

Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Kullanılan Vorteks Tüpünde Enerji ve Ekserji Analizi

Volkan KIRMACI

G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, 06500, Beşevler, Ankara, TÜRKİYE
vkirmaci@gazi.edu.tr

Received: 04.09.2006, Accepted: 28.12.2006

Özet: 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 konumda bırakılmıştır. Yapılmış olan deneysel çalışmada, basınçlı akışkan olarak Hava ile hava içinde bulunan Oksijen, Karbondioksit ve Azot gazı kullanılmıştır. Hava, Oksijen (O₂), Karbondioksit (CO₂) ve Azot (N₂) vorteks tüpüne giriş basınçları 2 bar'dan 7 bara kadar 1 bar aralıklarla değişik basınçlarda uygulanmıştır. Bu çalışmada, vorteks tüplerde oluşan enerji ayrışma olayı dört farklı akışkan için deneysel olarak incelenmiştir ve performansı termodinamik açıdan incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca, yapılan ekserji analizi ile sistemdeki kayıp iş ve verim hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Ranque–Hilsch vorteks tüp, Enerji ayrışımı, Ekserji Analizi.

Exergy Analysis And Energy Of Air Oxygen Carbon Dioxide Nitrogen Which Are Used As The Fluid In The Vortex Tube

Abstract: In this study, the vortex tube, having no any moving parts, except the control valve Which was used in order to arrange volumetric flows. In the experimental studies, the control valve on the outlet side of the hot fluid was kept in open position. In the present experimental study, Air, Oxygen (O₂), Carbon Dioxide (CO₂) and Nitrogen (N₂) gases in the air, were used as pressured fluid. Air, Oxygen, Carbon

Dioxide, and Nitrogen were applied to vortex tube for varying the inlet pressure from 2.0 bar to 7 bar having 1 bar intervals. In this study, energy–separation case which occurs in the vortex tubes was investigated experimentally for four types of different fluids and hence its performance was studied thermodynamic investigations were studied. In addition, the lost work and the efficiency of the system were calculated by an exergy analysis.

Key words:, Ranque–Hilsch vortex tube, Energy separation, Exergy analysis.

1. Giriş

Vorteks tüpler, 1931 yılında metalurjist ve fizikçi olan George Joseph Ranque tarafından bulunmuş ve Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiştir [1, 2, 3]. Vorteks tüpü, hareketli bir parçası bulunmayan basit bir borudan ibaret olan basınçlı akışkan kullanılarak aynı anda hem soğuma hem de ısınma işlemi gerçekleştirebilen bir sistemdir [4]. Ebatlarının küçük ve hafif olmaları, gecikmesiz rejime ulaşmaları, kimyasal soğutkanlar gerektirmemeleri ve dolayısıyla ekolojik açıdan zararsız olmaları gibi bir çok özellikleri ile vorteks tüpler günümüzde birçok soğutma ve ısıtma problemine çözüm olabilmektedirler [5, 6].

Vorteks tüpleri değişik özellikleri dikkate alındığında iki ana grupta toplanabilir. Bunlar; akış özellikleri ve tasarım özellikleridir.

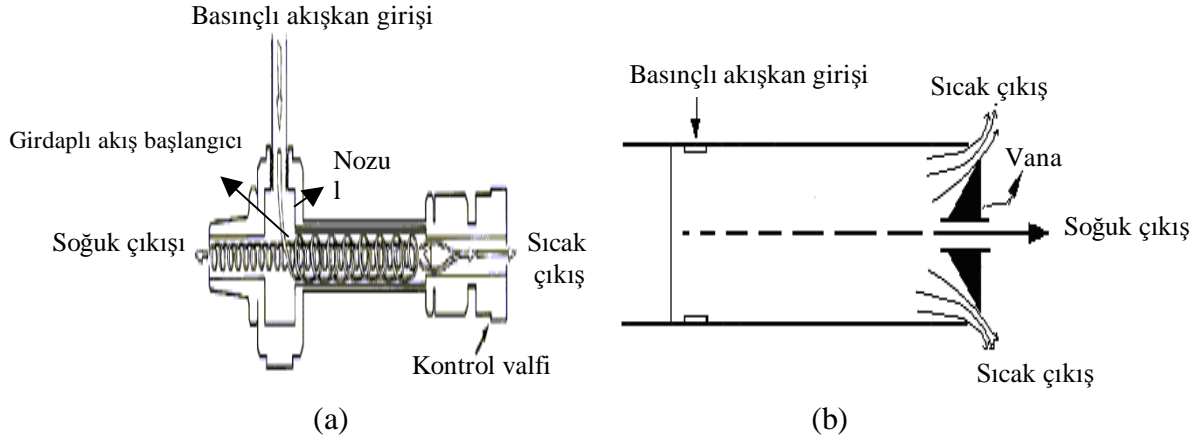
A-) Akış özelliklerine göre;

- I. Karşıt akışlı vorteks tüpler,
- II. Paralel akışlı vorteks tüpler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

B-) Tasarım özelliklerine göre;

