

ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZ METODUYLA KAYSERİ ŞEKER FABRİKASINDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

H. Mehmet ŞAHİN*, **Adem ACIR***, **Eşref BAYSAL*** ve **Emre KOÇYİĞİT**

* Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Teknikokullar, Ankara
Akademi Bilgisayar, 38010 Kayseri

mesahin@gazi.edu.tr, adema@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 06.12.2005; Kabul/Accepted: 09.05.2006)

ÖZET

Bu çalışmada; Kayseri Şeker Fabrikası 2002–2003 yılı kampanya verileri kullanılarak şeker üretim süreçleri için termodinamiğin birinci kanun (enerji analizi) ve ikinci kanun (ekserji analizi) analizleri yapılmıştır. Endüstriyel tesislerde enerji ve ekserji analizleri termodinamik açıdan büyük önem taşımaktadır. Bu analizler endüstrideki üretim tesislerinin enerji verimliliğini artırmak ve atık enerjinin geri kazandırılmasını sağlamaktadır. Termodinamik açık sistem olarak ele alınan şeker üretim süreçlerine giren ve çıkan her bir durum için enerji ve ekserji analizi sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak şeker üretim süreçlerinin birinci ve ikinci kanun verimleri tespit edilmiştir. Elde edilen birinci ve ikinci kanun verimlerini iyileştirmek için Kayseri Şeker Fabrikasına tavsiyelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji, ekserji, şeker üretimi, termodinamik.

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY IN KAYSERİ SUGAR PLANT BY METHOD OF ENERGY AND EXERGY ANALYSES

ABSTRACT

In this study, the first (energy analysis) and second law (exergy analysis) of the thermodynamics for sugar production stages were analyzed by using the operational data from Kayseri Sugar Plant, Turkey in 2002–2003 campaign years. The energy and exergy analysis are very important for thermodynamics in the industrial plants. This analysis provide to increase energy efficiency of industrial production plants and to gain reuse of waste energy. The result of the energy and exergy analysis were employed for each case going in and out to all sugar production stages, as a steady-state open thermodynamics system. Depending on this result, the first and second law efficiencies of sugar production stages were determined. It was recommended Kayseri Sugar Plant to improve getting the first and second law efficiencies.

Keywords: Energy, exergy, sugar production, thermodynamics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin gelişimi ve dünya nüfusunun artması sonucu enerji gereksinimi gittikçe büyümektedir. Buna karşılık dünyada kullanılan klasik enerji rezervleri gelecek bir zamanda gereksinimi karşılayamaz ve oldukça pahalı hale gelecektir. Bu nedenle, mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak ve alternatif enerji türlerini geliştirmek mecburiyeti ortaya çıkmaktadır.

Bugün sanayinin ihtiyaç duyduğu enerji üretimi fosil (petrol, kömür ve doğal gaz) ile nükleer yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtların sebep olduğu lojistik

(taşıma ve dağıtım gibi) ve çevre kirliliği (atmosferde artan CO₂ dolayısıyla sera etkisi, SO₂ ve NO_x gazlarının sebep olduğu asit yağmuru vs.) problemleri, bu tip yakıtların kullanımını sınırlayabilirler. Bu yüzden 20. yüzyılın ikinci yarısında alternatif enerji kaynakları araştırılması ve mevcut enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması çalışmaları yoğun bir şekilde artmıştır. Son yıllarda bilim adamları, mühendisler ve araştırmacılar tarafından çevre kirliliği ve özellikle enerji tasarrufu yani mevcut sektörlerdeki kayıp enerjinin tekrar geri kazanımı amacıyla yapılan çalışmalarda bir artış gözlenmiştir [1–9].

Ülkelerin sürdürülebilir kalkınması için gerekli olan enerji kullanımı küresel ısınma, asit yağmurları, ozon tabakasının delinmesi, iklim değişimi gibi çevre felaketlerine sebep olmaktadır. Ayrıca enerjinin yoğun kullanımı, özellikle başlıca enerji kaynaklarımızdan olan fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması, tükenme eğilimlerinde olmaları ve bunun sonucu olarak giderek fiyatlarının sürekli artmasından dolayı ekserji terimi ve ekserji analizi insanlık için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle termodinamik kanunları önemli bir rol oynamaktadır. Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanımı veya kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. Özellikle birinci kanun enerji analizi yapmakta kullanılırken, ikinci kanun tersinir ve tersinmezliği belirlediği için ekserji analizini yapmamızı sağlar. Bu konu ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [10–15]. Bu nedenle bu çalışmada şeker üretim süreçlerinde enerji kullanımının, hem birinci kanun (enerji analizi) hem de ikinci kanuna dayalı termodinamik analizleri (ekserji analizi) yapılmıştır.

Kanada, Japonya, İtalya, Türkiye, vs. gibi farklı ülkelerde bulunan endüstriyel tesisler için enerji ve ekserji analizi üzerine çalışmalar yapılmakta olup, genel olarak bu çalışmalar tarımsal, ulaşım, endüstriyel, özel ve kullanıma tahsis edilmiş yerleşim merkezlerini kapsamaktadır [1–9]. Ekserji ve enerji analizi ile ilgili çalışmalar Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için önem arz etmektedir. Çünkü endüstriyel alanlardaki enerjinin kullanımı ve sonucunda ortaya çıkan enerji kaybı, enerji ve ekserji modellemeleri yardımıyla en aza indirilerek ülkenin ekonomi ve çevre kirliliğinin azaltılması yönünde katkıda bulunabileceği tahmin edilmektedir.

