

## Laminar Dönen Boru Akışında Isı Transferinin İncelenmesi

Emre Turgut<sup>1\*</sup>, Aydın Durmuş<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>2</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
<sup>1</sup> turgutm@gmail.com, <sup>2</sup> aydindurmus@aydin.edu.tr

(Geliş/Received: 12/05/2022;

Kabul/Accepted: 27/06/2022)

**Öz:** Bu çalışmada, silindirik borunun çeşitli hızlarda döndürülmesi ile akışkana verilen dönme etkisinin ısı transferi, sürtünme faktörü ve etkinlik değerleri üzerinde meydana getirdiği değişimler deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler Reynolds sayısının 500 ile 1800 değerleri arasında ve silindirik borunun farklı devirlerde döndürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, dönme hızındaki artış ile Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve etkinlik değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca laminar akışta gerçekleştirilen akış gözleme deneyleri ile borunun dönme hızındaki artışın, akışkan üzerine yaptığı etkiler görüntülenmiştir. Bu görüntülerden; laminar akış karakteristiği olan çizgi şeklindeki doğrusal akışın, dönme hızındaki artış ile birlikte türbülanslı akış karakteristiği kazandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların literatürle uyum içinde olduğu sonucu elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Dönen boru akışı, ısı transferi, etkinlik, akış gözleme.

### Investigation of Heat Transfer in Laminar Rotating Pipe Flow

**Abstract:** In this study, the changes in heat transfer, friction factor and efficiency values caused by the rotation effect given to the fluid by rotating the cylindrical tube at various speeds was investigated experimentally. The experiments were carried out by rotating the cylindrical tube at different revolutions and the Reynolds number between 500 and 1800 values. As a result of the experiments, it was observed that the Nusselt number, friction factor and efficiency values increased with the increase in rotational speed. In addition, the effects of the increase in the rotational speed of the pipe on the fluid were observed with the flow observation experiments performed in laminar flow. From these images; It has been observed that linear flow, which has laminar flow characteristics, gains turbulent flow characteristics with the increase in rotational speed. The results obtained were found to be in agreement with the literature.

**Key words:** Rotating pipe flow, heat transfer, effectiveness, flow monitoring.

#### 1. Giriş

Boru içindeki akışlarda, akışkana dönme etkisi verilerek ısı transferinin artırılması çok kullanılan bir yöntemdir. Adından da anlaşılacağı üzere türbülötörler (türbülans üreticileri) akış ortamının türbülansını artırmaktadır. Türbülans artışı da ısı transferi ve bununla birlikte basınç kaybını artırmaktadır. Literatürde yay, pervane, palet, kanatçık, bükülmüş şerit vb. pek çok şekilde üretilmiş türbülötör bulunmaktadır [1-10]. Bu yöntemlerde sisteme ek bir enerji vermeye gerek yoktur. Bu sebeple bu yöntemlere pasif yöntemler de denmektedir.

Dönmeli akış üretmenin bir diğer yolu ise akışkanın aktığı ortamın döndürülmesidir. Bunun için sisteme enerji girişi olmalıdır. Dışarıdan enerji verilerek ısı transferini artırma yöntemleri aktif yöntemler olarak adlandırılmaktadır. Dönen boru akışları; ısı değiştiricileri, borulama sistemleri, elektrik motorları, kimyasal karışımlar, soğutma sistemleri gibi pek çok mühendislik sistemlerinde kullanılmaktadır [11,12]. Endüstriyel uygulamalardaki öneminden dolayı dönen boru akışları pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Literatürde; dönen borulardaki akışın laminar akış [13,-14] ve türbülanslı akış [15,16] durumlarında; hem sayısal [17,18] hem de deneysel [19,20] olarak incelendiği çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışma, akışkanın aktığı ortamın döndürülmesi ile elde edilen dönme etkilerini araştırmaya yöneliktir. Kikuyama et al.[21], akışkanın; eksenel olarak dönen bir boruya girmesi durumunda akışın dönen borudan teğetsel bir hız aldığı ve bunun da akış direncinde ve zamana göre ortalama hız profilinde büyük değişikliklere sebep olduğunu ve laminar akış karakteristiğinin dönme hızındaki artışla birlikte bu etkilerden dolayı bir kararsızlık kazandığını tespit etmişlerdir. Pedley [22], dönen bir boru içindeki laminar akışın kararlılığını incelemiştir. Yapmış olduğu deneyler sonucunda, eksenel Reynolds sayısının 82,9'dan büyük olması durumunda borunun dönmesinin

