

Termodinamik kısılma olayında Joule-Thomson katsayısı ve inversiyon eğrileri

Okan KON*

Balıkesir Üniversitesi Müh.-Mim. Fak., Makine Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir

Özet

Bu çalışma, termodinamikte Joule-Thomson etkisi olarak da bilinen kısılma olayı ve bu olay sonucu elde edilen Joule-Thomson katsayısı hakkında bilgi vermek, ideal ve gerçek gazların kısılma olayındaki durumlarını incelenmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, mühendislik bilimlerinden özellikle makine mühendisliğinde çok geniş alanlarda kullanılan, kısılma olayını karakterize eden Joule-Thomson katsayısı ve bu katsayının alacağı değerlerden elde edilen inversiyon eğrilerinin farklı gazlar için termodinamik özellikleri araştırılmıştır. Joule-Thomson katsayısı ile inversiyon eğrilerinin teorikte ve pratikte önemi hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Joule-Thomson katsayısı, inversiyon eğrisi, kısılma.*

Joule-Thomson coefficient and inversion curves in thermodynamic throttling event

Abstract

The study is realized by aiming to give information about the Joule-Thomson coefficient that obtained as a result of throttling event and also throttling event itself which is commonly known Joule-Thomson effect in Thermodynamics, in addition of investigate states in throttling event of ideal and real gases. In the study, Joule-Thomson coefficient which characterize the throttling event that uses in wide areas in engineering sciences specially in mechanical engineering and thermodynamic attributes of inversion curves obtained from the values of the coefficient for different gases are investigated. It is given information about the importance of Joule-Thomson coefficient and inversion curves in theory and practice.

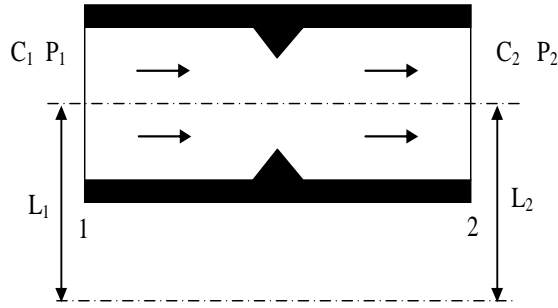
Keywords: *Joule-Thomson coefficient, inversion curve, throttling.*

* Okan KON, okan@balikesir.edu.tr, Tel: (266) 6121194/95

1.Giriş

Kısılma, bir akışkanın daha yüksek basınçlı bir ortamdan, daha düşük basınçlı bir ortama küçük bir aralıktan geçmesi olayıdır [1]. Kısılma olayı, akışkanın, gözenekli tıpa, kılcal boru, vana, valf, musluk, meme gibi akış kesit alanını küçülten bir elemandan geçerken sürtünmelerin artması ve basıncın azalmasıyla meydana gelir [2,3,4].

Termodinamik kısılma deneyi, ilk olarak James Joule ve William Thomson (Lord Kelvin) tarafından 1850' li yıllarda yapılmıştır. Bu nedenle kısılma olayı, genellikle Joule-Thomson etkisi (Joule-Thomson olayı) olarak bilinir ve Joule-Thomson etkisi sonucu elde edilen katsayıdan yararlanılarak karakterize edilir [5,1]. Bu katsayıya Joule-Thomson katsayısı denir. Bu katsayı termodinamik bir özelliktir [2].



Şekil 1. Termodinamik kısılma olayı [4].

Şekil 1'de görüldüğü gibi termodinamik kısılma olayında, kısılma bölgesine girişte ve çıkışta yükseklik ($L_1=L_2$) farkının olmadığı için potansiyel enerji değişimi olmaz. Kısılma bölgesine girişte ve çıkıştaki hızlar yaklaşık olarak birbirine eşit ($C_1 \approx C_2$) kabul edildiği için kinetik enerji değişimi ihmal edilebilir. Kısılma olayı sırasında, kimyasal reaksiyon olmaz, bir kanaldan akış olur ve dışarıya iş yapılmaz [6,1]. Fakat kısılma bölgesine girişte ve çıkışta basınç değerleri değişir. Buna bağlı olarak sıcaklık değerleri değişebilir veya değişmeyebilir. Bu durum kullanılan akışkanın özelliğine, girişteki basınç ve sıcaklık değerlerine bağlıdır. Bu özelliklere bağlı olarak, işlem yalıtılmış (izole edilmiş) bir sistemde olduğu düşünülür ve ısı alış veriş yapılmadığı (adyabatik olduğu) kabul edilir. Böylece enerjinin korunumu kanununa bağlı olarak, kısılma işleminde entalpilerin yaklaşık olarak eşit olduğu ($H_1 \approx H_2$), sabit entalpili ($\Delta H=0$), yani izentalpik bir durum değiştirme olduğu sonucuna varılır [1,2,4].

