

VORTEKS TÜPÜNDE AKIŞKAN OLARAK KULLANILAN HAVA İLE AZOT GAZININ SOĞUTMA SICAKLIK PERFORMANSLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

*Hüseyin USTA

*Volkan KIRMACI

**Kevser DİNCER

*G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, 06500, Beşevler, Ankara, TÜRKİYE

**G.Ü. Fen Bil. Ents. Makina Müh. ABD, Maltepe, Ankara, TÜRKİYE

ÖZET

Bu çalışmada, hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası bulunmayan vorteks tüpü kullanılmıştır. Vorteks tüplerinden, girişteki basınca bağımlı olarak iki farklı sıcaklıkta akışkan elde edilmektedir. Deneysel çalışmalarımızda, sıcak akışkan çıkış tarafındaki kontrol vanası tam açık konumda bırakılmıştır. Genellikle vorteks tüpünde basınçlı akışkan olarak hava kullanılmaktadır. Havanın içinde % 78.09 Azot, % 20.95 Oksijen (O₂), % 0.93 Argon, % 0.03 Karbondioksit (CO₂) ve çok az oranda diğer gazlar bulunmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarımızda, basınçlı akışkan olarak hava ve azot (N₂) gazı kullanılmıştır. N₂ gazının kullanılmasındaki amaç, hava içinde bulunan N₂'nin vorteks tüpündeki soğutma etkisinin, havaya göre değişimini incelemektir. Gösterge basıncı 1.0 bar'dan başlayarak 0.5 bar aralıklarla 6.0 bar'a kadar değişik basınçlarda, hava ve N₂ gazı, vorteks tüp sistemine uygulanmıştır. Bu çalışmada, vorteks tüplerde oluşan enerji ayrışma olayı iki farklı akışkanda deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları dikkate alınarak, hava ve N₂ gazına ait grafikler oluşturulmuştur. Vorteks tüpünde, hava ve N₂ gazına ait grafikler incelenerek performanslarının artırılmasına yönelik öneriler getirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ranque–Hilsch vorteks tüp, Enerji ayrışımı, Isıtma, Soğutma.

ABSTRACT

In this study, the vortex tube, having no one moving part, except the control valve was used in order to arrange volumetric flows. Fluid in two different heats as depending on intake pressure is obtained from vortex tubes. In our experimental studies, the control valve on the outlet side of hot fluid was left in full open position. Air is usually used as the pressured fluid in the vortex tube. 78.09 % of nitrogen, 20.95 % of oxygen (O₂), 0.93 % of argon, 0.03 % of carbon dioxide and other gases at very less amount are existing in the air. Our the experimental studies, air and N₂ as pressured fluid were used. The objective of using N₂ gas was to inspect change of cooling influence in the vortex tube compared to air of N₂ in the air. Vortex tube system was applied to the air and N₂ with intervals 0.5 as applying with indicative pressure from beginning 1.0 bar to 6 bars in the different pressure. In this study, energy–separation case which occurs in the vortex tubes was inspected experimentally in two different fluids. At the end of the experiments, the graphics on N₂ and air were established. The graphics on N₂ and air in vortex tube were interpreted by inspecting them, and there were suggestions on increasing their performances.

Key words: Ranque–Hilsch vortex tube, Energy separation, Heating, Cooling.

1. GİRİŞ

Vorteks tüpü, George Ranque tarafından 1931 yılında bulunmuştur. Vorteks tüpü, hareketli hiç bir parçası bulunmayan basit bir borudan ibaret olan basınçlı akışkan kullanılarak çalışan bir sistemdir [1]. Rudoph Hilsch tarafından geliştirilmiştir [2]. Vorteks tüplerinde enerji ayrışımı olayı gerçekleşmektedir. Bu olay oldukça kompleks bir yapıdır [3]. Vorteks tüpü ile aynı anda hem soğuma hem de ısınma işlemi gerçekleşmektedir [4]. Vorteks

tüpü, gazların içindeki nemi alma işlemleri için de kullanılmaktadır [5]. Vorteks tüpler üzerinde çalışmalar uzun süredir devam etmesine rağmen, vorteks tüplerin içinde gerçekleşen olayın matematiksel olarak çözümü oldukça zordur [6]. Vorteks tüplerde bulunan sıcak çıkış tarafındaki vananın kısılması ile enerji ayrışma olayı gerçekleşmektedir. Bu da Joule-Thomson mekanizmasıyla benzerlik göstermektedir [7]. Vorteks tüpüne basınçlı akışkan, şekil 1’de görüldüğü gibi teğetsel olarak nozuldan verilir [8]. Basınçlı akışkan tüp içinde çok yüksek hızlarda döner. Vorteks tüpün cidarlarındaki akışkan sıcak akış, tüpün merkezindeki akışkan ise soğuk akıştır. Vorteks tüpler değişik özellikleri dikkate alındığında iki ana başlık altında gruplandırılırlar. Bunlar; akış özellikleri ve dizayn özellikleridir.

