
Araştırma Makalesi / Research Article

MoO₃/PAG ve ZnO/PAG Nanoyağlayıcılarının Soğutma Sisteminin Performans Parametrelerine Etkilerinin Belirlenmesi

Mustafa AKKAYA *

*Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği,
Karaman, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-8690-921X)*

Öz

Isıtma ve soğutma makinelerinde sistem performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda popüler bir hâl almıştır. Bu deneysel çalışma ile buhar sıkıştırma soğutma çevrimindeki kompresöre müdahale edilerek, sistemde enerji verimliliğini sağlamak amaçlanmıştır. Soğutma sistemi elemanlarından kompresör içerisinde polialkilen glikol (PAG) yerine nanoyağlayıcıdan yararlanılmıştır. Nanoyağlayıcı hazırlarken baz sıvısı olarak tam sentetik PAG kullanılmıştır. Baz sıvısı içerisinde farklı kütle oranlarında çinko oksit (ZnO) ve molibden tri-oksit (MoO₃) nanoparçacıkları eklenmiştir. Nanoyağlayıcıdaki topaklanmaları engellemek amacıyla yüzey aktif madde olarak Triton X-100 (TX-100) kullanılmıştır. Nanoyağlayıcıda ZnO ve MoO₃ nanoparçacıkları ağırlıkça %1,0 ve %1,5 oranlarında, TX-100 yüzey aktif maddesi ağırlıkça %0,5 ve %1,0 oranlarında, baz sıvısına dahil edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, soğutma sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Kompresör yağı olarak PAG kullanıldığında, soğutma tesir katsayısı (STK) 3,98 olarak hesaplanmıştır. Ortam koşulları ve sıcaklığı değiştirilmeden, hazırlanan nanoyağlayıcılar aynı kompresörde kullanılmıştır. En iyi sonuç; baz sıvısı PAG, ağırlıkça %1,5 oranında ZnO nanoparçacıkları ve ağırlıkça %0,5 oranında TX-100 yüzey aktif maddesi ile hazırlanan nanoyağlayıcıdan kompresörde iş akışkanı olarak faydalanılması neticesinde elde edilmiştir. Hazırlanan bu nanoyağlayıcının kompresör yağı olarak kullanılması sonucunda, STK 4,65 olarak hesaplanmıştır. STK değerinde %16,83 kadar artış gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Nanoyağlayıcı, PAG, ZnO, MoO₃, TX-100.

Determination of the Effects of MoO₃/PAG and ZnO/PAG Nano-lubricants on Cooling System Performance Parameters

Abstract

Efforts to improve system performance in heating and cooling machines have been popular during recent years. With this experimental study, it was aimed to provide energy efficiency by intervening in the compressor in the vapor compression refrigeration cycle. Nano-lubricant was used instead of polyalkylene glycol (PAG) in the compressor from cooling system components. Fully synthetic PAG was used as the base fluid when preparing nano-lubricant. Zinc oxide (ZnO) and molybdenum tri-oxide (MoO₃) nanoparticles of different mass fractions were added to the base liquid. Triton X-100 (TX-100) was used as surfactant in order to prevent precipitation in the nano-lubricant. While preparing the nano-lubricant, ZnO and MoO₃ nanoparticles were included in the base fluid in 1.0% and 1.5% mass fractions and TX-100 surfactant in 0.5% and 1.0% mass fractions. When pure PAG was used as the compressor oil, the coefficient of performance (COP) was calculated as 3.98. The prepared nano-lubricants were used in the same compressor without changing the ambient conditions and temperature. The best result; the base liquid PAG was obtained by using the nano-lubricant prepared with 1.5% by mass ZnO nanoparticles and 0.5% by weight TX-100 surfactant material as compressor oil. As a result of using this prepared nano-lubricant as compressor oil, the COP was calculated as 4.65. An increase of 16.83% was observed in the COP value.

Keywords: Nano-lubricant, PAG, ZnO, MoO₃, TX-100.

*Sorumlu yazar: makkaya@kmu.edu.tr

Geliş Tarihi: 10.01.2021, Kabul Tarihi: 30.04.2021

1. Giriş

Dünya genelinde nüfusun artmasıyla endüstriyel alanda gelişmeler meydana gelmiştir. Gündelik yaşamımızda da hayat standartlarının yükselmesiyle, enerjinin kullanımı artmaktadır. Gelişen bu teknolojilerle mevcut enerji kaynaklarının, tüketilen enerjiyi karşılayamaması sorunu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, geleceğe yönelik planlamalar doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımlar artmaktadır. Son yıllarda farklı enerji kaynaklarına yönelimin yanında, enerji verimliliği kavramı da son derece önemli bir konu haline gelmiştir [1]. Endüstriyel sistemlerde ve günlük yaşamımızda, iklimlendirme sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. İklimlendirme sistemleri içerisinde yer alan soğutma sistemleri dört temel elemandan meydana gelmektedir: Kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve genişleme valfi. Bu ana elemanlarla birlikte, soğutma sisteminin devamlılığını kolaylaştıran kurutucu, sıvı deposu, sıvı ayırıcı, selenoid valf, termostat vb. yardımcı elemanlar bulunmaktadır. Çevrim içerisinde dolaşan soğutucu akışkanın soğuk kaynaktan sıcak kaynağa ısı iletimi kompresörler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle; kompresör soğutma sistemlerinin kalbi olarak gösterilebilir [2]. Soğutma sistemlerinde bilinen enerji verimlilik çalışmalarına ek olarak, kompresörün soğutulması ve istenilen verimlilik düzeyinde çalışması için kullanılan yağa müdahale edilerek nanoparçacık-yağ (nanoyağlayıcı) süspansiyonunun kullanılması da söz konusudur [3]. Isı transferi uygulamalarında kullanılan akışkanlara farklı derişimlerde nanoparçacıkların eklenmesiyle, bu sıvıların ısı transferi performanslarının arttırılabildiği bilinmektedir. Son yıllarda, *Maxwell* veya diğer makro ölçekli yaklaşımlar gibi geleneksel yöntemlerin dışında, nano boyutta parçacıkların baz sıvısı içerisine eklenmesiyle akışkanların ısı transfer özelliklerinde iyileştirmeler meydana gelmiştir [4]. Nanoakışkan ve nanoyağlayıcı uygulamalarında nanoparçacıkların iş akışkanına eklenmesiyle, katı parçacıkların birbiriyle olan etkileşimleri sonucunda türbülans ve ısı transfer yüzeyi artmaktadır. Isı iletim katsayısı yüksek katı partiküllerle, akışkanın ısı iletim katsayısı da artmaktadır. Böylece, nanoparçacık-sıvı süspansiyonların hazırlanması ve ağırlıkça uygun kütle oranlarında eklenmesi, baz akışkanının ısı transferi performansını arttırmaktadır [5,6].

