



İçerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların pulsatif akışının ısı transferine etkisinin parametrik incelenmesi

Parametric investigation of effect on heat transfer of pulsating flow of nanofluids in a tube using circular rings

Selma AKÇAY^{1*}, Ünal AKDAĞ²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye.
selma.352@hotmail.com

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Aksaray üniversitesi, Aksaray, Türkiye.
uakdag@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 10.10.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 20.12.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.70120

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, içerisine dairesel halkalar yerleştirilmiş olan bir boruda laminer pulsatif akış giriş şartlarında nanoakışkanların ısı transferi ve sürtünme faktörüne etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarda korunum denklemleri, FLUENT ANSYS 15.0 paket programı kullanılarak, tariflenen sınır şartlar için sonlu hacim metodu (SHM) ile ayrıntılandırılmış ve SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüştür. İlk olarak farklı Reynolds sayılarında ve değişen partikül hacim oranlarındaki farklı nanoakışkan tiplerinin sürekli akış şartlarında ısı transferine etkileri analiz edilmiştir. Daha sonra en iyi ısı transferi sağlayan bu nanoakışkan parametreleri sabit tutularak nanoakışkanların pulsatif akışının ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Farklı pulsatif parametreler için ortalama Nusselt sayısı ve ortalama sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Sayısal sonuçlar sürekli akış durumunda Reynolds sayısının ve partikül hacim oranının artması ile ısı transferinin iyileştiğini göstermiştir. Ayrıca nanoakışkanların pulsatif akışı durumunda pulsatif parametrelerin artması ile sürtünme faktöründe bir miktar artış ile birlikte ısı transferinde iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, içerisnde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların pulsatif akışının ısı transferi iyileşmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nanoakışkan, Pulsatif akış, Dairesel halka, ısı transferi, Sayısal çalışma

Abstract

In this study, the heat transfer characteristics and friction factor of nanofluids under laminar pulsating inlet flow conditions in a tube with circular rings are investigated numerically. In investigations, the governing equations are solved with FLUENT ANSYS 15.0 package program, along with boundary conditions using the finite volume approach (FVM) by SIMPLE algorithm. Firstly, the effects on heat transfer of different nanofluid types with varying particle volume fractions and Reynolds numbers under steady flow conditions are analyzed. Then, these nanofluids parameters are kept constant and the effects on heat transfer under pulsating flow conditions of nanofluids are investigated. The average Nusselt number and friction factor are calculated for different pulsating parameters. The numerical results indicate that the heat transfer performance enhances with increase in particle volume fraction and Reynolds number in steady regime. It is observed that the heat transfer performance increases with increasing pulsating amplitude in pulsating nanofluid flow, and there is a slightly increase in pressure drop. The computed results reveal that there is a good potential in promoting the heat transfer enhancement by using the nanoparticles under pulsating flow in a tube with circular rings.

Keywords: Nanofluid, Pulsating flow, Circular ring, Heat transfer, Numerical study

1 Giriş

Isıtma ve/veya soğutma sistemlerinde kullanılan termal cihazların ısı transferi etkinliğini artırmak için alternatif yöntemler üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Dalgalı yüzey geometrilerinin kullanılması [1]-[3], boru içine farklı geometrilerde kanatçıklar, bükülmüş şeritler ve halkalar gibi türbülötörlerin eklenmesi bu yöntemlerden bazılarıdır [4]-[8]. Pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri olarak bilinen bu yöntemlerin üretimi oldukça basittir ve sistemin çalışması esnasında harici güç tüketimine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu cihazların tasarımında temel gaye ısı transferi etkinliğini iyileştirirken akış direncini en aza indirmektir. Bir boru içerisine eklenmiş kanatçıklar, bükülmüş şeritler, halkalar gibi türbülötörlerin kullanılması ile akış ve ısı transferi pek çok araştırmacı tarafından sayısal ve deneysel olarak incelenmiş ve bu çalışmaların sonucunda boru içine eklenen türbülötörlerin ısı transferi etkinliğini önemli derecede iyileştirdiği bildirilmiştir [9]-[14]. Özceylan ve diğ. [15], çalışmalarında dairesel halkalar içeren bir tüp içerisinde ısı transferi

performansını beş farklı halkalar arası mesafe ($p = d/2, d, 3d/2, 2d, 3d$) için ve Reynolds sayısının geniş bir ($4475 \leq Re \leq 43725$) aralığında sayısal olarak incelemişler ve en iyi ısı transferi performansının ($p = 3d$) halkalar arası mesafede ve $Re = 15600$ değerinde %18 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir. Gunes ve diğ. [16], içerisnde sarmal tel bulunan bir boruda ısı transferi performansını türbülanslı akış şartlarında farklı geometrik parametreler ($P/D = 1, 2, 3$) için deneysel olarak incelemişler ve Re sayısının ve aralık-çap oranının (P/D) azalması ile ısı transferinin ve sürtünme faktörünün arttığını belirtmişlerdir. Sheikholeslami ve diğ. [17], deneysel çalışmalarında delikli helisel türbülötörlerin ısı transferi ve sürtünme faktörüne etkilerini farklı Reynolds sayıları ($6000 \leq Re \leq 12000$) ve farklı geometrik parametreler için analiz etmişler, akış ve ısı transferinin geometrikparametrelerden önemli derecede etkilendiğini bildirmişlerdir. Keklikcioglu ve Özceylan [18], kıvrımlı tel eklenmiş bir tüpteki ısı performansını üç farklı aralık çap oranlarında ($P/D = 1, 2, 3$) ve Reynolds sayısının geniş bir aralığında ($3429 \leq Re \leq 26663$) deneysel olarak

incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda içerisinde kıvrımlı tel eklenen borudaki ısı performansın düz boruya göre daha yüksek olduğunu ve sürtünme faktörünün de bir miktar arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca en yüksek ısı performansın en düşük aralık çap oranında $P/D = 1$ ve en düşük Re sayısında ($Re = 3429$) 1.82 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir.