Genel olarak yapılan bu çalışmalarda; enerjinin korunumu ve ekonomik yapıdan faydalanabilmek amacıyla enerji ve ekserji analizi modellemeleri yapılmıştır. Bu modellemeler aracılığıyla, ülke için genel olarak farklı yöntemlerle elde edilen enerjiden etkili bir şekilde faydalanılabilmesi ve elde edilen bu enerjinin daha verimli kullanılabilmesi amacıyla ekserji analizlerine başvurularak endüstriyel tesislerin enerji verimlilikleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bu enerji verimlilik değerlerine bağlı olarak son yıllarda endüstriyel tesislerin üretim birimlerindeki enerji kayıplarının tespiti yapılarak, bu tesislerin daha az kayıp ve daha fazla verim elde edilebilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [1–15].

Bu analizler sonucunda endüstrideki üretim tesislerinde enerji verimliliğinin yükselmekte ve atık enerjinin geri kazandırılmasını sağlanmaktadır. Aynı zamanda da işletme giderlerini azaltmakla kalmayıp ülke ekonomisi ve çevresel problemler açısından önem taşımaktadır. Son yıllarda uluslararası alanda önem kazanan enerji ve ekserji analizi dikkate alınarak, yapılan bu çalışmada ülkemizde bulunan endüstriyel tesislerden birisi olan şeker fabrikaları ele alınmıştır. Çünkü Türkiye’de 33 tane şeker fabrikası bulunmakta olup, yıllık yaklaşık olarak 15 milyon tonun üzerinde pancar işlenerek 1.5 milyon tonu aşkın şeker üretilmekte, çok miktarda enerji

harcanmaktadır [1,21,22]. Dolayısıyla böyle bir kapasiteye sahip bu endüstriyel tesislerden birisi olan ve çok miktarlarda ısı enerji harcanan şeker fabrikalarının enerji ve ekserji analizlerinin yapılması tercih edilmiştir. Bu analizle yardımıyla şeker fabrikalarında ısı süreçlerindeki sistemlerin enerji kayıpları ve verimleri tespit edilebilecektir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak şeker fabrikalarında ekonomik iyileştirmeler yapılabilecektir.

Çok miktarlarda enerji harcayan şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analizi yapılmasıyla ülkemizde çevre ve ekonomik açıdan diğer endüstriyel tesisler içinde benzer çalışmalara örnek teşkil etmesi amaçlanmaktadır. Dolayısıyla tüm sektörel alanların böyle bir uygulamaya tabii tutulmasıyla endüstriyel tesislerin verimlerinde iyileştirmeler elde edilebilecektir.

Bu çalışmada; yıllık 1,3 milyon ton pancar kullanılarak şeker üretimi yapan Kayseri Şeker Fabrikasındaki şeker üretim süreçlerinin Tablo 1’de verilen 2002–2003 yılı kampanyası verileri kullanılarak [23], termodinamiğin birinci kanunu (enerji analizi) ve ikinci kanunu (ekserji analizi) için analizleri yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda her bir sürece giren ve çıkan durumlar için enerji ve ekserji analizi sonuçları tablolar halinde verilerek, bu süreçlerin birinci ve ikinci kanun verimleri tespit edilmiştir. Tesis için elde edilen birinci ve ikinci kanun verimlerinin artırılması yönünde tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. ŞEKER ÜRETİMİ (SUGAR PRODUCTION)

Bir şeker fabrikasında şeker üretimi dört ana süreçte elde edilir. Bunlar;

1. Pancar kıyımı ve ham şerbet üretimi
2. Şerbet arıtma
3. Şerbetin koyulaştırılması
4. Şeker kristalleştirme.

Şekil 1’de şematik olarak bütün süreçler açık termodinamik bir kontrol hacmi olarak ele alınarak tüm şeker üretim süreçlerine giren ve çıkanlar gösterilmiştir. Şeker fabrikasına getirilen pancar ilk önce yıkanır ve kıyılır. Ham şerbet üretiminde kıyılan pancar mekanik ve ısı yollarla sıkılır ve suyundan arıtılır. İkinci süreçte, birinci süreçten çıkan ham şerbet içerisindeki yabancı maddelerden arındırmak için sulandırılır. Üçüncü süreçte, ikinci süreçten gelen sulu şerbet ısı yollarla koyulaştırılır. Son süreç, şerbet üretiminin son aşaması, koyu şerbet kristalleştirilerek kristal şeker üretimi elde edilir. Tüm bu işlemler esnasında çok miktarlarda buhar ve ısı enerji harcanır [1,16-21].

3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analizlerinin gerçekleştirilmesindeki temel amaç:

1. Şeker üretim süreçlerinde sistemin akışını engelleyebilecek enerji kesintisine meydan vermemektir.