Nanoakışkan ve uygulamalarıyla ilgili yapılan çalışmalarda, ZnO nanoparçacığı yüksek ısı iletkenlik ve süspansiyon içerisinde göstermiş olduğu homojen dağılımdan dolayı, sıklıkla tercih edilmektedir [7,8]. Goodarzi vd. ZnO ve karbon nanotüp (MWCNT) nanoparçacıkları ile çalışma sıvısı motor yağını (SAE 10W40) karıştırarak hibrit nanoyağlayıcı hazırlamıştır. Çalışmanın ilk ve en önemli aşamasının nanoyağlayıcı hazırlamak olduğu ve nanoyağlayıcı hazırlarken çökelmelerin önüne geçmek amacıyla homojen bir süspansiyon hazırlanması gerektiği vurgulanmıştır. Bu nedenle, kararlı bir süspansiyon oluşturmak amacıyla motor yağına belirli hacim oranlarında hibrit nanoparçacıklar eklendikten sonra çözelti ilk aşamada, manyetik karıştırıcıya konulmuştur. İkinci aşama olarak, nanoyağlayıcı içerisinde topaklanmaları önlemek ve partikülleri baz sıvısında tamamen çözmek amacıyla süspansiyon ultrasonik karıştırıcıya konulmuştur. Önceki deneyler ölçüt alındığında, hazırlanan nanoyağlayıcılarda çökelme olup olmadığını gözlemek amacıyla beş gün süreyle süspansiyon bekletilmiştir ve bu süre sonunda herhangi bir sorun ile karşılaşmadığı raporlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, incelenen tüm hacim oranlarındaki nanoyağlayıcıların, *Newtonian akışkan* davranışına sahip olduğu bildirilmiştir. Farklı sıcaklıklara bağlı olarak partikül hacim oranlarını incelemiştir. Artan sıcaklıkla birlikte nanoparçacıkların artan hacim oranına bağlı olarak, baz sıvısının viskozitesi artmıştır. Sonuç olarak, aynı sıcaklık değerinde, nanoyağlayıcının hacim oranının artmasıyla viskozitenin arttığı sonucuna ulaşılmıştır [9]. Senthilkumar vd. buhar sıkıştırmalı bir soğutma sisteminde, enerji tasarrufu sağlamak amacıyla performans katsayısı, soğutma kapasitesi gibi değişkenlerin iyileştirmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Basit bir soğutma sisteminde performansı arttırmak ve enerji kullanımını en aza indirmek amacıyla kompresör yağlama yağına nanoparçacık ilavesine ilişkin yeni uygulamaların olduğuna dikkat çekilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, buhar sıkıştırmalı soğutma sistemlerinde enerji tasarrufu problemleri için nanoyağlayıcıların kullanımına odaklanıldığı belirtilmiştir. Nanoparçacık olarak ZnO ve SiO₂ metal oksitlerinin manyetik karıştırıcıda karıştırılmasıyla elde edilen hibrit nanoparçacıklar kullanılmıştır. Soğutma sistemi, 60 g soğutucu akışkanla (R600a) şarj edilerek 0,4 g/L nanoyağlayıcı kullanıldığında, sistemin nanoparçacıksız sisteme göre daha az güç tükettiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en düşük kompresör çalışması 78 W olarak belirlenmiştir. Bu değer 0,6 g/L ZnO-SiO₂ hibrit nanoparçacıkların kompresör yağına eklenmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca kullanılan bu kütle oranı için soğutma etkinlik katsayısında, nanoparçacıksız kullanıma göre 1,7 kadar arttığı söylenmiştir [10].

Subhedar vd. geliştirmekte olan ülkelerde, enerji sıkıntısı ile karşı karşıya kalındığını ve soğutma sistemlerinde birçok endüstriyel ve ev uygulamaları için ana enerji tüketicisi olduğunu ifade etmişlerdir. Basit bir soğutma sistemi için evaporatördeki ısı absorpsiyon oranı artırılarak veya kompresör gücü düşürülerek enerji verimliliğinin sağlanabileceği vurgulanmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada R134a soğutucu akışkanı ile çalışan buhar sıkıştırma soğutma sisteminde, %0,05; %0,075; %0,1 ve %0,2 oranlarında nanoyağlayıcı kullanılarak enerji verimliliği sağlanmak istenmiştir. Süspansiyon hazırlarken mineral yağ (MO) içerisine 20 nm boyutunda alümina nanoparçacıkları eklenmiştir. Kararlı ve homojen bir süspansiyon oluşturmak amacıyla oleik asit yüzey aktif malzemesi kullanılmıştır. Mineral yağ içerisine alümina nanoparçacıkları %0,05; 0,075; %0,1 ve %0,2 hacim konsantrasyonlarında eklenmiştir. Hazırlanan bu nanoyağlayıcıların termal özellikleri ve tribolojik özellikleri iyileştirilmiştir. Buhar sıkıştırma soğutma sisteminde kompresör yağı olarak mineral yağ yerine %0,075 hacim oranında alümina/mineral yağ nanoyağlayıcısı kullanıldığında, kompresör gücünde yaklaşık olarak %27 kadar azalma olmuştur. Aynı hacim fraksiyonda nanoyağlayıcı, kompresör yağı olarak kullanıldığında evaporatör bölümünde ısı emme kapasitesinin %35 kadar arttığı görülmüştür [11].