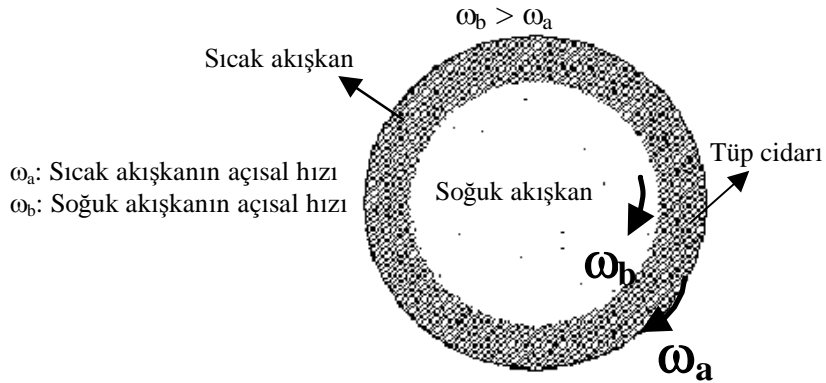
- I. Adyabatik vorteks tüpler,
- II. Adyabatik olmayan vorteks tüpler,

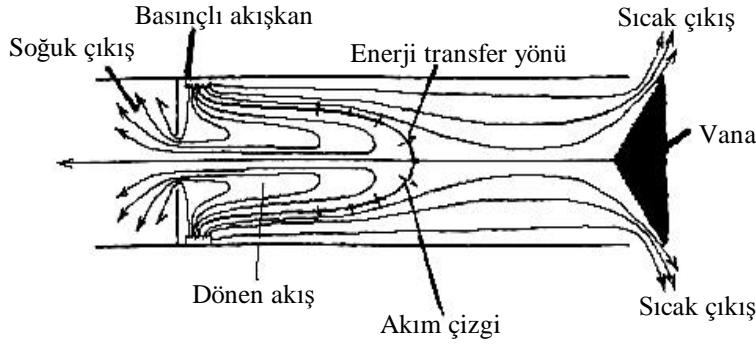
olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar [7, 8]. Vorteks tüpler böyle bir sınıflandırmaya tabi tutulmalarına rağmen tüm cihazların çalışma prensipleri aynı ilkelere dayanır [9]. Karşıt akışlı ve paralel akışlı vorteks tüpünün çalışma prensibi Şekil 1 a ve b’de verilmiştir.



2. Vorteks Tüpünün Çalışma Prensibi

Vorteks tüpü ile iki farklı sıcaklıkta akışkan elde edilmesinin temel prensibi, Şekil 2 ve 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, basıncın düşürülerek hızın artmasını sağlamaktır. Nozul sonrası hız, tüpe giren basınçlı akışkana bağlı olarak tüpün silindirik yapısından dolayı dönmeye başlar. Çok yüksek açısal hızlarda dönen akış merkezkaç kuvvetin etkisi ile tüp cidarına doğru açılmaya zorlanır [9, 12]. Bu etki neticesinde tüp merkezindeki akışkan ile tüp cidarındaki akışkan arasındaki basınç farkı oluşur.





Şekil 3. Karşıt akışlı bir vorteks tüpteki akış [14]

Tüp cidarı ile tüp merkezi arasında oluşan basınç farkı nedeni ile akış radyal yönde merkeze 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 yüzeydeki akışı ivmelendirmeye çalışır. Bu durumda merkezdeki akış cidardaki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezde ki akış soğuk akışkan, tüp cidardaki sürtünme etkisi ve merkezdeki akıştan aldığı mekanik enerjiden dolayı tüp cidarındaki akış sıcak akışkandır. Karşıt akışlı vorteks tüp Şekil 1.a'da görüldüğü gibi, soğuk akış sıcak akışın çıktığı uca yerleştirilmiş olan vananın etkisi ile bir durgunluk noktasından sonra akış geriye doğru yönelir. Bu sayede tüpün bir ucundan sıcak akışkan diğer ucundan ise soğuk akışkan elde edilir [7].

