

# Brine ve Buhar&NCG Hatlarında Vana ile Basınç Düşürülmesi Sonrası Sıcaklık Hesabı

Yunus Çengel

Makine Mühendisliği Bölümü, Emeritus Profesörü  
Nevada Üniversitesi, Reno, USA



EKSERJİ 2024

2 Mayıs 2024

# Giriş: Vanalar

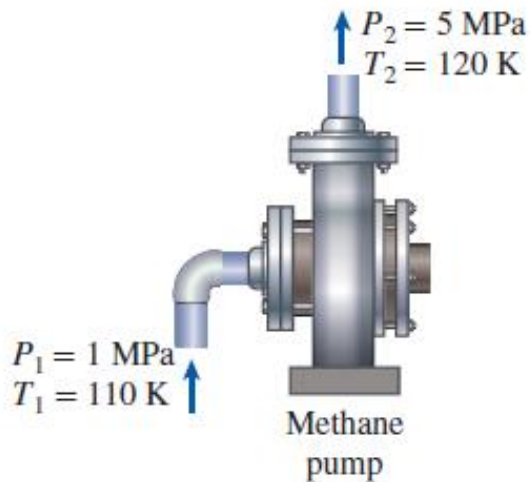
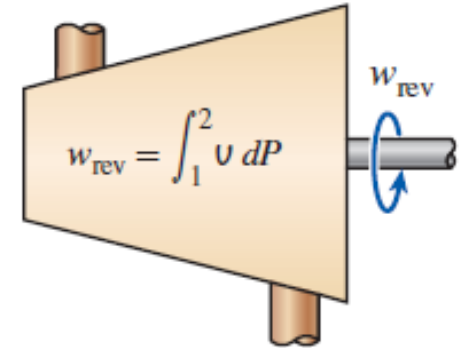
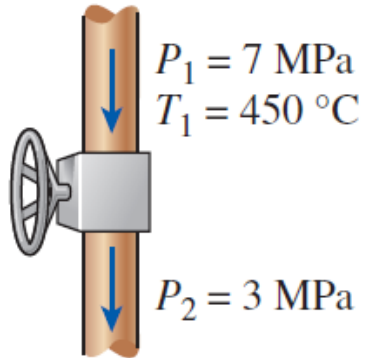
Not: Aksi belirtilmedikçe, şekiller Google görsellerinden alınmıştır.

# Industrial Valves:

Reduce (waste) fluid pressure, control flow rate  
(Necessary wasteful devices – just like brakes in the cars)



**Valves** (waste mechanical work).  
Use turbines instead.



# VALVES (Preserve energy, but destroy exergy):

Practically, the **best** invention of engineers (*easily control flow rate*).  
Thermodynamically, the **worst** invention of engineers (*destroy exergy*).

**Throttling valves** are *any kind of flow-restricting* devices that cause a significant pressure drop in the fluid.

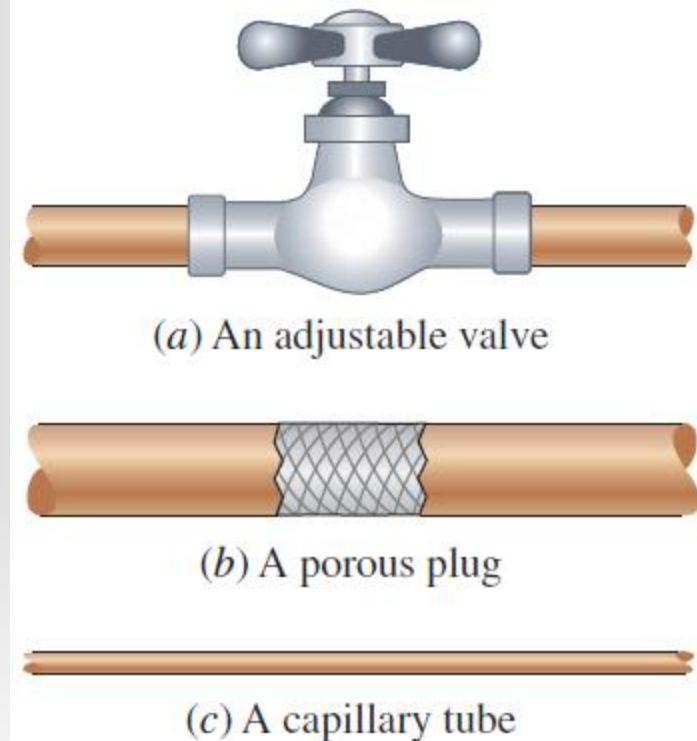
*Q: What is the difference between a turbine and a throttling valve?*

**Energy balance for a valve:**

$$h_2 \cong h_1 \quad (\text{kJ/kg})$$

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

Internal energy + Flow energy = Constant



**FIGURE 5-32**

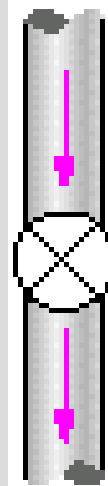
Throttling valves are devices that cause large pressure drops in the fluid.



# Replacing a valve by a turbine:

LNG Turbine at  $-150^{\circ}\text{C}$  ve 50 Bar

- At  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $-150^{\circ}\text{C}$ , replacing a valve that drops LNG pressure from 50 to 10 Bar by a turbine:
- 900 kW power production
- \$800,000/yr savings
- Turbine cost: \$1 million
- Payback:  $\sim 1$  year



## POWER RECOVERY THROUGH THERMODYNAMIC EXPANSION OF LIQUID METHANE

**YUNUS A. CENGEL**

Associate Professor

Department of Mechanical Engineering

University of Nevada, Reno

Reno, Nevada

**HANS KIMMEL**

Vice President

Research and Development

Ebara International Corporation

Sparks, Nevada

Kısım 1:

Sıvı brine hattının vana ile düşük basınca kısılması

Brine = Su+tuz+ergimiş gaz (NCG)

NCG=CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>S+...

## Amaç:

Bu kısmın amacı, jeotermal santrallerinde brine hattındaki bir vananın kısılarak **brine basıncı düşürüldüğünde**, vana çıkışında:

- Sıcaklık
- Brine debisi
- Buhar debisi
- NCG debisi
- Buharhattı debisi
- Brinehattı debisi

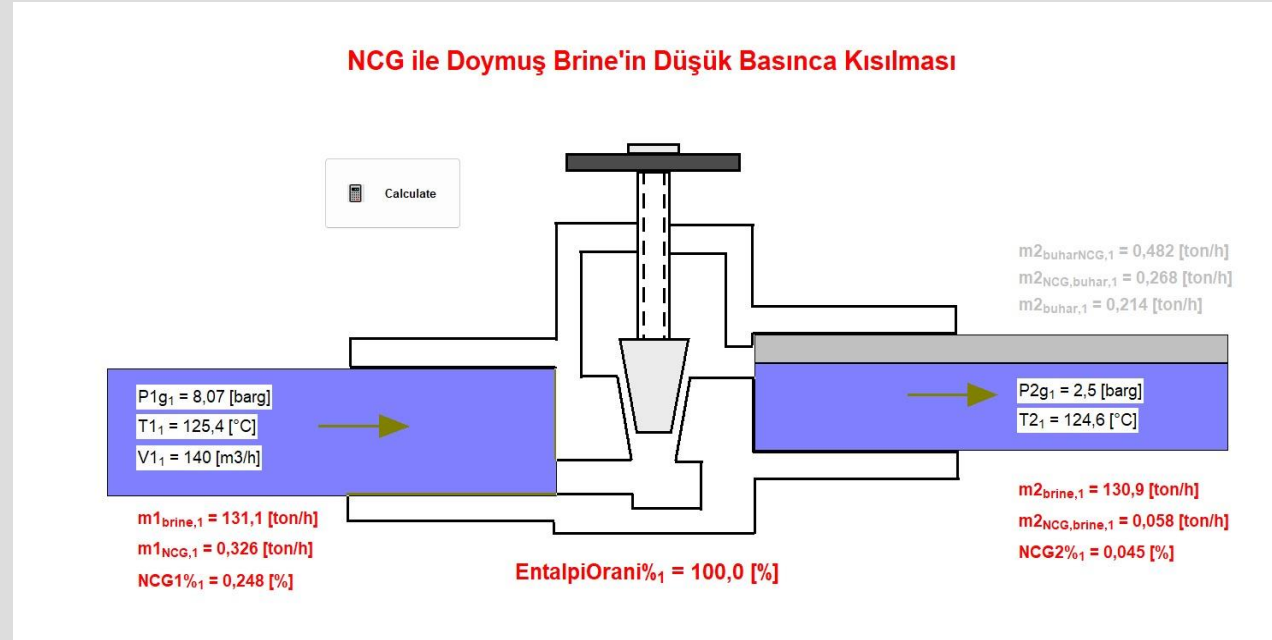
değerlerini bulmaktır.