\* Sorumlu Yazar: turgutm@gmail.com. ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-1504-9080, <sup>2</sup>0000-0002-0281-365X

akış üzerinde kararsızlığa sebep olduğunu tespit etmiştir. Song et al. [23], eksenel olarak dönen borulardaki ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda; dönme hızının ve ısı borusu geometrisinin ısı transferi üzerindeki etkilerini karakterize etmişlerdir. Ouali et al. [24], eksenel hava akışına sahip dönen bir silindirin içerisinde taşınım ile olan ısı transferini deneysel bir teknik ile incelemişlerdir. Bu metod ile silindirin dış yüzeyi kızılötesi lambalarla ısıtılmış ve dış yüzeydeki yüzey sıcaklıkları kızılötesi kamera yardımıyla kaydedilmiştir. Deneyler dönme hızının, Reynolds sayısının ve hava debisinin farklı değerlerinde gerçekleştirilmiş ve deneysel bağıntılar geliştirilmiştir. Mori and Nakayama [25], paralel eksen etrafında büyük bir açısal hızla dönen düz bir boru içerisinde dönme ve kaldırma kuvvetlerinden dolayı olan etkileri incelemişlerdir. Bununla birlikte araştırmacılar, düşey eksen etrafında hızla dönen borudaki tam gelişmiş laminar akışı teorik olarak analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, Coriolis kuvveti ile oluşan ikincil akıştan dolayı direnç katsayısında ve Nusselt sayısında önemli bir artış olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Ling et al. [26], turbo makinelerde kullanılan ve radyal olarak dönebilen ısı borularını yüksek sıcaklıklarda araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda; ısı borusunun çapının, dönme hızının ve çalışma sıcaklığının ısı borusunun performansı üzerinde çok önemli etkileri olduğunu görmüşlerdir. İsmail and Miranda [27], eksenel olarak dönebilen bir ısı borusu üzerinde nümerik bir çalışma yapmışlardır.

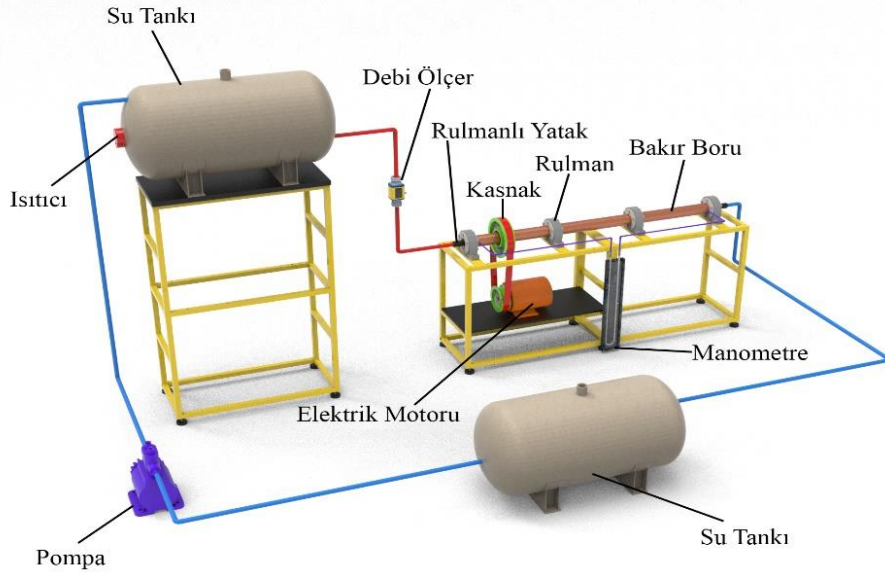
Bu çalışmada ise, bakır borunun çeşitli devirlerle döndürülmesinin, ısı transferi, sürtünme faktörü ve etkinlik üzerine olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca laminar akışta gerçekleştirilen akış gözleme deneyleri ile borunun dönme hızındaki artışın, akışkan üzerine yaptığı etkiler görüntülenmiştir. Akış gözleme görüntüleri, ısı transferi ve basınç kaybı deneyleri birlikte değerlendirildiğinde, deneylerin hem birbirleriyle hem de literatürle uyum içinde olduğu görülmüştür. Akışta meydana gelen türbülans ya da sönümlenme etkileri gerek laminar ve gerekse türbülanslı akış durumunda ısı transferi ve basınç kaybını önemli ölçüde etkilemektedir. Geniş kapsamlı bir araştırmanın parçası olarak düşünülen bu çalışmada laminar akış koşullarında borunun dönme hızının artırılmasının sistem üzerine olan etkileri hem enerji analizi hem de akış gözleme deneyleriyle desteklenerek yorumlanmış ve sadece ısı transferi, basınç kaybı ve etkinlik değerlerinde meydana gelen artışlar değerlendirilmiştir. Meydana gelen sönümlenme etkisi, enerji analizinin yanısıra ekserji analizinin yapılması ve performans karakteristiklerinin Taguchi, ANOVA ve Gri İlişkisel Analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi bu çalışmanın 2. bölümü olarak düşünülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