3. Deneysel Çalışma

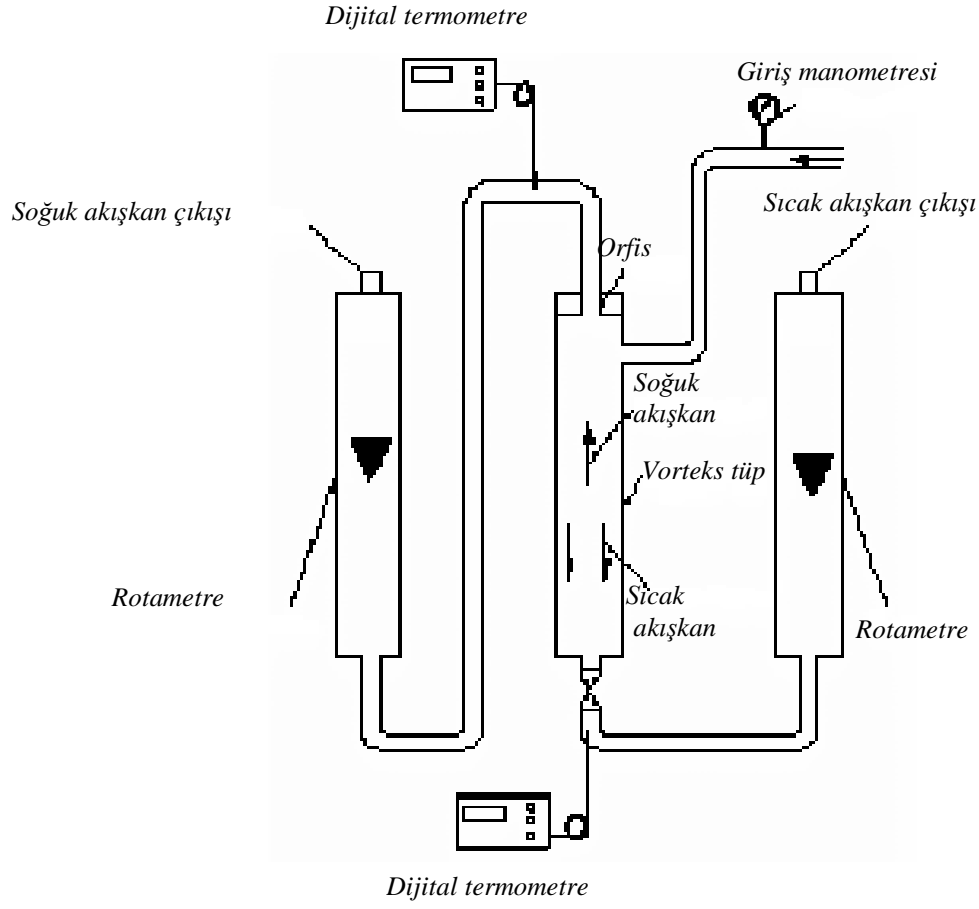
3.1. Deneysel Sistem

Bu çalışmada, iç çapı 11 mm, gövde uzunluğu 160 mm olan abyabatik-karşıt akışlı bir vorteks tüpü kullanılmıştır. Yüksek basınca karşı dayanımını arttırmak için iç çapı 14 mm olan çelik bir boru vorteks tüpün üzerine kafes amacıyla geçirilmiştir. 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'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Vorteks tüpüne, giren basınçlı akışkanın basıncını ölçmek için %1 hassasiyetinde manometre, çıkan soğuk ve sıcak akışkanın hacimsel debilerini ölçmek için %2 hassasiyetindeki rotametreler bağlanmıştır. Vorteks tüpünden çıkan soğuk ve

sıcak akışkanların sıcaklıklarını ölçmek için ± 1 °C hassasiyetinde olan dijital termometreler kullanılmıştır. Dijital termometrelerin probaları vorteks tüpünün sıcak ve soğuk çıkış taraflarından 1 cm ilerisine 1 mm çapında delinmiş tüpün merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiş, etrafı silikonla kapatılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Vorteks tüpünün sıcak akışkanın çıkış ucuna hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol valfi monte edilmiştir.

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 2,0 bar'lık basınç sağlanmıştır. Yapılan basınç ayarlamasından sonra vorteks tüpünün sıcak ve soğuk akışkan çıkışına monte edilen dijital termometrelerdeki okunan sıcaklık değerleri sabit oluncaya kadar aynı basınçta hava kompresörden gönderilmiştir. Vorteks tüpe girişteki basınç, sıcak ve soğuk akışkanın sıcaklık değerleriyle birlikte hacimsel debileri de okunmuştur. Daha sonra 3,0 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 3,0 bar olan basınç değerindeki deney yapılmaya başlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, 3,0; 4,0; 5,0; 6,0 ve 7,0 bar basınç değerleri için, 2,0 bar'daki yapılan işlemler tekrarlanmıştır.

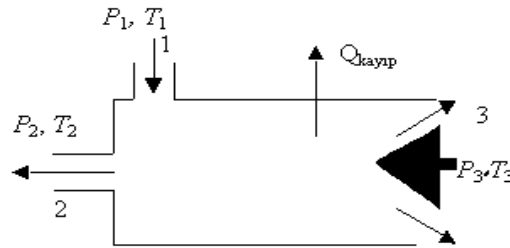
Vorteks tüpünde 2,0 bar ve 7,0 bar arasında basınçlı hava gönderilerek yapılan deneyler tamamlandıktan sonra hava kompresör bağlantısı sistemden çıkarılarak, yerine sırasıyla O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının muhafaza edildiği tüpler bağlanmıştır. Vorteks tüpünde akışkan olarak kullanılan O₂, CO₂ ve N₂ gazları için 2,0 bar ve 7,0 bar basınç değeri arasındaki deneysel işlemler hava deneylerinde yapılan işlemler yapılmıştır.



Şekil 4. Deneysel sistem

4. Bulgular Ve Tartışma

Bu çalışmada, genellikle oda sıcaklığında ve yüksek basınçtaki gazdan giriş sıcaklığına göre daha sıcak ve daha soğuk iki akım elde etmek için kullanılan vorteks tüplerin Termodinamik analizi yapılmıştır. Çözümü esas alınan sistemin genel görünüşü Şekil 5’de verilmiştir [15].



