

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR LİKORİŞ ÜRETİM TESİSİNİN TERMOEKONOMİK
ANALİZİ**

Mak. Müh. Alper Tezcan

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Galip Temir

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	i
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1 GİRİŞ.....	1
2 GENEL KAVRAMLAR	5
2.1 Termodinamik sistemin tanımı	5
2.1.1 Sistem çeşitleri	6
2.2 Özellikler	7
2.3 Hal ve denge	7
2.4 Enerji	8
2.5 Basınç	10
2.6 Sıcaklık ve denge	10
2.7 Termodinamiğin sıfıncı yasası.....	11
3 KAPALI SİSTEMLER İÇİN TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ YASASI	12
3.1 Isı	12
3.1.1 İletimle ısı geçişi	13
3.1.2 Radyasyonla ısı geçişi	14
3.1.3 Taşınım ile ısı geçişi.....	14
3.2 İş	15
3.3 İş ve ısının kapalı sistemler için termodinamiğin birinci yasasındaki yeri	16
3.4 Özgül ısılar ve entalpi.....	17
3.5 Katılar ve sıvılarda iç enerji, özgül ısılar ve entalpi.....	18
4 AÇIK SİSTEMLER İÇİN TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ YASASI.....	20
4.1 Kütle korunumu ve kontrol hacmi	20
4.2 Bir kontrol hacmi için termodinamiğin birinci yasası.....	21
4.2.1 Sürekli akışlı açık sistem	22
5 TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ KANUNU.....	23
5.1 Termodinamiğin ikinci kanunun ifadeleri	24
5.1.1 Clausius ifadesi	24
5.1.2 Kelvin-Planck ifadesi	24
5.2 Tersinir ve tersinmez hal değişimleri	25
5.3 Entropi	26
5.3.1 Entropinin artışı.....	28
5.3.2 Sıvı ve katıların entropi değişimleri	29

6	KULLANILABİLİR ENERJİ.....	31
6.1	Kapalı sistemlerde kullanılabilir enerji	31
6.2	Açık sistemlerde kullanılabilir enerji	33
7	EKSERJİ ANALİZLERİ	35
7.1	Akışsız sistemler	35
7.2	Akışlı sistemler	38
7.3	Genelleştirilmiş ekserji analizleri.....	42
7.4	Sıvı haldeki suyun toplam akış ekserjisi	44
8	YANMA	46
8.1	Sıvı yakıtlar.....	47
8.2	Yanma denklemleri	50
8.3	Yanma ısısı	50
8.4	Yakıt ısı değeri ölçülmesi	51
8.5	Alt ve üst ısı değerleri	52
8.6	Yakıtın elemansal analizine göre ısı değeri hesabı	52
8.7	Yanma ürünleri miktarlarının bulunması	53
8.8	Yakacak miktarının bulunması	54
9	TERMOEKONOMİK ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ	55
9.1	Ekserji analizi.....	55
9.1.1	Fiziksel ekserji	56
9.1.2	Kimyasal ekserji.....	56
9.2	Ekserji ekonomik analiz.....	58
10	LİKORİŞ ŞEKERİ ÜRETİM TESİSİ.....	61
10.1	Likoriş.....	61
10.2	Üretim prosesi.....	62
11	BİR LİKORİŞ ÜRETİM TESİSİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ	65
11.1	Prosesin akış şeması	65
11.2	Likoriş ve şurup için bazı kabuller ve özellikler.....	67
11.3	Buhar kazanı için yakıt miktarının hesaplanması	68
11.4	Ekserji analizi.....	70
11.5	Eksergoekonomik analiz.....	91
12	SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	121
12.1	Ortalama birim ekserji maliyetlerine göre değerlendirme.....	121
12.2	Kayıp ve tahrip olan ekserji maliyetlerine göre değerlendirme.....	122
12.3	Termoekonomik faktöre (f) göre değerlendirme	124
12.4	Sonuç	126
	KAYNAKLAR	127
	ÖZGEÇMİŞ	128

