

VORTEKS TÜPÜNDE AKIŞKAN OLARAK HAVA OKSİJEN KARBONDİOKSİT AZOT VE ARGON KULLANILARAK ISITMA- SOĞUTMA SICAKLIK PERFORMANSLARININ DENEYSEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Volkan KIRMACI , Hüseyin USTA, Tayfun MENLİK

G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, 06500, Beşevler, Ankara. Tel: 312 2836120 (1867), vkirmaci@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, hacimsel debileri ayarlamak için bir kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası bulunmayan, iç çapı 11 mm ve gövde uzunluğu 160 mm olan vorteks tüplü kullanılmıştır. Vorteks tüpü deneylerinde genellikle akışkan olarak hava kullanılmaktadır. Hava; azot (N₂) (%78.09), oksijen (O₂) (%20.95), argon (Ar) (%0.93), karbondioksit (CO₂) (%0.03) ve az oranda da başka gazları ihtiva etmektedir. Yapılmış olan deneysel çalışmada, basınçlı akışkan olarak hava ile hava içinde bulunan O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazları kullanılmıştır. Bu gazlarının kullanılmasındaki amaç, hava içinde bulunan O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazlarının vorteks tüpündeki soğutma etkisinin, havaya göre değişimini incelemektir. Deneysel çalışmada giriş basıncı 2,0 ile 7,0 bar arasında 1,0 bar aralıklarla değişik basınçlarda uygulanmıştır. Vorteks tüplerde oluşan enerji ayrışması olayı beş farklı akışkan için deneysel olarak incelenmiş ve deneysel sonuçlar dikkate alınarak Hava, O₂, N₂, CO₂ ve Ar gazlarına ait grafikler oluşturularak yorumlar yapılmıştır.

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

EXPERIMENTAL COMPARING STUDY OF COOLING – HEAT PERFORMANCES OF AIR, OXYGEN, CARBONDIOXIDE, NITROGEN AND ARGON USED IN THE VORTEX TUBE

ABSTRACT

In this study, the vortex tube having no any moving parts, inside diameter and body length of that are 11 mm and 160 mm, except the control valve was used in order to adjust volumetric flow rates. Air is usually used as the pressured fluid in the vortex tube. 78.09% of nitrogen (N₂), 20.95% of oxygen (O₂), 0.93% of argon (Ar), 0,03% carbondioxide and other gases at very less amount are existing the air. In the present experimental study, air and O₂, CO₂, N₂ and Ar gases in the air were used as the pressured fluid. The objective of using O₂, CO₂, N₂ and Ar gases was to inspect change of cooling influence between air and O₂, CO₂, N₂, Ar in the vortex tube. Air, O₂, CO₂, N₂ and Ar were applide to vortex tupe for inlet pressure from 2.0 bar to 7 bar in 1 bar intervals. Energy–separation case which occurs in the vortex tubes was investigated experimentally for five different fluids and result were evaluated and comments were made on the results suggested by graphiceses.

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

1. GİRİŞ

Vorteks tüpler, 1931 yılında metalurjist ve fizikçi olan George Joseph Ranque tarafından bulunmuş ve Rudoph Hilsch tarafından geliştirilmiştir [1,2]. 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 [3]. Gecikmesiz olarak rejime giren, kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası olmayan bu sistem, birçok

soğutma ve ısıtma problemine çözüm olabilmektedirler [4].

Ebatlarının küçük ve hafif olmaları, gecikmesiz rejime ulaşmaları, kimyasal soğutkanlar gerektirmemeleri ve dolayısıyla ekolojik açıdan zararlı olmamaları gibi bir çok özellikleri ile vorteks tüpler günümüzde bazı alanlarda kullanılmaktadır [5].

Vorteks tüpünde soğutma-ısıtma enerjinin ayrışımı ile meydana gelmektedir. Bu olay enerjinin ayrışımı ile ifade edilen karmaşık bir işlemdir. Vorteks tüpler

üzerinde çalışmalar uzun süredir devam etmesine rağmen, vorteks tüplerin içinde gerçekleşen olayın matematiksel olarak çözümü oldukça zordur [6].

Vorteks tüpleri akış ve tasarım özelliklerine göre iki ana grupta toplanabilir. Bunlar;

A-) Akış özelliklerine göre;

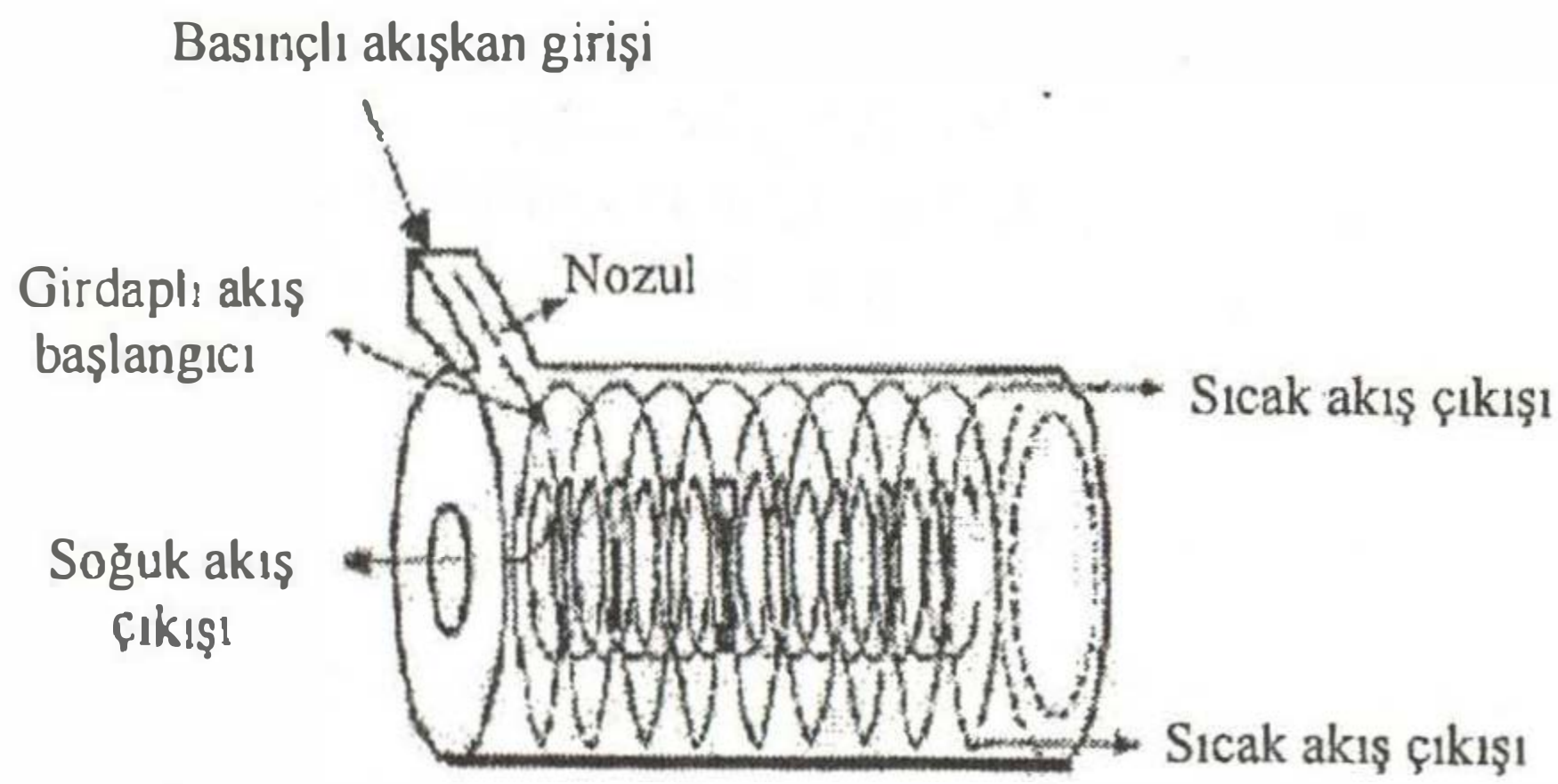
- Karşıt akışlı vorteks tüpler,
- Paralel akışlı vorteks tüpler ;