## Analizde girilmesi gereken değerler

- Vana girişi brine T ve P değerleri, °C ve barg,
- Brine debisi, ton/h,
- Brine'in çözünmüş NCG ile doymuş olduğu bilgisi veya brine'da çözünmüş NCG kütle oranı
- Vana çıkışındaki basınç, barg.



## Hesaplanan değerler:

- Brine'in NCG ile doymuş olması durumunda, vana giriş şartlarında NCG kütle oranı ve debisi (Ellis-Golding denkleminde)
- Vana çıkış sıcaklığı, °C
- Vana giriş ve çıkışındaki entalpi değerleri, kJ/kg
- Vana çıkışında brine, buhar ve NCG debileri, ton/h
- Kısılma sonrası sıvı brine debisi, ton/h

## Analizde kullanılan temel prensipler:

- NCG için **maddenin korunumu** kanunu,  $m_{\text{NCG,giriş}} = m_{\text{NCG,çıkış}}$ .  
Yani, vana çıkışında brine ve buhar&NCG gaz karışımındaki NCG debilerinin toplamı, vana girişindeki NCG debisine eşittir.
- H<sub>2</sub>O (sıvı su + su buharı) için **maddenin korunumu** kanunu,  $m_{\text{H2O,giriş}} = m_{\text{H2O,çıkış}}$ .  
Yani, vana çıkışında saf brine ve buhar kütle debilerinin toplamı, vana girişindeki saf brine debisine eşittir.
- **Enerjinin korunumu kanunu**,  $h = \text{sabit veya } h_{\text{giriş}} = h_{\text{çıkış}}$ .  
Yani, kısma vanası girişindeki entalpi değeri (kJ/kg) ile vana çıkışındaki entalpi değeri (kJ/kg) birbirine eşittir (entalpi hesaplama algoritmalarındaki hata paylarından dolayı arada küçük bir fark oluşabilir).
- **Sıvıda çözünmüş gazlar** için, doyma şartlarında, **Henry'nin kanunu** geçerlidir.  
Özel olarak, sıvı fazda doymuş su – CO<sub>2</sub> çözeltileri için empirik **Ellis-Golding denklemi** geçerlidir. Separatörden çıkıp terfi pompasına giren brine, NCG ile doymuş haldedir. Doymuş brine'daki çözünmüş NCG kütle oranı Henry kanunundan Ellis-Golding denklemi ile bulunabilir. Hesaplanan bu NCG kütle oranı ve debisi brine hattı boyunca sabit kalır.
- Gaz karışımları için **Dalton kanunu** (ideal karışım) geçerlidir.

## Yapılan kabuller:

- 1) Brine için saf su ( $H_2O$ ) özellikleri kullanılmıştır. (Dayanak: Germencik bölgesinde brine'ın tuzluluk oranı genellikle %1'in bir kesri kadardır).
- 2) NCG gazı için karbondioksit ( $CO_2$ ) özellikleri kullanılmıştır. (Dayanak: NCG'deki  $CO_2$  oranı genellikle %95'in üzerindedir).
- 3) Vana çıkışındaki sıvı brine, NCG ile doymuş haldedir. Dolayısıyla sıvıda çözünmüş NCG kütle oranı Henry kanunundan hesaplanabilir.
- 4) Vana çıkışında buhar&NCG gaz karışımında buharın kısmi basıncı, separatör sıcaklığındaki suyun doyma basıncına (= buhar basıncı,  $P_v$ ) eşittir. NCG'nin kısmi basıncı, Dalton kanunu uyarınca hesaplanabilir.

## Akışkanın Sıvı Olması Durumu:

Kısmen basınç düşürme sırasında, **giriş** şartlarındaki **Joule-Thompson katsayısının** değerine bağlı olarak, akışkanın sıcaklığı **artabilir, azalabilir veya sabit kalabilir**.

- (a) **Sıvı girişi**,  $P_{\text{çıkış}} > P_{\text{doyma}@T_1}$ : Kısmen vanasına  $T_1$  sıcaklığında giren saf bir sıvı (içinde **NCG yok**) yine sıvı olarak çıkıyorsa, yani **faz değişimi yoksa**, sıcaklık sabit kalır ( $T_2 = T_1$ ). Yoğunluk da çok yaklaşık olarak sabit kalır. Yani vana ile kısılan sıvı, tüm işlem sırasında '**sıkıştırılmış sıvı**' halinde kalır.
- (b) **Sıvı girişi**,  $P_{\text{çıkış}} < P_{\text{doyma}@T_1}$ : Çıkış basıncı, giriş sıcaklığına karşılık gelen doyma basıncından daha düşük ise, sıvı çıkışta **kısmen buharlaşır**. Buharlaşma ısısının tamamı geri kalan sıvıdan geleceği için, çıkıştaki sıvı ve buhar karışımının sıcaklığı, giriş sıcaklığına kıyasla düşer ( $T_2 < T_1$ ). Bu durumda ortalama yoğunluk da düşer.

**Gaz hızının** vana çıkışında vana girişine kıyasla yüksek olması durumunda, karışım için  $h_2 = h_1$  yerine:

$$h_1 + V_1^2/2 = h_2 + V_2^2/2 \text{ denklemi kullanılmalıdır.}$$

## Akışkanın gaz olması durumu-1: İdeal gaz

İdeal gazların entalpileri sadece sıcaklığa bağlıdır,  $h=h(T)$ . Yani basınçtan bağımsızdır. Bu durumda, kısarak basınç düşürme işlemi sırasında, entalpinin sabit kalması halinde:

- ideal gazların sıcaklığı sabit kalır ( $T_2=T_1$ ).
- Yoğunluk ise basınçla orantılı olarak düşer.

Başta CO2 olmak üzere NCG genellikle az bir hata ile ideal gaz kabul edilebilir.

Vanalarla akışkanı kısma (throttling) işlemi sırasında sabit kalan aslında entalpi değil, **entalpi+kinetik enerji**'dir. Yani:

$$h + V^2/2 = \text{sabit.}$$

**Boru çapının sabit kalması** durumlarında akışkanın yoğunluğunun düşmesi ile hızı artar ve kinetik enerji terimindeki değişim ciddi olabilir. O yüzden bir ideal veya gerçek gaz vanadan geçirilerek basıncı düşürülünce, gazın hızındaki ve dolayısı ile kinetik enerjisindeki değişimi dikkate almak gerekebilir. Aksi taktirde hesaplanan gaz çıkış sıcaklığı gerçek gaz sıcaklığından daha yüksek olacaktır.



## Akışkanın gaz olması durumu-2: Gerçek Gaz

İdeal gaz yaklaşımından kaynaklanan hata yüksek ise (yüksek basınçta doymuş buhar gibi), gaz için ideal gaz kabulü yapılmaz. Bu durumda EES gibi programlar hal denklemlerini kullanarak, istenilen özellikleri kolaylıkla hesaplar.

Su gibi saf maddelerin özelliklerinin bulunabilmesi için, 2 bağımsız özelliğin bilinmesi gerekir. Bu durumda:

- giriş entalpi ve yoğunluk değerleri, giriş  $T_1$  ve  $P_1$  bilgisinden bulunabilir.
- çıkış sıcaklığı ve yoğunluğu da,  $h_2 = h_1$  olduğu dikkate alınarak (akışkan hızındaki değişim küçük ise),  $P_2$  ve  $h_2$  bilgisinden bulunur.

Gaz hızının vana çıkışında vana girişine kıyasla yüksek olması durumunda,  $h_2 = h_1$  yerine  $h_1 + V_1^2/2 = h_2 + V_2^2/2$  denklemi kullanılmalıdır.