Joule-Thomson katsayısı ve inversiyon eğrileriyle ilgili olarak yapılmış birçok çalışmalar bulunmaktadır. Wisniak J. [7], kısılma işleminde, Joule-Thomson katsayısının izah etmiştir. Çeşitli gazlar için maksimum inversiyon sıcaklıklarını vererek virial denkleminle inversiyon sıcaklığının hesabını göstermiştir. Joule-Thomson etkisini, ikili karışımlar için çeşitli denklem durumları ile göstermiştir. Chacin A., Vazquez J. M., Müller E. A. [8], karbondioksit gazının Joule-Thomson inversiyon eğrisinin moleküler simülasyon kullanarak hesaplamışlardır. Bu hesaplamayı yaparken Joule-Thomson katsayısının termodinamik olarak çeşitli ifadelerinden yararlanarak, Joule-Thomson inversiyon eğrilerini çizmişlerdir. Kioupis L. I., Arya G., Maginn E. J. [9], Joule-Thomson katsayısı ve inversiyon eğrisinin yalnız gazlarda değil, sıvılarda da önemli parametreler olduğunu göstermişlerdir. Sıvılar için Joule-Thomson katsayısının,

durum denklemleriyle tespit edilmesi üzerinde durmuşlardır. Deneysel olarak inversiyon eğrisinin elde edilmesinin zorluğunu tespit etmişlerdir. Colina C. M. ve Olivera-Fuentes C. [10], Joule-Thomson inversiyon eğrilerini indirgenmiş basınç ve sıcaklıklar cinsinden incelemişlerdir. Carroll J. J. [11], Joule-Thomson katsayısını, matematiksel ve termodinamik olarak ifade ederek, Joule-Thomson katsayısının ideal gazlar ve gerçek akışkanlarda nasıl değiştiğini izah etmiştir. Schoen M. [12], Joule-Thomson katsayısının elde edilmesi ve alabileceği değerler ile ilgili bilgi vermiştir. Joule-Thomson olayının uygulama alanları ve Joule-Thomson etkisinin ideal gazlar üzerindeki etkilerini izah etmiştir. İncersiyon sıcaklığının nelere bağlı olarak değiştiği ve alacağı değerleri tanımlamıştır. Colina C. M., Turens L. F., Gubbins K. E., Olivera-Fuentes C., Vega L. F. [13], Joule-Thomson katsayısının termodinamik olarak bulunmasını izah etmişlerdir. Moleküler model kurmuşlardır. Karbondioksit ve alkan serileri için Joule-Thomson inversiyon eğrilerini incelemişlerdir. Saygın H. ve Şişman A. [14], Joule-Thomson etkisini ve bunun sonucu elde edilen Joule-Thomson katsayısı hakkında bilgi vermişlerdir. İdeal gazların Joule-Thomson katsayılarını izah etmişlerdir.

Bu çalışma, mühendislik bilimlerinden özellikle makine mühendisliğinde sıklıkla kullanılan ve Joule-Thomson olayı olarak da bilinen termodinamik kısılma olayı sonucu elde edilen Joule-Thomson katsayısını, bu katsayıya bağlı olarak oluşturulan ve kısılma olayı sonunda kullanılan akışkanın hangi özelliklerde olabileceğini tahmin edilebilmesine yardımcı olan inversiyon eğrilerini incelemek amacıyla yapılmıştır.

2. Joule-Thomson katsayısı

Joule-Thomson katsayısı, sabit entalpide, basıncın düşmesiyle sistemin sıcaklığında gözlenen değişme miktarı olarak tanımlanabilir [15]. Yani Joule-Thomson katsayısı sabit entalpide basınç değiştirildiğinde, akışkanın (gazların ve sıvıların) sıcaklığının kaç derece değiştiğini gösterir [9]. Kısılma olayında gaz akışkan davranışını değerlendirilmesinde kullanılan bir parametredir [8]. Bu katsayı, çeşitli soğutma ve gazların sıvılaştırma işlemlerinde, özellikle soğutma işlemlerinde kullanılmaktadır [10].