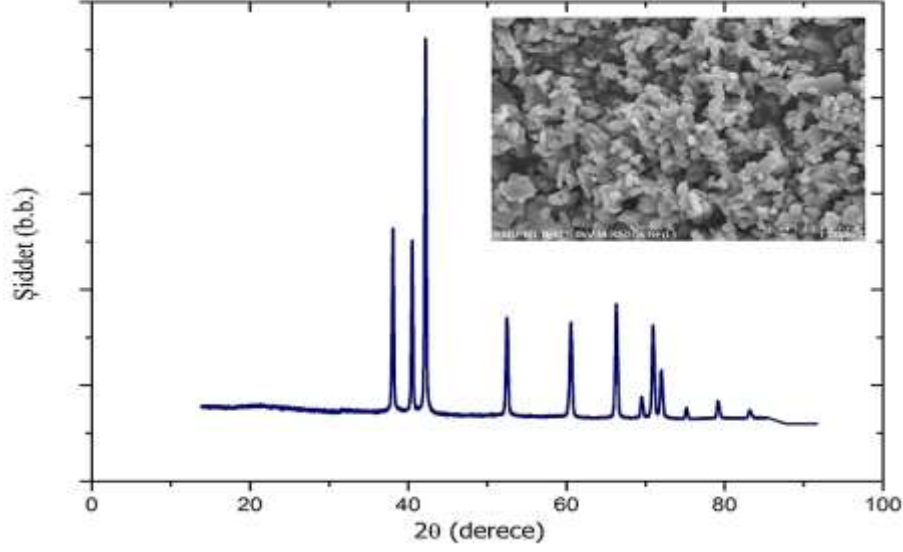
Son yıllarda yapılan nanoakışkan ve nanoyağlayıcı uygulamalarında alaşımli metal oksit nanopartiküllerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Termal iletkenlik ve performansın artırılması noktasında alaşımli nanoparçacıkların sıvı içerisinde etkin ısı transfer yüzeyini artırdığı ve baz sıvıları ile homojen bir karışım oluşturdukları görülmektedir [12,13]. Nanoakışkan ve nanoyağlayıcı içerisinde çökelmelerin önüne geçerek homojen ve kararlı bir süspansiyon hazırlamak için nanoparçacıkların boyutunun önemli olduğu görülmektedir. Nanoparçacıkların boyutunun yanında hazırlanan süspansiyonda kullanılan nanoparçacık kütle oranının uygun olarak belirlenmesi ve karışımın homojen hale gelene kadar karıştırılması önemlidir. Yapılan nanoyağlayıcı çalışmalarında, yüzey aktif madde kullanımının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle süspansiyon içerisinde yüzey gerilmesinin yenilerek toplanmayı engellemek için yüzey aktif madde kullanılmalıdır [13]. Nanoparçacık olarak MoO₃ parçacıklarının kullanımına yönelik nanoakışkan uygulamaları vardır. Sun vd. MoO₃ nanoakışkanlarını, baz sıvısı diyonize suya MoO₃ partiküllerinin eklenmesiyle hazırlamıştır. Çalışma sonuçlarına göre, nanoparçacık-MoO₃'ün suda dağılmasının sürtünme katsayılarını ve aşınma hacminin azalmasına yardımcı olduğu ve yük taşıma kapasitesinde artışa neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, tribolojik olarak MoO₃ partiküllerinin yağlayıcı ve termal özelliklerinin yüksek olduğu görülmektedir [14].

Yapılan bu deneysel çalışmada; ZnO nanoparçacıkları ve MoO₃ nanoparçacıklarıyla hazırlanan nanoyağlayıcılar, kompresör yağı olarak kullanılmıştır ve akabinde buhar sıkıştırma soğutma sisteminin performansı incelenmiştir. Kullanılan MoO₃ partiküllerinin nanoakışkan uygulamalarının dışında, soğutma sisteminde nanoyağlayıcı olarak kullanımına rastlanılmamıştır. Sistemde kompresör olarak hermetik tip ve 844 W soğutma kapasitesine sahip kompresör kullanılmıştır. MoO₃ ve ZnO nanoparçacıkları ile hazırlanan farklı kütle oranlarındaki nanoyağlayıcıların termal özellikleri ve kompresörün çalışma verimliliğine etkileri karşılaştırılarak incelenmiştir. Nanoparçacıklar, PAG baz sıvısına eklenerek nanoyağlayıcı hazırlanmış olup, süspansiyonda homojen bir dağılımın sağlanması ve toplanmanın engellenmesi için TX-100 yüzey aktif maddesinden faydalanılmıştır.

2. Materyal ve Metot

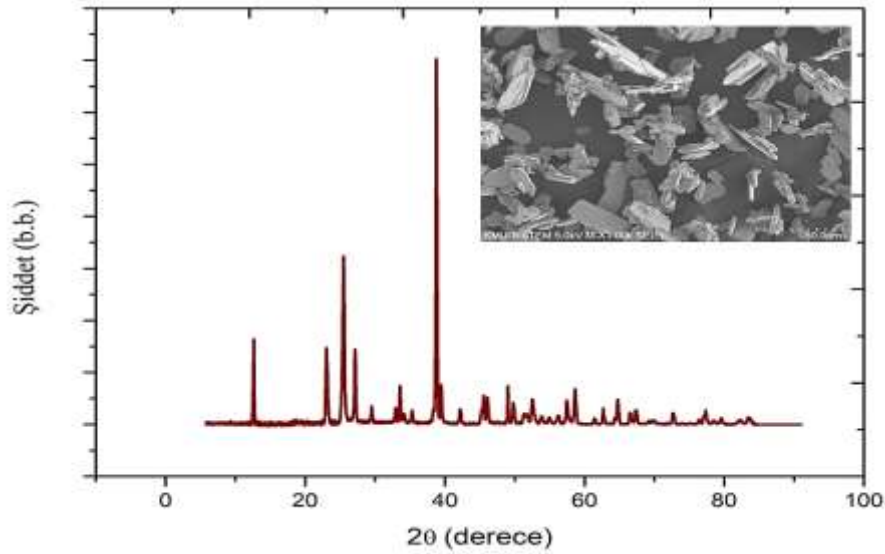
2.1. Nanoparçacıkların Özellikleri

Çalışmada kullanılan, ≥ 99 saflığında ZnO ve MoO₃ nanoparçacıkları *Sigma-Aldrich* firmasından temin edilmiştir. Nanoparçacıkların morfolojik özelliklerinin belirlenmesi açısından, X-ışınları difraktometresi (XRD) analizleri yapılarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Şekil 1'de ZnO nanoparçacığına ait XRD analizi ile birlikte SEM görüntüsü verilmiştir. XRD analizi sonucunda, toz halindeki ZnO nanoparçacıklarının kristal yapısı ile birlikte tanecik boyutunun da analizi gerçekleştirilmiştir. ZnO nanoparçacıkları için XRD analizinde, malzemenin kristal düzlemlerine göre altıgen kristal geometrisine karşılık geldiği ve literatür ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır [15]. Şekil 1 üzerinde partiküle ait SEM görüntüsüne yer verilmiştir. ZnO partiküllerinin *Scherrer* denkleminde göre (XRD) ortalama 13 nm boyutunda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. ZnO nanoparçacıklarının XRD analizi ve SEM görüntüsü

Nanoyağlayıcı hazırlarken kullanılan bir diğer partikül MoO_3 'tür. Nanoparçacığa ait XRD analizi ve SEM görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. XRD grafiği incelendiği zaman, tüm pik noktalarının MoO_3 'ün literatürdeki şekliyle uyumlu olduğu görülmektedir [16]. MoO_3 nanoparçacıkları Scherrer denkleminde göre (XRD) ortalama 28 nm boyutundadır.