B-) Tasarım özelliklerine göre;

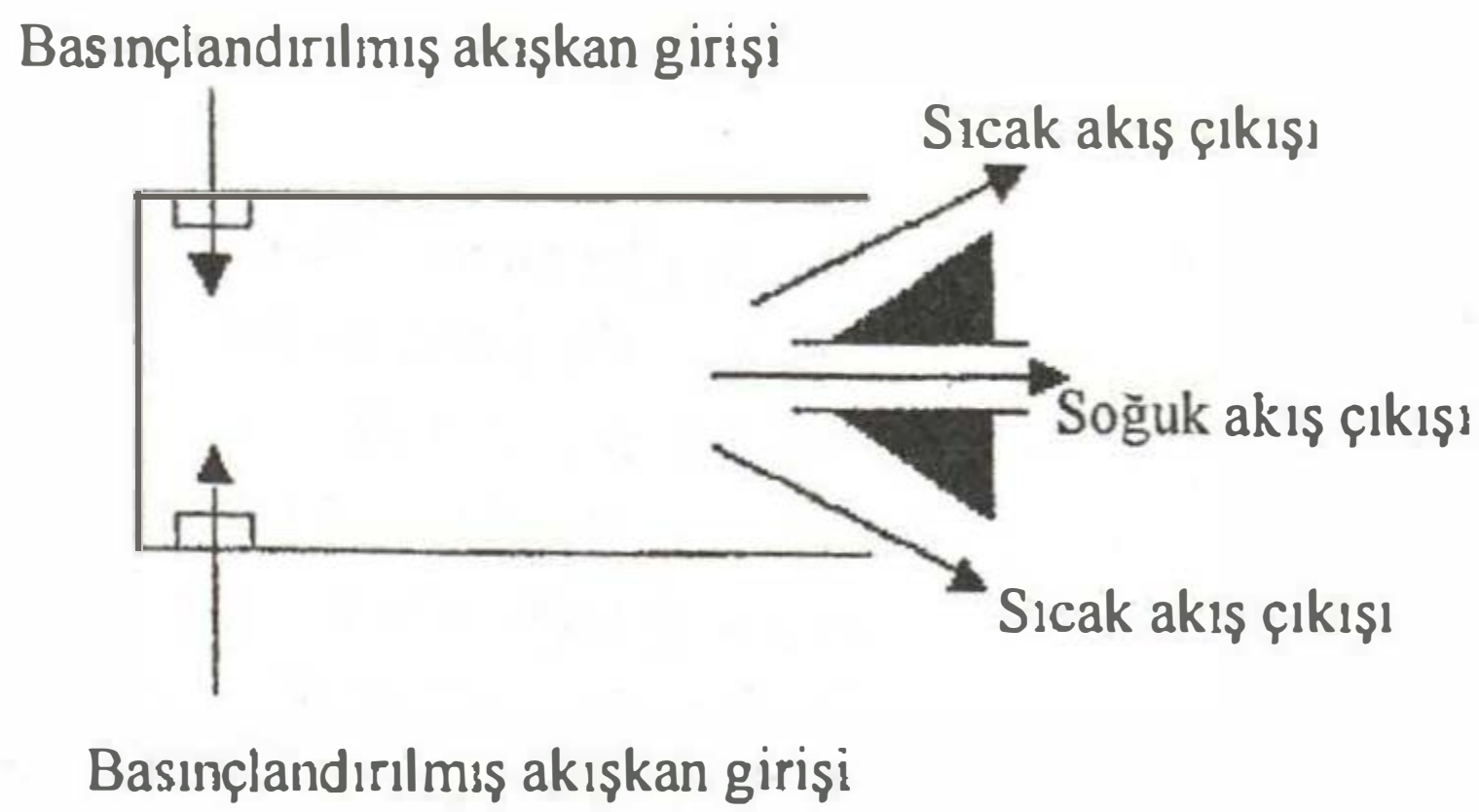
- Adyabatik vorteks tüpler,
 - Adyabatik olmayan vorteks tüpler,
- olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar [7].

Vorteks tüpler böyle bir sınıflandırmaya tabi tutulmalarına rağmen tüm cihazların çalışma prensipleri aynı ilkelere dayanır [8].

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].

