

TERMODİNAMİK KISILMA OLAYINDA FARKLI ÇIKIŞ HIZLARINDA GAZLARIN SICAKLIK VE BASINÇ DEĞİŞİMİ

Okan KON Ömer Samih MERTBAŞ

Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü –10145 Balıkesir

ÖZET

Kısılma olayı, gaz akışkanın basıncı daha yüksek bir ortamdaki, akış kesit alanını küçülten bir aralıktan, daha alçak basınçlı bir ortama akmasıdır. Kısılma olayı mühendislik uygulamalarında; Linde yöntemi ile gazların sıvılaştırılması, soğutma makinaları, buhar makinaları, cryogenic soğutma gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, termodinamikte Joule-Thomson etkisi olarak da bilinen bu olayın özellikleri üzerinde durulmuş ve bu olay sonucu meydana gelen sıcaklık ve basınç değişimleri, kısılma yerinden farklı çıkış hızlarında nasıl değişeceği araştırılmıştır. Bu amaçla, kauçuk köpükle yalıtılmış bakır borular ve bu borulara bağlanan üç ayrı çaplardaki vanalardan oluşan bir deney düzeneğinde altı ayrı gaz akışkan ile gözlemler yapılmıştır. Bu gözlemler sonucu, kullanılan bakır boruların çaplarının artmasıyla birlikte kısılma yerinden çıkış hızlarının da artmasıyla daha iyi soğuma dereceleri elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kısılma, Joule-Thomson Etkisi, İzentalpi.

TEMPERATURE AND PRESSURE CHANGES OF GASES WITH DIFFERENT OUTFLOW VELOCITIES IN THERMODYNAMIC THROTTLING EVENT

ABSTRACT

Throttling event is the flow of gaseous fluid from a higher-pressure environment to lesser-pressure environment from an opening reducing the flow cross-sectional area. Throttling event is used in many areas in engineering such as liquefaction of gases by Linde method, refrigeration machines, vapor machines and cryogenic refrigeration. In this study, properties of this event, which is also known as Joule-Thomson effect in thermodynamics, are studied and temperature and pressure changes resulting from this event are studied how change in different outflow velocities from throttling space. For this purpose, observations are made with six different gaseous fluids in an experimental set up composed of copper pipes isolated with sponge rubber and valves with three different diameters connected to these pipes. As a result of these observations, it has been seen that higher cooling temperatures are obtained by increasing the outflow velocities from the throttling space with increasing the diameters of the copper pipes.

Key Words: Throttling , Joule-Thomson Effect ,İsenthalpy.

Semboller:

q	Isı (kJ/kg.K)
Ek	Kinetik Enerji (kJ/kg)
Ep	Potansiyel Enerji (kJ)
h	Entalpi (kJ/kg)
w	İş (kJ/kg)
s ₁	Giriş Entropi Değeri (kJ/kg. K)
s ₂	Çıkış Entropi Değeri (kJ/kg. K)
T ₂	Çıkış Sıcaklığı (°C, K)

T ₁	Giriş Sıcaklığı (° C, K)
P ₂	Çıkış Basıncı (bar)
P ₁	Giriş Basıncı (bar)
v	Özgül Hacim (m ³ /kg)
c _p	Özgül Isı (kJ/kg ⁰)
T	Sıcaklık (° C, K)
P	Basınç (bar)

1.GİRİŞ

Bu çalışmada, çok geniş kullanım alanına sahip olan kısılma olayı, yani Joule-Thomson etkisi hakkında hem teorik hem de deneysel incelemeler yapılmıştır.

Kısılma olayı, gaz veya sıvı akışkanın daha yüksek basınçlı bir ortamdan, akış kesit alanını küçülten bir aralıktan, daha alçak basınçlı bir ortama akmasıdır [1]. Akış kesit alanını küçülten bir eleman olarak; valf, musluk, meme, vana, kılcal boru gibi elemanlar kullanılır [2,3].

Kısılma olayı, özellikle mühendislikte; bir buhar kazanında çeşitli ihtiyaçlar için ayrı basınçlarda buhar alınması, Linde yöntemi ile gazların sıvılaştırılması, cryogenic soğutmalar (düşük sıcaklıklarda soğutma), soğutma makinaları, buhar makinaları, petrol kuyularındaki gazların yoğunlaştırılması gibi alanlarda kullanılır [4,5,3,1].

Termodinamik kısılma olayı ile ilgili ilk araştırma, James Joule ve William Thomson tarafından 1850' li yıllarda yapılmıştır. Bu nedenle termodinamik kısılma olayı sıklıkla Joule-Thomson olayı veya Joule-Thomson etkisi olarak adlandırılır.

