



**VORTEKS TÜPLERİN ÇALIŞMA
KRİTERLERİNE ETKİ EDEN
FAKTÖRLERİN ve ENDÜSTRİDEKİ
KULLANIM ALANLARININ TESPİTİ**

ARIF EMRE ÖZGÜR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ISPARTA 2001**



T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VORTEKS TÜPLERİN ÇALIŞMA KRİTERLERİNE ETKİ EDEN
FAKTÖRLERİN ve ENDÜSTRİDEKİ KULLANIM ALANLARININ TESPİTİ

ARIF EMRE ÖZGÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

106049

106049

ISPARTA, 2001

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI'nda
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ali Kemal YAKUT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Adnan SÖZEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Reşat SELBAŞ

ONAY

Bu tez 28.1.2001 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri
üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

28.1.2001

S.D.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

VORTEKS TÜPLERİN ÇALIŞMA KRİTERLERİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN VE ENDÜSTRİDEKİ KULLANIM ALANLARININ TESPİTİ.

Arif Emre ÖZGÜR

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 66 s., 2001.

Anahtar Kelimeler: Vorteks, tüp, soğutma, ısıtma, akış.

Bu çalışmada, vorteks tüp içerisinde gerçekleşen olaylara ve vorteks tüp performansına etki eden kriterlere yer verilmiştir. Ayrıca, vorteks tüplerin termodinamik açıdan incelemeleri yapılmış ve vorteks tüplerin endüstrideki kullanım alanları açıklanmıştır. Vorteks tüpler soğutma ve ısıtma araçları olarak kullanılabilir. Bu çalışmada vorteks tüplerin soğutma performansları incelenmiştir.

Çalışma süresi içerisinde, çalışma akışkanı olarak basınçlı hava kullanılmıştır. Basınçlı hava tüpe değişik basınç değerlerinde (2, 3 ve 4 bar) uygulanmıştır. Soğuk akışın kütleli debisi ve sıcak akışın kütleli debisi, her bir basınç değerinde değiştirilmiştir. Soğuk akışın sıcaklık değerinin değişimi ve sıcak akışın sıcaklık değerinin değişimi gözlenmiştir.

Soğuk akışın en düşük sıcaklık değeri, % 30 soğuk akış kütleli debi değerinde elde edilmiştir. Maksimum soğutma kapasitesi, % 70 soğuk akışın kütleli debi değerinde elde edilmiştir.

Vorteks tüplerin basit yapısı ve ekonomikliğı bir çok soğutma ve ısıtma uygulaması için uygundur. Nispeten düşük termodinamik verimliliğine rağmen, vorteks tüpler sıklıkla bilinen bir ısıtma ve soğutma problemine en ekonomik çözüm olabilmektedir.

Jüri: Doç. Dr. Ali Kemal YAKUT
Yrd. Doç. Dr. Reşat SELBAŞ (Danışman)
Yrd. Doç. Dr. Adnan SÖZEN

THE DETERMINING OF CRITERIA WHICH EFFECT ON VORTEX TUBES WORKING AND USING AREAS OF VORTEX TUBES IN THE INDUSTRY.

Arif Emre ÖZGÜR

Mechanical Education Department, Master of Science Thesis, 66 pp., 2001.

Key Words: Vortex, tube, cooling, heating, flow.

In this work, it is give place to the events in vortex tubes and criteria which are effect on vortex tube performance. Additionally, thermodynamic investigations of vortex tubes were studied and using areas in industry of vortex tubes were explained. Vortex tubes can be used heating and cooling devices. In this work, cooling performance of a vortex tube was observed.

In the working time, the working fluid is compressed air. Compressed air was applied at various pressure values (2, 3 and 4 bar). The mass flow rate of the cold flow and the mass flow rate of the hot flow were changed each pressure value. The variation of the cold flow temperature and the variation of the hot flow temperature were observed.

The lowest temperature value of cold flow was obtained at % 30 of cold mass flow rate. The maximum cooling capacity was obtained at % 70 of cold mass flow rate.

The simplicity and economical properties of vortex tubes are appropriate for many cooling and heating applications. Despite the relatively low thermodynamic efficiency, vortex tubes can very often provide the most economical solution to a given heating or cooling problem.

Jury: Doç. Dr. Ali Kemal YAKUT
Yrd. Doç. Dr. Reşat SELBAŞ (Consultant)
Yrd. Doç. Dr. Adnan SÖZEN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Vorteks Tüplerin Sınıflandırılması ve Çalışma Prensipleri	3
1.1.1. Vorteks Soğutma Olayı Prensipleri	3
1.1.1.1. Karşıt Akışlı Vorteks Tüpler	5
1.1.1.2. Paralel Akışlı Vorteks Tüpler	8
1.1.1.3. Adyabatik Olmayan Vorteks Tüpler	8
1.2. Vorteks Tüplerle İlgili Terimler	11
1.2.1. Kütle Akış Oranı	11
1.2.2. Soğutma Performansı	12
2. KAYNAK ÖZETLERİ	14
3. VORTEKS TÜPLERİN UYGULAMA ALANLARI	23
3.1. Vorteks Tüplerin Spot Soğutma Amacıyla Kullanımı	23
3.2. Kimyasal Analizlerde Vorteks Tüp Uygulamaları	28
3.2.1. Orta Sıcaklıklı Kromatographik Analizlerde Vorteks Tüp Kullanılması ..	28
3.2.2. Kromatographik Şırınganın Soğutulması	29
3.2.3. Çözeltilerin Soğutulması	29
3.2.4. Numunenin Nemden Arındırılması	30
3.2.5. Hava Hattının Nemden Arındırılması	31
3.2.6. Kızılötesi Analizlerde Numunenin Soğutulması	33
3.3. Düşük Sıcaklıklı Vorteks Tüp Uygulamaları	33
3.4. Elektronik Devrelerin Soğutulması	34
3.5. Vorteks Tüp Sisteminin Gaz Endüstrisinde Kurutma Amacıyla Kullanımı ..	35

3.6. Vorteks Tüp Yardımıyla Kar Üretimi	37
4. MATERYAL ve METOD	40
4. 1. Materyal	40
4. 2. Metot	42
4.2.1 Vorteks Tüp İçindeki Enerji Transferi	43
4.2.2. Adyabatik Vorteks Tüplerin Termodinamiğin 1. Yasasına Göre Analizi ..	44
4.2.3. Adyabatik Vorteks Tüplerin Vorteks Tüplerin 2. Yasa Analizi	48
4.2.4. Soğuk Akış Kütleli Akış Oranının Tespiti	52
4.2.5. Vorteks Tüpteki Açıl Hız Değişimleri	53
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	56
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	63
7. KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	68



ÖZET

Vorteks tüpler, bir basınçlı akışı eş zamanlı biri soğuk diğeri sıcak iki akışa ayırır. Çalışma gazı olarak basınçlı hava kullanıldığında, bir vorteks tüp – 48 °C kadar düşük sıcaklıklı ve + 190 °C kadar yüksek sıcaklık değerlerini sağlayabilir. Bu durum özellikle bir çok ısıtma ve soğutma uygulamaları için kullanılabilir.

Bu çalışmada, vorteks tüp içerisinde gerçekleşen olaylara ve vorteks tüp performansına etki eden kriterlere yer verilmiştir. Ayrıca, vorteks tüplerin termodinamik açıdan incelemeleri yapılmış ve vorteks tüplerin endüstrideki kullanım alanları açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Vorteks tüp, soğutma, ısıtma.



ABSTRACT

The vortex tubes separate a compressed flow in synchronous two streams one of which is cold stream another of which is hot stream. When the compressed air use for working gas, a vortex tube can provide air streams at temperatures as low as -48 °C and as high as $+190$ °C. It is especially useful for heating applications and cooling applications.

In this work, it is give place to the events in the vortex tubes and the criteria which are effect on vortex tube performance. Additionally, the thermodynamic investigations of vortex tubes were studied and the using areas in industry of vortex tubes were explained.

Key Words: Vortex tube, cooling, heating.



TEŞEKKÜR

Vorteks tüpler ile ilgili olarak çalışma fikrini veren ve çalıőmam boyunca beni yönlendiren Sayın danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Reşat SELBAŞ' a ve Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÜÇGÜL' e, çalıőmam ilgili konularda katkılarda bulunan Sayın Doç. Dr. A. Kemal YAKUT' a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Reőit USAL' a deneylerim esnasında ve deney düzeneğinin hazırlanması konusunda yardımlarını esirgemeyen atölye teknisyenlerimiz Sayın Cengiz KAZMACI' ya ve Sayın Mümin ULUSOY' a içtenlikle teşekkür ederim.



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

c_p	: Gazlar için sabit basınçta ısınma ısısı
d_c	: Vorteks tüp soğuk akış çıkış ucu çapı
D	: Vorteks tüp çapı
d_{in}	: Vorteks tüpe basınçlı giriş hattı çapı
E_M	: Mekanik enerji
g	: Yer çekimi ivmesi
h	: Entalpi
H	: Açısal momentum
L	: Vorteks tüp boyu
\dot{m}	: Kütleli debi
\underline{M}	: Momentum
P	: Basınç
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds sayısı
S	: Entropi
T	: Sıcaklık
U	: İç enerji
V	: Hacim
\underline{V}	: Hız
y	: Kütleli akış oranı
z	: Yükseklik
Q_A	: Soğutma kapasitesi
W	: İş
μ	: Dinamik viskozite
τ	: Kayma gerilmesi
u_θ	: Teğetsel hız
u_r	: Radyal hız
ω	: Açısal hız

Şekiller Dizini**Sayfa**

Şekil 1.1. Vorteks tüplerin çalışma karakteristiklerine göre sınıflandırılmaları	3
Şekil 1.2. Akışın vorteks tüpe teğetsel olarak girmesi	4
Şekil 1.3. Karşıt akışlı bir vorteks tüpteki akış	5
Şekil 1.4. Jeneratöre sahip bir karşıt akışlı vorteks tüp	6
Şekil 1.5. Karşıt akışlı vorteks tüpteki akış olayları	7
Şekil 1.6. Sabit debi için ayarlanmış karşıt akışlı bir vorteks tüp	7
Şekil 1.7. Paralel akışlı bir vorteks tüp	8
Şekil 1.8. Gövdesi ince soğutma kanatçıkları ile kaplı iki uçtan beslemeli adyabatik olmayan vorteks tüp	9
Şekil 1.9. Adyabatik olmayan ve vorteks hücresi delikli bir vorteks tüp örneği	10
Şekil 1.10. Vorteks tüpün sıcak ucuna yerleştirilen ve soğuk akış ile sıcak akışın kütleli debilerini ayarlamaya yarayan iğneli vananın kesit görünüşü	11
Şekil 1.11. Bir soğutma sisteminin termodinamik açıdan şematik gösterimi	12
Şekil 2.1. Fröhlingsdorf ve Unger' in kullandığı cihazın çalışma şartları	20
Şekil 2.2. Fröhlingsdorf ve Unger' in cihazı içindeki akışların birbirine karışma yüzdeleri	20
Şekil 2.3. Fröhlingsdorf ve Unger' in deneylerindeki tüpün içindeki akışların aksenal hız değerleri	21
Şekil 2.4. Saidi ve Yazdi' nin deney düzeneği	21
Şekil 3.1. Sabit kapasite için tasarlanmış bir vorteks tüp soğutucu	24
Şekil 3.2 Vorteks tüplerin spot soğutma uygulamalarına örnekler	26
Şekil 3.3 Rigo tezgahlarında vorteks tüplerin kullanılması	28
Şekil 3.4. Çözeltilerin vorteks tüp ile soğutulması	30
Şekil 3.5. Vorteks tüp soğutmalı bir gaz numuneden nem alma sistemi	31
Şekil 3.6. Vorteks tüp soğutmalı bir basınçlı hava kurutucusu	32
Şekil 3.7. İki kademeli bir vorteks tüp sistemi ile bir düşük sıcaklık	

uygulamasının şematik gösterimi	33
Şekil 3.8. Cascade prensibine göre birbirine bağlanan vorteks tüplerin şematik gösterilmesi	34
Şekil 3.9. Bir elektronik devre sisteminin vorteks tüp soğutma sistemiyle soğutulması	35
Şekil 3.10. Doğalgaz v.b. gazlardan nem almak için tasarlanmış vorteks tüp	36
Şekil 3.11. Vorteks tüp kullanılan doğalgaz kurutma tesisatının şematik gösterimi	37
Şekil 3.12. Kar üretimi amacıyla tasarlanmış vorteks tüpün şematik gösterimi ...	38
Şekil 3.13. Kar üretmek amacıyla oluşturulmuş iki vorteks tüpün birbirine bağlanması	39
Şekil 4.1. Deneyde kullanılan vorteks tüpe ait şekil	40
Şekil 4.2. Deneyle kullanılan düzeneğin şematik gösterimi	41
Şekil 4.3. Adyabatik bir vorteks tüpün termodinamik sistemi akış şeması	42
Şekil 4.4. Vorteks tüp içindeki soğuk ve sıcak gaz akışları arasındaki mekanik enerji transferinin temsili gösterimi	43
Şekil 4.5. Adyabatik bir vorteks tüpün modellenmesi	47
Şekil 4.6. Vorteks tüpte ikinci yasa analizi için kullanılan kontrol hacmi	49
Şekil 4.7. Vorteks tüp içindeki hız değişimlerinin bir partikül üzerinde incelenmesi	53
Şekil 5.1. 2 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_c sıcaklığının değişimi	57
Şekil 5.2. 3 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_c sıcaklığının değişimi	57
Şekil 5.3. 4 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_c sıcaklığının değişimi	58
Şekil 5.4. Vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin değişimine göre elde edilen soğuk akış sıcaklığının değişimi	58
Şekil 5.5. 2 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_h sıcaklığının değişimi	59
Şekil 5.6. 3 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_h sıcaklığının değişimi	59
Şekil 5.7. 4 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_h sıcaklığının değişimi	60
Şekil 5.8. Vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin değişimine göre elde edilen sıcaklık değerinin değişimi	60
Şekil 5.9. ΔT değerinin vorteks tüpe uygulanan basınç değerine göre değişimi	62

1. GİRİŞ

Geride bıraktığımız elli yıl içerisinde birçok bilimsel disiplinde gerçekleştirilen hızlı gelişmeler, soğutma ve ısıtma teknolojileri alanına da etki etmiştir. Soğutma kavramı, insanların konforuna ve yiyeceklerin muhafazasına yönelik bir kavram olmakla birlikte, birçok ürünün istenilen koşullarda üretilebilmesi ve değişik fonksiyonları olan endüstriyel ekipmanların verimliliğinin artırılabilmesi gibi birçok alanda sıkça dikkat edilen bir kavram haline gelmiştir. Ayrıca, küçük ebatlı cihazların ve daha az bakım gereksinimine ihtiyaç duyan cihazların geliştirilme çalışmaları, soğutma teknolojilerinin gelişmesine hız kazandırmıştır. Bu alanda yapılan çalışmaların bir kısmı, George Ranque tarafından keşfedilen ve “vorteks etkisi” olarak bilinen etkinin uygulamalarına yönelmiştir.

Vorteks etkisini ilk keşfeden ve bu konudaki ilk çalışmayı gerçekleştiren, bir metalurjist ve fizikçi olan Fransız bilim adamı G. Ranque, çalışmasını 1933 yılında yayınlamış ve vorteks etkisi üzerine çalışan “Vortec” adındaki ilk ticari firmayı kurmuştur (Ranque, 1933). Fakat bilim ve mühendislik toplulukları Ranque’ nin çalışmasına ilgisiz ve şüpheli yaklaşmışlardır.

Vortkes soğutma olayı, 1946 yılında Alman mühendis Rudolf Hilsch tarafından incelendiğinde gerçek ilgiye ve başarıya ulaşmıştır. Hilsch tüpün soğuk çıkışı üzerine bir diyafram yerleştirmiş ve cihazın verimliliğini arttırmaya yönelmiştir. Ayrıca bir hidrojen sıvılaştırma tesisinde vortkes tüple soğutma olayını başarılı bir şekilde uyguladığını belirtmiştir (Hilsch, 1946).

Vorteks tüpler ilk olarak Ranque tarafından bulunduğu ve detayları ile Hilsch tarafından geliştirildiği için literatürde “Ranque-Hilsch Vorteks tüpü” olarak isimlendirilirler.

Vorteks tüp, bir basınçlı akışı eş zamanlı ve biri soğuk diğeri sıcak olmak üzere iki akışa ayıran, kontrol vanası hariç hiçbir hareketli parçası olmayan bir cihazdır. 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 alanda kullanılmaktadır.

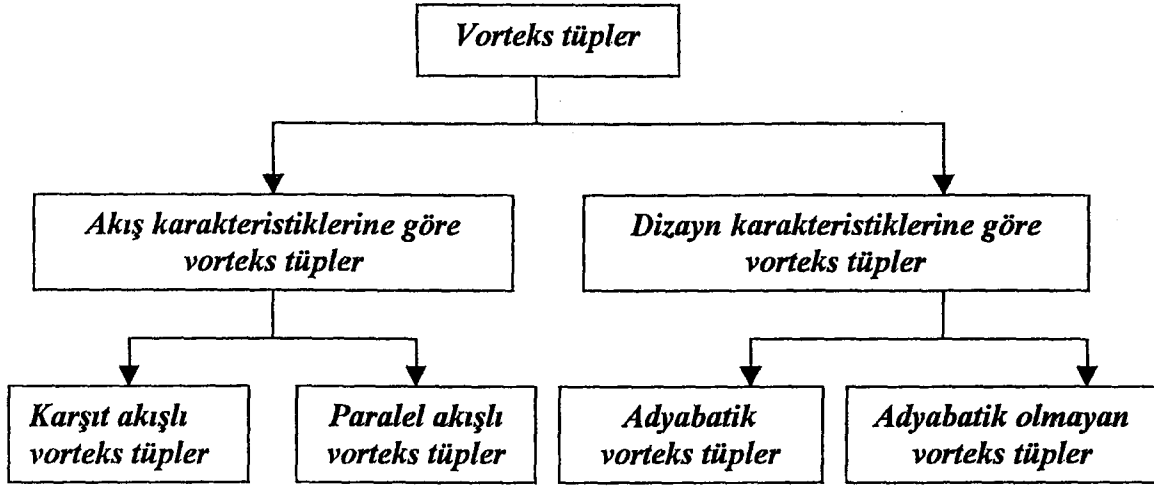
Vorteks tüplerde sıkıştırılabilir akışkan olarak metan (CH₄), karbondioksit (CO₂) ve hava kullanılabilir (Balmer 1988). Vorteks tüpler genellikle hava ile çalıştırılmakta olup bu çalışmada da çalışma gazı olarak hava dikkate alınacaktır. Vorteks tüpler hava ile çalıştırıldığında ve literatürdeki değerler dikkate alındığında, limit çalışma değerlerinin soğuk akış için – 48 °C, sıcak akış için +190 °C olduğu görülmektedir. Bu değerler vorteks tüpleri birçok alanda uygulanabilir kılmaktadır.

Vorteks tüplerin çalışmasına etki eden birçok faktör vardır. Bu çalışmada vorteks tüplerin çalışmasına etki eden faktörlerin açıklanması, tüpe uygulanan giriş basıncının değişiminin cihaz performansına olan etkisinin incelenmesi, cihazların değişik endüstriyel soğutma olaylarına uygulanabilirliğinin tartışılması ve bu konuda günümüze kadar yapılan çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Vorteks tüpler üreten ticari firmalar, vorteks tüpleri genel bir sınıflandırmaya tabi tutmamaktadır. Fakat, günümüzde tasarlanan vorteks tüplerin çalışma prensiplerini açıklayabilmek için vorteks tüpleri genel olarak bir sınıflandırmaya tutmak gerekmektedir. Vorteks tüpler için yapılan bu sınıflandırmada dikkate alınan esas kriter, vorteks tüplerin konstrüksiyon özellikleridir. Vorteks tüplere ait bu şekilde bir sınıflandırmanın ilk ve tek örneği Rus bilim adamı A.I. Azarov tarafından yapılmıştır. Bu kişi aynı zamanda adyabatik olmayan vorteks tüpleri ilk olarak tasarlayan ve bu cihazları ticari amaçla geliştiren kişidir.

Bölüm 1.1. de literatürde yapılan incelemeler ışığında ortaya çıkarılan bir sınıflandırma yapılmıştır ve daha sonraki bölümlerde her bir konstrüksiyona ait çalışma prensipleri açıklanmaya çalışılmıştır.

1.1. Vorteks Tüplerin Sınıflandırılması ve Çalışma Prensipleri



Şekil 1.1. Vorteks tüplerin çalışma karakteristiklerine göre sınıflandırılmaları (Azarov, 1998).

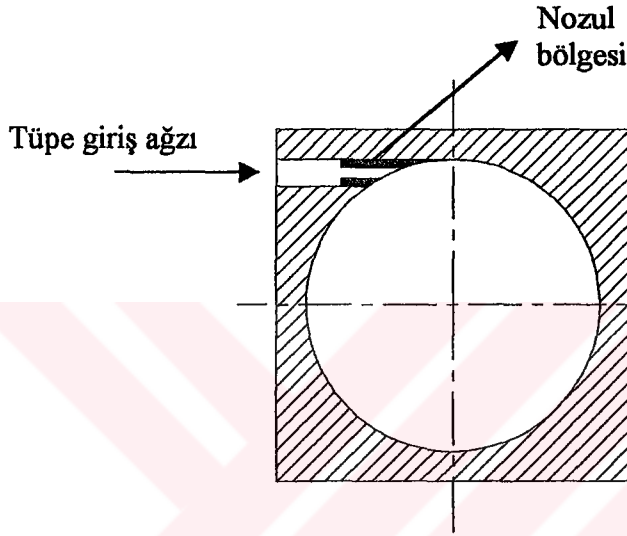
Vorteks tüpler temel özellikleri açısından yukarıdaki gibi bir sınıflandırmaya tabi tutulabilir. Günümüzde üretilen vorteks tüpler bu yapılan sınıflandırmadan farklı olarak ufak dizayn farklılıkları gösterebilmektedir. Bu gibi detaylar çalışma içerisinde açıklanmaya çalışılacaktır. Fakat, tüm bu yapılan sınıflandırmalara rağmen vorteks soğutma olayının temel prensibi değişmez.

1.1.1. Vorteks Soğutma Olayı Prensipleri

Ranque ve Hilsch' den bu güne kadar vorteks soğutma olayını inceleyen bilim adamları, konunun teorisi hakkında birçok teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalar, ilk bakışta basit bir olay gibi düşünülen vorteks soğutma olayının oldukça karmaşık bir olay olduğunu göstermiştir. Tüp içindeki akışın çok yüksek hızlarda dönmesi, kayma gerilmelerinin aktif rol alması, çalışma akışkanının sıkıştırılabilir olması ve akışın bir türbülans akışı olması vorteks soğutma olayının matematiksel olarak ifade edilmesini zorlaştırmaktadır.

Vorteks tüp ile farklı sıcaklıklarda akışlar elde edilmesinin temel prensibi, farklı açılarda dönen akışlar arasında gerçekleşen mekanik enerji transferidir.

Basıncılı bir hava akımı tüpe, tüpün giriş ağzında yer alan nozuldan geçerek şekil 1.2 de gösterildiği gibi teğetsel olarak girer. Tüp girişinde nozul kullanılmasının sebebi, akışı kısarak hızını arttırmaktır. Nozul sonrası ses hızı değerlerinde (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. Bu etki neticesinde tüp merkezindeki basınç ile tüp cidarı arasındaki basınç arasında fark oluşur.

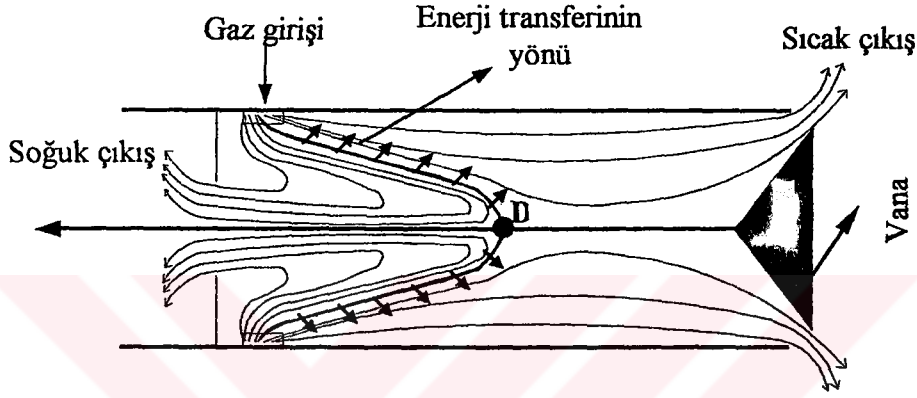


Şekil 1.2. Akışın vorteks tüpe teğetsel olarak girmesi (Fröhlingsdorf, 1997).

