

# ESKİŞEHİR KAZIM TAŞKENT ŞEKER FABRİKASININ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ\*

**Buket ÇAM**

Makina Mühendisi, Eskişehir  
buketcam@gmail.com

**L.Berrin ERBAY\*\***

Prof. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,  
Mühendislik Mimarlık Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
lberbay@ogu.edu.tr

## ÖZET

Son yıllarda, araştırmacıların ve politikacıların önem verdiği konuların başında enerji gelmektedir. Hem dünyamızın geleceğinde muhtemel olan “enerji kıtlığı” tehlikesi, hem de yeryüzünde yaşanan çeşitli çevre sorunları açısından kritik öneme sahip olan enerji verimliliği ülkemiz açısından da günceldir. Şeker üretim teknolojisi enerjinin yoğun tüketildiği alanlardan olması sebebiyle enerji verimliliği açısından dikkatle değerlendirilmelidir. Enerji verimliliğinin artırılması için öncelikle verimsizliklerin belirlenmesi gerekmektedir ki ekserji analizi bu açıdan çok etkin bir güçtür. Bu çalışmada Kazım Taşkent Eskişehir Şeker Fabrikasına ait şeker üretim birimleri ekserjistik yönden incelenmiştir. Ele alınan tüm süreçler sürekli akışlı açık sistemler olarak kabul edilmiştir. Süreçlere ait yapılan enerji ve ekserji hesaplamaları ile süreçlerin verimliliği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda en düşük enerji verimine sahip ve en yüksek enerji verimine sahip üniteler sırasıyla %74 ve %95 değerlerindeki, buharlaştırıcı ve ham şerbet üniteleridir. İkinci yasanın kullanılmasıyla bulunan sonuçlara dayanarak da en yüksek tersinmezliğin buharlaştırıcı ünitesinde olduğu belirtilmiştir. Çalışmada her süreçte ait ekserji ve enerji verim hesaplanmış ve tersinmezlik nedenleri açıklanarak verimliliği artırabilecek faydalı tanılara değinilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Şeker fabrikası analizi, ekserji analizi, enerji analizi, endüstriyel fabrika analizi,

## Energy and Exergy Analysis of Eskişehir Kazım Taşkent Sugar Plant

## ABSTRACT

In recent years, energy is the leading subject to which researchers and politicians attached importance. Energy efficiency having a critical importance for both the possible danger of “energy shortage” in the world future and various environmental problems realized globally is also important for our country. Since the sugar production technology is one of the heavily energy consuming ones, it must be evaluated carefully in terms of energy efficiency. Exergy analysis is a most powerful technique for determining the inefficiencies increase the energy efficiency. In this study, the sugar production units of Kazım Taşkent Eskişehir Sugar Factory have been evaluated in terms of energy. The production processes on the sugar production from the beet is considered as steady-state open systems. The efficiency of processes are calculated via energy and exergetic calculations. According to calculation the biggest and lowest efficient of energy at the process is with %95 belong sherbet production stage and with %72 belong sherbet thickning stage respectively. The biggest irreversibility at the process is sherbet thickning stage. The useful identifications for increasing efficiency are mentioned by explaining the reasons of inefficiencies of processes.

**Keywords :** Sugar factory analysis, exergy analysis, energy analysis, industrial plant analysis

\*\* İletişim Yazarı

\* Geliş tarihi : 28.04.2011  
Kabul tarihi : 18.07.2011

## GİRİŞ

**D**ünyada enerji tüketiminin bu şekilde devam etmesi durumunda 2020 yılında fosil yakıt kaynaklarının yarısının tüketilmiş olacağı tahmin edilmektedir. Fosil kaynaklar, sadece yakıt olarak değil aynı zamanda başta ilaç olmak üzere kimya sektöründe pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yönyle de korunması, en azından tüketiminin azaltılması önemlidir. Kömür veya petrol gibi fosil yakıtların yanması sonucu, daima CO<sub>2</sub> oluşur. Yapılan ölçümler milyonlarca yıldır 180-280 ppm arasında değişen CO<sub>2</sub> seviyesinin günümüzde 360 ppm seviyesine çıktığını göstermektedir. Karbondioksit diğer sera gazlarına göre %55'lik bir oranla, doğal sıcaklık dengelerinin bozulmasında en büyük etkiye yaparak küresel ısınmaya neden olmaktadır [1]. Fosil yakıtların sebep olduğu lojistik (taşıma ve dağıtım gibi) ve çevre kirliliği (atmosferde artan CO<sub>2</sub> dolayısıyla sera etkisi, SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> 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 armitter. Son yıllarda bilim adamları, mühendisler ve araştırmacılar tarafından çevre kirliliği ve özellikle enerji tasarrufu, yani mevcut sektörlerdeki enerjinin verimli kullanılması amacıyla yapılan çalışmalarında bir artış gözlenmiştir.

Enerji ihtiyacının % 62'sini ithal etmek zorunda olan ve fosil yakıt kullanarak elektrik enerjisine dönüşüm sağlayan santrallerin toplam veriminin %30 olduğu ülkemizde enerjinin verimli kullanımının önemi açıkça görülmektedir. Enerjinin bu denli verimsiz olması enerji maliyetini de yükseltmektedir. Enerji verimliliği direkt ekonomik katkı olarak sunulabilmektedir [2]. Enerjinin ekonomik kullanılabilmesi işletmelerin hem girdilerini düşürecek hem de çevreye verilen zarar daha aza indirilmiş olacaktır. Enerjinin etkili kullanılabilmesinde işletmelerin ilgili prosesleri için, ekserji terimi ve ekserji analizi önem taşımaktadır.

Enerji ve ekserji ortak bir birimi paylaşıyor ve enerji transferine ekserji transferinde eşlik ediyor olsa da temelde farklı kavramdır. Enerji ve ekserji sırasıyla termodinamiğin birinci ve ikinci yasası ile ilgilidir. Enerji korunur; fakat ekserji tersinmezliklerle yıkıma uğrar. Ekserji performansı enerjiden daha çarpıcı bir şekilde ortaya koyar; çünkü ekserji ortak temeldeki tüm enerji transferlerini açıklar ve ekserji yıkımı doğrultusunda tersinmezliklerin etkisini açık bir şekilde hesaplar [3]. Termodinamiğin birinci kanunu (enerji analizi) enerjinin niceliği ikinci kanunu (ekserji analizi) ise niteliği (yani bir değişime uğrama yeteneği) ile uğraşır. Enerjinin bir değişime uğrama sonucunda azami iş elde edilmesi makine mühendisliğinin temel konusu olmuştur. İş

enerji, ısı enerjisi ve kimyasal enerji gibi bazı enerji türleri; tersinir değişime uğratıldığılarında son konumda çevre şartlarında denge durumuna gelir ve bu denge durumunda hâlâ belirli bir enerjide oldukları hâlde enerjilerinin tamamını işe dönüştürmek mümkün olmaz. Bundan anlaşılacağı üzere enerjinin ancak bir kısmı kullanılabilir. Enerjinin kullanılabilirlik kısmını birinci ve ikinci kanun yardımıyla bulmak mümkündür. Termodinamiğin ikinci kanununa göre kayıpların en aza indirildiği gelişmiş-karmaşık (sofistike) işlemler için yapılan yatırımlar gün geçtikçe teknolojinin ilerlemesiyle daha ekonomik olmaktadır. İkinci kanun analizi tasarımcının yararlandığı başlıca araçlardan biri haline gelmiş ve son yirmi yılda termodinamikçilerin üzerinde çalıştığı en önemli konulardan biri olmuştur. Ekserji bir maddenin tersinir işlemler aracılığıyla doğal çevrenin genel bileşenleriyle termodinamik dengeye getirilmesi durumunda elde edilen iş olarak tanımlanmıştır [1-4].