Deney düzeneğinin şematik görünüşü ve fotoğrafı Şekil 1a-b'de verilmiştir. Isı iletim katsayısının yüksek olmasından dolayı bakır boru tercih edilmiştir. Bakır boru 4 cm iç çapında, 0.5 mm kalınlığında ve 3 m uzunluğunda seçilmiş ve dikişsiz olarak üretilmiştir. Boru, rulmanlı yataklar ile sehpa üzerine sabitlenmiş ve 0.75 kW'lık elektrik motorunun tahrik etmesiyle farklı devirlerde döndürülmüştür. Sistem için gerekli olan su 10 metre yükseğe yerleştirilen 300 litrelik bir depodan elde edilmiştir. Bu depoda toplam 4500 W gücünde iki adet ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtıcılar termostat kontrollü olup su sıcaklığı 80°C olunca ısıtma işlemi otomatik olarak sonlandırılmıştır. 10 m yüksekten serbest düşüş ile gelen sıcak su bakır borudan çıktıktan sonra ikinci bir depoya dökülmüş, bu depodan bir pompa vasıtasıyla tekrar yukarıdaki depoya basılmıştır. Böylece sistem için gereken su ihtiyacı karşılanmıştır.

Isı transferi deneyleri dakikadaki dönme hızına göre 4 farklı devirde (100 d/dk, 200 d/dk, 300 d/dk, 400 d/dk) gerçekleştirilmiştir. Deneyler laminar akış koşullarında, Reynolds sayısının 500 ile 1800 değerleri arasında 5 farklı debi değerinde yapılmıştır. Isı transferi deneylerinin gerçekleştirilmesi esnasında dönen bakır borudaki sıcaklıkların ölçülebilmesi amacıyla hareketli bir sehpa üzerine sabitlenen infrared sıcaklık ölçer bakır boruya 5 cm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde bakır boru boyunca cidar sıcaklıkları borunun dönmesi esnasında da ölçülebilmektedir. Deneyler esnasında ölçülen sıcaklıkların sağlıklı olabilmesi açısından infrared sıcaklık ölçer ısı çiftleriyle kalibre edilmiş ve ortam sıcaklıkları bu ısı çiftleri yardımıyla ölçülmüştür.

Basınç düşüşlerinde meydana gelen değişimlerin tespit edilmesi için ise şeffaf hortumdan imal edilen bir U manometre kullanılmıştır. Bu manometre sistemin tam ortasına yerleştirilmiştir. Üzerinden sıcaklık ölçümleri almak için, ısı çiftlerinin de bulunduğu teflon burçların alt kısmına pirinç malzemeden üretilen basınç prizleri takılmıştır. U manometresinin şeffaf hortumları bu prizlere takılarak ve manometreye civa koyularak sistem tamamlanmıştır.



(a)

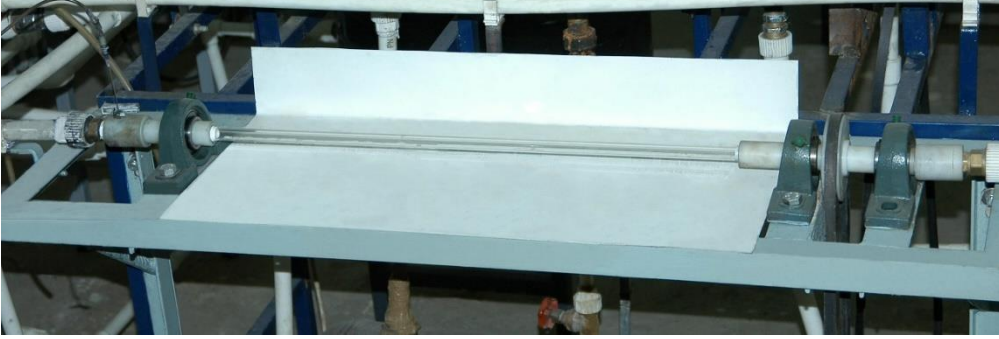


(b)

**Şekil 1.**

Akış gözleme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla ikinci bir deney düzeneği daha imal edilmiştir (Şekil 2a). Dönme etkisinin görüntülenebilmesi için 80 cm uzunluğunda bir cam boru kullanılmıştır. Cam borunun iki ucu, teflon malzemeden imal edilen burçlara yerleştirilmiştir. Bu teflon burçların içine iki adet halka conta yerleştirilmiştir (Şekil 2b) ve bu şekilde akış gözleme düzeneğinde oluşabilecek sızıntıların önüne geçilmiştir. Sistem bir elektrik motoru ile tahrik edilmiş ve istenen devirde dönmesi sağlanmıştır. Sistemde oluşabilecek sarsıntıların önlenmesi için kasnak her iki yanından da oynak yataklar ile yataklanmıştır. Akış gözleme deneylerinin yapılabilmesi, sistemde akım görünürlüğünün sağlanabilmesiyle mümkün olmaktadır. Bunu gerçekleştirebilmek

için ise suda çözünmeyen bir boya kullanılmıştır. Boyanın sisteme verilebilmesi için burç üzerinde bir delik açılmış ve bir iğne bu delikten içeri yerleştirilmiştir (Şekil 2b-c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.