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 cidardaki akışı ivmelendirmeye çalışır. Bu durumda merkezdeki akış cidardaki akışa mekanik enerji transferi gerçekleştirir. Mekanik enerjisinde azalma olan merkez akışı soğuk akışı, cidardaki sürtünme enerjisinin etkisi ile ve merkezdeki akıştan aldığı mekanik enerjisinin etkisiyle de cidardaki akış sıcak akışı oluşturur. Karşıt akışlı bir vorteks tüp için düşünersek, soğuk akış, sıcak akışın çıktığı uca yerleştirilmiş vananın ve tüp içindeki basıncın etkisi ile bir durgunluk noktasından geriye doğru yönlendir. Bu sayede tüpün bir ucundan sıcak akış, diğer ucundan ise soğuk akış elde edilir.

Akışların birbirlerine göre ters istikametlerde tüpü terk etmeleri nedeni ile bu tür tüpler “karşıt akışlı vorteks tüpler” olarak isimlendirilirler. Bundan farklı olarak birde “paralel akışlı vorteks tüpler” vardır. Bu cihazlarda tüpün bir ucu tamamen kapatılmıştır. Açık bırakılan diğer uçtan hem sıcak akış hem de soğuk akış alınır. Bu iki akışı birbirinden ayırmak için tüp çıkışına bir aparat yerleştirilmiştir.

1.1.1.1. Karşıt akışlı vorteks tüpler

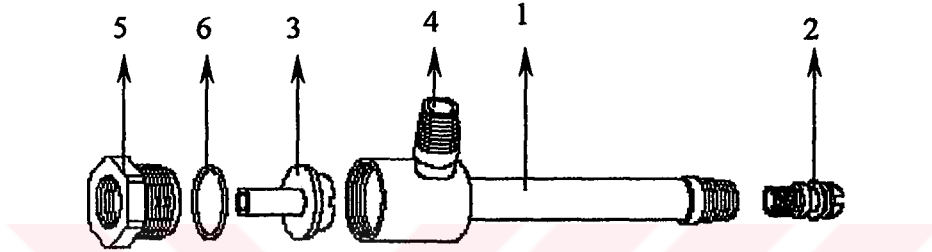


Şekil 1.3. Karşıt akışlı bir vorteks tüpteki akış (Cockerill, 1995).

Vorteks tüplerin endüstride en çok kullanılan tipi olan karşıt akışlı vorteks tüplerdeki akış olayı şekil 1.3 de görülmektedir. Tüpe teğetsel olarak giren bir basınçlı akış, bir durgunluk noktasından (D) itibaren iki kısma ayrılarak farklı uçlardan tüpü terk etmektedir. Durgunluk noktası olarak tarif edilen izafi noktanın yerinin tam olarak tespit edilmesi zor bir durum olarak nitelendirilebilir. Çünkü tüpe uygulanan akışın basınç değerinin ve tüp geometrisinin değişmesi gibi daha başka birçok parametrenin değişmesi bu noktanın yerini değiştiren faktörlerdir. Tüp içerisindeki akışın böyle bir noktadan itibaren ters yönleneceği umulan bir durumdur. Tüpün sağ ve sol ucunun atmosfere açık olması ve tüp cidarındaki akışın basıncının, tüpün merkezine radyal yönde ilerleyen merkez akışının basıncından yüksek olması (merkezkaç kuvvetleri etkisi ile) bir noktadan itibaren akışın geri yönleneceğini sağlayan faktörlerdir.

Vorteks tüplere basınçlı akışın girdiği giriş ağzında, akışın hızını arttırmak için bir nozül konulduğu belirtilmiştir. Bundan farklı fakat aynı amaca hizmet eden bir başka

konstrüksiyon da mevcuttur. Bu konstrüksiyonda giriş ağzı tüpe teğetsel olarak değil tüpün merkezinden bağlanmıştır. Fakat akışın tüp içerisinde dönme hareketi yapmasını sağlamak amacıyla “jeneratör” olarak isimlendirilen bir parça yerleştirilmiştir. Bu parça üzerine açılan çeşitli sayıdaki kanallar, akışa yön vererek tüp içerisinde vorteks akışı oluşturulmasını sağlarlar. Jeneratör parçasının soğuk akış tarafındaki çapı daraltılmıştır. Bu sayede şekil 1.4 de görülen soğuk akış çıkışındaki orifisin yaptığı görev, jeneratör tarafından sağlanmaktadır. Dolayısıyla tüpü terk eden soğuk akışın çıkış hızı artırılarak, etki mesafesinin artışı temin edilmektedir. Bu tür bir vorteks tüp şekil 1.4 de gösterilmektedir.



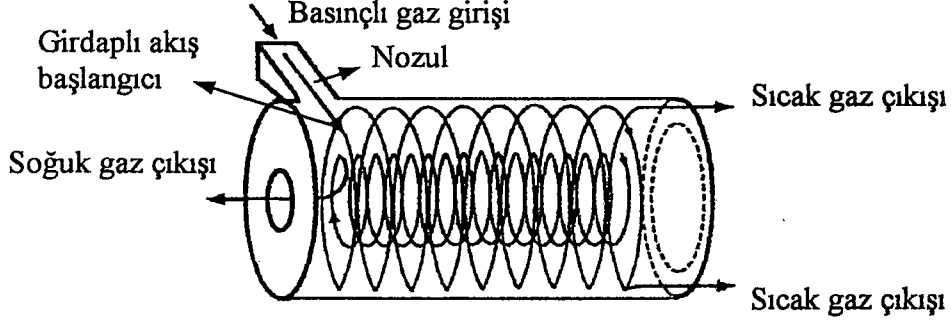
Şekil 1.4. Jeneratöre sahip bir karşıt akışlı vorteks tüp (Balmer, 1988).

- | | |
|----------------|-----------------------------|
| 1- Gövde | 4- Basınçlı akış girişi |
| 2- İğneli vana | 5- Jeneratör tespit elemanı |
| 3- Jeneratör | 6- O – ring |

Günümüzde vorteks tüplerin ticaretini gerçekleştiren firmalar, şekil 1.4 de gösterilen jeneratöre sahip karşıt akışlı vorteks tüplerin üretimini gerçekleştirmektedir. Bu modeli tercih etmelerinin esas sebebi, jeneratör ismi verilen parçanın değiştirilerek tüpün soğutma kapasitesinin ayarlanmasının mümkün olmasıdır.

Vorteks tüplerin ısıtma ve soğutma kapasitelerinin değişimini, sıcak akış ve soğuk akış sıcaklıklarının değişimini, sıcak çıkış ucuna yerleştirilmiş bir vana sağlar. Bu vananın sıcak akış debisini artırıp azaltması, soğuk akışın debisini etkiler. Bu vananın fonksiyonları ilerleyen bölümlerde detayları ile tartışılacaktır.

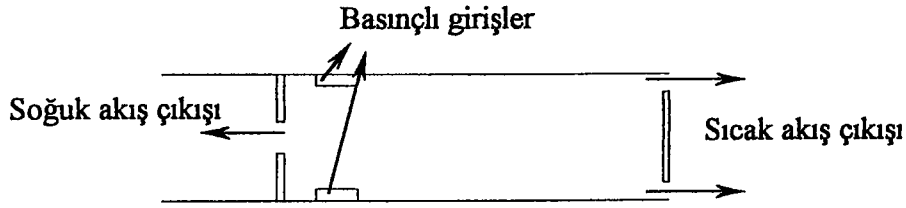
Bir karşıt akışlı vorteks tüpün çalışmasını açıklamak amacıyla şekil 1.5 gösterilen üç boyutlu bir çizimden faydalanılabilir.



Şekil 1.5. Karşıt akışlı vorteks tüpteki akış olayları (Frohlingsdorf ve Unger, 1998).

Şekil 1.5 deki gösterimde durgunluk noktası görülmemektedir. Bu çizimde vorteks tüp soğutma prensibinin basit olarak anlaşılabilmesi amacıyla soğuk akışın, sıcak uç çıkışındaki vanaya çarparak ters yönlendiği izafi olarak kabul edilmiştir.

Karşıt akışlı vorteks tüplerin günümüzde kullanımı çok az olan bir başka konstrüksiyonu daha vardır. Bu konstrüksiyonda sıcak çıkış kesiti sabit bir parça ile sabit bir kapasite için ayarlanmıştır. Bu konstrüksiyon şekil 1.6 da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Sabit debi için ayarlanmış karşıt akışlı bir vorteks tüp (Cockerill, 1995).

1.1.1.2. Paralel akışlı vorteks tüpler

Tek bir çıkış açıklığına sahip olan paralel akışlı vorteks tüplere bir örnek şekil 1.7 de gösterilmektedir. Bu konstrüksiyonda soğuk akışın bir durgunluk noktasından geri yönlenebilmesi söz konusu değildir. Tüpün merkezindeki akışı cidardaki akıştan ayırmak için ortası delikli bir aparat kullanılmıştır. Bu aparatın ileri geri hareketlendirilmesi tüpün soğuk ve sıcak akış sıcaklıklarının değişmesini sağlar.



Şekil 1.7. Paralel akışlı bir vorteks tüp (Cockerill, 1995).

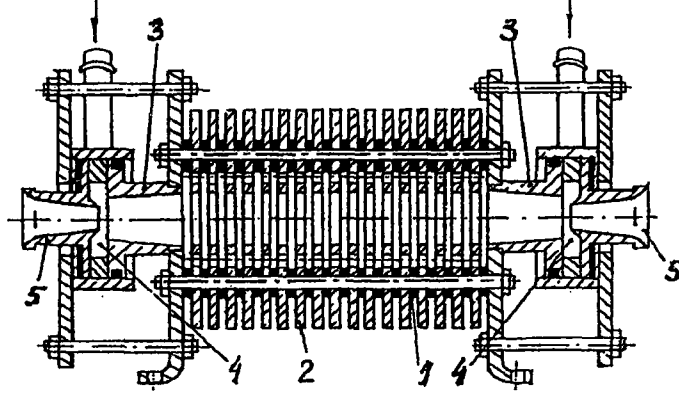
Paralel akışlı vorteks tüpler akışlar içinde oluşabilecek dağılmalar sebebi ile sıcak akış ve soğuk akışın birbirine belli oranlarda karışması ve akışların sıcaklıklarının olumsuz etkilenmesi muhtemel olduğundan genellikle tercih edilen bir konstrüksiyon değildir.

1.1.1.3. Adyabatik olmayan vorteks tüpler

Şekil 1.4 de 1 numara ile gösterilen gövde üzerinden çevre atmosfere ısı transferinin ihmal edildiği vorteks tüplere adyabatik vorteks tüpler denir. Adyabatik olmayan vorteks tüplerde ise gövde üzerinden çevre atmosfere ısı transferi vardır. Adyabatik vorteks tüplerde sıcak akış çıkışı yoktur. Fakat vorteks tüp gövdesi içerisinde sirküle ettirilen bir sıcak akış mevcuttur. Bu sıcak akışın sahip olduğu ısı enerjisi gövde üzerine yerleştirilmiş kanatçıklarla çevre atmosfere atılır.

Adyabatik olmayan vorteks tüpler üzerinde araştırma yapan ilk bilim adamı, Rus bilim adamı Anatoly Azarov'dur. Adyabatik olmayan vorteks tüpler ile çeşitli

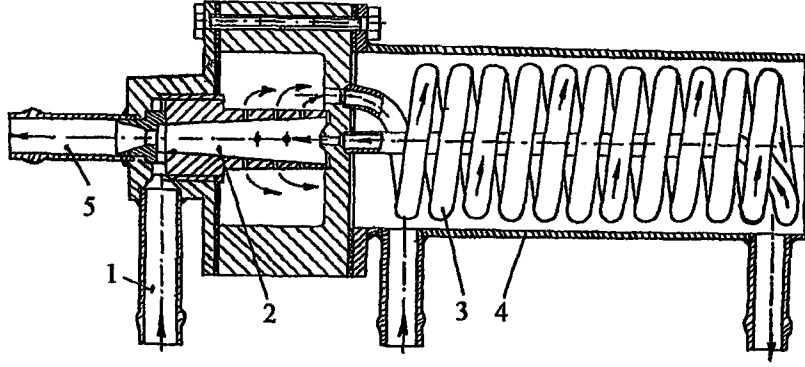
dizaynları ve çalışmaları vardır. Şekil 1.8 de Azarov tarafından dizayn edilen adyabatik olmayan bir vorteks tüp gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Gövdesi ince soğutma kanatçıkları ile kaplı iki uçtan beslemeli adyabatik olmayan vorteks tüp (Azarov, 1998).

- 1- Sızdırmaz contalar
- 2- Delikli diskler
- 3- Vorteks hücresi
- 4- Giriş
- 5- Soğuk akış çıkışı

Şekil 1.8 de gösterilen vorteks tüpte basınçlı hava oklarla gösterilen istikamette vorteks hücre sine giriş yapar. Bu tüp birbirine göre simetrik iki tüpün birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Akışların sıcaklıklarının değişmesini sağlayan mekanik enerji transferi vorteks hücre sine içinde ve gövde borusu içinde gerçekleşmektedir. Soğuk akışlar 5 numara ile ifade edilen çıkışlardan elde edilmektedir. Isınan akış ise 2 numara ile gösterilen ve delikli diskler olarak ifade edilen ısı transfer kanatçıkları ile çevre atmosfere atılmaktadır. Burada bu kanatçıkların kullanılma sebebi ısı transfer yüzeyini arttırarak, ısınan akışın ısısının yeterince çevre atmosfere atılabilmesidir. Tüpün ısıl performansı açısından bu kanatçıkların dizaynı oldukça önem arz eder. Şekil 1.9 da adyabatik olmayan vorteks tüplerin başka bir tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Adyabatik olmayan ve vorteks hücresi delikli bir vorteks tüp örneği (Alekscev ve Azarof, 1978).

- 1- Giriş
- 2- Vorteks hücresi
- 3- Tüpten çıkan sıcak akışın soğutulduğu serpantin
- 4- Gövde
- 5- Soğuk akış çıkışı

Şekil 1.9 daki adyabatik olmayan vorteks tüpün şekil 1.8 deki tüpten farkı sıcak akışın sahip olduğu ısı enerjisinin bir sarmal serpantin ile başka bir hava akımına nakledilmesidir. Basınçlı hava 1 numara ile gösterilen girişten tüpe gönderilir. Giriş bölümünün sonundaki nozulda hızlandırılan akış vorteks hücresine gönderilir. Soğuyan akış 5 numara ile ifade edilen çıkıştan alınır. Isınan akış ise vorteks hücresi üzerine açılan deliklerden 3 numara ile gösterilen serpantine gönderilir. Serpantine iki ağız daha bağlanmıştır. Bu ağızlardan da serpantin gövdesi içine basınçlı hava tesisatından alınan hava gönderilir. Serpantin boruları içinde akan sıcak akıştan serpantin gövdesi içindeki nispeten soğuk akışa ısı transfer edilir. Isısının bir kısmını burada atan sıcak akış vorteks hücresine tekrar geri gönderilir. Bu sayede tüp içersinde bir karşıt basınç oluşturulur. Bu karşıt basınç, iğneli kısma valfinin yaptığı görevi üstlenir ve bu basınç değerinin değişmesi akışların sıcaklıklarının da değişmesine direkt etki edecektir.

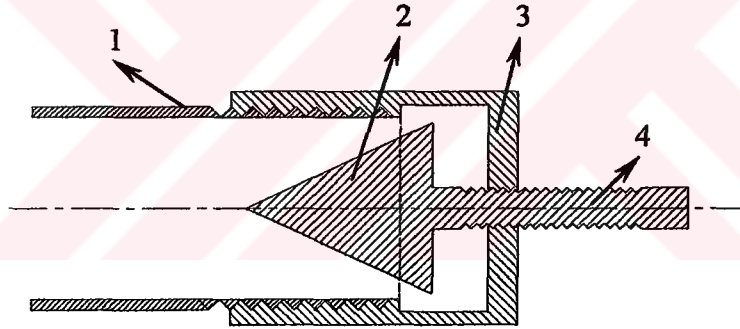
Adyabatik olmayan vorteks tüpler ile ilgili araştırmalar yapan Azarov, adyabatik vorteks tüplerin adyabatik olmayan vorteks tüplere nazaran daha verimli olduklarını

belirtmektedir. Günümüzde adyabatik olmayan vorteks tüpleri geliştirme çabaları halen devam etmekte olan bir konudur.

1.2. Vorteks tüplerle ilgili terimler

1.2.1. Kütle akış oranı

Vorteks tüplerin tek hareketli parçası olan iğneli ayar vanası olarak tabir edilen vana, ısınmış akışın çıktığı uca yerleştirilmiştir. Bu vana sıcak akışın kütleli debisini ayarlamaktadır. Bu fonksiyonunun yanında tüpe giren basınçlı havanın soğuk akış ve sıcak akışa bölünme oranını da ayarlamaktadır. Dolayısıyla tüpten elde edilen akışların sıcaklıklarına direkt etki eden bir parametredir. Bu vana şekil 1.10 da gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Vorteks tüpün sıcak ucuna yerleştirilen ve soğuk akış ile sıcak akışın kütleli debilerini ayarlamaya yarayan iğneli vananın kesit görünüşü (Fulton, 1950).

- 1- Vorteks tüpün gövdesi
- 2- İğneli vananın başı
- 3- Vananın tüpün sıcak ucuna bağlantısını sağlayan vana gövdesi
- 4- Vana mili

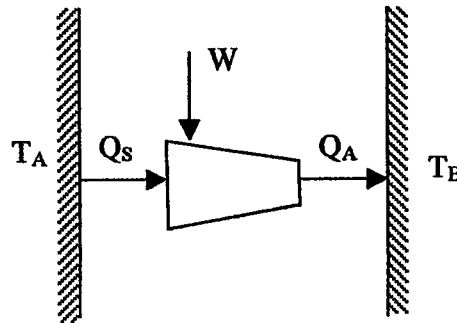
Vorteks tüplerde iki kütle akış oranı söz konusudur. Bunlar sıcak akış kütleli akış debisi ve soğuk akış kütleli orandır. Soğuk akış için kütleli akış oranının tanımı aşağıdaki gibidir.

$$y_c = \frac{\text{Soğuk akışın kütleli debisi}}{\text{Giriş akışının kütleli debisi}}$$

Tüpe giren akışın kütleli debisinin ne oranda soğuk akışa dönüştüğü şeklinde kısaca tanımlanabilecek y_c oranı, vorteks tüpün iki farklı seçenekte çalıştırılabilmesini mümkün kılar. Bunlar maksimum soğutma kapasitesi seçeneği ile en düşük soğuk akış sıcaklığı seçeneğidir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, $y_c = 0,30$ değeri civarında en düşük soğuk akış sıcaklığının sağlandığı, $y_c = 0,70$ değeri civarında da maksimum soğutma kapasitesinin elde edildiği görülmektedir (Fröhlingsdorf W. 1997). Sıcak akışın kütleli akış oranı değeri de y_h ile ifade edilir ve bu oranı da soğuk akış için tanımladığı gibi sıcak akış içinde benzer şekilde tanımlanabilir.

1.2.2. Soğutma performansı

Bir soğutma sisteminin performansı, genellikle COP (coefficient of performance) olarak tarif edilen etkinlik katsayısına göre değerlendirilir. Bu katsayı elde edilmek istenen değerin, harcanması gereken değere oranı şeklinde hesaplanır. Şekil 1.11 de termodinamik sisteme göre bir vorteks tüpün etkinlik katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.



Şekil 1.11. Bir soğutma sisteminin termodinamik açıdan şematik gösterimi (Çengel, 1996).

$$COP = \frac{Q_A}{W} \quad (1.1.)$$

Burada, Q_A vorteks tüpten elde edilen soğutma kapasitesini, W ise vorteks tüpü işletmek için gereken enerji değerini ifade etmektedir. T_A ısı çekilecek kaynağın sıcaklığını, T_B ise atık ısının atılacağı kaynağın sıcaklığını ifade etmektedir.

Vorteks tüplerde COP katsayısının düşük olduğu yapılan analizlerden bilinmektedir. Vorteks tüplerin çalışması için dışarıdan verilmesi gereken iş (W), yalnızca basınçlı hava kompresörünün gerektirdiği elektriksel enerjidir. Basınçlı havanın bol ve sürekli kullanıldığı endüstriyel tesislerde, vorteks tüpün çalışması için gereken basınçlı havayı hazırlama masrafları ihmal edilebilir. Bu da vorteks tüplerin bu tür tesislerde kullanımını artırır.

Vorteks tüpten elde edilebilecek soğutma kapasitesi (1.2.) eşitliğinden elde edilebilir.

$$Q_A = y_c \dot{m} c_p (T_A - T_C) \quad (1.2.)$$

Burada, \dot{m} vorteks tüpe gelen akışın kütleli debisini, y_c soğuk akış kütleli akış oranını, c_p ise çalışma gazının sabit basınçtaki ısınma ısısını ve T_C soğuk akış sıcaklığını ifade etmektedir. Günümüzde soğutma ihtiyacına yönelik kullanılan vorteks tüplerde 2600 kcal/h soğutma kapasitesi sınır değer olarak görülmektedir. Bu değerden sonra vorteks tüpün ebatları ve tükettiği hava miktarı artması sebebi ile ticari firmalar tarafından üretilmemektedir.

Vorteks tüplerin COP katsayılarının düşük olması nedeni ile çalışma esnasında bu değerlerin değişimi incelenmemiştir. Vorteks tüpler için gereken basınçlı havayı hazırlamanın maliyetinin göz ardı edilmesi makul kabul edilebileceğinden, COP katsayısı pratikte çok önem arz eden bir faktör olmamaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Vorteks tüplerde sıcaklık ayırımı olayını ilk keşfeden ve bu konuda patent alan kişi, Fransız metalurjist ve fizikçi bilim adamı George Ranque, bir siklon ayırıcı içinde cidardaki akışın iç bölgedeki akışa oranla ısındığını ve iç akış sıcaklığının giriş havası sıcaklığından düşük bir değere sahip olduğunu gördü. Bu doğrultuda bir tüpe teğetsel hava akımı göndererek çalışmalar yaptı. 1933 yılında çalışmalarının sonuçlarını açıkladı. Fakat bilim ve mühendislik topluluklarından gereken ilgiyi görmedi. Ranque, vorteks tüplerin endüstriyel olarak kullanılabilceğini düşünerek, “Vortec” adındaki şirketi kurdu. Fakat bu şirket ticari yetersizlikler nedeni ile devamlılık gösteremedi (Ranque, 1932).

1946 yılında Alman mühendis Rudolf Hilsch, Ranque’ nin çalışmalarından esinlenerek , yaptığı çalışmaların sonuçlarını yayınladı. Deneysel çalışmalara ağırlık veren Hilsch, vorteks tüplerin verimliliğini arttırabilmek için çalışmalar yaptı. Hilsch bir hidrojen sıvılaştırma tesisinde vorteks tüpü, sistemin esas bileşeni olarak dahil etmeyi önerdi. Fakat ikinci Dünya savaşı Hilsch’ in çalışmalarını böldü. İkinci Dünya savaşı sonrası müttefik ülkelerin bilim adamları Hilsch’ in çalışmalarını ele alıp inceleyerek bir takım çalışmalar yaptılar. Hilsch vorteks tüpün soğuk çıkış ucuna bir diyafram yerleştirerek günümüzde de sıkça kullanılan bir dizayn oluşturmayı da başarmıştır.