Doymuş buharın bir vana ile daha düşük bir basınca kısılması durumunda, bir miktar buhar yoğunlaşabileceği gibi, doymuş buhar kızgın buhara da dönebilir.

### Akışkanın gaz olması durumu-3: **Gaz Karışımı** (Buhar&NCG gibi)

Bir **gaz karışımının** bir vana ile daha düşük bir basınca kısılması durumunda, akışkanın vana giriş ve çıkış hızları arasındaki fark büyük değilse, **karışımın entalpisi** sabit kalır.

Yani karışımın çıkıştaki entalpisi, girişteki entalpisine eşittir,  $h_{2, \text{karışım}} = h_{1, \text{karışım}}$ .

Ancak bu, karışımı oluşturan **her bir gaz** veya buharın entalpisinin sabit kalmasını gerektirmez.

**Gaz hızının** vana çıkışında vana girişine kıyasla yüksek olması durumunda, karışım için  $h_2 = h_1$  yerine  $h_1 + V_1^2/2 = h_2 + V_2^2/2$  denklemi kullanılmalıdır.

## Analiz prosedürü:

1. Vana girişinde brine'in debisi, sıcaklığı ve basıncı bilinmektedir. Eğer brine separatörden geliyorsa, separatör çıkışı NCG kütle oranı ve NCG kütle debisi de bellidir (veya Henry kanunundan kolayca hesaplanabilir). Eğer vana girişinde brine NCG ile doymuş haldeyse, içindeki NCG miktarı yine Henry kanunundan hesaplanabilir. Yani brine girişinde saf brine debisi ile brine'da çözünmüş NCG debisi bellidir veya kolayca hesaplanabilir.
2. Vana çıkış sıcaklığı için tahmini bir değer kabul edilir ve bu değer

$$m_{\text{vana giriş}} = m_{\text{vana çıkış}}$$

şartı sağlanıncaya kadar arttırılır veya azaltılır. Vanaya giren NCG debisinin vanadan çıkan NCG debisine eşit olduğu sıcaklık değeri, vana çıkış sıcaklığıdır.

3. Vana giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, brine vanada daha düşük bir basınca kısıılırken oluşan sıcaklık düşümünü verir:

$$\Delta T_{\text{düşüş, brine}} = T_{\text{vana giriş}} - T_{\text{vana çıkış}}$$

4. Vana çıkışında oluşan buhar debisi aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$m_{\text{buhar}} h_{\text{buharlaşma}} = m_{\text{brine}} C_{p, \text{brine}} \Delta T_{\text{düşüş, brine}}$$

6. Vana çıkış sıcaklığı, basıncı ve NCG kütle oranı bilindiğinde, vana çıkışında brine ve buhar hatlarındaki saf brine, buhar ve NCG kütle debileri hesaplanabilir.

## Su ve suda çözünmüş CO2 karışımının entalpisi (Sıvı faz)

(Referans (113 sayfa, 1991): *Wellbore Models GWELL, GWNACL, and HOLA – User's Guide* by Zosimo P. A. et al. Supported by US DOE. October 1991. <https://www.osti.gov/servlets/purl/937440>)

Türkiye’de jeotermal brine, genellikle %0.1 ile %3 arasında çözünmüş NCG içermektedir. NCG’nin de genellikle %99’dan fazlası CO2’dur.

Saf suyun entalpisi:  $h_{\text{brine}} = h_{\text{su}} = h_{\text{H}_2\text{O}@T,P}$

NCG’nin entalpisi:  $h_{\text{NCG}} = h_{\text{CO}_2} = C_{p,\text{CO}_2@T} T$  (ideal gas)

İdeal olmayan karışım işlemleri sırasında (gazın sıvıda çözünmesi gibi) ısı açığa çıkabilmekte veya emilebilmektedir. Böyle durumlarda, ‘çözünme entalpisi’ de dikkate alınmalıdır.

Çözünmüş CO2 içeren sıvı suyun entalpisi:

$$h_{\text{su\&CO}_2} = m_{\text{f}_{\text{su}}} h_{\text{su}} + m_{\text{f}_{\text{CO}_2}} (h_{\text{CO}_2} + h_{\text{çözünme}})$$

Çözünme entalpisi Ellis ve Golding ifadesinden hesaplanabilir (sıcaklık birimi °C):

$$h_{\text{çözünme}} = -1.351 \times 10^6 + 1.692 \times 10^4 T - 75.524 T^2 + 0.1318 T^3 \quad (\text{kJ/kg})$$

Burada  $m_{\text{f}_{\text{CO}_2}}$ , suda çözünmüş CO2 kütle oranıdır.

## Sıvı+gaz durumunda (2 faz):

$$h_{\text{iki faz}} = [h_{\text{su}} m_{\text{su,brinehattı}} + h_{\text{buhar}} m_{\text{buhar,buharhattı}} + h_{\text{CO2}} m_{\text{CO2,buharhattı}} + (h_{\text{CO2}} + h_{\text{çözünme}}) m_{\text{CO2,brinehattı}}] / m_{\text{toplam}}$$

Burada:

$$m_{\text{toplam}} = (m_{\text{su,brinehattı}} + m_{\text{CO2,brinehattı}}) + (m_{\text{buhar,buharhattı}} + m_{\text{CO2,buharhattı}})$$

## Sıvı brine hattı basıncı ve yoğunluğu :

Sıvı su+CO2 karışımındaki çözünmüş CO2'nun kısmi basıncı düşüktür. O yüzden:

$$P_{\text{brine}} = P_{\text{su+CO2}} = P_{\text{su}}$$

$$\rho_{\text{brine}} = \rho_{\text{su+CO2}} = \rho_{\text{su}}$$

**Örnek 1:** Bir santralin brine hattında bulunan bir vanaya brine 125.4°C sıcaklık, 8.07 barg basınç ve 140 m<sup>3</sup>/h debi ile NCG ile doymuş halde girmektedir. Vana çıkış basıncı 2.5 barg'dır. Vana çıkış sıcaklığını ile buhar, NCG gaz, buharhattı ve brinehattı debilerini hesaplayınız.

Verilenler:

T\_vanagiris=125.4 "Sivi brine giris sicakligi, C"

P\_vanagiris\_gage=8.07 "Sivi brine giris gage basinci, barg)"

P\_vanagiris=P\_vanagiris\_gage+1 "Sivi brine giris mutlak basinci, bara"

V\_vanagiris = 140 "Vanaya giren brine hacim debisi, m<sup>3</sup>/h"

P\_vanacikis\_gage=2.5 "Vana cikisi gage basinci, barg"

**Çözüm:** Bu problem EES programı ile çözülmüş ve sonuçlar aşağıdaki şemada gösterilmiştir. Şemadan görüleceği gibi, hesaplanan vana çıkışındaki sıcaklık 124.6°C'dir ki 0.8°C'lik bir sıcaklık düşüşüne işaret etmektedir. Debiler şemada verildiği gibidir.