Tablo 1. 2002-2003 Kampanya dönemi Kayseri Şeker Fabrikası şeker üretimi süreçlerindeki madde bilançosu enerji ve ekserji analizi sonuçları (The calculation results of energy and exergy analyses in the mass balance of all sugar production processes of the 2002-2003 operating period (49.Period), Kayseri Sugar Plant, Turkey)

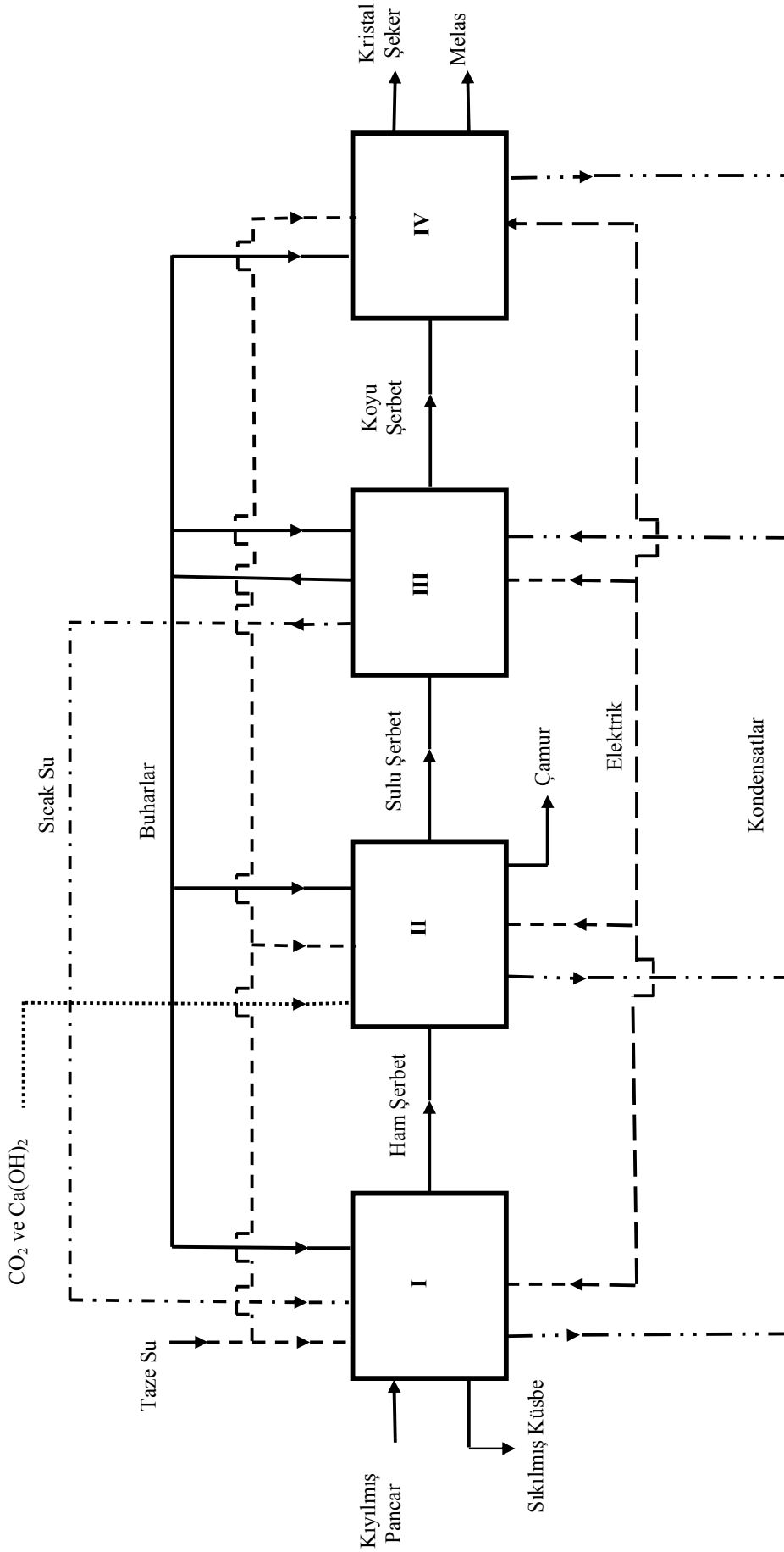
I. Sürece Giren Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Taze kıyım	100	22	100	7620	-
Taze su	47.6	76	100	15142.5	879.9
Prese suyu ısıtıcısı için fab. sıcak suyu	1.9	92	100	732.1	57.3
Sirkülasyon şerbeti ısıtıcı buharı	2.1	115	150	5672.2	1183.5
Elektrik				1400	1400
Toplam	151.6			30566.8	3520.7
I. Süreçten Çıkan Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Ham şerbet	112	55	100	20865.6	1240.6
Sıkılmış küspe	35.6	55	100	6568.1	363.9
Prese suyu ısıtıcı kondensatı	1.9	80	100	666.3	40.2
Sirkülasyon şerbeti ısıtıcı kondensatı	2.1	100	110	879.9	77.5
Toplam	151.6			28979.9	1722.2
II. Sürece Giren Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Ham şerbet	112	55	100	20865.6	1240.6
I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.0	86	57	5308.0	854.0
II. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.1	96	84	5607.7	1010.4
III. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.5	107	121	6719.7	1337.3
IV. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.3	117	169	6217.2	1337.2
Saturasyon ısıtıcı buharı	2.1	117	169	5676.6	1221.1
I. Sulu şerbet ısıtıcı buharı	1.8	132	270	4904.5	1170.6
II. Sulu şerbet ısıtıcı buharı	2.1	132	270	5721.9	1365.7
III. Sulu şerbet ısıtıcı buharı	1.7	132	270	4632.1	1105.5
Ek su	9.9	90	100	3731.4	282.7
Kireç sütü	8.5	90	100	-	-
Karbondioksit	1.4	90	100	-	-
Elektrik				2500	2500
Toplam	148.4			71884.7	13425.1
II. Süreçten Çıkan Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Sulu şerbet	122.8	125	100	58575.6	8721.3
I. Kireçli Ham şerbet ısıtıcı kondensatı	2.0	76	46	636.24	36.9
II. Kireçli Ham şerbet ısıtıcı kondensatı	2.1	85	58	747.37	51.9
III. Kireçli Ham şerbet ısıtıcı kondensatı	2.5	94	90	984.32	79.5
IV. Kireçli Ham şerbet ısıtıcı kondensatı	2.3	105	130	1012.32	179.8
Saturasyon ısıtıcı kondensatı	2.1	106	138	933.15	89.0
I. Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	1.8	120	216	906.7	102.1
II. Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	2.1	125	241	1102.45	129.9
III. Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	1.7	126	254	899.70	112.5
Çamur	9.0	40	100	-	-
Toplam	148.4			65797.8	9323.1
III. Sürece Giren Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Sulu şerbet	122.8	125	200	58575.6	8721.3
Retür buhar	51	137	313	139312.1	34298.9
Sirkülas. şerbeti ısıtıcı buharı konden.	2.0	103	122	863.4	79.3
I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı konden.	2.0	76	46	636.24	36.9
II. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı konden.	2.1	84	58	738.55	50.4
III. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı konden.	2.5	95	90	994.9	81.5
IV. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı konden.	2.3	105	130	1012.32	179.8
Saturasyon şerbeti ısıtıcı konden.	2.1	106	138	933.15	89.0
I. sulu şerbet ısıtıcı konden.	1.8	120	216	906.7	102.1
II. sulu şerbet ısıtıcı konden.	2.0	125	241	1050	122.9
III. sulu şerbet ısıtıcı konden.	1.7	126	254	899.7	112.5
Rafineri kris. şeker vak. ap. konden.	12.5	106	135	5554.5	529.9
Rafineri orta şeker vak. ap. konden.	2.0	101	110	846.52	75.6
Rafineri son şeker vak. ap. konden.	1.5	90	76	565.38	42.8

