



## Azot Sıvılaştırma Ünitesinin Performans Analizi

Arif Karabuğa<sup>a\*</sup>, Reşat SELBAŞ<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

\*Sorumlu yazar e-posta adresi: [arif.karabuga@gmail.com](mailto:arif.karabuga@gmail.com)

### **ÖZET**

Hava ayırmada en önemli metotlardan biri kriyojenik ayırıştırma dır. Kriyojeni düşük sıcaklıklar bilimi olarak bilinir. Hava üç ana bileşenden oluşur mamafih bunlar; azot, oksijen ve argondur. Havanın en önemli bileşeni azottur. Azot, kimya endüstrisinde, gıdaların soğutulmasında, tıp amaçlı, parçacık hızlandırıcı ve çarpıştırıcılarda, elektron hızlandırıcılarda ve metal işleme teknolojisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada hava ayırıştırma ünitesine entegre edilmiş azot sıvılaştırma ünitesi incelenmiştir. Yapılan numerik hesaplamalarda ve grafik çizimlerinde EES (Equation Engineering Solver) programı kullanılmıştır. Termodinamik hesaplamalar sonucunda çevrimin ekserji verimi, COP<sub>gerçek</sub> 0,28 ve COP<sub>tersinir</sub> 0,77 olarak hesaplanmıştır.

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

## Performance Analysis of Nitrogen Liquefaction Unit

### **ABSTRACT:**

Cryogenic separation is the most important method of air separation. Cryogenics is the science of very low temperature. Air consists of three main components thereof so that nitrogen, oxygen and argon. Nitrogen is most important of air components. The nitrogen is used in chemical industry, food freezing, medical purpose, particle accelerators and colliders, synchrotrons, metal processing technology etc. In the study, nitrogen liquefaction unit is integrated to an air separation unit. In numerical calculations and graphics EES (Equation Engineering Solver) software has been used. In result of thermodynamic calculations, exergy efficiency of cycle, COP<sub>actual</sub> 0,28 and COP<sub>reversible</sub> 0,77 has been calculated.

**Keywords:** Nitrogen liquefaction, Cryogenic, Performance analysis

## 1. GİRİŞ

Dünyanın çevresi hava ile sarılmaktadır. Havanın bileşenleri incelendiğinde azot, oksijen ve argon elementlerinin hava bileşeni içerisindeki diğer elementlere göre daha fazla yer kapladığı görülmektedir. Hacimsel olarak hava içerisindeki azot ve oksijen oranı yaklaşık olarak % 99,05 argon oranı ise % 0,93 seviyelerindedir. Buradaki her bir elementin kullanım alanları farklılık göstermektedir.

Havanın en önemli bileşenlerinden biri azottur. Azot yaygın olarak kimya endüstrisinde, gıdaların dondurulmasında, tıpta, petrol rafinerisinde, parçacık hızlandırıcılar, parçacık çarpıştırıcıları, elektron hızlandırıcıları vb. alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Bununla birlikte oksijen ve argon tıp ve sağlık biliminde, spor faaliyetlerinde ve malzeme biliminde, gıda sektöründe ve boya sanayisi gibi birçok disiplinlerde kullanılır. Doğada saf halde bulunamayan veya bulunması durumunda da hacimsel olarak çok düşük seviyelerde olan bu elementleri hava içerisinde ayırıştırarak elde edilir. Bu sebepten dolayı hava ayırma yöntemleri büyük önem arz etmektedir.

Hava kriyojenik ve kriyojenik olmayan iki ana yöntemle ayırıştırılabilir. Kriyojenik olmayan yöntemde kendi içerisinde basınç salınımlı adsorpsiyon ve membranlı ayırıştırma olmak üzere ikiye ayrılır [3].

Endüstriyel uygulamalarda genel olarak oksijen ve azot kullanılmaktadır. Bu kriyojenlerin saflık oranı hava ayırıştırmadaki 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 ayırıştırma sistemlerinin saflık değerlerine göre karşılaştırılması [4]*

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*

Tablo 1’ de hava ayırma yöntemlerinden olan membranlı, adsorbsiyonlu ve kriyojenik proseslerin işlem sonucunda elde edilen azot oksijenin saflık oranları verilmiştir.