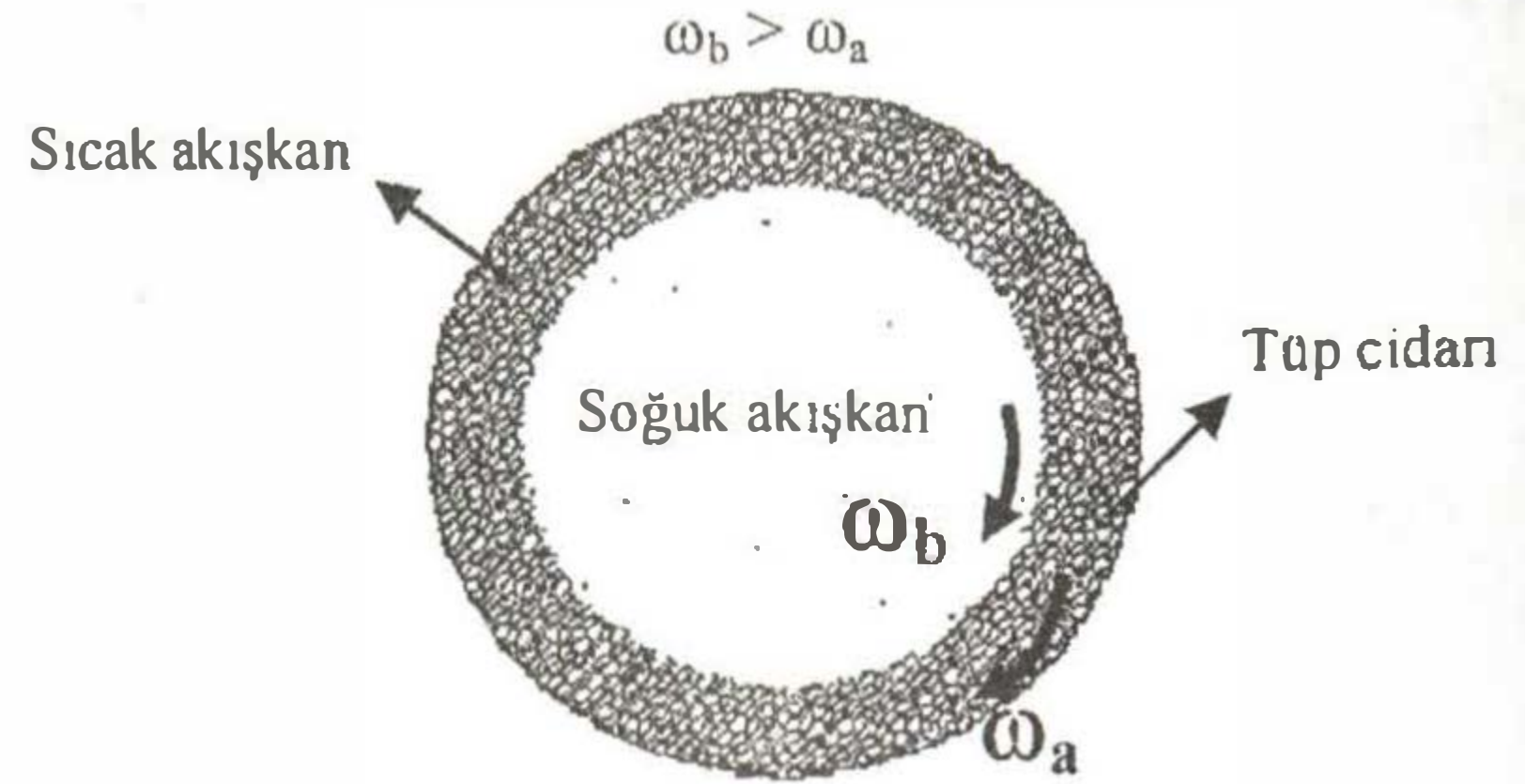
II. VORTEKS TÜPÜNÜN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE UYGULAMA ALANLARI

II.1. Vorteks Tüpünün Çalışma Prensibi

Vorteks tüpü ile iki farklı sıcaklıkta akışkan elde edilmesinin temel prensibi, Şekil 3 ve Şekil 4'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. Kısılma sonrası ses

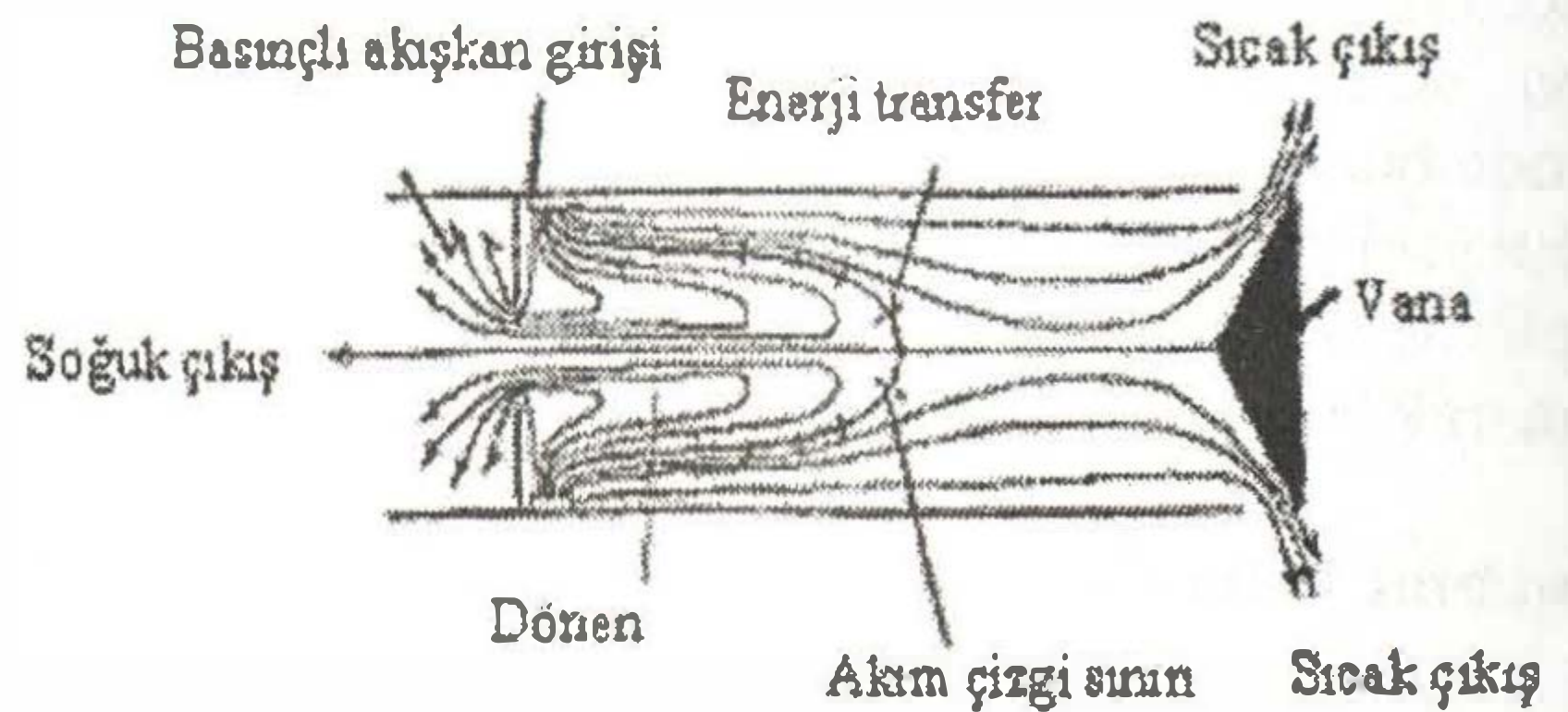
Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması
V. Kırmacı

hızı değerlerine (tüpe uygulanan basınca bağımlı olarak) olan akış, tüpün silindirik formu nedeni ile dönmeye başlar. Çok yüksek açısal hızlarda dönen akış merkezkaç kuvvetin etkisi ile tüp cidarına doğru açılmaya zorlanır [8]. Bu etki neticesinde tüp merkezindeki akışkan ile tüp cidarındaki akışkan arasındaki basınç farkı oluşur.



ω_a: Sıcak akışkanın açısal hızı
ω_b: Soğuk akışkanın açısal hızı

Şekil 3. Vorteks tüpünün içindeki sıcak ve soğuk akışın hareketi [10].



Şekil 4. Karşıt akışlı bir vorteks tüpteki akış [11]

Tüp yüzeyi 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 yüzeyindeki 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 yüzeydeki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkezdeki akış soğuk akış, tüp cidarındaki sürtünme etkisi ve merkezdeki akıştan aldığı mekanik enerjiden dolayı tüp yüzeyindeki akış sıcak akıştır. Karşıt akışlı vorteks tüpü Şekil 1'de 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 akış diğer ucundan ise soğuk akış elde edilir [7].

