

# ŞEKER FABRİKALARINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZ YÖNTEMİ

**Tolga Taner\***

Dr., Aksaray Üniversitesi,  
Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu  
Motorlu Araçlarda Ulaştırma Bölümü,  
Aksaray  
tolgataner@aksaray.edu.tr

**Mecit Sivrioğlu**

Prof. Dr., Gazi Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara  
mecits@gazi.edu.tr

## ÖZET

Bu çalışmada, şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analiz yönteminin nasıl olması gerektiği irdelemiştir. Şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analiz hesaplamaları çok önemlidir. Tüm şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analizi yapılırken hangi yöntem ve eşitliklerin kullanılması gerektiği gösterilmiştir. Şeker üretim proseslerinde enerji ve ekserji analizleri, işletme kârlılığında çok büyük öneme sahiptir. İşletmelerin kârlılığı için; enerjiden maksimum tasarruf elde etmek ve enerji – ekserji kayıplarını en aza indirmek gerekmektedir. Bu da kullanılacak doğru enerji ve ekserji analiz yöntem ve eşitlikleriyle mümkündür. Bu çalışmada tüm şeker fabrikaları için örnek teşkil edecek ve model olacak enerji ve ekserji analiz yöntem ve eşitlikleri verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, ekserji, termodinamik, enerji verimliliği, ekserji verimliliği

## Sugar Factories' Analysis of Energy and Exergy Methods

## ABSTRACT

In this study, for sugar mills has been considered the energy and exergy analysis method. Calculation of the energy and exergy values are very important for sugar factories. The methods and equations for energy and exergy analysis of sugar factories is presented. Energy and exergy analysis in sugar production processes are very important for business profitability. For the profitability of enterprises, to maximum saving in energy must be achieved and minimization of exergy losses is needed. This is possible with the usage of right energy and exergy analysis methods and equations. The energy and exergy analysis methods and equations which will be an example and will form a model, are presented for all sugar factories.

**Keywords:** Energy, exergy, thermodynamics, energy efficiency, exergy efficiency

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 06.02.2013

Kabul tarihi : 06.03.2013

Taner, T., Sivrioğlu, M. 2013. "Şeker Fabrikalarında Enerji ve Ekserji Analiz Yöntemi," Mühendis ve Makina, cilt 54, sayı 637, s.54-58

## 1. GİRİŞ

Gıda sektöründe; enerji verimliliğinin belirlenmesi için yapılan enerji ve ekserji analizleri çok önemlidir. Bunun sebebi ise gıda sektöründeki proseslerde çok fazla enerji kullanılmasıdır. Proses aşamalarının birçok safhasında değişik ısı ve kütle akışlarından dolayı enerji ve ekserji analizi hesapları mühendislik ve termodinamik bilgileriyle birlikte dikkatlice yapılmalıdır. Gıda sektöründe buhar kütleli neredeyse tüm gıda sektörlerinin proses aşamalarında kullanılmaktadır. Buharın olduğu yerde enerjiyle ilgili tüm konular önem kazanmaktadır.

Gıda sektörlerinde şekerin üretiminin de ise büyük miktarda enerji tüketimi söz konusudur. Enerjinin çok fazla tüketilmesi ekserjiyi de bir adım öne çıkarmaktadır. Sonuçta şeker üretiminde kullanılan buharın çok fazla miktarda olması, enerji ve ekserji analizlerini önemli hâle getirdiği gibi; enerji verimliliği ve enerji ekonomisi açısından bu hesaplamaların ve analizlerin yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

## 2. TANIM VE TEORİ

Şeker fabrikalarında pancardan şeker üretimi için uygulanan prosesler çok önemlidir. Bu proseslere göre enerji ve ekserji analiz yöntemleri uygulanır. Bu analizler öncesi proseslerin ne olduğu ve nerelerde enerjinin kullanıldığı tanımlanmalıdır.