Rafineride eritmelerden gelen konden.	2.0	108	140	905.66	88.6
Rafineri şurup depo. ısıt. konden.	1.2	103	122	518.04	47.6
Rafineri şeker kurutmada gelen konden.	0.7	97	95	284.46	24.0
R.vak. ap. yık. ve sant. yıkama buh. kon.	1.8	108	144	815.09	79.7
Elektrik				500	500
Toplam	214			215912.3	45262.8
III. Süreçten Çıkan Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Koyu şerbet	32.1	88	68	6927.1	217.7
Sirkülas. şerbeti ısıtıcı buharı	2.0	107	121	5375.7	1069.8
I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.0	86	57	5308.0	854.0
II. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.1	96	84	5607.6	1010.3
III. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.5	107	121	6719.7	1337.2
IV. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2.3	116	169	6212.5	1337.9
Saturasyon şerbeti ısıtıcı buharı	2.1	116	169	5672.3	1221.6
I. sulu şerbet ısıtıcı buharı	1.8	132	270	4904.5	1170.6
II. sulu şerbet ısıtıcı buharı	2.0	132	270	5449.5	1300.7
III. sulu şerbet ısıtıcı buharı	1.7	132	270	4632.1	1105.6
Rafineri kris. şeker vak. ap. buh.	12.5	116	169	33763.7	7271.5
Rafineri orta şeker vak. ap. buh.	2.0	112	143	5391.3	1116.0
Rafineri son şeker vak. ap. buh.	1.5	101	101	4017.1	763.4
Rafineride eritmelerde kull. buhar	2.0	122	198	5421.2	1211.8
Rafineri şurup depo. ısıt. buh.	1.2	114	153	3238.4	680.1
Rafineri şeker kurut. buhar.	0.7	110	134	1884.8	383.8
R.vak. ap. yık. ve sant. yıkama buh.	1.8	124	211	4884.3	1107.7
Fabrika atık sıcak su	90.7	89	100	33803.9	2526.6
Kazan besleme kondensatı	51	110	144	23526.8	2359.9
Toplam	214			172740.5	28046.2
IV. Süreçten Giren Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Koyu şerbet	32.1	88	68	6927.1	217.7
Rafineri kris. şeker vak. ap. buharı	12.5	117	169	33789.2	7268.2
Rafineri orta şeker vak. ap. buharı	2.0	112	143	5391.2	1116.0
Rafineri son şeker vak. ap. buharı	1.5	102	101	4020.1	764.1
Rafineride eritme için kullanılan buhar	2.0	122	198	5421.2	1211.8
Rafineri şurup depo. ısıt. kul. buhar	1.1	114	153	2968.5	623.5
Şeker kurutmada kullanılan buhar	0.7	110	134	1884.8	383.8
Vak. ap. yık. ve sant. yıkama buh.	1.8	124	211	4884.2	1107.7
Ek su	2.4	70	100	703.1	35.4
Elektrik				3200	3200
Toplam	56.1			69189.4	15928.2
IV. Süreçten Çıkan Maddeler	\dot{m} (kg/pg)	T (°C)	P (kPa)	\dot{E} (kJ/pg)	\dot{E}_x (kJ/pg)
Kristal şeker	17.0	22	100	486.2	-
Rafineri kris. şeker vak. ap. konden.	12.5	106	135	5554.5	529.9
Rafineri orta şeker vak. ap. konden.	2.0	100	110	838.1	73.8
Rafineri son şeker vak. ap. konden.	1.5	90	76	565.4	42.8
Rafineride eritmelerden çıkan konden.	2.0	107	140	897.3	86.9
Rafineri şurup depo. ısıt. konden.	1.1	108	144	498.1	48.7
Şeker kurutmada çıkan konden.	0.7	106	135	311.4	29.7
II. Brüde ile uçurulan su buharı	9	76	38	23736.7	3280.7
III. Brüde ile uçurulan su buharı	2.2	76	38	5802.3	801.9
IV. Brüde ile uçurulan su buharı	1.1	76	38	2901.1	400.9
Vak. yık. ve sant. yık. buh. konden	1.8	108	144	815.1	79.8
Melas	5.2	30	100	-	-
Toplam	56.1			42406.2	5375.1