Reynolds sayısı

$$Re = \frac{V_{ort} d_i}{\nu} \quad (1)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada  $V_{ort}$  ortalama hızı,  $d_i$  iç borunun iç çapını ve  $\nu$  kinematik viskoziteyi ifade etmektedir.

Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Nu = \frac{hd_i}{k} \quad (2)$$

$$f = \frac{2\Delta P d_i}{L\rho V_{ort}^2} \quad (3)$$

bu iki denklemde yer alan  $h$  taşınım katsayısını,  $k$  ısı iletkenlik katsayısını,  $\Delta P$  basınç kaybını,  $L$  boru uzunluğunu göstermektedir.

Sistemde gerçekleşen ısı transferi  $Q_g$

$$Q_g = \dot{m}C_p(T_{giriş} - T_{çıkış}) \quad (4)$$

formülüyle hesaplanır. Maksimum ısı transferi ise boruya giren sıcak suyun çevre sıcaklığında boruyu terketmesi durumunda olacaktır ve bu durum da

$$Q_{maks} = \dot{m}C_p(T_{giriş} - T_{çevre}) \quad (5)$$

denklemleriyle ifade edilebilir.

Etkinlik ise gerçekleşen ısı transferinin olabilecek maksimum ısı transferine oranı olarak tanımlanır. Bu durumda etkinlik

$$E = \frac{Q_g}{Q_{maks}} \quad (6)$$

şeklinde elde edilir.

Mühendislik sistemlerinin enerji analizinde ısı transfer birim sayısı veya transfer birim sayısı olarak ifade edilen ve NTU (number of transfer unit) ile gösterilen bir sayı kullanılır. Bu sayı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$NTU = \frac{AU}{C} \quad (7)$$

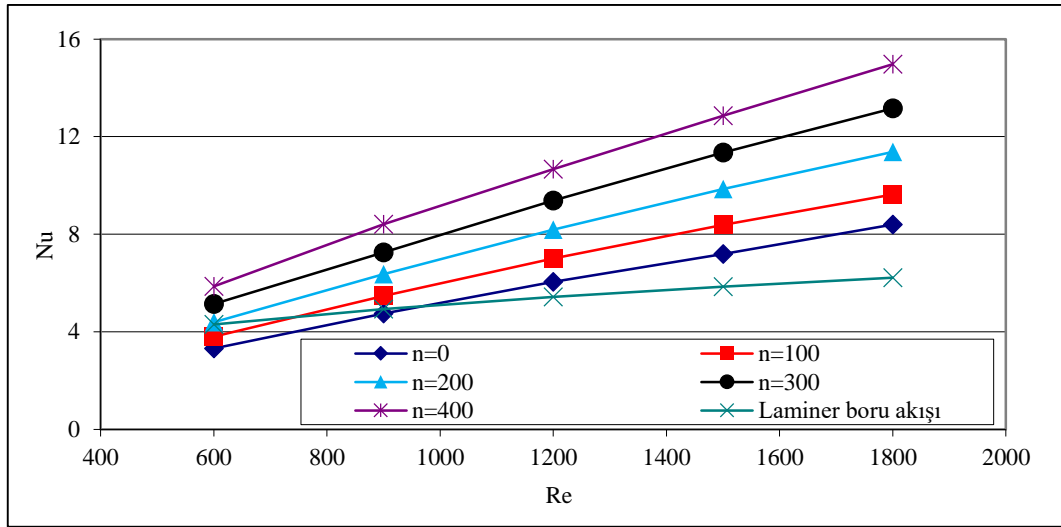
Bu denklemdeki C havanın ısı kapasitesini, A ısı transfer alanını ve U toplam ısı transfer katsayısını ifade etmektedir. Havanın ısı kapasitesi:

$$C = \dot{m}C_p \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır.