Jasiński [19], içinde top şeklinde türbülatorlerin bulunduğu daire kesitli bir boru akışında $10000 \leq Re \leq 300000$ aralığındaki Re sayılarında farklı top çapları ve farklı toplar arası mesafelerde ısı performansı incelemek için sayısal bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, artan Re sayılarında toplar arası mesafenin en büyük ve top çapının en küçük olduğu durumda en iyi ısı performansın ($\eta = 1.22$) elde edildiğini gözlemlemiştir. Chingtuaythong ve diğ. [20], içerisinde V şeklinde halkaların olduğu borulu ısı değiştiricilerinde dört farklı halka aralıkları ($RP = P/D = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) ve üç farklı halka blokaj oranlarında ($RP = e/D = 0.1, 0.15, 0.2$), ($5000 \leq Re \leq 25000$) aralığındaki Re sayılarında ısı transferi ve sürtünme faktörünü akışkan olarak hava kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar ile halka blokaj oranındaki artma ile ısı transferinin ve sürtünme faktörünün iyileştiğini fakat halkalar arası mesafenin artması ile ısı transferinin düştüğünü bildirmişlerdir. En yüksek ısı performansın $RB = 0.1$ ve $RP = 1.0$ değerlerinde 1.63 olarak elde edildiğini belirterek, V halkalarının kullanılması ile eğimli halkalar, tel bobinler ve bükülmüş bantlar gibi diğer vorteks üreten cihazlara göre çok daha yüksek ısı transferi performansı elde edildiğini bildirmişlerdir. Chang ve diğ. [21], ikili ve dörtlü helisel yapıları türbülatorlerin bulunduğu bir tüp içerisinde akış ve ısı transferini 750-70000 aralığındaki Re sayılarında deneysel olarak incelemişler ve laminer akıştaki ısı transferi performansının türbülanslı akıştan daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

Isı transferinde temel akışkanın taşınım özelliklerinin yetersiz olması nedeniyle temel akışkanın taşınım özelliklerini iyileştirmek için temel akışkana nanoboyutlu partiküller ilave edilmektedir. Nanopartiküllerin kullanılması akışkanın ısı iletkenliğini artırması nedeniyle ısı değiştiricileri ve elektronik parçalar gibi cihazların ısı transferi performansını artırırken akışta bir direnç oluşturarak basınç düşümünde de bir miktar artışa neden olmaktadır. Literatürde, içerisinde kıvrımlı şerit eklenmiş bir boruda nanoakışkanların ısı transferine etkilerini inceleyen pek çok sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır [22]-[25].

Azmi ve diğ. [26], içerisinde kıvrımlı şerit eklenmiş bir boruda SiO_2 -su nanoakışkanın türbülanslı akıştaki, akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemişler ve saf su ile karşılaştırıldığında ısı transferi performansının iyileştiğini bildirmişlerdir. Yang ve diğ. [27], sabit duvar sıcaklığında üç boyutlu yay çubuklu-oluklu kanallarda tek ve iki fazlı modeller kullanarak nanoakışkanların türbülanslı akıştaki ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak ortalama Nu sayısının geometrik parametrelerden, nanoakışkandan ve Re sayısından etkilendiğini bildirmişlerdir. Eiamsa-Ard ve Wongcharee [28], yarı dairesel kanatlı şeritler kullanılan bir dalgalı boruda $8000 \leq Re \leq 15000$ aralığındaki Re sayılarında üç farklı partikül hacim oranları için ($\varphi = \%0.05, \%0.1, \%0.15$), TiO_2 -su nanoakışkanın ısı transferi performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel sonuçlarda, kanat açısının artması ile ısı transferi performansının iyileştiğini ve en yüksek ısı performansın 75° kanat açısında, $\%0.15$ partikül hacim oranında ve $Re = 8000$ değerinde 1.98 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir.

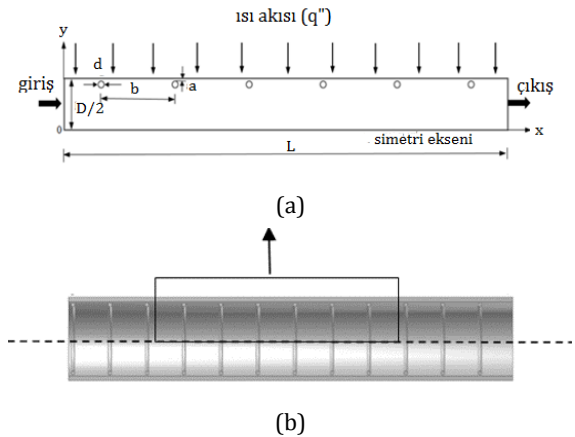
Yapılan literatür çalışmalarında boru içerisine ilave edilen türbülatorlerin uygun parametrelerin seçilmesi halinde akış ve ısı transferi üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu, temel akışkana nanopartiküllerin eklenmesi halinde de ısı transferinin daha da iyileşebileceği görülmektedir. Ancak uygun parametrelerin bulunmasına yönelik çalışmalar halen devam etmektedir. Literatür çalışmalarından, içerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların sürekli ve pulsatif akışının akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı görülmektedir. Bu çalışmada, içerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların laminer pulsatif akışı farklı nanoakışkan parametreleri ve pulsatif parametreler kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada pasif ve aktif ısı transferi iyileştirme yöntemleri birlikte kullanılmış ve bu yöntemlerin akış ve ısı transferine etkileri verilen parametreler için analiz edilmiştir.

2 Sayısal çalışma

2.1 Sayısal model ve kullanılan denklemler

Şekil 1'de, çalışmada kullanılan dairesel halkalar içeren borunun şematik görünümü verilmiştir. Bu çalışmada, Özceylan ve diğ. [15] tarafından kullanılan geometriye benzer bir geometri kullanılmıştır. Boru içerisindeki dairesel halkalar, boru duvarlarından $a = 0.6 \text{ mm}$ mesafeye yerleştirilmiştir. Halka çapı (d) ve halkalar arası eksenel mesafe (b) sırasıyla 1.2 mm ve 18 mm olarak alınmıştır. Boru çapı (D) 18 mm ve boru uzunluğu (L) 108 mm'dir. Geometri iki boyutlu ve eksenel simetrik olarak düşünülmüştür. Çalışmada geometrik parametreler sabit tutulmuştur.

Nanoakışkanın, Newton-tipi, tam gelişmiş, laminer sıkıştırılmaz, iki boyutlu, tek fazlı ve sürekli akış şartlarında olduğu, nanopartiküller ile suyun karışımının homojen olduğu, aynı akış ve ısı şartlarında kanala girdiği kabul edilmiştir. Yerçekimi ve radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu kabuller altında problemin çözümünde kullanılan korunum denklemleri Eşitlik (1)-(3) ile aşağıda verilmiştir.