1955 yılında Westley karşıt akışlı vorteks tüplerin performansını optimize etmek için birkaç deneysel çalışma yaptı ve vorteks tüp performansı ile ilgili olarak boyutsuz ifadelerle şu ilişkiyi önerdi;

$$\frac{\Delta T_c}{T_{in}} = f\left(R, \frac{P_{in}}{P_c}, \frac{d_c}{D}, \frac{d_{in}}{D}\right) \quad (2.1)$$

Burada, T_{in} giriş akışının sıcaklığı, P_{in} giriş akışının basıncı, P_c soğuk çıkıştan alınan akışın basıncı, D vorteks tüp çapı, d_{in} nozıl çapı, R ise sıcak akış çıkış ucuna yerleştirilmiş vananın açıklık oranı olarak ifade edilmektedir.

1957 yılında J. P. Hartnett ve G. Eckert yüksek hızlı vorteks tipi bir akış içerisinde hız ve sıcaklık dağılımının deneysel incelemelerini yapmışlardır. Çalışmalarında pleksiglas malzemedan 3 inç çapında ve 30 inç boyunda olan bir vorteks tüp kullanmışlardır. Fakat vorteks tüpün ısıtma veya soğutma performansını incelemedikleri için tüpün soğuk akış çıkışı ucunu tamamen kapatmışlardır. Hartnett ve Eckert tüp eksenine boyunca beş ölçme probu yerleştirmişlerdir. Bu proplar ile çeşitli ölçümlerde bulunmuşlardır. Tüpe 10, 15 ve 20 psig basınç değerlerinde basınçlı hava uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda tüp eksenine yakın bölgelerde akışın hızının daha yüksek değerlere ulaştığını görmüşlerdir. Çalışmalarında vorteks tüp cidarına yakın bölgeler hariç akışın sıcaklığının girişteki sıcaklıktan daha düşük olduğunu görmüşlerdir.

1988 yılında Baz A., ve Gilheany J., bir su altı araştırma habitatı içindeki havanın vorteks tüp yardımıyla şartlandırılmasını incelemiştir. Çalışmalarında kullanacakları vorteks tüplerin performansları hakkında bilgi sahibi olabilmek için daha önceden Hilsch, Uhler, Martynovskii ve Stephan tarafından önerilen aşağıdaki eşitliği incelemiştir. Bu eşitlik, vorteks tüplerin performansı hakkında günümüzdeki en geçerli eşitliklerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu eşitlik;

$$(T_a - T_c) / T_a = C \left[\left(1 - (2Pr)^{-1} \right) \left(1 - r^{-1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} g(Y)(Re)^n \right] \quad (2.2)$$

Burada, T_a ortam (atmosfer) sıcaklığı, T_c soğuk akış sıcaklığı, C ve n yukarıda bahsedilen yazarların bulduğu grafiklerden elde edilecek sabit değerler, $r = P_i/P_a$ giriş akış basıncının ortam (atmosfer) basıncına oranı, Y kütleli akış oranı ve γ ise sabit basınçtaki ve sabit hacimdeki özgül ısıların oranı (adyabatik üs) olarak ifade edilmektedir. Baz ve Gilheany yaptıkları bu teorik çalışmalarındaki hesaplamalarından gördüklerini, vorteks tüpün bu tür bir habitat havasının şartlandırılmasında kullanılmasının enerji sarfiyatında düşüş sağladığı olarak ifade etmişlerdir.

1988 yılında R.T. Balmer bir vorteks tüpte kullanılan akışkanın sıkıştırılmaz bir akışkan yani sıvı olması durumunda ne tür olayların meydana geldiğini incelemiştir. Çalışma akışkanı olarak suyu dikkate alan Balmer, tüp içerisinde dikkate değer bir sıcaklık ayırımı olayının gerçekleşebilmesi için çok yüksek basınçların gerektiğini vurgulamıştır. 20 ila 50 Mpa basınç değerleri arasında tüpe gönderilen su ile 10 ila 20 °C lık sıcaklık farklılıkları görüldüğünü belirtmektedir. Ayrıca Balmer, deneylerinde kullandığı cihazın hava için dizayn edilen bir cihaz olduğunu belirtmektedir. Eğer sıvılar için dizayn edilen bir tüp imal edilebilse ve tüp jeneratörü sıvı için dizayn edilirse, daha iyi performans karakteristiklerinin elde edilebileceğini belirtmiştir (Balmer, 1988).

Vorteks tüpler hakkında yapılan çalışmaların bazılarında da çelişkiler vardır. Sıcak vorteks tüp olarak tarif edilen ve vorteks tüpün ürettiği sıcak akışın verimliliğini arttırmaya amaçlayan Borisenko ve Gulyaev ayrı ayrı yaptıkları çalışmalarda sıcak vorteks tüpün gövdesi içinde 3 derecelik bir konik açının cihazın performansında optimum değeri sağladığını savunurken, Raiskii ve Tunkel bunun aksine konikliğin sıcak tüp olarak kullanılan bir tüpün performansına etkisinin olmayacağını savunmaktadır (Gulyaev, 1966).

Sıcak vorteks tüplerin diğer ebatları ile ilgili olarak da birçok fikir vardır. Tüm yazarlar verimli bir sıcak tüp dizaynı için tüp boyunun tüp çapından defalarca büyük olmasının gerektiğini savunmaktadırlar. Gulyaev boyun çaptan minimum 30 kez daha büyük olmasını önerirken, Martynovskii ve Alekseev optimum performansı $40 < (L/D) < 50$ arasında elde etmişlerdir. Bu durum Hilsch' in L/D oranını yaklaşık 50 olarak önermesi ile uyum göstermektedir. Soni ve Thompson $L/D > 45$ olduğu sonucuna varmışlardır. Optimum orifis çapı ise genellikle $0.4 < d/D < 0.6$ arası olarak önermektedir (Cockerill, 1995).

Martynovskii ve Alekseev 1957 yılında karşıt akışlı vorteks tüplerle ilgili dikkate değer gözlemler yapmışlardır. Sıcak tüpün dışının soğutulmasıyla soğuk akış sıcaklığında düşme elde etmişlerdir. En düşük sıcaklık derecelerini elde etmek için düşük soğuk akış kütleli debi değerlerinde çalışmışlardır (Martynovskii ve Alekseev, 1957).

1995 yılında Cockerill vorteks tüpler ile ilgili çalışmasını iki açıdan yapmıştır. İlk olarak vorteks tüpün sıcak akışının performansını incelemek için üç adet tüp kullanmıştır. Aynı zamanda soğuk akışın performansını inceleyebilmek içinde üç adet tüp kullanmıştır. Her üç tüpün ikisi pirinç malzemedendir, diğeri Perspex denilen ışığı geçiren bir malzemedendir yapılmıştır. Cockerill' in incelediği cihazlara ait özellikler tablo 2.1. de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Cockerill' in deneylerinde kullandığı cihazların özellikleri (Cockerill, 1995).

Malzeme	Sıcak Tüp Uzunluğu (mm)	Soğuk Tüp Uzunluğu (mm)	İç Çap (mm)	Nozul Çapı (mm)	Nozul Sayısı
Pirinç	1300	250	26	6	2
Pirinç	900	250	18	4	2
Perspex	1300	250	24	6	2

Cockerill tüplerin soğuk akış çıkışlarına farklı çaplarda orifisler yerleştirilerek, soğuk akışın sıcaklık değişimini, sıcak akış çıkışındaki vananın akışı geçirme kesitinin değişimi ile akışların sıcaklıklarının değişimini ve tüm bu yapılan işlemler boyunca tüpün ürettiği ses şiddetinin değerinin değişimini ölçmüştür. Aynı zamanda Cockerill paralel akışlı vorteks tüpler ile ilgili çalışmalar yapmış ve karşıt akışlı vorteks tüplerin paralel akışlı vorteks tüplere nazaran daha verimli olduğunu belirtmiştir. Cockerill vorteks tüplerin modellenmesi konusunda çalışmalar yapmış ve bazı yaklaşımlar önermiştir. Yaptığı bu çalışmaları tezine sponsorluk eden firmanın ürettiği cihazlarda uygulamaya çalışmıştır. Cockerill bu aşamada bir gaz şirketi olan sponsor firmanın cihazları ile "cascade" çalışan cihazlarda gaz kurutma işlemlerini de incelemiştir. Çalışmalarının neticesinde vorteks tüplerin kullanım alanları konusunda örneklemeler vererek, uranyum zenginleştirmesinde vorteks tüplerin kullanılabileceğini önermiştir. Cockerill çalışmasının sonucunda $\Delta T_c = f(y_c)$ bağımlılığını ifade etmiştir. Yani vorteks tüpün ürettiği soğuk akışın sıcaklığı, soğuk akış kütleli debisinin bir fonksiyonudur. Cockerill çalışmasında soğuk akış çıkış diyafram çapının tüp performansı üzerine etkisini incelemeyi iki nedenden dolayı ihmal etmiştir. Bunlardan birincisi, bu konu üzerine yapılan çalışmaların varlığı ve

tüp içerisindeki akış üzerine az bir etki yapması, ikincisi ise paralel yön akışlı vorteks tüplerde kontrol vanasının iç çapının değiştirilmesinin ilave işlemler gerektirmesidir.

Paruleker, kısa vorteks tüplerle deneyler yapmıştır. Deneylerinde vorteks tüpleri birbirine bağlayarak kademeli sistemler oluşturarak elde edilebilecek minimum soğuk akış sıcaklığını incelemiştir. Deneylerinde bir tüpten çıkan soğuk akışı diğer tüpe giriş akışı olarak göndermiştir.

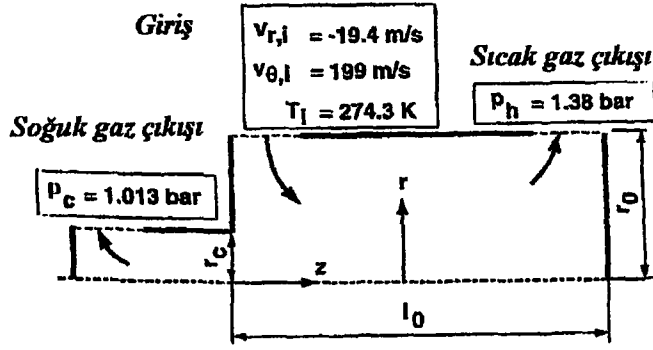
1996 yılında B. Ahlborn, T. Camire, J.U. Keller, kapalı bir sistem içerisinde vorteks tüplerin kullanımını incelemiştir. Sistem içerisindeki basıncın atmosferik basınç değerlerine yakın veya atmosferik basıncın altında olduğu durumlarda, vorteks tüpün sıcaklık ayırımı performansını test etmişlerdir. 91 ila 94 kPa giriş basıncına karşılık, sıcak akış için 33 ila 67 kPa, soğuk akış için ise 33 ila 58 kPa değerlerini ölçmüşlerdir. Ahlborn ve diğerleri yaptıkları çalışma şartları içinde sıcak akış ile soğuk akış arasındaki maksimum sıcaklık farkını 30 psig basınçta 45 °C olarak, minimum sıcaklık farkını ise 10 psig basınçta 15 °C olarak elde etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, vorteks tüplerin kapalı sistemlerde düşük basınçlarda çalıştırılmaları ile bazı soğutma ve gazları nemden arındırma işlemleri için güvenli bir model geliştirilebileceğini belirtmektedirler.

M. Lorey, J. Steinle, K. Thomas 1997 de, vorteks tüp sistemini doğal gazın endüstriyel olarak hazırlanması işlemlerinde kullanımını incelemiştir. Çok büyük ölçülerde tüp kullanmışlar ve tübe 60 ila 65 bar değerlerinde giriş gazı göndermişlerdir. Bu işlemi yapmalarındaki esas amaç, gazın içerisindeki nemin yoğunlaştırılması ve ağır hidrokarbonlar gibi diğer atık maddeleri de gazın içerisinden almaktır. Tüpe doğal gaz kesintisiz olarak 7000 ila 3500 Nm³/h değerleri arasında uygulanmış ve sonuçta elde edilen verilerin olumlu olduğunu görmüşlerdir. Doğal gazdan nemin alınması işleminde kullanılan bir başka yol olan desikant denen nem alıcı maddelerin kullanılması işlemi, bu maddelerin rejenere edilmeleri gerektiğinden sistemi kesintiye uğratması nedeni ile vorteks tüpler karşısında geri planda bırakmıştır. Ayrıca Lorey ve diğerleri tüpe 1000 ila 16000 Nm³/h değerleri arasında değişen debide ve 70 ila 60 bar değerleri arasında basınç uygulamışlardır. Sonuçta

tüpten alınan yoğuşuğun içerisinde bazı hidrokarbonların ve glikolün olduğunu görmüşlerdir. Çalışmalarının sonucunda, doğal gaz içerisinden nemin ve atık diğer maddelerin yoğuşturularak alınması işlemi için bakım maliyetleri ve ilk kuruluş maliyetleri yüksek olan J-T sistemlerinin ve Turbo-expander sistemlerinin kullanımına alternatif olarak vorteks tüp sistemini önermişlerdir. Ayrıca vorteks tüp sisteminin bu sistemler ile beraber kullanılması durumunda daha etkili sonuçların alınabileceğini belirtmişlerdir.

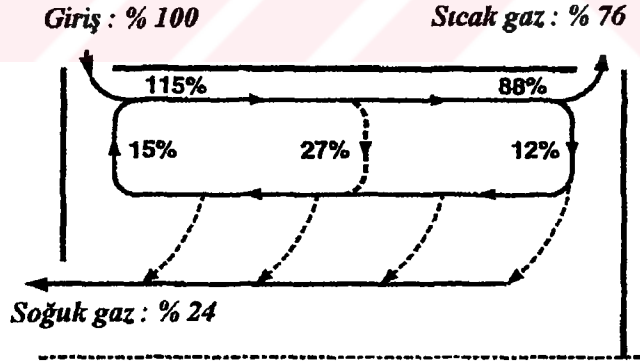
1998 yılında B. K. Alhborn, J. U. Keller ve E. Rebhan vorteks tüp hakkında değişik bir yaklaşım ile konuyu açıklamaya çalışmışlardır. Çalışmalarında vorteks tüp içerisinde gerçekleşen iki farklı sıcaklıkta akış oluşumu olayını, vorteks tüp içerisindeki olayı bir ısı pompasının çalışma karakteristiğine benzeterek açıklamaya çalışmışlardır. Isı pompalarının çalışma karakteristiklerini üç ana başlık altında toplamışlar ve vorteks tüp içerisindeki akış olayının bu şartları tatmin ettiğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında ortaya koydukları formüller ile hesapladıkları sonuçları, deneysel düzeneklerinden ölçtükleri verilerle kıyaslamışlardır. Bu kıyaslama sonucunda ölçülen veriler ile hesaplanan verilerin birbirine çok yakın olduğunu görmüşlerdir. Çalışmalarının son kısmında ise yaklaşık 60 yıldır açıklanamayan vorteks tüp olayının net olarak açıklandığını iddia etmişlerdir.

1999 yılında W. Fröhlingsdorf ve H. Unger vorteks tüplerde gerçekleşen enerji ayırımının nümerik hesaplamaları ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. 4 nozula sahip, 520 mm boyunda ve 47 mm yarı çapına sahip bir cihazı bilgisayar ortamında incelemişlerdir. Çalışmalarında y_c değerini 0.23 olarak dikkate almışlardır. Tüpe giren havanın basıncında 2 bar olarak ele almışlar ve bunun sonucunda yaklaşık -20 °C lık soğuk akış sıcaklığı elde etmişlerdir. Bilgisayardan elde edilen sonuçları şekiller üzerinde değerlendirmişlerdir. Bu durum şekil 2.1. de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Fröhlingsdorf ve Unger' in kullandığı cihazın çalışma şartları. (Fröhlingsdorf ve Unger, 1999).

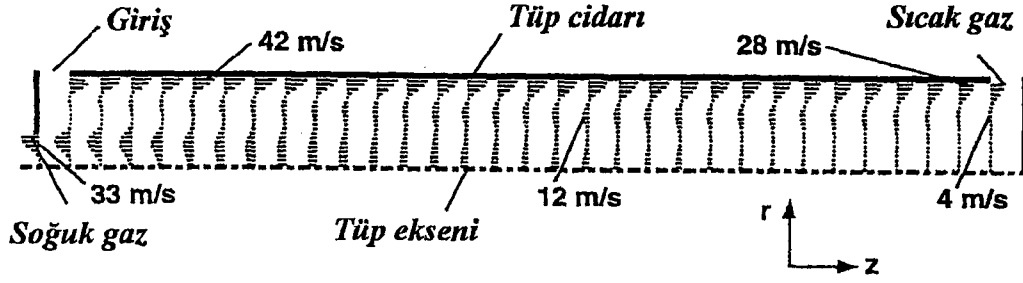
Şekil 2.1. den görüldüğü gibi sıcak ve soğuk akışların basınçları arasındaki fark 0.37 bar civarındadır. Tüpe giren havanın nozül sonrası radyal hızı 199 m/s olarak hesaplanmıştır. Ses hızının yaklaşık 332 m/s olduğu düşünüldüğünde, eğer tüpe daha yüksek giriş basıncı değerleri uygulanırsa, buradaki akışın hızının ses hızı değerine yaklaşacağı tahmin edilebilir. Fröhlingsdorf ve Unger inceledikleri vorteks tüpe akışların oranları hakkında bir değerlendirme yapmışlardır. $y_c = 0.24$ değerinde tüp içerisinde tahmin edilen sıcak ve soğuk akışın birbirine karışma yüzdeleri değerleri şekil 2.2. de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Fröhlingsdorf ve Unger' in cihazı içindeki akışların birbirine karışma yüzdeleri. (Fröhlingsdorf ve Unger, 1999).

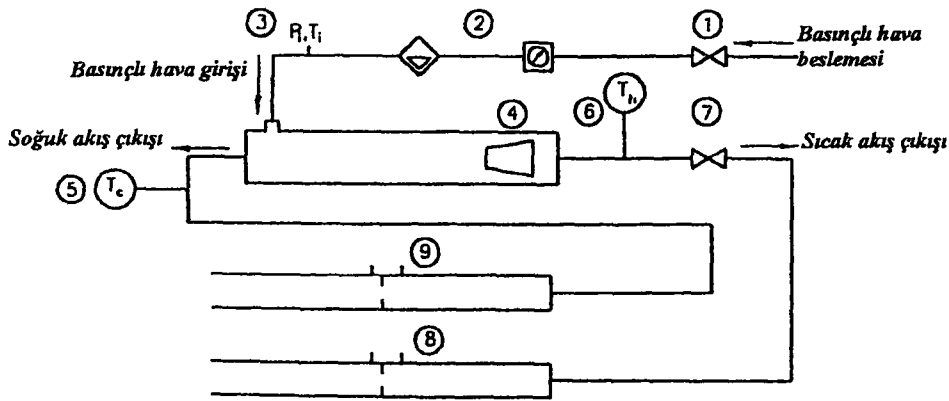
Aynı zamanda Fröhlingsdorf ve Unger inceledikleri tüp içerisinde gerçekleşen akışların tahmini hız değerlerini bilgisayar yardımıyla hesaplamışlardır. Bu değerlerin pratik olarak ölçümlerinin güç olması nedeni ile yapılan bu tür bilgisayar

destekli hesaplamalar, vorteks tüp içindeki akış olaylarının değerlendirilmesi açısından faydalı olmaktadır. Şekil 2.3. de Fröhlingsdorf ve Unger' in elde ettiği veriler gösterilmektedir. Bu şekil soğuk akışı oluşturan merkez akışının sıcak akışa göre ters yönlendiğini açıklamaya yardımcı olmaktadır. Bu şekilde, tüp içerisindeki çizgiler hız vektörlerini ifade etmektedir ve şiddetleri birbirine göre orantılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Fröhlingsdorf ve Unger' in deneylerindeki tüpün içindeki akışların aksel hız değerleri (Fröhlingsdorf ve Unger, 1999).

1999 yılında M.H. Saidi ve M. R. A. Yazdi, vorteks tüplerin ekserji analizi hakkında çalışma yapmışlardır. Bir deney seti üzerinde değişen giriş basıncı değerlerine göre tüpten elde edilen sonuçların değişimini incelemişlerdir. Ayrıca bir çelik tüp ve bir PVC tüp kullanarak, bu iki farklı malzemeden yapılmış tüpten elde edilen sonuçların kıyaslamasını yapmışlardır. Saidi ve Yazdi' nin kullandıkları deney seti şekil 2.4. de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Saidi ve Yazdi' nin deney düzeneği (Saidi ve Yazdi, 1999).

1 numaralı vanadan ve 2 numaralı filtre ve drayerden geçen besleme havası 3 numara ile gösterilen tp girişine gelmektedir. Tüp içerisinde enerji ayrımı olayına tabi tutulan akış, soğuk ve sıcak akış olarak tüpün sol ve sağ ucundan elde edilir. 5 numara ile gösterilen termometre soğuk akışın sıcaklık değişimini, 6 numara ile gösterilen termometre ise sıcak akışın sıcaklık değişimini göstermektedir. Tüpün sıcak akış çıkışında, tüp içerisindeki akışların kütleli oranlarını ayarlayan ve 7 numara ile gösterilen vana yerleştirelmıştır. Elde edilen sıcak ve soğuk akışların basınç değerleri de 8 ve 9 numara ile gösterilen orifisler ile elde edilmektedir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda $y_c = 0,7$ değeri civarında ekserji kaybının minimum olduğunu dolayısıyla vorteks tüpün verimli çalışma noktasının $y_c = 0,7$ olduğunu vurgulamışlardır. Aynı zamanda birbirine eşdeğer PVC bir tp ile çelik bir tüpün aynı şartlarda çalıştırıldıklarında, PVC tüpün çelik tüpe oranla daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bunun nedenini de iç cidar pürüzlülük değerinin ve ısıli iletim katsayısı değerinin PVC tüpte daha az olmasına bağlamışlardır.

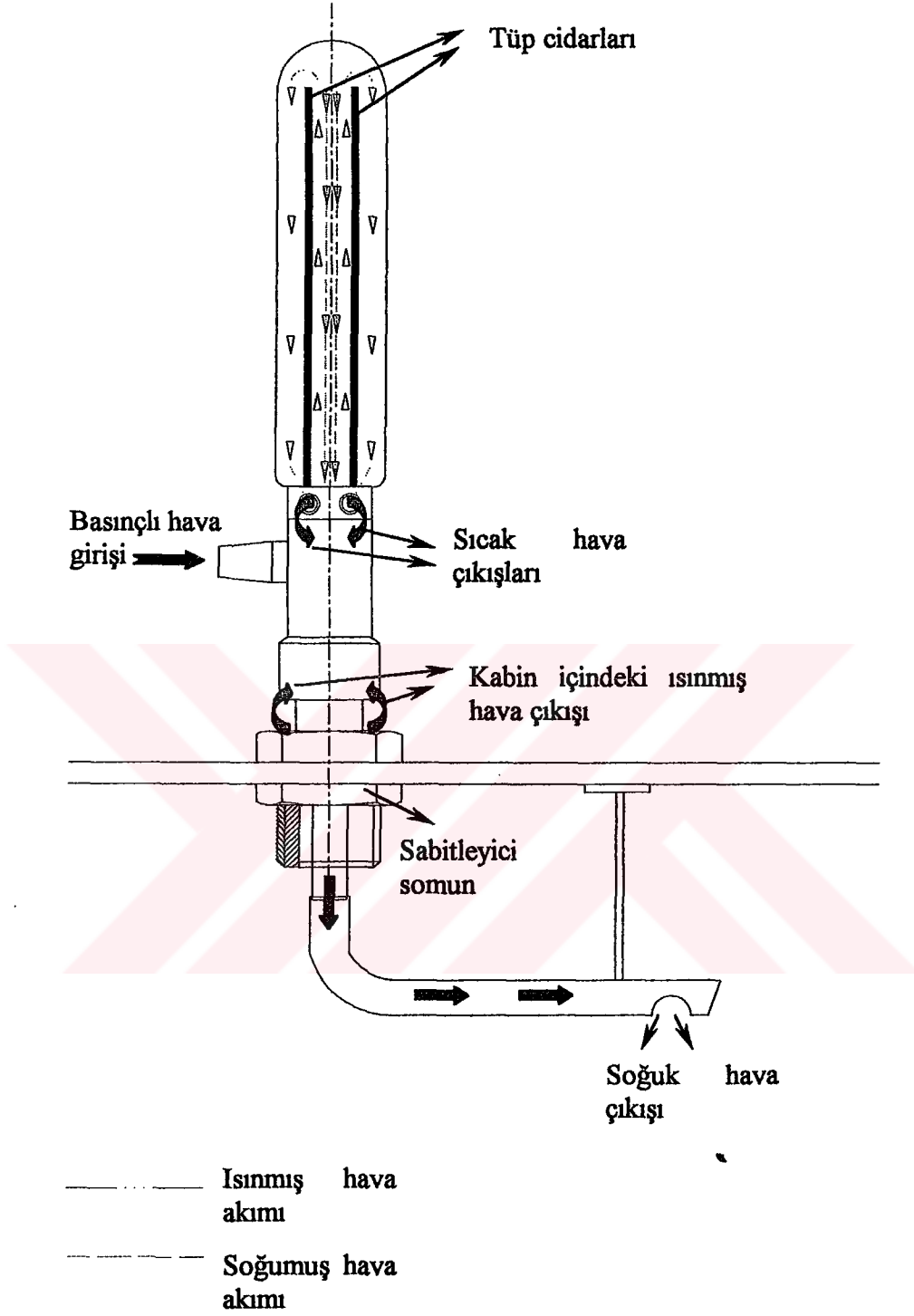
3. VORTEKS TÜPLERİN UYGULAMA ALANLARI

Vorteks tüplerin kullanım alanları, bu cihazların ürettiği farklı akışların sıcaklıklarının yeterli seviyelerde olması ve işletme maliyetlerinin düşük olması gibi başlıca nedenlerle günümüzde endüstriyel uygulamalar içinde oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Özellikle spot soğutma olarak tabir edilen ve herhangi bir cihaz içerisindeki ısı üreten kaynağın direk soğutulduğu uygulamalar için oldukça yaygındır. Ayrıca kimyasal analizlerde numunelerin soğutulması amacı ile kullanımları da oldukça yaygındır.