Dünyanın birçok gelişmiş farklı ülkelerinde (Kanada; Japonya; Hindistan; Türkiye vb.) bulunan endüstriyel tesisler için enerji ve ekserji analizi üzerine çalışmalar yapılmaktadır, genel olarak bu çalışmalar tarımsal, ulaşım, endüstriyel, özel ve kullanımına tahsis edilmiş yerleşim merkezlerini kapsamaktadır. Türkiye'de şeker fabrikalarının önemini kavranmasıyla beraber şeker fabrikalarında kullanılan enerjinin verimliliğinin artırılması çalışmaları da gittikçe hızlanmış ve önem kazanmıştır.

Buna bağlı olarak yapılan literatür araştırmalarında; Şahin vd. Kayseri Şeker Fabrikası 2002–2003 yılı kampanya verilerini kullanılarak şeker üretim süreçleri için termodinamiğin birinci kanun (enerji analizi) ve ikinci kanun (ekserji analizi) analizleri yapmışlardır. Elde edilen birinci ve ikinci kanun verimlerini iyileştirmek için Kayseri Şeker Fabrikasına tavsiyelerde bulunmuşlardır [5]. Antonio vd. ise Brezilya'da bir şeker fabrikasının termo-ekserjistik analizini incelemiştir. Bu çalışma Brezilyada uygulanan kuspe tabanlı kojenerasyon ünitesi sistemin ekonomik analizinin de yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu uygulamayla endüstriyel ihtiyaçları azaltacak yönde enerji bağımsızlığına yol göstermiş, elektrik üreterek enerji ihtiyacını karşılamada katkı sağlamıştır [6]. Kamate ve Gangavati ise günde 2500 ton şeker kamişi işleyen bir şeker fabrikasında yaptıkları analizde ekserji yöntemlerinin yanı sıra enerji analizleri, sistem bileşenlerinin verimliliği ve termodinamik kayıpları da hesaplanmıştır. Sistemin en verimli bileşeni ve en verimsiz bileşenini tespit etmişlerdir [7]. J.R. Ram ve R. Banerjee yaptıkları araştırmada Hindistan'daki bir şeker fabrikasının kojenerasyon ve enerji dengesini incelemiştir. Buharlaştırıcı tasarımında buharlaştırıcının yüzey alanının mevcut sisteme uygun olmadığı ve buhar tüketim miktarının artırılması konularında tavsiyelerde bulunmuştur [8]. M. Yılmaz Gürleyik ve arkadaşları, Bor Şeker Fabrikasında üretilen proses buharının kullanıldığı bütün üretim birimlerini

ekserjistik yönden incelemiştir. Süreçlerdeki ekserjistik verimsizliğin nedenlerini açıklamış ve verimi artırmak için faydalı tanımlar yapmışlardır [9]. B. Türközü vd., Çumra Şeker Fabrikası şeker üretimindeki süreçler, sürekli akışı açık bir sistem olarak ele alınmış ve termodinamigin II. Yasasına göre analizi yapılmıştır [10]. Tekin, yaptığı çalışmada, Erzurum Şeker Fabrikasının ekserji analizini yapmıştır. Bu amaçla sistemin matematik modelini kurarak her bir alt ünite için ekserji bant diyagramı oluşturmuş ve enerji, ekserji kayıp miktarlarıyla yerlerini belirlemiştir. Ayrıca yapısal bağ katsayılarıyla tesisin üniteleri arasındaki etkileşimleri incelemiştir. Sonuçta bazı proses değişkenlerin uygun şekilde ayarlanması, ekserji kaybında %26'luk bir azalmanın mümkün olacağını ortaya koymuştur [11].

Bu çalışmada Konya ve Ereğli fabrikalarından sonra Türkiye'deki en çok pancarı işleyen Kazım Taşkent Eskişehir fabrikasının enerji ve ekserji analizi yapılmış ve fabrika bünyesinde incelenen süreçlerdeki tersinmezlikler belirlenmiştir. Çok miktarlarda enerji harcayan şeker fabrikalarında enerji ve ekserji analizi yapılmasıyla ülkemizde çevre ve ekonomiklik açıdan diğer endüstriyel tesisler içinde benzer çalışmalara örnek teşkil etmesi amaçlanmıştır. Kazım Taşkent Eskişehir şeker fabrikası bizzat Atatürk'ün isteğiyle 1 Nisan 1933 yılında montajına başlanmış ve 5 Aralık 1933 yılında da açılışı yapılarak üretime başlatılmıştır. Bu çalışmada şeker üretiminin ana süreçleri olan ham şerbet üretim ünitesi, şeker arıtım ünitesi, buharlaştırma ünitesi ve rafineri ünitesi ele alınmış ve bu ünitelerdeki ekserji verimler incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarla her ünitenin tersinmezlikleri belirlenmiş ve tersinmezlikleri azaltmak için yapılabilecekler hakkında öneriler verilmiştir. Ayrıca her üniteye giren ve çıkan maddelerin enerji ve ekserji bilgileri tablolar halinde verilmiştir.

## MATERIAL VE METOT

Şeker üretim sistemleri enerji ve ekserji analizi kapsamında sürekli akışı açık termodinamik sistemler olarak belirlenmiştir. Şeker üretim sistemi dört ana bölüme ayrılmıştır. Şekli 1'de bu ana üniteleri ve ünitelerdeki akış çizgesini gösterilmiştir. Üniteler; ham şerbet üretimi ünitesi, şerbet arıtım ünitesi, buharlaştırma ünitesi, rafineri ünitesi.