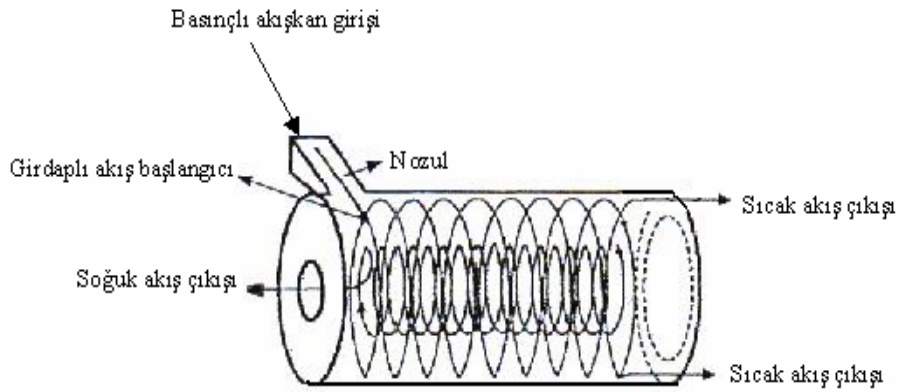
Akış özelliklerine göre;

1. Karşıt akışlı vorteks tüpler,
2. Paralel akışlı vorteks tüpler, olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

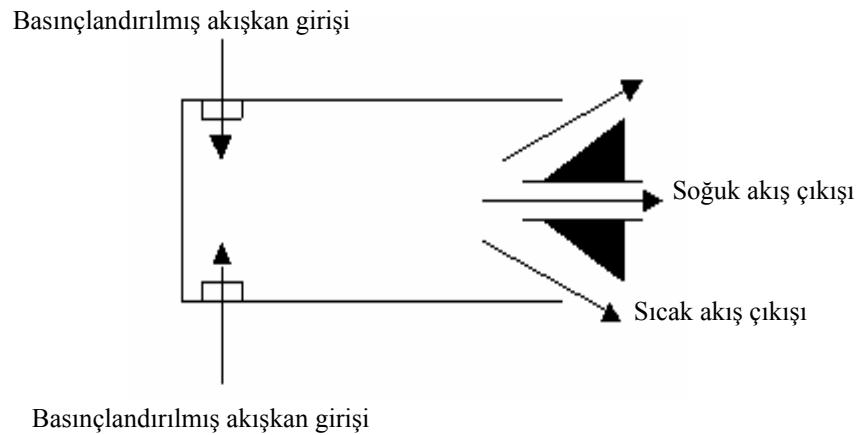
Dizayn özelliklerine göre;

1. Adyabatik vorteks tüpler,
2. Adyabatik olmayan vorteks tüpler olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar [9].

Karşıt akışlı ve paralel akışlı vorteks tüpünün çalışma prensibi şekil 1 ve şekil 2 ’de verilmiştir.



Şekil 1. Karşıt akışlı vorteks tüpünün yapısı [8].

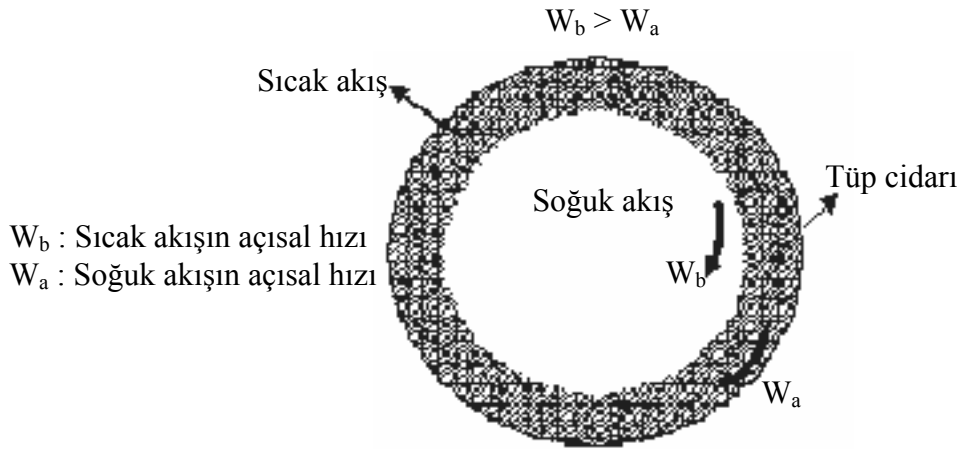


Şekil 2. Paralel akışlı vorteks tüpünün yapısı [9].

