belirlendi. Her ne kadar kullanılan demir tozu polidispers olsa da tek bir partikül büyüklüğünün dominant olacağı ve çerçeveyi oluşturacağı düşünüldü.

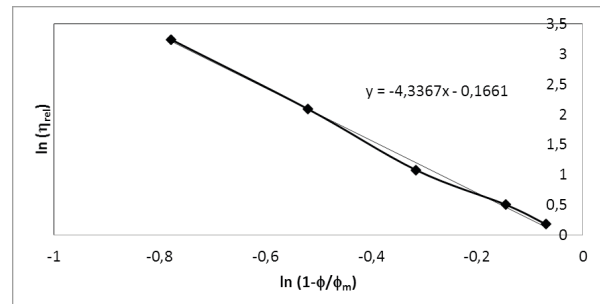


Şekil 6. Rölatif viskozitenin tersi ile demir (Fe) partikül konsantrasyonunun arasındaki ilişkinin 100 s⁻¹ kayma hızındaki grafiği

Partikül konsantrasyonu arttıkça partiküller arasındaki mesafe azalmaktadır ve bunun sebebi olarak hidrodinamik etkileşimler artmaktadır. Bizim hesaplarımızda hidrodinamik etkileşimlerin hesaplanması oldukça karmaşık olduğu için süspansiyon viskozitesinin konsantrasyona olan bağımlılığını tanımlamak için göreceli daha basit ilişkiler uygulandı. Daha önce yapılan çalışmalarda yüksek konsantrasyondaki süspansiyonların reolojik davranışlarının belirlenmesinde hem teorik hem de empirik denklemler geliştirilmiştir. Bunların içinde en iyi bilineni Krieger –Dougherty denklemidir ve Eşitlik 2’deki gibi verilir [12].

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (2)$$

Bu denklemde ϕ partiküllerin hacimsel oranı, ϕ_m , partiküllerin maksimum hacimsel oranı, $[\eta]$ intrinzik viskozitedir. Deneysel verilerimizden yola çıkarak $[\eta]$ değeri, $\ln[\eta] - \ln[1 - \phi/\phi_m]$ grafiğindeki (Şekil 7) doğrusal uyumdan 4,3 olarak hesaplandı [14].



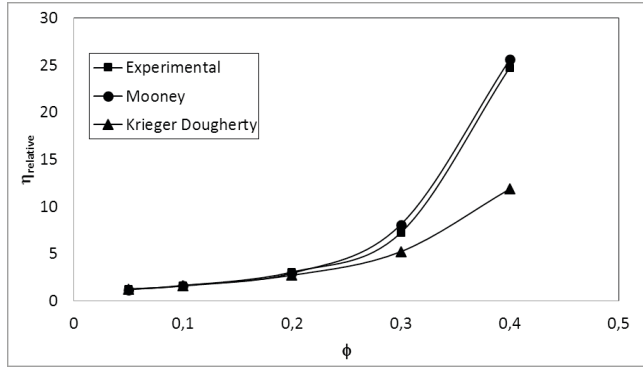
Şekil 7. $\ln[\eta] - \ln[1 - \phi/\phi_m]$ grafiğinin doğrusal uyumu

Başka bir model de Eşitlik 3’de verilen Mooney denklemidir.

$$\eta_{rel} = \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1-K\phi}\right) \quad (3)$$

Bu eşitlikte ϕ partiküllerin hacimsel oranı, $[\eta]$ intrinzik viskozite ve K ise ayarlanabilir parametredir. Mooney denkleminin maksimum katı yüklemesini içermediği dikkat çekmektedir. $[\eta]$ değeri için deneysel veriler kullanılarak Eşitlik 2 ile hesaplanan 4,3 değeri alınmıştır. K değeri ise Eşitlik 3 kullanılarak 1,6 olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen η_{rel} Şekil 8’de verilmiştir. Mooney modeli hacmen %5 – 40 konsantrasyon aralığında rölatif viskoziteyi oldukça yakın tahmin etmiştir. Krieger Dougherty Modeli ise hacmen %30 konsantrasyondan düşük MR akışkanları için geçerlidir. Bu modeldeki uyumsuzluk, özellikle konsantrasyonun %30’dan büyük olduğu durumlarda, partiküllerin aynı boyutta sert küre olarak kabul edilmesinden kaynaklanabilir. Aynı zamanda, polidispersite ve hidrodinamik etkileşimler bu tahminlerdeki uyumsuzluklarda rol oynamış olabilirler [14, 16].