Şekil 1: (a): Dairesel halkalara sahip borunun temel geometrisi, (b): Kullanılan geometrinin sembolik gösterimi.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_j \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{RePr} \nabla^2 T \quad (3)$$

2.2 Sayısal metod ve grid bağımsızlığı

Bu çalışmanın çözümü için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı çözüm yapan ANSYS FLUENT 15.0 [29] paket programı kullanılmıştır. Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılması sonlu hacim metodu (SHM) ile çözümleri ise SIMPLE algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yakınsama kriteri olarak tüm denklemler için 10^{-6} alınmıştır.

Grid bağımsızlığı için kullanılan geometriye farklı hücre sayıları uygulanmış ve her bir hücre sayısı için Nusselt sayısı hesaplanmıştır. Tablo 1'de laminer akışta hücre sayısına göre elde edilen Nu sayıları ve bir sonraki hücre sayısına göre Nu sayısındaki yüzde (%) değişim değerleri verilmiş olup 34580 hücre sayısından sonra Nu sayısının çok fazla değişmediği gözlenmiş ve yapılan çalışmada 34580 hücre sayısı kullanılmıştır.

Tablo 1: Hücre sayıları ile Nu sayılarının değişimi.

Hücre Sayısı	Nusselt Sayısı	Değişim Oranı, %
23562	10.12	11.46
28454	11.43	4.27
34580	11.94	0.75
42128	12.03	0.66
50342	12.11	-

2.3 Nanoakışkanların termo-fiziksel özellikleri

Nanoakışkanların termo-fiziksel özellikleri temel olarak ısı iletkenlik, viskozite, yoğunluk ve ısı kapasitesini içermektedir. Bu çalışmada, nanopartiküllerin suyun içerisinde homojen olarak dağıldığı kabul edilerek nanoakışkanların termo-fiziksel özellikleri elde edilmiştir. Nanoakışkanların yoğunluğu ve özgül ısı Eşitlik (4)-(5) ile [30], ısı iletkenliği Eşitlik (6) ile [31], viskozitesi ise Eşitlik (7) ile [32] hesaplanmıştır.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{pf} \quad (4)$$

$$C_{nf} = (1 - \varphi)C_{bf} + \varphi C_{pf} \quad (5)$$

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - 2k_{np})}{k_{np} + 2k_{bf} + 2\varphi(k_{bf} - 2k_{np})} \quad (6)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 1.25\varphi) \quad (7)$$

Burada, nf , pt ve bf alt indisleri sırasıyla nanoakışkanı, nanopartikülü ve temel akışkanı göstermektedir.

Tablo 2'de suyun ve kullanılan nanopartiküllerin termo-fiziksel özellikleri verilmiştir.

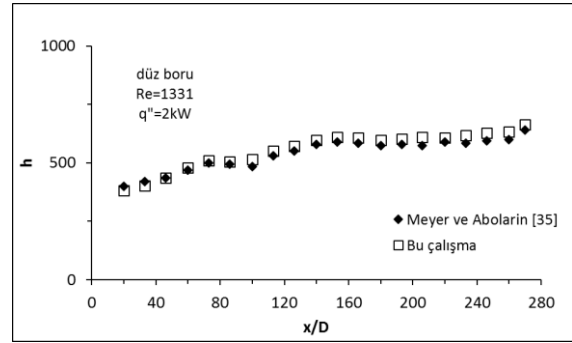
Tablo 2: Suyun ve nanopartiküllerin termo-fiziksel özellikleri.

	H ₂ O	SiO ₂	CuO	Al ₂ O ₃
ρ	998	255	650	3880
C_p	4182	710	540	733
k	0.62	1.4	18	46
μ	0.001	-	-	-

Nanoakışkanların termo-fiziksel özellikleri (özellikle ısı iletkenlik, viskozite ve ısı kapasitesi) literatürdeki farklı eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve bu eşitliklerin sonucu ne kadar değiştirdiği analiz edilmiştir. Elde edilen değerlerin çok fazla değişmediği (en fazla %1.6) gözlenmiştir [33], [34].

3 Tartışma ve sonuçlar

Bu çalışmada, sayısal çözümün geçerliliğini belirlemek için, Meyer ve Abolarin [35] tarafından yapılan deneysel çalışmaya ait $D = 19mm$ çapında ve yüzeylerine $q'' = 2kW$ sabit ısı akısı uygulanmış dairesel kesitli düz bir boru geometrisi kullanılarak $Re = 1331$ değeri için boru boyunca x/D mesafeleri ile h , ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Ref. [35]'e ait deneysel çalışma sonuçları ile yapılan sayısal çalışma sonuçları karşılaştırılarak aralarındaki uyum Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Bu çalışmanın referans [35] ile doğrulanması.

Bu çalışmada, içerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda ısı transferi ve sürtünme faktörü iki aşamada incelenmiştir. İlk aşamada, nanoakışkanların sürekli akışı, ikinci aşamada ise nanoakışkanların pulsatif akışı incelenmiştir. Her iki durumda da geometrik parametreler sabit tutulmuştur.

İlk olarak içerisinde dairesel halkaların olduğu boruda, sürekli akış şartlarında, farklı Re sayılarında, değişen partikül hacim oranları ile farklı nanoakışkan tiplerinin ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Analizler, Al₂O₃, CuO ve SiO₂ olmak üzere üç farklı nanoakışkan tipinde, değişen partikül hacim oranlarında ($\varphi = \%1, \%2, \%3$) ve Reynolds sayısının $20 \leq Re \leq 500$ aralığı için uygulanmıştır. Temel akışkan olarak su kullanılmıştır. Nanoakışkanların sürekli akışı için sayısal çözüm parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Sürekli akış için sayısal çözüm parametreleri.