2. VORTEKS TÜPÜNÜN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE SOĞUTMA AMAÇLI UYGULAMA ALANLARI

2.1. Vorteks tüpünün çalışma prensibi

Vorteks tüp ile iki farklı sıcaklıklarda akışkan elde edilmesinin temel prensibi, şekil 3'de görüldüğü gibi iki farklı açısal hızlarda dönen akışlar arasında gerçekleşen mekanik enerji transferidir. Basınçlı bir akışkan vorteks tüpüne, tüpün giriş ağzında yer alan nozuldan geçerek vorteks tüpüne teğetsel olarak girer. Tüp girişinde nozul kullanılmasının sebebi, basınç düşürülerek hızın artmasını sağlamaktır. Nozul sonrası hız, tüpe giren basınçlı akışkana bağımlı olarak tüpün silindirik yapısından dolayı dönmeye başlar. Çok yüksek açısal hızlarda dönen merkezdeki akış, merkezkaç kuvvetin etkisi ile tüp cidarına doğru açılmaya zorlanır. Tüp merkezindeki akışkan ile tüp cidarındaki akışkan arasında basınç farkı oluşur.



Şekil 3. Vorteks tüpünün içindeki sıcak ve soğuk akışın hareketi [8].

Tüp cidarı ile tüp merkezi arasında oluşan iki farklı basınç nedeni ile akış merkezden tüp cidarına doğru genişler. Merkezdeki akışın açısal hızı, açısal momentumun korunumu ilkesi gereğince tüp cidarındaki akışın açısal hızından daha yüksek değerlere ulaşır. Bu sebepten dolayı tüp içerisinde iki farklı hızda dönen akış oluşur. Merkezdeki akış daha yüksek hıza sahip olduğundan cidardaki akışı ivmelmeye çalışır. Bu durumda merkezdeki akış cidardaki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezdeki akış soğuk akış, tüp cidardaki sürtünme etkisi ve merkezdeki akıştan aldığı mekanik enerjiden dolayı tüp cidarındaki akış sıcak akıştır [9].

2.2 Vorteks tüplerinin kullanım alanları

Vorteks tüplerden aynı anda hem sıcak hem de soğuk akışkan elde edilmektedir. Vorteks tüplerinin kullanım alanları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Vorteks tüpler;

1. Spot soğutma amacıyla,
2. Kimyasal analizlerde,
3. Orta sıcaklıklı kromatografik analizlerde,
4. Kromatografik şırınganın soğutulmasında,
5. Çözeltilerin soğutulmasında,

6. Nem alınmasında,
7. Kızılötesi analizlerde numunenin soğutulmasında,
8. Düşük sıcaklık işlemlerinde,
9. Elektronik devrelerin soğutulmasında,
10. Gaz endüstrisinde kurutma işlerinde,
11. Kar elde etmek, amacıyla kullanılmaktadır [9].

3. TERMODİNAMİĞİN 1. KANUNUNUN VORTEKS TÜPLERE UYGULANIŞI

Bir giriş ve bir çıkışlı sürekli akışlı açık sistemler için enerjinin korunumu denklemi;

$$Q - W = m (\Delta h + \Delta ke + \Delta pe) \quad (1)$$

1 nolu eşitlikteki;

Q : Birim zamanda ısı geçişi, (kW)

W : Güç, (kW)

m : Kütleli debi, (kg/s)

Δh : Entalpi değişimi, (kJ/kg)

Δke : Kinetik enerji değişimi, (kJ/kg)

Δpe : Potansiyel enerji değişimi, (kJ/kg).