Şekil 5. Sistemin genel görünüşü

Bir giriş ve bir çıkışlı sürekli akışlı açık sistemler için kütle korunumu,

$$\sum \dot{m}_{gir} - \sum \dot{m}_{\check{c}k\check{s}} = 0 \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir [16]. Denk. 1 vorteks tüpü için Denk. 2 şeklinde yazılabilir.

$$\dot{m}_{\check{c}k\check{s}} = \dot{m}_a + \dot{m}_b \quad (2)$$

Vorteks tüpün adiyabatik olduğu ve dış yüzeyden ısı kaybının ihmal edilmiştir [17].

$$\sum \dot{m}h + \sum \dot{m}gz + \sum \dot{m}\frac{v^2}{2} = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad (3)$$

$$\sum \dot{m}h + \sum \dot{m}\frac{v^2}{2} = 0 \quad (4)$$

Giriş ve soğuk ile sıcak çıkışların alanları dikkatle ayarlanıp, yaklaşık $v_1 \approx v_2 \approx v_3$ yapılabilir veya bu hızlar gerçekte de birbirinden çok fazla farklı olmayacağından, kinetik enerji terimlerinin katkısı yaklaşık sıfır alınabilir ve enerji denkliği entalpi denkliğine dönüşür (Denk. 5, 6, 7) [15].

$$\sum \dot{m}h = 0 \quad (5)$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \quad (6)$$

$$\dot{m}_1 c_p (T_1 - T_r) = \dot{m}_2 c_p (T_2 - T_r) + \dot{m}_3 c_p (T_3 - T_r) \quad (7)$$

Referans sıcaklığı $T_r=0$ K, alındığında, Denk. 8 yazılabilir [18].

$$\dot{m}_1 c_p T_1 = \dot{m}_2 c_p T_2 + \dot{m}_3 c_p T_3 \quad (8)$$

Termodinamiğin 2.Yasasına göre;

Vorteks tüpler çoğunlukla gazlar için uygulanır. İdeal gazlar için geçerli olan hal denklemi kullanılarak;

$$PV = nRT \quad (9)$$

Termodinamiğin 2. yasasının genel ifadesi $\Delta S_{toplam} = \Delta S_{sistem} + \Delta S_{\check{c}evre} > 0$ ' dir. P_1, V_1, T_1 ilk halinden P_2, V_2, T_2 , son haline giden bir ideal gaz için;

$$\Delta S = \dot{n} c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \dot{n} R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

olarak yazılabilir.

ΔS (entropi) de ΔV veya ΔH gibi hal fonksiyonudur. Şekil 5’de gösterilen vorteks tüp için;

$$S_2 + S_3 - S_1 > 0 \quad (11)$$

veya

$$\Delta S_{Toplam} = \Delta S_{Soğuk akım} + \Delta S_{Sıcak akım} > 0 \quad (12)$$

yazılabilir. Giren ve çıkan akımların sıcaklık ve basınçları dikkate alınarak molar birimler cinsinden;

$$\Delta S_{Toplam} = \left(\dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \dot{n}_2 R \ln \frac{P_2}{P_1} \right) + \left(\dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_3}{T_1} - \dot{n}_3 R \ln \frac{P_3}{P_1} \right) > 0 \quad (13)$$

olmalıdır. Kütleli birimler kullanılarak ise;

$$\Delta S_{Toplam} = \dot{m}_2 \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right) + \dot{m}_3 \left(c_p \ln \frac{T_3}{T_1} - R \ln \frac{P_3}{P_1} \right) > 0 \quad (14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

$\frac{T_1}{T_2}$ cinsinden $\frac{P_1}{P_2}$ ifadesinin Geliştirilmesi;

$P_2 \approx P_3$ olarak kabul edilerek Denk. 13 yeniden düzenlenirse;

$$\Delta S_{Toplam} = \dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} + \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_3}{T_1} - \left(\dot{n}_2 + \dot{n}_3 \right) R \ln \frac{P_2}{P_1} > 0 \quad (15)$$

gibi yazılabilir. Denk. 15’de $\dot{n}_2 + \dot{n}_3$ görüldüğü yere \dot{n}_1 olarak yazılırsa;

$$-\dot{n}_1 R \ln \frac{P_2}{P_1} > - \left(\dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} + \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_3}{T_1} \right) \quad (16)$$

$$+\dot{n}_1 R \ln \frac{P_1}{P_2} > \dot{n}_2 \tilde{c}_p \ln \frac{T_1}{T_2} + \dot{n}_3 \tilde{c}_p \ln \frac{T_1}{T_3} \quad (17)$$

Denk. 17’deki eşitsizliğin her 2 tarafında \dot{n}_1 ile bölünmüş ve Denk. 18 oluşturulmuştur [15, 19].

