

Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava İle Karbondioksitin Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel İncelenmesi

***Hüseyin USTA, **Kevser DİNCER, *Volkan KIRMACI
*H. İbrahim VARİYENLİ**

*G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, 06500, Beşevler, Ankara, TÜRKİYE
**G.Ü. Fen Bil. Ents. Makina Müh. ABD, Maltepe, Ankara, TÜRKİYE

Received:28.10.2004, Accepted: 10.01.2005

Özet: Bu çalışmada, hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası bulunmayan vorteks tüpü kullanılmıştır. Vorteks tüplerinden akan akış, girişteki basınca bağımlı olarak iki farklı sıcaklıkta akışkana bölünmektedir. Deneysel çalışmalarda, 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 çalışmalarda, basınçlı akışkan olarak Hava ve CO₂ gazı kullanılmıştır. CO₂ gazının kullanılmasındaki amaç, hava içinde bulunan CO₂' nin vorteks tüpündeki soğutma etkisinin, havaya göre değişimini incelemektir. Gösterge basıncı 1.0 bar'dan başlayarak 1.0'er bar aralıklarla 6.0 bar'a kadar değişik basınçlarda, Hava ve CO₂ 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 CO₂ gazına ait grafikler oluşturulmuştur. Vorteks tüpünde, Hava ve CO₂ gazına ait grafikler incelenerek performanslarının artırılmasına yönelik öneriler getirilmiştir.

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

Experimental Study of Cooling – Heat Performances of Air And Carbon Dioxide Which are Used as the Fluid in the Vortex Tube

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 the 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. During the experimental studies, Air and CO₂ were used as pressured fluid. The objective of using CO₂ gas was to inspect change of cooling influence in the vortex tube of CO₂ in the air intervals compared to air. Vortex tube system Air and CO₂ was applied to the with 1.0 bar intervals start up 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 CO₂ and Air were established. The graphics on CO₂ and Air in vortex tube were interpreted by inspecting them, and there were suggestions to increase their performances.

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

1. Giriş

Vorteks tüpü, George Ranque tarafından 1931 yılında bulunmuştur. Rudoph Hilsch tarafından geliştirilmiştir. Vorteks tüpü, hareketli hiç bir parçası bulunmayan basit borudan ibaret olan, basınçlı akışkan kullanılarak çalışan bir sistemdir [1]. Vorteks tüplerinde enerji ayrışımı olayı gerçekleşmektedir. Vorteks tüpü ile aynı anda hem soğuma hem de ısınma işlemi gerçekleşmektedir [2]. Bu olay oldukça kompleks bir yapıdır [3]. Vorteks tüpü, gazların içindeki nemi alma işlemleri için de kullanılmaktadır [4]. Vorteks tüpler üzerinde çalışmalar uzun süredir devam etmesine rağmen, vorteks tüplerin içinde gerçekleşen olayın matematiksel olarak çözümü oldukça zordur [5]. Vorteks tüplerde bulunan sıcak çıkış tarafında ki vananın kısılması ile enerji ayrıştırma olayı gerçekleşmektedir. Bu da Joule-Thomson mekanizmasıyla benzerlik göstermektedir [6].

Vorteks tüpüne basınçlı akışkan, şekil 1’de de görüldüğü gibi teğetsel olarak nozullardan verilir [7]. 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.

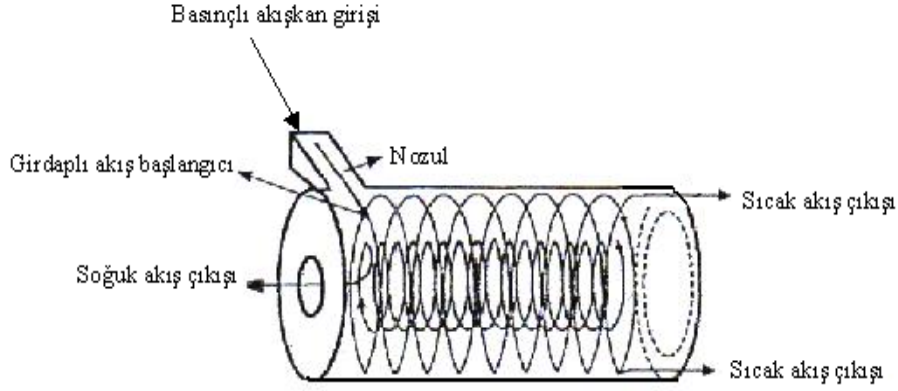
Akış özelliklerine göre;