### 1. Ünite: Ham Şerbet Üretim Ünitesi

Şeker üretim süreci meydan tesislerinde başlar. Şeker fabrikasına getirilen veya tesessim merkezlerinde sevk edilen pancar, fabrika meydanındaki kantarlıarda tartılır ve meydandaki pancar silolarına boşaltılır. Silolarda bulunan pancar, yüzdürme kanallarından fabrikaya su ile sevk edilir. Pancar yüzdürme kanalları vasıtıyla fabrikaya sevk edilen pancar içindeki otlar, kanallar üzerinde bulunan ot tutucuda, taşlar ise taş tutucuda ayrıştırılır. Taşından, kumundan,

toprağından kısmen ayrılan pancar; döner kollu yıkama teknesinde 10-15 dakika döndürülerek yıkanır. Yıkanan pancar artık kiyime hazırlıdır. Pancar kiyim makineleri genellikle ekseni üzerinde dikilmiş silindirik bir bunker (depo) ve bu eksene dik donebilen bir pancar kiyima tablasından oluşur. Bu tabla üzerinde bıçak gruplarını taşıyan pancar, bıçak kasaları yerleştirilmiştir. Ağırlığıyla bıçaklara gelen pancar, dönen bıçaklar vasıtıyla kiyim haline getirilir. Pancar bıçaklarında kiyilan pancar, kiyimleri nakıl bandında sürekli otomatik kantarda tartılarak haslama teknesine verilir [12-13].

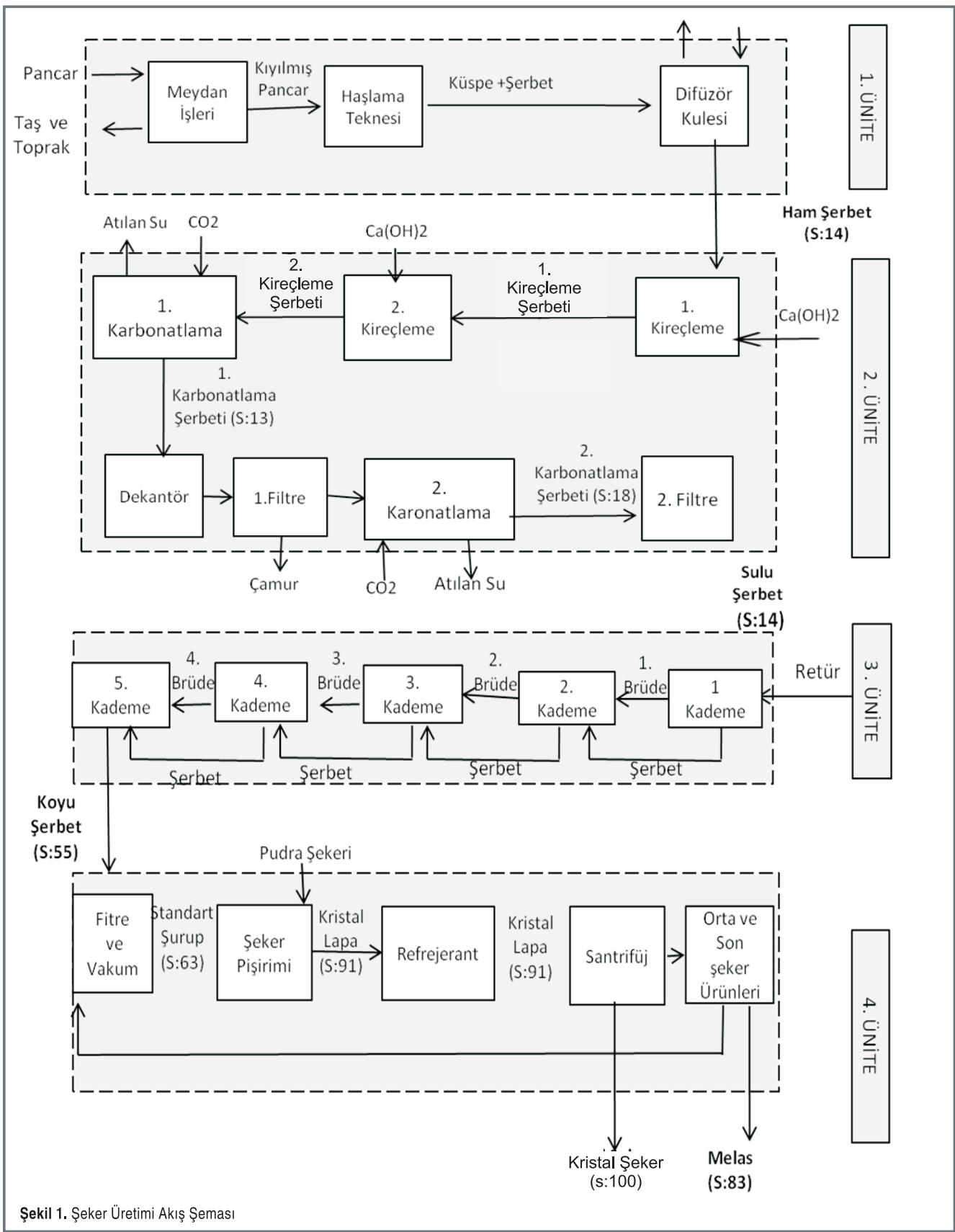
Haslama teknesinde amaç hem ısıtıcıdan geçirilen sirkülasyon şerbetiyle kiyimları ısıtarak optimal difüzyon sıcaklığı olan 70-72 °C ye getirmek ve pancarın hücrelerini denature (pancar hücrelerinin hücre duvarları ısıl işlem uygulanarak şekerin hücre dışına çıkışmasına izin verecek hâle getirilmesi) etmek, hem de şekerin şerbetle karıştırarak difüzyöre pompalanabilir hâle getirmektir. Haslama teknesinde pancar kiyimleri şerbetle karıştırılarak difüzyon kulesinin alt süzgecinin hemen üzerine basılır. Dönen kanatlar vasıtıyla kiyimlar kulenin altında tepesine doğru, ham şerbet ise kulenin alt kısmına doğru ilerler. Kulenin üstünden şeker alınış yaş pancar posası helezon vasıtıyla atılır, kulenin alt kısmından da ham şerbet dışarı çıkar [12-13].

### 2. Ünite: Şerbet Arıtım Ünitesi

Ham şerbet ilk olarak 1. Kireçleme kulelerine gelir. Birinci kireçleme istasyonunda amaç, ham şerbeteki şeker dışı maddeleri, kireç sütü  $[Ca(OH)_2]$  kullanarak kademeli olarak pH 11'e getirmek ve çöktürmektir. 1. Kireçleme istasyonunda çökme işlemi sağlanır çökme işlemi tamamlanmış şerbet 2. kireçleme ünitesine alınır burada da 1. Kireçleme istasyonunda çökmemiş şeker dışı maddelerin çöktürülmesi sağlanır. Şeker dışı maddeler aranmış; fakat içerisinde kireç sütü bulunan şerbet kireç sütünün çöktürülmesi için, 1. karbonatlama kazanına gelir. Burada şerbet kazanın alt kısmından  $CO_2$  verilir. Bu sayede şerbetin içerisindeki kireç sütü çöktürülmüş olur. I. Karbonatlama çamurlu şerbeti dekantörde çöktürülür. Dekantörler bir tür santrifüj yoğunlaştırıcıdır, çamuru hem yoğunlaştırmak, hem de suyunu almak için kullanılırlar. Filtre edilen I. Karbonatlama şerbeti, içindeki kalan kireci de alabilmek için II. Karbonatlama tabi tutulur. II. Karbonatlama kazanı I. Karbonatlama kazanı gibi çalışır. II. Karbonatlama şerbeti arıtılmış sulu şerbet olarak buharlaştırma istasyonuna kamarası içinden geçen boruların dışındaki ısıtma buharının etkisiyle isınarak girer [12-13].