1.1. İlgili Bağlımlar:

Kısılma olayının en önemli özelliği, dışarıya iş verilmez ve entalpi yaklaşık olarak sabit kalır [2,3]. Bu durum enerjiler cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$q + Ek_{giriş} + Ep_{giriş} + h_{giriş} = w + Ek_{çıkış} + Ep_{çıkış} + h_{çıkış} \quad (1.1)$$

$$q = w + \Delta Ek + \Delta Ep + \Delta h \quad (1.2)$$

Böylece gaz akışkanın; kısılma elemanına, girişindeki ve çıkışındaki hızları yaklaşık olarak aynı olduğundan kinetik enerji ($\Delta Ek=0$) değişimi sıfır kabul edilir, girişinde ve çıkışında yükseklik farkı olmadığından ($\Delta Ep=0$) potansiyel enerji farkı sıfırdır, sistem ısı alışverişi olmaması için yalıtım yapılır ve adyabatik durum değiştirme olduğu kabul edilerek $q=0$ 'dır. Ayrıca dışarıya iş verilmediği bilindiğinden $w=0$ 'dir. Sonuç olarak ,

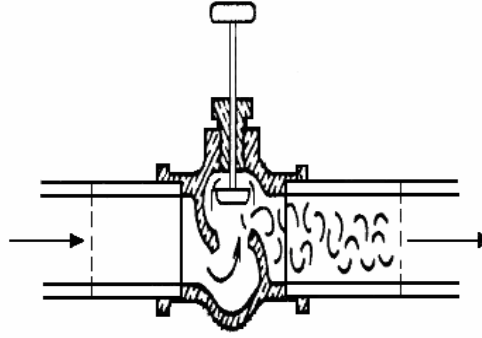
$$\Delta h \cong 0 \quad (1.3)$$

elde edilir. Böylece termodinamik kısılma olayının yaklaşık olarak sabit entalpili yani izentalpik bir hal değişmesi olduğu görülmektedir.

Kısılma olayı tersinmez bir durum değişimidir ve artan entropide meydana gelir [2]. Bu durumu izah edersek; tersinmez durum değiştirme de;

$$\Delta s > \Delta q / T \quad (1.4)$$

dir. Kısılma olayının yaklaşık adyabatik olarak meydana geldiği düşünüldüğünden ısı değişimi $\Delta q = 0$ dır. Böylece $\Delta s = s_2 - s_1 > 0$ olmalıdır. Buda kısılma olayının artan entropi de olduğunu gösterir [6].



Şekil 1.1. Vanada Kısılma Olayı

1.2. Kısılma olayında Joule-Thomson Katsayısı:

Termodinamik kısılma olayında gaz akışkanın basıncı daima düşerken sıcaklığı artabilir, azalabilir veya sabit kalabilir[4]. Bu durum kısılma olayı sonucu elde edilen katsayıdan yararlanılarak karakterize edilebilir. Bu katsayıya, Joule-Thomson katsayısı adı verilir. Joule-Thomson katsayısı, sabit entalpide, sıcaklığın basınçla nasıl değiştiğini gösterir [3].

Joule-Thomson Katsayısı matematiksel olarak;

$$\mu_{JT} = (\partial T / \partial P)_h = (\Delta T / \Delta P)_h \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilir [7]. Termodinamiksel olarak ise,

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{C_p} \left[v - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p T \right] \quad (1.6)$$

belirtilir [7,3].

Kısılma olayında, basınç daima düştüğü için $\partial P < 0$ 'dür. Bu durumda sıcaklık düşerse katsayı pozitif ($\mu_{JT} > 0$), sıcaklık yükselirse katsayı negatif ($\mu_{JT} < 0$), sıcaklık değişmez ise katsayı ($\mu_{JT} = 0$) sıfır olur[8]. Sıcaklığın değişmediği noktaya, inversiyon (dönüm) noktası adı verilir [9].

Bir gaz akışkanın Joule-Thomson katsayısı biliniirse, herhangi bir anda gazın genişlemesi sırasında soğuma mı yoksa ısınma mı yapacağı anlaşılabilir [8]. Mühendisler Joule-Thomson katsayısının özellikle negatif ya da pozitif olmasıyla

ilgilenirler [7]. Bu katsayı kısılma işleminden sonra çıkış sıcaklığının tahmininde önemlidir [10]. Sonuç olarak akışkan davranışını değerlendirmede kullanılan bir parametredir [11].

İdeal gazlarda kısılma olayı yoktur. Bunun nedeni entalpi, sıcaklığa dayanır. Yani sabit entalpi, sabit sıcaklık anlamına gelir. Gerçek gazlarda ise kısılma olayı vardır. Sabit entalpide basınç değişiminin nedeni, sıcaklık değişmesidir [12,7]. Bir başka anlatımla gerçek gazların molekülleri arasında çekim bulunur. Böylece iç molekül etkileşimi (itme-çekme) olması sebebiyle gerçek gazların Joule-Thomson etkisi vardır [13].