Şekil 2. MoO_3 nanoparçacıklarının XRD analizi ve SEM görüntüsü

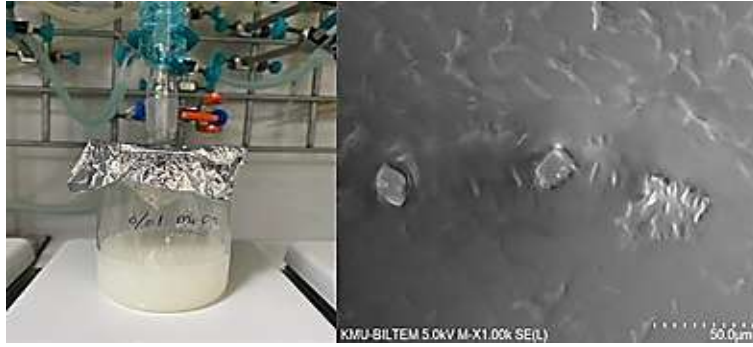
2.2. Nanoyağlayıcının Hazırlanması

Hazırlanan nanoyağlayıcılar; ultrasonik su banyosunda (*Kudos-Model: SK2210HP*) ve manyetik karıştırıcıda (*Jeio Tech MS-32M*) karıştırılmıştır. Nanoyağlayıcıların hepsinde 100 ml miktarında PAG baz sıvısı kullanılmıştır. Birinci aşamada PAG içerisine ağırlıkça %1,0 ve %1,5 oranlarında ZnO nanoparçacıkları ve ağırlıkça %0,5 oranında TX-100 yüzey aktif maddesi eklenmiştir. Bu aşamada elde edilen nanoyağlayıcı için SEM görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. PAG / %1,0 ZnO / %0,5 TX-100 nanoyağlayıcının SEM görüntüsü

İkinci aşamada ise 100 ml PAG baz sıvısının içerisine ağırlıkça %1,0 ve %1,5 oranlarında MoO_3 nanoparçacığı ve ağırlıkça %1,0 oranında TX-100 yüzey aktif maddesinin eklenmesiyle iki farklı nanoakışkan hazırlanmıştır. Hazırlanan nanoyağlayıcının SEM görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. PAG / %1,0 MoO_3 / 1,0 TX-100 nanoyağlayıcının SEM görüntüsü

2.3. Kullanılan Deney Düzeneginin Özellikleri

Çalışmada, *Deneysan* firmasından temin edilen buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi ile çalışan sistem, eklemeler yapılarak kullanılmıştır. Sistemde basit bir soğutma çevriminde yer alan kompresör, buharlaştırıcı, yoğuşurucu ve genişleme valfi elemanları bulunmaktadır. Çevrim içerisinde çevre ekipmanları, bakır borular ve kompresör elemanında değişiklikler yapılmıştır. Deneysel verileri dijital olarak alabilmek için sisteme data toplayıcı eklemesi yapılmıştır. Deney düzenegine ait görünüm Şekil 5'de gösterilmiştir [13].



Şekil 5. Deney düzenegine ait görünüm

Çevrimin temel elemanlarının sıcaklık giriş-çıkış değerlerini ölçmek amacıyla *Pt-100* tipi ısı çiftleri kullanılmıştır. Basınç değerlerini ölçmek için de *Refco mr-205-ds* ve *Refco-mr-305-ds* bourdon tipi yağlı manometreler kullanılmıştır. Deneylerde hazırlanan nanoyağlayıcılar hermetik pistonlu *Embraco FF 8.5 HBK* kompresöre eklenmiştir. Kompresörün özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kompresörün özellikleri [17]

Kompresör Teknik Özelliği	Açıklama
Marka	Embraca
Kompresör Tipi	Hermetik Pistonlu
Çalışma Rejimi	HBP (+7,2 °C / +54 °C)
Kompresör Gücü (Hp)	1/4
Soğutma Kapasitesi (Watt)	844
Süpürme Hacmi (cm ³ /rev)	7,95
Emiş Hattı	5/16"
Basma Hattı	1/4"

2.4. Belirsizlik Analizi

DeneySEL çalışmalarında, sonuçların doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve ölçüm hassasiyetinin belirlenmesi açısından belirsizlik analizi önemlidir. Kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, bağlantı noktaları ve okuma hatalarından kaynaklı olarak belirsizlik analizi gerçekleştirilir. Soğutma deney düzeneğinde kompresör, buharlaştırıcı ve yoğuşurucu elemanlarının giriş ve çıkış sıcaklıklarının ölçümü için ısı çiftleri kullanılmıştır. Isıl çift için toplam belirsizlik ısı çiftinin hassasiyeti ve bağlantıları ile okuma hataları dikkate alınarak aşağıdaki formül ile hesaplanır [5,18]. Şekil 6'da deney düzeneğinde yer alan ölçüm göstergeleri ve Tablo 2'de ölçüm cihazlarına ait belirsizlik analizi verilmiştir.

$$W_R = \left\{ (W_{\text{Isıl çift hassasiyeti}})^2 + (W_{\text{Isıl çift bağlantı}})^2 + (W_{\text{Okuma}})^2 \right\}^{1/2} \quad [1]$$

$$W_R = \{(1)^2 + (1)^2 + 0,1^2\}^{1/2} = 1,41$$

Deney düzeneğinde alçak ve yüksek basınç değerleri yağlı manometre ile ölçülmüştür. Basınç ölçümleri için belirsizlik analizi hesaplanırken, okuma hatası ve manometrenin hassasiyeti dikkate alınmaktadır [18].

$$W_R = \left\{ (W_{\text{basınç}})^2 + (W_{\text{Okuma}})^2 \right\}^{1/2} \quad [2]$$

$$W_R = \{(0,016)^2 + (0,1)^2\}^{1/2} = 0,10$$

Tablo 2. Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazları ve belirsizlik analizi

