

## AZOT SIVILAŞTIRMA ÜNİTESİNİN ENERJİ ANALİZİ

Arif KARABUĞA\*, Reşat SELBAŞ

Geliş Tarihi/ Received: 13.12.2016, Kabul tarihi/Accepted: 27.12.2016

### Özet

Parçacık hızlandırıcılarda ve çarpıştırıcılarda, elektron hızlandırıcılarda, tıp disiplininde, metallerin işleme, gıdaların dondurulmasında ve kimya endüstrisinde sıvı azot kullanılmaktadır. Hava çeşitli bileşenlerden oluşur ve dominant olan üç bileşen ise; azot, oksijen ve argondur. Havanın en önemli bileşeni azottur. Bu sebepten dolayı azotun ayrıştırılması ve sıvılaştırılması büyük önemi vardır. Hava ayırma yöntemleri temel olarak üç farklı metotla yapılmaktadır. Bu yöntemlerden biri kriyojenik ayrıştırma yöntemidir.

Bu çalışmada hava ayırma ünitesine entegre edilmiş azot sıvılaştırma ünitesi incelenmiştir. Yapılan termodinamik hesaplamalarda azot sıvılaştırma çevriminin  $COP_{gerçek}$  ve  $COP_{tersinir}$  değerleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Azot sıvılaştırma, Kriyojeni, Enerji analizi

## ENERGY ANALYSIS OF NITROGEN LIQUEFACTION PROCESSES

### Abstract

The nitrogen is used in particle accelerators and colliders, synchrotrons, medical disciplines, the processing of metal, cooling of food and the chemical industry. The air consists of various components, and the three dominant components are nitrogen, oxygen and argon. The most important component of air is nitrogen. Therefore, decomposition and liquefaction of nitrogen has a big significance. Air separation methods are basically made by three different methods. One of these methods is cryogenic separation.

In this study, the nitrogen liquefaction unit integrated in the air separation unit was investigated. In the thermodynamic calculations made, the  $COP_{actual}$  and  $COP_{reversible}$  values of the nitrogen liquefaction cycle are calculated.

**Key Words:** Air separation, Cryogenic, Energy analysis

### 1. Giriş

Dünyanın çevresi hava ile sarılmaktadır. Havanın en önemli bileşenlerinden biri azottur. Azot yaygın olarak kimya endüstrisinde, gıdaların dondurulmasında, tıpta, petrol rafinerinde, parçacık hızlandırıcılarda, parçacık çarpıştırıcılarında, elektron hızlandırıcılarında vb. alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Manenti vd. 2013; Thomas vd. 2011).

Hava kriyojenik ve kriyojenik olmayan 2 ana yöntemle ayrıştırılabilir. Kriyojenik olmayan yöntemde kendi içerisinde basınç salınımlı adsorpsiyon ve membranlı ayırma olmak üzere

\* Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 32260 Çünür-Isparta  
E-posta: arif.karabuga@gmail.com

ikiye ayrılır (Zhu vd. 2010) . Endüstriyel uygulamalarda genel olarak oksijen ve azot kullanılmaktadır. Bu kriyojenlerin saflık oranı hava ayrıştırmadaki kullanılacak yöntemi belirlememize imkân sağlar. Azot ve oksijenden elde edilen saflık oranları yüksek ve düşük saflık olarak tanımlanmaktadır. Referans olarak % 98 ve üzeri yüksek saflık, % 85-98 arası düşük saflık olarak belirlenmektedir.

**Tablo 1.** Hava ayrıştırma sistemlerinin saflık değerlerine göre karşılaştırması (Campestrini, 2014)

Proses	Saflık (%)
Membranlı	N: 95 – 99
Adsorbsiyonlu	O <sub>2</sub> : 90 – 95 N: 99,9 – üzeri
Kriyojenik	O <sub>2</sub> : 85 – 99,7 N: 10 ppb*

\*ppb: parts per billion (milyarda bir)