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

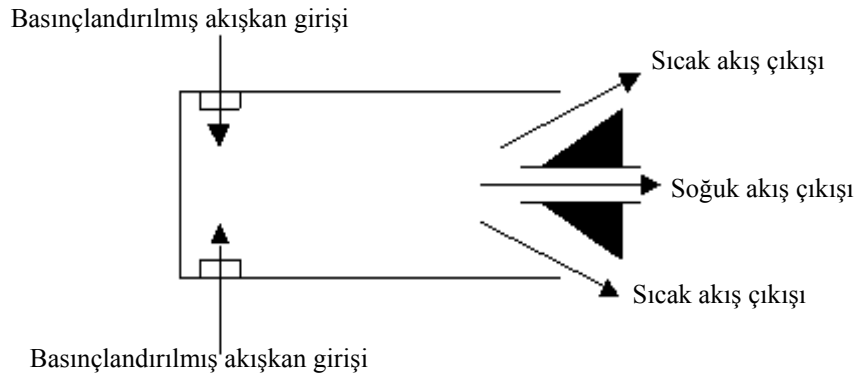
Dizayn özelliklerine göre;

1. Adyabatik vorteks tüpler,
2. Adyabatik olmayan vorteks tüpler olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar [8].

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



Şekil 1. Karşıt akışlı vorteks tüpünün yapısı [7].



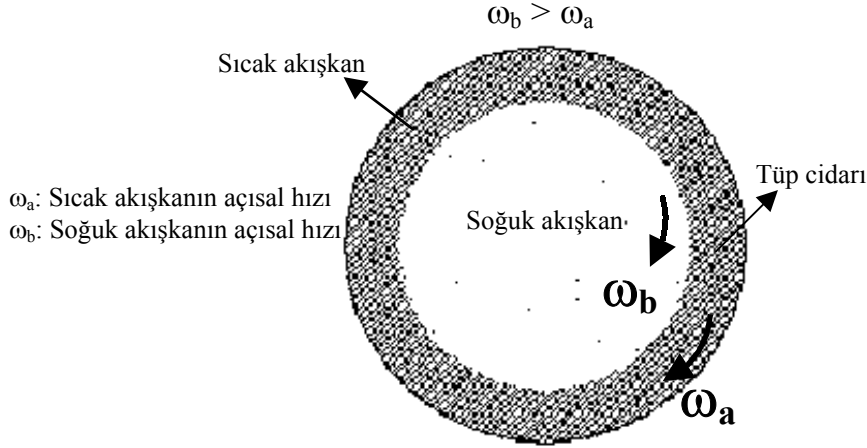
Şekil 2. Paralel akışlı vorteks tüpünün yapısı [8].

2. Vorteks Tüpünün Çalışma Prensibi ve Soğutma Amaçlı Uygulama Alanları

2.1. Vorteks Tüpünün Çalışma Prensibi

Vorteks tüpü ile farklı sıcaklıklarda akışkan elde edilmesinin temel prensibi, şekil 3'de görüldüğü gibi farklı açısal hızlarda dönen akışkan arasında gerçekleşen mekanik enerji transferidir. Basınçlı bir akışkan vorteks tüpüne, tüpün giriş ağzında yer alan nozuldan geçerek teğetsel olarak girer. Tüp girişinde nozul kullanılmasının sebebi, basıncın düşürülerek hızın artmasını sağlamaktır. Nozul sonrası hız, tüpe giren basınçlı akışkana bağımlı olarak tüpün silindirik yapısından dolayı dönmeye başlar. Çok yüksek açısal hızlarda dönen akış,

merkezkaç kuvvetin etkisi ile tüp cidarına doğru açılmaya zorlanır. Bu etki neticesinde tüp merkezindeki akışkan ile tüp cidarındaki akışkan arasında basınç farkı oluşur.



Şekil 3. Vorteks tüpün içindeki sıcak ve soğuk akışın hareketi [7].

Tüp cidarı ile tüp merkezi arasında oluşan basınç farkı nedeni ile akış merkezden tüp cidarına doğru genişler. Merkeze gelen 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 iki akış oluşur. Merkezdeki akış daha yüksek hıza sahip olduğundan cidardaki akışı ivmelendirmeye çalışır. Bu durumda merkezdeki akış cidardaki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezdeki akış yani soğuk akış, tüp cidardaki sürtünme etkisi ve merkezdeki akıştan aldığı mekanik enerjiden dolayı tüp cidarındaki akış sıcak akıştır [8].