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

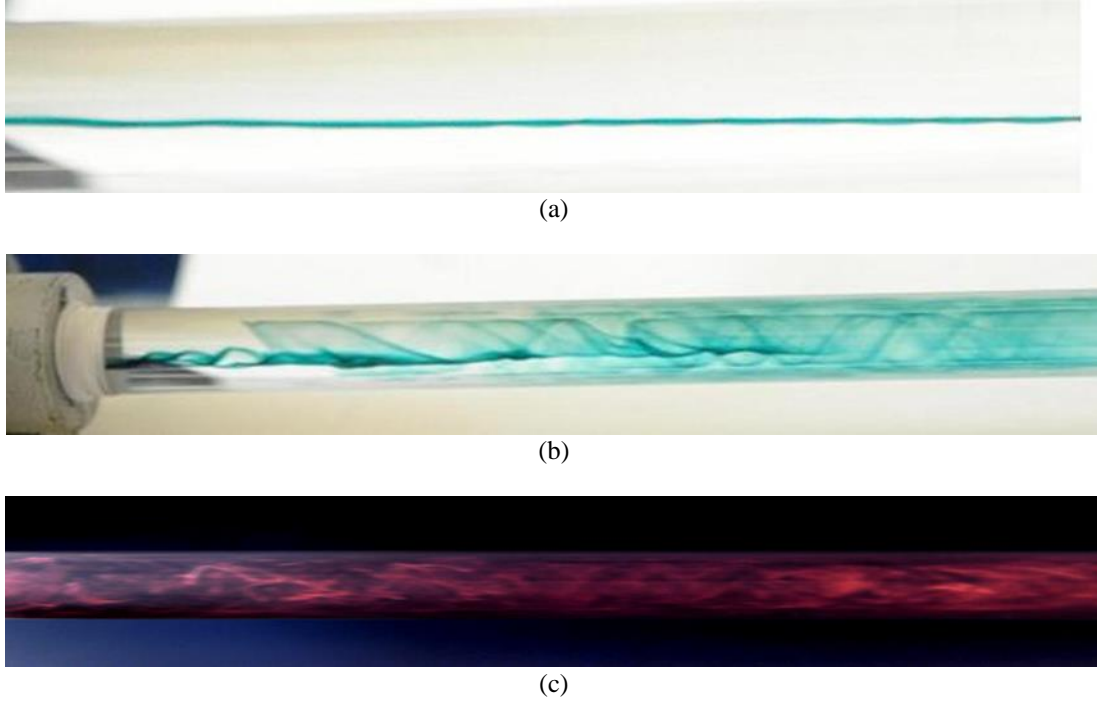
Silindirik bakır boru ve akış gözleme deneylerinde kullanılan cam borunun çeşitli devirlerde döndürülmesiyle gerçekleştirilen bu çalışmada Reynolds sayısı 500 ile 1800 değerleri arasında seçilmiştir. Sistemin durgun ( $n=0$  d/dk) hali referans alındığında, artan devir sayısı ile Nusselt sayısının arttığı, devir sayısının  $n=400$  d/dk değerinde ise en büyük değerine ulaştığı görülmüştür (Şekil 3).



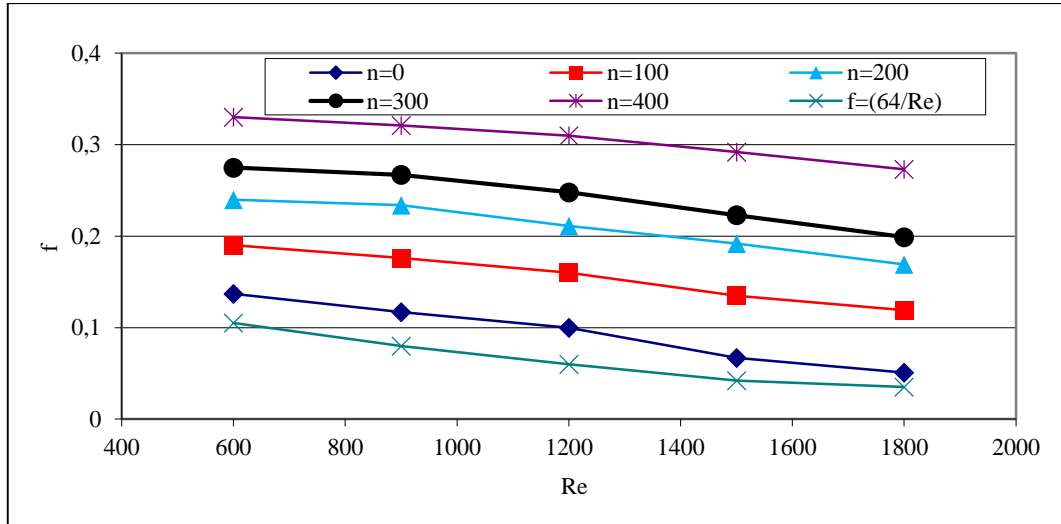
Şekil 3.