Cornelissen ve Hirs (1998), çift kolonlu bir kriyojenik hava ayırma ünitesinin ekserji analizini yapmıştır. Kriyojenik hava ayırma ünitesindeki ekserji kaybının büyük bir bölümünün kompresörlerde meydana geldiğini öyleki ekserji kaybının 1965 kW olarak hesaplamışlardır. Van Der Ham ve Kjelstrup (2010), iki farklı hava ayırma ünitesinin ekserji analizini yapmıştır. Hava ayırma ünitelerinin temel farkı kolon sayıdır. İncelenen ünitelerden biri üç kolonlu diğeri iki kolonlu tasarlanmıştır. Analizler sonucunda üç kolonlu tasarımın iki kolonlu tasarıma göre % 12 daha az ekserji kaybı olduğunu hesaplamışlardır. Rizk vd. (2012) Üç tip kriyojenik proses kolonunun simülasyonunu yapmışlar ve farklı kolonların ekserji kayıplarını hesaplamışlardır. Her bir kolon için hassas analizler gerçekleştirmiş ve bunun sonucunda ideal geometriler ve çalışma parametreleri belirlenmiştir. Distilasyon kolonları arasında ekserji analizlerini kıyaslanmıştır. Çift diyabatik kolonun ekserji verimliliği geleneksel adyabatik çift kolonluya göre % 23 daha verimli olduğu hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın amacı kriyojenik yöntem kullanarak gerçek bir hava ayırma tesisine entegre edilmiş azot sıvılaştırma ünitesinin enerji analizini yaparak bu ünitenin COP<sub>gerçek</sub> ve COP<sub>tersinir</sub> değerlerini bulmaktır. Bununla birlikte COP değerlerine etki eden parametrelerin tesbiti ve bu değerlerin ideal sınırlarını belirlemektir.

## 2. Azot Sıvılaştırma Ünitesi

Bu çalışmada sistem entegre bir sistemdir. Azot sıvılaştırma ünitesi hava ayrıştırma sistemine entegre edilmiştir. Çalışmada azot kriyojeni çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Hava atmosfer basıncında ve çevre sıcaklığında hava ayrıştırma ünitesine girmektedir. Hava filtresinden geçen hava akışkanı daha sonra üç kademeli hava kompresöründen geçmektedir. Kompresörden çıkan hava saflaştırıcı yataklarına girer. Bu aşamada hava, içerisinde bulunan partiküllerden ve nemden ayrılmış olarak cold box' a girer. Cold box ana eşanjör bloklarından ve distilasyon kolonundan oluşur. Distilasyon kolonu iki farklı kolonun birleşmesinden ve argon kolonundan oluşur. Bu iki farklı kolon, yüksek basınç ve düşük basınç kolonudur. Saflaştırma yataklarından çıkan kuru hava eşanjöre girer ve sıvılaştırma sıcaklığına çok yakın



### 3. Enerji Analizi

Azot sıvılaştırma ünitesinin enerji ve ekserji analizini yapabilmek için sıvı ve gaz fazında iki tane soğutma etkisinin tanımlanması gerekir. Çevrimdeki gazın birim kütlesi başına soğutma etkisi aşağıdaki gibi tanımlanır (Dinçer ve Rose, 2007);

$$q_{L,gaz} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

Burada  $h_2$  değeri kompresörden çıkan entalpiyi,  $h_1$  kompresöre giren entalpiyi belirtmektedir. Çevrimdeki sıvılaştırılan gaz birim kütlesi başına soğutma etkisi (Dinçer ve Rose, 2007);

$$q_{L,sıvı} = h_1 - h_{sıvı} \quad (2)$$

Burada  $h_{sıvı}$  çevrimden çıkan sıvı azotun entalpi değerini belirtmektedir. Bununla birlikte çevrimin doğru bir termodinamik analizini yapabilmek için kütle dengesinin, enerji dengesinin ve ekserji dengesinin yazılması gerekmektedir. Çoklu girişi ve çıkışı olan genel bir sürekli akışlı sistemler için kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir (Çengel ve Boles, 2011);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (3)$$

Burada  $\dot{m}$  birim alanda birim zamanda geçen kütle debisidir. Alt indiks olan  $g$  ve  $ç$  ise çevrime giren ve çıkan toplam kütle göstermektedir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_ç \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_g \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4)$$

Burada  $\dot{Q}$  birim zamandaki net ısıyı,  $\dot{W}$  birim zamandaki net işi  $v$  hızı,  $g$  yer çekimi ivmesini ve  $z$ ' de yüksekliği tanımlamaktadır. Sürekli akışlı açık sistemlerde kinetik ve potansiyel enerji göz ardı edilebileceği için  $\frac{v^2}{2}$  ve  $gz$  değerleri sıfıra eşitlenir.