## Çözüm (EES):

$cp_{brine} = 4.251$  [kJ/kg.K]  
 $h_{buharlasma} = 2189$  [kJ/kg]  
 $mf_{buhar} = 0.44$   
 $m_{buharhatti} = 0.481$  [ton/h]  
 $m_{NCG,buharhatti} = 0.268$  [ton/h]  
 $m_{safbrine,brinehatti} = 130.9$  [ton/h]  
 $m_{vanagiris} = 131.4$  [ton/h]  
 $NCG\%_{vanagiris} = 0.25$  [%]  
 $NCG_{vanagiris} = 0.00248$   
 $P_{vanacikis} = 3.5$  [bara]  
 $P_{vanagiris,gage} = 8.07$  [barg]  
 $p_{CO2,vanacikis} = 1.61$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $T_{vanacikis} = 124.6$  [°C]  
 $V_{vanagiris} = 140$  [m<sup>3</sup>/h]

$\Delta T_{dusus} = 0.84$  [°C]  
 $h_{cikis} = 526.4$  [kJ/kg]  
 $mf_{NCG} = 0.56$   
 $m_{buhar,buharhatti} = 0.213$  [ton/h]  
 $m_{NCG,vanacikis} = 0.326$  [ton/h]  
 $m_{safbrine,vanagiris} = 131.1$  [ton/h]  
 $NCG\%_{brinehatti} = 0.045$  [%]  
 $NCG_{brinehatti} = 0.00045$   
 $P_{vanacikis} = 2.291$  [bara]  
 $P_{vanacikis,gage} = 2.5$  [barg]  
 $p_{buhar\&NCG,vanacikis} = 2.892$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $p_{vanagiris} = 938.7$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $T_{vanacikis,doyma} = 138.9$  [°C]

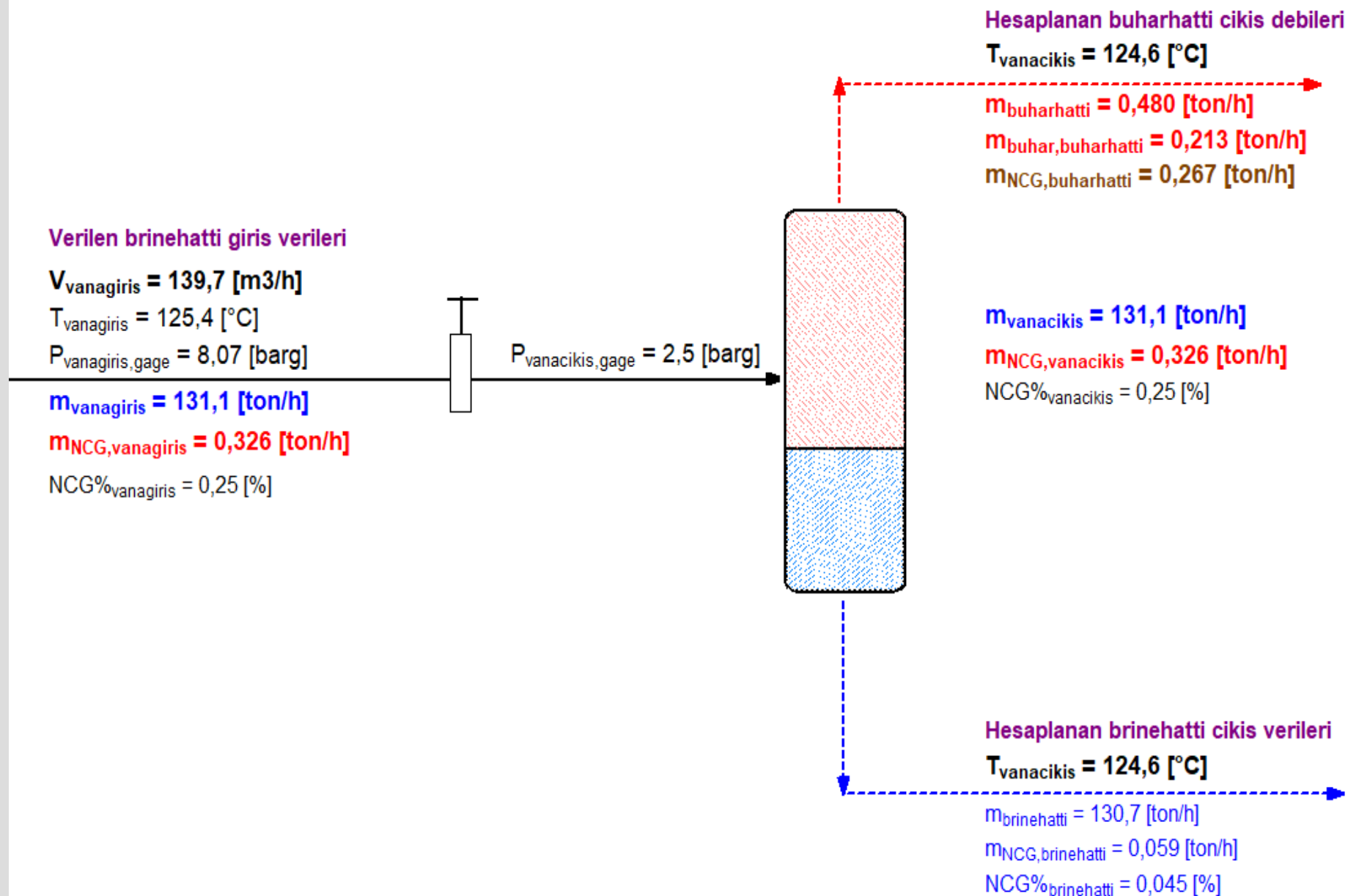
EntalpiOrani = 1.000  
 $h_{giris} = 526.5$  [kJ/kg]  
 $m_{brinehatti} = 130.9$  [ton/h]  
 $m_{NCG,brinehatti} = 0.059$  [ton/h]  
 $m_{NCG,vanagiris} = 0.326$  [ton/h]  
 $m_{vanacikis} = 131.4$  [ton/h]  
 $NCG\%_{vanacikis} = 0.25$  [%]  
 $NCG_{vanacikis} = 0.00248$   
 $P_{CO2,vanacikis} = 1.209$  [bara]  
 $P_{vanagiris} = 9.07$  [bara]  
 $p_{buhar,vanacikis} = 1.282$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $R_{CO2} = 0.1889$  [kJ/kg.K]  
 $T_{vanagiris} = 125.4$  [°C]

## Kontrol/teyit

Hesaplanan vana çıkış sıcaklığının doğruluğu, yukarıdaki formülleri kullanarak, vana giriş ve çıkışında entalpi değerlerini hesaplayarak teyit edilir.



## Çözüm (EES) - Grafik:



Kısım 2:

Buhar&NCG hattının vana ile düşük basınca kısılması

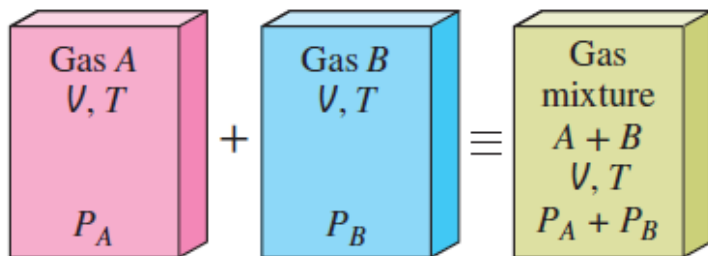
$NCG = CO_2 + H_2S + \dots$

Not: NCG, tamamına yakını  $CO_2$  olduğu için (%99; gerisi  $H_2S$ )  $CO_2$  alınmıştır.

## Kısmi basınç:

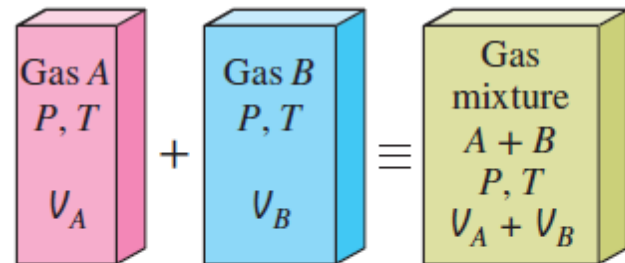
Gaz karışımını oluşturan komponentlerin kısmi basınçları toplamı, karışımın basıncına eşittir. Karışımındaki her bir komponentin istenilen özellikleri *kendi kısmi basıncı ve karışım sıcaklığında* bulunur. (Çengel, Thermodynamics).

$$\left. \begin{array}{l} \text{Dalton's law:} \\ \\ \text{Amagat's law:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m) \\ \\ V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, P_m) \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{exact for ideal gases,} \\ \\ \text{approximate} \\ \text{for real gases} \end{array} \right.$$



**FIGURE 14–5**

Dalton's law of additive pressures for a mixture of two ideal gases.



**FIGURE 14–6**

Amagat's law of additive volumes for a mixture of two ideal gases.