Ölçüm Cihazları	Cihaz	Özelliği	Duyarlılık	Belirsizlik
Isıl Çiftler °C	Pt-100	-200 °C - +850 °C	1,0	± %1,41
Manometreler (bar)	Refco	mr-205 ve mr-305-ds	0,016	±0,10

**Şekil 6.** Deney düzeneği ölçüm göstergeleri

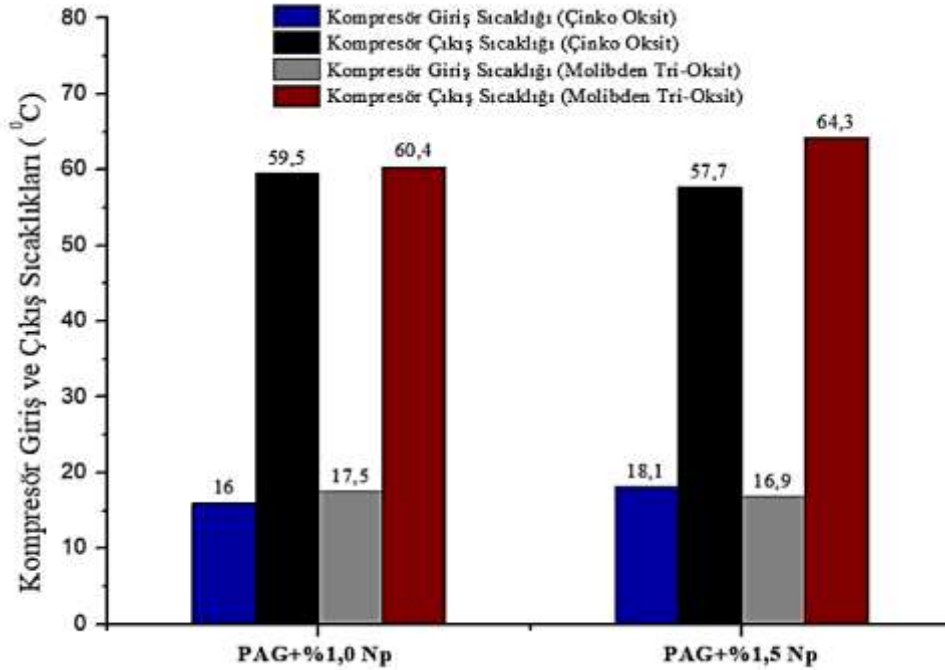
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada enerji verimliliği analizleri noktasında basit bir soğutma sistemi kullanılmıştır. Kompresör, buharlaştırıcı, yoğuşurucu, genişleme valfi ve kurutucudan oluşan soğutma sisteminde, kompresör yağına yapılan müdahalenin sonuçları daha net görülebilmektedir. Sistemde kompresör yağı yerine farklı derişimlerde hazırlanan nanoyağlayıcılar kullanılmıştır ve her bir derişimdeki

nanoyağlayıcı için sistem performansı değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda kompresör, buharlaştırıcı, yoğuşturucu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile alçak-yüksek basınç değerlerinin ölçümleri alınmıştır. Deneylerde, buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde kompresör yağı olarak, farklı derişimlerde kullanılan MoO₃ ve ZnO nanoparçacıklarıyla hazırlanan nanoyağlayıcıların kullanılması sonucunda, soğutma tesir katsayısı ve kompresör işi analiz edilmiştir. Yapılan deneyler, aynı ortam koşullarında tekrarlanmıştır. Soğutma deney düzeneği parametrelerinin belirlenmesinde, ortam sıcaklığındaki değişimler sistemi etkilemektedir. Bu nedenle, tüm deneyler aynı deneysel koşullarda gerçekleştirilmiştir.

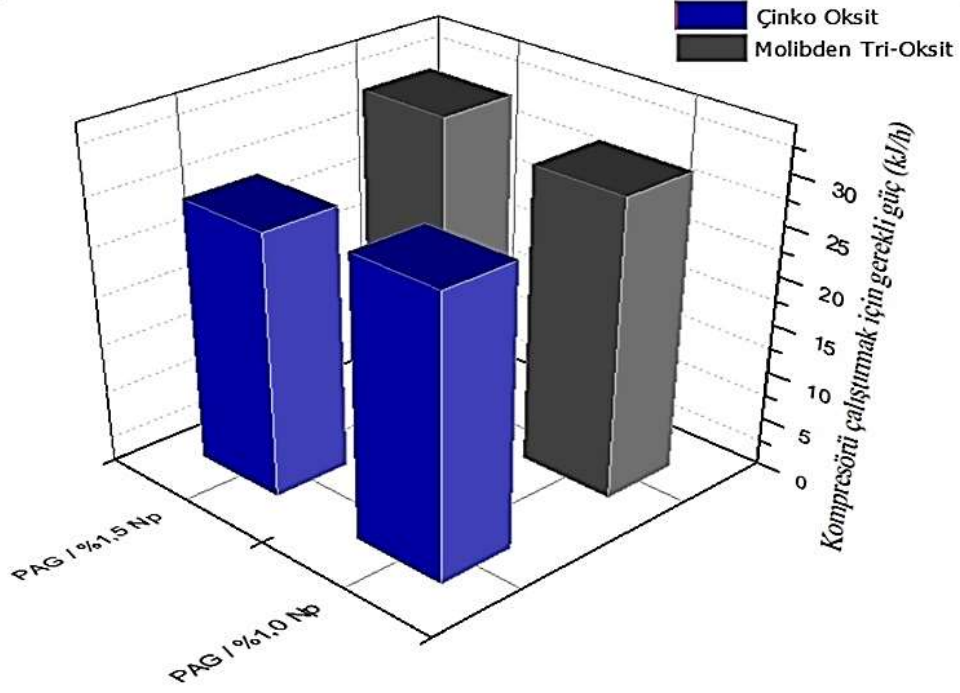
3.1. Kompresör Giriş ve Çıkış Sıcaklıklarının Analizi