### 3. Ünite: Buharlaştırıcı Ünitesi

Buharlaştırma istasyonları, birkaç buharlaştırıcının seri olarak bağlanmasından meydana gelir. Türbinden alınan buhar (retür) sadece ilk kademede şerbetin buharlaştırılmasında kullanılır. Diğer kademeler için gereken buhar ise önceki



Şekil 1. Şeker Üretimi Akış Şeması

kademeden alınan şerbet buharından (brüde) karşılanmaktadır. İkinci kademenin basıncı birinci kademeden daha azdır. Böylece birinci kademenin buhari ikinci kademeyi kaynatır. Kademeyle ilerledikçe basınç ve sıcaklık düşmeye devam eder. Son kademenin buhari yoğunlukuya gönderilir [12-13-14].

## 4. Ünite: Rafineri Ünitesi

Koyu şerbet buradan rafineri ünitesine girer. Rafineride ilk işlem %60-65 kuru maddeli koyu şerbetin süzülmesidir. Daha sonra koyu şerbet 1. Eritmede şeker miktarı daha az olan 1.eritme şurubuya karıştırılır. Bu karışım sonunda standart şurup olmuş olur. Standart şurup pişirilerek lapa haline getirilir. Kristal şeker lapası adı verilen bu lapa refrigerantlara (bekleme kazanlarına) alınır. Refrigerantlardaki lapa, santrifüjlerin ihtiyacı kadar bir debi ile santrifüjlere işlenmek üzere sevk edilir. Kristal lapa içindeki sakaroz kristallerinin ayrılması işlemi santrifüjlere yapılır. Lapa santrifüjlenliğinde kristaller silindirin içinde kalırken şurup dışındaki gövdeye savrulur ve buradan depoya gönderilir. Kristal lapadan elde edilen kristaller kurutmaya gönderilerek kristal şeker elde edilirken depodaki şuruplar sırasıyla orta ve son şeker lapasına dönüştürülerek santrifüjlere verilir. Son şeker lapasından ayrılan şuruba melas adı verilir [12-13].

## TEORİK ANALİZ

Şeker fabrikasına ait termodinamik analizler yapılmırken aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır.

- Tüm kontrol hacimler sürekli akışlı açık termodinamik sistemlerdir, herhangi bir noktada zamana bağlı değişim yoktur.
- Üretim aşamasında filtrelerden atılan çamur ve pis suyun enerji ve ekserji değerleri ihmal edildi.
- Sistemin çevreye olan ısı alışverisi ihmal edilmiştir.

Yukarıda sıralanan kabuller doğrultusunda tüm hesaplamalar termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sürekli akışlı açık sistemlerin yer aldığı bu çalışmada sistemleri çözümlerken bir zaman süresince sisteme giren veya çıkan kütleden daha çok birim zamanda akan kütle veya kütle debisi önem kazanır. Birçok girişi ve çıkışının genel bir sürekli akış için kütlenin korunumu ilkesi denklem 1 'de verilmiştir [5-3-14].

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_c \quad (1)$$

Enerjinin korunumu yalıtılmış bir sistemdeki enerjinin toplam miktarının sabit kalmasıdır. Buna göre enerji kaybolamaz; ancak şeklini değiştirebilir [11]. Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacmine ısı veya kütle akışı olarak giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması zorunludur. Bu

düşündeden yola çıkararak genel bir sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci kanunu veya enerjinin korunumu ilkesi aşağıda belirtildiği şekilde yazılmıştır. Çalışmalarda potansiyel ve kinetik enerjilerihal edilecektir [8-12].

$$\sum \dot{Q} - \sum \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_c - \sum \dot{m}_g \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_g \quad (2)$$

Denklemde  $Q$  kontrol hacmi ile çevresi arasında birim zamanda olan ısı geçisidir. Yapılan kabullerde kontrol hacminin çevreyle ısı alış verisi olmadığı belirtilmiştir [15].  $W$  çalışmada bahsi geçen sürekli açık sistemler için sıfırdır. Kontrol hacim içerisinde iş yapılmamaktadır.

Termodinamiğin 1. kanununun verimi kontrol hacminden çıkan maddeye ait toplam entalpinin kontrol hacmine giren maddenin toplam entalpisine oranı ile ifade edilir [16]. İfadeyi cebirsel şekilde yazacak olursak denklem 3 elde edilir.

$$\eta_I = \frac{\sum \dot{E}_c}{\sum \dot{E}_g} \quad (3)$$

Ekserji tersinir bir süreç sonucunda çevre ile denge sağlandığı taktirde kuramsal olarak elde edilebilecek maksimum iş miktarı olarak tanımlanır. Ekserjinin hesaplanabilmesi için çevrenin sıcaklık, basınç, kimyasal komposisyonunun belirtilmesi ve tersinir bir sürecin var olduğunu kabul edilmesi gereklidir. Diğer tüm termodinamik analizlerde olduğu gibi tersinir sürecin nasıl olduğu değil başlangıç (giriş) ve bitiş (çıkış) noktaları için geçerli olan koşulların bilinmesi yeterlidir. Çeşitli enerji dönüşümlerini içeren süreçlerde verimliliğin artırılması yanı sıra, aynı amaçlara yönelik yeni süreçlerin değerlendirilmesi ve mevcut süreçlerle karşılaştırılması da çok önemlidir. Ekserji analizi, değişik süreçlerin ortak bir temele dayandırılarak tutarlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağladığı gibi, her süreçteki en verimsiz aşamaları ve bunların nedenlerini de ortaya çıkarmakta kullanılabilir. Şeker üretim sistemlerinde su-sakkoroz karışımı ekserji değerine sahiptirler. Yapılan ekserji hesaplamalarında çevresel şartlar  $20^\circ\text{C}$  olarak ele alınacaktır [15-19]. Bu çalışmada şuruplara ait özgül ekserjiler teknik sakaroz çözeltilerine ait grafiklerden elde edilmiş ve hesaplamalara yansıtılmıştır. Açık sürekli akışlı kontrol hacmine giren ve çıkan ekserji genel olarak denklem 4 ve denklem 5'te verildiği gibi hesaplanır.

$$\dot{Ex}_g = \dot{m}_g \left[ (h_g - h_0) - T_o (s_g - s_o) + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right] \quad (4)$$

$$\dot{Ex}_c = \dot{m}_c \left[ (h_c - h_0) - T_o (s_c - s_o) + \frac{V_c^2}{2} + gz_c \right] \quad (5)$$

Genel olarak sürekli akışlı açık sistemlerde enerji dengesi;

$$\dot{Ex}_g - \dot{Ex}_c = \dot{Ex}_{DL} \quad (6)$$

Burada belirtilen  $\dot{Ex}_{DL}$  yıkımı ve ekserji kayıplarının tümünü oluşturur, giren ve çıkan ekserjiler arası fark bu ifadeye eşittir. Ekserji yıkımı sistem içerisinde oluşan ve kesin geri kazanımı olmayan ekserjiyi, ekserji kaybı ise çevreye atılan fakat geri kazanımı olabilecek ekserjiyi ifade eder.