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > \frac{\dot{n}_2}{\dot{n}_1} \ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\dot{n}_3}{\dot{n}_1} \ln \frac{T_1}{T_3} \quad (18)$$

Kütleli debiler oranı;

$$y = \frac{m_2}{m_1} \quad (19)$$

olarak tanımlanmıştır [20]. Molar büyüklükler cinsinden y ve $1-y$ Denk. 20 şeklinde yazılmıştır.

$$y = \frac{m_2}{m_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ve} \quad (1-y) = \frac{n_3}{n_1} \quad (20)$$

Denk. 18, Denk. 20 ile kullanılarak Denklem 21

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > y \ln \frac{T_1}{T_2} + (1-y) \ln \frac{T_1}{T_3} \quad (21)$$

elde edilmiştir. Denk. 8 molar büyüklükler cinsinden yazılıp T_3 sıcaklığı T_1 & T_2 cinsinden ifade edilebilir.

$$T_3 = \frac{(T_1 - yT_2)}{(1-y)} \quad (22)$$

elde edilir. Denk. 21 ile Denk. 22 birleştirilerek

$$\frac{R}{c_p} \ln \frac{P_1}{P_2} > y \ln \frac{T_1}{T_2} + (1-y) \ln \frac{T_1}{(T_1 - yT_2)/(1-y)} \quad (23)$$

yazılabilir. Bu ifadelerin tekrar düzenlenmesiyle de, vorteks tüpe girişteki basıncın soğuk çıkış tarafındaki basınca oranına göre değişimi Denk. 24 şeklinde yazılmıştır.

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right) > \left\{ \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^y \left[\frac{(T_1/T_2)(1-y)}{(T_1/T_2) - y} \right]^{(1-y)} \right\}^{\frac{c_p}{R}} \quad (24)$$

T_1 giriş sıcaklığıdır ve genellikle ortam sıcaklığına yakındır ve yine genellikle baştan bilinir. Termodinamiğin 2. Yasasından başlayarak geliştirilen yukarıdaki ifade, belirli bir y değeri için istenilen soğuk akım sıcaklığı olan T_2 'ye ulaşmak için P_1/P_2 'nin ne olması gerektiğini vermektedir.

Vorteks tüpler için ekserji eşitliği:

Bir sistemden elde edilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimiyle çevrenin bulunduğu hale (ölü hale) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyelini veya iş yapma

olanağını göstermektedir ve kullanılabilirlik diye adlandırılır. Bir sistemden elde edilen işin tümünden amaçlarımız doğrultusunda yararlanamayabiliriz. Tersinir iş belirli iki hal arasındaki hal değişimi sırasında bir sistemden elde edilebilecek en çok yararlı iş diye tanımlanır. Başka bir deyişle, sistemle çevre arasındaki ısı geçişinin tersinir olarak gerçekleştiği, ayrıca sistem içinde tersinmezliklerin olmadığı bir hal değişimi söz konusudur. Son hal ölü hal olduğu zaman tersinir iş kullanılabilirliğe eşittir. İş gerektiren hal değişimleri için tersinir iş, hal değişimini gerçekleştirmek için gerekli en az işi gösterir. Tümünden tersinir bir hal değişimi için gerçek ve tersinir iş terimleri aynıdır, böylece tersinmezlik sıfırdır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü tümünden tersinir bir hal değişimi sırasında tersinmezliklerin bir ölçüsü olan entropi üretimi olmaz. Tüm gerçek hal değişimleri sırasında tersinmezlik sıfırdan büyük (artı) bir değerdir [7]. Diğer tüm termodinamik analizler gibi, ekserji analizi için de sürecin nasıl olduğunun bilinmesi gerekli değildir. Sadece sürecin başlangıç-giriş noktaları ile bitiş-çıkış noktaları için geçerli olan koşulların bilinmesi yeterlidir [8].

Kayıp ekserji Denk. 25 ile verilmiştir.

$$I = e_1 - e_{çkş} \quad (25)$$

Vorteks tüp için giren ekserji;

$$e_1 = (h_1 - h_o) - T_o (s_1 - s_o) \quad (26)$$

sıcak akım tarafından çıkan ekserji;

$$e_3 = (h_3 - h_o) - T_o (s_3 - s_o) \quad (27)$$

soğuk akım tarafından çıkan ekserji;

$$e_2 = (h_2 - h_o) - T_o (s_2 - s_o) \quad (28)$$

şeklinde yazılabilir. Vorteks tüpler için sıcak ve soğuk olmak üzere 2 çıkış bulunmaktadır. Bu nedenle Denk. 27 ve Denk. 28 birlikte değerlendirilerek Denk. 29 elde edilmiştir.

$$e_{çkş} = ye_2 + (1 - y)e_3 \quad (29)$$

Bir hal değişimi sırasında, birim zamanda oluşan tersinmezlik hızı, \dot{I} ile gösterilmiş ve Denklem 30 şeklinde yazılmıştır.

$$\dot{I} = m_1 I \quad (30)$$

Adyabatik sistemler için, Denk. 14 kullanılarak Denklem 30 aşağıdaki gibi de yazılabilir.