Deneysel çalışmalarımızda kullandığımız vorteks tüp adyabatiktir.

$$\cancel{Q} - \cancel{W} = m (\cancel{\Delta h} + \cancel{\Delta ke} + \cancel{\Delta pe}) \quad (1)$$

\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow
 0 0 0 0

Çevresi ile iş ve ısı alış-verişinin olmadığı kabul edildiğinde 1 no'lu denklem yeniden düzenlenirse, (2) nolu denklem elde edilir.

$$m \Delta h = m (h_{gir} - h_{çı}) \quad (2)$$

Deneysel çalışmada kullanılan vorteks tüp 1 girişli, soğuk ve sıcak olmak üzere 2 çıkışlıdır. Eşitlik 2, deneysel çalışma için düzenlenirse, 3 nolu eşitlik elde edilir.

$$m_{gir} \Delta h_{gir} = m_a \Delta h_a + m_b \Delta h_b \quad (3)$$

yukarıdaki eşitlikteki ;

h_{gir} : Girişteki entalpi, (kJ/kg)

h_a : Sıcak çıkıştaki entalpi, (kJ/kg)

h_b : Soğuk çıkıştaki entalpi, (kJ/kg)

m_{gir} : Girişteki akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

m_a : Sıcak akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

m_b : Soğuk akışkanın kütleli debisidir, (kg/s) [10].

$$\Delta h_{gir} = c_p (T_{gir} - T_{refstc}) \quad (4)$$

$$\Delta h_a = c_p (T_a - T_{gir}) \quad (5)$$

$$\Delta h_b = c_p (T_{gir} - T_b) \quad (6)$$

$T_{refsic} \approx 0$ K'dır. (4) nolu denklem (7) nolu denklem gibi yazılır.

$$\Delta h_{gir} = c_p T_{gir} \quad (7)$$

(3) nolu denklemdeki Δh_{gir} , Δh_a , Δh_b değerleri (4), (5) ve (6) nolu eşitliklerden faydalanarak yerine yazıldığında;

$$\dot{m}_{gir} c_p T_{gir} = \dot{m}_a c_p (T_a - T_{gir}) + \dot{m}_b c_p (T_{gir} - T_b) \quad (8)$$

yukarıdaki eşitlikteki ;

T_{gir} : Girişteki akışkan sıcaklığı, (K)

T_a : Sıcak akışkanın sıcaklığı, (K)

T_b : Soğuk akışkanın sıcaklığı, (K)

Vorteks tüplerinde y_c olarak tanımlanan eşitlik (9) nolu denklem ile verilmiştir.

$$y_c = \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_{gir}} \quad (9)$$

(8) nolu eşitliğin her iki tarafı $\frac{1}{\dot{m}_{gir} c_p}$ ile çarpıldığında (10) nolu eşitlik elde edilir.

$$T_{gir} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{gir}} (T_a - T_{gir}) + \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_{gir}} (T_{gir} - T_b) \quad (10)$$

Denklem 10, 9 no'lu denklem ile yeniden düzenlendiğinde,

$$T_{gir} = (1 - y_c) (T_a - T_{gir}) + y_c (T_{gir} - T_b) \quad (11)$$

elde edilir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deneysel sistemin hazırlanması

Bu çalışmada, iç çapı 11 mm, uzunluğu 160 mm olan karşıt akışlı bir vorteks tüpü kullanılmıştır. Yüksek basınca karşı dayanımını arttırmak için iç çapı 14 mm olan çelik bir boru vorteks tüpün üzerine kafes olarak geçirilmiştir. Vorteks tüpünün sıcak akışkanın çıkış ucuna hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol valfi bağlanmıştır.

Vorteks tüp, genişliği 50 cm, yüksekliği 60 cm, kalınlığı 2 mm olan bir levha üzerine kontrol valfi aşağı tarafta olacak şekilde dik konumda şekil 4 'deki gibi yerleştirilmiştir. Vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanın hacimsel debilerini ölçmek için rotametreler bağlanmıştır. Vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanların sıcaklıklarını ölçmek için ± 1 °C hassasiyetinde olan dijital termometreler kullanılmıştır. Dijital termometrelerin problemleri vorteks tüpünün sıcak ve soğuk çıkış taraflarından 1 cm ilerisine 1 mm çapında delinmiş