Literatürde Joule-Thomson olayı ile ilgili daha çok teorik ağırlıklı olmak üzere çok sayıda incelemeler yapılmıştır. Bunlardan bazıları şu şekildedir; Wisniak [4], kısılma olayında ikili gaz karışımların lineer olmayan etkilerinin olabirliğini termodinamiğin ilk kanunu ve bazı yaygın kübik denklem durumları kullanarak analiz etmiştir. Schoen [13], Joule-Thomson olayında inversiyon sıcaklığının yoğunluğa bağımlılığını ve sınırlı bir gazın Joule-Thomson genişlemesinde daima ısındığını tespit etmiştir. Saygın, Şişman [12], Joule-Thomson etkisini kullanan cryogenic soğutma sistemlerinde, ideal gazların Joule-Thomson katsayılarını incelemiştir. Kortekaas, Peters, Swaan Arons [5], literatürde anlatılan Soave-Redlich-Kwong ve Peng-Robinson denklem durumlarını kullanarak izentalpik genişlemede petrol rezervlerindeki birkaç gaz yoğunlaşma karışımları için modellemiştir. Chou, Wu ve Pai [10], azot gazının genişlemesi ile Joule-Thomson etkisi kullanarak teorik olarak final sıcaklığı tahmini yapmışlardır. Chacin, Vazquez, Müller [11], karbondioksit için, Joule-Thomson inversiyon eğrisini tamamen moleküler simülasyonu kullanarak hesaplamışlardır.

Bu çalışmadaki amaç, çeşitli özellikteki gaz akışkanların; (hava, argon, oksijen, freon-22, karbondioksit, azot) kısılma olayı sonucu basınç ve sıcaklık değişimlerinin, literatürdeki çalışmalardan genel olarak farklı şekilde, kısılma yerinden farklı çıkış hızlarındaki davranışlarını araştırmaktır.

Termodinamik kısılma olayı yani Joule-Thomson etkisi ile ilgili literatürde yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu çeşitli denklem durumlarından elde edilen verilerdir. Bu denklemlere Van der Waals, Virial, Beattie-Bridgeman, Benedict-Webb-Rubin, Redlich Kwong, Soave-Redlich-Kwong, Peng-Robinson örnek verilebilir. Bu denklem durumlarından elde edilen sonuçlara bağlı olarak gaz akışkanların kısılmasıyla ilgili yorumlar yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA:

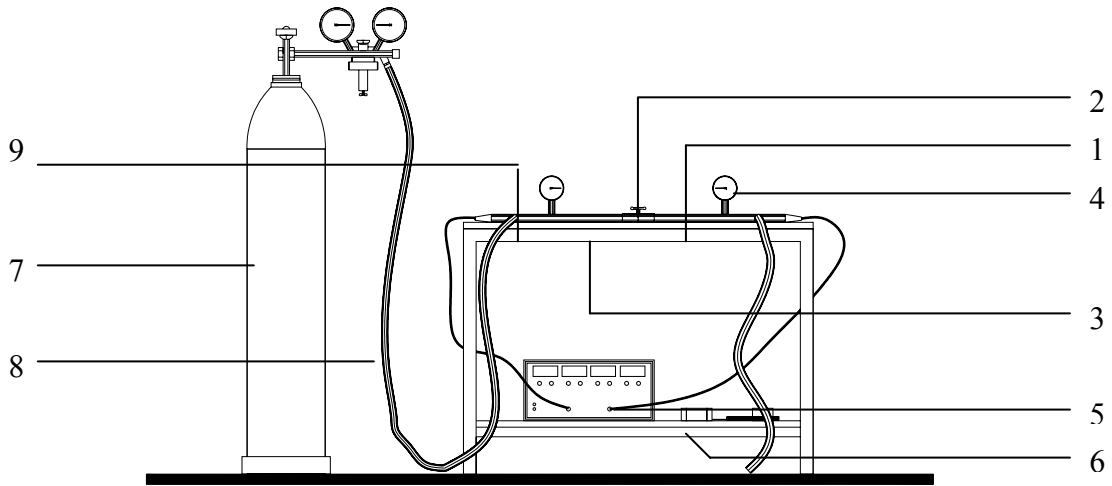
Bu çalışma, şematik olarak Şekil (2.1)'de görülen deney düzeneği ile yapılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan elemanların teknik özellikleri ise Tablo (2.1)'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar, en çok bilinen ve kullanılan hava, argon, oksijen, freon-22, karbondioksit ve azot gazları ile Tablo (2.2)'de belirtilen ortalama ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 0.5 – 1 m/s ile 1.5 – 2 m/s arasındaki, her iki ayrı kısılma yerinden çıkış hız aralıkları için yapılmıştır. Her iki hız aralığında üç farklı çap (3/8", 1/2", 5/8") değerindeki boru-vana bağlantısı için (kullanılan manometrelerin basınç değeri bölüntülerine uygun olarak) ayrı ayrı, 0.2 bar'dan başlayarak 5 bar'a kadarki basınçlarda, 0.2 bar arttırılarak gerçekleştirilmiştir. Düşük

giriş basınçları uygulandığından kısılma yerinden çıkışta belli bir basınç değeri gözlemlenmemiştir.