Karşıt akışlı vorteks tüp şekil 1'de görüldüğü gibi, soğuk akış sıcak akışın çıktığı uca yerleştirilmiş olan vananın etkisi ile bir durgunluk noktasından sonra akış geriye doğru yönlenir. Bu sayede tüpün bir ucundan sıcak akış diğer ucundan ise soğuk akış elde edilir.

2.2 Vorteks Tüplerin Kullanım Alanları

Vorteks tüplerden hem sıcak hem de soğuk akışkan elde edilmektedir. Vorteks tüplerin kullanım amaçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Spot soğutma amacıyla kullanımı,
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 [8].

3. Termodinamiğin 1. Kanununun Vorteks Tüplere Uygulanışı

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

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

(1) nolu eşitlikteki;

\dot{Q} : Birim zamanda ısı geçişi, (kW)

\dot{W} : Güç, (kW)

\dot{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.

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

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

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

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.

$$\dot{m}_{gir} \Delta h_{gir} = \dot{m}_a \Delta h_a + \dot{m}_b \Delta h_b \quad (3)$$

yukarıdaki eşitlikteki ;

h_{gir} : Girişteki entalpi, (kJ/kg)

h_a : Sıcak çıkıştaki entalpi, (kJ/kg)

h_b : Soğuk çıkıştaki entalpi, (kJ/kg)

\dot{m}_{gir} : Girişteki akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

\dot{m}_a : Sıcak akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

\dot{m}_b : Soğuk akışkanın kütleli debisidir, (kg/s) [9].

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

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

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

$T_{refsic} \approx 0$ 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;

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

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 Çalışma

4.1 Deneysel Sistemin Hazırlanması

Bu çalışmada, iç çapı 11 mm ve 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 geçirilmiştir. Vorteks tüpünün sıcak akışkanın çıkış ucuna hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol valfi bağlanmıştır.

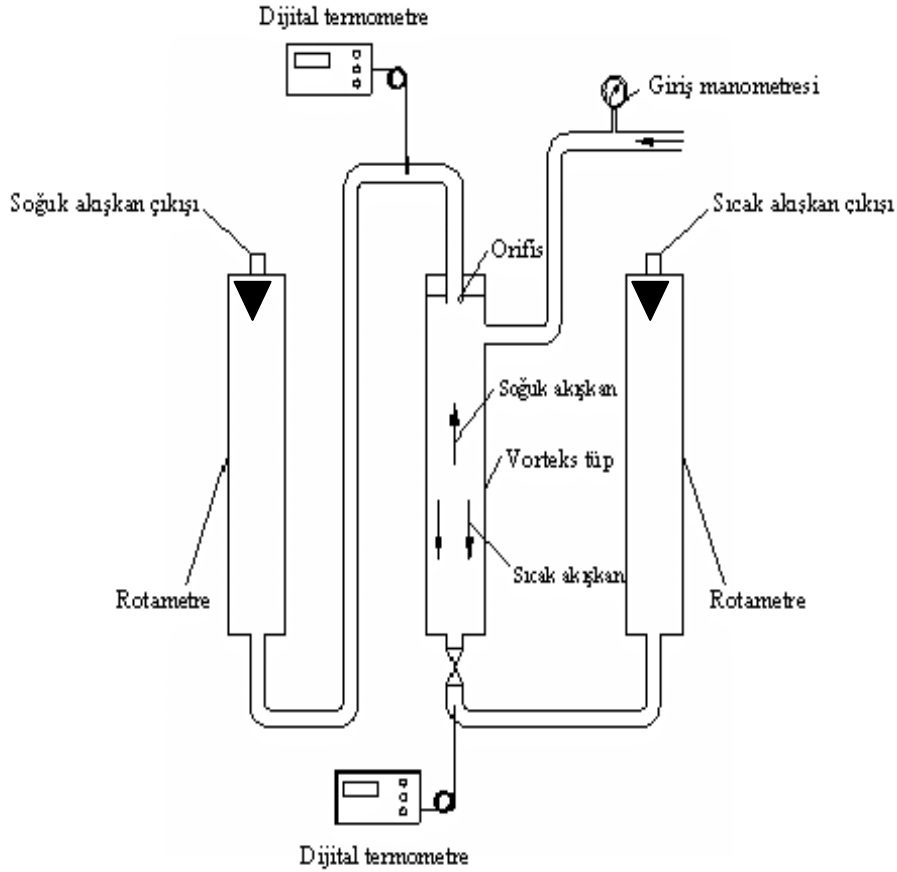
Vorteks tüp, genişliği 50 cm, yüksekliği 60 cm, et kalınlığı 2 mm olan bir levha üzerine kontrol valfi aşağı tarafta olacak şekilde dik konumda şekil 4 'deki gibi yerleştirilmiştir. Vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanın hacimsel debilerini ölçmek için rotametreler bağlanmıştır. Vorteks tüpünden 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 arasına 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 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.