3.1. Vorteks Tüplerin Spot Soğutma Amacıyla Kullanımı

Vorteks tüplerin spot soğutma amacıyla kullanımı endüstriyel uygulamalar içinde geniş bir yer tutmaktadır. Bu tür uygulamalarda kullanılan vorteks tüplerin özellikleri sabit kapasite için ayarlanmış olmalarıdır. Bu sabit değer cihazın ürettiği maksimum soğutma kapasitesidir. Bu şekilde ısınan elemanın veya bölgenin ürettiği atık ısı değerleri karşılanabilmektedir. Genellikle bu tür bir uygulama için kullanılan sabit değerli vorteks tüp şekil 3.1 de gösterilmektedir.

Şekil 3.1 de gösterilen sistemdeki vorteks tüp cihazının y_c kütle akış oranı sabit olarak ayarlanmıştır. Yani maksimum soğutma kapasitesi değerinin elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Genellikle bu değer $y_c = \% 70$ civarındadır. Daha öncede açıklandığı gibi bu oranda maksimum soğutma sıcaklığı elde edilmez. Maksimum soğutma sıcaklığı yaklaşık y_c nin $\% 30 -35$ değerinde elde edilmektedir. Fakat bu oranda debi değeri azaldığı için maksimum soğutma kapasitesi elde edilememektedir. $y_c = \%70$ değerinde debi değerinin yüksekliği ve yeterli düşük sıcaklık derecesi ile maksimum soğutma kapasitesi değerine ulaşabilmektedir.



Şekil 3.1. Sabit kapasite için tasarlanmış bir vorteks tüp soğutucu (Stephan vd, 1984).

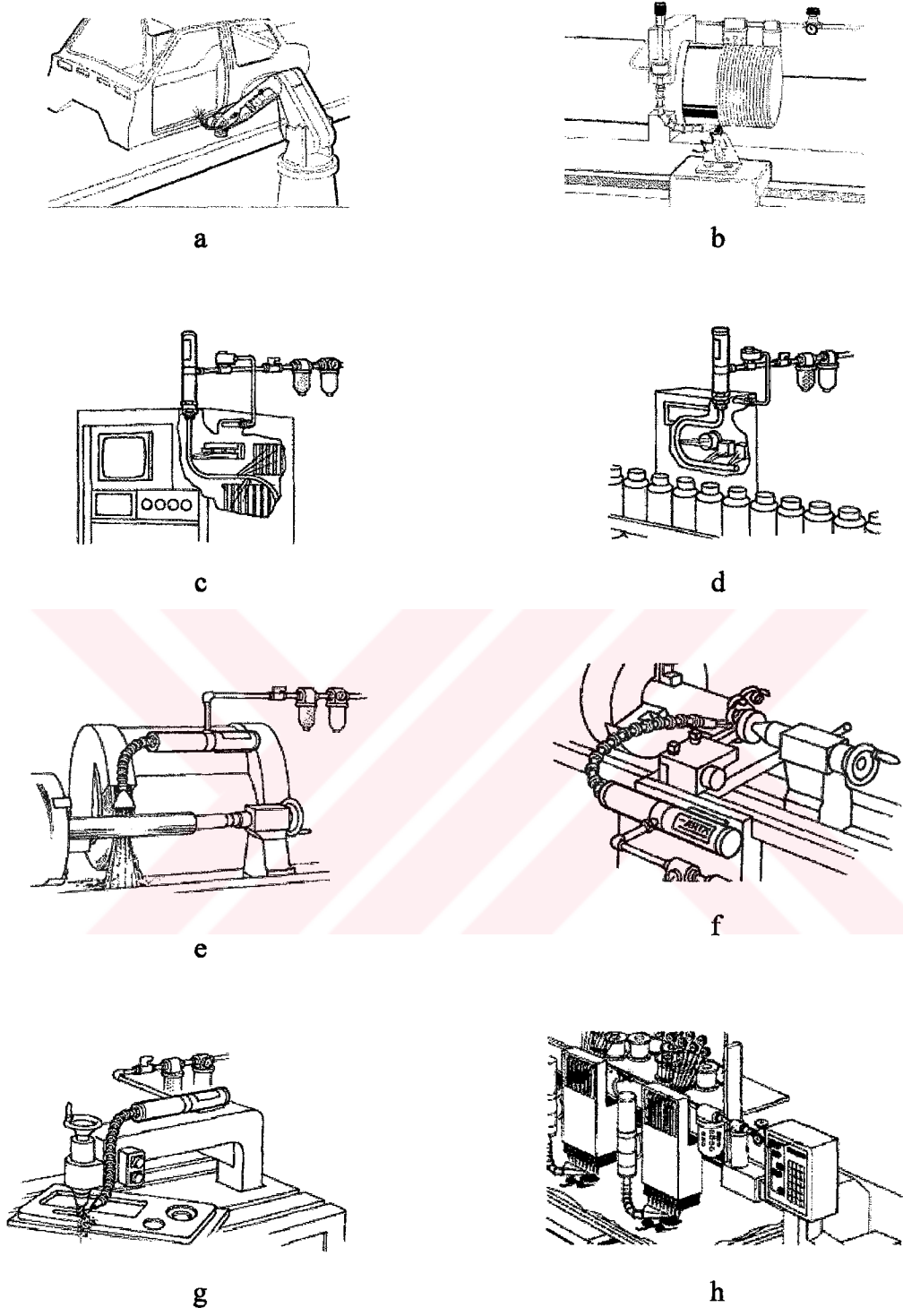
Şekil 3.1 deki cihazda çalışma akışkanı olarak basınçlı havanın kullanıldığı bir uygulama prensibi görülmektedir. Basınçlı hava tüpe şekilde gösterilen uçtan

girmektedir. Yaklaşık ses hızına ulaşan hava akımı iki farklı sıcaklıklı akışa ayrılmaktadır. Isınmış akım üst kısımdan yönlendirilerek cihaz üzerinde bulunan sıcak hava çıkış deliklerinden dışarıya atılmaktadır. Soğumuş akım ise ters yönlendiğinden alt çıkış borusundan soğutulacak kabin içerisine gönderilmektedir. Kabin içerisindeki sıcak hava ise, soğuk havanın tüp içerisine gönderilmesi ile oluşan basınç artışının yardımıyla kabin ile tüp arasındaki çıkış açıklığından dışarıya atılmaktadır. Tüp soğutulacak kabine şekil 3.1 den de görülebileceği gibi somun yardımıyla sabitlenilmiştir. Somunun iç kısmı deliktir ve bu delik içerisinden soğuk hava nakil borusu geçmektedir. Ayrıca kabin içerisindeki ısınmış hava akımı da bu delik içerisinden geçerek, kabinden dışarıya çıkmaktadır.

Vorteks tüpler spot soğutma amacıyla,

- Programlanabilir makine elemanlarının, otomatik hatların ve robotize uygulamaların elektronik ünitelerinin soğutulması,
- Kesici takımların ve taşlama taşlarının soğutulması,
- Termal kameraların merceklelerinin soğutulması,
- Sürekli kaynak yapan ve ısınan punto kaynak cihazlarının uçlarının soğutulması,
- Bilgisayar ünitelerinin ve CNC cihazlarının devrelerinin soğutulması,
- İp üreten cihazlarda sürtünmeden ısınan iplerin ve cihaz ekipmanlarının soğutulması,
- Rigo tezgahlarında mamul köşelerinin soğutulması,

gibi bir çok lokal ısınmanın olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.2 de bu uygulamalara ait örnekler gösterilmektedir. Bu şekiller “Amazonvortex” adında bir firmanın internet sitesinden alınmıştır.



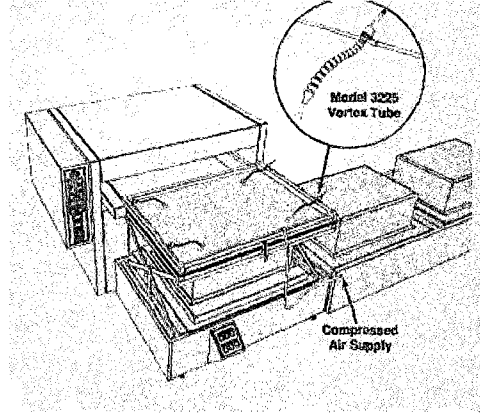
Şekil 3.2 Vorteks tüplerin spot soğutma uygulamalarına örnekler

Şekil 3.2 de;

- a- Punto kaynak cihazının soğutulması,
- b- Diş açma paftasının soğutulması,
- c- CNC elektronik devresinin soğutulması,
- d- Otomatik bantın hareketini kontrol eden elektronik sistemin soğutulması,
- e- Taşlama taşının soğutulması,
- f- Torna kaleminin soğutulması,
- g- Frezenin kesici takımının soğutulması,
- h- İp üretim cihazında ipin ve makaraların soğutulması,

işlemleri gösterilmektedir.

Bu uygulamalara bir ilave olarak buzdolaplarının iç gövde plastiğini üreten rigo cihazındaki soğutma uygulamasını belirtmek gerekir. Bu cihazdan çıkan gövde plastiğinin sıcaklığı yüksek olup normalde cihaz üzerine yerleştirilen radyal fanlar aracılığıyla ortam havası kullanılarak soğutulmaktadırlar. Fakat bu soğuma esnasında gövde plastiğinin köşe kısımları gerilme yüklenerek nispeten sıcaklığı yüksek olduğundan köşe et kalınlıkları azalarak delinmeler görülebilmektedir. Bu durumda üretilen mamul hurda olarak muamele görmektedir. Bu sorunu gidermek için şekil 3.3 de gösterildiği gibi bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulamada köşeler üzerine birer vorteks tüp yerleştirilmiştir. Gövde plastiği kalıptan çıktığında vorteks tüpler hızlı bir şekilde köşeleri soğutması ile katılaştırarak sertleştirmekte ve gerilmeye karşı dayanım güçlerini arttırarak et kalınlıklarının incelmelerini engellemektedir. Ortaya çıkan gerilmeler tüm gövde üzerine dağıtmakta ve hurda durumuna düşen malzeme sayısını azaltılmakta, malzeme maliyeti düşürülebilmektedir.



Şekil 3.3 Rigo tezgahlarında vorteks tüplerin kullanılması (Azarov, 1998).

3.2. Kimyasal Analizlerde Vorteks Tüp Uygulamaları

Kimyasal analizlerde her geçen yıl vorteks tüplerin kullanımları artmaktadır. Üretilen soğuk akış sıcaklığının yeterli olması ve cihaz ebatlarının küçük olması nedenleri ile vorteks tüpler kimyasal analizlerde sıkça tercih edilen bir uygulama haline gelmişlerdir.

3.2.1. Orta Sıcaklıklı Kromatografik Analizlerde Vorteks Tüp Kullanılması

Bir bileşiğin içerdiği maddelerin neler olduğunu tespitinde ve bileşiği oluşturan maddelerin miktarını belirlemede faydalanılan kromatografik analizlerde istenen şart, numunenin sıcaklığının düşük tutulmasıdır. Kromatografik analizler 0 °C ile -100 °C değerleri arasında yapılabilmektedir. -40 °C değerine kadar olan analizlere ise orta sıcaklıklı kromatografik analizler denmektedir. Bu işlem için düşük sıcaklıklarda buharlaşan sıvı soğutkanlar (kriojenik akışkan) kullanılabilir. Fakat kromatografik analizlerde bu tür düşük buharlaşma sıcaklıklı akışkanların kullanımı için "Dewar konteynırı" olarak tabir edilen boyutları büyük haznelere kullanmak gerekmektedir. Ayrıca bu kriojenik akışkanlar yanıcı ve patlayıcı olabilmektedir. Aynı analiz için bir Peltier etkili soğutucunun kullanılması da pek sık rastlanılan bir metot değildir.

Orta sıcaklıklı kromatografik analizler için uygun bir alternatif olarak, bir vorteks tüpten alınan soğuk hava akımının analiz için kullanılan kolon fırını içine enjekte edilmesi olarak düşünülebilir. Böyle bir durumda 15 veya 20 dakika içinde kolon sıcaklığı $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerlerine ulaşabilmektedir (T.J. Bruno 1992).

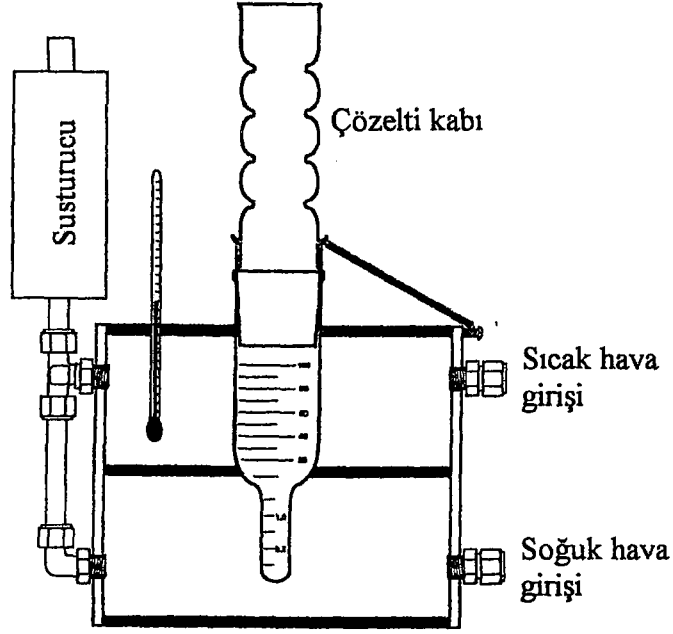
3.2.2. Kromatografik Şırınganın Soğutulması

Kromatografik analizlerde hataya sebebiyet veren en önemli etkenlerden birisi de test edilen sıvı numune miktarının tekrarlanabilirliğidir. T.J. Bruno (1987) bu analizlerde numune miktarının tekrarlanabilirliğinin çok önemli olduğunu belirtmektedir. Sıvı miktarının tekrarlanabilirliğinin sağlanabilmesi için standart bir kromatografik şırınga olarak tabir edilen bir aparat kullanılır.

Bu şırıngada bir cam boruya giriş ve çıkış bağlantıları yapılarak bu boru şırıngaya bir plastik conta ile irtibatlandırılmıştır. Vorteks tüpten gelen soğuk hava akımı şırınga etrafında dolaştırılarak şırınga içindeki numunenin sıcaklığı düşürülmektedir.

3.2.3. Çözeltilerin Soğutulması

Bazı çözeltilerde çözücü maddenin buharlaşması nedeni ile çözeltinin konsantrasyonunda değişimler olmaktadır. Bu sebeple çözelti soğutulmuş çözücü bileşenin buharlaşmasının durdurulması amaçlanır. Aynı zamanda bir "Micro veya Kuderna Danish" tipi konsantre edici aparatta numunenin üst kısımları ısıtılmakta alt kısımları ise soğutulmaktadır (Bruno, 1992). Bu iş için ise vorteks tüp uygun olabilmektedir. Bu tür bir konsantre edici aparat şekil 3.4 te gösterilmiştir.



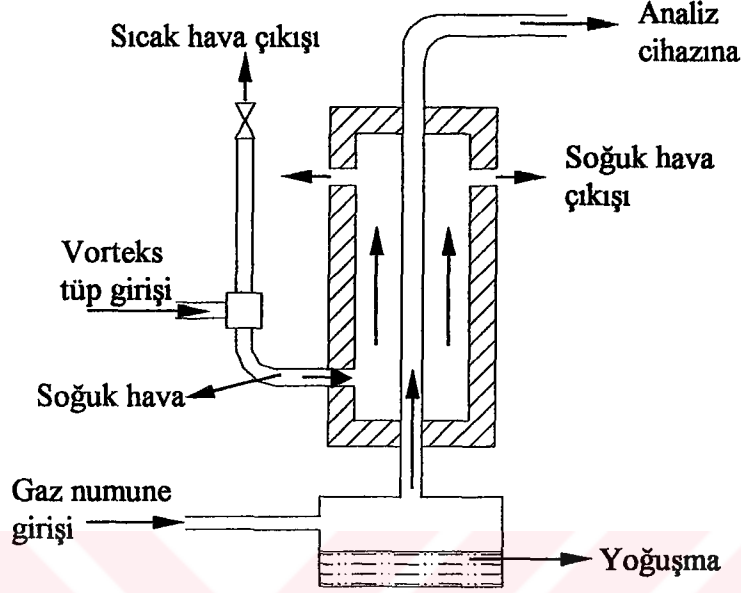
Şekil 3.4. Çözeltilerin vorteks tüp ile soğutulması (Bruno, 1992).

Bu sistemde iki hazneye ayrılmış gövdenin üst kısmına vorteks tüpün sıcak hava akımı, alt tarafına ise soğuk hava akımı verilmektedir. Isıl etkileşim sonrası oluşan atık hava bir susturucudan geçirilerek dış ortama atılmaktadır. Bu şekilde dizayn edilen bir konsantre edici cihazda soğuk parmak olarak tabir edilen alt uç ile üst uç arasında bir sıcaklık farkının oluşturulması, ağır parçaların aşağıya doğru yönelmesini sağladığı için tercih edilen bir yöntemdir.

3.2.4. Numunenin Nemden Arındırılması

Özellikle baca gazının analizinin yapılması ve buna benzer analizlerde numunenin nemden arındırılması gerekir. Baca gazı analizinin yapıldığı cihazın sensörünün elektroliti neme duyarlı olan bir alkalin kurşun hidroksit malzemedir. Bu sebepten dolayı numunenin nemden arındırılması bazı kimyasal analizlerde önem arz etmektedir. Ancak bu şekilde güvenilir ve doğru sonuçlar elde edilebilir. Bu tür bir

işlem için vorteks tüp ile bir soğutma sistemi dizayn edilebilir. Böyle bir sistem şekil 3.5 de gösterilmektedir.



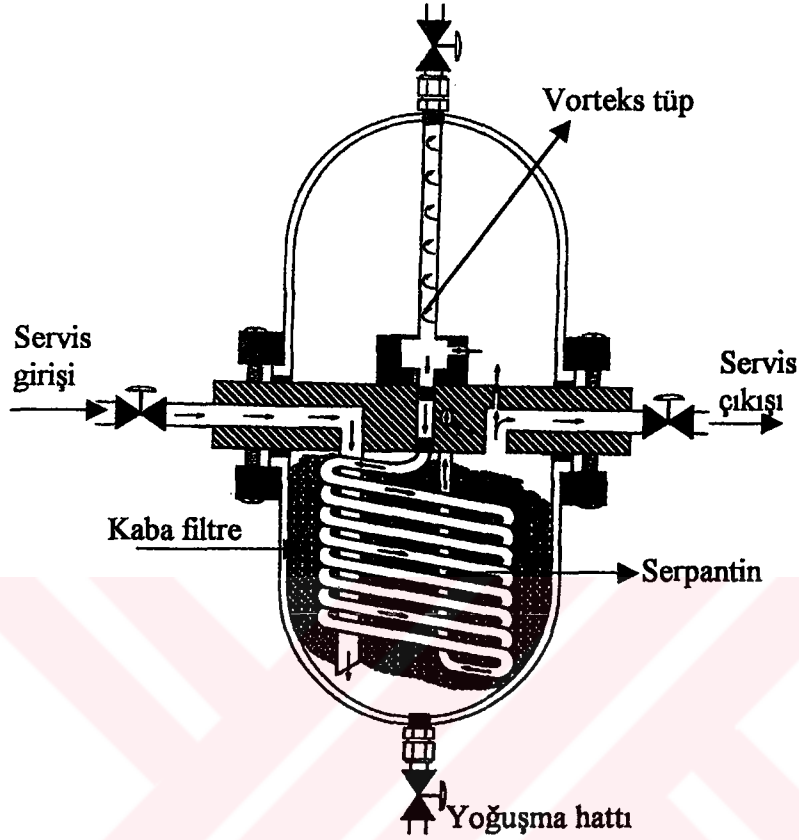
Şekil 3.5. Vorteks tüp soğutmalı bir gaz numuneden nem alma sistemi (Bruno, 1987).

Bu sistemde vorteks tüpten elde edilen soğuk hava akımı bir ters akımlı ısı değiştiricisine nakledilirken ısı değiştiricinin diğer ucuna da nemden arındırılacak ve analize tabi tutulacak numune nakledilir. Yoğuşan nem yerçekiminin etkisi altında numunenin ısı değiştiricisine girdiği uçtan, ısı değiştiricinin altına bağlanmış bir haznede biriktirilerek numuneden uzaklaştırılır.

3.2.5. Hava Hattının Nemden Arındırılması

Basıncı hava hatlarında nakledilen hava nem içerebilir. Pnömatik sistemlerde hava içerisindeki nem, bazı durumlarda arzu edilmeyen şartlar meydana getirebilmektedir. Bu sebeple hava içerisindeki nemin alınması pnömatik sistemlerin çalışma şartları açısından önem arz etmektedir. Bu işlem için nem absorblayıcı madde içeren bir kurutucu, basınçlı hava hattına bağlanabilir. Fakat böyle bir kurutucunun zamanla

bakım gereksinimi ortaya çıkarması muhtemeldir. Bu sebeple şekil 3.6 da gösterilen ve kendi kendine kurutmalı olarak tabir edilen bir kurutucu hava hattına bağlanabilir.



Şekil 3.6. Vorteks tüp soğutmalı bir basınçlı hava kurutucusu (Bruno, 1994).