SİMGE LİSTESİ

A	Alan (m^2)
B	Yakacak debisi (kg/s)
c	Birim ekserjinin ortalama fiyatı (\$/gJ)
C	Birim ekserji akısının fiyatı (\$/h)
C_{ort}	Ortalama özgül ısı (kJ/kgK)
c_D	Tahrip olan ekserjinin birim ekserjisinin ortalama fiyatı (\$/gJ)
C_D	Tahrip olan ekserjinin birim akımının fiyatı (\$/h)
c_E	Elektrik ekserjisinin ortalama fiyatı (\$/gJ)
c_f	Yakıtın birim ekserjisinin ortalama fiyatı (\$/gJ)
c_L	Kayıp ekserjinin birim ekserjisinin ortalama fiyatı (\$/gJ)
C_L	Kayıp ekserjinin birim akımının fiyatı (\$/h)
CELF	Sabit düzeltme faktörü
CRF	Kapital geri kazanım faktörü
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
c_v	Sabit hacimde özgül ısı (kJ/kgK)
e	Özgül enerji (kJ/kg)
e	Özgül ekserji (kJ/kg)
e^{CH}	Kimyasal akış ekserjisi (kJ/kg)
e_F^{CH}	Yakıtın kimyasal ekserjisi (kJ/kg)
e_{KK}^{CH}	Yakıtın kuru ve külsüz haldeki kimyasal ekserjisi (kJ/kg)
e^{KN}	Kinetik akış ekserjisi (kJ/kg)
e^{PH}	Fiziksel akış ekserjisi (kJ/kg)
e^{PT}	Potansiyel akış ekserjisi (kJ/kg)
e_x	Termomekanik (fiziksel) akış ekserjisi (kJ/kg)
e_t	Toplam veya termomekanik ve kimyasal akış ekserjisi (kJ/kg)
E	Enerji (kJ)
E	Ekserji (kW)
E^{CH}	Kimyasal ekserji (kW)
E^{KN}	Kinetik ekserji (kW)
E^{PH}	Fiziksel ekserji (kW)
E^{PT}	Potansiyel ekserji (kW)
E_0	Ortam ekserjisi (kW)
E_D	Tahrip olan ekserji (kW)
E_L	Kayıp ekserji (kW)
E_k	Yok edilen ekserji (kW)
f	Termoekonomik faktör (%)
F	Kuvvet (kN)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
g	Özgül gibbs fonksiyonu (kJ/kg)
H	Entalpi (kJ/kg)
h	Özgül entalpi (kJ/kg)
\bar{h}	Toplam molar entalpi (kJ/kg)
H_0	Üst ısı değer
H_u	Alt ısı değer (kJ/kg)
H_0	Ortam entalpisi

HHV	Üst ısıl değer (kJ/kg)
(HHV) _{KK}	Kuru ve külsüz fuel oil için üst ısıl değer (kJ/kg)
i_{eff}	Geri ödeme oranı (%)
K	Kullanılabilirlik (kJ)
k	Isı iletim katsayısı (kJ/m ² K)
k	Bir değere getirilmiş fiyat düzeltme faktörü
KE	Kinetik enerji (kJ)
ke	Birim kütle başına kinetik enerji (kJ/kg)
m	Kütle (kg)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
M	Bir değere getirilme faktörü
N	Mol sayısı
\dot{N}	Toplam akış oranı
P	Basınç (kPa)
P	Ortam basıncı (kPa)
pe	Birim kütle başına potansiyel enerji (kJ/kg)
Q	Isı (kJ)
q	Isı miktarı (kJ/kg)
r_n	Eslakasyon (%)
r_i	Faiz oranı (%)
R	Gaz sabiti (kJ/kgK)
s	Özgül entropi (kJ/kgK)
\bar{s}	Toplam molar entropi (kJ/kgK)
S	Entropi (kJ/K)
S _{üretim}	Entropi üretimi (kJ/kgK)
S ₀	Ortam entropisi (kJ/kgK)
S _{KK}	Kuru ve külsüz fuel oil için özgül entropi
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (K)
T ₀	Ortam sıcaklığı (K)
U	İç enerji (kJ)
u	Özgül iç enerji (kJ/kg)
x	Mesafe (m)
x	Mol oranı
v	Özgül hacim (m ³ /kg)
V	Hacim (m ³)
V	Hız (m/s)
w	mol kesri oranı
W	İş (kJ)
w	Özgül iş (kJ/kg)
y	Yok edilen ekserji oranı (%)
y _D	Tahrip olan ekserji oranı (%)
y _L	Kayıp ekserji oranı (%)
Z	Yükseklik (m)
Z	Bir değere getirilmiş yıllık toplam gider (\$/h)
Z _{bakım}	Yıllık bakım maliyeti (\$/h)
Z _{bektank}	Bekletme tankı maliyeti (\$)