2. İşlem süreçleri sırasında meydana gelebilecek enerji kaybını en aza indirmektir.

Bu nedenle endüstriyel tesislerde olduğu gibi, şeker fabrikalarındaki üretim süreçlerinde de ısı ekonomisine

bağlı olarak enerji tüketimi tespit edilir. Tüm bunlara bağlı olarak şeker fabrikalarının termodinamik analizinin yapılabilmesi için kendi içerisinde belirli kontrol hacimlerine ayrılması gerekir. Bu kontrol hacimleri; pancar kıyımı ve ham şerbet üretimi, şerbet arıtma, şerbetin



Şekil 1. Şeker üretim süreçleri akış diyagramı (I) Ham Şerbet Üretimi; (II) Şerbet Arıtımı; (III) Şerbet Koyulaştırma; (IV) Şeker Kristalleştirme (Flow diagram of sugar production process) (I) Raw Juice Production; (II) Juice Clarification; (III) Juice Concentration; (IV) Sugar Crystallization

koyulaştırılması ve kristalleştirme olarak ele alınmıştır. İşletim süreçlerine bağlı olarak belirlenen kontrol hacimleri aracılığıyla enerji ve ekserji analizi tespiti yapılmıştır. Ayrıca bir kontrol hacminin termodinamik açıdan incelenmesinde üç ayrı bilançonun dikkate alınması gerekir. Bunlar;

1. Madde bilançosu
2. Enerji bilançosu
3. Kullanılabilir (ekserji) bilançosudur.

3.1. Şeker Üretim Süreçlerinde Enerji ve Ekserji Analizleri için Kullanılacak Eşitlikler (The Equation Used for Energy and Exergy Analyses in Sugar Production Processes)

Kütlenin korunumu prensibine göre; bir kontrol hacmine giren ve çıkan madde miktarları eşit olmak zorundadır ve aşağıdaki eşitlikle verilir [24–27].

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç$$

Termodinamiğin birinci kanununa göre enerjinin korunumu aşağıdaki eşitlikle belirlenir. Eşitliğin sol tarafı; şeker üretim sürecinde ısı, iş ve kütle yoluyla enerji transfer oranındaki değişimi, sağ tarafı ise; kinetik, potansiyel ve iç enerjideki değişim miktarını ifade etmektedir.

$$\sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_ç = \sum (\Delta \dot{E})_{sistem}$$

Kontrol hacmine giren ve çıkan ekserji değerleri aşağıdaki eşitliklerle elde edilirler.

$$\dot{E}x_g = \dot{m}_g [(h_g - h_o) - T_o(s_g - s_o) + \frac{V_g^2}{2} + gz_g]$$

$$\dot{E}x_ç = \dot{m}_ç [(h_ç - h_o) - T_o(s_ç - s_o) + \frac{V_ç^2}{2} + gz_ç]$$

Yine bu kontrol hacmindeki ekserji kayıpları veya tersinmezlikler sisteme giren ve çıkan ekserji miktarlarının farkı ile belirlenir.

$$\text{Toplam ekserji kaybı} = \text{Toplam ekserji girişi} - \text{Toplam ekserji çıkışı}$$

$$\sum \dot{E}x_L = \sum \dot{I} = \sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_ç$$

Tüm şeker üretim süreçleri için belirlenen kontrol hacmindeki enerji kayıpları da aşağıdaki eşitlikle bulunur:

$$\sum \dot{E}_L = \sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_ç$$

3.2. Ekserji Analizi (Exergy Analysis)

Ekserji tersinir bir süreç sonucunda çevre ile denge sağlandığı takdirde, teorik olarak elde edilen maksimum iş miktarıdır. Yani ekserji en basit anlamda, enerjinin kullanılabilen kısmıdır ve kullanılabilirlik olarak da ifade edilir. Enerji çoğunlukla belirsiz bir durumdur.

Ekserji iş veya iş üretebilme yeteneğidir. Bu tanımlara uygun olarak ekserjinin hesaplanabilmesi için çevre şartlarının bilinmesi gerekir. Tersinir süreçler yoluyla, bir madde doğal çevrenin temel elemanları ile termodinamik denge durumuna getirildiğinde elde edilebilecek iş miktarı o maddenin ekserjisine eşittir [24–27].