III.2. Vorteks Tüplerin Kullanım Alanları

Oluşturdukları ısıl ayrışma, vorteks tüplerin ısıtma ve soğutma gereksinimi gösteren uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmasını sağlamaktadır. Şüphesiz ki uygulama alanı, tüpten elde edilebilecek ısıtma ve

soğutma kapasitesine son derece bağımlıdır. Vorteks tüplerin verimi, geleneksel soğutma sistemlerine göre oldukça düşük olmasına rağmen, düşük ilk yatırım maliyetleri ve gecikmesiz olarak rejime girmesi bu dezavantajı giderebilmektedir. Hazır bir basınçlı akışkan kaynağı var ise gerekli olan ısıtma ve soğutma hemen hemen maliyetsiz olarak sağlanabilir [12,13].

Vorteks tüplerin uygulama alanları;

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 işlemlerin,
9. Elektronik devrelerin soğutulmasında,
10. Gaz endüstrisinde kurutma işlerinde,
11. Buz elde etmekte,
12. Uçaklar, uzay araçları ve madenlerin soğutulmasında,
13. Buharlı güç üretim sistemlerinin çabuk çalışmaya başlaması için,
14. İtfaiyeci elbiselerinin soğutulmasında,
15. Peltier soğutucuların performansını geliştirmek için termoçiftlerle birlikte,
16. Dalgıçların hava ikmal kaynaklarının sıcaklık kontrolünde,
17. Sualtı araştırma habitatı içerisindeki havanın şartlandırılmasında,
18. Hiperbasınçlı odalarda,
19. Lokal ısınmanın olduğu alanlarda soğutma,
20. Düşük kapasiteli gıda soğutucularda kullanılması, olarak sıralanabilir [7].

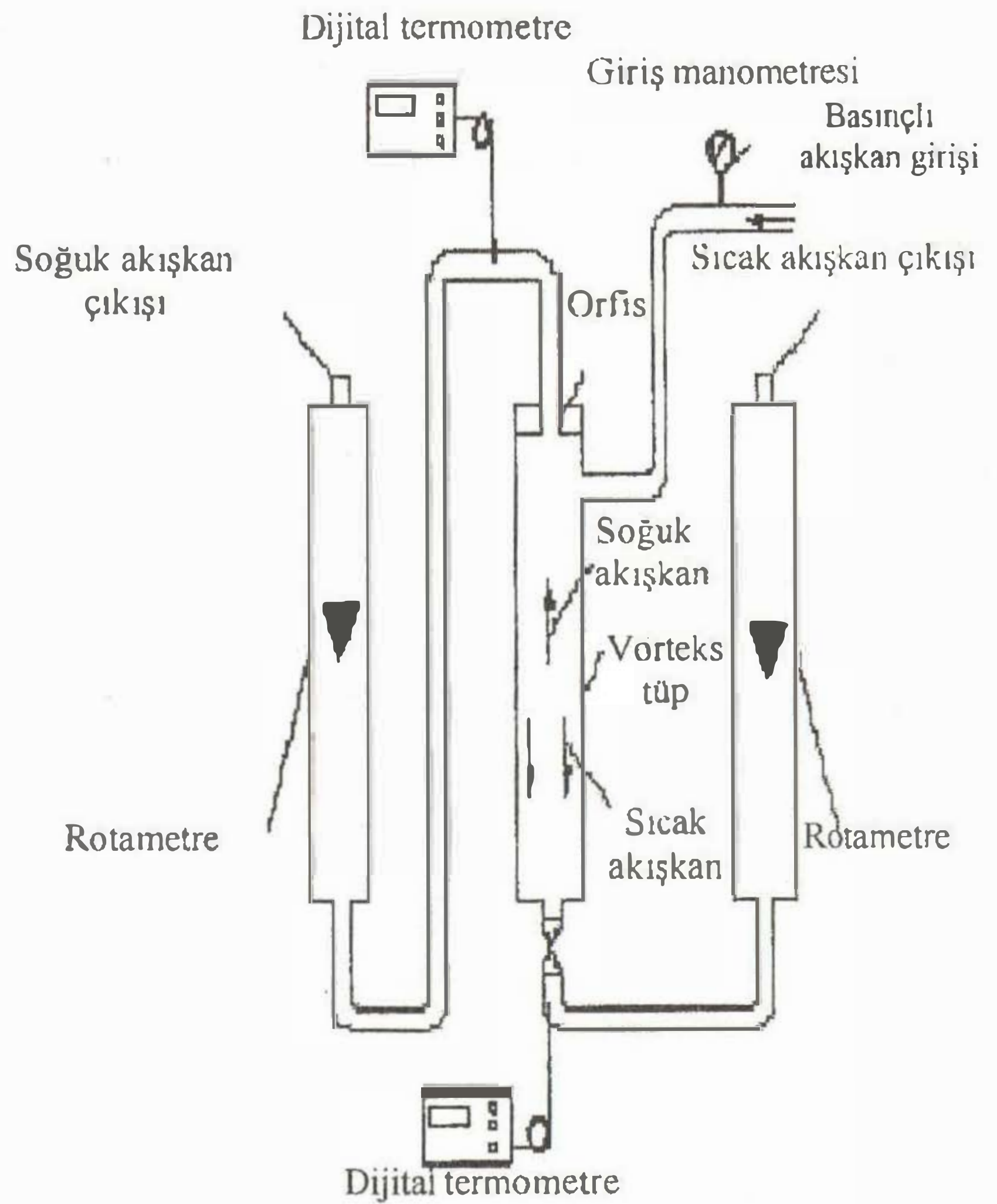
III. DENEYSEL ÇALIŞMA

III.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 5 'deki gibi yerleştirilmiştir. Vorteks tüpüne, giren basınçlı akışkanın basıncını ölçmek için %1 hassasiyetinde manometre, çıkan soğuk ve sıcak akışkanın hacimsel debilerini ölçmek için rotametreler bağlanmıştır. Rotametreler havanın hacimsel debisini ölçmek üzere kalibre edilmiş olup, skala değeri üzerinden $\pm\%2$ hassasiyetle ölçüm yapmaktadır. Vorteks tüpünden çıkan soğuk ve sıcak akışkanların sıcaklıklarını ölçmek için $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyetinde olan dijital termometreler kullanılmıştır. Dijital termometrelerin problemleri vorteks tüpünün sıcak ve soğuk çıkış taraflarından 1 cm ilerisine 1 mm çapında

Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması
V. Kırmacı

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. Bu vananın açılıp kapanmasına bağlı olarak çalışan vorteks tüpünün performansı sıcak akışkanın sıcaklığı (T_a) ile soğuk akışkanın sıcaklığı (T_b) arasındaki fark olan $T_a - T_b$ cinsinden incelenmiştir. Dolayısı ile vorteks tüp deneysel sistemi çevre şartlarından bağımsızdır.



III.2. Deneylerin 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 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 basınç değerindeki deney yapılmaya başlanmıştır. 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; ve 7,0 bar basınç değerleri için yapılan deneysel çalışmalarda, 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 kompresörü sistemden çıkarılarak, yerine deneyde kullanılan diğer gazların muhafaza edildiği tüpler sırasıyla bağlanarak deneyler tamamlanmıştır.