Joule-Thomson katsayısı μ_{JT} sembolüyle gösterilir ve

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_H = \left(\frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1} \right)_H \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir [4]. Matematiksel olarak,

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \quad (2)$$

gösterilirken [3],

termodinamiksel olarak,

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{C_p} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] \quad (3)$$

formülü ile gösterilmektedir [3,11].

Kısılma işlemi sırasında Joule-Thomson katsayısı, gaz akışkanın kısılma yerine girişteki sıcaklığına ve basıncına bağlı olarak;

$\mu_{JT} < 0$ (kullanılan akışkanın sıcaklığı artar)

$\mu_{JT} = 0$ (kullanılan akışkanın sıcaklığı değişmez)

$\mu_{JT} > 0$ (kullanılan akışkanın sıcaklığı azalır)

değerlerini alır [3, 16].

Joule-Thomson olayında basınç daima düşer (yani $\partial P < 0$ 'tür). Bu durumda, kısılma işlemi esnasında sıcaklık düşerse Joule-Thomson katsayısı pozitif, sıcaklık yükselirse Joule-Thomson katsayısı negatif değerlerini alır. Böylece Joule-Thomson katsayısından giderek, akışkanın kısılmasından sonra soğuyacak mı, yoksa ısınacak mı anlayabiliriz [16].

Tablo 1. Bazı gazların (μ_{JT}) Joule-Thomson katsayıları [17].

| | Hava için | | | Argon için | | | Karbondiyoksit için | | | Azot için | | |
|--------------------|------------|---------|----------|------------|---------|----------|---------------------|---------|----------|------------|---------|----------|
| | μ_{JT} | | | μ_{JT} | | | μ_{JT} | | | μ_{JT} | | |
| Sıcaklık Basınç | -50 °C | 0 °C | 50 °C | -50 °C | 0 °C | 50 °C | -50 °C | 0 °C | 50 °C | -50 °C | 0 °C | 50 °C |
| 1 atm | 0.39 | 0.27 | 0.20 | 0.60 | 0.43 | 0.32 | 2.41 | 1.29 | 0.90 | 0.40 | 0.27 | 0.19 |
| 20 atm | 0.37 | 0.26 | 0.18 | 0.57 | 0.41 | 0.30 | -0.01 | 1.40 | 0.90 | 0.37 | 0.25 | 0.17 |
| 60 atm | 0.32 | 0.22 | 0.16 | 0.50 | 0.36 | 0.27 | -0.02 | 0.04 | 0.88 | 0.31 | 0.21 | 0.14 |
| 100 atm | 0.25 | 0.18 | 0.13 | 0.40 | 0.30 | 0.23 | -0.02 | 0.02 | 0.56 | 0.23 | 0.17 | 0.12 |

Tablo (1)'de görüldüğü gibi herhangi bir sıcaklık değeri (sıcaklık değerini sabit alırsak) için; basınç yükseldikçe, Joule-Thomson katsayısı küçülmektedir. Tersini durumda yani herhangi bir basınç değeri (basınç değerini sabit alırsak) için; sıcaklık yükseldikçe (-50 °C ile 50 °C arasındaki sıcaklık değerleri için), Joule-Thomson katsayısı yine küçülmektedir [16].

Literatürde çok geniş sıcaklık ve basınç değerleri alınarak yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta ve düşük sıcaklıkta (sabit bir basınç değerinde) olmak üzere iki adet inversiyon sıcaklığı (dönme, dönüşüm sıcaklığı) olduğu tespit edilmiştir [16]. Bu durum Şekil (4)'de görülebilir.

Joule-Thomson katsayısını termodinamiksel ve matematiksel kavramlarla açıklamak için $H=f(P,T)$ fonksiyonunun toplam diferansiyelini kullanabiliriz,

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT \quad (4)$$

Joule-Thomson olayında entalpilerin değişmediği düşünüldüğünden yani $dH=0$ olduğu kabul edildiğinden,

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT = - \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \quad (4.1)$$

olur. Bu ifadede düzenlemeler yaparsak,

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = - \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \quad (4.2)$$

eşitliği ortaya çıkar. Bu eşitlikte,

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_p \text{ ve } \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \mu_{JT}$$

olduğunu bildiğimizden (4.2) denkleminde yerine yazdığımızda,

$$C_p \mu_{JT} = - \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \quad (5)$$

elde ederiz [15]. Sonuç olarak,

$$\mu_{JT} = - \frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T$$

$$(H = U + P.v \text{ idi}) \quad (6)$$

$$\mu_{JT} = - \frac{1}{C_p} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_T + \left(\frac{\partial (Pv)}{\partial P} \right)_T \right] \quad (6.1)$$

ifadesi elde edilir [18].