Bir maddenin sıcaklığı (T) ve basıncındaki (P) özgül entalpisi (h) ve özgül entropisi (s) olduğunda özgül ekserjisi veya kullanılabilirliği;

$$ex = h - h_o - T_o(s - s_o)$$

denklemi ile hesaplanır, burada kinetik ve potansiyel etkiler ihmal edilmiştir. Bu eşitlikte; şeker su çözeltisinin çevre sıcaklığı (T_o), basıncı (P_o), entalpi (h_o) ve entropi (s_o) değerleridir. Şeker su çözeltisi için bu değerler referans [28]'den, su buharı için ilgili termodinamik tablolardan alınmıştır [25].

Bu çalışmada, verilerle analizler yapılarak elde edilen sonuçlarla her sürecin sonunda sistemin birinci ve ikinci kanun verimleri süreçteki tersinmezlikler hesaplanmaktadır. Verim, süreçten çıkan maddelerin toplam enerji miktarının, sürece giren maddelerin toplam enerji miktarına oranlanması ile elde edilmektedir. Termodinamiğin birinci ve ikinci kanun verimleri;

Sürecin birinci kanun verimi;

$$\text{Enerji verimi} = \frac{\text{Toplam enerji çıkışı}}{\text{Toplam enerji girişi}}$$

$$\eta_I = \frac{\sum \dot{E}_ç}{\sum \dot{E}_g}$$

Sürecin ikinci kanun verimi;

$$\text{Ekserji verimi} = \frac{\text{Toplam ekserji girişi} - \text{Toplam ekserji kaybı}}{\text{Toplam ekserji girişi}}$$

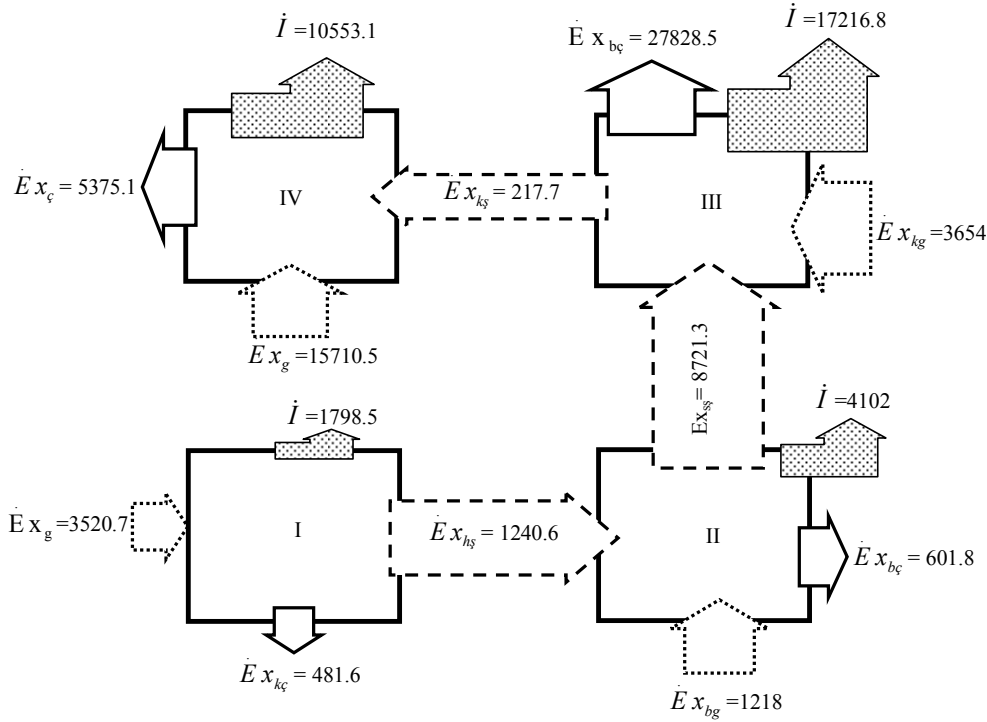
$$\eta_{II} = 1 - \frac{\sum \dot{E}x_L}{\sum \dot{E}x_g} \text{ şeklinde yazılır.}$$

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Birinci sürece giren taze kıyılmış şeker pancarından tüm süreçlerin sonunda kristal şeker ve melas üretilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2'de tüm şeker üretim süreçleri için hesaplanan enerji kayıpları, tersinmezlikler ve süreçlere giren ve çıkan enerji ve ekserji değerleri gö-

Tablo 2. Şeker üretim süreçlerinde enerji kaybı ve tersinmezlik değerleri (Energy loses and irreversibility values in sugar production process)

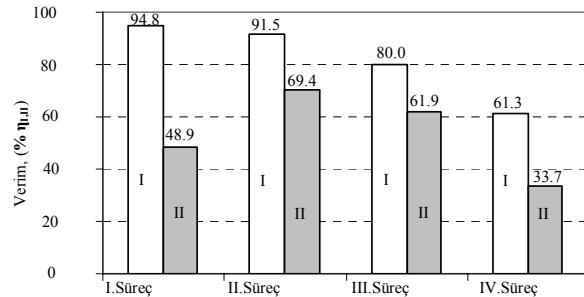
Şeker üretim süreci	$\sum \dot{E}_L$ (kJ/pg)	$\sum \dot{I}$ (kJ/pg)
Şerbet üretimi	1586,9	1798,5
Şerbet arıtımı	6086,9	4102
Koyulaştırma	43171,8	17216,6
Kristalleştirme	26783,2	10553,1