Kompresörün sıkıştırma işi ele alınarak kompresördeki enerji dengesi gaz birim kütlesi başına yazılırsa (Çengel ve Boles, 2011);

$$w_{in} = RT_0 \ln(P_2/P_1) \quad (5)$$

Burada  $R$ , azot gaz sabiti,  $T_0$  çevre sıcaklığı yani ölü hal durum sıcaklığı mamafih bu sıcaklık  $298.15 \text{ K}$ ' dir.  $P$  değerleri de azotun kompresöre giriş ve çıkış basıncı olarak tanımlanır. Ekserji analizi yapılırken tüm ünitelerde kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserji ihmal edilir. Ekserji denkliği aşağıdaki şekilde yazılır (Bejan, 2002; Kabul, 2008).

$$\dot{E}_Q - \dot{E}_W = \sum \dot{m}_{çıkın} \varepsilon_{çıkın} - \sum \dot{m}_{giren} \varepsilon_{giren} + I \quad (6)$$

Burada  $\dot{E}_Q$  ısıyla gelen birim zamandaki ekserjiyi,  $\dot{E}_W$  iş ile gelen birim zamandaki ekserjiyi,  $\varepsilon$  özgül ekserjiyi ve  $I$  birim zamanda kaybolan ekserjiyi yani tersinmezliği tanımlamaktadır.

$$I = T_0 s_{\text{üretim}} \quad (7)$$

$$\varepsilon = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

Çevrimde dolaşan gazın sıvılaştırma oranını denklem 2' nin denklem 1' e fraksiyonu alınmıştır ve bu fraksiyon  $y$  olarak tanımlanmıştır (Dinçer ve Rose, 2007).

$$y = \frac{q_{L \text{ gaz}}}{q_{L \text{ sıvı}}} \quad (9)$$

Çevrimdeki gerçek iş sıvılaştırma azotun birim kütlesi için yazılırsa (Dinçer ve Rose, 2007).

$$w_{\text{gerçek}} = \frac{w_{\text{in}}}{y} \quad (10)$$

Çevrimdeki gerçek iş gazın birim kütlesi için yazılırsa (Dinçer ve Rose, 2007).

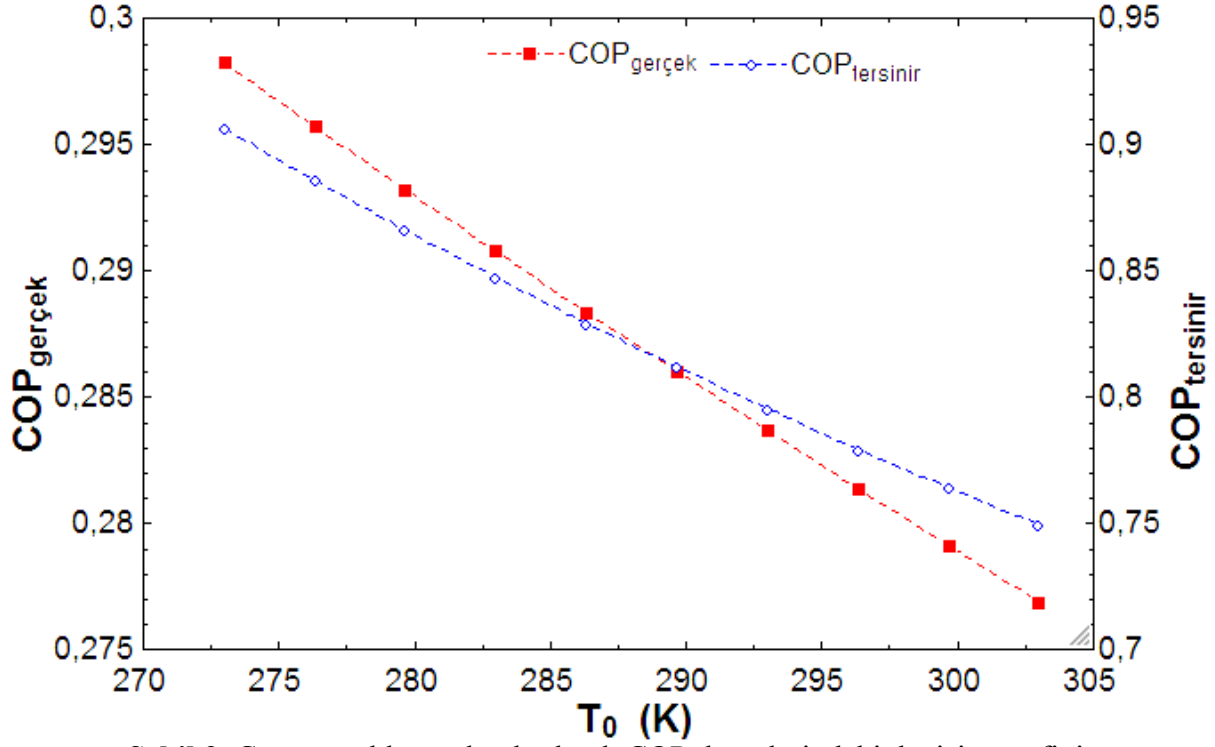
$$COP_{\text{gerçek}} = \frac{q_{L \text{ gaz}}}{w_{\text{in}}} \quad (11)$$