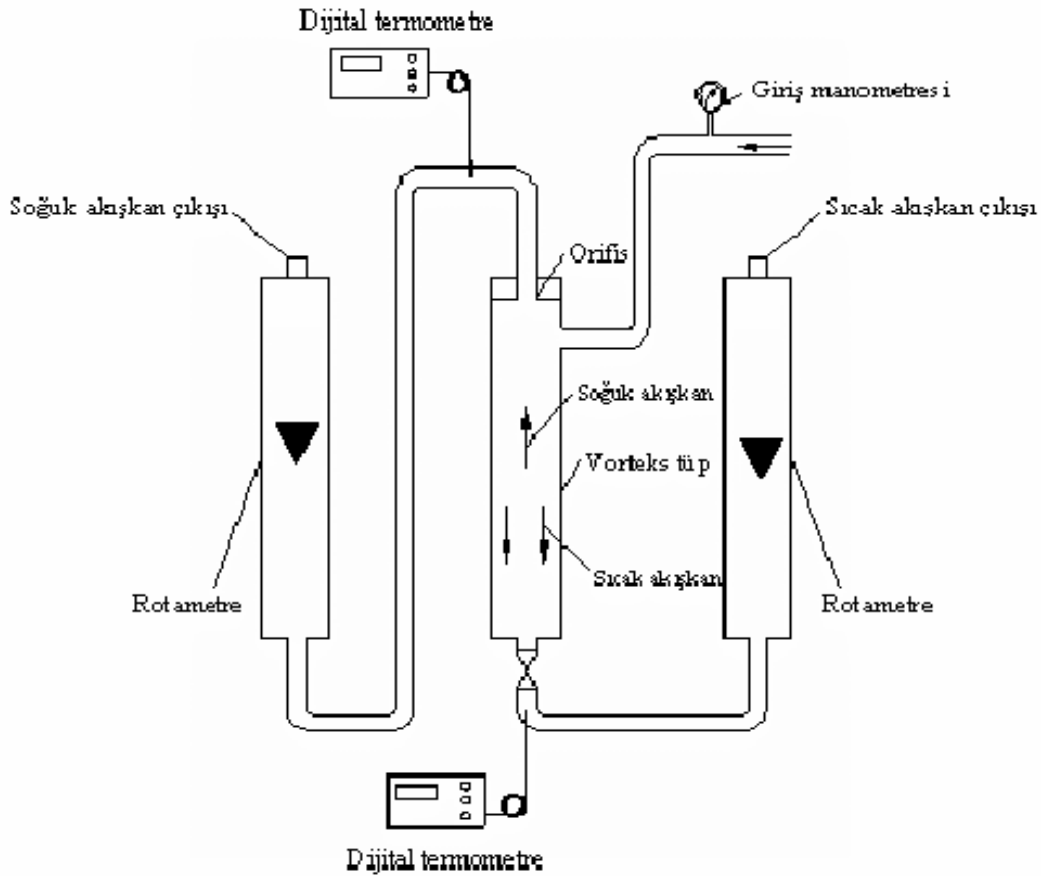
tüpün merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiş, etrafı silikonla sıvanarak sızdırmazlık sağlanmış ve sistem deneysel çalışma için çalışır konuma getirilmiştir.

4.2 Deneilerin yapılışı

Vorteks tüpünün girişindeki vana ile hava kompresörü arasında yüksek basınca dayanıklı plastik hortum kelepçeler yardımıyla bağlanmıştır. Hava kompresörü çalıştırılmış ve vorteks tüpe akışkan girişindeki vana yardımıyla deneylerde başlangıç basıncı olan 1.0 bar'lık gösterge basınç sağlanmıştır. Yapılan basınç ayarlamasından sonra vorteks tüpünün sıcak ve soğuk akışkan çıkışına monte edilen dijital termometrelerle okunan sıcaklık değerleri sabit oluncaya kadar aynı basınçta hava kompresörden gönderilmiştir.

Sıcak ve soğuk akışkanın sıcaklık değerleriyle birlikte hacimsel debileri de okunmuştur. Daha sonra gösterge basıncı 1.5 bar olan basınç değerindeki deneye başlamadan önce vorteks tüpünün soğuk ve sıcak akışkan sıcaklığını ölçen dijital termometre ile ortam sıcaklığını ölçen dijital termometrelerin eşit sıcaklık değerine gelinceye kadar beklenmiş ve okunan değerler eşitlendikten sonra gösterge basıncı 1.5 bar olan basınç değerindeki deney yapılmaya başlanmıştır. 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, ve 6.0 bar gösterge basınç değerleri için yapılan deneysel çalışmalarda, 1.0 bar'daki yapılan işlemler tekrarlanmıştır.

Vorteks tüpünde 1.0 bar ve 6.0 bar arasında basınçlı hava gönderilerek yapılan deneyler tamamlandıktan sonra hava kompresör bağlantısı sistemden çıkarılarak, yerine N₂ gazının muhafaza edildiği tüp bağlanmıştır. Vorteks tüpünde akışkan olarak kullanılan N₂ gazı için 1.0 bar ve 6.0 bar gösterge basınç değeri arasındaki deneysel işlemler hava deneylerinde yapılan işlemlerin aynısıdır.