Hazırlanan nanoyağlayıcılar, soğutma sistemindeki kompresörün harcamış olduğu enerjii düşürmek amacıyla kompresör yağı olarak kullanılmıştır. Kompresörde harcanan enerjii azaltmak için soğutma çevrimi içerisinde kompresör çıkışındaki sıcaklığın azaltılması gerekir. Baz sıvısı içerisinde nanoparçacıkların kullanılmasıyla, buharlaştırıcı tarafından soğutulan ortamdaki daha fazla ısı çekimi sağlanarak, çıkış sıcaklığı düşürülmüştür. Farklı özelliklerdeki nanoyağlayıcıların, kompresörde iş akışkanı olarak kullanılması sonucunda, kompresör giriş ve çıkış sıcaklıklarındaki varyasyonlar Şekil 7’de verilmiştir. En düşük kompresör çıkış sıcaklığı; iş akışkanı PAG, ağırlıkça %1,5 oranında ZnO nanoparçacığı ve ağırlıkça %0,5 oranında TX-100 yüzey aktif maddesinin kullanılmasıyla ve en yüksek kompresör çıkış sıcaklığı ise PAG içerisine ağırlıkça %1,5 oranında MoO₃ ve ağırlıkça %1,0 oranında TX-100 eklenerek hazırlanan nanoyağlayıcının kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Süspansiyon içerisine eklenen MoO₃ nanoparçacıklarının, ZnO nanoparçacıklarına göre daha fazla çöktüğü gözlemlendiği için MoO₃ ile hazırlanan nanoyağlayıcılarda, yüzey aktif madde %1,0 kütle oranında kullanılmıştır.



Şekil 7. Nanoyağlayıcı kullanımı sonucunda kompresör giriş ve çıkış sıcaklıklarındaki değişimler

Kompresör giriş-çıkış sıcaklık ve sistem basınç ölçümlerine bağlı olarak entalpi değerleri belirlenmiştir. Bu entalpi değerleriyle kompresörü çalıştırmak için gerekli güç değerleri hesaplanmıştır [19]. PAG içerisine ağırlıkça %1,5 kütle oranında ZnO nanoparçacığı eklenmesiyle hazırlanan nanoyağlayıcının kompresör yağı olarak kullanılması ile en düşük güç değeri elde edilmiştir. Farklı derişimlerde nanoyağlayıcıların kompresörü çalıştırmak için güç değeri üzerine etkisi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Nanoyağlayıcı kullanımının kompresöre etkisi

3.2. Soğutma Tesir Katsayısının Analizi

Soğutma çevriminde soğutucu akışkan, sistem elemanları tarafından kademeli bir şekilde buharlaşır, yoğunur ve buhar halindeyken kompresörde sıkıştırılır. Soğutma işlemi için kullanılan, soğutma makinesi veya ısı pompasının performans ölçütü STK değeri ile belirlenmektedir. Gerekli hesaplamalar aşağıdaki formüller yardımıyla yapılmıştır [19]. Hesaplama yapılırken yoğunlaştırıcı çıkışındaki entalpi değeri h_3 ile buharlaştırıcı girişindeki h_4 entalpi değerlerinin ortalaması alınarak h_{ort} üzerinden işlemler yapılmıştır.

$$\dot{W}_K = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad [3]$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad [4]$$

$$STK = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_K} \quad [5]$$

\dot{m} : Soğutucu akışkanın kütleli debisi (g/s)

h_1 : Soğutmanın kompresör girişindeki entalpi değeri (kJ/kg)

h_2 : Soğutmanın kompresör çıkışındaki entalpi değeri (kJ/kg)

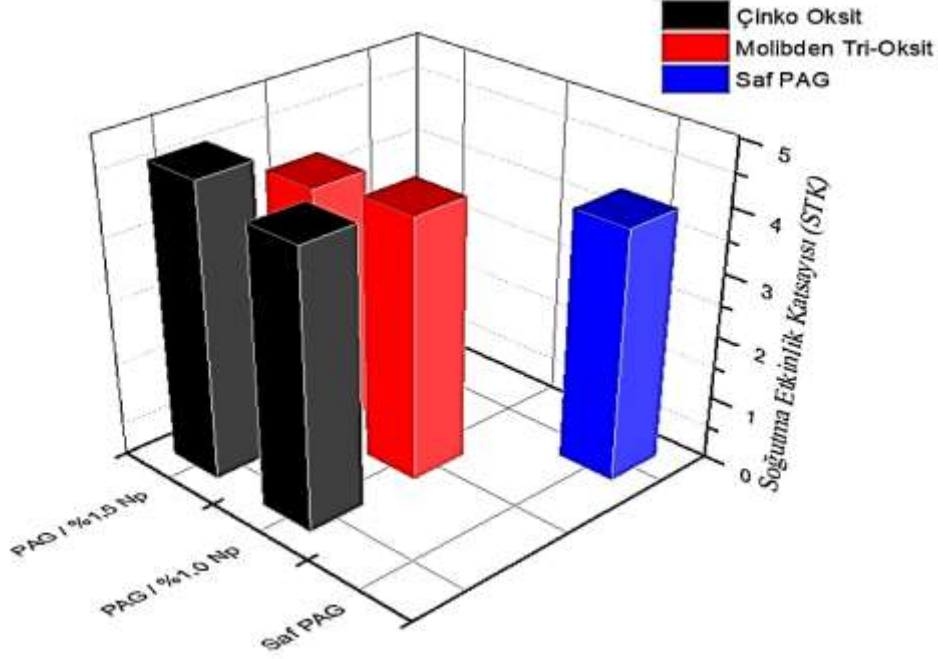
h_4 : Soğutmanın buharlaştırıcı girişindeki entalpi değeri (kJ/kg)

\dot{Q}_L : Buharlaştırıcının ortamdaki çekmiş olduğu ısı miktarı (kJ/h)

\dot{W}_K : Kompresör işi (kJ/h)

Sistem için etkinlik katsayıları, sistem çıktılarının termodinamik analizi sonucunda hesaplanmıştır ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Farklı derişimlerde hazırlanan nanoyağlayıcıların kullanılması sonucunda, en yüksek STK değeri, baz sıvısı PAG, ağırlıkça %1,5 kütle oranında ZnO nanoparçacığı ve %0,5 kütle oranında TX-100 yüzey aktif maddesi ile 4,65 olarak elde edilmiştir. En

düşük STK değeri ise baz sıvısı PAG, ağırlıkça %1,5 kütle oranında MoO₃ nanoparçacığı ve %1,0 kütle oranında TX-100 yüzey aktif maddesi kullanılarak hazırlanan nanoyağlayıcı ile 3,93 olarak hesaplanmıştır. Bu duruma sebep olarak, ağırlıkça %1,5 oranında MoO₃ nanoparçacığı ile hazırlanan nanoyağlayıcı içerisinde yoğun miktarda çökelmelerin oluşması gösterilebilir. Saf PAG kompresörde iş akışkanı olarak kullanıldığında ise STK değeri 3.98 olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. Nanoyağlayıcı kullanımı sonucunda STK değerindeki değişimler