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

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

$$\sum m_{gir} = \sum m_{çkş} \quad (1)$$

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

$m_{çkş}$: Çıkıştaki akışkanın kütleli debisi, kg/s

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 1 vorteks tüpü için Eşitlik 2 şeklinde yazılabilir [14].

$$m_{çkş} = m_a + m_b \quad (2)$$

Vorteks tüpünde, soğuk akışkanın kütle debisinin girişteki akışkanın kütle debisine oranı y_c olarak tanımlanmış ve Eşitlik 3 ile verilmiştir.

$$y_c = \frac{m_b}{m_{gir}} \quad (3)$$

m_a : Sıcak akışkanın kütleli debisi, kg/s

m_b : Soğuk akışkanın kütleli debisidir, kg/s [15].

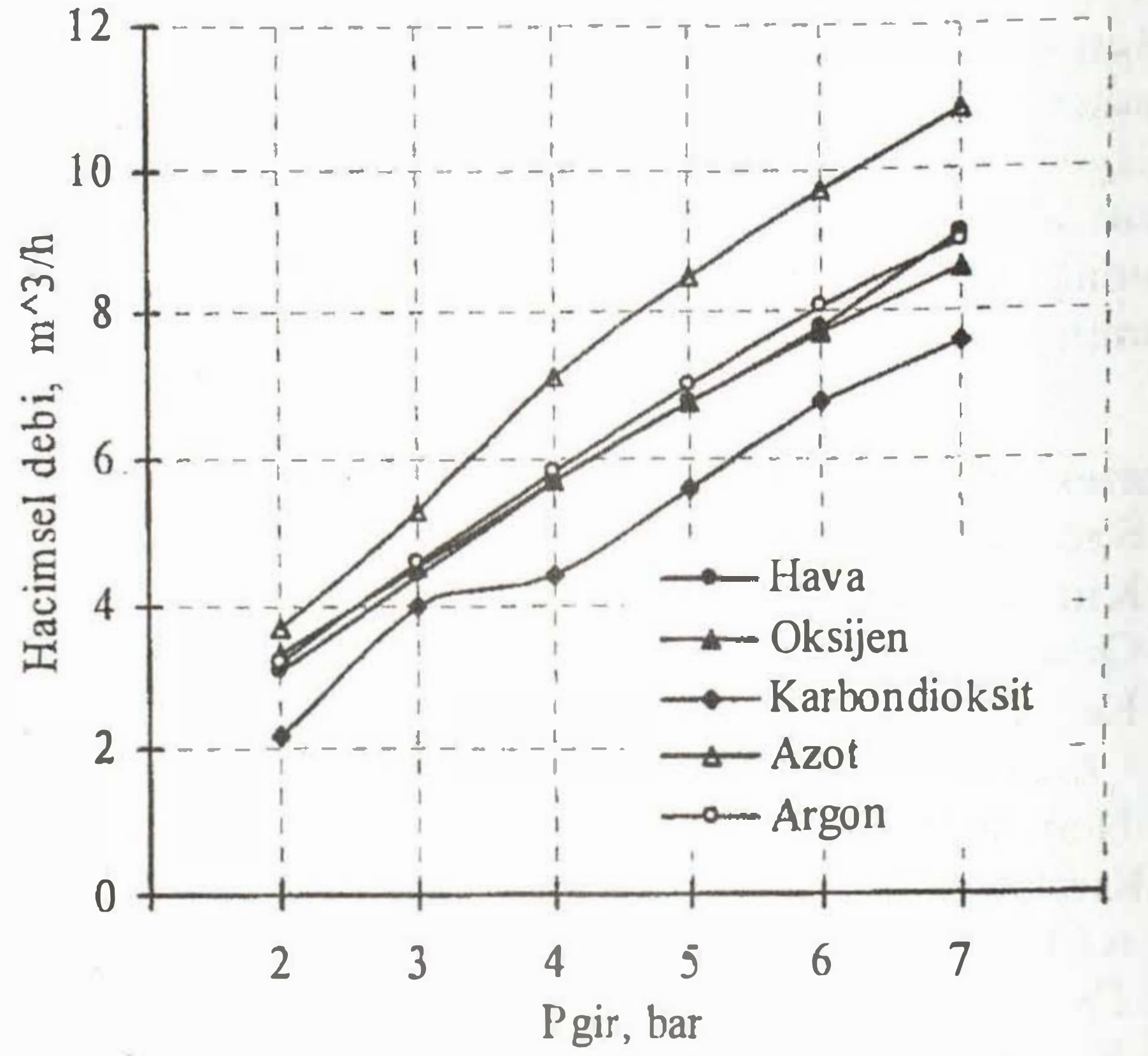
Vorteks tüplerde, sıcak akışın çıkış tarafında bulunan vananın açılıp kapanması ile y_c oranı değişmektedir. Yapılmış olan bu deneysel çalışmada, vorteks tüpün sıcak akış çıkışındaki vana tam açık konumunda bırakılarak deneyler yapıldığından y_c oranı değişmemektedir. Deneyler sırasındaki y_c oranı yaklaşık olarak 0,5 olmaktadır.

Şekil 6 ve Şekil 7'de hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar ait sıcak ve soğuk akışkanın hacimsel debilerinin vorteks tüpüne giriş basıncına göre değişim değerleri gösterilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7'de hava dışında kullanılan diğer gazların gösterge debisi (m³/h) Tablo 1'de verilen dönüş katsayıları ile çarpılarak düzeltilmiştir [16].