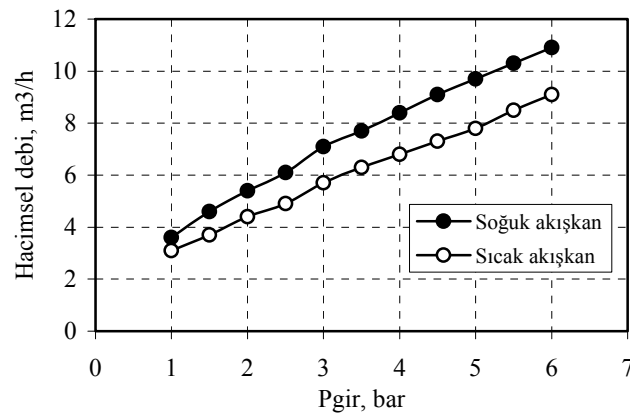


Şekil 4. Deneysel sistem

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

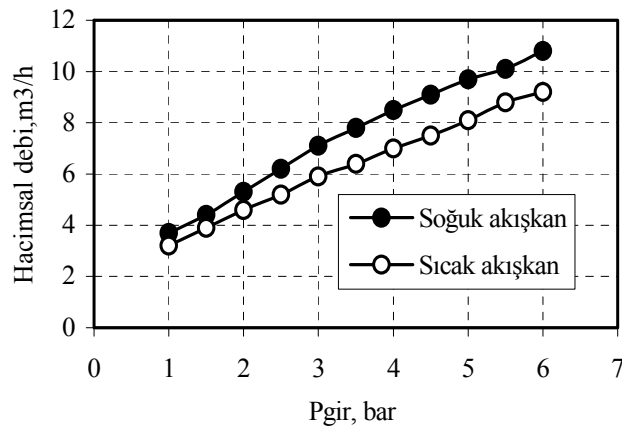
Bu çalışmada, hiç bir hareketli parçası bulunmayan ve sıcak akışkan çıkış tarafındaki vana ile hacimsel debileri ayarlanan deneysel sistemde, sıcak akışkan çıkış tarafındaki kontrol vanası tam açık konumda bırakılmıştır. Vorteks tüpe girişteki gösterge basıncı 1.0 bar'dan başlayarak 0.5 bar aralıklarla 6.0 bar'a kadar değişik basınçlarda akışkan olarak hava ve N₂ gazı kullanılarak deneyler yapılmış ve grafikler çizilmiştir.

Şekil 5'de hava'ya ait soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişim değerleri gösterilmiştir. Şekil 6'da ise Azot gazının soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişim değerleri verilmiştir. Hava ile azot gazının şekil 5 ve şekil 6'dan da görüldüğü gibi soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debilerinin lineer bir doğru olarak artmıştır.



Şekil 5. Havanın vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanın hacimsel debilerinin vorteks tüpüne girişteki basınca göre değişimi

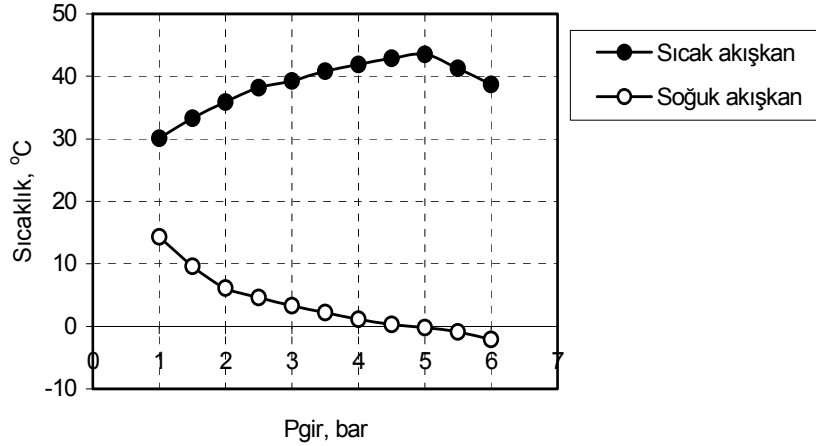
Şekil 5 ve şekil 6'da görüldüğü gibi, hava ve azot gazının soğuk akışın hacimsel debisinin, sıcak akışın hacimsel debisinden daha fazla olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.