Nanoakışkan	Hacim oranı: (φ %)	Reynolds sayısı: Re
Al ₂ O ₃ -su	1, 2, 3	20, 50, 100, 200,
CuO-su	1, 2, 3	20, 50, 100, 200,
SiO ₂ -su	1, 2, 3	20, 50, 100, 200,

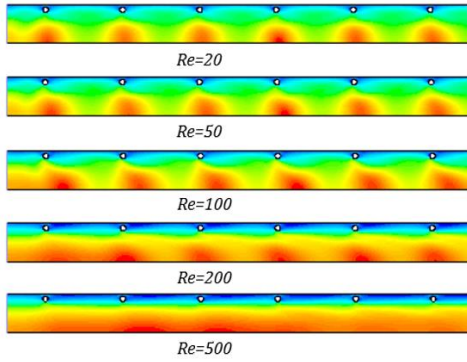
Sürekli akış şartlarında tam gelişmiş akış koşullarını yansıtmak için boru girişinde Eşitlik (8)'te verilen parabolik hız profili tariflenmiştir.

$$U_r = 2U_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (8)$$

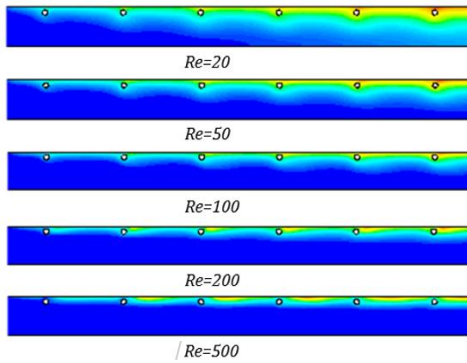
Akışkanın boruya $T_o = 293K$, üniform bir sıcaklık ile girdiği kabul edilmiştir. Nanoakışkanların sürekli akışı için boru girişinde "hız girişi" sınır şartı, boru çıkışında "dışa akış" sınır şartı tariflenmiştir. Tüm boru yüzeylerine $q'' = 3000 W/m^2$

değerinde sabit ısı akısı uygulanmıştır. Boru duvarlarında kaymama sınır şartı tariflenmiştir. Belirtilen bu sınır şartlar altında farklı nanoakışkan tipleri, partikül hacim oranları ve Re sayıları için Nu sayısı ve sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Test edilen Re sayılarında en iyi ısı transferi performansını sağlayan nanoakışkan tipi ve partikül hacim oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca sürekli akış ve pulsatif akış durumları için boru içindeki hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.

Şekil 3'te CuO-su nanoakışkanın $\phi = \%3$ partikül hacim oranı için değişen Re sayılarında boru içindeki hız dağılımları (a) ve sıcaklık dağılımları (b) gösterilmiştir. Re sayısının boru içindeki hız ve sıcaklık dağılımını önemli derecede etkilediği, ayrıca, sıcaklık konturlarından, yüksek Re sayılarında boru cidarındaki sıcaklığın daha fazla azaldığı görülmektedir.



Şekil 3: (a): Re ile hız konturlarının değişimi (CuO-su, $\phi = \%3$).



Şekil 3: (b): Re ile sıcaklık konturlarının değişimi (CuO-su, $\phi = \%3$).

Nu sayısının hesabı için önce Eşitlik (9) ile ısı taşınım katsayısı, h (W/m^2K) tariflenmiştir, daha sonra Eşitlik (10) ile her bir nanoakışkan için Nu sayısının değeri hesaplanmıştır.

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_f)} \quad (9)$$

Burada, T_w , boru duvar sıcaklığını, T_f ise $T_f = (T_g + T_c)/2$ olup akışkanın film sıcaklığını ifade etmektedir.

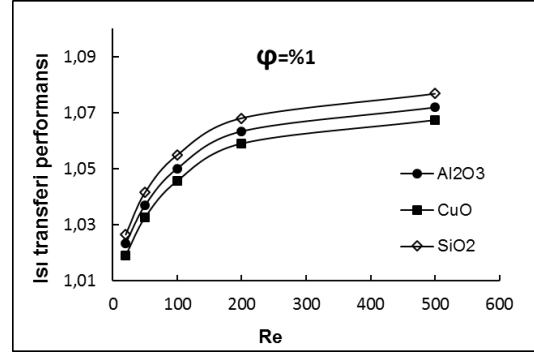
$$Nu_{nf} = \frac{hD}{k_{nf}} \quad (10)$$

Isı transferi etkinliğini belirlemek için Eşitlik (11) ile ısı transferi performansı (ϵ) tariflenmiştir.

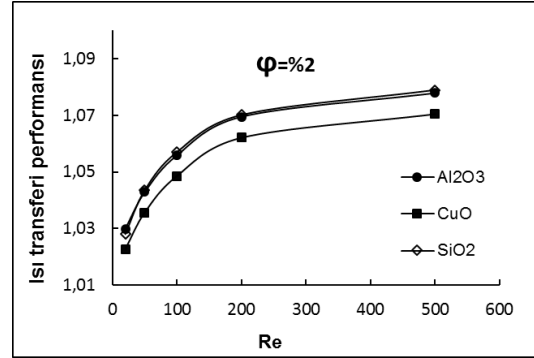
$$\epsilon = \frac{Nu_{nf}}{Nu_s} \quad (11)$$

Burada, Nu_{nf} nanoakışkanlar için hesaplanan Nu sayısını, Nu_s ise saf su için elde edilen Nu sayısını ifade etmektedir. Isı transferi performansının (ϵ), 1'den büyük olması ısı transferinde bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

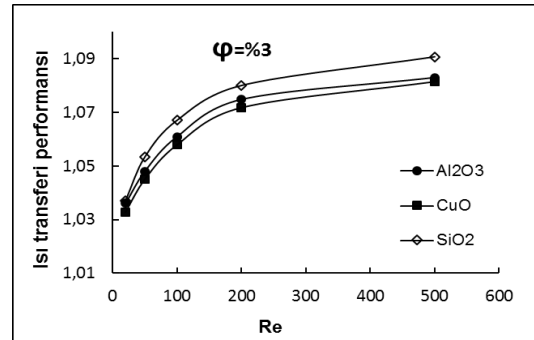
Şekil 4a, b, c'de sırasıyla $\phi = \%1, \phi = \%2, \phi = \%3$ partikül hacim oranları için nanoakışkan tiplerine ve Re sayısına bağlı olarak ısı transferi performansının değişimi verilmiştir.



4 (a): $\phi = \%1$ için.



4 (b): $\phi = \%2$ için.



4 (c): $\phi = \%3$ için.

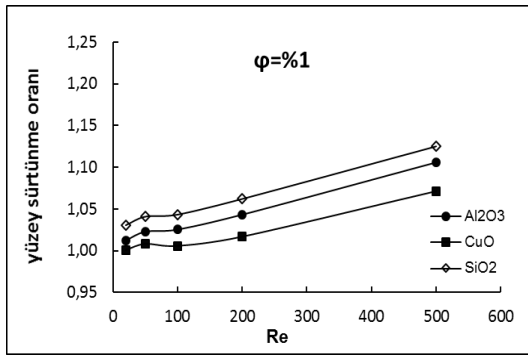
Şekil 4: Re sayısı ve nanoakışkan tipleri ile ısı transferi performansının değişimi.