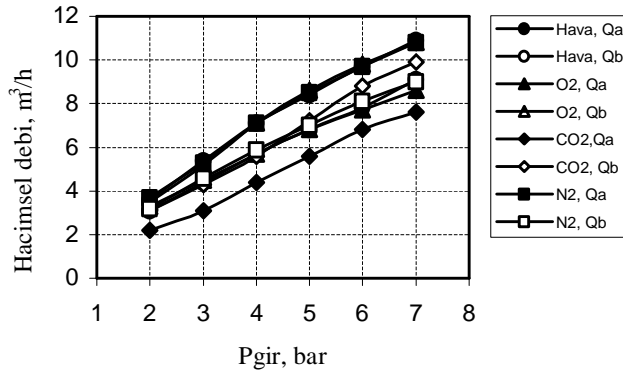
$$\dot{I} \cong T_o \Delta S_{Toplam} = T_o \left[\dot{m}_2 \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right) + \dot{m}_3 \left(c_p \ln \frac{T_3}{T_1} - R \ln \frac{P_3}{P_1} \right) \right] \quad (31)$$

Vorteks tüpler için yapılmış olan ekserji analizinde ise ikinci kanun verimi Denklem 32’de tanımlanmıştır [15, 19].

$$\eta_{II} = \frac{e_{çkş}}{e_{gir}} \cong 1 - \frac{T_o \Delta S_{Toplam}}{\dot{m}_1 e_1} \quad (32)$$

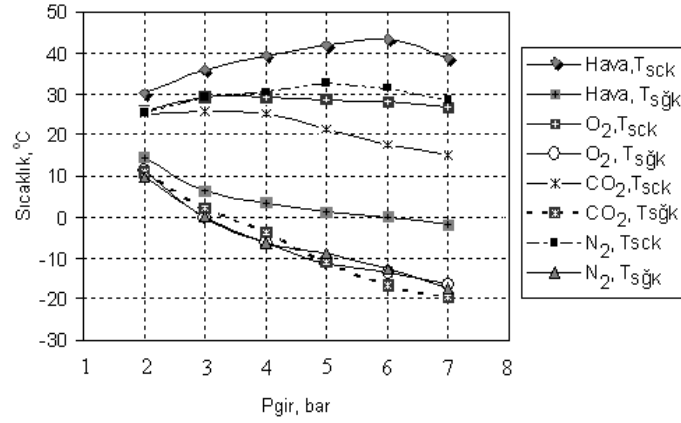
5. Sonuç ve Öneriler

Vorteks tüplerde, sıcak akışın çıkış tarafında bulunan vananın açılıp kapanması ile y_c oranı değişmektedir. Yapılmış olan bu deneysel çalışmada, vana tam açık konumda bırakılarak deneyler yapıldığından y_c oranı sabittir. Şekil 6’de hava, O₂, CO₂ ve N₂’e ait sıcak ve soğuk akışkanın hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişim değerleri gösterilmiştir. Hava, O₂, CO₂ ve N₂’in soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debileri Vorteks tüpe giriş basıncı artıkça lineer bir doğru şeklinde artmıştır.



Şekil 6. Hava, O₂ ve CO₂ 'tin vorteks tüpünden çıkan soğuk hacimsel debilerinin vorteks tüpüne girişteki basınca göre değişimi

Şekil 7’de hava, O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının, sıcak akışkanın sıcaklığı (T_{sck}) ve soğuk akışkanın sıcaklığının ($T_{soğ}$) girişteki basınç ile değişimi verilmiştir. Sıcak akışkanın sıcaklığının en fazla havada, en az ise CO₂’de olduğu görülmektedir. Ancak, CO₂’in en az ısınmasına rağmen, en fazla soğuma olayı CO₂ gazında olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir (Şekil 7).

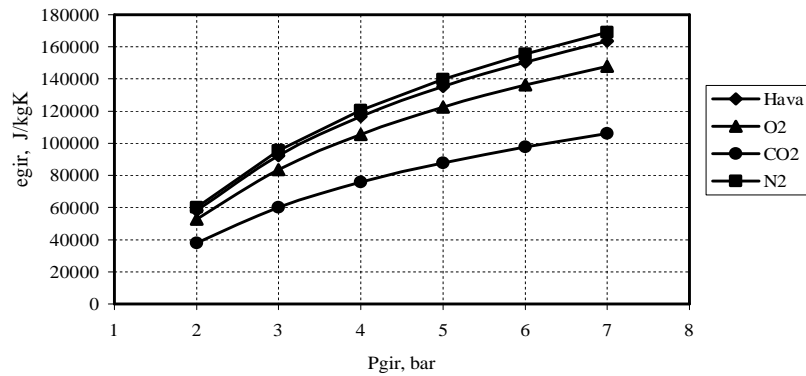


Şekil 7. Hava, O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının T_{sck} ve T_{soğ}'nın vorteks tüpü girişteki basınç ile değişimleri

Şekil 7'de görüldüğü gibi 7 bar giriş basıncında, hava, Azot, Oksijen ve Karbondioksit gazlarının, vorteks tüpün sıcak çıkış tarafındaki sıcaklık değerleri sırasıyla 38,7 °C; 28,5 °C; 26,7; °C; 15 °C, vorteks tüpü giriş basıncının 7 bar olduğunda, Karbondioksit, Azot, Oksijen ve havanın, vorteks tüpünden çıkan soğuk çıkış sıcaklıkları sırasıyla -19,7 °C; -17,4 °C; -16,4 °C ve -2,1 °C'dir.