Şeker fabrikasının proses ve kojenerasyon aşamaları Şekil 1'de detaylandırılmıştır. Fabrikaya gelen şeker pancarından çıkan küspe ile (şeker üretimi sonrası kalan kısmı) elektrik enerjisi üretilerek tekrar şeker üretim proses aşamalarında kullanılır. Şekil 1'de proses aşamaları gösterilmiştir [1]. Şekil 1'e göre ham şeker üretim prosesi enerji – ekserji hesaplamaları şu şekilde yapılır:

- 1) Taze pancarın kıyılması,
- 2) Ham şerbet üretimi (Difüzyon işlemi)

- 3) Ham şerbetin arıtılması,
- 4) Ham şerbetin koyulaştırılması (Buharlaştırma)
- 5) Rafinasyon
- 6) Kurutma
- 7) Enerji üretimi

### Fabrika şeker üretimi ve proses enerji - ekserji hesaplamaları:

Fabrika şeker üretimi ve proses enerji – ekserji hesaplamaları enerji ve ekserji verimlilik esasına dayanır. Enerji ve ekserji analizinden önce fabrikadaki proseslerinde yer alan proses akışları giriş ve çıkış kısımları belirlenir. Belirlenen bu proses akışlarına göre fabrikadan elde edilen kütleli debi, basınç ve sıcaklık parametre verileri ile enerji - ekserji hesaplamaları, giriş ve çıkışlar baz alınarak yapılır.

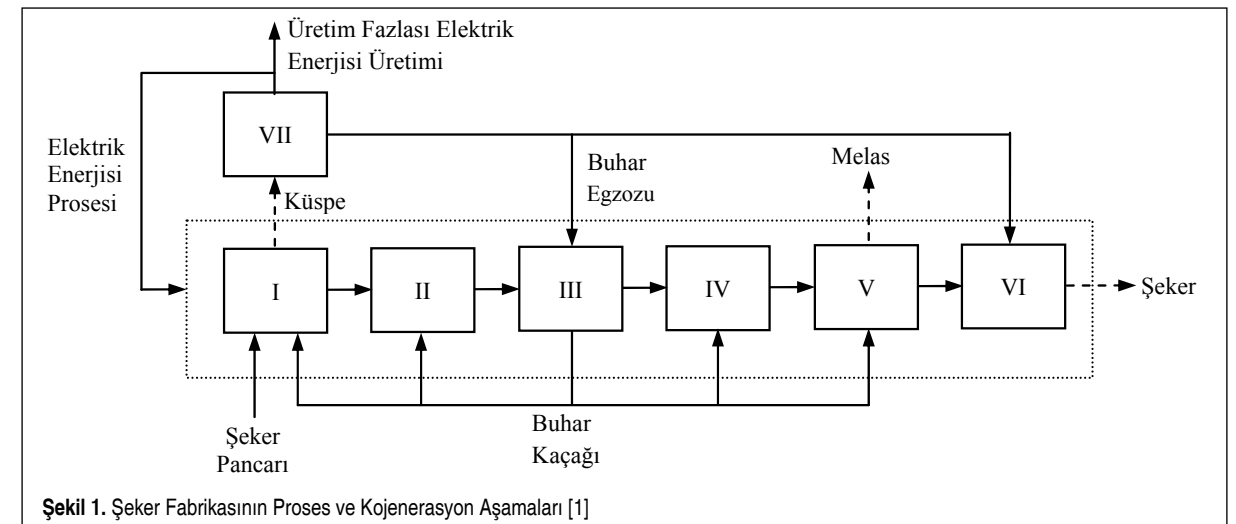
Şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analizlerinin uygulanabilirliği için tanım ve denklemlerin çok doğru ifade edilmesi gerekir.

Bunun için, öncelikle enerji analizinin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Termodinamiğin 1. Kanunu enerji korunumunu açıklar. Enerji girdi ve çıktılarının hesaplanması için önce kütle denkleminin de ortaya konması gerekir.