Şekil 2. Şeker üretim süreçleri ekserji band diyagramı (I) Ham Şerbet Üretimi; (II) Şerbet Arıtımı; (III) Şerbet Koyulaştırma; (IV) Şeker Kristalleştirme (Exergy band diagrams of the sugar production process (I) Raw Juice Production; (II) Juice Clarification; (III) Juice Concentration; (IV) Sugar Crystallization)

rülmektedir. Ayrıca Şekil 2’de, şeker üretim süreçleri için ekserji akış diyagramı da verilmiştir. Bu diyagramdan da görüleceği gibi, birinci kanun veriminin analizinde ele alınamayan ekserji değerleri ve tersinmezlikler, tespit edilerek, tüm süreçlerin ikinci kanun verimleri hesap edilmiştir. Böylece her bir süreçte enerjinin kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Şekil 3’te tüm şeker üretim süreçleri için hesaplanan birinci ve ikinci kanun verimleri görülmektedir. En düşük ikinci kanun verimi dördüncü süreçte (%33,7) bulunurken, en yüksek değer ikinci süreçte (%69,4) elde edilmiştir. En yüksek birinci kanun verimi (%94,8) birinci süreçte görülürken, ikinci, üçüncü ve dördüncü süreçlere geçildikçe birinci kanun verimleri sırayla (%91,5; %80 %61,9) düşmüştür. Öte yandan, en yüksek tersinmezlik üçüncü süreçte olurken, en



Şekil 3. Şeker üretim süreçlerinde enerji ve ekserji analiz sonucu elde edilen birinci ve ikinci kanun verim değerleri (The first and second laws efficiencies obtained from in the results of energy and exergy analyses in sugar production process)

düşük tersinmezlik birinci süreçte olmuştur. Bunun sebebi, en yüksek enerji akışının (enerji girişi ve çıkışı) üçüncü süreçte (koyulaştırma sürecinde), en düşük enerji akışının da birinci süreçte olmasıdır. Enerji miktarı ile tersinmezlik doğru orantılı olurken sadece dördüncü süreçte enerji akışına oranla tersinmezlik yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise elde edilen kristal şeker ve melasın süreçten çevre şartlarında yani 22°C ve 100 kPa’da çıkmasıdır.

Tablo 2’de görüldüğü gibi tersinmezlikler oldukça yüksektir. Bu tersinmezlik değerlerinin yüksek çıkmasının sebebi, sonlu sıcaklık farklarının oldukça yüksek olmasındandır. Şeker üretim süreçlerinde verimleri artırmak için bu değerler düşürülmelidir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kayseri Şeker Fabrikası 2002–2003 sezonu verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda fabrika şeker üretim süreçlerinde daha yüksek verimler elde etmek için aşağıdaki öneriler göz önüne alınmalıdır.

1. Birinci süreçte (şerbet üretimi süreci) ham şerbet tarafından taşınan enerji ve ekserji değeri eşanjörlerdeki kayıplar azaltılarak verimler artırılabilir.
2. Birinci süreçten sıkılmış küspe ile ayrılan enerji ve ekserji değerleri düşürülerek verimlerinin artırılması için süreçten ayrılmadan sıkılmış küspenin sıcaklığı süreç içerisinde bırakılarak düşürülmelidir.
3. İkinci süreçten (şerbet arıtımı süreci) ayrılan sulu şerbetin üçüncü sürece taşıyacağı enerji ve ekserji değerlerini artırmak için sulu şerbet sıcaklığı ısıtıcı

buhar sıcaklığına yakın tutularak yükseltmeli ve böylece bu sürecin verimi artırılabilir.

4. İkinci süreçte atık madde olarak ayrılan çamurun sıcaklığı en düşük seviyede tutulmalı böylece taşıyacağı enerji ve ekserji değeri düşürülerek bu sürecin verimi artırılabilir.
5. Üçüncü süreçte (şerbetin koyulaştırılması süreci) brüdelere ve buhar, şerbetin ısıtılması için tekrar kullanılmalıdır.
6. Dördüncü süreçte (şekerin kristalleştirilme süreci) şekerin pişirilmesi esnasında yüksek sıcaklık farkları olmaktadır. Bu yüksek sıcaklık farklarında enerji kayıpları çok yüksek olmaktadır. Bu kayıplar önlenerek verimler artırılabilir.
7. Dördüncü süreçte buharla çevreye atılan enerjiden faydalanılmalıdır. Böylece fabrika genelinde bir enerji tasarrufu sağlanmış olunacaktır.
8. Yinede dördüncü süreçte tüketilen elektrik enerji miktarı düşürülmelidir. Böylece tüm sistemin verimleri artacaktır.
9. Fabrika kojenerasyon (birleşik güç sistemleri) uygulamalarına ağırlık verilmeli, atık ısılardan maksimum seviyelerde faydalanılmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya 41/2005-01 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi çerçevesinde maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Kayseri Şeker Fabrikası Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