Bu düzende, 3/8", 1/2", 5/8" çaplarında bakır borular ve vanalar kullanılmıştır (bakır borunun çapıyla aynı çapta vana kullanılmıştır). Bu boru ve vanalara, ısı alış verişini en aza indirmek için kauçuk köpükten yalıtım malzemesi kaplanmıştır. Yalıtım malzemesi olan kauçuk köpüğün üzeri koruma ve sabitlik sağlamak için siyah bant ile kaplanmıştır. Düzende, Şekil (2.2)'de görülen (daha önceden bakır borular ile vanalar monte edilmiştir) bakır boru ve vanadan oluşan kısım değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

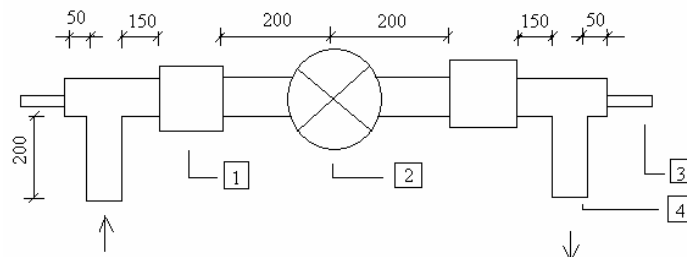
Kısılmanın gerçekleştiği vananın giriş ve çıkışına manometreler ile elektronik sıcaklık ölçerlerin prob'ları (bakır boruların içine problar yerleştirilmiştir) monte edilmiştir. Giriş kısmında istenilen basınç değeri elde etmek için manometreden kontrol edilerek, vanadan el ile ayarlama yapılmaktadır.

Gaz akışkan tüpleri ile bakır borular arasındaki bağlantı hortumlar ile sağlanmıştır. Gaz akışkan, vananın çıkışındaki bakır borulara bağlı (bakır boruların çapına uygun olan) hortum içinden hız ölçer'e gönderilmektedir. Vananın çıkışındaki hortumun uzunluğu yaklaşık 1 m civarındadır. Buradaki hız kaybı çok düşük miktarda olduğundan ihmal edilmiştir.



Şekil 2. 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

(1-Bakır boru, 2-Kısılma Vanası, 3-Kauçuk köpüğünden ısı yalıtım elemanı, 4- Manometre, 5-Sıcaklık Ölçer, 6-Hız Ölçer, 7-Gaz Tüpü, 8-Hortum, 9-Sunta Levha.)



Şekil 2. 2. Deney düzeneğinde değiştirilen kısmın şematik olarak üstten görünüşü.
(1-Manometre, 2-Kısılma Vanası, 3-Sıcaklık Ölçerin Probu, 4- Yalıtılmış Bakır Boru.)

Tablo 2.1. Deney Setinin Özellikleri

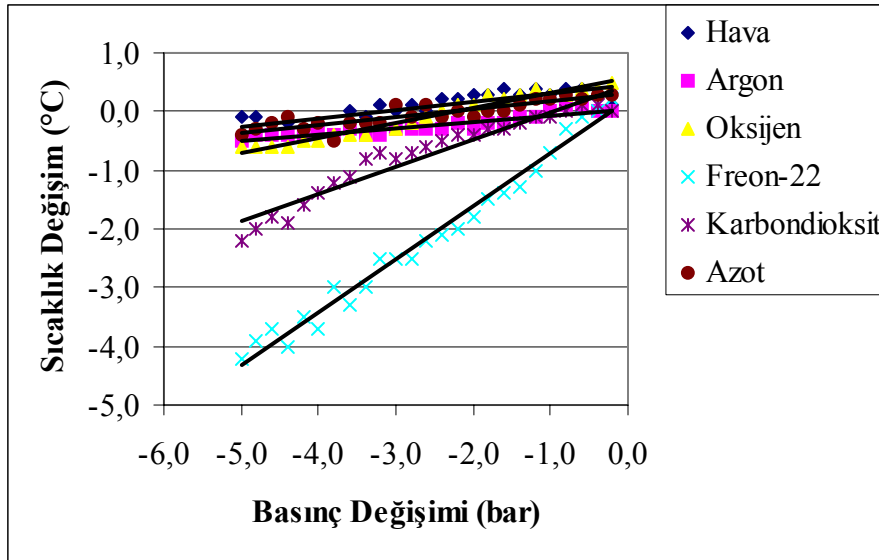
Eleman	Teknik Özellikleri
Bakır Borular	3/8", 1/2", 5/8" çaplı tavllanmış, kalın etli, yumuşak bakır borular.
Vanalar	İki yollu, vidalı, düz tip, Castel firmasının, glop valf, pirinç malzemedir, 3/8", 1/2", 5/8" çaplarında vanalar.
Isı Yalıtım Elemanı	Kauçuk köpüğü yalıtım malzemesi. (Isı iletkenlik katsayısı: 0,04 W/m.K Sıcaklık dayanımı: -45 °C ile 120 °C)
Manometreler	0,2 bar bölüntülü, 6 bar basınç değerine kadar ölçüm yapabilen, Pakkens firmasının manometreler. Deney düzeneğinde vananın girişinde ve çıkışında olmak üzere iki adet manometre.
Sıcaklık Ölçer	(-100) °C ile (100) °C arasında ölçüm yapabilir. Elektronik özellikli, Phywe firmasının sıcaklık ölçeri.
Hız Ölçer (Anomometre)	0.2 ile 40 m/s arasında ölçüm yapabilen, onda bir hassasiyetli, elektronik özellikli, Lutron firmanın hız ölçeri.
Gaz Akışkan Tüpleri	40 m ³ kapasiteli, 120 bar basınç kadar dolun yapılan tüpler. Freon-22 için 13 kg ağırlığında standart tüp.
Ara Bağlantı Hortumları	3/8" ,1/2" , 5/8" çaplı bakır borulara uygun çapta,100 bar'a kadar dayanıklı, çift tel sarımlı, lastikten yapılmış hortumlar.
Kompresör (Hava için)	8 bar basınç kapasiteli, 50 lt depo hacimli, 1000 dev/dak motor devir sayısı olan, 7,5 HP motor gücü olan, 3 silindirli kompresör.
Sunta Levhalar	Suntalem ile kaplı, 25*90 cm ebatlarında, 18 mm kalınlığında, bakır boruların monte edildiği levhalar.
Isı yalıtımlı Bant	Kauçuk köpüğü üzerine sarılan, 30 mm kalınlıkta, koruma, sabitlik ve yalıtım sağlayan siyah bant.
Termometre	+50 °C ile -50 °C arasında ortam sıcaklığını ölçen termometre.
Basınç Ölçer	Elektronik olarak ortam basıncını mmHg cinsinden ölçen basınç ölçer.