Termodinamiğin 1.Kanuna göre enerji üretiminde aşağıdaki hususlara dikkat edilir. Bir sistemdeki ısı enerji prosesinde; elektrik enerjisi çıkışından önce buhar enerjisi üretilir. Yüksek basınçta elde edilen buhar enerjisinin verimliliği çok önem kazanmaktadır [2].

Ayrıca şeker sürecinin enerji analizi için de hesaplamalar yapılmalıdır [3].

Bulunan sonuçlarla enerji kalitesinin de belirlenmesi gerekir. Enerji kalitesi enerji kaynaklarının derecelendirilmesidir. Enerji kalitesi ekserjinin enerjiye olan oranıdır [4].



Şekil 1. Şeker Fabrikasının Proses ve Kojenerasyon Aşamaları [1]

Enerji kalitesi ( $\Theta$ ), 0 ile 1 aralığındadır. Enerji kalite oranının 1'i geçmesi, enerji üretiminin olduğu anlamına gelir ki bu Termodinamiğin 1. Kanunu'na aykırıdır. Bu oranın ayrıca 0'ın altına düşmemesi gerekir. Enerji kalitesinin yüksek olması enerji kaynaklarının çok iyi kullanılmadığı anlamına gelir [4].

Ekserji analizi de tıpkı enerji analizi gibi dikkatlice gerçekleştirilmelidir. Ekserji analizinde Termodinamiğin 2.Kanunu uygulanır.

Ekserji, maksimum faydalı iş olarak tanımlanır. Ekserji analizinde, son halin sistemin ölü hali olduğu kabul edilmektedir. Bu halde, kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Enerji ve ekserji analizi hesaplamalarında çeşitli entalpi ve diğer termodinamik bağıntıları, ilgili termodinamik tablolarından alınmalıdır [5].

Ekserji analizinde sistemdeki nicel olarak ekserji kaybı hesaplanmalıdır. Bu yöntem bir gerçek iyileştirme yaklaşımı olmamasına rağmen sistemin ekserji verimliliğini tanımlar. Potansiyel, mekanik ve elektrik enerjileri saf ekserjilerdir. Kimyasal ekserji ise yanmadaki kimyasal ayrışmayla ilgili olan ekserji değişimiyle tanımlanır. Isıl ekserji ise Carnot prosesinde tanımlanmış olan, elde edilebilecek maksimum mekanik enerjidir. Bu üretilen maksimum mekanik enerji, çevreyle olan sıcaklık farkından kaynaklanan ve kullanılan ısı enerjisidir. Kontrol hacmindeki olağan korunum sadece enerji, kütle ve türleri için uygulanabilir. Ekserjinin denkleminde ise kayıpların sonucunda meydana gelen tersinmezliklerin etkisi dikkate alınmalıdır. Fakat ekserji kaybının ortaya çıkmasıyla sistemdeki ekserjinin miktarı düşer [6].

Kombine ısı ve güç santralleri, ekserji dağılımının nasıl değiştiğine en iyi örnektir. Yakıttan ısı ve güç üretilebilir. Fakat kombine üretimde, üretilen ısıdan ekserjinin en az şekilde harcanması uygundur. Türbinlerdeki güç üretimi (ekserji eldesi) için yüksek kaliteli enerji kullanıldığında, nispeten düşük sıcaklıkta elde edilen atık enerjinin, düşük kalite enerji olarak kullanılması gerekecektir [6].

### 3. YÖNTEM VE DENKLEMLER

Enerji ve ekserji analizleri aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak yapılır.

Ölü hâl için 25°C ve 1 atm basınç koşulları kabul edilerek ve  $\infty$  indis sembolüyle gösterilmiştir [4, 5, 7, 8, 9].