Okunan sıcak ve soğuk akışkan sıcaklık değerleri ve hacimsel debilerden sonra vorteks tüpüne basınçlı hava sağlayan kompresör durdurulmuştur. Daha sonra 2.0 bar 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 2.0 bar basınç değerindeki deney yapılmaya başlanmıştır. 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 ve 6.0 bar 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 kompresörü sistemden çıkarılarak, yerine CO₂ gazının muhafaza edildiği tüp bağlanmıştır. Vorteks tüpünde akışkan olarak kullanılan CO₂ gazı için 1.0 bar ve 6.0 bar basınç değeri arasındaki deneylerindeki işlemler hava deneylerinde yapılan işlemlerin aynısıdır.



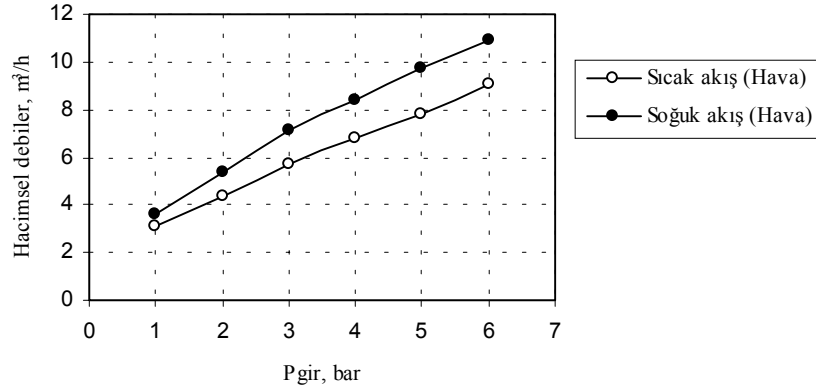
Şekil 4. Deneysel sistem

5. Bulgular Ve Tartışma

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 1.0'er bar aralıklarla 6.0 bar'a kadar değişik basınçlarda akışkan olarak Hava ve CO₂ gazı kullanılarak deneyler yapılmış ve grafikler çizilmiştir.

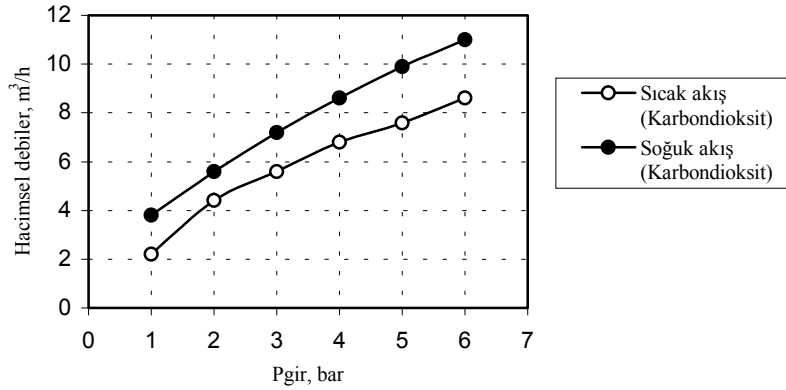
Şekil 5'de Havaya ait soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişim değerleri gösterilmiştir. Şekil 6'da ise

Karbondioksitin soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişim değerleri verilmiştir. Hava ile Karbondioksit gazının, 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