## Gaz Karışımları Temel Denklemleri

Bir gaz karışımının molar kütlesi  $M_m$  (kg/kmol) ve eşdeğer gaz sabiti  $R_m$ , komponentlerin mole oranı  $y_i$  veya kütle oranı  $mf_i$  cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır (Çengel, Thermodynamics):

$$mf_i = \frac{m_i}{m_m} \quad \text{and} \quad y_i = \frac{N_i}{N_m}$$

$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{\sum m_i}{N_m} = \frac{\sum N_i M_i}{N_m} = \sum_{i=1}^k y_i M_i$$

$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \frac{m_m}{\sum m_i / M_i} = \frac{1}{\sum m_i / (m_m M_i)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{mf_i}{M_i}}$$

$$mf_i = \frac{m_i}{m_m} = \frac{N_i M_i}{N_m M_m} = y_i \frac{M_i}{M_m}$$

$$R_m = \frac{R_u}{M_m}$$

Bir komponentin kısmi basıncı, o komponentin mol oranı ile karışımın basıncının çarpımına eşittir:

$$\frac{P_i}{P_m} = \frac{V_i}{V_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i$$

Bu ifade, **ideal gazlar** için tam doğru, ancak gerçek gazlar için yaklaşık olarak doğrudur.

## Yoğunluk:

Karışımın yoğunluğu, komponentlerin kısmi basınç ve karışım hacim ve sıcaklığında hesaplanmış olan yoğunluklarının toplamıdır. Buhar ve NCG karışımları için:

$$P_{\text{karışım}} = P_{\text{buhar}} + P_{\text{NCG}}$$

$$\rho_{\text{karışım}} = \rho_{\text{NCG}} \left( \frac{P_{\text{NCG}}}{P_{\text{karışım}}} \right) + \rho_{\text{buhar}} \left( \frac{P_{\text{buhar}}}{P_{\text{karışım}}} \right)$$

Analizde genellikle NCG (veya CO<sub>2</sub>) için ideal gaz denklemleri kullanılır.

Buhar genellikle gerçek gaz kabul edilir ve özellikleri tablolardan (veya EES) alınır.

**Karışımın entalpisi**, komponentlerin entalpilerinin ağırlıklı ortalamasıdır:

$$h_m = \sum_{i=1}^k m f_i h_i$$

$$\bar{h}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i$$

**Buhar&NCG** gaz karışımının **entalpi**  $h$  ve **viskozitesi**,  $\mu$ :

$$h_{\text{buhar\&NCG}} = m f_{\text{buhar}} h_{\text{buhar}} + m f_{\text{NCG}} h_{\text{NCG}} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\mu_{\text{buhar\&NCG}} = m f_{\text{buhar}} \mu_{\text{buhar}} + m f_{\text{NCG}} \mu_{\text{NCG}} \quad (\text{kg/m.s})$$

## Separatörlerde $P$ ve $T$ bilgisinden Buhar ve NCG Oranlarının Hesaplanması

Separatördeki buhar&NCG gaz karışımındaki buharın separatör sıcaklığında (veya buharın kısmi basıncında) doymuş buhar olduğu kabul edilebilir. Bu durumda **buharın kısmi basıncı**, suyun separatör sıcaklığındaki ( $T$ ) buhar basıncı  $P_v$  olmak zorundadır. Separatör basıncı ( $P = P_{\text{buharNCG}}$ ) ile buhar kısmi basıncı  $P_v$  arasındaki fark da **NCG kısmi basıncı**dır.

$$\text{Buhar kısmi basıncı: } P_{\text{buhar}} = P_v = P_{\text{su, doyma@T}}$$

$$\text{NCG kısmi basıncı: } P_{\text{NCG}} = P_{\text{buharNCG}} - P_{\text{buhar}} \quad (\text{ve } P_{\text{CO}_2} = P_{\text{NCG}})$$

Buhar&NCG karışımındaki buhar ve NCG **yoğunlukları**:

$$\rho_{\text{buhar}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{g, H}_2\text{O@T}} (= \rho_{\text{g, H}_2\text{O@P}_v}) \quad (\text{Buhar tabloları veya EES'den})$$

$$\rho_{\text{NCG}} = \rho_{\text{CO}_2} = P_{\text{CO}_2}/R_{\text{CO}_2}T \quad (T \text{ için Kelvin birimi kullanılmalıdır; } K = ^\circ\text{C} + 273)$$

$$\rho_{\text{buharNCG}} = \rho_m = \rho_{\text{buhar}} + \rho_{\text{CO}_2}$$

Su ve CO<sub>2</sub> için bazı kimyasal özellikler (molar kütle  $M$ , gaz sabiti  $R$ , özgül ısı oranı  $k = C_p/C_v$ ):

$$\text{H}_2\text{O:} \quad \text{Molar kütle: } M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ kg/kmol; Gaz sabiti: } R_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4615 \text{ kJ/kg.K; } k = 1.33$$

$$\text{CO}_2: \quad \text{Molar kütle: } M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ kg/kmol; Gaz sabiti: } R_{\text{CO}_2} = 0.1889 \text{ kJ/kg.K; } k = 1.29$$

## Buhar ve NCG kütle oranları:

Buhar&NCG karışımının toplam kütle debisi  $m_{\text{buharNCG}}$  ise, buhar ve NCG'nin **kütle debileri**:

$$\text{Buhar kütle debisi: } m_{\text{buhar}} = mf_{\text{buhar}} \times m_{\text{buharNCG}}$$

$$\text{NCG kütle debisi: } m_{\text{NCG}} = mf_{\text{NCG}} \times m_{\text{buharNCG}} = m_{\text{buharNCG}} - m_{\text{buhar}}$$

**1 m3** buhar&NCG karışımındaki buhar ve NCG **mole sayısı**:

$$N_{\text{buhar}} = m_{\text{buhar}}/M_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{buhar}}/M_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{buhar}}/18$$

$$N_{\text{NCG}} = m_{\text{NCG}}/M_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{NCG}}/M_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{NCG}}/44$$

$$N_{\text{buharNCG}} = N_m = N_{\text{buhar}} + N_{\text{NCG}}$$

Buhar ve NCG'nin **mole oranları**:

$$y_{\text{buhar}} = N_{\text{buhar}}/N_{\text{buharNCG}}$$

$$y_{\text{NCG}} = N_{\text{NCG}}/N_{\text{buharNCG}}$$

(**Not:** Buhar&NCG gaz karışımının ideal gaz kabul edilebildiği durumlarda, mole oranları Dalton kanunundan kolayca hesaplanabilir:  $y_{\text{buhar}} = P_{\text{buhar}}/P_{\text{buharNCG}}$  ve  $y_{\text{NCG}} = P_{\text{NCG}}/P_{\text{buharNCG}}$ .)

Buhar&NCG gaz karışımının **molar kütlesi** ve **gaz sabiti**:

$$M_{\text{buharNCG}} = y_{\text{buhar}} M_{\text{buhar}} + y_{\text{NCG}} M_{\text{NCG}}$$

$$R_{\text{buharNCG}} = R_u / M_{\text{buharNCG}} = (8.314 \text{ kJ/kmol.K}) / M_{\text{buharNCG}}$$

Buhar ve CO2 entalpileri (EES veya tablolardan).

$$h_{\text{buhar}} = h_{g, \text{H}_2\text{O}@T} (= h_{g, \text{H}_2\text{O}@P_v})$$

$$h_{\text{NCG}} = h_{\text{CO}_2} = C_{p, \text{CO}_2}@T T$$

**Örnek 2:** 10 bar (mutlak) basınçtaki **saf doymuş pentan buharı** (içinde hiç NCG yok), bir vanada kısılarak, basıncı 8 bar'a düşürülmektedir. Vana çıkışında buharın sıcaklığını ve eğer yoğuşma olmuşsa yoğuşan buharın yüzdesini bulunuz.