Enerjinin bir 'kalitesi' olduğunu idrak eden ve enerji kalitesinin sürdürülebilir gelişme için önemine işaret eden ekserji verimi de;

$$\eta_H = 1 - \frac{\sum \dot{Ex}_L}{\sum \dot{Ex}_g} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır.

Isıtıcılarda ısı aktarımı konveksiyonla gerçekleşir. Isıtıcıların içerisinde şerbet, dışından ise ısıtıcı buhar geçmektedir. Bu ısıticılarda boru dış yüzeyindeki sıcaklık, buhar sıcaklığında sabit olarak kabul edilir. Isıtıcı hesaplamalarında sistemi terk eden ısıtıcıya kondensat adı verilmiştir. Kondensatın sıcaklığının hesaplanması denklem 8 kullanılmıştır [20-21].

$$T_k = \frac{6.T_b + T_{gs} + T_{cs}}{8} \quad (8)$$

$T_b$  Isıtıcı buharın sıcaklığı, şerbet sıcaklığı ve  $T_k$  kondensat sıcaklığını temsil etmektedir.

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Birinci süreçte giren taze kıyılmış şeker pancarından tüm süreçlerin sonunda kristal şeker ve melas üretilmiştir. Ham şerbet üretimi için yapılan verimlilik hesabı çalışmasında süreçte giren ve çıkan ürünler ve elde edilen enerji ve ekserji miktarları aşağıda verilen tabloda sıralanmıştır.

Pancar kıyım işlemiyle başlayan ve pancarın içindeki şekerin denatüre edilerek ham şerbetin oluşturulması işlemine kadar olan süreçteki ekserjitik verimi %75,42 olarak hesaplanmıştır.

Ham şerbet üretim istasyonunun çıktısı olan ham şerbet, şerbet arıtım istasyonuna girer. Ham şerbet buradan sulu şerbet olarak çıkar.

Şerbet arıtım istasyonuna giren ve çıkan ürünler ve ürünlere ilişkin yapılan enerji ve ekserji hesaplama sonuçları Tablo 2'de mevcuttur.

Ham şerbet olarak giren ürünler ısıtıcı buharlar ve çöktürme malzemeleriyle temizlenerek sulu şerbet olarak çıkmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda şerbet arıtım ünitesinin ekserjitik verimi %89,52 olarak hesaplanmıştır.

Buharlaştırıcılarda sulu şerbet olarak giren şerbet, içerisindeki fazla suyun buharlaştırılarak koyu şerbet dönüştürülmesiyle koyu şerbet olarak çıkar. Yapılan hesaplamalar sonucunda buharlaştırıcı ünitesinin ekserjitik verimi %63,92 olarak hesaplanmıştır.

Rafineri ünitesine koyu şurup olarak giren şerbet, pişirilerek ve santrifüjlerden geçirilerek kristal şeker oluşturulmuştur. Rafine ünitesinde yapılan hesaplamalarla rafineri ünitesinin ekserjitik verimi %62,60 olarak hesaplanmıştır.

Kazım Taşkent Şeker Fabrikası 2006–2007 sezonu verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda fabrika şeker üretim süreçlerinde daha yüksek verimler elde etmek için aşağıdaki öneriler göz önüne alınabilir.

## SONUÇ

Sonuç olarak yapılan bu çalışmada Kazım Taşkent Şeker fabrikasında şeker üretiminin ana esasları ele alınmış ve ekserji ve tersinmezlik değerleri tespit edilerek sistemlerin ikinci kanun verimleri (ekserjitik verim) hesaplanmıştır. Sözü geçen tersinmezlik oranları sistemlerin tersinmezlik miktarlarının toplam tersinmezliğe oranı olmakla birlikte, en fazla tersinmezliğin meydana geldiği ünite belirlenmiştir. Tablo 5'te ünitelere ait enerji ve ekserji verimleri görülebilmektedir.

Fabrika genelinde en büyük tersinmezlik buharlaştırma ünitesinde meydana gelmektedir. Tersinmezlik oranı %67 olarak hesaplanan buharlaştırma ünitesinde fabrika ısıtıcıları için gerekli olan brüdeler üretilmektedir. Tersinmezlik oranının azaltılabilmesi için öncelikle gereksiz brüde miktarlarının yok edilmesi gereklidir. Şerbet üretim istasyonunda bulunan prese suyu ısıtıcılarındaki brüde miktarının azaltılması için, ısıtıcıya giren prese suyu sıcaklığının artırılması gereklidir. Bu sebeple difüzörden çıkan sıkılmış küspenin sıcaklığı azaltılmalı ve gereksiz isının sistemden atılması engel olunmalıdır. Rafineri ünitesinde oluşturulan standart şerbetin kuru madde oranı yüksek tutulmalı bu sayede rafineri ünitesindeki kristal şeker kurutmaları, kristal vakumları orta şeker, orta rafine şeker, son şeker vakumları için gerekli brüde miktarları azaltılmış olacaktır.

Standart şurubun katı miktar oranının artırılması için eritmelerde kesinlikle su kullanılmamalı ve koyu şerbetin kuru miktar oranı uygun değer aralık olan 60-65 aralığında olması sağlanmalıdır. Buharlaştırıcı ünitelerinde kondensere giden buhar miktarı uygun değer tutularak kondensere giden fazla buhar buharlaştırıcıya giren retür buharın azaltılmasıyla ekserjitik verim artırılabilir.

Tablo 1. Ham Şerbet Ünitesi İçin Hesaplanan Ekserji Değerleri

I. Sürece Giren Maddeler	m (kg)	T (°C)	P (kPa)	Cp (kJ/kg°C)	E (kJ/pg)	Ex (kJ/pg)
Taze kıym	100	20	100	0,9	7.330,00	1.300
Taze su	43,3	76	100	1	13.830,02	2020,75
Prese suyu ısıtıcısı suyu	1,09	120	100	1	548,82	57,86
Sirkülasyon şerbeti ısıtıcı buharı	1,34	120	100	1	2.714,60	783,6
Toplam					<b>24.423,44</b>	<b>4.162,20</b>
II. Süreçten Çıkan Maddeler	m (kg)	T (°C)	P (kPa)	Cp (kJ/kg°C)	E (kJ/pg)	Ex (kJ/pg)
Ham şerbet	129	38	100	0,915	20.156,25	2.670,30
Sıkılmış küspe	14,3	50	100	0,9	2.027,00	386,1
Prese suyu ısıtıcı kondensatı	1,09	106,5	100	1	489,41	37,28
Sirkülasyon şerbeti ısıtıcı kondensatı	1,34	111,25	100	1	627,39	45,83
Toplam					<b>23.300,05</b>	<b>3.139,51</b>