Cornelissen ve Hırs, çift kolonlu bir kriyojenik hava ayırma ünitesinin ekserji analizini yapmıştır. Kriyojenik hava ayırma ünitesindeki ekserji kaybının büyük bir bölümünün kompresörlerde meydana geldiğini mamafih ekserji kaybının 1965 kW olarak hesaplamıştır [5]. van der Ham ve Kjelstrup, iki farklı hava ayırma ünitesinin ekserji analizini yapmıştır. Hava ayırma ünitelerinin temel farkı kolon sayılarıdır. İncelenen ünitelerden biri üç

kolonlu diğeri iki kolonlu tasarlanmıştır. Analizler sonucunda üç kolonlu tasarımın iki kolonlu tasarıma göre % 12 daha az ekserji kaybı olduğunu hesaplamıştır [6]. Rizk vd. Üç tip kriyojenik proses kolonunun simülasyonunu yapmış ve farklı kolonların ekserji kayıplarını hesaplamıştır. 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 [7].

## **2. KRİYOJENİK PROSES**

Bu çalışmada ki 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 bir sıcaklıkta eşanjörden çıkar. Çıkan bu kuru hava cold box'a yüksek basınç kolonundan girer. Yüksek basınç kolonunda 50 tane ayrıştırma tepsisi, düşük basınç kolonunda ise 78 tane ayrıştırma tepsisi bulunmaktadır.

Distilasyon kolonuna giren hava sıcaklık farklılıklarından faydalanılarak oksijen, azot ve argon olarak ayrılır. Distilasyon kolonunda azot diğer bileşenlerden ayrılarak, azot sıvılaştırma ünitesine transfer edilir. Azot sıvılaştırma ünitesi birer adet azot geri çevrim kompresörü CP-70, booster kompresör-türbin çifti CE-77, booster kompresör son soğutucusu HE-771, azot chilleri R-60 ve üç adet eşanjörden oluşmaktadır.

Yaklaşık olarak 5 bar basınçla azot sıvılaştırma ünitesine giren azot, geri çevrim kompresöründe yaklaşık olarak 32 bar' a basınçlandırılır. Kademeli olarak basınçlandırılan azot booster kompresör-türbin çiftinden 45 bar' la çıkmaktadır. Kompresör bu basınçlandırma işini türbinden sağlamaktadır. Booster kompresöründen çıkan basınçlandırılmış azot booster kompresör son soğutucusundan geçerek eşanjör



birim kütlesi başına soğutma etkisi (kj/kg) [8];

$$q_{L\text{svl}} = h_1 - h_{\text{svl}} \dots \dots \dots (2)$$

Burada  $h_{\text{svl}}$  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 (kg/s) aşağıdaki gibi yazılabilir [9];

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\text{ç} \dots \dots \dots (3)$$

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

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_c \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_g \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \dots \dots \dots (4)$$

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 (kj/kg) gaz birim kütlesi başına yazılırsa [9];

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

Burada  $R$ , azot gaz sabiti,  $T_0$  çevre sıcaklığı yani ölü hal durum sıcaklığı mamafih bu sıcaklık 298.15 K' dir. (İ) 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 [10,11].

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

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

$$I = T_0 S_{\text{üretim}} \dots \dots \dots (7)$$

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

Çevrimde dolaşan gazın sıvılaştırma oranını denklem 2' nin denklem 1' e fraksiyonu alınmıştır ve bu fraksiyon  $y$  olarak tanımlanmıştır [8].

$$y = \frac{q_{L\text{gaz}}}{q_{L\text{svl}}} \dots \dots \dots (9)$$

Çevrimdeki gerçek iş sıvılaştırılan azotun birim kütlesi için yazılırsa (kj/kg) [8];

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

Çevrimdeki gerçek iş gazın birim kütlesi için yazılırsa [8];