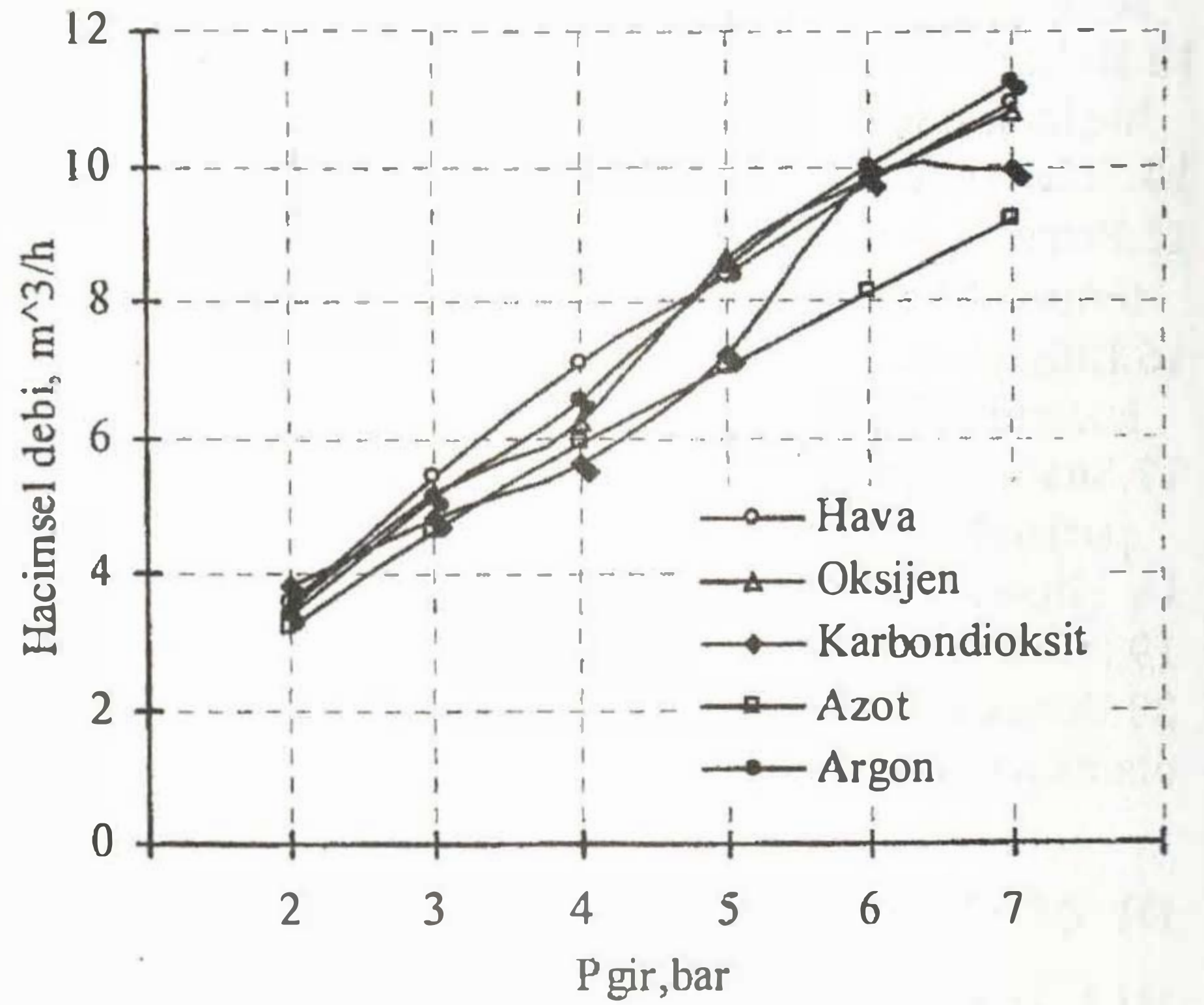
Tablo 1. Dönüş Katsayı

Göster Skalası	O ₂	CO ₂	N ₂	Ar
Hava	0,95	0,81	1,02	0,85

Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması
V. Kırmacı

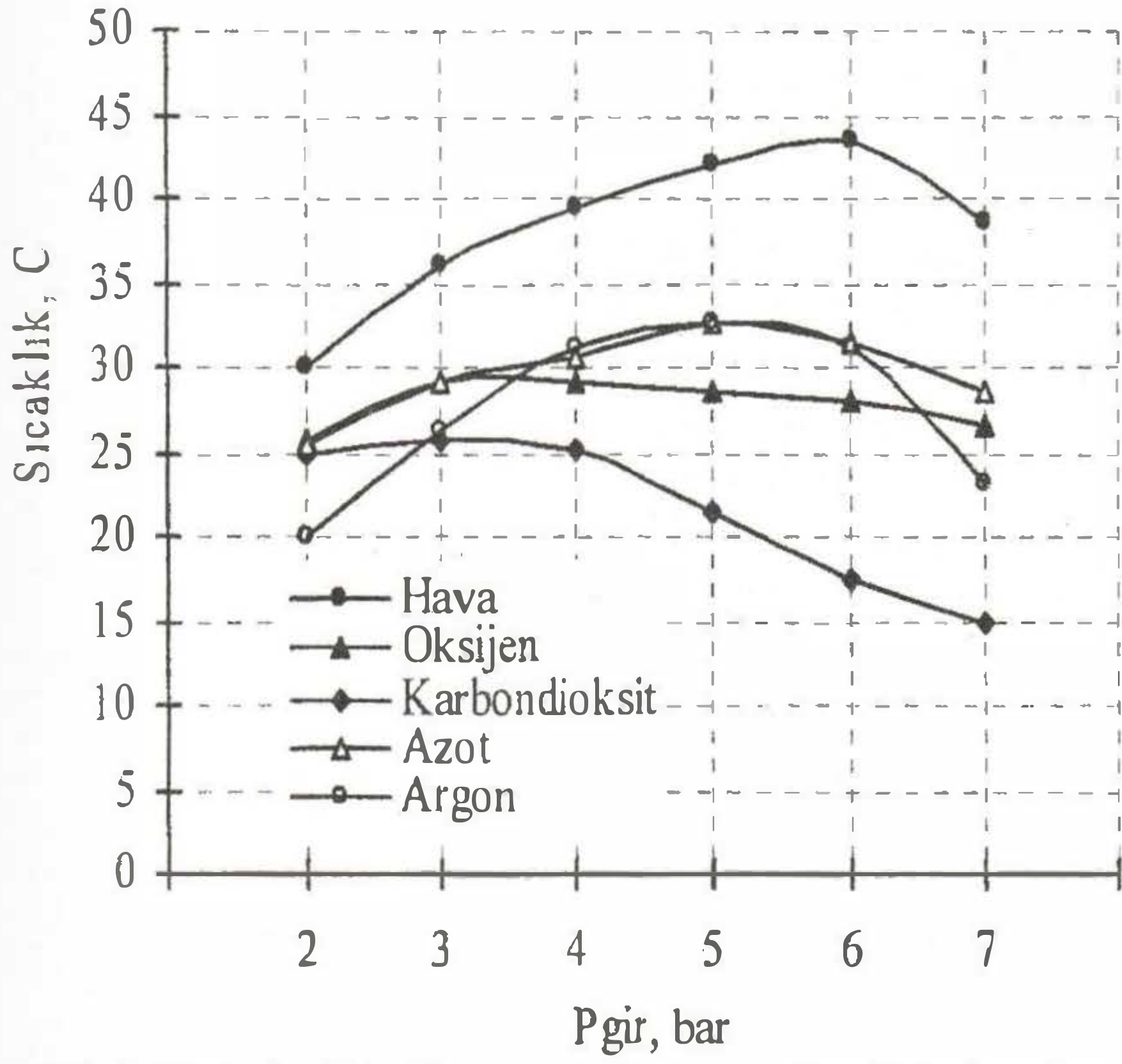


Şekil 6. Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar'nun vorteks tüpünden çıkan sıcak hacimsel debilerinin vorteks tüpüne girişteki basınca göre değişimi