Tablo 2. Şerbet Arıtım Ünitesi İçin Hesaplanan Ekserji Değerleri

III. Sürece Giren Maddeler	m (kg)	T (°C)	P (kPa)	Cp (kJ/kg°C)	E (kJ/pg)	Ex (kJ/pg)
Ham şerbet	129	38	100	0,915	20.156,25	2.670,30
V. Büründeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	4,72	102	25	1	11.841,54	2.431,50
IV. Büründeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2,625	100	30	1	6.579,30	1.279,50
III. Büründeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	1,3	115	60	1	3.280,81	729,9
II. Büründeli Sulu şerbet ısıtıcı buharı	4,72	120	90	1	9.561,78	2.760,10
I. Büründeli Sulu şerbet ısıtıcı buharı	2,35	125	170	1	5.956,31	1.427,60
Retür Buharlı Sulu şerbet ısıtıcı buharı	1,64	135	200	1	4.173,80	1.067,53
Kireç süti	12,504				-	-
Karbondioksit	1,092				-	-
Toplam					<b>61.549,80</b>	<b>12.336,43</b>
IV. Süreçten Çıkan Maddeler	m (kg)	T (°C)	P (kPa)	Cp (kJ/kg°C)	E (kJ/pg)	Ex (kJ/pg)
Sulu şerbet	138,321	127	100	0,94	48.412,35	10567,7
V. Büründeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı kondensatı	4,72	95	100	1	1.878,00	161,33
IV. Büründeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı kondensatı	2,625	95	100	1	1.044,44	89,89
III. Büründeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı kondensatı	1,3	104,4	100	1	566,55	44,44
II. Büründeli Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	4,72	115	100	1	2.276,45	161,33
I. Büründeli Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	2,35	122,5	100	1	1.203,20	80,32
Retür Buharlı Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	1,64	132,88	100	1	916,432	56,05
Toplam					<b>56.297,45</b>	<b>11.071,15</b>

**Tablo 3.** Buharlaştırcı Ünitesi İçin Hesaplanan Ekserji Değerleri

<b>III. Sürece Giren Maddeler</b>	<b>m (kg)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Cp (kJ/kg°C)</b>	<b>E (kJ/pg)</b>	<b>Ex (kJ/pg)</b>
Sulu şerbet	138,321	127		0,94	48.412,35	10.567,70
Retür buhar	39,92	136	200	0,1	108.925,70	26.154,80
Sirkülas. şerbeti ısıtıcı buharı konden.	1,34	100	100	1	627,39	45,8
Prese suyu ısıtıcısı için fab. sıcak suyu	1,09	100	100	1	489,41	37,25
V. Bürüdeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı kondensatı	4,72	100	100	1	1.878,00	161,33
IV. Bürüdeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı kondensatı	2,625	100	100	1	1.044,44	89,89
III. Bürüdeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı kondensatı	1,3	100	100	1	566,55	44,44
II. Bürüdeli Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	4,72	100	100	1	2.276,46	161,33
I. Brüdeli Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	2,35	100	100	1	1203,2	89,32
Retür Buharlı Sulu şerbet ısıtıcı kondensatı	1,64	100	100	1	916,432	56
Rafineri kris. şeker vak. ap. konden.	14,95	100	100	1	6.712,55	510,97
Rafineri orta şeker vak. ap. Konden	2,576	100	100	1	1.156,63	88
Rafineri son şeker vak. ap. Konden.	1,46	100	100	1	655,54	49,9
Rafineri şeker kurutmadan gelen konden.	0,67	100	100	1	208,76	22,9
<b>Toplam</b>					<b>175.073,06</b>	<b>38.093,53</b>
<b>III. Süreçten Çıkan Maddeler</b>	<b>m (kg)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Cp (kJ/kg°C)</b>	<b>E (kJ/pg)</b>	<b>Ex (kJ/pg)</b>
Koyu şerbet	35,597	104		0,72	14.238,80	1.118,80
Prese suyu ısıtıcısı için fab. Sıcak suyu	1,09	120	900	1	2.714,60	637,28
Sirkülasyon şerbeti ısıtıcı buharı	1,34	120	900	1	2.208,20	760
V. Bürüdeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	4,72	102	25	1	11.841,54	2.431,50
IV. Bürüdeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	2,625	100	30	1	6.579,30	1.279,50
III. Bürüdeli I. Kireçli ham şerbet ısıtıcı buharı	1,3	115	60	1	3.280,81	729,9
II. Bürüdeli Sulu şerbet ısıtıcı buharı	4,72	120	90	1	9.561,78	2.760,10
I. Bürüdeli Sulu şerbet ısıtıcı buharı	2,3	125	170	1	5.956,31	1.427,60
Retür Buharlı Sulu şerbet ısıtıcı buharı	1,6	135	200	1	4.173,80	1.067,53
Rafineri kris. şeker vak. ap. buh.	14,95	115	60	1	37.729,32	8.392,00
Rafineri orta şeker vak. ap. buh.	2,576	115	60	1	6.501,05	1.446,00
Rafineri son şeker vak. ap. buh.	1,46	100	30	1	3.659,40	711,5
Rafineri şeker kurut. buhar.	0,67	125	170	1,0	1.698,19	407
Kazan besleme kondensatı	41,1	120	198	1,0	20.702,48	2.881,60
<b>Toplam</b>					<b>130.845,60</b>	<b>26.050,31</b>

Tersinmezlik oranı %22 olan rafineri bölümde ise hem rafineri bölümünün hem de şeker imalatının son bölümü olan kristal şeker kurutma sürecine giren su ısınarak sistemi terk etmektedir. Burada ısınan nemin taşımakta olduğu ekserjinin sisteme geri döndürülmesi sağlanarak ekserjistik verim artırılabilir. Rafineriden atık madde olarak çıkan melasın içinde %50 oranında şeker vardır. Bu şeker miktarının artmaması sağlanarak tersinmezlikler azaltılabilir.

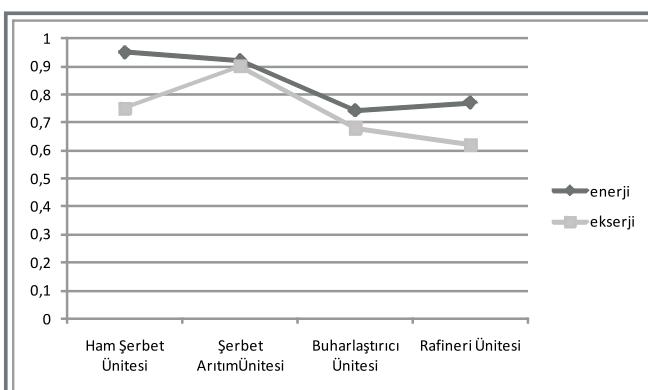
Tersinmezlik oranı sırasıyla %5 ve %6 olan şerbet üretimi ve şerbet arıtımı ünitelerinde fitrelerden atılan çamurun ve difüzyondan atılan sıkılmış küspenin sıcaklıklarını ölçülerek kontrol altına alınmalıdır. Atılan bu ürünlerin ısı ile taşımış oldukları ekserji değerleri minimuma indirilmelidir. Ayrıca şerbet arıtım sisteminde ekserji analizine dahil edilmeyen CO<sub>2</sub> ve kireç sütü maddeleri, sıcaklıklarının ortam sıcaklığına olumsuz yönde etki etmemeleri için uygun koşullar altında üretilmeli ve saklanmalıdır.