Bu durumu daha iyi anlayabilmek için akış gözleme deneylerini incelemek faydalı olacaktır. Ancak bu deneylere göz atmadan önce akış karakteristiklerinin ve bu karakteristiklerin ısı transferi üzerine olan etkilerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Laminer akış; çalkantısız akım çizgileri ile tanımlanan oldukça düzenli akışkan hareketi, türbülanslı akış ise genellikle yüksek hızlarda oluşan ve çalkantılar ile tanımlanan oldukça düzensiz akışkan hareketi olarak adlandırılır [28]. Akışta meydana gelen türbülans sınır tabaka kalınlığını azaltır ve bozar, daha iyi bir akış karışımı oluşmasını sağlayarak ısı transferini artırır. Şekil 4a da laminer akış karakteristiği görülmektedir. Çalkantısız, düz bir akım çizgisi şeklinde olan bu akış, borunun döndürülmesiyle Şekil 4b'de olduğu gibi türbülanslı akış karakteristiği kazanmıştır. Şekil 4c'de ise türbülanslı akışa ( $Re=5000$ ) ait bir akış gözleme görüntüsü yer almaktadır. Şekil 4b'de akışın boruya girdiği noktada düz bir çizgi şeklinde olduğu, dönme etkisiyle birlikte türbülanslı akış karakteristiği kazandığı açık bir şekilde görülmektedir.

Türbülanslı akışta ısı transferinde meydana gelen artışların sebebi yukarıda açıklanmıştı. Şekil 3'te artan devir sayısı ile meydana gelen ısı transferi artışları akış gözleme deneyleriyle örtüşmektedir. Reynolds sayısının 1800 değerinde; borunun dönme hızının durgun halden 400 devire çıkması sonrasında Nusselt sayısı 8.4'den 14.97'ye çıkmıştır. Devir sayısının 400 d/dk olduğu durumda Nusselt sayısındaki değişimin, Reynolds sayısının 600-1800 değerleri arasında 5.87 ile 14.97 arasında olduğu görülmüştür. Meydana gelen bu artışın sebebi dönme etkisiyle laminar akışın türbülanslı akış karakteristiği kazanmasıdır.



Şekil 4.



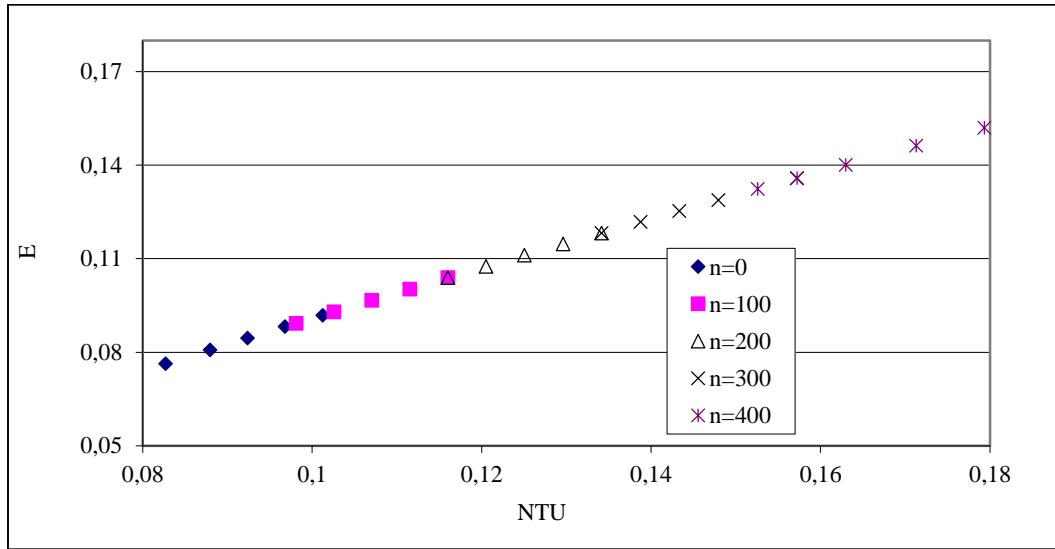
Şekil 5.

Isı transferindeki artışlara benzer şekilde basınç kayıpları ( $\Delta P$ ) da devir sayısındaki artış ile artmaktadır. Sürtünme faktöründeki (f) değişim hızın karesi ile ters orantılı olduğundan Reynolds sayısındaki artış ile sürtünme faktörü değerleri azalmaktadır. Bu durum Şekil 5'te sunulmuştur ve Denklem 3'te açık bir şekilde görülmektedir.

$f$ 'nin en büyük değeri ısı transferi deney sonuçlarıyla uyumlu olarak 400 d/dk durumunda ortaya çıkmıştır. Çünkü artan devir sayısı ile akış türbülans karakteristiği kazanmakta ve bunun sonucunda basınç kayıpları da artmaktadır. Durgun durum ile borunun 400 d/dk ile dönmesi durumu kıyaslandığında  $f$  değerlerinin sırasıyla 0.137 ile 0.33 arasında değiştiği görülmüştür. 400 d/dk durumunda  $f$  değerinde meydana gelen en büyük değişimin Reynolds sayısının 600-1800 değerleri arasında sırasıyla 0.33-0.273 arasında olduğu sonucu elde edilmiştir.