Joule-Thomson katsayısını termodinamiksel ve matematiksel kavramlarla açıklarken başka bir yol kullanırsak;

Entalpi fonksiyonu,

$$dH = dU + v dP = T dS + v dP \quad (7)$$

dir. Bu eşitlikte entropi ifadesi genişletilirse;

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T dP \quad (8)$$

elde edilir. Buradaki ifade de,

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P = \frac{C_p}{T} \text{ ve } \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T = \left(- \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P$$

(Maxwell denklemlerinden alınmıştır)

olduğunu biliniyor. Bu eşitlikler, (8) denkleminde yerine yazılırsa,

$$dS = \frac{C_p}{T} dT + \left(- \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \quad (9)$$

elde edilir. Bulunan bu entropi ifadesi, (7) denkleminde yerine yazıldığında,

$$dH = T \left(\frac{C_p}{T} dT + \left(- \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \right) + v dP \quad (10)$$

olur. Matematiksel işlemler yapılırsa,

$$dH = T \frac{C_p}{T} dT + T \left(- \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP + v dP \quad (10.1)$$

$$dH = C_p dT + \left(v + \left(- \frac{\partial v}{\partial T} T \right) \right) dP \quad (10.2)$$

bulunur. Kısılma olayında entalpi değeri $dH=0$ olduğu kabul edildiğinden, gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$C_p dT = \left[\left(\frac{\partial v}{\partial T} T - v \right) \right] dP \quad (10.3)$$

$$\frac{dT}{dP} = \frac{1}{C_p} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial T} T - v \right) \right] \quad (10.4)$$

elde edilir. Bu eşitlikten Joule-Thomson katsayısı,

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{C_p} \left[v - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right) T \right] \quad (11)$$

olarak bulunur [11,19,20].

Literatürde, Joule-Thomson katsayısının elde edilmesiyle ilgili olarak bir çok denklemlerden yararlanılır. Bu denklemlerden en sık kullanılanları Van der Waals ve Virial denklemleridir. Bunların dışında, Beattie-Bridgeman, Benedict-Webb-Rubin, Redlich Kwong, Soave-Redlich –Kwong, Peng-Robinson denklemleri de kullanılmıştır.

3. Kısılma olayında ideal ve gerçek gazlar

Kısılma olayında ideal gazlar incelendiğinde, ideal gazların molekülleri arasında herhangi bir etki yoktur. Böylece dış ortamla hiçbir ısı alış-verişi olmadan (adyabatik olarak yalıtım yapıldığında) kısılan bir gaz akışkanın moleküllerini birbirinden ayırmak için iş yapılmaz ve sıcaklık değişimi görülmez [21].

Bu durumda, Joule-Thomson katsayısını izah edersek:

İdeal gaz denklemi $Pv = RT$ idi. Bu denklemde hacim ve sıcaklık,

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P} = \frac{v}{T} \text{ şeklinde düzenlenebilir [21].}$$

Bu eşitlik, Joule-Thomson katsayısı (11) denkleminde yerine yazılırsa,

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{C_p} \left[v - \frac{v}{T} T \right] \quad (12)$$

olur. Sonuç olarak Joule-Thomson katsayısı $\mu_{JT} = 0$ bulunur. Buradan da görülüyor ki ideal gazlarda kısılma olayı yoktur [22,21].

Joule-Thomson katsayısının sıfır olması durumu, bir ideal gazın izentalpik (sabit entalpili durum) olarak kısılmasında, gazın sıcaklığının değişmediğini gösterir [11].

Gerçek gazlarda ise, gaz molekülleri arasında itme-çekme kuvvetleri bulunur. Gerçek gazlarda moleküller arasında çekim kuvvetleri olduğundan, moleküller bir potansiyel enerjiye sahiptir. Gaz akışkan kısıldıktan sonra moleküller arasındaki uzaklık artar, çekim kuvvetlerine karşı iş yapılır ve böylece potansiyel enerji artmış olur. Dış ortamla iş yapılmazsa ve dışarıyla ısı alış verişi olmazsa, potansiyel enerjideki bu artma, gaz akışkanın kinetik enerjisinden karşılanır ve gaz akışkanın sıcaklığı değişir [23].