**Çözüm:** Bu bir basınç düşürme işlemidir ve bu işlem sırasında akışkanın entalpisi sabit kalmaktadır.

Girişteki entalpi, verilen basınçtaki doymuş buharın entalpisidir:

$$h_1 = h_{g@P_1} = h_{g@10 \text{ bar}} = 2777 \text{ kJ/kg} \quad (\text{EES})$$

$$\text{Keza, } T_1 = T_{\text{doyma}@P_1} = T_{\text{doyma}@10 \text{ bar}} = 170^\circ\text{C}. \quad (\text{EES})$$

Çıkıştaki basınç  $P_2 = 8 \text{ bar}$  ve entalpi  $h_2 = h_1 = 2777 \text{ kJ/kg}$ 'a karşılık gelen sıcaklık (EES'den):

$$T_2 = T(P=10 \text{ bar}, h=2777 \text{ kJ/kg}) = \mathbf{173.8^\circ\text{C}}. \quad (\text{EES})$$

Keza,  $T_{\text{doyma}@P_2} = T_{\text{doyma}@8 \text{ bar}} = \mathbf{170.4^\circ\text{C}}$ . Buharın çıkış sıcaklığı çıkış basıncındaki doyma sıcaklığından yüksek olduğundan ( $T_2 > T_{\text{doyma}@P_2}$ ), yoğunlaşma olmamıştır. Aksine, doymuş buhar  $173.8 - 170.4 = 3.4^\circ\text{C}$  fazlalıkla **kızgın buhara dönüşmüştür**.

**Not:** Bu örnek göstermektedir ki basıncın düşmesiyle doymuş buhar illa yoğuşmaz; tam tersine kızgın buhara dönebilir. Buhar iyi izole edilmiş borularda akarken böyle bir durum yaşanabilir ve hiç yoğuşma olmayabilir.



## Örnek 2 için tüm sonuçlar

$$h_1 = 2777 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_2 = 2777 \text{ [kJ/kg]}$$

$$P_1 = 1000 \text{ [kPa]}$$

$$P_2 = 800 \text{ [kPa]}$$

$$T_1 = 179.9 \text{ [C]}$$

$$T_{1\text{doyma}} = 179.9 \text{ [C]}$$

$$T_2 = 173.8 \text{ [C]}$$

$$T_{2\text{doyma}} = 170.4 \text{ [C]}$$

$$T_{\text{Degisim}} = -6.037 \text{ [C]}$$

**Örnek 3:** Bir jeotermal kuyunun separatörü  $T = 170^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $P = 12$  bar mutlak (11 bar gage) basınçta çalışmaktadır. Kuyudan gelen brine debisi 400 ton/h'tir ve kuyu flash point ölçümlerinden brine içindeki çözünmüş **NCG kütle oranının %1.5** olduğu hesaplanmıştır. NCG için  $\text{CO}_2$  özellikleri kullanarak, buhar&NCG hattına giren buhar ve NCG kütle oranlarını, kütle debilerini, buhar&NCG karışımının yoğunluğunu ve entalpisini hesaplayınız.

Ayrıca, buharı ideal gaz almanın ve buhar&NCG karışımını bir ideal gaz karışımı olarak irdelemenin buhar&NCG gaz karışımının yoğunluk hesabında yüzde kaç hataya sebep olduğunu bulunuz.

**Çözüm:** Yukarıda buhar&NCG karışımı için verilen ifadeleri kullanarak ve gerekli buhar ve  $\text{CO}_2$  özelliklerini EES'den alarak (Not: Analizlerde genellikle *mutlak basınç* kullanılır):

Buhar ve NCG kısmi basınçları:

$$P_{\text{buhar}} = P_v = P_{\text{doyma@T}} = P_{\text{doyma@170}^{\circ}\text{C}} = 7.922 \text{ bara} = \mathbf{792.2 \text{ kPa}} \text{ [EES]}$$

$$P_{\text{NCG}} = P - P_{\text{buhar}} = 1200 - 792 = \mathbf{407.8 \text{ kPa}}$$

Buhar ve NCG yoğunlukları:

$$\rho_{\text{buhar}} = \rho_{\text{g, H}_2\text{O@T}} = \rho_{\text{g, H}_2\text{O@170}^{\circ}\text{C}} = \mathbf{4.122 \text{ kg/m}^3} \text{ [EES]}$$

$$\rho_{\text{NCG}} = \rho_{\text{CO}_2, \text{ideal gaz@T,P}} = \rho_{\text{CO}_2, \text{ideal gaz@170}^{\circ}\text{C}, 12 \text{ bar}} = \mathbf{4.871 \text{ kg/m}^3} \text{ [EES]}$$

$$(\text{Veya } \rho_{\text{NCG}} = \rho_{\text{CO}_2} = P_{\text{CO}_2} / R_{\text{CO}_2} T = (407.8 \text{ kPa}) / [(0.1889 \text{ kPa.m}^3/\text{kg.K})(170+273)] = 4.872 \text{ kg/m}^3)$$

Buhar&NCG gaz karışımı yoğunluğu:

$$\rho_{\text{buharNCG}} = \rho_{\text{buhar}} + \rho_{\text{CO}_2} = 4.122 + 4.871 = \mathbf{8.993 \text{ kg/m}^3}$$

Buhar ve NCG kütle oranları:

$$mf_{\text{buhar}} = m_{\text{buhar}}/m_{\text{buharNCG}} = 4.122/8.993 = \mathbf{0.458 \text{ } (\%45.8)}$$

$$mf_{\text{NCG}} = \rho_{\text{CO2}}/\rho_{\text{buharNCG}} = 1 - mf_{\text{buhar}} = 1 - 0.458 = \mathbf{0.542 \text{ } (\%54.2)}$$

NCG'nin kütle debisi:

$$m_{\text{NCG}} = \text{NCG oranı} \times \text{Kuyuiçi toplam kütle debisi} = 0.015 \times 400 = \mathbf{6 \text{ ton/h}}$$

Buhar&NCG gaz hattı toplam kütle debisi ve buhar debisi:

$$m_{\text{buharNCG}} = m_{\text{NCG}}/mf_{\text{NCG}} = 6/0.542 = \mathbf{11.1 \text{ ton/h}}$$

$$m_{\text{buhar}} = m_{\text{buharNCG}} - m_{\text{NCG}} = 11.1 - 6 = \mathbf{5.1 \text{ ton/h}}$$

Buhar&NCG gaz karışımının birim kütle başına entalpisi (kJ/kg):

$$h_{\text{buhar}} = h_{\text{g, H2O@T}} = h_{\text{g, H2O@170°C}} = 2768 \text{ kJ/kg [EES]}$$

$$h_{\text{NCG}} = h_{\text{CO2}} = C_{p, \text{CO2@T}} T = C_{p, \text{CO2@170°C}} T = (0.976 \text{ kJ/kg.K})(170+273) = 432.2 \text{ kJ/kg [EES]}$$

$$h_{\text{buharNCG}} = mf_{\text{buhar}} h_{\text{buhar}} + mf_{\text{NCG}} h_{\text{NCG}} = 0.458 \times 2768 + 0.542 \times 432.2 = \mathbf{1503 \text{ kJ/kg}}$$

## Molar Analiz:

Aşağıda buhar&NCG gaz karışımının **molar analizi** verilmiştir:

Buhar ve NCG mole sayıları (m<sup>3</sup> başına):

$$N_{\text{buhar}} = \rho_{\text{buhar}} / M_{\text{H}_2\text{O}} = 4.122 / 18 = 0.229 \text{ kmol}$$

$$N_{\text{NCG}} = \rho_{\text{NCG}} / M_{\text{CO}_2} = 4.871 / 44 = 0.111 \text{ kmol}$$

Toplam mole sayısı (m<sup>3</sup> başına):

$$N_{\text{buharNCG}} = N_{\text{buhar}} + N_{\text{NCG}} = 0.229 + 0.111 = 0.340 \text{ kmol}$$

Buhar ve NCG mole oranları:

$$y_{\text{buhar}} = N_{\text{buhar}} / N_{\text{buharNCG}} = 0.229 / 0.340 = 0.674 \text{ (%67.4)}$$

$$y_{\text{NCG}} = N_{\text{NCG}} / N_{\text{buharNCG}} = 0.111 / 0.340 = 0.326 \text{ (%32.6)}$$

Buhar&NCG gaz karışımının molar kütlesi ve gaz sabiti:

$$M_{\text{buharNCG}} = y_{\text{buhar}} M_{\text{buhar}} + y_{\text{NCG}} M_{\text{NCG}} = 0.674 \times 18 + 0.326 \times 44 = 26.5 \text{ kg/kmol}$$

$$R_{\text{buharNCG}} = R_u / M_{\text{buharNCG}} = 8.314 / 26.5 = 0.3141 \text{ kJ/kg.K}$$

## Buharı ideal gaz kabul etmedeki hata oranı:

Buhar&NCG gaz karışımının ideal gaz kabulüyle yoğunluğu:

$$\rho_{\text{buharNCG, ideal gaz}} = (P/RT)_{\text{buharNCG}} = (1200 \text{ kPa})/[(0.3141 \text{ kPa.m}^3/\text{kg.K})(170+273)] = 8.625 \text{ kg/m}^3$$

Karışımın gerçek yoğunluğu yukarıda 8.993 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştu. O halde hata oranı:

$$\text{Hata oranı} = (8.993 - 8.625)/8.993 = 0.041 \text{ (\%4.1)}$$

Yani, 170°C ve 12 bar'daki buhar&NCG gaz karışımını ve bu karışımdaki buharı ideal gaz kabul etmenin sebep olduğu hata sadece %4 civarındır ki kabul edilebilir bir miktardır. Daha düşük separatör basınçlarında (ve daha yüksek separatör sıcaklıklarında) bu hata daha da küçük olacaktır.