Mühendislik uygulamalarında etkinlik de önemli bir kavramdır ve gerçekleşen ısı transferinin olabilecek maksimum ısı transferine oranı olarak ifade edilir. Verilen Reynolds sayısı değerinde gerçekleşebilecek maksimum ısı transferi bellidir. Bu durumda gerçek ısı transferini maksimum ısı transferine ne kadar yaklaştırırsak etkinlik de o kadar artacaktır. Bu çalışmada etkinlik ile ilgili verilerin yorumlanabilmesi için Kays ve London [29] tarafından önerilen E-NTU yöntemi kullanılmıştır. Denklem 7'den de görüleceği gibi artan ısı transfer katsayısı NTU'nun da artması anlamına gelecektir. Dolayısıyla artan NTU ile birlikte etkinlik de artacaktır.

Bu çalışmada, gerçekleşen en büyük ısı transferi borunun 400 d/dk hızla döndürülmesi durumunda elde edildiğinden etkinliğin en büyük olduğu devir sayısı da 400'dür (Şekil 6). Etkinlik değerleri 0.076 ile 0.152 değerleri arasında değişmiştir.



Şekil 6.

#### 4. Sonuçlar

Silindirik borunun eksenine etrafında serbestçe döndürülmesiyle gerçekleştirilen bu çalışmada, dönme etkisinin ısı transferi, sürtünme faktörü ve etkinlik üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler akış gözleme deneyleriyle desteklenmiş ve aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

1. Laminar akışta borunun dönme hızının ve Reynolds sayısının artmasının Nu sayısını artırdığı görülmüştür. Laminar akışta meydana gelen ısı transferi artışı akış gözleme deneyleriyle doğrulanmıştır. Laminar akışın dönme etkisiyle türbülanslı akış karakteristiği kazandığı Şekil 4'te açık bir şekilde görülmektedir. Bilindiği üzere türbülanslı akışta ısı transferi, artan türbülans etkisine paralel olarak artmaktadır. Nusselt sayısının en büyük değerinin, 400 d/dk dönme hızında 14.97 olduğu görülmüştür.
2. Sürtünme faktörü değeri artan Reynolds sayısı ile birlikte azalma eğilimine girmiştir. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü sürtünme faktörü hızın karesi ile ters orantılı olarak değişmektedir. Ancak dönme hızındaki artış ile artan türbülans etkisi ise basınç kayıplarını dolayısıyla da sürtünme faktörü değerlerini artıracaktır. Sürtünme faktörünün en büyük değeri türbülans etkisinin en büyük olduğu 400 d/dk durumunda 0.33 olarak bulunmuştur.
3. E-NTU değişimi incelendiğinde etkinliğin artan NTU ile arttığı görülmüş, en büyük etkinlik değeri 0.152 olarak hesaplanmış ve bu değere dönme hızının 400 d/dk olduğu durumda ulaşılmıştır.

4. Akış gözleme deneylerinden elde edilen sonuçların ısı transferi deney sonuçlarını desteklediği görülmüştür.

### Teşekkür

Bu çalışma FÜBAP (Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri ) 1044 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Doktora tez çalışması olarak yürütülen bu çalışmada Prof. Dr. Aydın Durmuş proje yürütücüsü, Dr. Öğr. Üyesi Emre Turgut ise araştırmacı olarak görev almıştır. Proje çalışanları sağladıkları destekten dolayı FÜBAP'a teşekkür eder.