Bu durumu Joule-Thomson katsayısı ile izah edersek; ideal gaz kanunuyla, sıkıştırılabilirlik faktörü arasındaki bağıntı kurulduğunda bir durum denklemi elde edilir.

Bu durum denklemi,

$$Pv = zRT \quad (13)$$

şeklindedir. Bu denklemin T' ye bağlı türevi (sabit basınçta) alınırsa,

$$v \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_P + P \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = R \left[z \left(\frac{\partial T}{\partial T} \right)_P + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_P \right] \quad (14)$$

bulunur. Bu türev ifadesinde (P sabit olduğundan),

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_P = 0 \text{ ve } \left(\frac{\partial T}{\partial T} \right)_P = 1$$

dir.

Bu nedenle,

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P} \left[z + \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_P T \right] \quad (15)$$

elde edilir. Elde edilen bu denklem, (11) denkleminde yerine yazıldığında,

$$\mu_{JT} = \frac{\frac{RT}{P} \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_P \right] - v}{Cp} \quad (16)$$

olur.

Gerekli matematiksel işlemler yapıldığında,

$$\mu_{JT} = \frac{v + \frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_P - v}{Cp} \quad \left(v = \frac{zRT}{P} \text{ dir} \right) \quad (17)$$

$$\mu_{JT} = \frac{\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_P}{Cp} \quad (18)$$

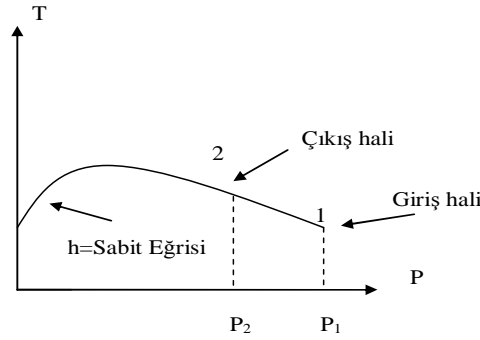
elde edilir. Burada gerçek gazlarda Joule-Thomson katsayısı $\mu_{JT} \neq 0$ olduğu görülür. Buradan gerçek gazlarda kısılma olayı olduğu anlaşılır [11].

Gerçek gazlarda sabit entalpili basınç değişiminin nedeni, sıcaklık değişmesidir. Düşük basınç ve sıcaklıklarda μ_{JT} , gerçek gazlar için genellikle pozitifdir. Yüksek basınç ve sıcaklıklarda ise μ_{JT} genellikle negatif olur [14]. Herhangi bir iç molekül etkileşimi olmadan kısılma olayı olmamaktadır [12].

4. İncersiyon eğrileri

Gaz akışkanın kısılma işlemi sırasında, ne soğuma ve ne de ısınma gösterdiği, diğer bir deyişle Joule-Thomson katsayısının sıfır $\mu_{JT} = 0$ olduğu noktaya dönme, dönüm veya inversiyon noktası adı verilir [15].

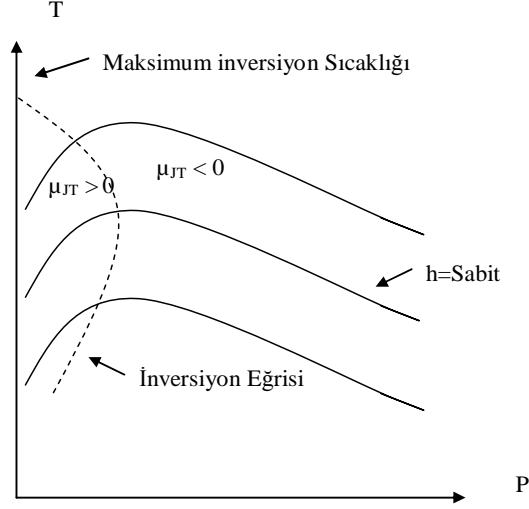
Joule-Thomson katsayısı, Şekil (2)'de sabit entalpi eğrilerinin eğimini gösterir. Bu eğrilerin çizilmesinde bir kısılma olayında, sadece sıcaklık ve basıncın ölçülmesi yeterli olur. Bu durumda, sıcaklığın ve basıncın bilinmesinden dolayı entalpisi bilinen bir gaz akışkanın, bir kısılma bölgesinden geçirildikten sonra, çıkış basıncı ve sıcaklığı ölçülür. İşlem; farklı akış kesit alanı olan kısılma yerlerinde tekrarlanırsa, farklı (çıkış sıcaklık ve basıncı) T_2 ve P_2 değerleri elde edilir. Bu değerler sıcaklık-basınç diyagramında işaretlenir ve bir eğri ile birleştirilirse, Şekil (2)'de görülen sabit entalpi eğrisi elde edilir. Şekil (3)'de gösterildiği gibi kısılma yerinin giriş özelliklerini değiştirerek farklı sabit entalpi eğriler çizilebilir [3].