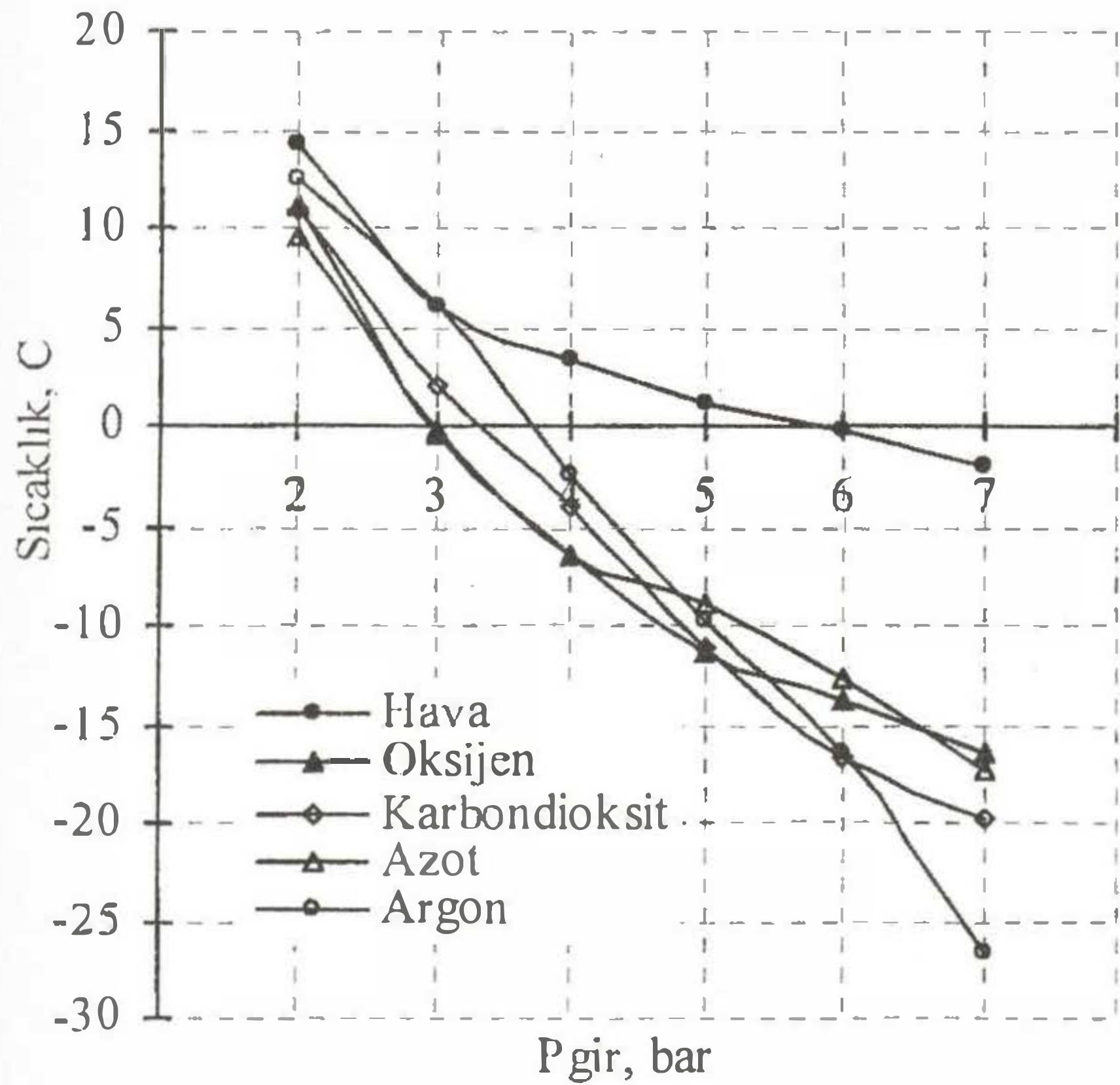
Şekil 7. Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar'nun vorteks tüpünden çıkan soğuk hacimsel debilerinin vorteks tüpüne girişteki basınca göre değişimi

Şekil 6 ve Şekil 7'de görüldüğü gibi, Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar'nin soğuk ve sıcak akışkanların hacimsel debileri lineer bir doğru şeklinde artmıştır. Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazlarının soğuk akışın hacimsel debisinin, sıcak akışın hacimsel debisinden daha fazla olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Şekil 8'de hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazlarının vorteks tüpünden, çıkan sıcak akışkanın sıcaklığının girişteki basınç ile değişimi verilmiştir.



Şekil: 8. Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazlarının vorteks tüpünden çıkan sıcak akışkan sıcaklığının giriş basınç ile değişimleri

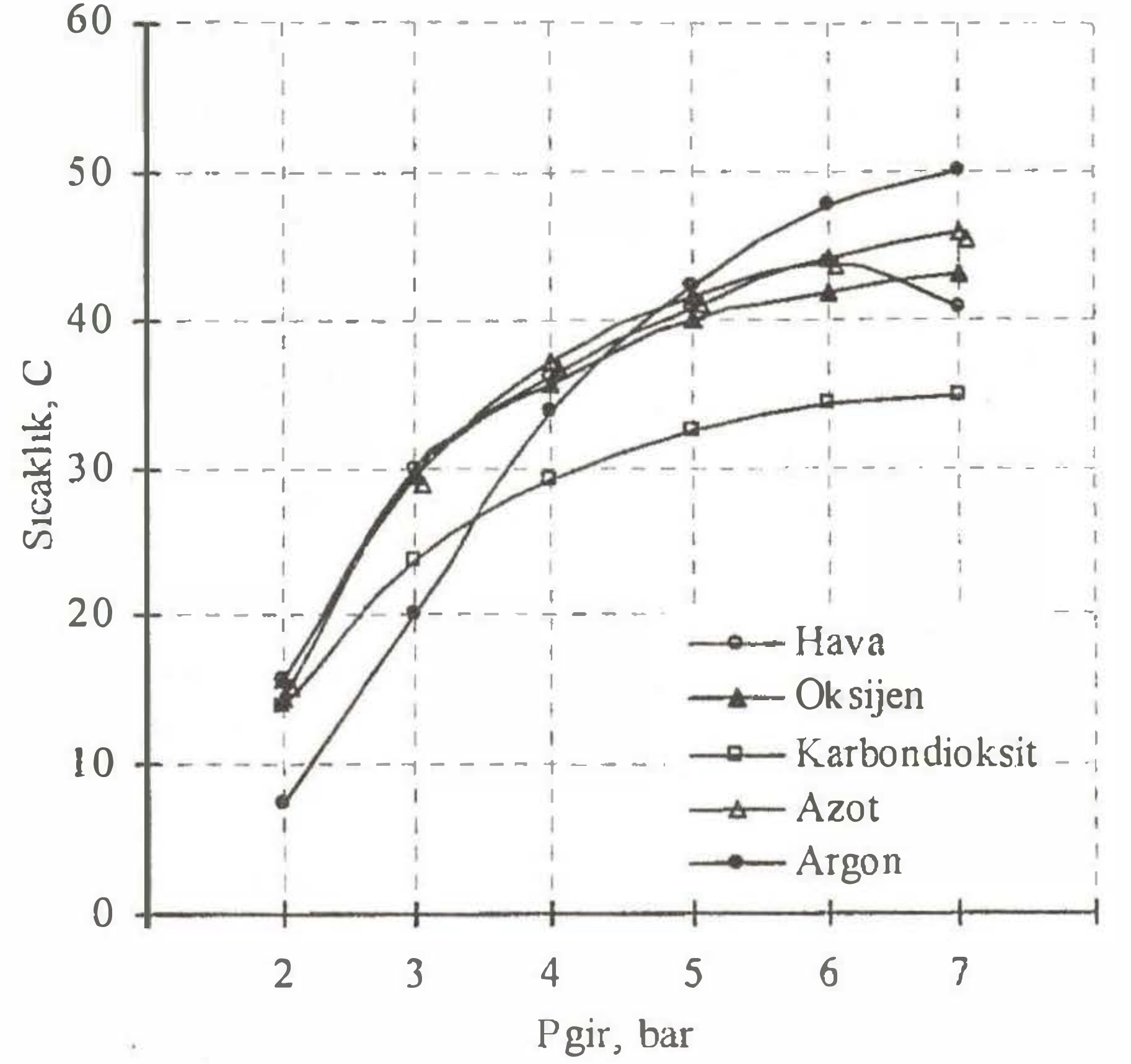
Şekil 8'de sıcak akışkanın sıcaklığının en fazla havada, en az ise CO₂'de olduğu görülmektedir. Vorteks tüpüne, 7 bar giriş basıncında, hava, Azot, Oksijen, Argon ve Karbondioksit gazlarının, tüpün sıcak çıkış tarafındaki sıcaklık değerleri sırasıyla 38,7 °C; 28,5 °C; 26,7 °C; 23,2 °C; 15 °C olduğu görülmektedir. Şekil 9'da hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazlarının vorteks tüpünden, çıkan soğuk akışkanın sıcaklığının girişteki basınç ile değişimi verilmiştir.