Tablo 2.2. Deneysel Çalışmalardaki Ortam Şartları.

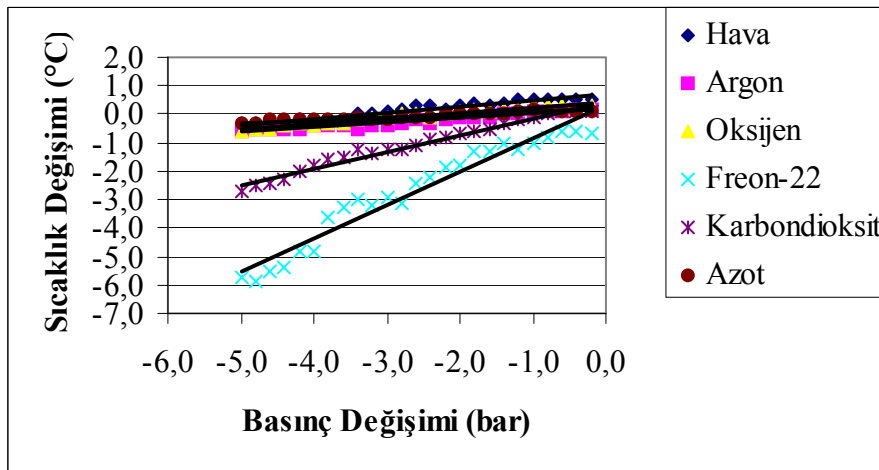
3/8"lik boru-vana bağlantısı için ortalama değerler				
0.5 - 1 m/s çıkış hız aralığında		1.5 - 2 m/s çıkış hız Aralığında		
Gaz Türü	Oda Sıcaklığı (°C)	Atmosfer Basıncı (mmHg)	Oda Sıcaklığı (°C)	Atmosfer Basıncı (mmHg)
Argon (Ar)	17.2	751.0	17.7	749.4
Azot (N ₂)	19.8	751.3	20.3	753.0
Oksijen (O ₂)	18.6	761.4	18.1	760.2
Hava (0.21 O ₂ + 0.78 N ₂ + 0.01Ar)	15.1	748.7	16.8	743.9
Karbondioksit (CO ₂)	19.9	745.2	19.1	746.6
Freon-22 (CHClF ₂)	17.4	752.0	18.9	752.0
1/2"lik boru-vana bağlantısı için ortalama değerler				
0.5 - 1 m/s çıkış hız aralığında		1.5 - 2 m/s çıkış hız aralığında		
Gaz Türü	Oda Sıcaklığı (°C)	Atmosfer Basıncı (mmHg)	Oda Sıcaklığı (°C)	Atmosfer Basıncı (mmHg)
Argon (Ar)	17.7	752.0	16.8	754.0
Azot (N ₂)	19.9	752.0	19.8	751.9
Oksijen (O ₂)	16.8	754.6	17.4	752.2
Hava (0.21 O ₂ + 0.78 N ₂ + 0.01Ar)	12.9	753.0	14.7	754.9
Karbondioksit (CO ₂)	19.8	745.6	18.9	745.6
Freon-22 (CHClF ₂)	19.7	747.6	20.0	747.1
5/8"lik boru-vana bağlantısı için ortalama değerler				
0.5 - 1 m/s çıkış hız aralığında		1.5 - 2 m/s çıkış hız aralığında		
Gaz Türü	Oda Sıcaklığı (°C)	Atmosfer Basıncı (mmHg)	Oda Sıcaklığı (°C)	Atmosfer Basıncı (mmHg)
Argon (Ar)	15.1	752.7	15.7	750.4
Azot (N ₂)	19.8	752.8	19.9	752.0
Oksijen (O ₂)	11.9	756.0	13.9	752.9
Hava (0.21 O ₂ + 0.78 N ₂ + 0.01Ar)	20.2	745.0	19.9	752.0
Karbondioksit (CO ₂)	19.0	750.0	19.6	751.9
Freon-22 (CHClF ₂)	19.7	750.4	20.8	754.9