Şekil 8. Mooney ve Krieger Dougherty Modellerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada hacmen farklı demir konsantrasyonu ($\phi = 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,40$) ile sentezlenen MR akışkanlarının kapalı durum viskozitesi incelendi. Konsantrasyonun hacmen %5den büyük olduğu durumlarda kayma hızının artması ile süspansiyonların viskozitelerinin azaldığı, yani akma incelmeleri özelliği sergilediği gözlemlendi. Hacmen %5’lik MR akışkanı ise Newtonian bir akış özelliği gösterdi. Maksimum katı faz yüklemesi, $\phi=0,74$ olarak kabul edildi. Bu aynı zamanda aynı boydaki kürelerin en sıkı paket

orandır. İntrinzik viskozite $[\eta]$ deneysel verilerden 4,3 olarak hesaplandı. Viskozitenin partikül konsantrasyonuna bağlılığı rölatif viskozite (η_r) ile hacimsel oran (ϕ) arasındaki ilişki incelenerek tespit edildi. $\eta_{rel} - \phi$ arasındaki uyum Mooney ve Krieger-Dougherty modelleri ile karşılaştırıldı. Mooney Modeli bütün konsantrasyonlarda deneysel sonuçlarla uyum içindeydi. Krieger-Dougherty Modeli ise sadece hacmen %30’luk ($\phi < 0,30$) orandan küçük oranlar için geçerliydi. Bu çalışma sonunda demir ve silikon yağ bazlı MR akışkanlarının kapalı durum viskoziteleri için en uygun modelin Mooney Modeli olduğu belirlendi.

REFERANSLAR

- [1] Genc, S ve Phule, P.P., (2002). Rheological properties of magnetorheological fluids. *Smart Materials and Structures*, 11(1), 140-146.
- [2] Choi H. J., Taeg, M., Kwon, M. Jhon, S. (2000). Viscosity of Magnetic Particle Suspensions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 209, 228-230.
- [3] Smith, T. L. ve Bruce C. A., (1979). Intrinsic viscosities and other rheological properties of flocculated suspensions of non-magnetic and magnetic ferric oxides. *Journal of Colloid and Interface Science*, 72, 13-26.
- [4] Jeon, J. ve Koo, S., (2012). Viscosity and dispersion state of magnetic suspensions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(4), 424-429.
- [5] Sundar, L. S., Ramana, E. V., Singh, M. K., & De Sousa, A. C. M. (2012). Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe3O4 nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Chemical physics letters*, 554, 236-242.
- [6] Rich, J. P., Doyle P.S., ve McKinley G.H., (2012). Magnetorheology in an aging, yield stress matrix fluid. *Rheologica Acta*, 51(7), 579-593.
- [7] Jolly M.R., Bender, J.W., ve Carlson, J.D., (1999). Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 10(1), 5-13.
- [8] Ginder, J. M., Davis, L.C., ve Elie L.D., (1996). Rheology of magnetorheological fluids: Models and measurements. *International Journal of Modern Physics B*, 10(23-24), 3293-3303.
- [9] Carlson, J.D., Catanzarite, D.M. ve StClair, K.A., (1996). Commercial magnetorheological fluid devices. *International Journal of Modern Physics B*, 10(23-24), 2857-2865.
- [10] Yuanling, S., Xiaolin L., and Jianfeng C., (2004). The maximum solid loading and viscosity estimation of ultra-fine BaTiO3 aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 247(1), 27-34.
- [11] Falk, V. ve D’Ortona, U. A., (2002). Polydisperse sedimentation and polydisperse packing model. *Powder technology*, 128(2), 229-235.

- [12] Krieger, I.M., ve Dougherty, T.J., (1959). A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Journal of Rheology*, 3, 137.
- [13] Liu, D. M. ve Tseng, W. J., (2000). Rheology of injection-molded zirconia-wax mixtures. *Journal of Materials Science*, 35(4), 1009-1016.
- [14] Bergström, L., Shinozaki, K., Tomiyama, H., & Mizutani, N., (1997). Colloidal processing of a very fine BaTiO₃ powder-effect of particle interactions on the suspension properties, consolidation, and sintering behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(2), 291-300.
- [15] Mooney, M., (1951). The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of Colloid Science*, 6(2), 162-170.
- [16] Tseng, W.J. ve Li, S.Y., (2002). Rheology of colloidal BaTiO₃ suspension with ammonium polyacrylate as a dispersant. *Materials Science and Engineering: A*, 333(1), 314-319.