Tablo 4. Rafineri Ünitesi İçin Hesaplanan Ekserji Değerleri

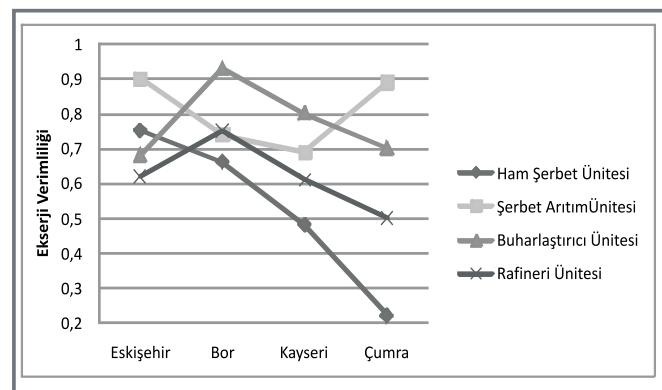
<b>IV. Süreçten Giren Maddeler</b>	<b>m (kg)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Cp (kJ/kg°C)</b>	<b>E (kJ/pg)</b>	<b>Ex (kJ/pg)</b>
Koyu şerbet	35,597	104		0,72	14.238,80	1118,8
Rafineri kris. şeker vak. ap.buharı	14,95	115	60	1	37.729,32	8.392,00
Rafineri orta şeker vak. ap.buharı	2,576	115	60	1	6.501,05	1.446,00
Rafineri son şeker vak. ap.buharı	1,46	100	30	1	3.659,40	711,5
Şeker kurutmada kullanılan buhar	0,67	125	170	1,0	1.698,19	407
<b>Toplam</b>					<b>63.827,26</b>	<b>12.075,30</b>
<b>IV. Süreçten Çıkan Maddeler</b>	<b>m (kg)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>Cp (kJ/kg°C)</b>	<b>E (kJ/pg)</b>	<b>Ex (kJ/pg)</b>
Kristal şeker	15,17	22	100	5,4	433,9	0
Rafineri kris. şeker vak. ap.konden	14,95	106,5	100	1	6.712,55	510,97
Rafineri orta şeker vak. ap. konden.	2,576	106,5	100	1	1.156,63	88
Rafineri son şeker vak. ap. konden.	1,46	106,5	100	1	655,54	49,9
Şeker kurutmadan çıkan konden.	0,67	100	100	1	208,76	22,9
III. Brüde ile uçurulan su buharı	17,23	76	38,5	1	37.251,26	6.401,40
IV. Brüde ile uçurulan su buharı	1,27	76	38,5	1	2.745,74	471,84
Melas	4,8	30	100	0,53	—	15
<b>Toplam</b>					<b>49.236,38</b>	<b>7.560,01</b>

Tablo 5. Ünitelere Enerji ve Ekserji Verimleri

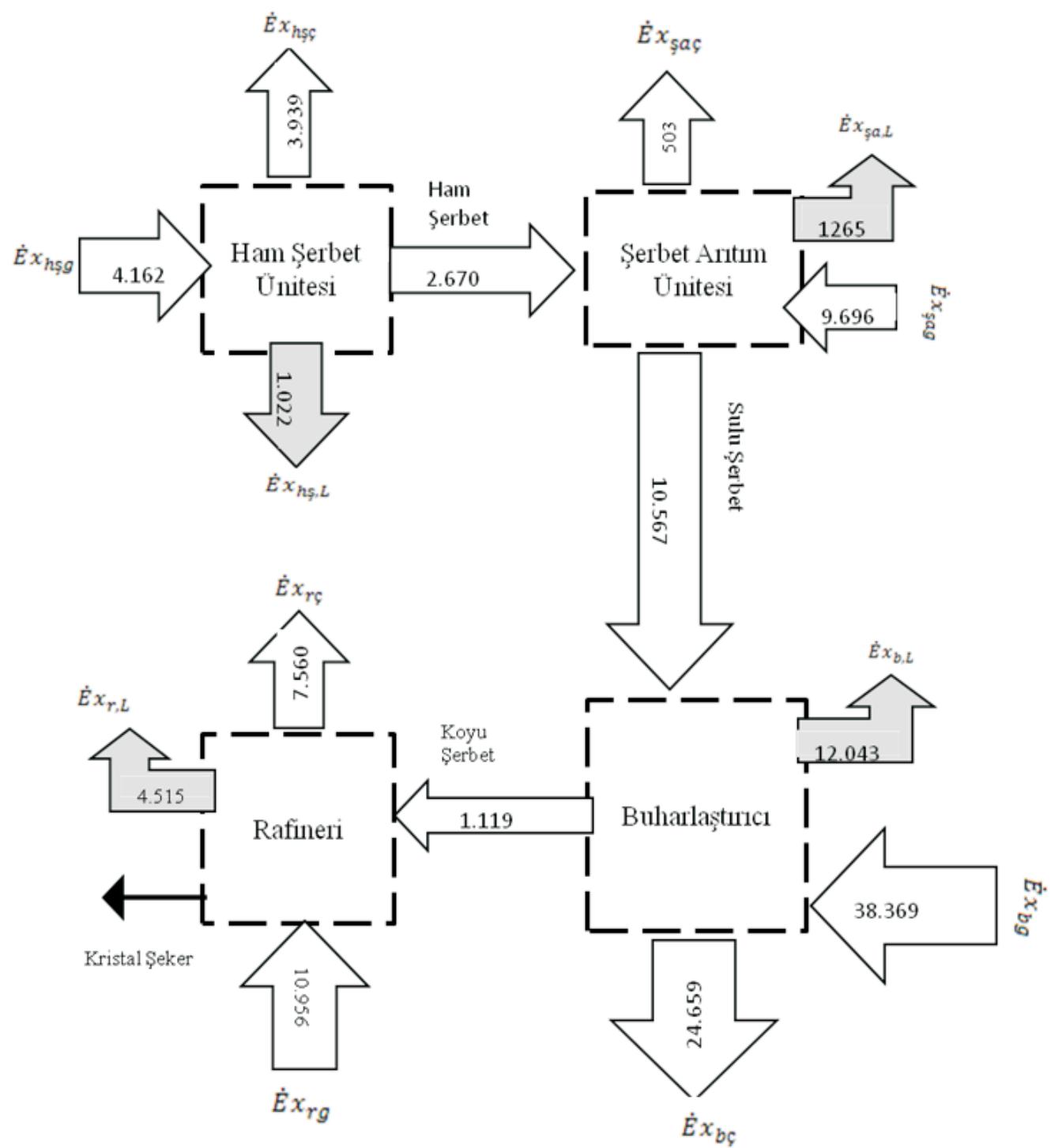
	<b>Giren</b>		<b>Çıkan</b>		<b>Verim</b>	
	<b>E (kcal/pg)</b>	<b>Ex (kcal/pg)</b>	<b>E (kcal/pg)</b>	<b>Ex (kcal/pg)</b>	<b>E (kcal/pg)</b>	<b>Ex (kcal/pg)</b>
Ham Şerbet Süreci	24.423,44	4.162,2	23.300,05	3139,51	0,95	0,75
Şerbet Arıtım süreci	61.549,8	12.336,43	56.297,35	11071,15	0,92	0,9
Buharlaştırma Süreci	175.073,7	38.093,53	130.845,4	26050,31	0,74	0,68
Rafineri Süreci	63.827,26	12.075,53	49.236,38	7560,01	0,77	0,62