Hem literatürlerde hem de şeker üretimi yapan fabrikalarda, teknik olarak birim pancara göre kilogram kütlesi ele alındığı için; kütleli debilerde birim kg/pg, enerji kavramında ise birim olarak kJ/pg kullanılır. Kütleli debi de kullanılan pg ifadesi, 100 kg birim pancara göre anlamındadır [8, 10, 11, 12].

Kontrol hacminde kütle girişi ve çıkışları eşit olduğundan kütle korunur. Kütle Denkliği ise;

$$\sum m_i = \sum m_o \quad (1)$$

şekindedir. Burada

$m_i$  : Toplam kütle girişi, kg/pg

$m_o$  : Toplam kütle çıkışı, kg/pg

dır.

Enerji korunumunun bir ifadesi olan Termodinamiğin 1. Kanuna göre sürekli akış bir sistem için [4, 5, 7, 8, 9, 13];

$$\sum En_i + Q_x = \sum En_o + W \quad (2)$$

yazılır. Burada

$En_i$  : Enerji girişi, kJ/pg

$Q_x$  : Isı miktarı, kJ/pg

$W$  : İş, kJ/pg

göstermektedir.

Enerji denkliği yeniden düzenlenirse;

$$Q_x - W = \sum En_{net_i} = \sum En_o - En_i \quad (3)$$

elde edilir.

İş, kütleli enerji transferine göre çok küçük olduğu zaman ihmal edilir:

$$\sum En_{net_i} = Q_x \quad (4)$$

Burada;

Net enerji transferi:

$$En_{net} = \sum En_{net_i} = \sum En_o - \sum En_i \quad (5)$$

Enerji Girişi;

$$\sum En_i = \sum m_i h_i \quad (6)$$

Enerji Çıkışı;

$$\sum En_o = \sum m_o h_o \quad (7)$$

olduğundan, sisteme net enerji transferi, giriş ve çıkışlardaki entalpi farkıyla bulunur [4, 7, 8].

Sistemdeki ekserji kaybını bulmak için önce ekserji girişi ve çıkışları hesaplanır. Potansiyel ve kinetik enerjiler çok küçük olduğu için ihmal edilir [4, 7, 8].

Ekserji Girişi:

$$Ex_i = m_i [(h_i - h_{\infty}) - T_{\infty} (s_i - s_{\infty}) + \frac{V_i^2}{2} + gz_i] \quad (8)$$

şeklinde ifade edilebileceğinden potansiyel ve kinetik enerji

ihmal edildiğinde,  $\frac{V_i^2}{2} + gz_i = 0$

Ekserji Girişi:

$$Ex_i = m_i [(h_i - h_{\infty}) - T_{\infty} (s_i - s_{\infty})] \quad (9)$$

olur.

Ekserji Çıkışı:

$$Ex_o = m_o [(h_o - h_{\infty}) - T_{\infty} (s_o - s_{\infty}) + \frac{V_o^2}{2} + gz_o] \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebileceğinden potansiyel ve kinetik enerji

ihmal edildiğinde,  $\frac{V_o^2}{2} + gz_o = 0$

Ekserji Çıkışı:

$$Ex_o = m_o [(h_o - h_{\infty}) - T_{\infty} (s_o - s_{\infty})] \quad (11)$$

olur.

Ekserji girişi ve çıkışı farkı, adyabatik ve işin söz konusu olmadığı süreçlerde ekserji kaybını (tersinmezliği) ifade eder. Bu durumda [7, 8];

Ekserji Kaybı:

$$Ex_i - I = \sum Ex_o + \sum Ex_i = T_{\infty} \Delta S \quad (12)$$

Burada  $\Delta S$  toplam entropi değişimidir.

Şekerin tüm proses hesaplamalarında yukarıdaki enerji transferi ve ekserji denklemleri kullanılır.

Hava ve buhar için kullanılan gereken özgül akış ekserji denklemi aşağıdaki gibidir [4, 8, 10, 11, 12];

$$\Psi = (h - h_{\infty}) - T_{\infty} (s - s_{\infty}) \quad (13)$$

Şeker su çözeltisi için kullanılması gereken özgül akış ekserjisiyle ilgili sıkıştırılmaz maddenin özgül entalpi ve entropi denklemleri aşağıda verilmiştir.