Eğer tek başına buharı ideal gaz kabul ederek yoğunluğunu hesaplarsak:

$$\rho_{\text{buhar, ideal gaz}} = P_{\text{buhar}}/R_{\text{H}_2\text{O}}T = (792.2 \text{ kPa})/[(0.4615 \text{ kPa.m}^3/\text{kg.K})(170+273)] = 3.875 \text{ kg/m}^3$$

elde ederiz. Bu değer, gerçek değer olan 4.122 kg/m<sup>3</sup> değerine kıyasla, (4.122-3.875)/4.122 = 0.060 yani %6 hata içermektedir.

Yukarıda belirlenen düşük hata oranları göstermektedir ki, jeotermal güç üretimi uygulamalarında karşılaşılan sıcaklık ve basınçlarda, buhar&NCG karışımı, %10'un altında bir hata ile, karışım özelliklerine sahip bir ideal gaz kabul edilebilir.

**Not:** İdeal gazlar ve ideal gaz karışımları bir vana ile daha düşük bir basınca kısıldıkları zaman, hızdaki (ve dolayısıyla kinetik enerjideki) değişim büyük değilse, sıcaklıkları değişmez. O halde buhar&NCG gaz karışımının basıncı düşürüldüğünde, sıcaklıktaki değişim küçük olacaktır.

## NOTLAR:

**Not 1:** Buhar&NCG hatlarında yoğuşmanın ana sebebi, borulardan olan ısı kaybının sebep olduğu sıcaklık düşümüdür. Borulardaki basınç kayıplarının etkisi, buharı kızgın buhar bölgesine itmek ve dolayısı ile yoğuşmayı önlemektir. O yüzden çok iyi izole edilmiş buhar&NCG hattında, bilhassa hat çok uzun değilse, yoğuşma olması beklenmez. Gerçek durum, hatlarda ısı transferi analizi ile belirlenir. Vanalarda kısılma, doymuş buharı kızgın buhara dönüştürme yönünde etki edecektir.

**Not 2:** Separatörde NCG her zaman buhar ile doymuş olacağından ve buhar&NCG hattına doymuş buhar gireceğinden, hattaki buhar&NCG karışımındaki buhar oranı, separatör sıcaklık  $T$  ve basıncı  $P$  değerleri ile sabitlenir. Hatlarda ısı kaybı ve basınç düşümünün izafi büyüklüklerine bağlı olarak, buharın bir kısmı yoğunlaşabileceği gibi, buharın tamamı kızgın buhara da dönüşebilir.

**Not 3:** Kuyulardan gelen buhar&NCG bağlantı hatlarının ana hatta bağlandığı noktalarda (ki buhar, basınç düşürücü kısıcıcı bir vanadan geçmemişse, verilen sıcaklıkta doymuş buhardır), iki hat arasında sıcaklık farkı olması durumunda, karışım sonrası oluşan sıcaklık, ana hat veya bağlantı hattından gelen buharın doyma sıcaklığının altına düşebilir. Bu durumda bir miktar buhar yoğuşur.

**Örnek 4:** Örnek 3'te analiz edilen separatörde 170°C sıcaklık ve  $P = 12$  bar mutlak (11 bar gage) basınçtaki buhar&NCG gaz karışımı, buhar&NCG hattına girerken bir vanadan geçirilerek 10 bar olan hat basıncına düşürülmüştür. Buhar&NCG gaz karışımının yoğunluk ve sıcaklığındaki değişim nedir?

**Çözüm:** Buhar&NCG hattına girişteki yoğunluk Örnek 1'de 170°C ve 12 bar şartlarında 8.993 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştı. Borularda akan akışkanların basınçlarının bir vana ile daha düşük bir basınca düşürülmeleri sırasında entalpi yaklaşık sabit kalır ( $h_2 = h_1 = 1503$  kJ/kg).

EES kullanarak, çıkış basıncı  $P_2 = 10$  bar mutlak ve  $T_2$  için 170°C civarında bazı sıcaklık değerleri için Örnek 1'deki hesaplamalar tekrarlanırsa,  $h_2 = 1503$  kJ/kg değerini veren  $T_2$  değeri 168°C alındığı zaman  $h_2 = h_1 = 1503$  kJ/kg olmaktadır. Yoğunluk da 7.401 kg/m<sup>3</sup> olmuştur. O halde:

$$\text{Sıcaklık değişimi} = T_2 - T_1 = 168 - 170 = -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Yoğunluk değişimi} = \rho_2 - \rho_1 = 7.401 - 8.993 = -1.592 \text{ kg/m}^3 \text{ (%18 düşüş)}$$

Yani, basınç 12 bar'dan 10 bar'a düşürülünce, buhar&NCG gaz karışımının sıcaklığı 2°C düşmüş, yoğunluk da %18 azalarak 8.993 kg/m<sup>3</sup>'ten 7.401 kg/m<sup>3</sup> değerine düşmüştür.

**Not 1:** Buhar&NCG gaz karışımının bir ideal gaz karışımı olduğunu kabul edip mole oranı Dalton kanunundan hesaplandığında (mole oranı = kısmi basıncın toplam basınca oranı) oluşan hata:

Giriş şartlarında:

Gerçek gaz analizi (EES):  $y_{\text{CO}_2} = 0.3259$ ;  $y_{\text{buhar}} = 0.6741$

İdeal gaz analizi (Dalton's law):  $y_{\text{CO}_2} = 0.3398$ ;  $y_{\text{buhar}} = 0.6602$

**İdeal gaz analizinin** sebep olduğu hata:

CO2 için:  $(0.3398 - 0.3259)/0.3259 = 0.043$  (%4.3)

Buhar için:  $(0.6741 - 0.6602)/0.6741 = 0.021$  (%2.1)

Görüldüğü gibi, ideal gaz kabulü ile yapılan analizlerde yapılan hata, sistemdeki belirsizliklerden çok daha küçüktür.

**Not 2:** Vana çıkışında buharın kısmi basıncı 674.1 kPa'dır ve bu basınca karşılık gelen doyma sıcaklığı 163.4°C'dir – ki çıkış sıcaklığı olan 168°C'nin 168 – 163.4 = 4.6°C üzerindedir. Yani çıkışta buhar doymuş değil **kızgın buhardır**. O yüzden vanadan geçiş sırasında buharın **yoğuşması** söz konusu değildir.

Bu demektir ki separatör çıkışında buhar&NCG basıncının bir vana ile düşürüldüğü durumlarda, buhar&NCG hattının ilk kısımlarında yoğuşma beklenmemelidir. Ancak borulardan olan ısı kaybından dolayı sıcaklık (ve entalpi) düşüşü ve borudaki sürtünmeler etkisiyle oluşan basınç kayıplarından dolayı da basınç bir miktar düşecektir. O yüzden buhar&NCG hattının ileriki kısımlarında yoğuşma beklenebilir. Yani vana ile basıncın düşürülmesi, buharın olası yoğuşmasını öteleme etkisi yapmıştır.