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME:

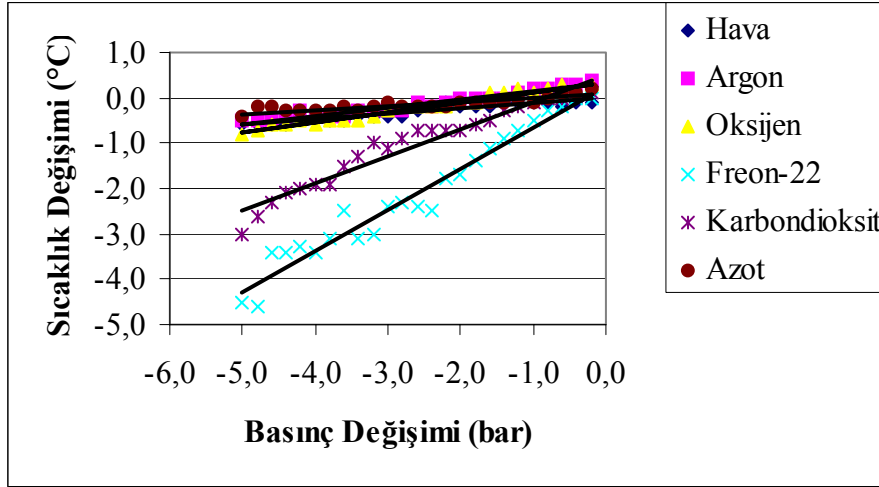
Deneysel çalışmalarda, sıcaklık değişimi $\Delta T = T_2 - T_1$, basınç değişimi ise $\Delta P = P_2 - P_1$ alınarak grafikler çizilmiştir. T_1 ve P_1 , vanaya girişteki gaz akışkanın sıcaklık ve basınç değerlerini, T_2 ve P_2 , vanadan çıkıştaki gaz akışkanın sıcaklık ve basınç değerlerini göstermektedir. Grafikler, literatürdeki çalışmalardan değişik olarak farklı çıkış hızlarında; (hava, argon, oksijen, freon-22, karbondioksit, azot gazları için) basınç değişiminin, sıcaklık değişimine göre durumunu, yani basınç değişiminden sıcaklık değişiminin nasıl etkilendiğini gösterir. Kısılma olayında, basınç daima düştüğü (P_2 basıncı daima düşük olduğundan) için $\Delta P < 0$ 'dür. Bu nedenle basınç değişimi değerleri negatiftir. Zaten yapılan deneylerde düşük çıkış hızları için çıkışta belli bir basınç değeri gözlenmemiştir.



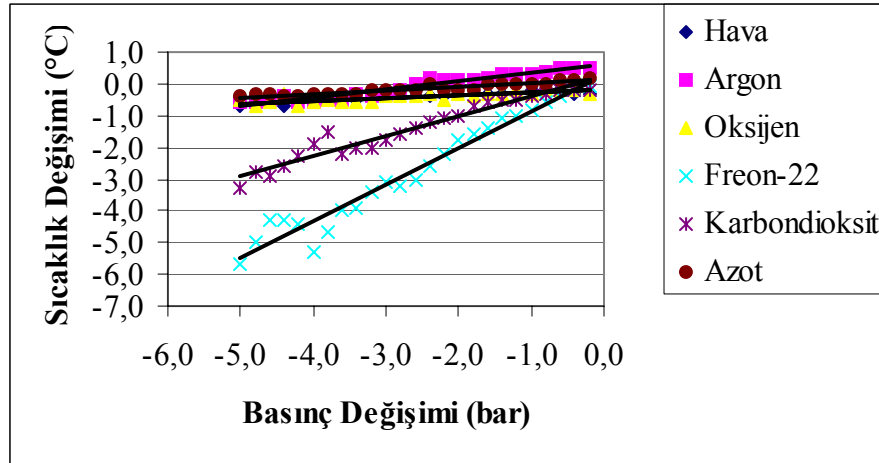
Şekil 3.1. 3/8" lik boru-vana bağlantısından, 0.5 – 1 m/s çıkış hızları arasında geçen gazların Sıcaklık Değişimi-Basınç Değişimi Grafiği.