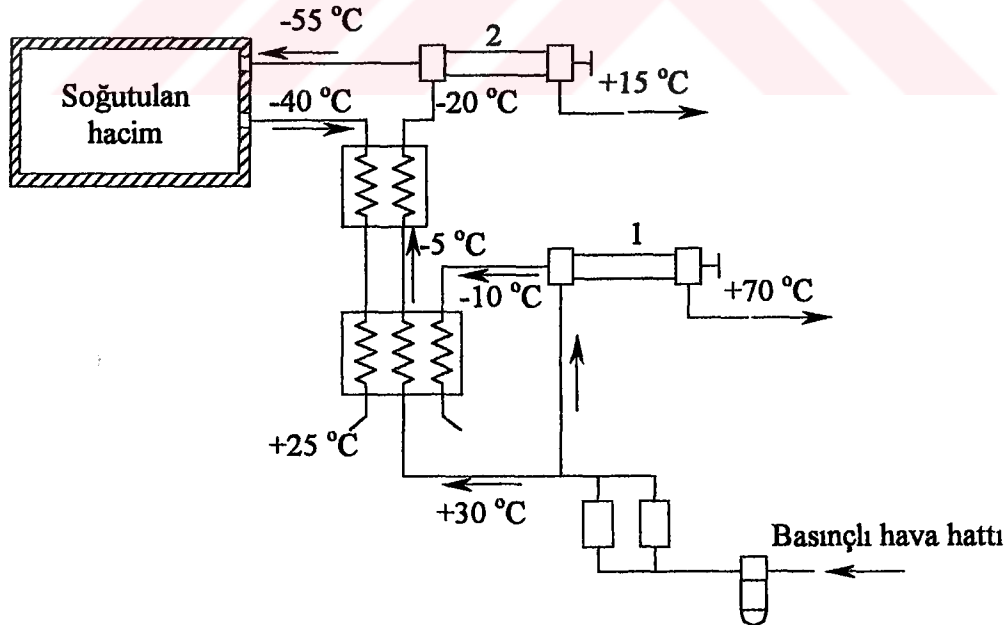
Şekil 3.6 da basınçlı hava servis girişinden girerek alt kısma geçer ve burada küçük bir delik aracılığı ile bir vorteks tüpü besler. Vorteks tüpten elde edilen soğuk hava akımı, servis hattı havası ile temasta olan bir ısı değişiricisine gönderilir. Tüpten çıkan sıcak hava akımı da kurutucunun üst kısmından ortama bırakılır. Böyle bir sistemde genellikle $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ lık bir ısı değişirici yüzey sıcaklığı servis havası neminin alınmasına olanak sağlamaktadır (Bruno, 1994). Bu şartlar altında da bu sistemdeki bir vorteks tüp toplam servis havasının yaklaşık % 20 sini tüketmektedir. Bu değerden geriye kalan hava debisi bir çok pnömatik cihazın çalışması için yeterlidir.

3.2.6. Kızılötesi Analizlerde Numunenin Soğutulması

Kızılötesi ışınlar kullanılarak yapılan analizlerde numunenin bulunduğu hücrenin soğutulması gerekmektedir. Alternatif soğutkanlar ile yapılabilecek bu hücre soğutulmasında kullanılan "Dewar" tipi hücreler pahalı cihazlardır (Bruno, 1992). Ayrıca kızılötesi analizlerinde $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklar önemlidir. Bir çok soğutucu akışkanda daha düşük sıcaklıklarda buharlaşabildiklerinden bu sıcaklıklarda kullanılmaları bazı durumlarda sorun çıkarabilmektedir. T.J. Bruno vorteks tüp soğutma sistemi ile yaptığı kızıl ötesi analizlerde oldukça güvenilir sonuçlar aldığını ve vorteks tüp ile soğutma sisteminin bu analizde avantajlı olduğunu belirtmiştir.

3.3. Düşük Sıcaklıklı Vorteks Tüp Uygulamaları

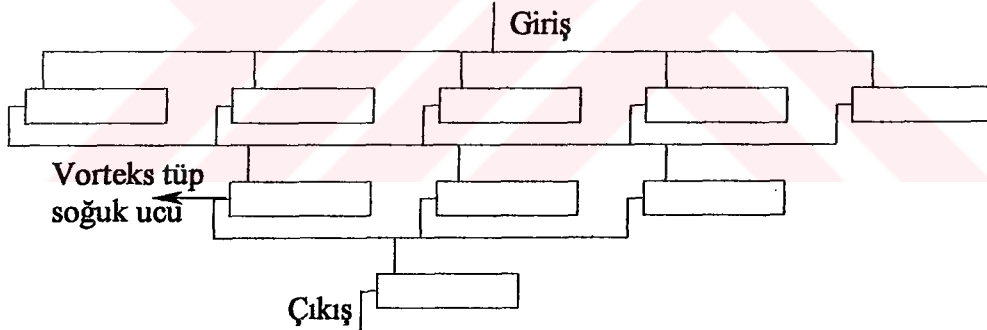
Vorteks tüplerin soğuk akış sıcaklıklarının düşük değerlere ulaşması şekil 5.7 de gösterilen bir tesisatın oluşturulması ile mümkün olabilmektedir.



Şekil 3.7. İki kademeli bir vorteks tüp sistemi ile bir düşük sıcaklık uygulamasının şematik gösterimi (Azarov, 1998).

Şekil 3.7 deki sistemde 1 numara ile gösterilen vorteks tüp 2 numaralı tüpün giriş havasını soğutmak amacıyla kullanılmakta ve bu işlem için bir ısı değiştiricisi kullanılmaktadır. $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ da ikinci tüpe giren hava, tüpten $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik bir soğuk akış ve $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik bir sıcak akış olarak iki kısımda çıkmaktadır. $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ lik akış soğutulacak hacme gönderilerek, bu hacim içerisindeki gıda mamullerinin dondurulması gibi düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir.

Vorteks tüplerde sıcaklık ayırımı işlemlerinde eğer soğuk akışın sıcaklık değerinin daha da düşürülmesi arzulanıyorsa "Cascade" sistemleri denilen sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler bir çok vorteks tüpün birleştirilmesinden oluşmaktadır. Bir tüpten çıkan soğuk akış diğer tüpün giriş ağzına bağlanır. Bir çok tüpün ard arda bu şekilde bağlanması ile elde edilen sıcaklık değerlerini çok daha düşürmek mümkün olmaktadır. Şekil 3.8 de "cascade" sistemine ait şematik gösterim verilmiştir.

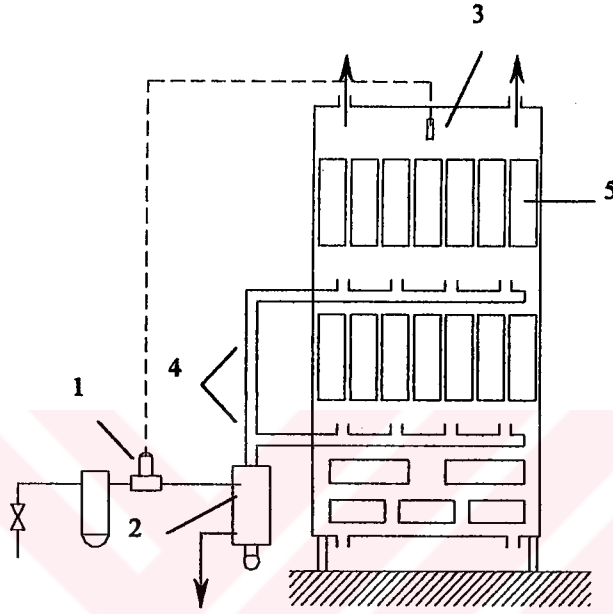


Şekil 3.8. Cascade prensibine göre birbirine bağlanan vorteks tüplerin şematik gösterilmesi (Cockerill, 1994).

3.4. Elektronik Devrelerin Soğutulması

Elektronik devrelerin çalışmaları esnasında açığa çıkan ısının, bu devrelerin çalışmalarının devamı için sistemden alınması gerekmektedir. Şekil 3.9 da bir elektronik devre sisteminin şematik soğutma prensibi gösterilmiştir.

Şekil 3.9 da 2 numara ile gösterilen vorteks tüpten elde edilen soğuk hava akımı 4 numara ile gösterilen soğuk hava kanalları aracılığı ile devreler üzerine gönderilmektedir. 1 numara ile gösterilen selenoid vana 3 numara ile gösterilen termostatin kontrolünde iç ortam sıcaklığı istenen değere ulaştığında selenoid vana vorteks tüpün hava beslemesini kapatmaktadır.



Şekil 3.9. Bir Elektronik Devre Sisteminin Vorteks Tüp Soğutma Sistemiyle Soğutulması (Azarov, 1998).

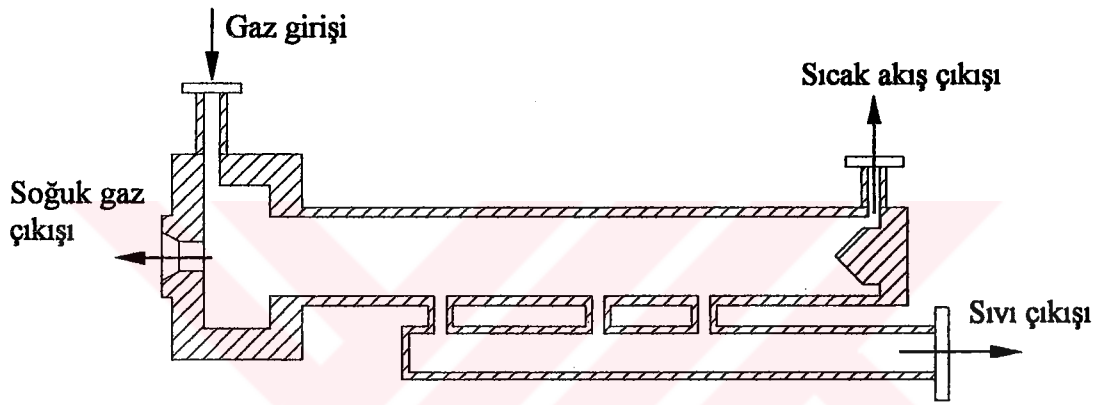
3.5. Vorteks Tüp Sisteminin Gaz Endüstrisinde Kurutma Amacıyla Kullanımı

Vorteks tüp sisteminin gaz endüstrisinde kullanım alanı, bir hidrokarbon bileşiği olan doğalgaz içerisinde nem almaktır. Vorteks tüp sistemi, endüstrideki diğer uygulamalarından farklı olarak çok büyük ebatlara sahiptir ve çok yüksek işletme basınçlarında (60 – 65 bar) çalıştırılmaktadır (Hajdik, 1997).

Bu tür bir uygulama için tasarlanan bir vorteks tüp sisteminin aynı amaç için tasarlanan Joule – Thomson sistemine göre ilk yatırım maliyetinin düşük olması ve işletme şartlarının Joule – Thomson sistemi ile yaklaşık aynı olması, vorteks tüp sisteminin bu alanda kullanımını arttıran faktörlerdir.

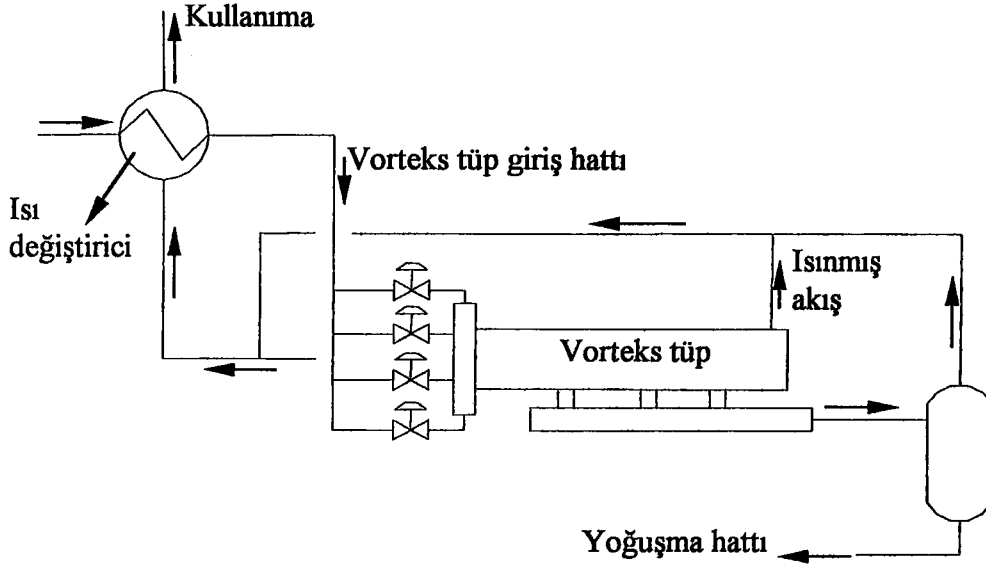
Vorteks tüp sisteminin, bir doğalgaz kurutma aracı olarak kullanılmasında bazı kısıtlayıcı faktörler vardır. Bu konu hakkında Hajdik (1997) vd. tarafından yapılan çalışmalar, vorteks tüpe uygulanan giriş gazında bulunabilecek nem miktarının % 5 ile % 10 değerleri arasında olması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca Hajdik (1997) vd. bu nem seviyesini geçen değerlerde vorteks tüpten beklenen performansın düşme eğilimi gösterdiği belirtmektedir.

Doğalgaz gibi bir hidrokarbon gaz bileşimi içinden nem alınması işlemi için kullanılan vorteks tüpe ait şematik gösterim şekil 3.10 da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Doğalgaz v.b. gazlardan nem almak için tasarlanmış vorteks tüp (Hajdik vd., 1997).

Şekil 3. 10 da gösterilen vorteks tüpün alt kısmına bir sıvı alma hattı bağlanmıştır. Vorteks tüpün ürettiği soğuk akışın etkisi ile yoğuşan nem, merkezkaç kuvvetlerin etkisi altında cidara biriktirilir ve cidar ile alt nem alma hattı arasındaki bağlantıdan, alt bölüme geçer ve sistemden uzaklaştırılır. Bu prensibe göre çalışan vorteks tüpün çalışması için uygulanan tesisat şeması şekil 3.11 de gösterilmektedir.

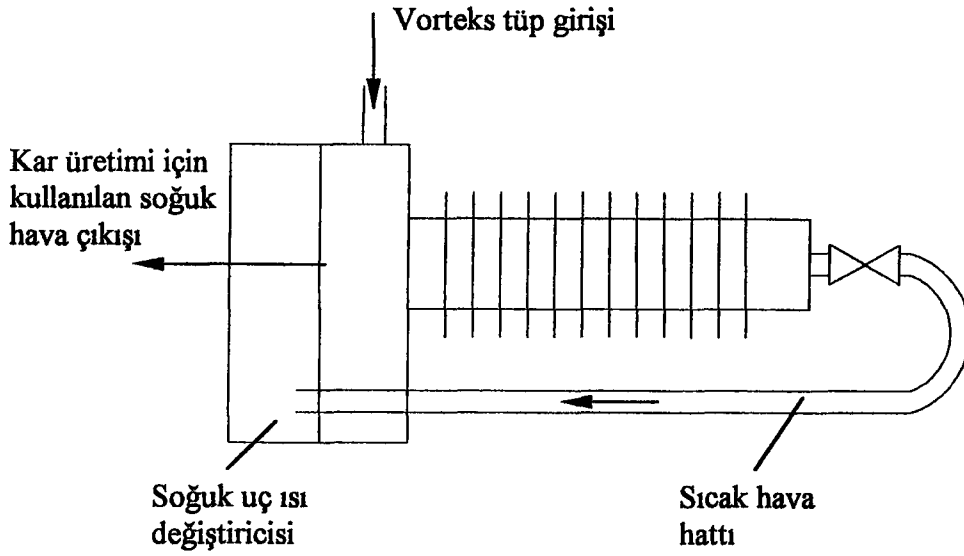


Şekil 3.11. Vorteks tüp kullanılan doğalgaz kurutma tesisatının şematik gösterimi (Hajdik vd., 1992).

Şekil 3.11 de gösterilen tesisatta vorteks tüpe gönderilecek olan akış önce bir ısı değiştiricisinden geçirilir. Bu ısı değiştiricisine vorteks tüpten elde edilen soğuk akış gönderilerek giriş gazının sıcaklığı düşürülür. Bu sayede vorteks tüpün verimi artırılabilir. Vorteks tüpe giriş akışı dört adet giriş nozulu ile gönderilir. Vorteks tüpten elde edilen ısınmış akış tüpün üst kısmından alınarak soğuk akış hattına bağlanır. Sistemden çekilen yoğuşma ise bir depoda toplanır ve yoğuşma hattından tahliye edilir.

3.6. Vorteks Tüp Yardımıyla Kar Üretimi

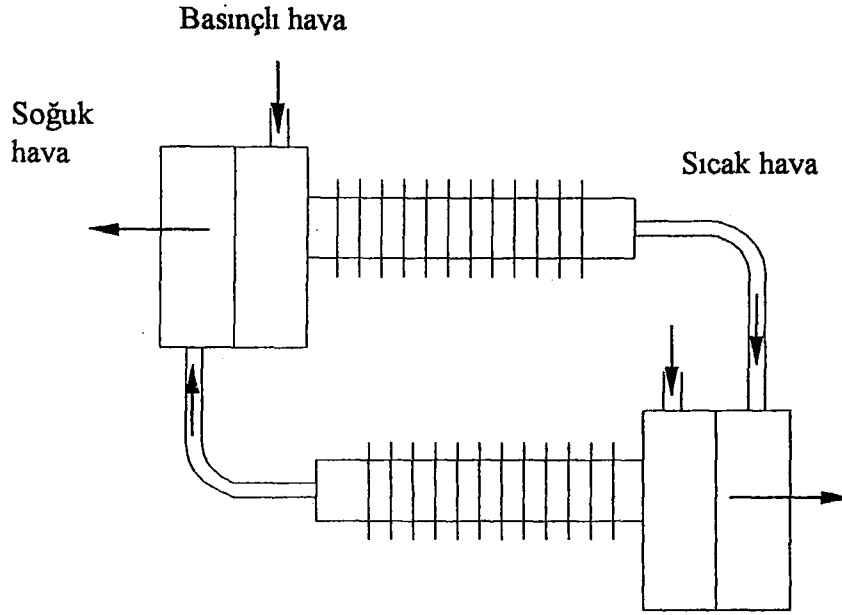
Vorteks tüpün sağladığı soğuk akışın sıcaklığının kar üretimi için kullanılması fikri ilk olarak 1999 yılında L.Tunkel vd. tarafından düşünülmüştür. Vorteks tüpten elde edilen soğuk akış, bir su jetinden pülverize olarak püskürtülen su hüzmesi ile kesştirilerek kar üretmek amaçlanır. Bu tür bir yolla kar elde etmek için vorteks tüp dizaynında bazı ilave elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. İlave elemanlarla donatılmış vorteks tüpe ait şekil, şekil 3.12 de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Kar üretimi amacıyla tasarlanmış vorteks tüpün şematik gösterimi (Tunkel, 1999).

Kar üretimi için kullanılan vorteks tüpün gövdesi üzerine yerleştirilen kanatçıklar ve soğuk akış çıkış ucuna yerleştirilen bir ısı eşanjörü, sisteme ilave edilen elemanlardır. Tüpe gönderilen basınçlı hava akımı, tüp içerisindeki enerji seperasyonu sonucu iki kısma ayrılmakta ve şekil 3.12 de görüldüğü gibi soğuk akış tüpün sol ucundan, sıcak akış ise vanadan geçerek tüpün sağ tarafından elde edilir. Gövde üzerine yerleştirilen kanatçıklar sıcak akış sıcaklığını belli bir değere düşürmek amacıyla tasarlanmıştır. Isınmış akış, vorteks tüpün sol ucuna yerleştirilen bir ısı eşanjörüne, bir sıcak hava hattı ile bağlanmıştır. Bu ısı değiştiricisinin görevi, vorteks tüpün soğuk uç çıkışında oluşabilecek buz formasyonunu dolayısıyla da soğuk akış çıkış kesitinin tıkanmasını önlemektir. Fakat bu ısı değiştiricisine gelen sıcak akışın sıcaklık değerinin yüksek olması arzulanmaz (Tunkel, 1999). Aksi takdirde vorteks tüpten elde edilen soğuk akışın sıcaklık değerinde bir artış gözlenebilir. Bu durum da kar oluşumuna olumsuz yönde etki edebilir.

Şekil 3.13 te kar üretmek amacıyla beraber çalıştırılan iki vorteks tüpe ait şekil gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Kar üretmek amacıyla oluşturulmuş iki vorteks tüpün birbirine bağlanması (Tunkel, 1999).

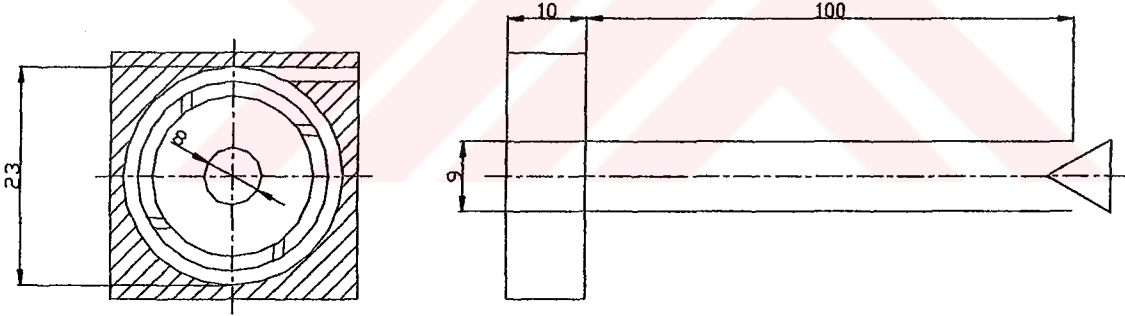
Şekil 3.13 te gösterilen çalışma şeklinde her bir vorteks tüpten elde edilen sıcak akışların bir diğer tüpe bağlandığı görülmektedir. Bu durum birden çok tüp kullanımı söz konusu olduğunda kullanılabilir alternatif bir çalışma şeklidir. Bu sistemlere ait çalışmalar Tunkel (1999) vd. tarafından test edilerek, Amerikan Patent Enstitüsünde patentlendirilmiştir.

4. MATERYAL ve METOD

4. 1. Materyal

Deneyler için kullanılan vorteks tüp paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş olup vorteks tüpe ait imalat şekil 4.1. de verilmiştir.

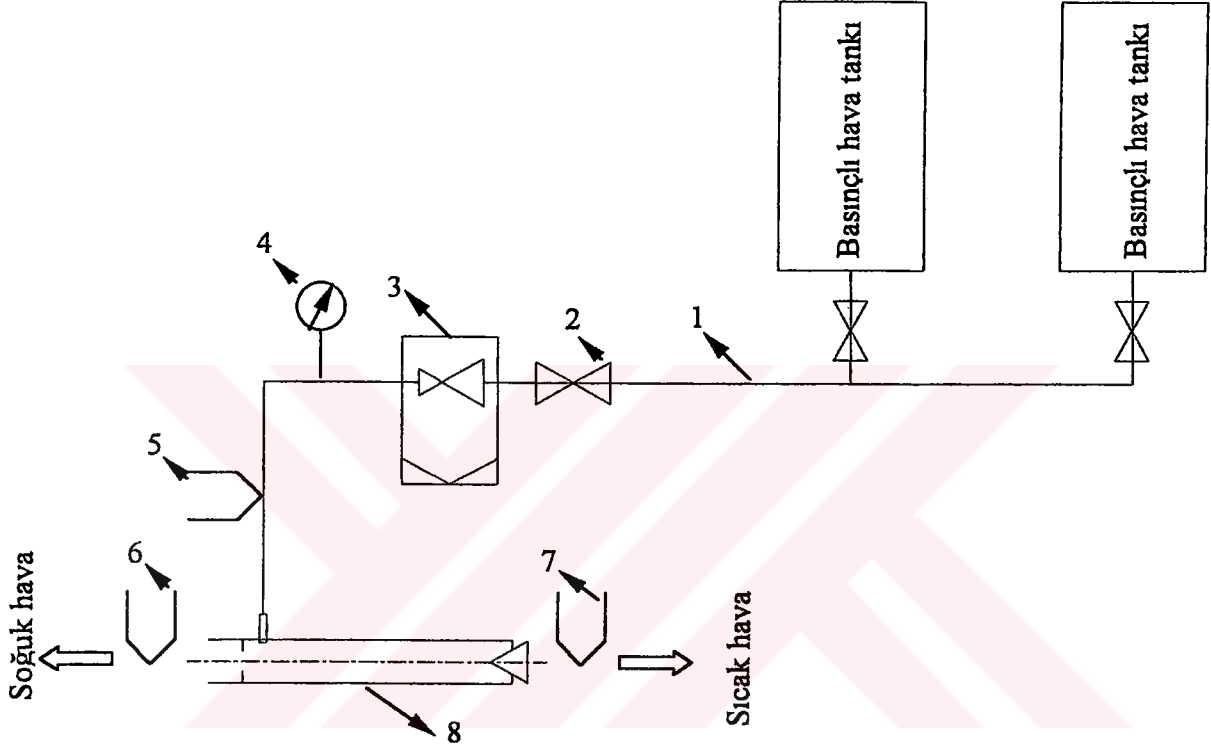
Çalışmalarımızda vorteks tüplerin soğutma amacı için kullanımı odak olarak alınmıştır. Bir önceki bölümde izah edildiği gibi, eğer vorteks tüp ısıtma amacı için kullanılmak isteniyorsa, optimum performans için L/D oranının yaklaşık olarak 50 civarında olması gerekmektedir. Bu oran vorteks tüp soğutma amacına yönelik olarak kullanılacaksa yaklaşık olarak 10 olmaktadır. Atölyemizdeki deney düzeneğine hava beslemesini sağlayan kompresörlerin debi değerleri ısıtma amacına yönelik tüpler üretimi için kısıtlayıcı bir faktör oluşturmaktadır. Bu kıstas ile beraber vorteks tüplerin soğutma özelliklerinin kullanımının yaygın olması sebebi ile çalışmamızda vorteks tüplerin soğutma performansları odak olarak alınmıştır.