## Örnek 4 için tüm sonuçlar (EES)

$$h1 = 1503 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h2 = 1503 \text{ [kJ/kg]}$$

$$mf_{\text{buhar}} = 0.4584$$

$$MM_{\text{buharNCG}} = 26.47 \text{ [kg/kmol]}$$

$$m_{\text{buharNCG}} = 11.08 \text{ [ton/h]}$$

$$m_{\text{toplam}} = 400$$

$$P1_{\text{buhar}} = 792.2 \text{ [kPa]}$$

$$P2_{\text{buhar}} = 674.1 \text{ [kPa]}$$

$$\rho1 = 8.993 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho1_{\text{CO2}} = 4.871 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho2 = 7.401 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho2_{\text{ideal}} = 7.22 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{\text{CO2}} = 0.1889 \text{ [kJ/kg.K]}$$

$$T2 = 168 \text{ [C]}$$

$$V1 = 0.3421 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$y_{\text{CO2}} = 0.3259$$

$$h1_{\text{buhar}} = 2768 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h2_{\text{buhar}} = 2773 \text{ [kJ/kg]}$$

$$mf_{\text{CO2}} = 0.5416$$

$$MM_{\text{CO2}} = 44 \text{ [kg/kmol]}$$

$$m_{\text{KGS}} = 3.077 \text{ [kg/s]}$$

$$NCG_{\text{orani}} = 0.015$$

$$P1_{\text{CO2}} = 407.8 \text{ [kPa]}$$

$$P2_{\text{CO2}} = 325.9 \text{ [kPa]}$$

$$\rho1_{\text{buhar}} = 4.122 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho1_{\text{CO2,ideal}} = 4.873 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho2_{\text{buhar}} = 3.49 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{\text{buhar}} = 0.4615 \text{ [kJ/kg.K]}$$

$$T1 = 170 \text{ [C]}$$

$$T2_{\text{buhar,doyma}} = 163.4 \text{ [C]}$$

$$y_{\text{buhar}} = 0.6741$$

$$y_{\text{CO2,ideal}} = 0.3398$$

$$h1_{\text{CO2}} = 432.2 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h2_{\text{CO2}} = 429.6 \text{ [kJ/kg]}$$

$$MM_{\text{buhar}} = 18 \text{ [kg/kmol]}$$

$$m_{\text{buhar}} = 5.077 \text{ [ton/h]}$$

$$m_{\text{NCG}} = 6 \text{ [ton/h]}$$

$$P1 = 1200 \text{ [kPa]}$$

$$P2 = 1000 \text{ [kPa]}$$

$$Pv1 = 792.2 \text{ [kPa]}$$

$$\rho1_{\text{buhar,ideal}} = 3.875 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho1_{\text{ideal}} = 8.625 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho2_{\text{CO2}} = 3.91 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$R_{\text{buharNCG}} = 0.3141 \text{ [kJ/kmol.K]}$$

$$T1_{\text{buhar,doyma}} = 170 \text{ [C]}$$

$$T_{\text{Degisim}} = -2 \text{ [C]}$$

$$y_{\text{buhar,ideal}} = 0.6602$$

Basınç düşürmenin vana yerine **türbin** ile yapılması durumunda,  $\Delta P$  kaynaklı mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Türbin, entropi artışını azaltacağından, entalpi-entropi ( $h - s$ ) diyagramında, proses eğrisi, sağa doğru (kızgın buhar) yatay ilerlemek yerine, aşağıya doğru (sıvı-buhar karışımı) dikeye yakın bir tarzda inecektir. Doyma eğrisinin şeklinden dolayı, türbin çıkışında pentan hala kızgın buhar olacaktır (su buharı durumunda türbin çıkışı sıvı-buhar karışımı olacaktır).

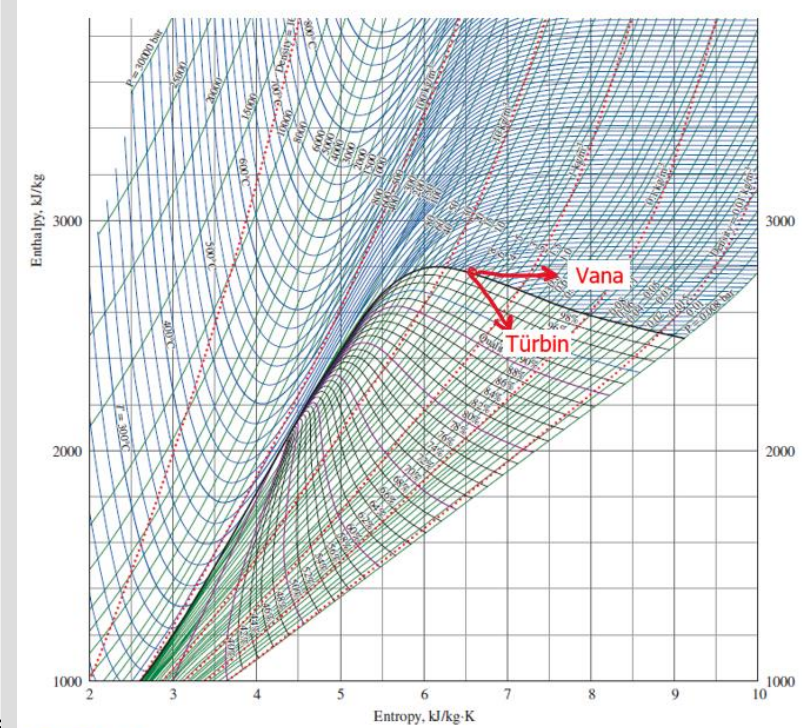
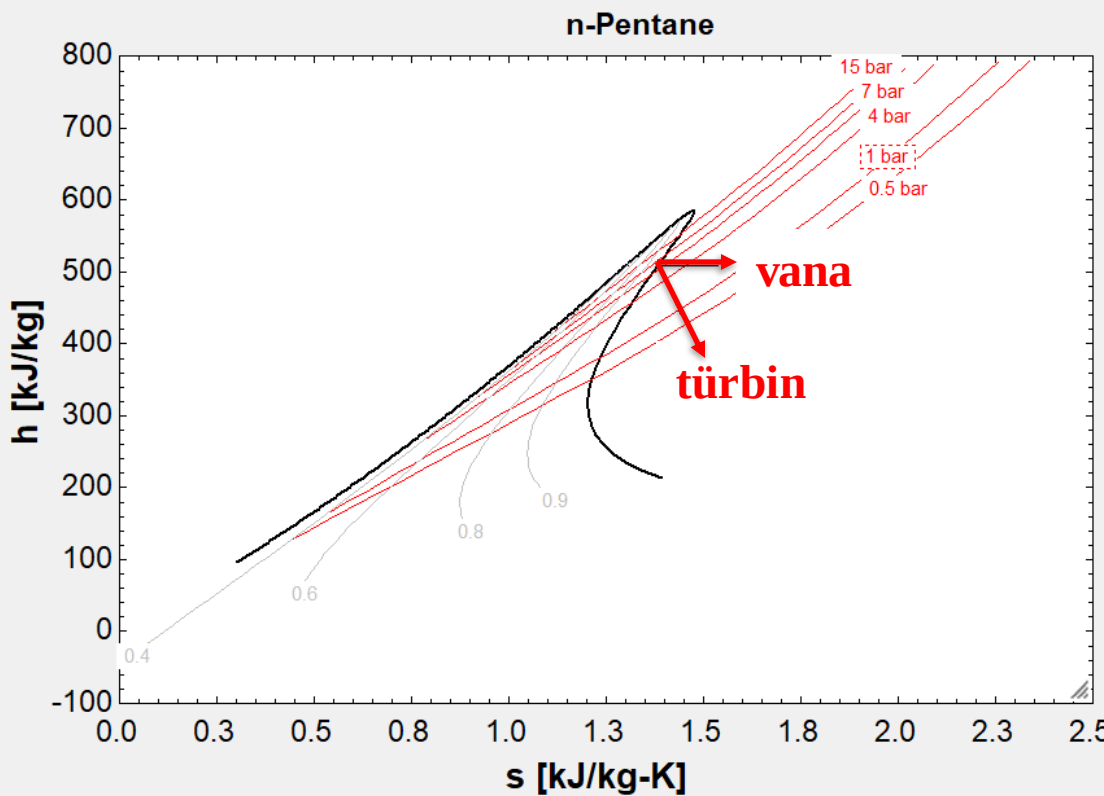


FIGURE A-10  
Mollier diagram for water.