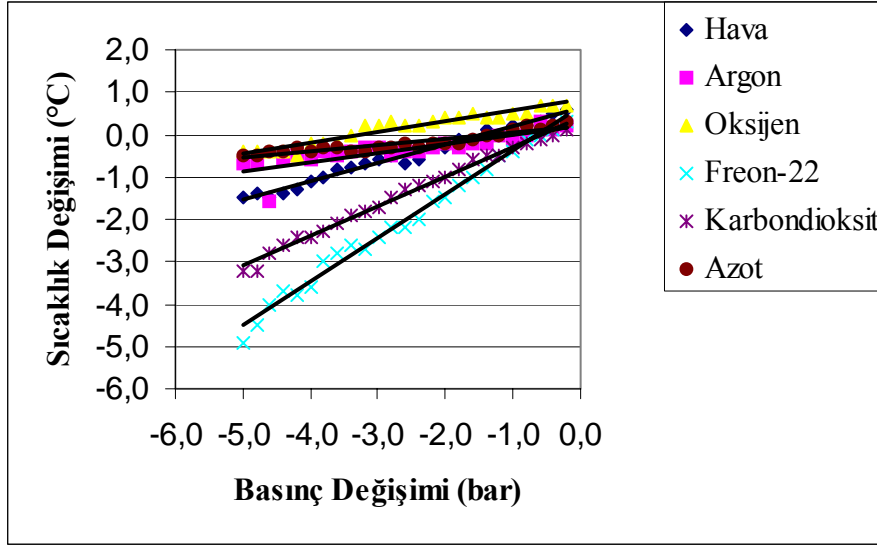
Şekil 3.2. 3/8" lik boru-vana bağlantısından, 1.5 – 2 m/s çıkış hızları arasında geçen gazların Sıcaklık Değişimi-Basınç Değişimi Grafiği.



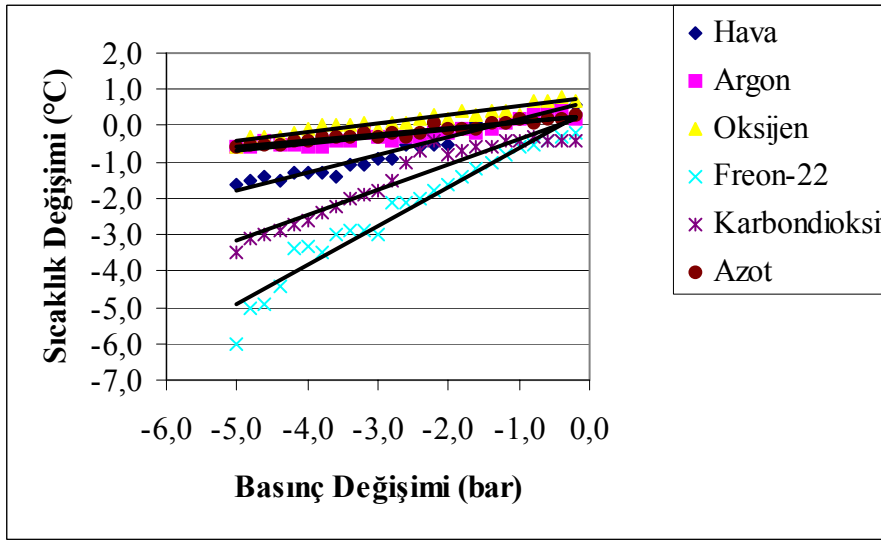
Şekil 3.3. 1/2" lik boru-vana bağlantısından, 0.5 – 1 m/s çıkış hızları arasında geçen gazların Sıcaklık Değişimi-Basınç Değişimi Grafiği.



Şekil 3.4. 1/2" lik boru-vana bağlantısından, 1.5 – 2 m/s çıkış hızları arasında geçen gazların Sıcaklık Değişimi-Basınç Değişimi Grafiği.



Şekil 3.5. 5/8" lik boru-vana bağlantısından, 0.5 – 1 m/s çıkış hızları arasında geçen gazların Sıcaklık Değişimi-Basınç Değişimi Grafiği.



Şekil 3.6. 5/8" lik boru-vana bağlantısından, 1.5 – 2 m/s çıkış hızları arasında geçen gazların Sıcaklık Değişimi-Basınç Değişimi Grafiği.

Literatürde kısılma olayı sonucu gaz akışkanının ısınma veya soğuma özelliği olduğu Joule-Thomson katsayısı değerlerine bağlı olarak yorumlanır. Bu yorumlar, çeşitli gazlar için kısılma yerine girişteki, basınç ve sıcaklık değerlerinde, Joule-Thomson katsayısı elde edilerek yapılır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA:

Termodinamik kısılma olayı ile ilgili literatürde, genellikle teorik bağıntı ve denklemlerden bulunan veriler bulunur. Bu verilere bağlı olarak, oda sıcaklığına (yaklaşık 20 °C) yakın kısılma yerine giriş sıcaklık ve 10 bar'ın altındaki kısılma yerine giriş basınç değerlerinde, kullandığımız tüm gaz akışkanlar için işlem sonunda soğuma özelliği olduğu anlatılmaktadır. Bu durum özellikle Joule-Thomson katsayısı bağlı olarak belirtilir [14]. Bizim yaptığımız deneylerde, oda sıcaklığındaki ve 2 bar'ın altındaki kısılma yerine giriş basınçlarında işlem sonunda azda olsa ısınma dereceleri gözlenmiştir. Bu durum, teorik ve deneysel çalışmalar arasındaki farklılıklardan kaynaklanabilir.