Şekil 4.1. Deneyde kullanılan vorteks tüpe ait şekil

Deneylerde kullanılan düzeneşekil 4.2. de gösterilmektedir. Deney düzeneğini beslemek amacıyla iki adet basınçlı hava kompresörünün maksimum basınç değerleri aynı değere ayarlanmış ve bu kompresörler birbirlerine seri olarak bağlanmışlardır. Bu sayede basınçlı hava debisinin sürekliliği sağlanarak, daha uzun deney sürelerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Kompresörlerden gelen basınçlı hava akımı bir basınçlı hava regülatörüne bağlanmış ve böylece değişik basınç değerlerinde çalışma imkanı sağlanmıştır. Regülatörden çıkan basınçlı hava hattı, vorteks tüp girişine

bağlanmıştır. Tüp içerisindeki enerji ayırımı olayı sonrası elde edilen soğuk akışa ve sıcak akışa ait sıcaklık değerleri bir dijital sıcaklık ölçme cihazı ile kaydedilmiştir. Vorteks tüpün sıcak akış çıkış ucundaki vana ile sıcak akışa ve soğuk akışa ait kütleli akış değerleri değiştirilerek, akışların sıcaklıklarındaki değişimler gözlenmiştir.

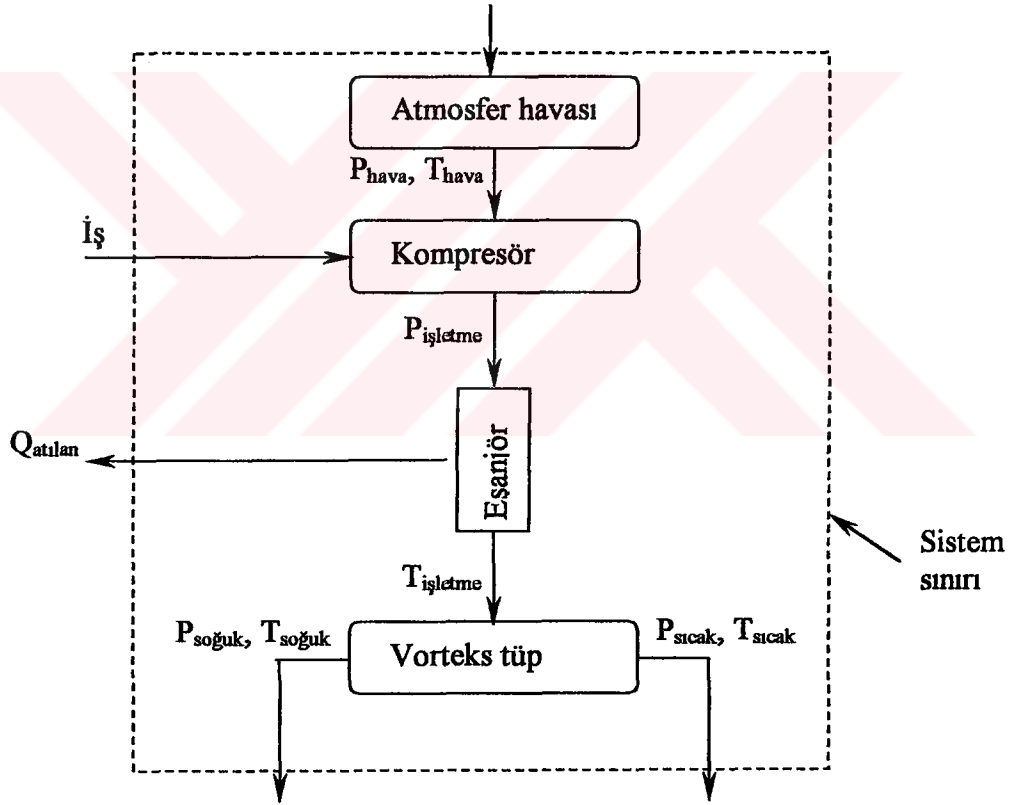


Şekil 4.2. Deneyleerde kullanılan düzeneğin şemantik gösterimi.

- 1 – Basınçlı hava hattı
- 2 – Basınçlı hava hattı vanası
- 3 – Regülatör
- 4 – Manometre
- 5 – Basınçlı hava hattı termometresi
- 6 – Soğuk akış termometresi
- 7 – Sıcak akış termometresi
- 8 – Vorteks tüp

4. 2. Metot

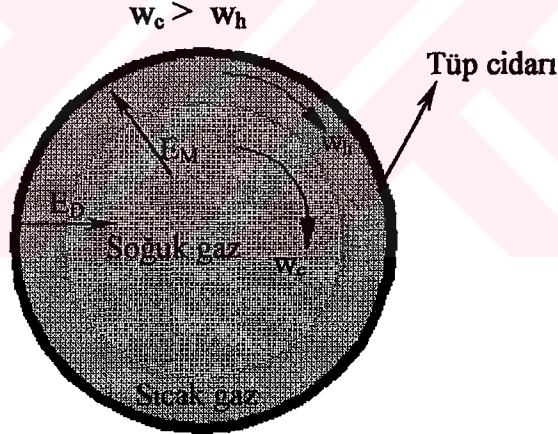
Günümüzde adyabatik ve adyabatik olmayan vorteks tüplerin kullanımları yaygın durumdadır. Vorteks tüpün gövdesi ile dış ortam arasında ısı transferinin olmadığı yani sisteme (vorteks tüpe) giren ve çıkan ısının yalnızca akışkan tarafından taşındığı kabul edilen tüplere adyabatik vorteks tüpler denilmektedir. Dolayısıyla adyabatik olarak kabul edilen tüplerin adyabatik olmayan tüplere göre birinci yasa analizlerinin yapılmasının daha kolay olduğu söylenebilir. Tarafımızdan yapılan çalışmalarda da adyabatik olarak kabul edilen vorteks tüpler kullanılmıştır. Bir adyabatik vorteks tüpü incelemek için aşağıdaki gibi bir akış şemasının çıkartılması faydalı olacaktır.



Şekil 4.3. Adyabatik bir vorteks tüpün termodinamik sistemi akış şeması (Cockerill, 1995).

4.2.1 Vorteks Tüp İçindeki Enerji Transferi

Adyabatik olan ve adyabatik olmayan vorteks tüplerin çalışma prensibi aynı ilkeye dayanmaktadır. Sistemden eş zamanlı, biri soğuk diğeri sıcak iki akışın elde edilmesini sağlayan bu esas etki, vorteks çekirdeğindeki akışın tüpün dış cidarındaki akış üzerinde iş yapmasıdır. Bu sayede çevresel akış üstüne yüklendiği iş ve sürtünmelerle yüklendiği iş nispetinde ısınmakta, vorteks çekirdeğindeki akışta kaybettiği iş oranında soğumaktadır. Aynı zamanda dış akış bölgesinden iç akış bölgesine bir ısı transferi söz konusudur. Yani dış bölgede bulunan ve sıcaklığı iç akışa göre nispeten yüksek olan akıştan, iç bölgedeki akışa enerji transferi vardır. Fakat 1950 yılında Fulton tarafından belirttiği gibi, iç akış tarafından dış akış üzerine yapılan iş miktarı, dış akıştan iç akışa olan ısı transferi ile ortaya çıkan enerji kazancından daha büyüktür. Dolayısıyla iç akış kaybettiği enerji nispetinde soğumaktadır. Bu durum şekil 4. 4. teki gibi ifade edilebilir.



Şekil 4.4. Vorteks tüp içindeki soğuk ve sıcak gaz akışları arasındaki mekanik enerji transferinin temsili gösterimi (Frohlingsdorf ve Unger, 1998).

Şekil 4.4. de E_M , iç akışın dış akış üzerine yaptığı işi, E_D ise dış akıştan iç akışa olan difüz enerji transferini ifade etmektedir. İç akışın dış akış üzerine yaptığı iş viskoz kuvvetler tarafından olmaktadır. Bir hacim elemanı üzerine yapılan iş;

$$-\nabla \cdot (\tau \cdot v) \quad (4.1)$$

dir.

Birbirinden farklı açısal hızlarda dönen akışlar arasındaki kayma gerilmeleri ise;

$$\tau_{r\theta} = -\mu r \frac{\partial \omega}{\partial r} = -\mu \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} \right) \quad (4.2)$$

dir.

Burada, vorteks tüp içerisindeki akışın aksenal olarak simetrik kabul edilmesi mümkündür. Dolayısıyla $\tau_{r\theta}$ tarafından yapılan iş değeri,

$$dE_M = v_\theta \tau_{r\theta} dA_r \quad (4.3)$$

olarak elde edilebilir.

4.2.2. Adyabatik Vorteks Tüplerin Termodinamiğin 1. Yasasına Göre Analizi

Termodinamiğin birinci yasası veya diğer adıyla enerjinin korunumu ilkesi enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri incelemek için bir temel oluşturur. Bu yasanın toplam kütle için kısaca ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$Q - W = \Delta E \quad (4.4)$$

Burada, Q sistem sınırlarındaki net ısı geçişi, W değişik biçimleri kapsayan net işi ve ΔE ise sistemdeki toplam enerji değişimini ifade etmektedir. Bilindiği gibi sistemin toplam enerjisi üç parçadan oluşmaktadır. İç enerji (U), kinetik enerji (KE) ve potansiyel enerji (PE). Bu nedenle;

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (4.5)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada;

$$\Delta U = m (u_2 - u_1) \quad (4.6)$$

$$\Delta KE = (m/2) (V_2^2 - V_1^2) \quad (4.7)$$

$$\Delta PE = m g (z_2 - z_1) \quad (4.8)$$

olmaktadır.

Bu yasayı vorteks tüp için uygularsak, yükseklik değişiminin olmadığı düşünülerek $\Delta PE = 0$ alınacaktır. Vorteks tüp içindeki akışların farklı açısız hızlarda döndüklerinden yüksek hızlı akış nispeten düşük hızlı akışı ivmelendirmeye çalışmaktadır. Bu olay esnasında yüksek hızlı akışın hızında düşüş oluşmaktadır. Eğer vorteks tüp adyabatik bir sistem olarak kabul edilirse, bu düşüş birinci yasaya göre, akışın hızındaki düşme akışın sahip olduğu toplam enerjiyi ve dolayısıyla sıcaklığını da düşüreceği anlamına gelir.

Vorteks tüpün adyabatik bir proses olduğu kabulü ve iç cidar ile dış akış arasındaki sürtünmenin göz ardı edilmesi ile enerjinin korunumu eşitliğinin analizi için aşağıdaki ifadeyi yazmak mümkündür.

$$\dot{m}_g h_{giriş} = \dot{m}_g y_c h_c + \dot{m}_g (1 - y_c) h_h \quad (4.9)$$

Burada;

$$y_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_g} \quad (4.10)$$

$$y_h = 1 - y_c \quad (4.11)$$

$$\frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_g} = 1 - y_o \quad (4.12)$$

dir.

(4.9) nolu eşitlikte yer alan giriş akışının kütle oranı ifadesini her iki tarafından sadeleştirildiğinde (4.13) nolu eşitlik elde edilir.

$$y_o(h_o - h_h) + (h_h - h_g) = 0 \quad (4.13)$$

(4.9) nolu ifadeden de anlaşılacağı gibi sisteme giren enerji iki kısma ayrılmaktadır. İdeal bir gaz için yukarıdaki ifade (4.14) nolu ifadedeki gibi yazılabilir.

$$c_p T_{giriş} = y_c c_p T_c + (1 - y_c) c_p T_h \quad (4.14)$$

Burada;

c_p : İdeal bir gaz sabit basınçtaki özgül ısı,

T_c : Soğuk akışın sıcaklığı,

T_h : Sıcak akışın sıcaklığı,

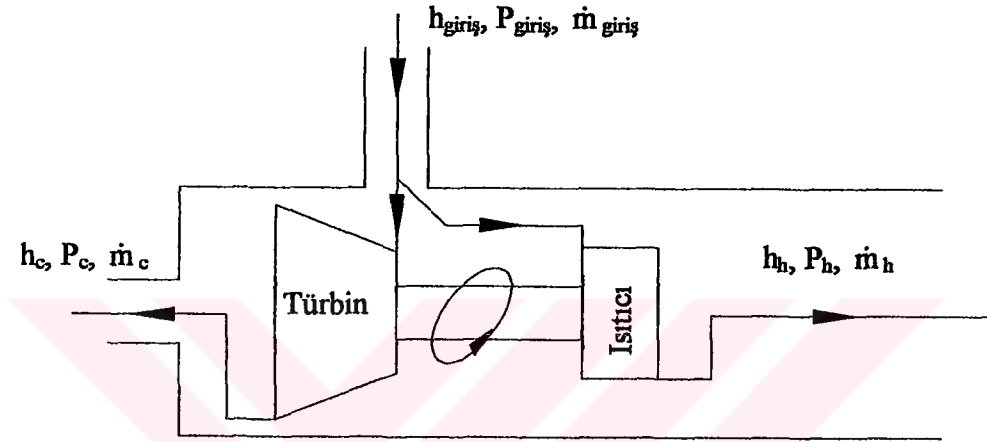
dır.

Vorteks tüplerin çalışma kriterlerine etki eden bir diğer parametre de Joule – Thomson etkisi olarak bilinen ve bir akışın kısılması ile sıcaklığının düşürülmesini açıklayan etkidir. Bu etkinin sistem üzerinde çok büyük bir etkisi yoktur. Cockerill tarafından yapılan çalışmalarda, 670 kPa basınç altında bu etkinin 2 K den daha az olduğu belirtilmektedir. Bu etkinin (4.14) nolu ifadeye etki ettirilmesi ile ve ideal bir gaz için c_p değerinin sabit olduğunun göz önüne alınarak, eşitliğin her iki tarafından kaldırılması ile (4.15) nolu eşitlik yazılabilir.

$$T_{giriş} = y_c(T_c - T_{jt}) + (1 - y_c)(T_h + T_{jt}) \quad (4.15)$$

Bu ifade de T_{jt} ifadesi, Joule – Thomson etkisini ifade etmektedir.

Adyabatik bir vorteks tüp çalışma prensibinin ve içerisindeki olayların anlaşılmasını basit kılmak amacıyla bir vorteks tüpü aşağıdaki gibi modellemek mümkündür.



Şekil 4.5. Adyabatik bir vorteks tüpün modellenmesi

$$\dot{m}_{giriş} = \dot{m}_o + \dot{m}_h \quad (4.16)$$

Şekil 4.5. de yapılan modellemede, tüpe giren basınçlı akışın bir kısmının bir türbine gönderilerek soğutulduğu ve bu türbinin milinden elde edilen enerji aracılığıyla da bir ısıtıcıya tahrik için gerekli enerjinin sağlanarak giriş akışının geri kalan kısmının da burada ısıtılarak tüpten dışarıya atıldığı gösterilmektedir. Bu yapılan modelleme ile tüpün çalışması daha kolaylıkla anlaşılabilir.

İdeal bir gaz için (4.17) nolu denklemi yazmak mümkündür;

$$h_1 - h_2 = c_p (T_1 - T_2) \quad (4.17)$$

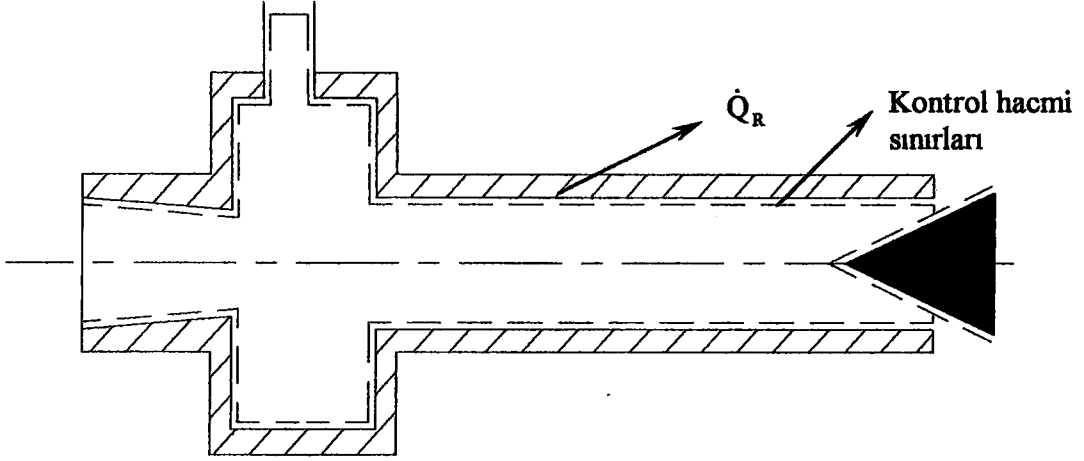
4.2.3. Vorteks Tüplerin 2. Yasa Analizi

Termodinamiğin ikinci kanununu Clausius şöyle ifade etmektedir;

“Daha soğuk bir cisimden daha sıcak bir cisme çevresi tarafından iş yapılmaksızın ısı transferi gerçekleştiren bir sistem oluşturmak mümkün değildir.”

Vorteks tüpler bir giriş akışından iki eş zamanlı ve farklı sıcaklıklarda (biri sıcak diğeri soğuk) akış oluşturdıkları ve bu olayı da tüpün merkez çizgisinde yakın olan akıştan (soğuk akış) cidara yakın akın akışa (sıcak akış) enerji transfer ederek gerçekleştirdikleri ifade edilmişti. İlk bakışta bu durumun termodinamiğin 2. kanununu ihlal ettiği gibi ön yargıya kapılmak olasıdır. Fakat, tüp içerisinde gerçekleşen olayda transfer edilen enerjinin ısı enerjisi değil, mekanik enerji olduğu gözden kaçırılmamalıdır. İç akış dış akış üzerinde iş yaparak mekanik enerjisini bu akışa aktarmakta ve 1. yasa analizinde açıklandığı üzere transfer ettiği enerji oranında ısı enerjisinde azalma olmaktadır. Dolayısıyla sıcaklığı da düşmektedir. Dış akışta buna uyumlu olarak ısınmaktadır. Tüp içerisinde bu olayların yanı sıra sıcaklığı yükselen akıştan sıcaklığı düşen akışa doğru bir ısı transferi söz konusudur. Fakat iç akışın mekanik enerji transferi yolu ile kaybettiği enerji, dış akıştan iç akışa olan ısı transferi ile gerçekleşen enerji kazancından daha büyük olduğu için iç akış soğumaktadır.

Şekil 4.6. da gösterilen termodinamik sisteme termodinamiğin ikinci yasını uygulandığında vorteks tüp tarafından üretilen entropi değeri;



Şekil 4.6. Vorteks tüpte ikinci yasa analizi için kullanılan kontrol hacmi

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_\varphi s_\varphi - \sum \dot{m}_g s_g + \frac{dS_{KH}}{dt} + \sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R} \quad (\text{kW/K}) \quad (4.18)$$

Burada;

\dot{S} : Entropi üretimi

$\sum \dot{m}_\varphi s_\varphi$: Çıkan akışların toplam entropisi

$\sum \dot{m}_g s_g$: Giren akışların toplam entropisi

$\frac{dS_{KH}}{dt}$: Kontrol hacmi içersinde birim zamanda entropi üretimi

$\sum \frac{\dot{Q}_R}{T_R}$: Sistemden geçen ısı nedeni ile oluşan entropi

olarak ifade edilmektedir.

Vorteks tüp yukarıda verilen entropi üretimi eşitliğine göre değerlendirildiğinde dikkat edilmesi gereken husus, vorteks tüplerde basit sistemler gibi bir giriş ve bir çıkışın olmadığıdır. Vorteks tüplerde bir giriş olmasına karşın iki çıkış olup bu akışların da farklı sıcaklıklarda olduğu unutulmamalıdır.

Vorteks tütün cidarından çevreye olan ısı transferi olmadığı ($\dot{Q}_R = 0$), yani sistemin adyabatik olduğu kabulü ile (4.18) deki eşitlikte sistemden ısı geçişiyle açığa çıkan entropiyi ifade eden terim ihmal edilebilir. Kontrol hacmi içerisindeki sürtünmelerin ihmal edilmesi ile tüp içerisinde entropi üretimini ifade eden terim de ihmal edilebilir. Bu durumda çıkışlar toplanıp yazılırsa (4.18) eşitliği aşağıdaki gibi geliştirilebilir.

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = [\dot{m}_g y_c s_c + \dot{m}_g (1 - y_c) s_h] - \dot{m}_g s_g > 0$$

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \dot{m}_g [y_c s_c + s_h - y_c s_h - s_g] > 0 \quad (4.19)$$

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \dot{m}_g [y_c (s_c - s_h) + (s_h - s_g)] > 0$$

Bu ifade biraz daha geliştirilirse;

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - \int_1^2 R \frac{dP}{P} \quad (4.20)$$

elde edilir.

(4.20) ifadesi Gibbs tarafından türetilen T – ds denkleminin genel halidir. İdeal bir gaz için yazılan bu denklemin integrali (4.21) nolu eşitlikte verilmektedir.

$$s_1 - s_2 = c_p \ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right) - R \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (4.21)$$

(4.21) nolu denklemlerdeki 1 ve 2 indisleri herhangi iki noktayı ifade etmektedir.

(4.17) nolu genel eşitlik (4.13) nolu eşitliğe uygulanırsa;

T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI
 İZMİR İLİ MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI
 İZMİR İLİMİZLİK VE KÜLTÜR BAKANLIĞI
 İZMİR İLİ MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI İZMİR İLİMİZLİK VE KÜLTÜR BAKANLIĞI

$$y_c c_p (T_c - T_h) + c_p (T_h - T_g) = 0$$

$$y_c c_p (T_c - T_h) = -c_p (T_h - T_g)$$

$$y_c \frac{(T_c - T_h)}{T_h} = \frac{(T_g - T_h)}{T_h}$$

$$y_c \left(\frac{T_c}{T_h} - 1 \right) = \frac{T_g}{T_h} - 1$$

$$\frac{T_g}{T_h} = 1 + y_c \left(\frac{T_c}{T_h} - 1 \right) \quad (4.22)$$

bulunur.

(4.21) denklemini (4.19) nolu eşitliğe uygulayarak aşağıdaki eşitlikleri yazmak mümkündür. Burada incelenen vorteks tüp sistemi için $P_c = P_h$ almak uygun olacaktır (Balmer R.T. 1988). Dolayısıyla bu eşitliğe göre aşağıdaki işlemleri yapmak daha basit ve sade olacaktır.

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \dot{m}_g y_c \left[c_p \ln \left(\frac{T_c}{T_h} \right) - R \ln \left(\frac{P_c}{P_h} \right) \right] + \dot{m}_g \left[c_p \ln \left(\frac{T_h}{T_g} \right) - R \ln \left(\frac{P_h}{P_g} \right) \right] > 0 \quad (4.23)$$

Bu eşitlikte $P_h = P_c$ olarak alındığından bu ifadenin \ln ' i sıfır olacaktır ve (4.22) nolu eşitlikte elde edilen denklem burada yerine yazıldığında denklem aşağıdaki halleri alacaktır.