### Kaynaklar

- [1] Pourahmad S, Pesteei SM. Effectiveness-NTU analyses in a double tube heat exchanger equipped with wavy strip considering various angles. *Energy Convers Manage* 2016; 123:462-469.
- [2] Du J, Hong Y, Wang S, Ye WB, Huang SM. Experimental thermal and flow characteristics in a traverse corrugated tube fitted with regularly spaced modified wire coils. *Int J Therm Sci* 2018; 133: 330-340.
- [3] Muthusamy C, Vivar M, Skryabin I, Srithar K. Effect of conical cut-out turbulators with internal fins in a circular tube on heat transfer and friction factor. *Int Commun Heat Mass Transfer* 2013; 44: 64-68.
- [4] Chompookham T, Chingtuaythong W, Chokphoemphun S. Influence of a novel serrated wire coil insert on thermal characteristics and air flow behavior in a tubular heat exchanger. *Int J Therm Sci* 2022; 171: 107184.
- [5] Singh P, Pandit J, Ekkad SV. Characterization of heat transfer enhancement and frictional losses in a two-pass square duct featuring unique combinations of rib turbulators and cylindrical dimples. *Int J Heat Mass Transfer* 2017; 106: 629-647.
- [6] Ayub ZH, Yang D, Khan TS, Al-Hajri E, Ayub AH. Performance characteristics of a novel shell and tube heat exchanger with shell side interstitial twisted tapes for viscous fluids application. *Appl Therm Eng* 2018; 134: 248-255.
- [7] Shirvan KM, Mamourian M, Esfahani JA. Experimental investigation on thermal performance and economic analysis of cosine wave tube structure in a shell and tube heat exchanger. *Energy Convers Manage* 2018; 175: 86-98.
- [8] Ham J, Shin Y, Cho H. Theoretical investigation of the influence of pipe diameter and exit channel width in welded plate heat exchanger on heat exchanger performance. *Heat Mass Transfer* 2020; 56: 759-771.
- [9] Fan A, Deng J, Guo J, Liu W. A numerical study on thermo-hydraulic characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with conical strip inserts. *Appl Therm Eng* 2011; 31: 2819-2828.
- [10] Jasinski PB. Numerical study of thermo-hydraulic characteristics in a circular tube with ball turbulators. Part 3: Thermal performance analysis. *Int J Heat Mass Transfer* 2017; 107: 1138-1147.
- [11] Ma JF, Shen XR, Zhang MK, Zhang BZ. Laminar developing flow in the entrance region of rotating curved pipes. *J Hydrodyn* 2006; 18(4): 418-423.
- [12] Petrakis MA. Flow characteristics in a heated rotating straight pipe. *Int J Heat Mass Transfer* 1998; 41: 4385-4392.
- [13] Lei U, Yang ACY. Convective heat transfer of the flow through a rotating circular straight pipe. *Chin J Mech* 2001; 17(2): 79-91.
- [14] Ling J, Cao Y. Closed-form analytical solutions for radially rotating miniature high-temperature heat pipes including non-condensable gas effects. *Int J Heat Mass Transfer* 2000; 43: 3661-3671.
- [15] Turgut E, Durmuş A. Dönen borudaki türbülanslı iç akışın incelenmesi. 17. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 24-27 Haziran 2009, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- [16] Cloos FJ, Zimmermann AL, Pelz PF. Two turbulent flow regimes at the inlet of a rotating pipe. *Eur J Mech B Fluids* 2017; 61: 330-335.
- [17] Taamneh Y. Thermal analysis of gas turbine disk integrated with rotating heat pipes. *Case Stud Therm Eng* 2017; 10: 335-342.
- [18] Shi X, Yin B, Chen G, Zhang X, Mei X. Numerical study on two-phase flow and heat transfer characteristics of loop rotating heat pipe for cooling motorized spindle. *Appl Therm Eng* 2021; 192: 116927.
- [19] Koca T, Cıtlak A. Design and analysis of double-pipe heat exchanger using both helical and rotating inner pipe. *Therm Sci* 2021; 25(2B): 1545-1559.
- [20] Wang H, Bao Y, Liu M, Zhu S, Du X, Hou Y. Experimental study on dynamic characteristics of cylindrical horizontal axially rotating heat pipe. *Appl Therm Eng* 2022; 209: 118248.
- [21] Kikuyama K, Murakami M, Nishibori K, Maeda K. Flow in an axially rotating pipe, *Bulletin of the JSME* 1983; 26(114): 506-513.
- [22] Pedley TJ. On the instability of viscous flow in a rapidly rotating pipe. *Journal of Fluid Mechanics* 1969; 35: 97-115.
- [23] Song F, Ewing D, Ching CY. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes. *Int J Heat Mass Transfer* 2004; 47: 4721-4731.
- [24] Ouali SS, Saury D, Harmand S, Phillipart O, Laloy D. Convective heat transfer inside a rotating cylinder with an axial air flow. *Int J Therm Sci* 2006; 45: 1166-1178.



- [25] Mori Y, Nakayama W. Forced convective heat transfer in a straight pipe rotating around a parallel axis. *Int J Heat Mass Transfer* 1967; 10(9): 1179-1194.
- [26] Ling J, Cao Y, Chang WS. Analyses of radially rotating high-temperature heat pipes for turbomachinery applications. *ASME J Eng Gas Turbines Power* 1999; 121: 306-312.
- [27] Ismail KAR, Miranda RF. Two-dimensional axisymmetrical model for a rotating porous wicked heat pipe, *Appl Therm Sci* 1997; 17: 135-155.
- [28] Çengel AY, Ghajar AJ. *Heat and Mass Transfer -FUNDAMENTALS & APPLICATIONS*. 6th ed. New York, NY, USA. McGraw Hill, 2020.
- [29] Kays WM, London AL. *Compact FHeat Exchangers*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 1984.