Yaptığımız deneysel çalışmalarda, boru-vana çapı arttığında vanaya girişteki uygulanan basınç değerleri artmasıyla birlikte daha iyi soğuma dereceleri elde edilmiştir. Aynı boru çaplarında gaz akışkanın vanadan (kısılma yerinden) çıkış hızlarını arttırdığımızda (vanaya girişteki basınç değerleri artmasıyla) elde edilen soğuma dereceleri de artmıştır. Böylece boru çapı ve buna bağlı olarak vanadan çıkıştaki hız değerleri arttığında daha iyi soğuma dereceleri elde edildiği görülmektedir.

Boru çapına ve çıkış hızlarına göre elde edilen sonuçlara ek olarak; genelde, molekül kütlesi ve yoğunluğu yüksek olan freon-22 ve karbondioksit gazları için kısılma işlemi sonunda kullanılan diğer gaz akışkanlara göre çok daha yüksek soğuma dereceleri elde edilmiştir. Freon-22 için bu soğuma derecesi 6 °C yi bulmuştur. Bu da molekül kütlesi ve yoğunluğu yüksek olan gaz akışkanlarda kısılma işlemi sonunda daha iyi soğuma dereceleri elde edileceğini gösterir. Ayrıca bu akışkanların soğuma özelliği olan akışkanlar olduğunun da bir ispatıdır. Molekül kütlesi ve yoğunluk değerleri yakın diğer gaz akışkanlar; azot, argon, hava, oksijen için genel olarak birbirlerine yakın soğuma dereceleri elde edilmiştir.

Ortam şartlarından sıcaklık ve atmosfer basıncının, kısılma deneylerinde bir etkisinin olmadığı, literatürdeki bilgilere uygun olarak gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak deney düzeneğinin ısı alış-verişine karşı kauçuk ile yalıtılmış olması gösterilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Balsöz, A. M., “**Termodinamik**”, İstanbul Teknik Okulu Yayınları: 95, İstanbul, (1969) s: 233-234.
- [2] Mertbaş, Ö. S., “**Termodinamik**”, Balıkesir Üniversitesi Yayınları:004, Balıkesir, (1997), s: 140-144.
- [3] Çengel, Y. A., Michael A. B., “**Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik**“, Çeviren: Dertbentli, T., İstanbul, (1999), s: 584-585.
- [4] Wisniak, J.; “The Joule-Thomson Coefficient For Pure Gases and Their Mixtures“, **Chem. Educator**, (1999), 4 , p:51-57.
- [5] Kortekaas, W.G.; Peters, C.J.; De Swaan Arons; J.,”Joule-Thomson Expansion of high-pressure-high-temperature gas Condensates”, **Fluid Phase Equilibria**, 139 (1997), p: 205-218.

- [6] Mertbaş, Ö. S.; “**Termodinamik Ders Notları**”, Balıkesir, (1997).
- [7] Carroll, J. J., “Working with fluids that warm upon expansion “, **Chemical Engineering**, Semtember (1999), p: 108-114.
- [8] Aybak, S., Yalçın, H., “**Kimya Mühendisliği Termodinamiği**”, Cilt 1, Ankara, (1977), s:96-99.
- [9] Cebe, M., “**Fizikokimya**”, Cilt 1, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, (1992), s:131-134.
- [10] Chou, F.-C., Wu S.-M., Pai, C.-F.,”Prediction of final temperature following Joule- Thomson expansion of nitrogen gas”, **Cryogenics**, (1993) Vol:33, No:9.
- [11] Chacin, A.,Vazquez, J.M., Müller, E. A.; “Molecular simulation of Joule-Thomson inversion curve of carbon dioxide”, **Fluid Phase Equilibria**, 165 (1999), p: 147-155.
- [12] Saygın, H., Şişman, A.;”Joule-Thomson Coefficients of quantum ideal-gases”, **Applied Energy**, 70 (2001), p: 49-57.
- [13] Sschoen, M.,”The Joule-Thomson effect in confined fluids”, **Physica A** (1999), p: 353-379.
- [14] Perry, R. H., “**Perry ‘s Chemical Engineers’ Handbook**”, Editör:Green, D. W., (1984), Cheapter:3, p:107-109.
- [15] Kon, O. ,”Termodinamik Kısılma ve Madde Özelliklerine Etkisi”, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi**, (2004).