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \dot{m}_g y_c \left[c_p \ln \left(\frac{T_c}{T_h} \right) \right] + \dot{m}_g \left[c_p \ln \left(1 + y_c \left(\frac{T_c}{T_h} - 1 \right) \right)^{-1} \right] - \dot{m}_g R \ln \left(\frac{P_h}{P_g} \right) > 0$$

$$(\dot{S})_{\text{üretim}} = \dot{m}_g c_p \ln \left[\left(\frac{T_c}{T_h} \right)^{y_c} \left(1 + y_c \left(\frac{T_c}{T_h} - 1 \right) \right)^{-1} \right] - \dot{m}_g R \ln \left(\frac{P_h}{P_g} \right) > 0 \quad (4.24)$$

Bu ifade aracılığı ile ölçülen çıkış akışlarının sıcaklık değerleri ve çalışma akışkanına ait özgül ısı ve genel gaz sabiti değerlerine göre entropi üretimi değerini hesaplayabilmek mümkündür.

4.2.4. Soğuk Akış Kütleli Akış Oranının Tespiti

Deneysel çalışmalarda vorteks tüpün ısıtma ve soğutma değerlerinin tespit edilebilmesi aşağıdaki tanımlamaların yapılması gerekmektedir.

$$\Delta T_c = T_g - T_c \quad (4.25)$$

$$\Delta T_h = T_h - T_g \quad (4.26)$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (4.27)$$

Bu tanımlamalar aracılığıyla vorteks tüpün çalışma şartlarına etki eden başlıca faktörlerden biri olan y_c değerinin hesaplanması kolaylaşmaktadır. (4.15) nolu ifadede yer alan Joule – Thomson etkisini gösteren terimlerin ihmal ile bu eşitlik aşağıdaki gibi türetilir;

$$T_g = y_c T_c + (1 - y_c) T_h$$

$$T_g = y_c (T_c - T_h) + T_h$$

$$T_g - T_h = y_c (T_c - T_h)$$

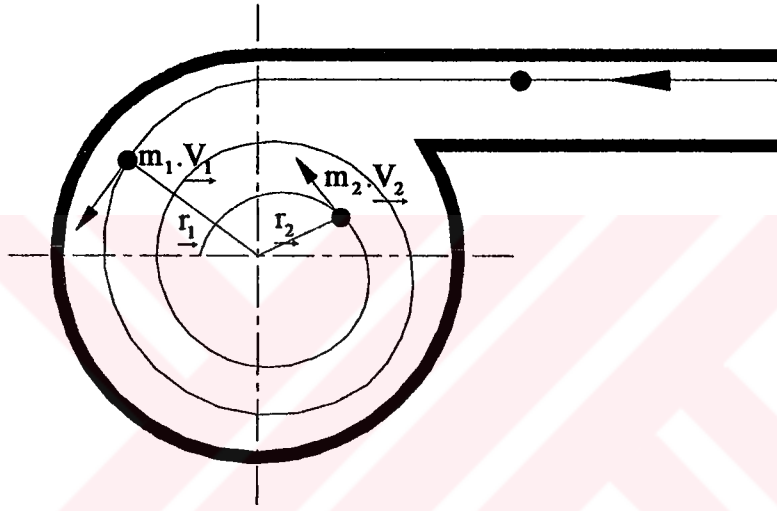
$$-\Delta T_h = y_c (-\Delta T)$$

$$y_c = \frac{\Delta T_h}{\Delta T} \cdot 100 \quad (4.28)$$

Deneylerde y_c değeri bu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değer vorteks tüpün maksimum soğutma kapasitesi ve maksimum sıcaklık düşümü açısından önemlidir.

4.2.5. Vorteks Tüpteki Açısal Hız Değişimleri

Vorteks tüp içinde gerçekleşen termal seperasyon olayının asıl sebebinin iç ve dış akışlar arasında gerçekleşen mekanik enerji transferi olduğu ve bu olayın da esas sebebinin iç akışın açısal hızının dış akışın açısal hızından yüksek olması olduğu daha önceki bölümlerde belirtilmiştir.



Şekil 4.7. Vorteks tüp içindeki hız değişimlerinin bir partikül üzerinde incelenmesi.

Şekil 4.7. de basınçlı bir akış içerisindeki bir partikülün izlediği yörüngenin şematik bir gösterimi verilmektedir. Vorteks tüp içerisinde akışın gelişme yönünün yalnızca bu şekilde gösterildiği gibi olmadığı unutulmaması gerekir. Vorteks hücreğine giren basınçlı akış moleküllerinin bir kısmı tüp cidarına doğru merkezkaç kuvvetlerin etkisi altında açılmaya zorlanırken, bir kısım partikül de merkez çizgisine doğru kapanmaktadır. Bu içe kapanan akış partiküllerinin açısal hızlarının artışı sebebi ile yine merkezkaç kuvvetler etkisi altında dışa doğru açılmaya zorlanmaktadır. Bu şekilde gelişen hız değişimleri sonucu dışa doğru merkezkaç kuvvetler etkisi altında açılmaya çalışan akış, boru cidarına yakın bölgedeki ve daha düşük açısal hızdaki akışa mekanik enerjisini transfer ederek ısınıyı yitirmektedir.

Merkez çizgisine yakın olan akış (soğuk akış) eğer tüp karşıt akışlı bir tüp ise bir durgunluk noktasından itibaren ters yönde akar ve soğuk uçtan dışarıya çıkar. Bu beklenen bir sonuçtur. Tüp cidarına yakın seyreden akış tarafından iç akışa karşı uygulanan aksi basınç etkisi ve girişin solunda kalan soğuk uç açıklığının atmosfere açık olması sebebi ile tüp içerisinde merkez akışının ters yöne doğru yönleneceği doğal bir sonuçtur.

İç akışın hızının dış akışa oranla daha yüksek olduğunu açısal momentumun tanımından türetmek mümkündür. Açısal momentum kısaca, bir cisme etkiyen dış kuvvetlerin aynı noktaya göre toplam momentine eşit olduğunu ifade etmekte olup (Şuhubi 1994) \underline{H} ile ifade edilir.

$$\underline{r} \times m \underline{V} = \underline{H}$$

$$\frac{d\underline{H}}{dt} = \frac{d\underline{r}}{dt} \times m \underline{V} + \underline{r} \times m \frac{d\underline{V}}{dt}$$

$$\frac{d\underline{H}}{dt} = \underline{V} \times m \underline{V} + \underline{r} \times m \underline{a} \quad (4.29)$$

(4.29) nolu eşitlikte \underline{V} ve $m \underline{V}$ vektörleri aynı doğru üzerinde bulduklarından elde edilen ifadenin sağ tarafının ilk terimi sıfırdır. Eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terimin de moment ifadesine eşit olduğu kolaylıkla görülebilmektedir. Bu halde (4.29) eşitliği aşağıdaki gibi geliştirilebilir.

$$\frac{d\underline{H}}{dt} = \underline{M}$$

$$\int_1^2 d\underline{H} = \int_1^2 \underline{M} dt$$

$$\underline{H}_2 - \underline{H}_1 = \int_1^2 \underline{M} dt$$

$$m\underline{V}_1 \times \underline{r}_1 + \int_1^2 \underline{M} dt = m\underline{V}_2 \times \underline{r}_2 \quad (4.30)$$

Moment teriminin de ihmal edilmesi ile (4.30) eşitliği aşağıdaki hali alır.

$$m\underline{V}_1 \times \underline{r}_1 = m\underline{V}_2 \times \underline{r}_2 \quad (4.31)$$

Akışkan partikülünün kütlesinde bir değişme olmadığına göre azalan yarıçap vektörüne karşılık hız vektörünün artması gerektiği (4.31) nolu eşitlikten görülebilmektedir. Dolayısıyla vorteks tüpte soğuk akışı oluşturan iç akışın açısız hızı sıcak akışı oluşturan dış akışın açısız hızından daha büyüktür.



5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Deneyler esnasında vorteks tüpe esas olarak üç değişik basınç değeri uygulanmıştır. Bu basınç değerleri 2, 3 ve 4 bar olarak belirlenmiştir. Bu basınç değerleri çalışma esnasında vorteks tüpe uygulanarak elde edilecek sonuçların doğruluğuna katkıda bulunulmaya çalışılmıştır.

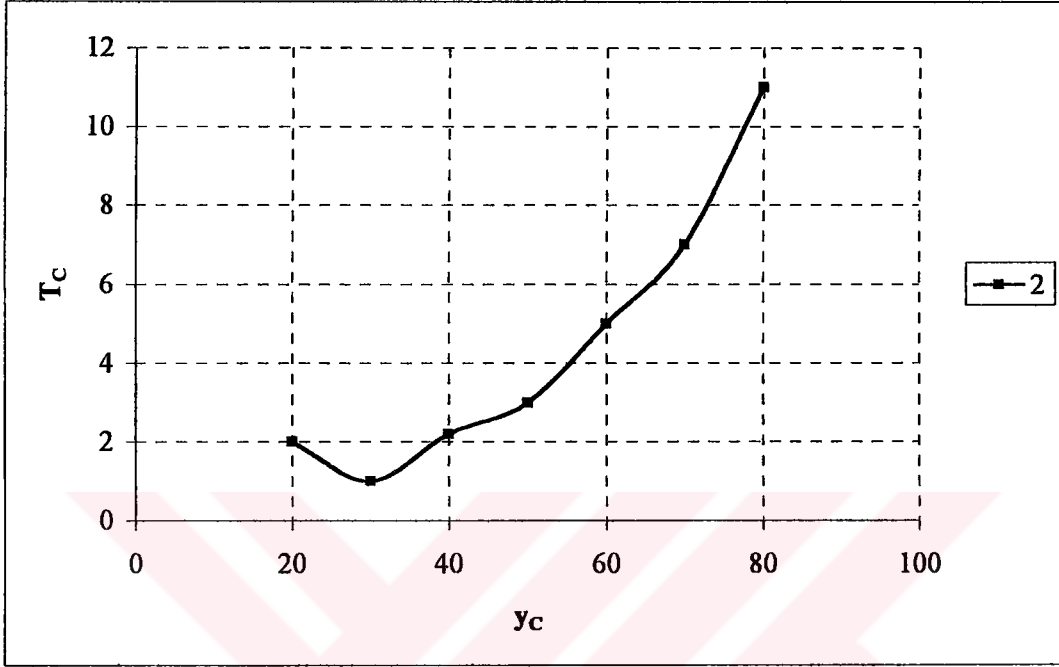
Çalışma esnasında her bir basınç değeri için yedişer deney yapılarak toplam olarak 21 deney yapılmıştır. Bu deneyler esnasında gözlenecek sonuç değerleri olarak, vorteks tüpün ürettiği soğuk akış ve sıcak akış sıcaklıkları alınmıştır. Deneylerden elde edilen sıcaklık değerlerinin doğruluğu için deneyler iki kez tekrarlanmış ve bulunan iki değer aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar, önce her bir değer için tek grafikler olarak verilmiş ve tüm sonuçlar şekil 5.4 ve şekil 5.8 de toparlanarak özetlenmiştir. Şekil 5.4 vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin değişimine göre, tüpten elde edilen soğuk akış sıcaklığının değişimini, şekil 5.8 ise vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin değişimine göre tüpten elde edilen sıcak akışın sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil 5.4 den görüldüğü üzere, T_c değerinin yaklaşık $y_c = 0.3$ değerinde bir minimum yaptığı görülmektedir. Bu nokta vorteks tüpün en düşük soğuk akış sıcaklık modu değeridir. Bölüm 2 de belirtildiği gibi vorteks tüp soğutma amacı için kullanıldığında iki farklı karakterde çalıştırılabilir. Bunlar;

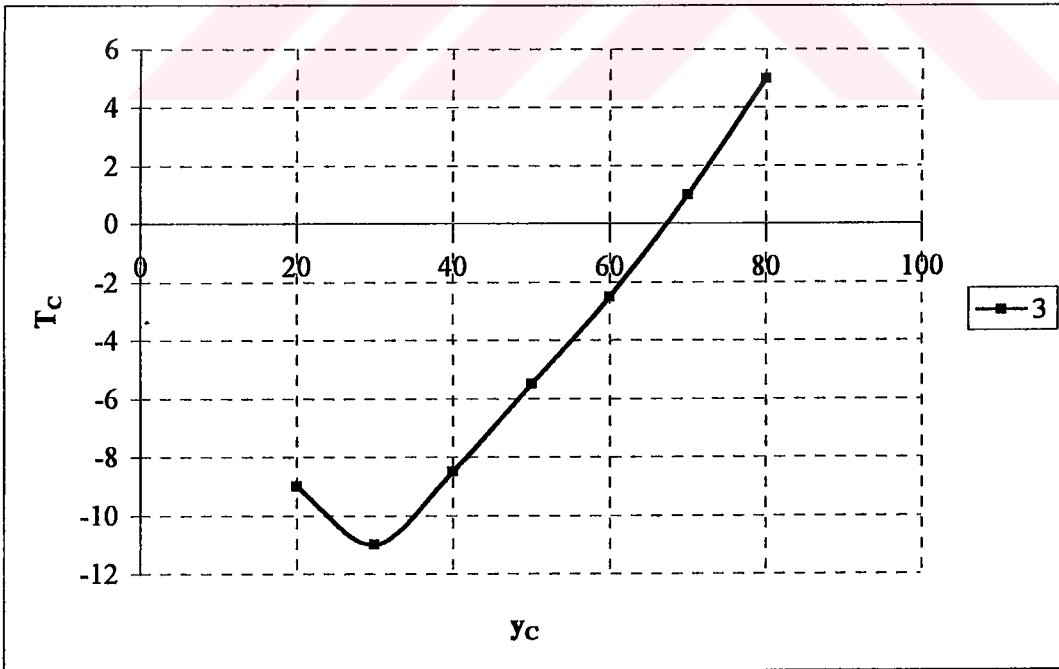
- a-) En düşük soğuk akış sıcaklığı modu
- b-) Maksimum soğutma kapasitesi modu

$y_c = 0.3$ değerinde elde edilen sıcaklık ilk modu sağlarken ikinci mod, yani maksimum soğutma kapasitesi modu yaklaşık olarak y_c nin 0.7 değerinde elde edilen sıcaklık ve soğuk akış debisi değerinde sağlanmaktadır. Bu iki farklı çalışma modunu üreten esas faktör $y_c = 0.7$ deki soğuk akış debisinin $y_c = 0.3$ değerindeki debi değerinden büyük olmasıdır. Bu durum giriş bölümünde verilen (1.2) eşitliğinde, her bir basınç değerinde elde edilen sıcaklıkların şekil 5.1 den okunarak ifadede ilgili

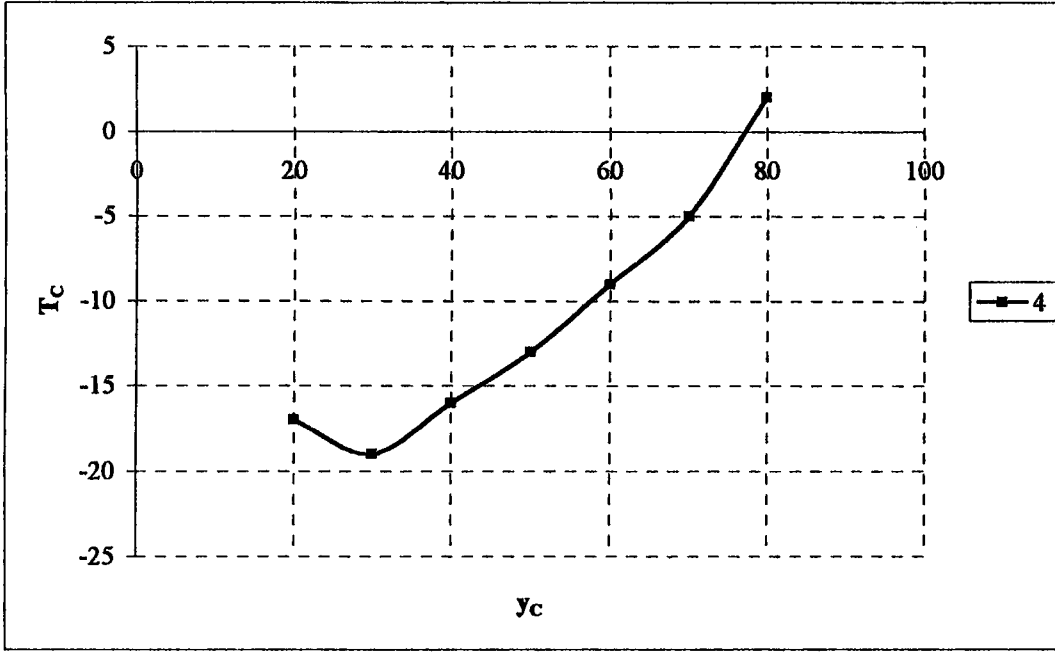
yerlere konulduğu ile tüpe giren toplam akışın debisinin ve sabit basınçtaki özgül ısısının sabit kaldığının göz önüne alındığı düşünülürse, oldukça kolaylıkla elde ispatlanabilir.



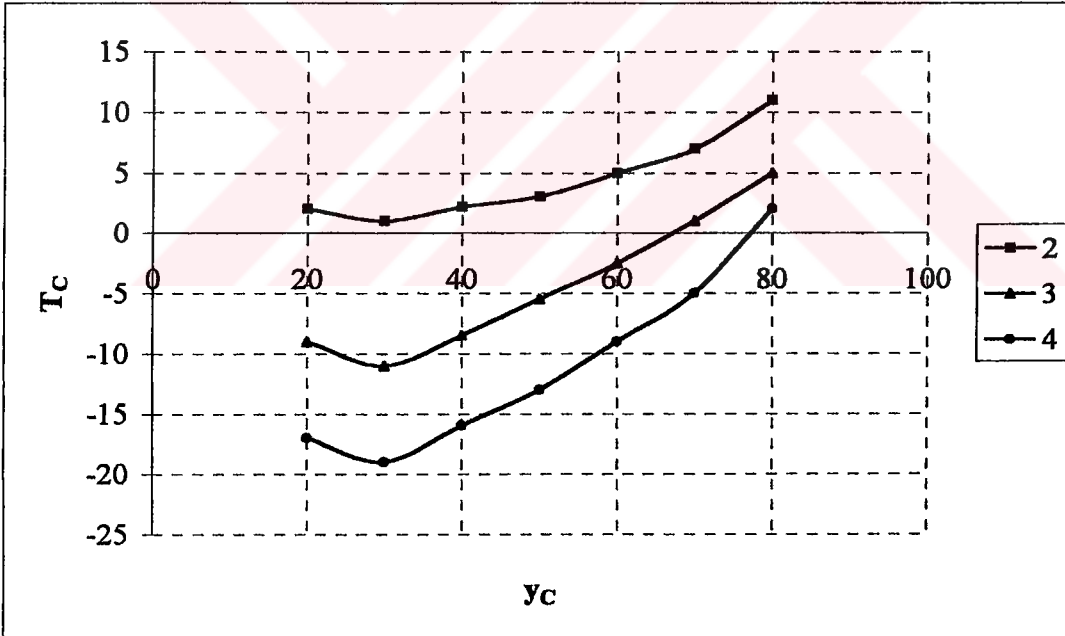
Şekil 5.1. 2 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_c sıcaklığının değişimi



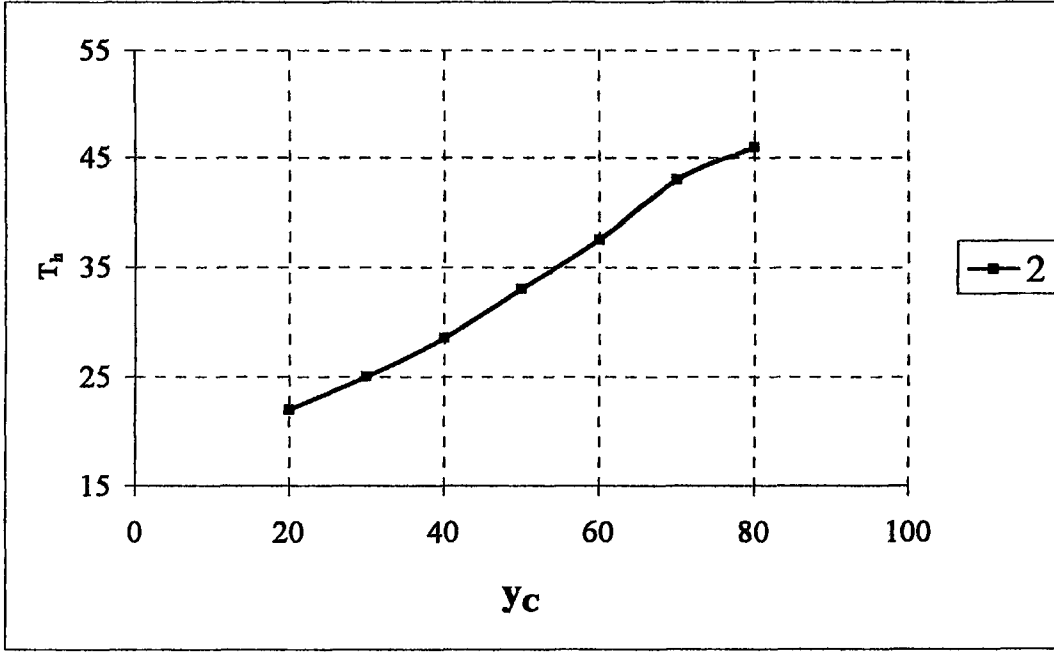
Şekil 5.2. 3 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_c sıcaklığının değişimi



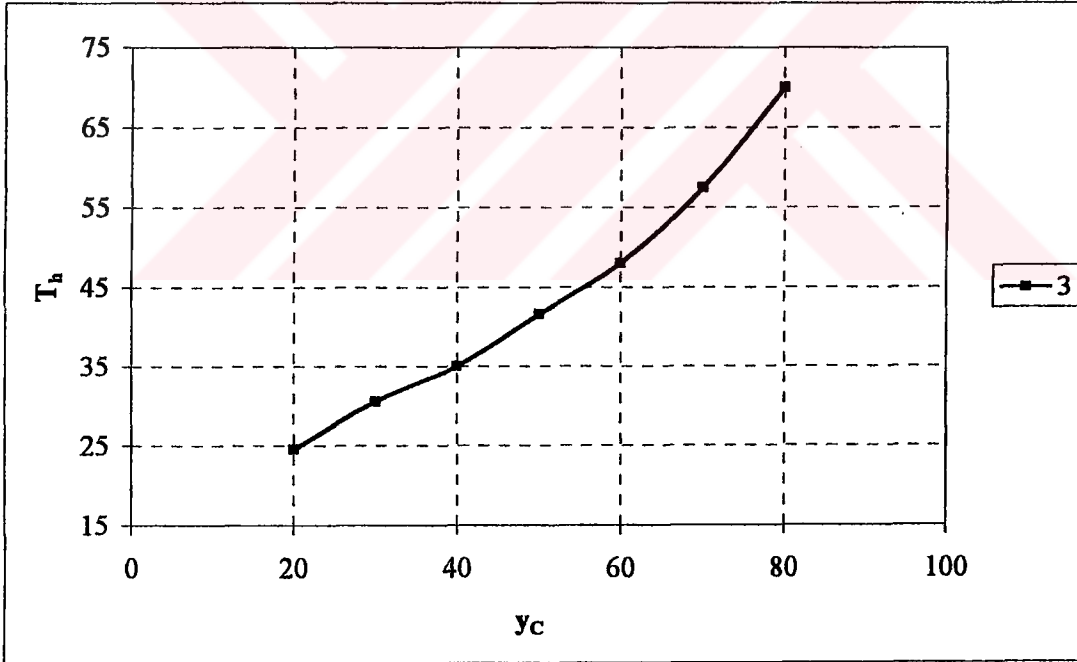
Şekil 5.3. 4 bar basınç değeri ve y_c değeri için T_c sıcaklığının değişimi