Şekil: 9. Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazlarının vorteks tüpünden çıkan soğuk akışkan sıcaklığının giriş basınç ile değişimleri

Şekil 9'da görüldüğü gibi vorteks tüpü giriş basıncının 7 bar olduğunda, Argon, Karbondioksit, Azot, Oksijen ve havanın, vorteks tüpünden çıkan soğuk çıkış sıcaklıkları sırasıyla -26,7 °C; -19,7 °C; -17,4 °C; -16,4 °C ve -2,1 °C'dir. Deneysel sistemin performansı, sıcak akışkanın sıcaklığı (T_a) ile soğuk akışkanın sıcaklığı (T_b) arasındaki fark olan (T_a-T_b) cinsinden ifade edilmiştir. Şekil 10'da Hava, oksijen, karbondioksit, azot ve argon

gazlarına ait vorteks tüpüne giriş basıncına göre vorteks tüpünden çıkan sıcak akışkan (T_a) ile soğuk akışkan (T_b) sıcaklıklarının farkları cinsinden (T_a-T_b) karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil: 10. Hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar gazına ait sıcak akışın sıcaklığı ve soğuk akışın sıcaklıkları farkının girişteki basınca göre değişimi

Hava, oksijen, karbondioksit, azot ve argon gazlarının vorteks tüpünden çıkan soğuk akışkanın sıcaklığı ile sıcak akışkanın sıcaklıklarının farkları cinsinden performansları dikkate alınarak mukayese edilirse; karışım gazı, hava, oksijen ve karbondioksit gazının T_a-T_b cinsinden değeri vorteks tüpe girişteki 7 bar basıncındaki sıcaklık değerleri sırasıyla 40,8 °C; 43,1 °C; 34,7 °C; 45,9 °C; ve 49,9 °C olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir.

V. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada, y_c oranı sabit tutulmuştur. Sabit y_c oranına göre, vorteks tüpünde hava, N₂, O₂, CO₂ ve Ar gazları değişik basınçlarda, vorteks tüpe giriş basıncına göre çıkan soğuk ve sıcak akışkan sıcaklık performansları deneysel olarak incelenmiştir. Vorteks tüpünde yapılan deneyler sonucunda akışkan olarak N₂, O₂, CO₂ ve Ar gazları kullanıldığında, soğuk çıkıştaki akışkanın sıcaklığının havaya göre daha düşük olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Vorteks tüpe girişteki akışkanın basıncı arttırıldıkça, soğuk çıkıştaki akışkanın (hava, O₂, CO₂, N₂ ve Ar) sıcaklığı da düşmüştür. Ar, CO₂, N₂ ve O₂ gazları, havaya göre daha fazla soğuduğu görülmüştür. Sıcak çıkıştaki akışkanın sıcaklığı ile soğuk çıkıştaki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark (T_a-T_b) hava, oksijen, karbondioksit, azot ve argon mukayese edildiğinde, argon gazının performansı hava, oksijen, karbondioksit ve azot'a göre daha düşük olduğu deneysel olarak görülmüştür (Şekil 10). Vorteks tüpüne giriş basıncı arttıkça hava, oksijen, karbondioksit, azot ve argon gazlarının performansı da artmıştır. Vorteks tüpü girişindeki basınç miktarı arttıkça

sıcak çıkıştaki akışkanın sıcaklığı ile soğuk çıkıştaki akışkanın sıcaklığı arasındaki fark (T_a-T_b) artacaktır.

6. KAYNAKLAR

- [1]. Özkul N., “Uygulamalı Soğutma Tekniği”, Makina Mühendisleri Odası, Yayın No:115, Ankara, s. 24-25, 1999.
- [2]. Yılmaz M., Çomaklı Ö., Kaya M., Karlı S., “Vorteks Tüpler: 1-Teknolojik Gelişim”, Mühendis ve Makine, 47 (554): 42-51, 2006.
- [3]. Althouse A. D., Turnquist C. H., Bracciano A. F., “Modern Refrigeration and Air Conditioning”, The Goodheart-Willcox Company Inc., South Holland, 633, 1979.
- [4]. Balmer R., “Pressure Driven Ranque-Hilsch Temperature Separation in Liquids”, Journal of Fluids Engineering-Trans. of Asme, 110 (2): 161-164, 1988.
- [5]. Özgür A., E., Selbaş R., Üçgül İ., “Vorteks Tüpler ile Soğutma Uygulamaları”, V. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, 387-397, 2001.
- [6]. Gulyaev A. I., “Investigation of Conical Vortex Tubes”, Inzherno-Fizicheskii Zhurnal, 10 (3): 326-331, 1966.
- [7]. Özgür A. E., “Vorteks Tüplerin Çalışma Kriterlerine Etki Eden Faktörlerin ve Endüstrideki Kullanım Alanlarının Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Isparta, 70, 2001.
- [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]. Cockerill T., “The Ranque-Hilsch vortex Tube”, Ph. D. Thesis, Cambridge University Engineering Department, Sunderland, 243, 1995.
- [10]. Nabhani N., “Hot-wire Anemometry Study of Confined Turbulent Swirling Flow”, PhD Thesis. Bradford University, Bradford, U.K., 1989.
- [11]. 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, Isparta, s.13-18, 2003.
- [12]. Azarov A., “Qualimetric Method of Comparison of Refrigeration Systems According to the Totality of Their Technological and Operational Characteristic. Int. Conf.”, Resources Saving in Food Industry, 143-144, 1998.
- [13]. Bruno T., “Applications of The Vortex Tube in Chemical Analysis”, Process Control and Quality, 3: 195-207, 1992.
- [14]. Usta H., Kırmacı V., Dincer K., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava, Oksijen Ve Karbondioksitin Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi”, Teknoloji, Cilt 8, Sayı 4, S. 311-319, 2005.
- [15]. 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.
- [16]. <http://www.keyinstruments.com/gas-correction-formulas.html>

Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma-Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması
V. Kırmacı