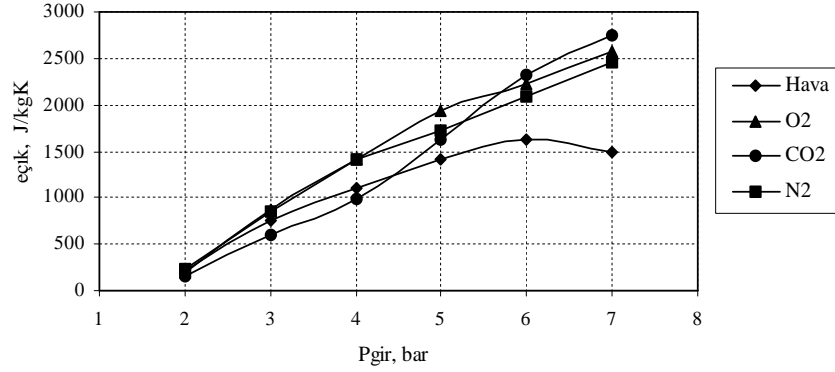
Vorteks tüpe girişteki basınç 2 bar'dan başlayarak 1 bar aralıklarla 7 bar'a kadar yükseltilerek yapılmış olan değişik giriş basıncındaki değişik gazlarla vorteks tüpünde yapılan deneyin deneysel verileri kullanılarak, ekserji analizi yapılmıştır. Ekserji analizi için gerekli olan entalpi, entropy değeri "CoolPack" bilgisayar programından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda en fazla giren ekserji, en fazla çıkan ekserji, kayıp ekserji ve İkinci kanun verimi hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmada vorteks tüpünde kullanılan Hava, O₂, CO₂ ve N₂ giriş basıncının artmasıyla girişteki ekserjide sürekli artış göstermiştir. Aynı basınç'da, vorteks tüplerin giriş ekserjileri birbiri ile mukayese edildiğinde, en fazla giren ekserjinin, N₂; en az giren ekserji ise CO₂ olmuştur (Şekil 8).



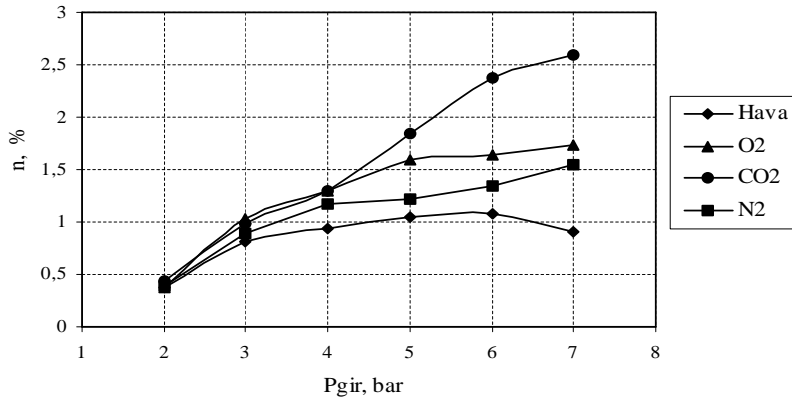
Şekil 8. Hava, O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının e_{gir} değerlerinin vorteks tüpü girişteki basınç ile değişimleri

Vorteks tüpünde kullanılan Hava, O₂, CO₂ ve N₂ giriş basıncının artmasıyla çıkış ekserjide sürekli artış göstermiştir. Ancak Hava 6 bar'dan sonra çıkış ekserjide azalma olmuştur. Hava, O₂, CO₂ ve N₂ çıkış ekserjileri birbiri ile mukayese edildiğinde, en fazla çıkış ekserjinin, CO₂; en az çıkan ekserji ise Hava olmuştur (Şekil 9).



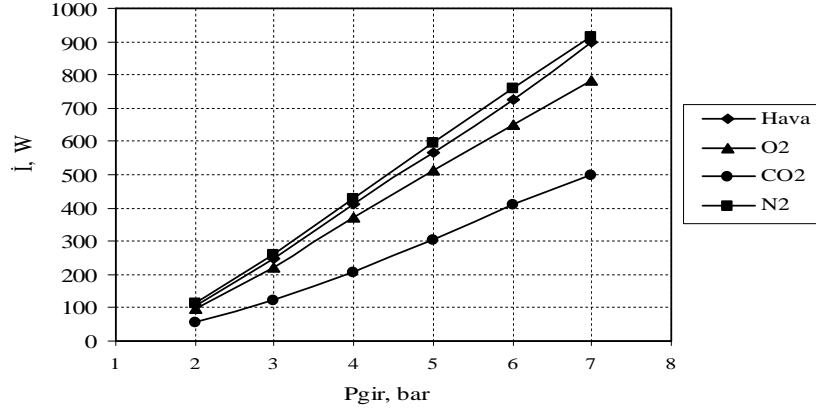
Şekil 9. Hava, O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının e_{çık} değerlerinin vorteks tüpü girişteki basınç ile değişimleri

Basıncın yükselmesi ile e_{gir} sürekli artış göstermiştir. Buna karşılık e_{çık}, e_{gir}'e göre çok düşük değerlerde kalmıştır. Bu durum 2. kanun verimini etkilemiştir (Şekil 10). 2. kanun veriminin çok düşük değerler almasının nedeni, vorteks tüplerde gerçekleşen süreçlerin tersinmez olmasıdır. Vorteks tüplerde, faydalı iş enerjisinden (sıkıştırılmış akışkanın enerjisinden) yararlanılarak noktasal olarak ısıtma veya soğutma yapılmaktadır.