Grafik 1. Eskişehir Şeker Fabrikası Üniteleri İçin Hesaplanan Enerji ve Ekserji Verimleri



Grafik 2. Literatürdeki Şeker Fabrikalarının Ekserji Verimlerinin Karşılaştırılması



Şekil 2. Eskişehir Şeker Fabrikası Ekserji Bant Diyagramı

Yapılan diğer çalışmalarla ekserjistik verim karşılaştırıldığında (Grafik 2) Eskişehir Şeker fabrikası Ham şerbet üretim ünitesinin diğer fabrikalarla kıyaslandığında daha yüksek olduğu söylenebilir. Buna karşın buharlaştırma ünitesinde tersinmezlikler sebebiyle incelen diğer fabrikalara nazaran verimi daha azdır.

## SEMBOLLER

Ex	Eksjerji (kJ)	$\epsilon$	Özgül Eksjerji (kJ/kg)
h	Entalpi (kJ)	$\eta$	Verim
$\dot{I}$	Tersinmezlikler (kJ)	<b>Alt İndisler</b>	
m	Kütle(kg)	I	Termodinamiğin 1. yasası
P	Basınç (Pa)	II	Termodinamiğin 2. yasası
$P_0$	Atmosfer Basıncı (Pa)	$\dot{c}$	Çıkan ürünler
Q	Isı Transferi (kW)	g	Giren ürünler
s	Entropi (kJ/kg °C)	L	Eksjerji Farkı
T	Sıcaklık (K)	<b>Üst İndisler</b>	
$T_0$	Çevre Sıcaklığı (K)	-	Birim Zaman
V	Hız(m <sup>2</sup> /s)	<b>Kısaltmalar</b>	
W	İş (kW)	100 p.g.	100 kg birim pancara göre
$\Delta T$	Sıcaklık Farkı (K)		

## KAYNAKÇA

1. Termodinamiğin İlkinci Kanunu Çalışma Toplantısı. 1990. Erciyes Üni. T.I.B.T.D., 27-30 Ağustos, Kayseri.
2. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, www.enerji.gov.tr
3. Moran, M.J., Shapiro, H.N. 2007. Fundamentals of Engineering Thermodynamics, ISBN-13 978-0471-78735-8, 6th edition.
4. Szargut, J. 2005. Exergy Method Technical and Ecological Applications, ISBN: 1-85312-753-1, WIT Press.
5. Şahin, M., Acır A., Baysal, E., Koçyiğit, E. 2007. "Enerji ve Eksjerji Analiz Metoduyla Kayseri Şeker Fabrikasında Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi," Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, cilt 22, no 1, s. 111-119.
6. Antonio, L., Tekin, T., Bayramoğlu, M. 2001. "Exergy and Structural Analysis of Raw Juice Production and Steam-Power Units of a Sugar Production Plant," Energy Res., vol. 26, p. 287-297.
7. Kamate, S.C., Gangavati, P.B. 2009. "Exergy Analysis of Cogeneration Power Plants in Sugar Industries," Applied Thermal Engineering, vol. 29, p. 1187-1194
8. Ram, J.R. 2003. "Rangan Banerjee Energy and Cogeneration Targeting For a Sugar Factory," Applied Thermal Engineering, vol. 23, p. 1567-1575.
9. Gürleyik M.Y., Bayrak, M., Nurveren, K. 2001. "Bor Şeker Fabrikası Buharlaşma Sistemlerinin Eksjerjistik Analizi," YÖK Dokümantasyon Merkezi, 112659.
10. Türközü, B., Özén, D., Altımişık, K. 2010. "Çumra Şeker Fabrikası Enerji Verimliliğinin Eksjerji Analiziyle Değerlendirilmesi," İşı Bilimi ve Tekniği Dergisi, cilt 30, no 2, s. 77-83.
11. Tekin, T., Bayramoğlu, M. 1998. "Exergy Analysis of the Sugar Production Process From Sugar Beets," Energy Res, vol. 22, p.591-60.
12. Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş., www.turkseker.gov.tr
13. Becker, D., Bruckner, B. 1961. Şeker Teknolojileri, Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Neşriyatı, no 69.
14. Dülger, N., Erbay, B. 1991. "Şeker Fabrikalarında Isının Kullanımı," Anadolu Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü Tez Projesi.
15. Çengel, Y.A., Boles, A. 1994. Mühendislik Yaklaşımı ile Termodinamik, ISBN: 975-8431-91-9, McGraw-Hill Inc.
16. Bayrak, M., Midilli, A., Nurveren, K. 2003. "Energy and Exergy Analyses of Sugar Production Stages," International Journal of Energy Research, vol. 27, p. 989–1001 (DOI: 10.1002/er.916).
17. Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. 1996. Thermal Design and Optimization, New York: Jonh Wiley and Sons.
18. Erbay, L.B. 2007. "Flow Exergy Destruction In Ducts," Journal of Thermal Sciences and Technology, vol. 27, no 2, p.1-6.
19. Erbay, L.B., Öztürk, M. M. 2005. "Sonlu-Zaman Termodinamiği Üzerine Bir Tartışma," Uluslararası Katılımlı 15. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiri Kitabı, Editörler: Bekir Zühtü Uysal ve Tahir Yavuz, cilt II, s.500-505, 7-9 Eylül, Trabzon.
20. Erdem, F. 2007. Şeker Fabrikasyonunda Enerji Ekonomisi, Şeker Enstitüsü Teknolojik Araştırmalar Bölümü Enerji Ekonomisi ve Korozyon Şubesi.
21. Leblebici, F. 2003. Şeker Fabrikası Enerji Ekonomisi, Şeker Fabrikası Seminer Notları.
22. Kılıkış, İ. 2008. "Termodinamiğin İlkinci Kanunu ve Akıcı Sürdürülebilirlik," Uzman Gözüyle Termodinamik ve Uygulamaları Ders Notları, Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu.
23. Kazım Taşkent Şeker Fabrikası 2007/2008 Kampanyası Teknik Raporu