Elde edilen deneysel sonuçların literatür çalışmaları ile uygun olduğu görülmüştür [13, 20-22]. Nanoparçacık olarak ZnO metal oksitin, nanoakışkan ve nanoyağlayıcı uygulamalarında kullanıldığı bilinmektedir. Örneğin, yapılan deneysel bir çalışmada, yazarlar nanoakışkan hazırlarken baz akışkanı olarak; etilen glikol, propilen glikol ve su karışımından oluşan iş akışkanı kullandıklarını bildirmiştir. Baz sıvısının sahip olduğu termal özellikleri arttırmak amacıyla süspansiyon içerisine ZnO nanoparçacıklarının eklendiği bildirilmiştir. Hazırlanan nanoakışkan içerisinde, baz sıvısı ve nanoparçacık için ağırlıkça 60:40 şeklinde oranlama yapıldığı raporlanmıştır. Deneylede; %99 saflıkta ve 30 nm boyutunda nanoparçacık-ZnO kullanıldığı belirtilmiştir. Hazırlanan süspansiyonun temel olarak viskozite ve termal iletkenlik gibi özelliklerinin incelendiğini ve çözelti içerisine katılan nanoparçacıklar ile ısıl iletkenliği arttırmayı amaçladıklarını bildirmişlerdir. Bununla birlikte, deneysel sonuçların, farklı modeller kullanılarak analiz edildiği söylenmiştir. Deneyleye bağlı analizlerde, partikül hacmi ve sıcaklığın etkisi etilen glikol ve propilen glikol baz sıvıları için viskozite ve termal iletkenlik açısından incelenmiştir. Etilen glikol içerisinde ZnO partiküllerinin kullanılmasıyla ısıl iletkenliğin %15, propilen glikol içerisinde ZnO partiküllerinin kullanılmasıyla da ısıl iletkenliğin %9 kadar arttığı görülmüştür [20]. Nanoakışkan içerisinde daha homojen bir çözelti oluşturmak amacıyla partikül boyutu 30 nm'nin altında kullanılabilir. Daha önce yapılan çalışmalarda düşük boyuttaki nanoparçacık kullanımının deneyleri olumlu etkilediği görülmektedir [13]. Bu çalışmada ortalama 13 nm boyutundaki ZnO partiküllerinin kullanılması, homojen bir süspansiyon oluşması açısından önemli olmuştur ve sonuçları etkilemiştir. Nanoyağlayıcı uygulamaları ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, MoO₃ nanoparçacıkları kullanılmıştır. MoO₃ partiküllerinin süspansiyon içerisinde yağlayıcı özelliklerinin yüksek olduğu bilinmektedir [21]. Nanoyağlayıcı hazırlarken farklı özellikteki nanoparçacıkların kullanılmasının yanında baz sıvısı olarak PAG kullanılması çalışmada fark yaratmaktadır. Akkaya vd. çalışmalarında, baz sıvısı POE içerisinde farklı ağırlık yüzdelerinde alümina partiküllerinin eklenmesiyle elde edilen nanoyağlayıcıların kompresörde iş akışkanı olarak kullanılması sonucunda soğutma etkinlik katsayısını 4,53 olarak hesaplamıştır [22]. Bu çalışmada ise benzer koşullarda sisteme eklemeler yapılarak ve kullanılan nanoyağlayıcı değiştirilerek soğutma etkinlik katsayısı en yüksek 4,65 olarak hesaplanmıştır ve STK değerinde artış

gözlemlenmiştir. Kompresör kapasitesine bağlı olarak, baz sıvısı PAG ve ZnO ile MoO₃ nanoparçacıklarının güvenli bir şekilde soğutma sisteminde kullanılabilirdiği görülmektedir. Sistem içerisinde kullanılan nanoparçacık, yağ ve yüzey aktif maddelerin birbiriyle tepkimeye girmeden ve akışkanın bozulmadan sistemde çalıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kompresör yağı ile soğutucu akışkanın az da olsa karıştığı görülmektedir. Soğutucu akışkan ile hazırlanan nanoyağlayıcısında uyumlu bir şekilde çalıştığı ve sistemde herhangi bir zarar oluşturmadığı gözlemlenmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu deneysel çalışmada, buhar sıkıştırımlı bir soğutma çevrimindeki kompresörde, içerisinde ZnO ve MoO₃ nanoparçacıkları içeren PAG süspansiyonunun, kullanımıyla sistemin ısı performansındaki etkiler araştırılmıştır. Nanoyağlayıcı hazırlarken ortalama 13 nm ZnO ve 28 nm MoO₃ boyutlarına sahip nanoparçacıklar ile %0,5 ve %1,0 kütle oranlarında TX-100 yüzey aktif maddesi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Kompresörde iş akışkanı olarak farklı derişim ve özelliklerdeki nanoyağlayıcıların kullanılması sonucunda sistemin performans etkinlik katsayıları ve kompresörün harcamış olduğu enerji miktarları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki çıkarımlara ulaşılarak önerilerde bulunulmuştur.