Şekil 4'ten ısı transferi performansının Re sayısından, nanoakışkan tiplerinden ve partikül hacim oranlarından önemli derecede etkilendiği görülmektedir. Her nanopartikül tipi için Re sayısı arttıkça ısı transferi performansının da arttığı ve partikül hacim oranındaki artışın ısı performansı iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca her üç nanoakışkan için en yüksek ısı transferi iyileşmesi SiO₂-su nanoakışkan için elde edilmiş olup bu iyileşmeyi sırasıyla Al₂O₃-su ve CuO-su nanoakışkanlar izlemiştir.

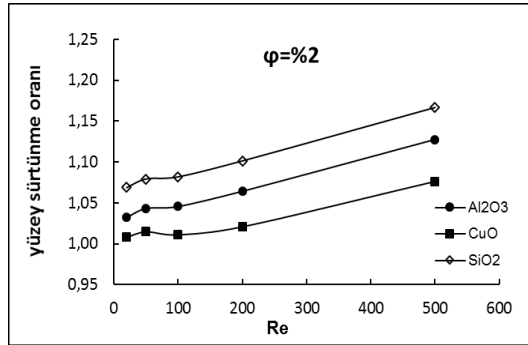
Akışkan içerisindeki nanopartiküllerin kendi aralarında ve dairesel halkalarla çarpışması ve etkileşimi nedeniyle kayma

gerilmesinde önemli miktarda bir artış meydana gelecektir. Literatür çalışmalarından da temel akışkana nanopartiküllerin ilave edilmesinin duvar kayma gerilmesi üzerinde ters bir etkiye neden olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni ise nanoakışkanların temel akışkana göre daha yüksek viskozite değerine sahip olmasıdır. İçerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların neden olduğu basınç düşümünü değerlendirmek için yüzey sürtünme oranı $r = f_{nf}/f_s$, tariflenmiştir. Burada, f_{nf} , nanoakışkan için elde edilen sürtünme faktörü ve f_s , ise saf su için elde edilen sürtünme faktörüdür.

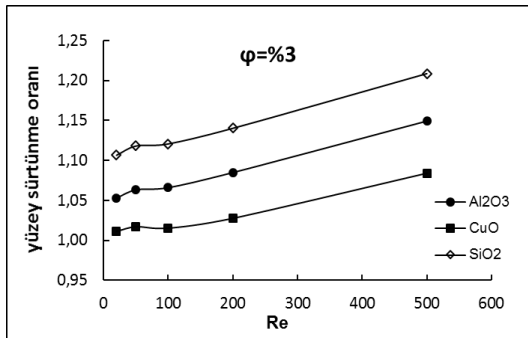
Şekil 5a, b, c ile sırasıyla $\varphi = \%1$, $\varphi = \%2$, $\varphi = \%3$ partikül hacim oranları için nanoakışkan tiplerine ve Re sayısına bağlı olarak yüzey sürtünme oranlarının değişimi verilmiştir. Şekil 5'ten yüzey sürtünme oranının Re sayısından, partikül hacim oranından ve nanoakışkan tipinden oldukça etkilendiği görülmektedir. Her üç nanoakışkan için Re sayısının ve nanopartikül hacim oranının artması ile yüzey sürtünme oranı arttığı görülmektedir.



5 (a): $\varphi = \%1$ için.



5 (b): $\varphi = \%2$ için.

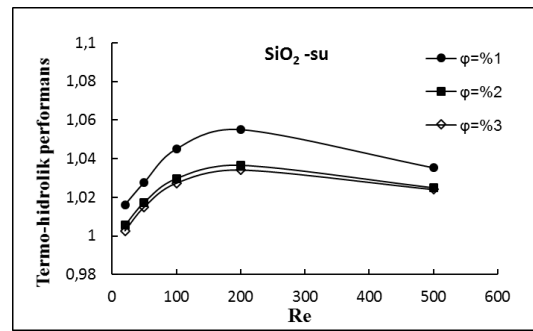


5 (c): $\varphi = \%3$ için.

Şekil 5: Re sayısı ve nanoakışkan tipleri ile yüzey sürtünme oranının değişimi.

En yüksek ısı transferi performansı sürekli akış için $Re=500$ değerinde SiO_2 -su nanoakışkanın $\varphi = \%3$ partikül hacim oranında 1.095 olarak elde edilmiştir. Yine en yüksek yüzey sürtünme oranı ise SiO_2 -su nanoakışkan için $\varphi = \%3$ partikül hacim oranında 1.20 olarak elde edilmiştir. Isı transferindeki bu iyileşmenin borudaki sürtünme oranına oranlanması ile termo-hidrolik performans (THP) elde edilmektedir. THP , boru içinde meydana gelen sürtünmeye rağmen ısı transferinde bir iyileşme olduğunu göstermektedir. SiO_2 -su nanoakışkan için termo-hidrolik performans, Wang ve Sunden [36] tarafından yapılan çalışma referans alınarak Eşitlik (12) ile hesaplanmış ve Re sayısı ve partikül hacim oranına bağlı olarak elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.

$$THP = \frac{(Nu_{nf}/Nu_s)}{(f_{nf}/f_s)^{1/3}} \quad (12)$$



Şekil 6: Re sayısı ve partikül hacim oranları ile termo-hidrolik performansın değişimi (SiO_2 -su).

Şekil 6'da da görüldüğü gibi çalışılan tüm partikül hacim oranları ve Re sayıları için termo-hidrolik performansta bir artış söz konusudur. Ancak en yüksek THP artışı $Re = 200$ 'de düşük partikül hacim oranında ($\varphi = \%1$) elde edilmiştir. Bu durum partikül hacim oranındaki artışın boru içindeki sürtünme faktörünü artırması nedeniyle termo-hidrolik performans da azalmaya yol açtığı şeklinde açıklanabilir. Düşük partikül hacim oranlarında sürtünme faktörünün daha az olması THP 'ta artışa neden olmuştur.