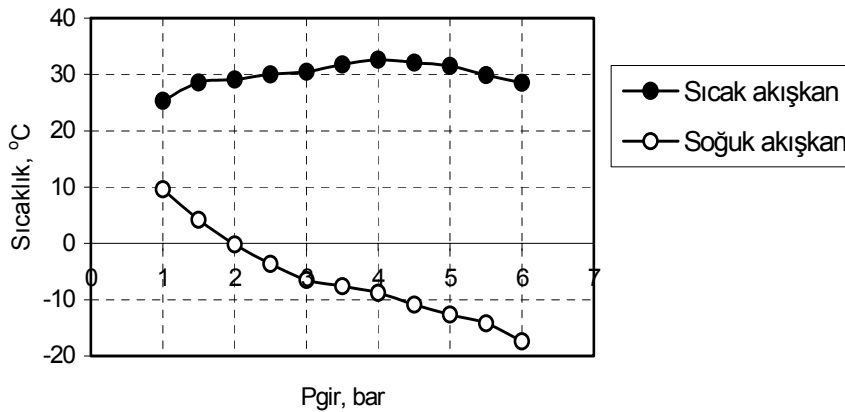
Şekil 6. Azot gazının vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debilerinin vorteks tüpüne girişteki basınca göre değişimi

Hava ile azot gazının vorteks tüpünün soğuk çıkış tarafından çıkan akışkan sıcaklıkları dikkate alınarak mukayese edilirse; Azotun, havaya göre daha fazla soğuduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Havanın 6.0 bar gösterge basıncındaki soğuk çıkış tarafındaki sıcaklığı -2.1 °C'e kadar soğurken aynı basınçtaki azot gazının soğuk çıkıştaki sıcaklığı ise -17.4 °C'dir.

Şekil 7'de Havaya ait soğuk ve sıcak akışkan sıcaklık değerlerinin, vorteks tüpüne girişteki basınç değerine göre değişimi verilmiştir. Şekil 8'de ise azot'a ait soğuk ve sıcak akışkan sıcaklık değerlerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişimi verilmiştir.

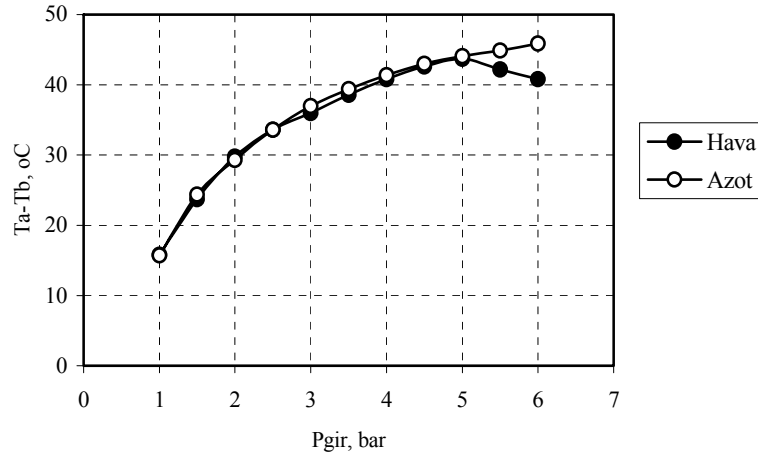


Şekil 7. Havanın vorteks tüpünden çıkan sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının vorteks tüpe girişteki basınca göre değişimi



Şekil 8. Azot gazının vorteks tüpünden çıkan sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının vorteks tüpe girişteki basınca göre değişimi

Şekil 9'da hava ve azot gazının vorteks tüpüne girişteki gösterge basıncına göre vorteks tüpünden çıkan soğuk akışkan ile sıcak akışkan sıcaklıklarının farkları cinsinden ($T_a - T_b$) karşılaştırılması verilmiştir. Hava ile azot gazının vorteks tüpünden çıkan sıcak akışkanın sıcaklığı ile soğuk akışkanın sıcaklıklarının farkları cinsinden performansları dikkate alınarak mukayese edilirse; Havanın $T_a - T_b$ cinsinden değeri vorteks tüpe girişteki 6 bar gösterge basıncında 40.8 °C iken aynı basınçta azot gazının $T_a - T_b$ değeri 45.9 °C olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Havanın maksimum $T_a - T_b$ değeri 5 bar basınç'ta 43.7 °C'dir. Havanın $T_a - T_b$ değeri 5 bar basınç'dan sonra düşmeye başlamıştır. Şekil 9'dan da g r ld ği gibi, azot gazının, $T_a - T_b$ değeri hava'ya göre sürekli olarak yükselmiştir.