Şekil 2. Sabit entalpi eğrisi [3].

Sıcaklık-basınç diyagramında sabit entalpi eğrilerinin bazıları eğimin yani Joule-Thomson katsayısının sıfır olduğu noktalardan geçer. Eğimin sıfır olduğu noktalardan (her sabit entalpi eğrisi üzerindeki) geçen eğriye inversiyon (dönme, dönüşüm) eğrisi denir. Dönme eğrisinin sabit entalpi eğrisini kestiği noktadaki sıcaklık, dönme noktası sıcaklığı olarak tanımlanır. Dönme eğrisinin üst bölümünün $P=0$ doğrusunu (T eksenini) kestiği noktasındaki sıcaklık maksimum dönme sıcaklığıdır. Sabit entalpi eğrilerinin eğimleri, dönme eğrisinin sağ tarafında eksi ($\mu_{JT} < 0$) değerdeden, dönme eğrisinin sol tarafında ise artı ($\mu_{JT} > 0$) değerdedir [3].

Bir kısılma olayı, sabit entalpi eğrisi üzerinde azalan basınç yönünde, yani sağdan sola doğru gerçekleşir. Bundan dolayı, inversiyon eğrisinin sağında kalan bir gaz akışkan için, sıcaklık, kısılma işlemi sırasında artar. İncersiyon eğrisinin solunda kalan bir gaz akışkan için ise, sıcaklık, kısılma işlemi sırasında azalır (Şekil (3)' de görüldüğü gibi). Soğutma etkisi sağlayabilmek için gaz akışkanın maksimum inversiyon sıcaklığının çok altında olmalıdır [3].



Şekil 3. İncersiyon (Dönme, Dönüm) eğrisi [3,7].

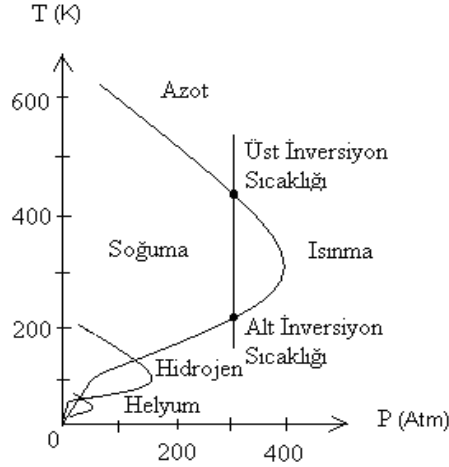
Maksimum (dönme) incersiyon sıcaklığı, oda sıcaklığının altında olan hidrojen ve helyum gazlarıdır. Bazı kaynaklarda bu gazlara Neon gazı da eklenmektedir. (hidrojenin maksimum incersiyon sıcaklığı 202 K, helyumun gazının ise 40 K'dir.) Maksimum incersiyon sıcaklığı oda sıcaklığının altında olan bu gazlar, kısılma olayı sonucunda soğutma etkisi sağlanmak istendiğinde (örneğin sıvılaştırma yapılabilmesi için), bu gazları maksimum incersiyon sıcaklıklarının altına soğutmak gerekir [3,21-25].

Normal şartlarda hidrojen ve helyum gazları, oda sıcaklığında kısılma olayı sonucu ısınır. Bu durum, kısılma olayında bu gazları diğerlerinden (azot gazı, hava, argon gazı, karbondioksit gazı gibi) ayıran en önemli özelliktir. Bu özellik, makine mühendisliğinin birçok uygulamasında (linde yöntemi ile gazların sıvılaştırılması gibi) kullanılır [24].