İlk aşamada çalışılan parametreler arasında en iyi ısı transferi performansını sağlayan parametreler ($Re = 500$, $\varphi = \%3$, SiO_2 -su nanoakışkan) tespit edilmiştir. İkinci aşamada bu en iyi ısı transferi performansını sağladığı parametreler sabit tutularak nanoakışkanların pulsatif akış şartlarındaki akış ve ısı transferi incelenmiştir. Spesifik nanoakışkan tipi, partikül hacim oranı ve Re sayısında pulsatif genlik ve pulsatif frekans değiştirilerek çevrim ortalamalı Nu sayısı ve sürtünme faktörü hesaplanmıştır. Çalışmada pulsatif genlik $Ao = 1, 2, 3$ olmak üzere üç kez, pulsatif frekansı ifade eden Strouhal sayısı $St = 1, 2, 3, 4$ olmak üzere dört kez değiştirilmiştir.

Zamana bağlı çözümler için boru girişinde sinüsoidal pulsatif terimlerin eklenmesi ile tam gelişmiş Poiseuille akışı uygulanmıştır [37]. Giriş hız profilinin boyutsuz formdaki gösterimi Eşitlik (13)'te sunulmuştur.

$$U(Y, \tau) = \frac{3}{2} u_o (1 - (Y - 1)^2 [1 + A_o \sin(2\pi St \tau)]) \quad (13)$$

Burada, A_o boyutsuz genliği ($A_o = x_m/D_h$), τ boyutsuz zamanı, St Strouhal sayısını ($St = fL/U$ ve $f = \omega/2\pi$) ifade etmektedir. Diğer sınır şartların, sürekli akış için uygulanan sınır şartlar ile aynı olduğu kabul edilmiştir.

Pulsatif akış ile ısı transferinde pulsatif genlik ve pulsatif frekans iki önemli parametredir. Bu pulsatif parametreler nedeniyle boru içinde periyodik bir akış meydana gelmektedir ve ısı transferi de periyodik olarak elde edilmektedir. Bu nedenle pulsatif akışlarda zamana bağlı ısı transferi hesaplamaları bir çevrim üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bir çevrimi ifade etmek için " $\tau = \omega t$ " şeklinde faz açılarından yararlanılmıştır. 2π radyan ya da 360° bir çevrimi göstermektedir. Sistem tamamen periyodik hale geldikten sonra sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Nanoakışkanların pulsatif akışı için ısı transferi, çevrim ortalamalı Nu sayısı ile hesaplanmıştır. Bunun için önce h_x yerel ısı taşınım katsayısı Eşitlik (14) ile tariflenerek zaman ortalamalı ısı taşınım katsayısı $h(x, t)$ Eşitlik (15) ile elde edilmiştir. Zaman ortalamalı ısı taşınım katsayısından çevrim ortalamalı Nu sayısı Eşitlik (16) ile hesaplanmıştır.

$$h_x = \frac{q''}{(T_{w,x} - T_\infty)} \quad (14)$$

$$h_{ort} = \frac{1}{\tau L} \int_0^L \int_0^\tau h(x, t) dt dx \quad (15)$$

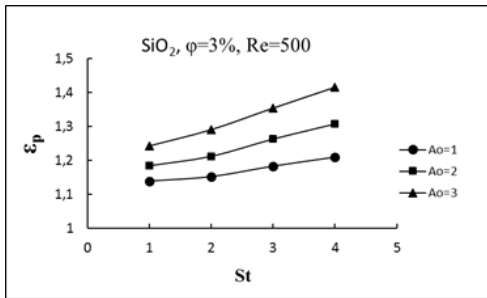
$$Nu_p = \frac{q'' L}{k_{nf}(T_w - T_\infty)} \quad (16)$$

Burada, τ çevrimin boyutsuz zaman periyodu, L ise ısıtılmış boru uzunluğudur. Nanoakışkanların pulsatif akışı için ısı transferi performansı ε_p , Eşitlik (17) ile tariflenmiştir.

$$\varepsilon_p = \frac{Nu_p}{Nu_{nf}} \quad (17)$$

Burada, Nu_p nanoakışkanların pulsatif akışı için elde edilen Nu sayısı, Nu_{nf} ise nanoakışkanların sürekli akışı için elde edilen Nu sayısını göstermektedir. İçerisinde dairesel halkaların bulunduğu nanoakışkanların pulsatif akışı için yüzey sürtünme oranı $r_p = f_p / f_{nf}$, olarak tariflenmiştir. Burada f_p nanoakışkanların pulsatif akışı için elde edilen yüzey sürtünme katsayısını, f_{nf} nanoakışkanın sürekli akış şartlarında elde edilen yüzey sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

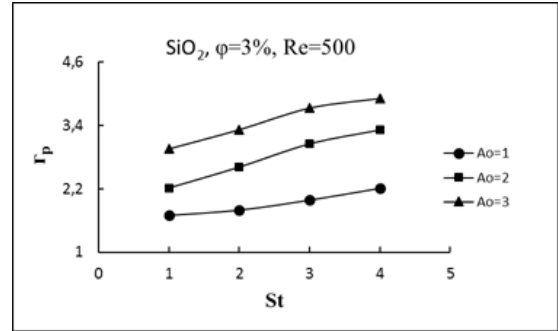
Şekil 7 ile SiO_2 -su nanoakışkanın $\phi = \%3$ partikül hacim oranında, sabit bir Re sayısı ($Re = 500$) için pulsatif parametrelere bağlı olarak ısı transferi performansının değişimi verilmiştir.



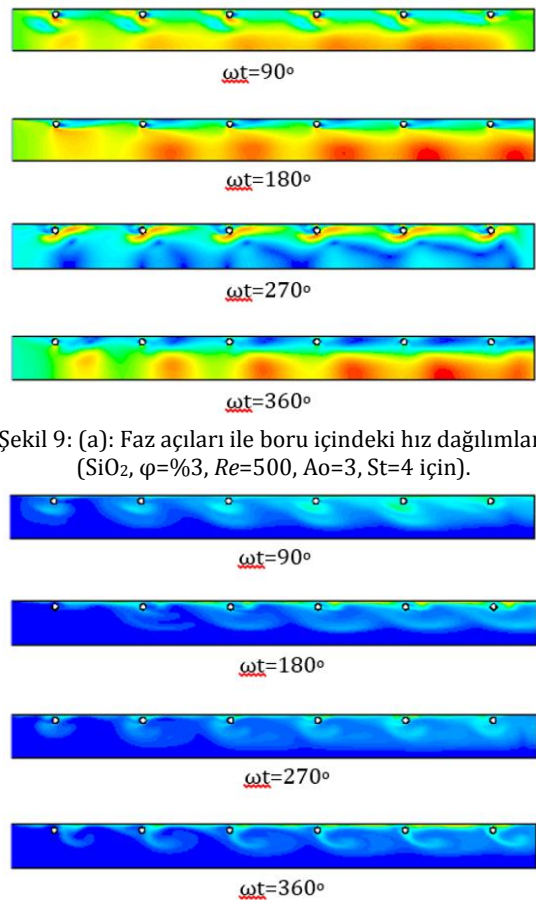
Şekil 7: Pulsatif genlik ve pulsatif frekansla ısı transfer performansının değişimi (SiO_2 , $\phi = \%3$, $Re = 500$ için).