Sıvılaştırma ünitesindeki sıvılaştırma birim kütle başına tersinir COP değerini bulabilmek için ise denklem 2' nin tersinir işe bölümü alınır (Dinçer ve Rose, 2007).

$$COP_{\text{tersinir}} = \frac{q_{L \text{ sıvı}}}{w_{\text{tersinir}}} \quad (12)$$

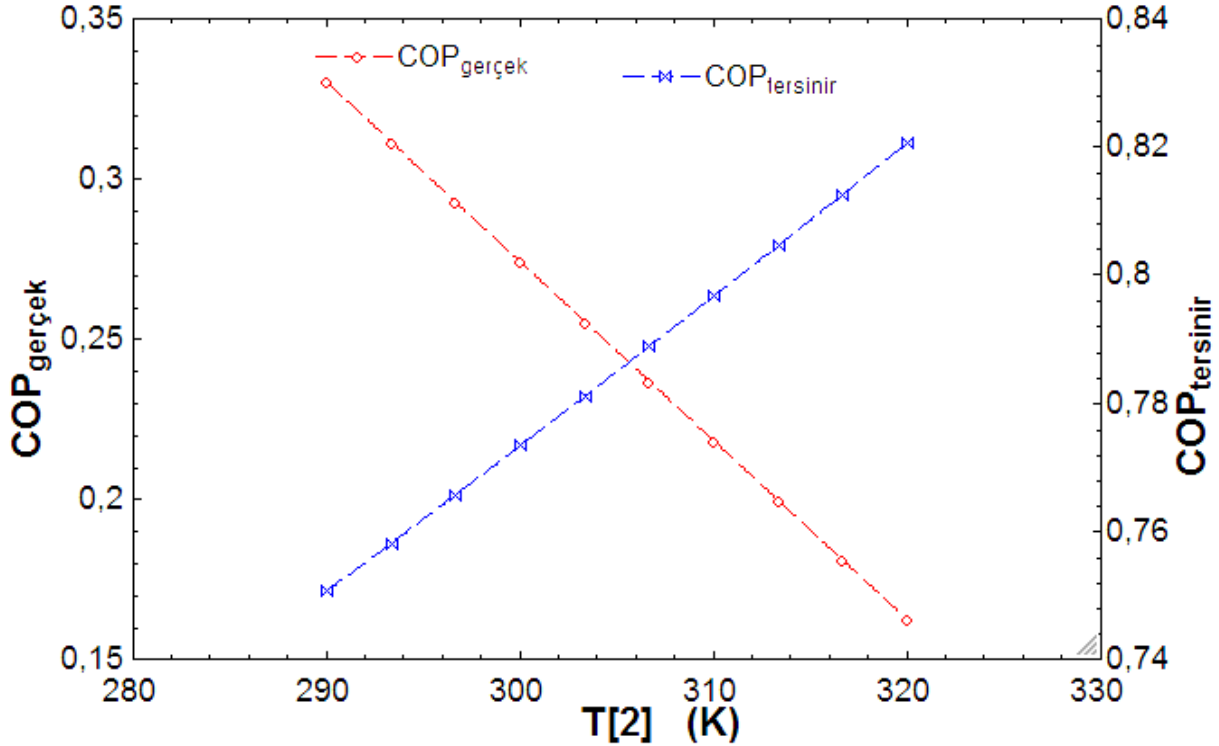
#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada gerçek bir hava ayırma ve azot sıvılaştırma ünitesi incelenmiştir. Azot sıvılaştırma ünitesinin performans analizi yapıldı ve çevrimin  $COP_{\text{gerçek}}$  ve  $COP_{\text{tersinir}}$  değerleri sırasıyla 0.28 ve 0.77 bulundu. COP değerlerinin çevre sıcaklığına bağlı olarak değişimi şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çevre sıcaklığına bağlı olarak COP değerlerindeki değişim grafiği