- Çevrimde, kompresör yağı olarak saf POE yerine nanoyağlayıcı kullanılması, enerji verimliliği noktasında sisteme olumlu etki göstermiştir.
- MoO₃ nanoparçacıklarının yağlama özelliğinin yüksek olduğu ve nanoyağlayıcı uygulamalarında rahatlıkla kullanılabileceği görülmüştür.
- Nanoparçacık olarak kullanılan ZnO nanoparçacıklarının MoO₃ nanoparçacıklarına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. ZnO partiküllerinin daha küçük boyutta olması ve molekül kütlelerinin de daha az olması bu durumun nedeni olarak düşünülmektedir.
- ZnO nanoparçacıkları ile hazırlanan süspansiyonun daha homojen olduğu ve süspansiyonda topaklanmaların az olduğu görülmektedir.
- PAG ile nanoparçacıkların ve yüzey aktif maddenin tepkimeye girmeden uyumlu bir süspansiyon oluşturduğu gözlemlenmiştir.
- Soğutma sisteminin STK değeri; baz sıvısı PAG içerisine ağırlıkça %1,0 ve %1,5 oranında ZnO nanoparçacıklarının eklenmesiyle elde edilen nanoyağlayıcıların kompresör yağı olarak kullanılması sonucunda sırasıyla 4,37 ve 4,65 olarak hesaplanmıştır. Aynı oran ve özellikteki nanoyağlayıcının kullanımı sonucunda kompresör işi, entalpi değerlerine bağlı olarak sırasıyla 28,72 kJ/h ve 27,10 kJ/h olarak hesaplanmıştır.
- ZnO nanoparçacığının yerine MoO₃ nanoparçacığı aynı oranlarda kullanıldığında, STK değeri sırasıyla 4,14 ve 3,93 olarak hesaplanmıştır. Kompresör işi ise sırasıyla 30,48 kJ/h ve 31,98 kJ/h olarak hesaplanmıştır.
- Hazırlanan farklı derişim ve özelliklerdeki nanoyağlayıcıların buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde güvenli ve kararlı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir.
- MoO₃ nanoparçacıklarının sadece nanoakışkan uygulamalarında değil, nanoyağlayıcı ve nanosoğutucu uygulamalarında da kullanılabileceği öngörülmektedir.
- Soğutma sistemlerinde sistemin daha verimli çalışması noktasında farklı özellikte nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoyağlayıcılarda kompresör yağı olarak kullanılabileceği önerilmektedir.
- Nanoparçacıkların soğutucu gaz ile karıştırılmasıyla hazırlanacak nanosoğutucuların, sistemde kullanılmasıyla da enerji verimliliğinin sağlanabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Nanoparçacıkların analizlerinin yapıldığı Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkür ederim.

Yazarların Katkısı

Çalışmada tüm katkı yazara aittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Bozkurt A.U. 2008. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- [2] Yamankaradeniz R., Horoz İ., Coşkun S., Kaynaklı Ö., Yamankaradeniz N. 2012. İklimlendirme Esasları ve Uygulamaları. Dora Basım ve Yayın Ltd. Şti, Bursa, 1-602.
- [3] Kumar R., Singh, D.K., Chander S. 2020. An Experimental Approach to Study Thermal and Tribology Behavior of LPG Refrigerant and MO Lubricant Appended with ZnO Nanoparticles in Domestic Refrigeration Cycle. Heat and Mass Transfer, 56 (7): 2303-2311.
- [4] Pil Jang S., Choi S. U. 2007. Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity. Journal of Heat Transfer, 129 (5): 617-623.
- [5] Çiftçi E. 2020. AlN/Saf Su Nanoakışkanının Isı Borusu Performans Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8 (4): 858-871.
- [6] Sözen A., Variyenli H.I., Özdemir M.B., Gürü M. 2017. Upgrading the Thermal Performance of Parallel and Cross-flow Concentric Tube Heat Exchangers Using MgO Nanofluid. Heat Transfer Research, 48: 419-434.
- [7] Yu W., Xie H., Chen L., Li Y. 2009. Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of Ethylene Glycol Based ZnO Nanofluid. Thermochimica Acta, 491 (1-2): 92-96.
- [8] Lee G.J., Kim C.K., Lee M.K., Rhee C.K., Kim S., Kim C. 2012. Thermal Conductivity Enhancement of ZnO Nanofluid Using a One-step Physical Method. Thermochimica Acta, 542: 24-27.
- [9] Goodarzi M., Toghraie D., Reiszadeh M., Afrand M. 2019. Experimental Evaluation of Dynamic Viscosity of ZnO–MWCNTs/Engine Oil Hybrid Nanolubricant Based on Changes in Temperature and Concentration. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 136 (2): 513-525.
- [10] Senthilkumar A., Sahaluddeen P.M., Noushad M.N., Musthafa E.M. 2020. Experimental Investigation of ZnO/SiO₂ Hybrid Nano-lubricant in R600a Vapour Compression Refrigeration System. Materials Today: (Proceedings), Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.180>.
- [11] Subhedar D.G., Patel J.Z., Ramani B.M. 2020. Experimental Studies on Vapour Compression Refrigeration System Using Al₂O₃/Mineral oil Nano-lubricant. Australian Journal of Mechanical Engineering, 1-6.
- [12] Deokar P.S., Cremaschi L. 2020. Effect of Nanoparticle Additives on the Refrigerant and Lubricant Mixtures Heat Transfer Coefficient During in-tube Single-Phase Heating and Two-Phase Flow Boiling. International Journal of Refrigeration, 110: 142-152.
- [13] Akkaya M., Menlik T., Sözen A., Gürü M. 2020. Experimental Investigation of Nanolubricant Usage in A Cooling System at Different Nanoparticle Concentrations. Heat Transfer Research, 51 (10): 949-965.
- [14] Sun J., Meng Y., Zhang B. 2021. Tribological Behaviors and Lubrication Mechanism of Water-based MoO₃ Nanofluid during Cold Rolling Process. Journal of Manufacturing Processes, 61: 518-526.
- [15] Muhammad W., Ullah N., Haroon M., Abbasi B.H. 2019. Optical, Morphological and Biological Analysis of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO NPs) Using Papaver Somniferum L. RSC Advances, 9 (51): 29541-29548.
- [16] Bin L., Daheng Y., Jiuju C., Xiaolei Y., Qinggang M. 2011. Sonochemical Preparation and Characterization of MoO₃ and MoS₂ Nanoparticles. In: MSIE, IEEE: 1083-1086.

- [17] Embraco F.F. 2021. 8.5 HBK. <https://www.cantas.com/urun/embraco-ff-85-hbk/> (Erişim Tarihi: 06.01.2021).
- [18] Holman J.P. 2001. *Experimental methods for engineers* (7th edition). New York: McGraw-Hill.
- [19] Cengel Y.A., Boles M.A. 2007. *Thermodynamics: An Engineering Approach* 6th Edition (SI Units). The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [20] Akbarzadeh S., Farhadi M., Sedighi K., Ebrahimi M. 2014. Experimental Investigation on the Thermal Conductivity and Viscosity of ZnO Nanofluid and Development of New Correlations. *Transp Phenom Nano Micro Scales*, 2 (2): 149-160.
- [21] Ezırmık K.V., Ürgen M. 2010. MoN-Ag Nanokompozit Kaplamaların Tribolojik Özellikleri. *ITU Journal Series D: Engineering*, 9 (2).
- [22] Akkaya M., Menlik T., Sözen A. 2021. Performance Enhancement of a Vapor Compression Cooling System: An Application of POE/Al₂O₃. *Politeknik Dergisi*, (Erken Görünüm). Doi: <https://doi.org/10.2339/politeknik.679563>.