Sıkıştırılmaz maddenin (şeker) özgül entalpisi [4, 8];

$$h = C (T - T_{\infty}) \quad (14)$$

ifade edilir. Burada C özgül ısıdır.

Sıkıştırılmaz maddenin (şeker) özgül entropisi [4, 8];

$$s = C \ln (T / T_{\infty}) \quad (15)$$

Sıkıştırılmaz maddenin (şeker) özgül ekserjisi [4, 8];

Burada

$$\psi = C [T - T_{\infty} - T_{\infty} \ln (T / T_{\infty})] \quad (16)$$

Tüm şeker süreci için alınan verilerle, enerji ve ekserji analizleri sonunda Termodinamiğin 1. ve 2. Kanunu verimleriyle hesaplanır.

Enerji ve ekserji verimlilikleri [4, 5, 7, 8]:

$$\eta_{em} = \frac{\sum En_o}{\sum En_i} \cdot \%100 \quad (17)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum Ex_o}{\sum Ex_i} \cdot \%100 \quad (18)$$

şeklinde tanımlanır.

Enerji kaynaklarının kalitesi derecelendirilebilir. Enerjinin

termodinamik kalitesi, ekserjinin entalpiye oranıdır [4, 8].

Enerji kalitesi [4, 8]:

$$\Theta = \frac{Ex}{En} \quad (19)$$

Şeker fabrikalarının enerji açısından verimli çalışıp çalışmadığının kontrolü için yapılması gereken enerji ve ekserji hesaplamaları, yukarıda verilen yöntem ve denklemlerle yapılmalıdır.

### 4. SONUÇLAR

Enerji – ekserji analizi ile fabrikanın proses aşamalarına göre Termodinamik 1. ve 2. Kanun verimlilikleri ortaya çıkar. Böylece tüm proses aşamalarının verimliliklerinin düşük olduğu aşamalar bulunmuş olur. Buna göre alternatif olarak neler yapılabileceği ortaya konabilir. Bu alternatifler, tesisin proseslerinde en çok enerjinin harcandığı ve ekserji kaybının meydana geldiği yerlere göre yapılabilecek değişiklik seçeneklerini verir. Bir başka deyişle senaryolar üretilir. Bununla ilgili örnek verilirse; enerji güç santral tesisinde türbin gücünün artırılması seçenekleri araştırılıp, değişik senaryolar üretilir ve hesaplamalar sonucunda türbin gücünün artırılmasıyla enerji ve ekserji kaybının azaltılıp azaltılamayacağı irdelenir.

Enerji ve ekserji analizinde mevcut proseslerde gerekli iyileştirmeler yapıldığında fabrikanın enerji ve ekserji verimliliklerinin nasıl artırılacağı gösterilebilir. Değişik senaryolarla sistemdeki proseslere alternatif çözüm bulunarak iyileştirme sağlandığında, fabrikanın mevcut enerji ve ekserji verimliliklerinin nasıl değişebileceği analiz edilmiş olur.

Bununla ilgili olarak bulunan enerji ve ekserji sonuçlarına göre termoeconomik uygulamalar da yapılabilir [3, 9].

Bu enerji ve ekserji analizlerinin uygulanmasıyla fabrikanın enerji ekonomisi üzerine çalışmalar yapılarak, fabrika kârlılığıyla ilgili senaryolar üretilip irdelenebilir.