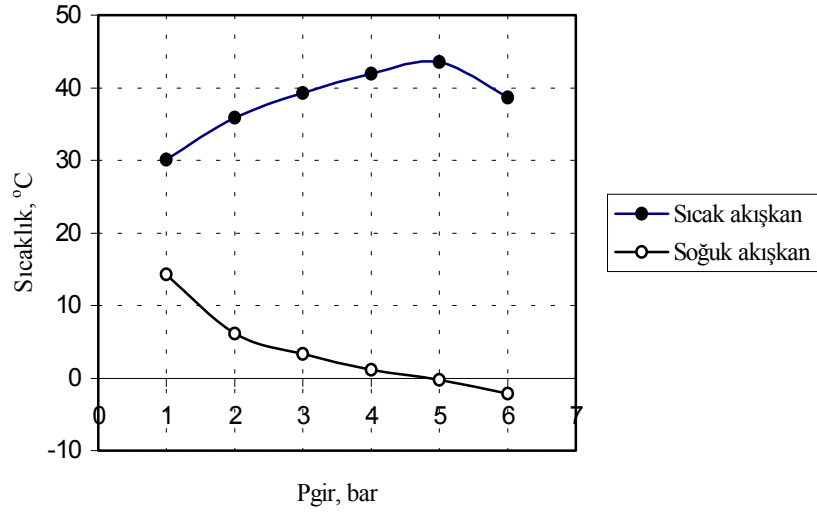
Şekil 5 ve şekil 6'da görüldüğü gibi, Hava ile Karbondioksit gazlarının vorteks tüpünden çıkan soğuk akışın hacimsel debisinin her iki akışkanda da vorteks tüpünden çıkan, sıcak akışının hacimsel debisinden daha fazla olduğu görülmektedir.



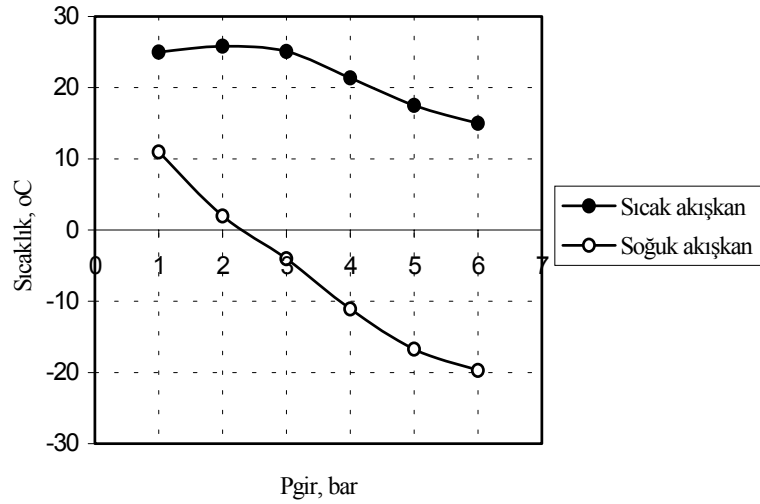
Şekil 6. Karbondioksit gazının vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanın hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basınca göre değişimi

Hava ile Karbondioksitin vorteks tüpünün soğuk çıkış tarafından çıkan akışkan sıcaklıkları dikkate alınarak mukayese edilirse; Karbondioksitin, Havaya göre daha fazla soğuduğu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Havanın 6.0 bar gösterge basıncındaki soğuk çıkış tarafındaki sıcaklığı $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'e kadar soğurken aynı basınçtaki Karbondioksit gazının soğuk çıkıştaki sıcaklığı ise $-19.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Hava ve Karbondioksit gazlarının vorteks tüpünde yapılan deney sonuçları şekil 7 ve şekil 8’de verilmiştir. Şekil 7’de Havaya ait soğuk ve sıcak akışkan sıcaklık değerlerinin, vorteks tüpüne girişteki basınç değerine göre değişimi verilmiştir. Şekil 8’de ise Karbondioksite ait soğuk ve sıcak akışkan sıcaklık değerlerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişimi verilmiştir.