Şekil 10. Hava, O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının η değerlerinin vorteks tüpü girişteki basınç ile değişimleri

Şekil 11'de tersinmezlik hızı olan İ'nin vorteks tüpe giriş basıncına göre değişimi verilmiştir. Tersinmezlik hızı, P_{gir}'in yükselmesi ile artmıştır.



Şekil 11. Hava, O₂, CO₂ ve N₂ gazlarının İ değerlerinin vorteks tüpü girişteki basınç ile değişimleri

5. Simgeler

c_p sabit basınçtaki özgül ısı, $J kg^{-1} K^{-1}$

\tilde{c}_p sabit basınçtaki özgül ısı, $J mol^{-1} K^{-1}$

e ekserji, $kJ kg^{-1}$

h entalpi, $kJ kg^{-1} K^{-1}$

I kayıp ekserji, $kJ kg^{-1}$

\dot{I} tersinmezlik hızı, kW

\dot{m} kütle debisi, $kg s^{-1}$

\dot{n} molar hız, $mol s^{-1}$

P basınç, bar

R gaz sabiti, $287 J kg^{-1} K^{-1}$

s entropi, $kJ kg^{-1} K^{-1}$

T_o çevre sıcaklığı, K

T_r referans sıcaklığı, K

T_1 girişteki akışkanın sıcaklığı, K

T_2 soğuk akışkanın sıcaklığı, K

T_3 sıcak akışkanın sıcaklığı, K

ΔT sıcak akışın sıcaklığı ile soğuk akışın sıcaklığı arasındaki fark, K

Q ısı geçişi, kJ

V hacim, m^3

η_{II}	ekserji verimi
y	soğuk akışın kütle debisinin girişteki akışın kütle debisine oranı
1-y	sıcak akışın kütle debisinin girişteki akışın kütle debisine oranı

İndisler

0	çevre hali
1	giriş
2	soğuk çıkış
3	sıcak çıkış
Δ	değişim
çık	çıkış
gir	giriş
sck	sıcak
soğ	soğuk

6. Kaynaklar

- [1] M. Yılmaz, Ö. Çomaklı, M. Kaya, S. Karşlı, *Mühendis ve Makine*, **2006**, 47, 554, 42-51.
- [2] N. Özkul, Uygulamalı Soğutma Tekniği, 5. Baskı, *Makine Mühendisleri Odası Yayın No:115*, Ankara, **1999**, s. 709.
- [3] P. Promvonge, S. Eiamsa-ard, *ScienceAsia*, **2005**, 31, 215-223.
- [4] A.D. Althouse, C.H. Turnquist, A.F. Bracciano, Modern Refrigeration and Air Conditioning, *The Goodheart-Willcox Company Inc.*, South Holland, **1979**.
- [5] R. Balmer, *Journal of Fluids Engineering-Trans. of Asme*, **1988**, 110, 2, 161-164.
- [6] A.E. Özgür, R. Selbaş, İ. Üçgül, *V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, **2002**, 387-397.
- [7] A. E. Özgür, Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti, *Yüksek Lisans Tezi*, **2001**, Isparta Üniversitesi Fen Bil. Enst.,Isparta, s. 85.
- [8] H. Usta, V. Kırmacı, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, **2006**, 8, 2.
- [9] W. Fröhlingsdorf, H. Unger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **1999**, 42, 415-422.

- [10] C.D. Fulton, *Refrig. Eng.*, **1950**, 5, 473-479.
- [11] T. Coccerill, Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque Hilsch Vortex Tube. *MSc Thesis*, **1998**, University of Cambridge.
- [12] H. Usta, V. Kırmacı, K. Dincer, *Teknoloji*, **2005**, 8, 4, 311-319.
- [13] B. Hajdik, M. Lorey, J. Steinle, K. Thomas, *Oil-Journal*, 1997, 76-83.
- [14] U. Behera, P.J. Paul, S. Kasthuriengan, R. Karunanithi, S.N. Ram, K. Dinesh, S. Jacob, *Internation Journal of Heat and Mass Transfer*, **2005**, 48, 1961-1973.
- [15] K. Dincer, B.Z. Uysal, Ş. Başkaya, M. Sivrioğlu, İ. Üçgül, *ULIBTK'05 15. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, **2005**, Trabzon.
- [16] Y. Çengel, M. Boles, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, *Literatür Yayıncılık Ltd.*, İstanbul, **1996**, 780.
- [17] H. Usta, K. Dincer, V. Kırmacı, *Teknoloji*, **2004**, 7, 3, 415-425.
- [18] H. Usta, K. Dincer, V. Kırmacı, H.İ. Variyenli, *C.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, **2003**, 24, 2, 28-39
- [19] K. Dincer, B.Z. Uysal, Ş. Başkaya, M. Sivrioğlu, İ. Üçgül, 4. Internation Advanced Technologies Symposium, **2005**, Konya.
- [20] M.H. Saidi, M.S. Valipour, *Applied Thermal Engineering*, **2003**, 23, 1971-1980