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

Sıvılaştırma ünitesindeki sıvılaştırılan birim kütle başına tersinir COP değerini

bulabilmek için ise denklem 2' nin tersinir işe bölümü alınır [8];

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

Denklem 7' de ki tersinir iş denklem 8' de tanımlanmıştır (kj/kg) [8];

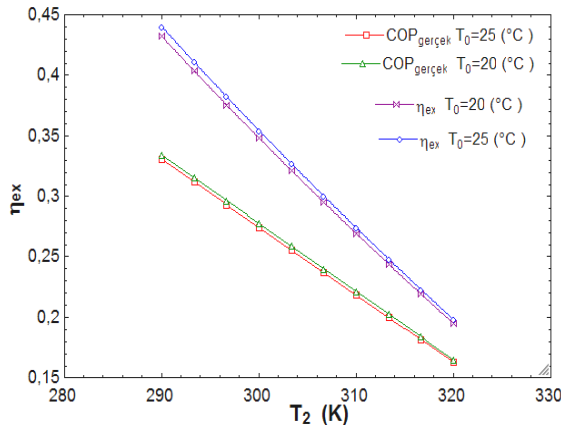
$$w_{tersinir} = h_{17} - h_2 - T_0(s_{17} - s_2) \dots (13)$$

Çevrimdeki ekserji verimliliğini bulabilmek için  $COP_{gerçek}$  değerinin  $COP_{tersinir}$  değerlerine oranı hesaplanmıştır [8];

$$\eta_{ex} = \frac{COP_{gerçek}}{COP_{tersinir}} \dots \dots \dots (14)$$

#### 4. SONUC

Bu çalışmada gerçek bir hava ayırma ve azot sıvılaştırma ünitesi incelenmiştir. Azot sıvılaştırma ünitesinin performans analizi yapıldı ve çevrimin  $COP_{gerçek}$  ve  $COP_{tersinir}$  değerleri sırasıyla 0,28 ve 0,77 bulundu. Ayrıca çevrimin ekserji verimliliği 0,36 olarak hesaplandı. Şekil 2'de kompresör giriş sıcaklığına bağlı olarak sistemin ekserji verimindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil2. T2 Sıcaklığına bağlı olarak ekserji veriminin değişim grafiği

Şekil 2'de T<sub>0</sub> değerinin yani çevre sıcaklığının 20 °C ve 25 °C olduğu durumlarda sisteme giren T<sub>2</sub> sıcaklığının artması durumunda ekserji veriminin azaldığı gözlenmektedir. Ancak çevre sıcaklığının 20 °C olduğu durumda COP gerçek değerinin 25 °C göre biraz daha fazla olduğu gözlenmektedir. Fakat çevre sıcaklığının 25 °C olduğu durumda da ekserji veriminin 20 °C dereceye göre biraz daha artığı ölçülmektedir.

Bu çalışma neticesinde kompresör verimliliğinin düşük olduğu ve kompresörden çıkan entalpi değerinin artması durumunda çevrimin ekserji veriminin de artacağı tespit edilmiştir.

#### Teşekkür:

Bu çalışmamızı destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz. (Proje no: 4350-YL1-15).

#### Semboller

- q<sub>L</sub> : Soğutma etkisi
- h : Entalpi
- s : Entropi
- ṁ : Birim kütle
- Q̇ : Birim zamandaki net ısı
- Ẇ : Birim zamandaki net iş
- COP : Coefficient of Performance
- T<sub>0</sub> : Çevre sıcaklığı
- P : Basınç

I : Tersinmezlik  
y : Gazın sıvılaştırma fraksiyonu  
 $\varepsilon$  : Özgül ekserji  
 $\eta_{ex}$  : Ekserji verimliliği

### **KAYNAKLAR**

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

[2] J.F 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.

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

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

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

[6] Van der Ham, L. V., Kjelstrup, S., 2010. Exergy Analysis of Two Cryogenic Air Separation Processes, Energy, 35, 4731-4739.

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

[8] Dinçer, İ., Rose, M.R., 2007. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, 454. Elsevier, Canada

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

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

[11] 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.

[12] 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.