Şekil 8'de ise SiO_2 -su nanoakışkanın $\phi = \%3$ partikül hacim oranında, sabit bir Re sayısı ($Re = 500$) için pulsatif parametrelere bağlı olarak sürtünme oranının değişimi

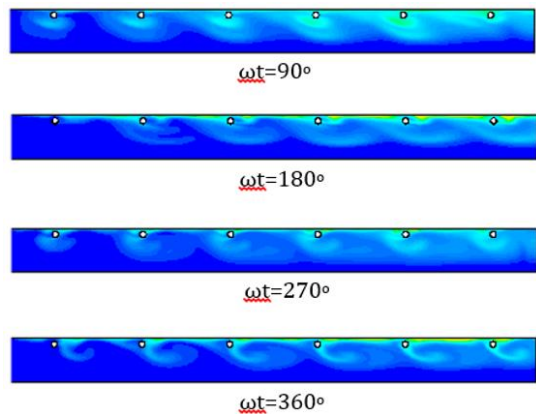
verilmiştir. Şekil 7 ve 8 nanoakışkanların pulsatif akışı için elde edilen ısı transferi performansının ve sürtünme oranının pulsatif parametrelerden önemli derecede etkilendiğini göstermektedir. Nanoakışkanların sürekli akış şartları ile karşılaştırıldığında pulsatif genlik ve pulsatif frekansın (St sayısı) artması ile ısı transferi performansının ve sürtünme oranının da arttığı gözlenmektedir. Şekil 9'da SiO_2 -su nanoakışkanın $\phi = \%3$ partikül hacim oranında ve $Re = 500$ 'te, pulsatif genlik $Ao = 3$, pulsatif frekans $St = 4$ için değişen faz açıları ile (bir çevrim boyunca) boru içindeki hız dağılımları (a) ve sıcaklık dağılımlarının çevrim boyunca değiştiği, boru içindeki akışkanın pulsatif akıştaki salınımlar nedeniyle daha iyi karıştığı ve bu durumun da ısı transferi performansının iyileşmesine neden olduğu görülmektedir.



Şekil 8: Pulsatif genlik ve pulsatif frekansla yüzey sürtünme oranının değişimi (SiO_2 , $\phi = \%3$, $Re = 500$ için).



Şekil 9: (a): Faz açıları ile boru içindeki hız dağılımları (SiO_2 , $\phi = \%3$, $Re = 500$, $Ao = 3$, $St = 4$ için).



Şekil 9: (b): Faz açıları ile boru içindeki sıcaklık dağılımları (SiO_2 , $\phi = \%3$, $Re = 500$, $Ao = 3$, $St = 4$ için).

Pulsatif parametrelerin artması akış içindeki çalkantıların etkisini artırdığından akışkan karışımının iyileşmesine ve dolayısı ile ısı transferinin artmasına neden olmaktadır. Pulsatif akış nedeniyle akışta oluşan bu dalgalanmalar boru içerisindeki nanopartiküllerin sürekli hareketini sağlayarak çökmesini önlemede bir avantaj oluşturacağı düşünülmektedir. Ancak boru içindeki sürtünmenin artması bir miktar basınç düşümünde de artmaya neden olmaktadır. $Re = 500$ için SiO_2 -su nanoakışkanın $\phi = \%3$ partikül hacim oranındaki pulsatif akışında en yüksek ısı transferi performansı ve sürtünme oranı sırasıyla 1.42 ve 3.91 olarak elde edilmiştir.

Bu sayısal çalışma sonuçları, içerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların pulsatif akışının nanoakışkan ve pulsatif parametrelere bağlı olarak ısı transferi iyileşmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Fakat sürtünme oranında da bir miktar artış görülmektedir. Çalışma sonuçlarına göre, pasif ve aktif ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin birlikte kullanılmasında ısı transferinin daha da artabileceği gösterilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, içerisinde dairesel halkalar olan bir boru içerisinde nanoakışkanların sürekli ve pulsatif akış şartlarında ısı transferi ve sürtünme faktörüne etkileri HAD tabanlı çözüm yapan FLUENT ANSYS 15.0 paket programı kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak $20 \leq Re \leq 500$ aralığında, sürekli akış şartlarında farklı nanopartikül tiplerinin değişen partikül hacim oranlarında akış ve ısı transferine etkileri analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, sürekli ve pulsatif akış şartları için boru içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Analizlerin sonucunda en iyi ısı transferi performansının $Re = 500$ ve $\phi = \%3$ için SiO_2 -su nanoakışkan için elde edildiği görülmüştür. Daha sonra en iyi ısı transferi performansını sağlayan bu parametreler sabit tutularak nanoakışkanların pulsatif akış altında akış ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. $Re=500$ için SiO_2 -su nanoakışkanın $\phi = \%3$ partikül hacim oranındaki pulsatif akışında en yüksek ısı transferi performansı ve sürtünme oranı sırasıyla 1.42 ve 3.91 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak içerisinde dairesel halkalar bulunan bir boruda nanoakışkanların pulsatif akışı ısı transferi iyileşmesi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır.

5 Kaynaklar

- [1] Akdağ U, Akçay S, Demiral D. "Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59, 17-23, 2014.
- [2] Khoshvaght-Aliabadi M, Sahamiyan M, Hesampour M, Sartipzadeh O. "Experimental study on cooling performance of sinusoidal-wavy minichannel heat sink". *Applied Thermal Engineering*, 92, 50-61, 2016.
- [3] Akbarzadeh M, Rashidi S, Esfahani A. "Influences of corrugation profiles on entropy generation, heat transfer, pressure drop and performance in a wavy channel". *Applied Thermal Engineering*, 116, 278-291, 2017.
- [4] Chandra PR, Alexander VR, Han JC. "Heat transfer and friction behavior in rectangular channels with varying number of ribbed walls". *International Journal Heat and Mass Transfer*, 46, 481-495, 2003.
- [5] Promvong P, Eiamsa-ard S. "Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(1), 72-82, 2007.