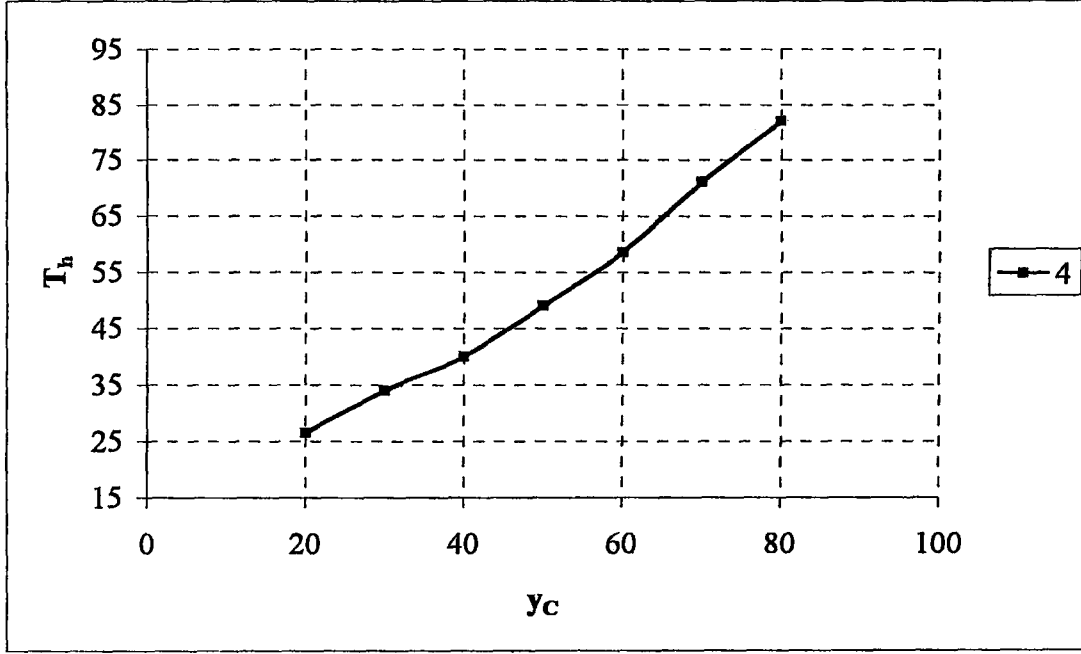
Şekil 5.4. Vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin değişimine göre elde edilen soğuk akış sıcaklığının değişimi



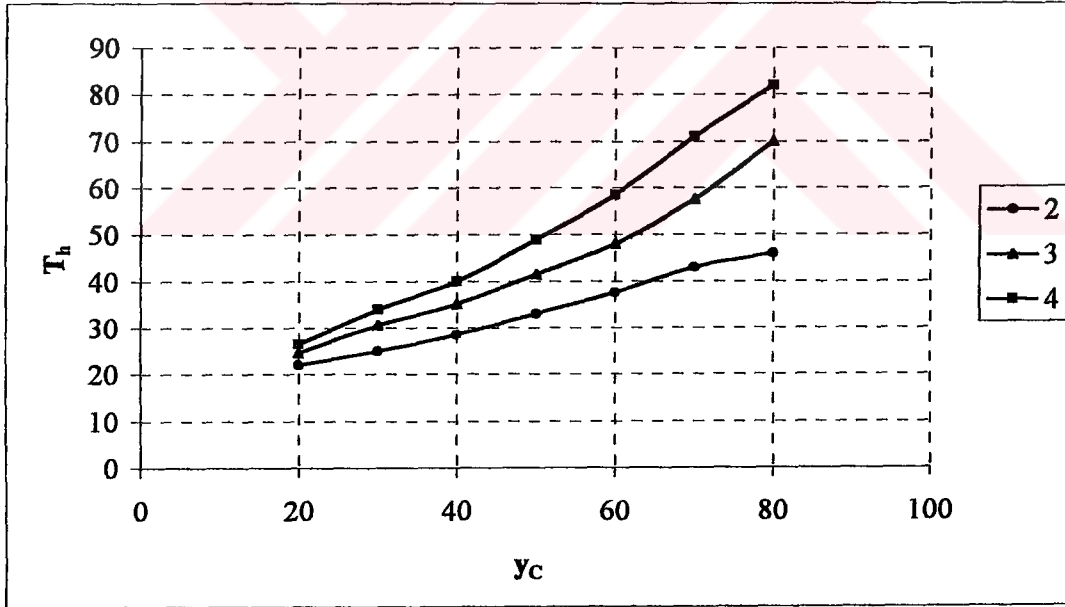
Şekil 5.5. 2 bar basınç değeri ve y_c değerine göre T_h sıcaklığının değişimi



Şekil 5.6. 3 bar basınç değeri ve y_c değerine göre T_h sıcaklığının değişimi



Şekil 5.7. 4 bar basınç değeri ve y_c değerine göre T_h sıcaklığının değişimi



Şekil 5.8. Vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin değişimine göre elde edilen sıcaklık değerinin değişimi

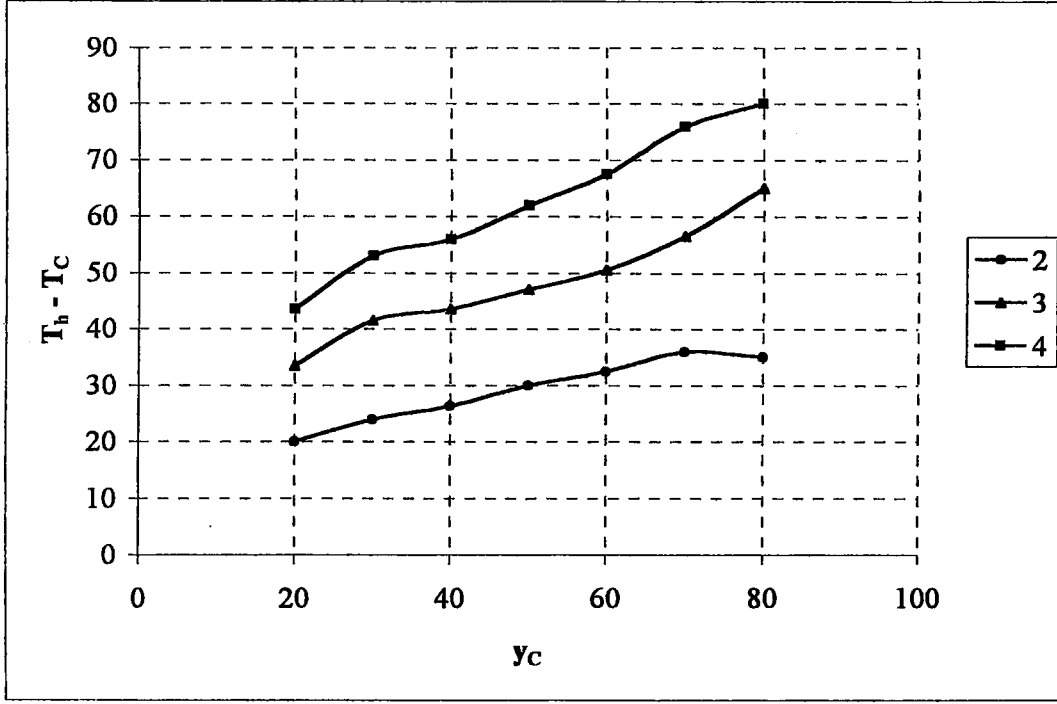
Vorteks tüpün ısıtma amacına yönelik kullanılması durumunda ise y_c değerinin artması, ısınmış akışkanın sıcaklığını arttırmaktadır. Bu durum Şekil 5.8 den de görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.8 de grldği üzere, vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin artması, ısınmış akışkanın sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır.

Deneylerde 4 bar dan yüksek basınç kullanılmamıştır. Fakat K. Stephan (1984) vd. tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarından grldği üzere, 4 bar değerinden yüksek basınçlar tüpe uygulandığında, vorteks tüpten elde edilen minimum soğuk akış sıcaklık değeri $-48\text{ }^\circ\text{C}$ ve maksimum sıcak akış sıcaklığı $+190\text{ }^\circ\text{C}$ olabilmektedir. Tarafımızdan yapılan çalışmada ait deneylerde, deney dzeneneğini besleyen basınçlı hava kompresörlerinin kapasitesinin sınırlılığı ve kullanılan vorteks tüpün ebatları açısından 4 bar basınç değerinin üzerine çıkılmaması uygun görülmüştür.

Ayrıca deneyler esnasında y_c değerinin 0.2 ila 0.8 değerleri arasındaki değişimleri dikkate alınmıştır. Bu sınır değerler arasında alınan sonuçlar, vorteks tüpün sıcaklık değişimlerinin incelenmesi için uygun görülmüştür.

Çalışma esnasında y_c değerinin ve tüpe uygulanan basının artması durumunda, vorteks tüp insan kulağı için rahatsız edici ses frekansı değerlerine ulaşmıştır. Bu durum vorteks tüpler için bir eksi puan olarak nitelendirilebilir. Fakat günümüzde vorteks tüp üretimi ile uğraşan firmalar, bu rahatsız edici ses seviyesini alt değerlere düşürebilmek için basit yapıya haiz susturucular üretmektedirler. Bu sayede kısmen vorteks tüpün ortaya çıkardığı gürültü kirliliği bertaraf edilmektedir.

Şekil 5.9 da vorteks tüpten elde edilen sıcak akış sıcaklığı ve soğuk akış sıcaklığı arasındaki farkın, tüpe uygulanan basınç değerine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 5.9. ΔT değerinin vorteks tüpe uygulanan basınç değerine göre değişimi

Şekil 5.9 da gösterilen grafik ısınmış akış ile soğumuş akışın sıcaklıkları farkının (ΔT), tüpe uygulanan basınç değerine oranla arttığını göstermektedir. Bu grafikte elde edilen maksimum ΔT değeri 80 °C olarak bulunmuştur. Bir önceki paragrafta belirtildiği gibi vorteks tüpe uygulanan basınç değerinin artması ile bu değer yaklaşık 158 °C olabilmektedir. Bu durum Stephan (1984) vd. tarafından yapılan çalışmalarda açıkça gösterilmiştir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bir basınçlı giriş akışını, biri sıcak diğeri soğuk iki eş zamanlı akışa ayıran vorteks tüpler, bazı soğutma ve ısıtma uygulamalarında alternatif çözümler olabilmektedir. Vorteks tüpler, hiçbir hareketli parçaya sahip olmamaları nedeni ile bakım gereksinimi yok olarak nitelendirilen cihazlardır. Ayrıca ilk yatırım maliyelerinin düşük olması, çalışmaları için gereken beslemenin yalnızca basınçlı bir akış olması, ebatlarının büyük olmaması, gecikmesiz olarak rejime girebilmeleri, ayarlanan şartlardaki çalışma hassasiyetlerinin istenen seviyelerde olması (± 1 °C çalışma hassasiyeti) ve ekolojik açıdan zararlı sayılan soğutucu akışkanlara bağımlı bir çalışma karakteristiği olmamaları gibi diğer özellikleri ile, vorteks tüpleri endüstriyel amaçlarla bir çok alanda alternatif çözüm olarak değerlendirilebilir kılmaktadır.

Vorteks tüpler soğutma ve ısıtma uygulamaları için tasarlandıklarında, çalışma akışkanı olarak genellikle hava kullanılmaktadır. Basınçlı havanın atmosferde bol ve serbest halde olması, bir çok endüstriyel kuruluştta basınçlı hava tesisatının olması gibi özelliklerle hava tercih edilmektedir. Bu durumdan farklı olarak, vorteks tüp bir ayırıcı olarak kullanılmak istendiğinde, doğalgaz gibi gazlar vorteks tüpün çalışması için kullanılabilir. Ayrıca vorteks tüplere karbondioksit, oksijen ve helyum gibi değişik gazlar, deneysel amaçlarla uygulanmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar oldukça az ve yenidir.

Bölüm 4 de elde edilen verilerin de işaret ettiği gibi ve giriş bölümündeki genel bilgiler kısmında tarif edildiği gibi, bir vorteks tüp soğutma amacı için kullanıldığında iki farklı çalışma modu söz konusudur. Bunlar en düşük soğuk akış sıcaklığı modu ile maksimum soğutma kapasitesi modudur. Bölüm 4 de, deneysel çalışmadan elde edilen verilerden de görüldüğü gibi, en düşük soğuk akış sıcaklık modu, $y_c = 0.3$ civarında elde edilebilmektedir. Maksimum soğutma modu ise vorteks tüplerle yapılan birçok çalışmada belirtildiği gibi $y_c = 0.7$ civarında elde edilebilmektedir. Çünkü bu değerde, soğuk akışın sıcaklığı ve soğuk akışın kütleli debisi değerlerinin bileşimi en fazla soğutma kapasitesini vermektedir. Bu durum (1.2) eşitliğinden ve şekil 4.1 deki verilerden elde edilen neticeler ile kolaylıkla anlaşılmaktadır.

Vorteks tüp içerisinde gerekleŒen enerji ayırımı olayının temel sebebi, giriŒ akıŒının bir silindirik tüpe teĒetsel olarak gönderilmesi ve bu giriŒ akıŒından, açısal momentumun korunumu gereĒince oluŒan farklı açısal hızlarda dönen akıŒların birbirleri ile olan etkileŒimleridir. İ akıŒın dıŒ akıŒa yaptıĒı mekanik enerji transferi, basıncılı bir giriŒ akıŒının iki eŒ zamanlı ve farklı sıcaklıklı akıŒa dnŒmesini saĒlar. Dolayısıyla vorteks tüp içerisindeki akıŒların sahip oldukları açısal hızların Œiddeti, vorteks tüpün performansına etki eden en önemli faktörlerdendir. Geometrisi sabit bir vorteks tüp içerisinde ne kadar yüksek açısal hızlar meydana getirilebilirse, o oranda vorteks tüpün performansında artıŒ gözlenir. Tüpe giren akıŒın açısal hızını arttırmamanın en kolay yolu, tüpe gönderilen giriŒ akıŒı basıncı deĒerinin arttırılmasıdır. Dolayısıyla vorteks tüpe gönderilen giriŒ akıŒının basıncının deĒiŒmesi, vorteks tüpün performansı üzerine direkt etki eden bir faktördür. Bu durum Œekil 4.1 de özetlenen deney sonuçlarından da açıkça görülmektedir.

Vorteks tüpün rettiĒi akıŒların sıcaklıklarını direkt olarak etkileyen bir diĒer faktör, sıcak akıŒ ıkıŒ ucuna yerleŒtirilmiŒ vananın, sıcak akıŒ ıkıŒ kesitini deĒiŒtirmesidir. Dolayısıyla y_c ve y_h deĒerlerinin deĒiŒmektedir. Bu deĒerlerin deĒiŒmesi Œekil 4.1 den ve Œekil 4.2 de zetlendiĒi gibi, vorteks tüp performansını etkileyen ana faktörlerden biridir.

Vorteks tüplerinin soĒuk akıŒ ıkıŒ kesitinin çapının deĒiŒmesi de, sıcak akıŒ ıkıŒ kesitindeki vananın yaptıĒı görevin bir benzeri olarak, vorteks tüpün performansına direkt etki eden bir faktördür. Sabit bir alıŒma rejiminde bu çapın deĒiŒimi, y_c ve y_h deĒerlerinin deĒiŒimine neden olmaktadır.

GiriŒ akıŒının vorteks tüpe gnderildiĒi nozulun i çapının deĒiŒimi, giriŒ akıŒının hızının deĒiŒmesine neden olduĒundan, vorteks tüpün performansına etki eden bir baŒka faktördür. Ayrıca bu bölgede gerekleŒen izentalpik kısma olayı (Joule – Thomson etkisi) nedeni ile giriŒ akıŒının sıcaklıĒında bir dŒŒ olabilmektedir. Bu etki daha önce belirtildiĒi gibi tüpün alıŒması açısından çok büyük bir etkiye sahip olmamakla birlikte göz ardı edilen bir husustur.

Vorteks tüplerde çalışma akışkanı olarak sadece sıkıştırılabilir akışkanların kullanılması söz konusu değildir. Balmer R.T. (1988) tarafından yapılan çalışma neticesinde, sıkıştırılmaz akışkanların vorteks tüp için çalışma akışkanı olarak kullanılması mümkün olduğu görülmüştür. Fakat, çok yüksek giriş akışı basınç değerleri gerekmekte dikkate değer bir ısıtma veya soğutma kapasitesinin elde edilmesinin güç olduğu belirtilmiştir.

Vorteks tüpler, COP katsayılarının düşük olması sebebi ile konvansiyonel ısı pompalarına performans açısından rakip olamazlar. Vorteks tüpler, özellikle lokal soğutma ve ısıtma ihtiyaçları için uygun çözüm olabilmektedirler. Konvansiyonel sistemlerin bazı lokal uygulamalar için minyatürleştirilmelerinin olanaksız olduğu durumlarda vorteks tüplerin kullanılması alternatif bir çözüm olmaktadır. Lokal uygulamalar için vorteks tüplere Termo-Elektrik sistemler rakip olarak değerlendirilebilir. Fakat Termo-Elektrik sistemlerin genellikle bir ısı kaynağı ile kondüksiyon yoluyla etkileşimde olması, bu sistemlerin uygulamasına kısıtlayıcı bir unsur olmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin bir ısı kaynağıyla konveksiyon yolu ile etkileşime girmesi durumunda, su veya hava gibi bir soğutucu akışkanın sistem üzerinden sirküle ettirilmesinin gerekmesi, bu sistemlerin vorteks tüplere rakip olarak değerlendirilmesini güçleştirmektedir.

Vorteks tüpler özellikle gaz endüstrisinde önemli bir uygulama alanına sahiptir. Bu cihazların gazların kurutulması işlemlerinde basit bir alternatif çözüm olarak değerlendirilmesi ve bakım gereksinimi olmayan ekonomik bir çalışma karakteristiği ortaya koymaları, gaz endüstrisinde bu cihazların kullanımını arttıran bir durum ortaya koymaktadır.

Vorteks tüpler tarafından üretilen ses seviyesinin insan sağlığı için rahatsız seviyelere ulaşması, bu cihazların dezavantajlarından biri olarak ortaya çıkmaktadır. Tüp içerisindeki akışın hızının, tüpe uygulanan giriş akışı basıncı değerine oranla ses hızı seviyelerine ulaşması, üretilen ses seviyesini arttırır. Fakat bu ses şiddetinin sisteme ilave olarak eklenen susturucularla bertaraf edilmesi mümkündür. Bu

susturucuların sistem performansı üzerine olumsuz etkisi az olduğu, bu cihazları üreten firmaların kataloglarından anlaşılmaktadır.

Vorteks tüpler hakkında bugüne kadar yapılan deneysel ve teorik çalışmaların, konuyu tam olarak açıklayamadığı, konu üzerinde çalışan çalışmacılar tarafından ortak bir fikir olarak kabul edilmektedir. Tüp içerisindeki enerji seperasyonunun nedenleri ve tüpe uygulanan çalışma şartlarının, tüp performansına ne oranda etki ettiği ve farklı çalışma akışkanlarının kullanılması durumunda gerçekleşen olaylar hakkında detaylı çalışmalar mevcuttur.

Vorteks tüpler hakkında yapılan her yeni çalışma, bu cihazların çalışma özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Vorteks tüpler günümüzde halen güncelliğini koruyan bir konu olma özelliğini taşımaktadır.



7. KAYNAKLAR

- Ahlborn B.K., Keller J.U., Rebhan E., 1988. The Heat Pump in A Vortex Tube, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 23, 159 – 165.
- Alekseev V.P., Azaroff A.I., 1978. Development, Investigation and Application of Non – Adiabatic Vortex Tubes. *Int. Congr. of Refrig.*, 2, 997 – 1004.
- Azarov A. 1998. Qualimetric Method of Comprasion of Refrigerating Systems According to the Totality of Their Technological and Operational Characteristics. *Int Conf. Resources Saving in Food Industry*. 143 – 144.
- Borisenko A. I., Safonov V. A., Yakovlev A. I., 1968. The Effect of Geometric Parameters on the Characteristics of A Conical Vortex Cooling Unit. *Inzherno – Fizicheskii Zhurnal*, 15 (6), 988 – 993.
- Bruno T.J., 1987. Laboratory Applications of Vortex Tube, *Journal of Chemical Education*, 64 (11), 987 – 988.
- Bruno T.J., 1992. Applications of the Vortex Tube in Chemical Analysis, *Process Control and Quality*, 3, 195 – 207.
- Bruno T.J., 1994. Chromatographic Cryofocusing Cryotrapping with the Vortex Tube, *Journal of Chromatographic Science*, 32, 112 – 115.
- Balmer R.T., 1988. Pressure Driven Ranque – Hilsch Temperature Seperation in Liquids, *Journal of Fluids Engineering – Trans. of Asme*, 110 (2), 161- 164.
- Baz A. Gilheany J., 1988. Feasibility of Vortex Tube – Asisted Environmental Control of A Manned Underwater Research Habitat. *Ocean Eng.* 15 (1), 33 – 54.
- Beer F.P., Johnston E.R., 1956. *Dynamics for Engineers*. McGraw – Hill Inc., 398s.

- Cockerill T., 1995. The Ranque – Hilsch Vortex Tube. Cambridge University Engineering Department, PhD. Thesis, 243 s, Sunderland.
- Çengel Y.A., Boles M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Literatür Yayıncılık, Papirüs Basım, 867s, İstanbul.
- Fröhlingsdorf W., Unger H., 1999. Numerical Investigations of Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque – Hilsch Vortex Tube. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 42 (3), 415 – 422.
- Fröhlingsdorf W., 1997. Untersuchungen Zur Kompressiblen Strömung und Energietrennung im Wirbelrohr nach Ranque und Hilsch. Fakultät für Maschinenbau der Ruhr – Universität Bochum, Erlangung des Grades Doktor – Ingenieur, 144 s, Bochum.
- Fulton C.D., 1950, Ranque's Tube. Journal of ASRE, 58, 473 – 478.
- Gulyaev A. I., 1966. Investigation of Conical Vortex Tubes. Inzherno – Fizicheskii Zhurnal, 10 (3), 326 – 331.
- Harnett J.P., Eckert E.R., 1957. Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in A High Velocity Vortex Type Flow. Trans. of ASME, 79, 751 – 755.
- Hajdik B., Lorey M., Steinle J., Thomas K., 1997. Vortex Tube can Increase Liquid Hydrocarbon Recovery at Plant Inlet. Oil and Gas Journal, 8, 88 – 94.
- Keller J.U., Göbel M.U., 1997. Eine Anlage zur Entspannung Komprimierter Flüssigkeiten unter Wärmeabgabe. Ki Luft – und Kältetechnik, 2, 57 – 60.
- Martynovskii V.S., Alekseev V.P., 1957. Investigation of Vortex Thermal Separation Effect for Gases and Vapors. Soviet Physics, 26 (2), 2233 – 2243.

- Piralishvili S.A., Ployaev V.M., 1996. Flow and Thermodynamic Characteristics of Energy Separation in A Double Circuit Vortex Tube. *Exp. Thermal and Fluid Science*, 12, 399 – 410.
- Raiskii Y.D., Tunkel L.E., 1974. Influence of Vortex Tube Configuration and Length on the Process of Energetic Gas Separation. *Inzherno – Fizicheskii Zhurnal*, 27 (6), 1128 – 1133.
- Ranque G.H., 1933. Experiences sur la Detente Giratoire Avec Productions Simultanees d'un Echappement d'air Chaud et d'air Froid. *Journal de Physique et le Radium*, 1125 – 1155, 1993.
- Saidi M.H., Yazdi M.R., 1999. Exergy Model of A Vortex Tube System with Experimental Results. *Energy*, 24, 625 – 632.
- Stephan K., Lin S., Durst M., Huang F., Seher D., 1984. A Similarity Relation for Energy Separation in A Vortex Tube. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 27 (6), 911 – 920.
- Stephan K., Lin S., Durst M., Huang F., Seher D., 1983. An Investigation of Energy Separation in A Vortex Tube, 26 (3), 341 – 348.
- Şuhubi E.S., 1994. Sürekli Ortamlar Mekaniği. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, No: 1530, 242s, İstanbul.
- Tunkel L., Krasovitski B., Foster R.L., 1999. Vortex Tubes for Snow Making. Patent Institute of United States, Patent no: 5,937,654.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Arif Emre ÖZGÜR

Doğum Yeri : Eskişehir

Doğum Yılı : 1977

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu :

Lise 1991 – 1994 Eskişehir Motor Meslek Lisesi

Lisans 1994 – 1998 Süleyman Demirel Üni. Teknik Eğitim Fak. Tesisat Öğr. Böl.

Yabancı Dil : İngilizce

İş Deneyimi :

1998 – Süleyman Demirel Üni. Teknik Eğitim Fak. Tesisat Öğr. Böl.
Araştırma Görevlisi

T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN İZLEME MERKEZİ