Ex	: Ekserji, kJ/pg
E	: Enerji, kJ/pg
h	: Özgül entalpi, kJ/kg
İ	: Birim zamanda tersinmezlik
m	: Kütle, kg/pg
P	: Basınç, kPa
s	: Özgül entropi, kJ/kg
pg%	: Birim pancar, 100 kg
T	: Sıcaklık, °C, K
V	: Hız, m/s
z	: Yükseklik, m
η	: Verim, %

Alt indisler (Subscripts)

bç	: Buhar çıkışı
bg	: Buhar girişi
ç	: Çıkan
g	: Giren
hş	: Ham şerbet
I	: Birinci kanun
II	: İkinci kanun
kç	: Kondensat çıkışı
kg	: Kondensat girişi
kş	: Koyu şerbet
L	: Kayıp
o	: Çevre (22 °C, 100 kPa)
sş	: Sulu şerbet

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Koçyiğit, E., **Kayseri Şeker Fabrikası Şeker Üretim Proseslerinde Enerji Ve Ekserji Analizi**, Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
2. Kahraman, N., Cengel, Y. A., "Exergy Analysis of a MSF Distillation Plant", **Energy Conversion and Management**, Cilt 46, 15-16, 2625-2636, 2005.
3. Dincer, I., "Thermodynamics, Exergy and Environmental Impact", **Energy Sources**, Cilt 22, 723-732, 2000.
4. Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., "Energy and Exergy Use in Residential Sector of Saudi Arabia", **Energy Sources**, Cilt 26, 1239-1252, 2004.
5. Utlu Z., Hepbasli, A., "Analysis of Energy and Exergy Use of the Turkish Residential-Commercial Sector", **Building and Environment**, 40, 5, 641-655, 2005.
6. Dincer, I., "Thermodynamics, Exergy and Environmental Impact", **Energy Sources**, Cilt 22, 723-732, 2000.
7. Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., "Energy and Exergy Use in Residential Sector of Saudi Arabia", **Energy Sources**, Cilt 26, 1239-1252, 2004.
8. Dincer, İ., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I., "Energy and Exergy Use in the Utility Sector of Saudi" Desalination 169 (3): 245-255, 2004.
9. Ertesvag, I.S., Energy, Exergy, and Extended-Exergy Analysis of the Norwegian Society 2000, **Energy** 30 (5): 649-675, 2005.
10. Wall G., **Exergy-a Useful Concept, Physical Resource Theory Group**, PhD. Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, Sweden, 1986.
11. Wall G. Exergy Flows in Industrial Processes. **Energy**; 13(2): 197-208, 1998.
12. Günther, F., <http://www.holon.se/folke/kurs/Distans/Ekofys/fysbas/exergy/exergybasics.shtml>, 2006.
13. Ahern, J.E., **The Exergy Method of Energy Systems Analysis**, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1980.
14. Szargut, J., Morris, D.R. ve Steward, F.R., **Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process**, Hemisphere Publishing Corporation, New York, A.B.D., 1988.
15. Çamdalı, Ü., Erişen, A. ve Çelen, F., "Energy and Exergy Analyses in a Rotary Burner with Pre-Calcinations in Cement Production", **Energy Conversion and Management**, Cilt 45, 3017-3031, 2004.
16. Bayrak, M., Midilli, A. ve Nurveren, K., "Energy and Exergy Analyses of Sugar Production Stages" **International Journal of Energy Research**, Cilt 27, 989-1001, 2003.
17. Nurveren, K., **Exergy Analysis of Evaporator Systems of Bor Sugar Plant**, MSc Thesis, University of Nigde, Turkey, 2001.

18. Tekin T, Bayramoğlu M., “Exergy Analysis of the Sugar Production Process from Sugar Beets”, **International Journal of Energy Research**, Cilt 22, 591–601, 1998.
19. Tekin, T. ve Bayramoğlu, M., “Exergy and Structural Analysis of Raw Juice Production and Steam-Power Units of a Sugar Production Plant”, **Energy**, Cilt 26, 287–297, 2001.
20. Ram, J.R., ve Banerjee, R., “Energy and Cogeneration Targeting for a Sugar Factory” **Applied Thermal Engineering**, Cilt 23, 1567-1575, 2003.
21. Midilli, A. ve Küçük, H., “Energy and Exergy Analyses of Solar Drying Process of Pistachio”, **Energy**, Cilt 28, 539–556, 2003.
22. Türkiye Şeker Fabrikaları AŞ, www.turkseker.gov.tr (11.11.2005).
23. TR, “2002/2003 Kampanyası (48. Kampanya) Teknik Raporu”, **Kayseri Şeker Fabrikası**, Türkiye, 2003.
24. Bejan A., **Advanced Engineering Thermodynamics**, Wiley&Sons., New York, A.B.D, 1998.
25. Çengel A. ve Boles Y., **Thermodynamics: An Engineering Approach**, McGraw-Hill, Inc., 1994.
26. Wylen, G, V., SonnTag, R. ve Borgnakke, C., **Fundamentals of Classical Thermodynamics**, John Wiley-Sons, New York, A.B.D, 1994.
27. Öztürk, H, H., Başçetinçelik, A., “Isı Depolama Tekniği”, Çukurova Üniversitesi, Türkiye, 2002.
28. Sugar Technology, <http://www.sugartech.co.za/matlprop.php3>, (11.11.2005).