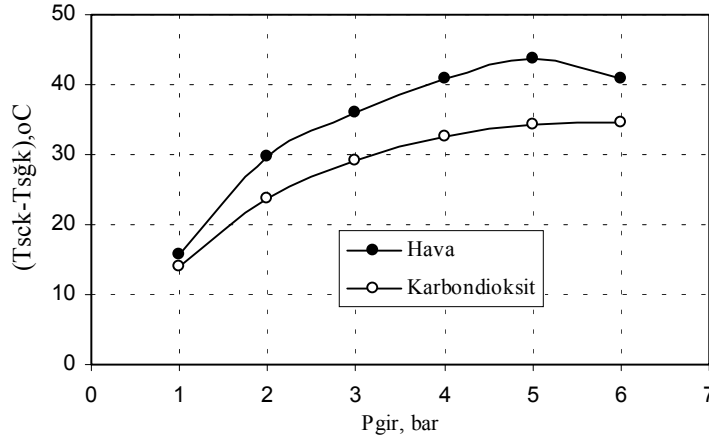
Şekil 7. Havanın vorteks tüpünden çıkan sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının vorteks tüpe girişteki basınca göre değişimi



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

Şekil 9’da Hava ve Karbondioksit 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 Karbondioksit 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 Karbondioksitin gazının T_a-T_b değeri 34.7 °C olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, Havanın, T_a-T_b değeri Karbondioksit gazına göre daha yüksektir.



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

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, hacimsel debilerini ayarlamak için bir kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası bulunmayan vorteks tüpü kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, sıcak akışkan çıkış tarafındaki kontrol vanası tam açık konumda bırakılmıştır. Yapılmış olan deneylerde vorteks tüpe girişteki gösterge basıncı 1.0 bar'dan başlayarak 1.0'er bar aralıklarla 6.0 bar'a kadar değişik basınçlarda, Hava ve CO₂ gazı ayrı ayrı vorteks tüp sistemine uygulanmıştır. Vorteks tüpünde oluşan enerji ayrıştırma 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 CO₂ gazının değişik basınçlardaki performansları deneysel olarak incelenmiştir. Vorteks tüpünde yapılan deneyler sonucunda akışkan olarak CO₂ gazı kullanıldığında, soğuk akışkanın çıkış sıcaklığının havaya göre daha düşük olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Vorteks tüpüne giren akışkanın giriş basıncı arttırıldıkça, soğuk çıkıştaki akışkanların sıcaklığı hem havada hem de

karbondioksit gazında düşmektedir. CO₂'nin Havaya göre, soğuk çıkış akışkan sıcaklığının daha düşük olduğu görülmüştür. Sıcak çıkıştaki akışkanın sıcaklığı ile soğuk çıkıştaki akışkanın sıcaklığı arasındaki farkı (T_a-T_b) cinsinden Hava ile Karbondioksit mukayese edildiğinde, Havanın performansının Karbondioksite göre daha yüksek olduğu deneysel olarak görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışma sonuçları dikkate alınır, havada bulunan CO₂ miktarı arttırıldığında, soğuk çıkıştaki akışkan sıcaklığının daha da soğuk olacağı düşünülmektedir. Hava ile Karbondioksit gazının vorteks tüpüne giriş basıncı arttırıldığında sıcak çıkış ve soğuk çıkış sıcaklıklarının farklarının da artacağı önerilmektedir.

7. Kaynaklar

1. N. Özkul, Uygulamalı Soğutma Tekniği, 5. Baskı, Makine Mühendisleri Odası Yayın No:115, Ankara, **1999**, s. 709
2. A. D. Althouse, C. H. Turnquist, A. F. Bracciano, Modern Refrigeration and Air conditioning, The Goodheart-Willcox Company Inc., South Holland, **1979**, pp. 633
3. T. Cockerill, "The Ranque Hilsch vortex Tube", Ph.D. Thesis, Cambridge University Engineering Department, Susderland, **1995**.
4. T Bruno, Journal of Chemical Education, **1987**, 64 (11), pp. 987-988,.
5. A. I. Gulyaev, Soviet Physics-Technical Physics, **1966**, 10 (10), pp.1441-1449.
6. B. Hajdik, M. Lorey, J. Steinle, K. Thomas, Oil-Journal, **1997**, 8, pp.76-83.
7. W. Fohlingsdorf, H. Unger, International Journal of Heat and Mass Transfer, **1999**, 42, pp. 415-422.
8. A. E. Özgür, "Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti", Yüksek Lisans Tezi, **2001**, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bil. Enst.,Isparta, s.76.
9. Y Çengel, M. Boles, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, 2. Baskı, Literatür Yayıncılık Ltd., İstanbul, **1996**, s.780.
10. K. Stephan, S Lin, M. Durst, F. Huang, D. Seher, Journal of Heat Mass Transfer, **1983**, 26 (3), pp. 344-348.