Şekil 2'de  $T_0$  değerinin yani çevre sıcaklığının 275 K' den 300 K' e artması durumunda COP değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 3.  $T_2$  değerine bağlı olarak  $COP_{gerçekte}$  ve  $COP_{tersinir}$  verimindeki değişim grafiği

Şekil 3’de azot geri çevrim kompresörünün giriş sıcaklığının COP değerleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Kompresör giriş sıcaklığının artmasına bağlı olarak  $COP_{tersinir}$  değerinin arttığı fakat  $COP_{gerçek}$  değerinin ise azaldığı gözlenmiştir.

Bu çalışma neticesinde şekil 2’ de verildiği gibi çevre sıcaklığının COP değerleri üzerinde etkisi olduğu tesbit edilmiştir. Çevre sıcaklığında meydana gelen artış her iki COP değeri üzerinde azalmaya yol açmaktadır. Ayrıca şekil 3’ de görüleceği gibi azot geri çevrim kompresörünün giriş sıcaklığının artırılması durumunda  $COP_{gerçek}$  ve  $COP_{tersinir}$  değerlerinin ters orantılı olarak değişim gösterdiği bulunmuştur. Bu sebepten dolayı giriş sıcaklığının yaklaşık 305 K seviyelerinde tutulması gerektiği öngörülmüştür.

### Teşekkür:

Bu çalışmamı maddi olarak destekleyen SDÜ BAP koordinasyon birimine teşekkür ederim. (Proje no: 4350-YL1-15)

### Semboller:

$q_L$	: Soğutma etkisi
$h$	: Entalpi
$s$	: Entropi
$\dot{m}$	: Birim kütle
$\dot{Q}$	: Birim zamandaki net ısı
$\dot{W}$	: Birim zamandaki net iş
COP	: Coefficient of Performance
$T_0$	: Çevre sıcaklığı
$P$	: Basınç
$I$	: Tersinmezlik
$y$	: Gazın sıvılaştırma fraksiyonu

### **KAYNAKLAR**

Manenti, F., Rossi, F., Croce, G., Grottoli, M. G., 2013. Intensifying Air Separation Units, Chemical Engineering Transactions, 35, 1249-1254.

Thomas, R. J., Ghosh, P., Chowdhury, K., 2011. Exergy Analysis of Helium Liquefaction Systems Based on Modified Claude Cycle with Two Expanders, Cryogenics, 51, 287-294.

Zhu, Y., Legg, S., Laird, C. D., 2010. Optimal Design of Cryogenic Air Separation Columns Under Uncertainty, Computers and Chemical Engineering, 34, 1377-1384.

Campestrini M., 2014. Thermodynamic study of solid-liquid-vapor equilibrium: application to cryogenics and air separation unit, doktora tezi, 147.

Cornelissen, R.L., Hirs G.G., 1998. Exergy Analysis of Cryogenic Air Separation. Energy Conversion and Management, 39, 1821-1826.

van der Ham, L. V., Kjelstrup, S., 2010. Exergy Analysis of Two Cryogenic Air Separation Processes, *Energy*, 35, 4731-4739.

Rizk, J., Nemer, M., Clodic, D., 2012. A real column design exergy optimization of a cryogenic air separation unit, *Energy*, 37, 417-429.

Diñçer, İ., Rose, M.R., 2007. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*, 454. Elsevier, Canada

Çengel, Y. A., Boles, M. A., 2011. *Termodinamik; Mühendislik Yaklaşımıyla*, 946, Güven Kitapevi, Türkiye.

Bejan, A., 2002. Fundamentals of Exergy Analysis Entropy Generation Minimization and The Generation Architecture. *International Journal of Energy Research*. 26, 545-565.

Kabul A., 2008. Alternatif Soğutucu Akışkan Kullanılan Bir Soğutma Sisteminde Termodinamik ve Isı Transferinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 118s, Isparta.