İncersiyon noktası, kullanılan gaz akışkanın yoğunluğuna bağlıdır [12]. Ayrıca maksimum incersiyon sıcaklığının artması veya azalması kullanılan gaz akışkanın moleküler ağırlığına da bağlıdır [13]. İncersiyon noktalarının yakın çevresinde küçük sıcaklık farklılıkları büyük basınç farklılıklarına yol açabilir [8]. Bazı gazlar için maksimum incersiyon sıcaklıkları Tablo (2)' de verilmiştir.

Tablo 2. Bazı gazların maksimum incersiyon sıcaklıkları [25].

| Gaz | Maksimum İncersiyon Sıcaklığı (K) |
|---------------|-----------------------------------|
| Karbondioksit | 1500 |
| Oksijen | 761 |
| Argon | 723 |
| Azot | 621 |
| Hava | 603 |
| Hidrojen | 202 |
| Helyum | 40 |



Şekil 4. Azot, Helyum, Hidrojen gazlarının inversiyon eğrileri [26].

Şekil (4) görüldüğü gibi azot gazı herhangi bir anda kısıldığında, soğuma etkisi gözlenmesi için 621 K sıcaklık ve 400 atm basıncın altında olması gerekir. Azot gazının bu özellikleri, hidrojen ve helyum gazlarından çok yüksektir. Helyum için, 40 K sıcaklık ve 40 atm basınç altında, Hidrojen için ise 202 K sıcaklık ve 160 atm basınç altında olmalıdır [24].

Gazların inversiyon eğrilerini laboratuvar ortamında deneysel olarak elde etmek çok zordur [9].

5. Sonuçlar ve tartışma

Günlük hayatımızda bir parfüm şişesinde bile görebileceğimiz kısılma olayı, özellikle makine mühendisliğinde gazların sıvılaştırılması, basınç düşürme, cryogenic soğutma, buhar makineleri, buhar kazanları, soğutma makineleri ve iklimlendirme cihazları gibi çok geniş alanda kullanılmaktadır [1,3,7]. Bu nedenle, bu olayı karakterize eden Joule-Thomson katsayısı ve bu katsayıdan yararlanılarak elde edilen inversiyon eğrileri üzerine özellikle yurtdışında çok sayıda çalışma olduğu görülmüştür.

Kısılma olayında, Joule-Thomson katsayıları ve inversiyon eğrileri sayesinde herhangi bir gazın kısılması sonrasında hangi özelliklerde olabileceği hakkında bizlere ön bilgi vermektedir. Bu bilgi ile önceden, kısılma olayı sonrasında gazların; soğuma, ısınma veya sıcaklığında sabit kalma özelliği gösterebileceği tahmin edilebilmektedir [16].

Konuyla ilgili yapılan araştırmalarda, özellikle deneysel olarak yüksek sıcaklık ve basınçlarda Joule-Thomson katsayısı ve inversiyon eğrilerinin elde edilmesi çok zordur [8]. Bu nedenle matematiksel ve termodinamiksel olan çeşitli denklemlerden yararlanılmıştır. Bu denklemlerin yardımıyla uygulama imkanı çok az olan, çok yüksek basınç ve sıcaklıklarda gazların kısılma olayı sonrası hangi özellikler gösterebileceği tahmin edilebilmektedir.

Semboller:

| | |
|------------|---|
| T | Sıcaklık ($K, ^\circ C$) |
| P | Basınç (atm) |
| H | Entalpi ($kJ, kJ/kg$) |
| U | İç Enerji (kJ/kg) |
| R | İdeal Gaz Sabiti ($kJ/kg K$) |
| S | Entropi ($kJ/K, kJ/kg K$) |
| z | Sıkıştırılabilirlik Faktörü |
| T_2 | Çıkış Sıcaklığı ($K, ^\circ C$) |
| T_1 | Giriş Sıcaklığı ($K, ^\circ C$) |
| P_2 | Çıkış Basıncı (atm) |
| P_1 | Giriş Basıncı (atm) |
| μ_{JT} | Joule-Thomson Katsayısı ($^\circ C/atm, K/atm$) |
| v | Özgül Hacim (m^3/kg) |
| C_p | Özgül Isı ($kJ/kg K$) |
| C_1 | Giriş Hızı (m/s) |
| C_2 | Çıkış Hızı (m/s) |
| L_1 | Girişteki Yükseklik (m) |
| L_2 | Çıkıştaki Yükseklik (m) |