- [6] Kongkai-paiboon V, Nanan K, Eiamsa-ard S. "Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(5), 568-574, 2010.
- [7] Pathipakka G, Sivashanmugam P. "Heat transfer behaviour of nanofluids in a uniformly heated circular tube fitted with helical inserts in laminar flow". *Superlatt. Microstruct.* 47(2), 349-360, 2010.
- [8] Tanda G. "Effect of rib spacing on heat transfer and friction in a rectangular channel with 45° angled rib turbulator on one/two walls". *International Journal Heat and Mass Transfer*, 54(5-6), 1081-1090, 2011.
- [9] Promvong P, Khanoknaiyakarn C, Kwankaomeng S, Thianpong C. "Thermal behavior in solar air heater channel fitted with combined rib and delta-winglet". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(6), 749-756, 2011.
- [10] García A, Solano JP, Vicente PG, Viedma A. "The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils". *Applied Thermal Engineering*, 35, 196-201, 2012.
- [11] Skullong S, Kwankaomeng S, Thianpong C, Promvong P. "Thermal performance of turbulent flow in a solar air heater channel with rib-groove turbulators". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 50, 34-43, 2014.
- [12] Alam T, Saini RP, Saini JS. "Use of turbulators for heat transfer augmentation in an air duct-a review". *Renew Energy*, 62, 689-715, 2014.
- [13] Tamna S, Kaewkohkiat Y, Skullong S, Promvong P. "Heat transfer enhancement in tubular heat exchanger with double V-ribbed twisted-tapes". *Case Studies in Thermal Engineering*, 7, 14-24, 2016.
- [14] Sroysroy A, Eiamsa-ard S. "Periodically fully-developed heat and fluid flow behaviors in a turbulent tube flow with square-cut twisted tape inserts". *Applied Thermal Engineering*, 112, 895-910, 2017.
- [15] Özceyhan V, Gunes S, Buyukalaca O, Altıntop N. "Heat transfer enhancement in a tube using circular cross sectional rings separated from wall". *Applied Energy*, 85(10), 988-1001, 2008.
- [16] Gunes S, Özceyhan V, Buyukalaca O. "The experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a tube with coiled wire inserts placed separately from the tube wall". *Applied Thermal Engineering*, 30(13), 1719-1725, 2010.
- [17] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD. "Effect of discontinuous helical turbulators on heat transfer characteristics of double pipe water to air heat exchanger". *Energy Conversion and Management*, 118, 75-87, 2016.
- [18] Keklikcioglu O, Özceyhan V. "Experimental investigation on heat transfer enhancement of a tube with coiled-wire inserts installed with a separation from the tube wall". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 88-94, 2016.
- [19] Jasiński PB. "Numerical study of thermo-hydraulic characteristics in a circular tube with ball turbulators. Part 3: Thermal performance analysis". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 1138-1147, 2017.

- [20] Chingtuaythong W, Promvong P, Thianpong C, Pimsarn M. "Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings". *Applied Thermal Engineering*, 110, 1164-1171, 2017.
- [21] Chang SW, Yu KC, Huang KC. "Thermal performances of tubular flows enhanced by twin and four spiky twisted fins on rod". *Applied Thermal Engineering*, 112(5), 45-60, 2017.
- [22] Sharma KV, Sundar LS, Sarma PK. "Estimation of heat transfer coefficient and friction factor in the transition flow with low volume concentration of Al_2O_3 nanofluid flowing in a circular tube and with twisted tape insert". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(5), 503-507, 2009.
- [23] Sundar LS, Sharma KV. "Turbulent heat transfer and friction factor of Al_2O_3 nanofluid in circular tube with twisted tape inserts". *International Journal Heat and Mass Transfer*, 53(7-8), 1409-1416, 2010.
- [24] Chandrasekar M, Suresh S, Bose AC. "Experimental studies Al_2O_3 /water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts". *Experimental Thermal Fluid Science*, 34(2), 122-130, 2010. on heat transfer and friction factor characteristics of
- [25] Sundar LS, Kumar NTR, Naik MT, Sharma KV. "Effect of full length twisted tape inserts on heat transfer and friction factor enhancement with Fe_3O_4 magnetic nanofluid inside a plain tube: An experimental study". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11-12), 2761-2768, 2012.
- [26] Azmi WH, Sharma KV, Sarma PK, Mamat R, Anuar S, Sundar LS. "Numerical validation of experimental heat transfer coefficient with SiO_2 nanofluid flowing in a tube with twisted tape inserts". *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 296-306, 2014.
- [27] Yang Y, Tango H, Zen B, Jean M. "Numerical Simulation and optimisation of turbulent nanofluids in a three-dimensional arc rib-grooved channel". *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, An International Journal of Computation and Methodology*, 70(8), 831-846, 2016.
- [28] Eiamsa-Ard S, Wongcharee K. "Experimental study of TiO_2 -water nanofluid flow in corrugated tubes mounted with semi-circular wing tapes". *Heat Transfer Engineering*, 39(1), 1-14, 2018.
- [29] ANSYS Fluent user guide & theory guide- Release 15.0, Fluent Ansys Inc, USA, 2015.
- [30] Pak BC, Cho YI. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles". *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151-170, 1998.
- [31] Nasiri M, Etemad SGh, Bagheri R. "Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(7), 958-963, 2011.
- [32] HaghshenasFard M, Esfahany MN, Talaie MR. "Numerical study of convective heat transfer of nanofluids in a circular tube two-phase model versus single-phase model". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(1), 91-97, 2010.
- [33] Minea AA. "Effect of microtube length on heat transfer enhancement of a water/ Al_2O_3 nanofluid at high Reynolds numbers". *International Journal Heat and Mass Transfer*, 62, 22-30, 2013.
- [34] Kakac S, Pramuanjaroenkij A. "Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids". *International Journal Heat and Mass Transfer*, 52(13-14), 3187-3196, 2009.
- [35] Meyer JP, Abolarin SM. "Heat transfer and pressure drop in the transitional flow regime for a smooth circular tube with twisted tape inserts and a square-edged inlet". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 11-29, 2018.
- [36] Wang L, Sunden B. "Performance comparison of some tube inserts". *International Communications Heat and Mass Transfer*, 29(1), 45-56, 2002.
- [37] Zontul H, Kurtulmuş N, Şahin B. "Pulsating flow and heat transfer in wavy channel with zero degree phase shift". *European Mechanical Science*, 1(1), 31-38, 2017.