Şekil 9. Hava ve azot sıcak akışın sıcaklığı ve soğuk akışın sıcaklıkları farkının girişteki basınca göre değişimi

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası bulunmayan vorteks tüpü kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, sıcak akışkan çıkış tarafındaki kontrol vanası tam açık konumunda bırakılmıştır. Yapılan deneylerde 1.0 bar gösterge basıncında başlayarak 0.5 bar aralıklarla 6.0 bar'a kadar değişik basınçlarda, hava ve N₂ gazı ayrı ayrı vorteks tüp sistemine uygulanmıştır. Vorteks tüpünde oluşan enerji ayrışma olayı iki farklı akışkanda incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları doğrultusunda şekiller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu şekiller dikkate alınarak yorumlar getirilmiştir.

Deneysel olarak yapılan çalışmada y_c oranı sabit tutulmuştur. Sabit y_c oranına göre, vorteks tüpünde hava ve N₂ gazının değişik basınçlardaki performansları deneysel olarak incelenmiştir. Vorteks tüpünde yapılan deneyler sonucunda akışkan olarak N₂ gazı kullanıldığında, soğuk akışkanın çıkış sıcaklığının performansının havaya göre daha düşük olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Vorteks tüpüne giren akışkanın giriş basıncı arttırıldıkça, soğuk çıkıştaki akışkanların sıcaklığı hem havada hem de azot gazında düşmektedir. Azot gazının havaya göre soğuk çıkış akışkan sıcaklığının daha düşük olduğu görülmüştür. Sıcak çıkıştaki akışkanın sıcaklığı ile soğuk çıkıştaki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark (T_a-T_b) hava ile azot gazı mukayese edildiğinde, azot gazının performansı hava'ya göre daha yüksek olduğu deneysel olarak görülmüştür. Vorteks tüpüne giriş basıncı arttıkça hava ile azot gazının soğuk çıkış tarafındaki soğutma sıcaklığıda düşmektedir.

Yapılan deneysel çalışma sonuçları dikkate alınırca, havada bulunan azot miktarı arttırıldığında, soğuk çıkıştaki akışkan sıcaklığının daha da soğuk olacağı düşünülmektedir. Hava ile azot gazının vorteks tüpüne giriş basıncı arttırıldığında sıcak çıkış ve soğuk çıkış sıcaklıklarının farklarının da artacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] Özkul N., “**Uygulamalı Soğutma Tekniği**”, Ankara. Makina Mühendisleri Odası Yayın No:115, s: (1999).
- [2] Dincer K., Başkaya Ş., Üçgül İ., Uysal B. Z., “Giriş ve Çıkış Kütleli Debilerinin Bir Vorteks Tüpünün Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi”, **14.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiri Kitabı**, Ed. İ. Üçgül ve B. Z. Uysal Isparta, s.13-18, 2003.
- [3] Cockerill T., “The Ranque Hilsch vortex Tube”, **Ph. D. Thesis**, Cambridge University Engineering Department, Susderland, 1995.
- [4] Althouse A. D., Turnquist C. H., Bracciano A. F., “**Modern Refrigeration and Air Conditioning**”, South Holland. The Goodheart-Willcox Company Inc., s: (1979).
- [5] Bruno T., “Laboratory Applications of Vortex Tube”, **Journal of Chemical Education**, 64: (11), 987-988, (1987).
- [6] Gulyaev A. I., “Investigation of Conical Vortex Tubes”, **Inzherno-Fizicheskii Zhurnal**, 10: (3), 326-331, (1966).
- [7] Hajdik B., Lorey M., Steinle J., Thomas K., “Vortex Tube can Increase Liquid Hydrocarbon Recovery at Plant Inlet”, **Oil-Journal**, 8: 76-83, (1997).
- [8] Fröhlingsdorf W., Unger H., “Numerical Investigations of Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube. int”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 42: 415-422, (1999).
- [9] Özgür A. E., “Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti”, **Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Isparta, (2001).
- [10] Çengel Y., Boles M., “**Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik**”, İstanbul. Literatür Yayıncılık Ltd., s: (1996).
- [11] Stephan K., Lin S., Durst M., Huang F., Seher D., “An Investigation of Energy Separation In A Vortex Tube”, **Journal of Heat Mass Transfer**, 26, (3), 344-348, (1983).