### SEMBOLLER

$C$  : Özgül ısı, kJ/kg K

$En_i$  : Enerji girişi, kJ/pg

$En_{net}$  : Net enerji transferi, kJ/pg

$En_{net_i}$  : Toplam net enerji transferi, kJ/pg

$En_o$  : Enerji çıkışı, kJ/pg

$Ex_i$  : Ekserji girişi, kJ/pg

$Ex_i$  : Ekserji kaybı, kJ/pg

$Ex_o$	: Ekserji çıkışı, kJ/pg
$g$	: Yerçekim ivmesi, 9,81 m/s <sup>2</sup>
$h$	: Hava veya buhar entalpisi, kJ/kg
$h_i$	: Entalpi girişi, kJ/kg
$h_o$	: Entalpi çıkışı, kJ/kg
$h_\infty$	: Ölü hâl entalpisi, kJ/kg
$I$	: Tersinmezlik, kJ/pg
$i$	: Giriş indisi
$m_i$	: Toplam kütle girişi, kg/pg
$m_o$	: Toplam kütle çıkışı, kg/pg
$o$	: Çıkış indisi
$O_x$	: Isı miktarı, kJ/pg
$s$	: Hava veya buhar entropisi, kJ/kg.K
$s_i$	: Entropi girişi, kJ/kg.K
$s_o$	: Entropi çıkışı, kJ/kg.K
$s_\infty$	: Ölü hâl entropisi, kJ/kg.K
$T_\infty$	: Ölü hâl sıcaklığı, K
$v_i$	: Akışkan giriş hızı, m/s
$v_o$	: Akışkan çıkış hızı, m/s
$W$	: İş, kJ/pg
$z_i$	: Giriş yükseklik farkı, m
$z_o$	: Çıkış yükseklik farkı, m
$\Theta$	: Enerji kalitesi
$\sum En_i$	: Toplam enerji girişi, kJ/pg
$\sum En_o$	: Toplam enerji çıkışı, kJ/pg
$\sum Ex_i$	: Toplam ekserji girişi, kJ/pg
$\sum Ex_o$	: Toplam ekserji çıkışı, kJ/pg
$\Psi$	: Hava veya buhar özgül akış ekserjisi, kJ/kg
$\infty$	: Ölü hâl (1 atm ve 25 °C)

## KAYNAKÇA

1. **Ensinas, A., Nebra, S. A.** 2007. "Design of Evaporation Systems and Heaters Networks in Sugar Cane Factories

Using a Thermo-economic Optimization Procedure," Int. J. of Thermodynamics, 10 (3), p. 97-105.

2. **Çolpan, C. Ö.** 2005. "Exergy Analysis of Combined Cycle Cogeneration Systems," Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s.120.
3. **Kotas, T. J.** 1995. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Anchor Brendon Ltd, London, p.328.
4. **Wang, L.** 2009. Energy Efficiency and Management in Food Processing Facilities, CRC Press, Boca Raton – London – New York, p. 452.
5. **Diñçer, I., Rosen, M. A.** 2007. Exergy, Elsevier, London, p. 450.
6. **Dalsgard, H.** 2002. "Simplification of Process Integration in Medium-Size Industry," Doktora Tezi, Department of Mechanical Engineering Philosophy Colorado State University Ford Collins, Colorado, USA, p. 295.
7. **Çengel, Y., Boles, Y.** 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık, ISBN 975-8431-91-9, s. 869.
8. **Taner, T.** 2013. "Gıda Sektöründe Enerji Verimliliği ve Enerji Yönetimi: Şeker Fabrikası Örneği," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 216.
9. **Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F., R.** 1988. Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes, ISBN 3-540-18864-9, Springer-Verlag, Berlin, p. 332.
10. **Tekin, T.** 1995. "Erzurum Şeker Fabrikasının Ekserji Analizi," Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, s. 112.
11. **Nurveren, K.** 2001 "Bor Şeker Fabrikası Buharlaştırma Sistemlerinin Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, s.76.
12. **Türközü, B.** 2008. "Çumra Şeker Fabrikası Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, s. 92.
13. **Gaggioli, R. A.** 1983. "Second Law Analysis for Process and Energy Engineering," In Efficiency and Costing; ACS Symposium Series; American Chemical Society, 0097-6156/83/0235-0003, p. 50.