Teşekkür

Bu çalışmayı hazırlarken bana katkı sağlayan Hocam, Emekli Öğretim Üyesi; Yrd. Doç. Dr. Ömer Samih MERTBAŞ'a teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

- [1] Balsöz, A. M., **Termodinamik**, İstanbul Teknik Okulu Yayınları Sayı: 95, 234-236, İstanbul, (1969).
- [2] Öztürk, A.; Kılıç, A.; **Termodinamik Problemleri**, 199-200, İstanbul, (1984).
- [3] Çengel, Y. A., Michael, A. B., **Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik**, Türkçesi: Derbentli, T., Literatür Yayıncılık, 584-585, İstanbul, (1996).
- [4] Mertbaş, Ö. S., **Termodinamik**, Balıkesir Üniversitesi Yayınları No:004, 140-144, Balıkesir, (1997).
- [5] Kenneth, Jr. W., **Thermodynamics**, 512-515, (1989).
- [6] Doolittle, J. S., **Thermodynamics for Engineers**, Obert, E. F., 164-167, USA Pennsylvania, (1959).
- [7] Wisniak, J., "The Joule-Thomson Coefficient for Pure Gases and Their Mixtures", **Chemical Educator**, 4, 51-57, (1999).
- [8] Chacin, A., Va'zquez, J.M., Müller, E.A., "Molecular simulation of the Joule-Thomson inversion curve of carbon dioxide", **Fluid Phase Equilibria**, 165, 147-155, (1999).
- [9] Kioupis, L.İ., Arya, G., Maginn, E.J., "Pressure-enthalpy driven molecular dynamics for thermodynamic property calculation II: applications", **Fluid Phase Equilibria**, 200, 93-110, (2002).
- [10] Colina, C.M., Olivera-Fuentes, C., "Prediction of the Joule-Thomson inversion curve of air from cubic equations of state", **Cryogenics**, 38, 721-728, (1998).
- [11] Carroll, J.J., "Working with Fluids that Warm Upon Expansion", **Chemical Engineering**, 108-114, (September 1999).

- [12] Schoen, M., “The Joule-Thomson effect in confined fluids”, **Physica A**, 270, 353-379, (2000).
- [13] Colina, C. M., Turrens, L.F., Gubbins, K.E., Olivera-Fuentes, C., Vega, L.F., “Predictions of the Joule-Thomson Inversion Curve for the n-Alkane Series and Carbon Dioxide from the soft-SAFT Equation of State”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41, 1069-1075, (2002).
- [14] Saygın, H., Şişman, A., “Joule-Thomson coefficients of quantum ideal-gases”, **Applied Energy**, 70, 49-57, (2001).
- [15] Cebe, M., **Fizikokimya**, Cilt:1, Uludağ Üniversitesi Basımevi, 131-134, Bursa, (1992).
- [16] Yalçın, H., Aybak, S., **Kimya Mühendisliği Termodinamiği**, Cilt 1, 96-99, Ankara, (1977).
- [17] Perry H. R., **Perry’s Chemical Engineers’ Handbook**, Green, W. D., Chapter 3, 6-24, 107-111, USA Kansas, (1984).
- [18] Klotz, I. M., M. Rosenberg, R., **Chemical Thermodynamics Basic Theory and Methods**, 102-106., (1991).
- [19] Jordan, R. C., Priester, G. B., **Refrigeration and Air Conditioning**, 396-400.
- [20] Çiğdemoğlu M., **Teknik Termodinamiğe Giriş**, 354-358, Ankara, (1976).
- [21] Berkem, A. R., Baykut, S., **Fizikokimya**, İstanbul Üniversitesi Yayınları Sayı 2735, 264-269, İstanbul, (1980).
- [22] Zemansky, M.W., **Heat and Thermodynamics**, 335-341, Newyork, (1968).
- [23] Erdik, E., **Isı ve Termodinamik**, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları Genel:115, 150-153, Ankara, (1973).
- [24] Kon, O., Termodinamik Kısılma ve Madde Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2004).
- [25] Hsieh, J. S., **Engineering Thermodynamics**, 584-587, (1993).
- [26] <http://www.physics.rutgers.edu/ugrad/351/Lecture%2015.pdf>
“Lecture 15. The van der Waals Gas (Ch. 5)” (Erişim Tarihi: 01.03.2006)