Z_{boyler}	Boyler maliyeti (\$)
Z_{elektrik}	Yıllık elektrik maliyeti (\$/h)
Z_{filtre}	Filtre maliyeti (\$)
$Z_{\text{iş}}$	İşletme maliyeti (\$/h)
$Z_{\text{işç}}$	İşçilik maliyeti
Z_{kartank}	Karıştırma tankı maliyeti (\$)
$Z_{\text{katkımad}}$	Yıllık katkı maddesi maliyeti (\$/h)
Z_{kazan}	Kazan maliyeti (\$)
Z_{nakil}	Nakliye maliyeti (\$)
$Z_{\text{pişirici}}$	Pişirici maliyeti (\$)
Z_{pompa}	Pompa maliyeti (\$)
Z_{servis}	Yıllık servis maliyeti (\$/h)
$Z_{\text{sıyırıcı}}$	Yıllık sıyırıcı maliyeti (\$/h)
Z_{sig}	Nakliye sırasında yapılan sigorta maliyeti (\$)
Z_{su}	Yıllık su maliyeti (\$/h)
Z_{tank}	Tank maliyeti (\$)
Z_{tes}	Tesisat maliyeti
$Z_{\text{ürün}}$	Yıllık ürün maliyeti (\$/h)
Z_{ver}	Yıllık ödenen vergi (\$/h)
$Z_{\text{yakıt}}$	Yıllık yakıt maliyeti (\$/h)
Z_{yat}	Yatırım maliyeti (\$/h)
Φ	Bağıl nem
μ	Kimyasal potansiyel
Ξ	Akışsız fiziksel ekserji (kJ/kg)
Ξ_{ch}	Akışsız kimyasal ekserji (kJ/kg)
Ξ_{t}	Karışım yığınının toplam ekserjisi (kJ/kg)
η_{II}	İkinci yasa verimi
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ε	Yayma oranı
σ	Stefan-Boltzmann sabiti (W/m ² K ⁴)
α	Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
η_{II}	Yakıt verimi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Sistem çevre ve sınırlar5
Şekil 2.2	Kapalı sistem6
Şekil 2.3	Açık sistem6
Şekil 2.4	İki farklı halde bulunan bir sistem8
Şekil 2.5	Hareketli bir sınıra sahip olan bir sistemin denge durumu..... 10
Şekil 2.6	Ayrık bir ortamda biraraya getirilen iki cismin ısı dengeye ulaşması 11
Şekil 3.1	Fourier ısı iletim yasası gösterimi..... 14
Şekil 3.2	Taşımla ısı geçişi gösterimi 15
Şekil 3.3	Bir sistemin sınırlarından çıkan iş 16
Şekil 4.1	Bir kontrol hacminin enerji ve kütle geçişini gösteren şematik diyagramı.....20
Şekil 5.1	Ağırlık etkisiyle dönen karıştırıcı sistemi 23
Şekil 5.2	Clausius ifadesinin şematik şekli 24
Şekil 5.3	Kelvin-Planck ifadesinin şematik şekli 25
Şekil 5.4	Bir gazın sanki-dengeli genişletilmesi ve sıkıştırılması 25
Şekil 5.5	Bir çevrim boyunca iç enerji gibi durum değişkenlerindeki değişiklik 26
Şekil 5.6	İki içten tersinir hal değişiminde oluşan çevrim..... 27
Şekil 5.7	Tersinir ve tersinmez hal değişimlerinden oluşan bir çevrim 28
Şekil 7.1	Akışkan olmayan sistemlerin çevre ile ulaştığı termik, mekanik ve kimyasal denge..... 35
Şekil 7.2	Karışım akışının çevre ile termik, mekanik ve kimyasal dengede olduğu düzenli akış cihazı 39
Şekil 7.3	Çevreyle ısı, iş ve kütle değişimi yapan genel açık sistem 42
Şekil 7.4	Akışlı toplam, fiziksel ve kimyasal ekserjiler arasındaki ilişki 43
Şekil 9.1	Hidrokarbon yakıt olan C_4H_{10} 'nin ekserjisini değerlendiren bir aygıt 57
Şekil 10.1	Likoriş bitkisi..... 61
Şekil 10.2	Çeşitli likoriş şekerleri 61
Şekil 10.3	Bir likoriş üretim sistemi prosesi 63
Şekil 10.4	Karıştırma tankının görünümü..... 64
Şekil 10.5	Pişirici ve ekstruderin görünümleri 64
Şekil 10.6	Ekstruderin çıkış ağızlarından likoriş ürününün taşıyıcı bantlara döküldüğü an..... 64
Şekil 11.1	Likoriş üretim tesisinin akış şeması 66
Şekil 11.2	P_1 pompasının şematik şekli 92
Şekil 11.3	Buhar kazanının şematik görünümü 94
Şekil 11.4	P_2 pompasının şematik görünümü..... 97
Şekil 11.5	Boyelerin şematik görünümü 99
Şekil 11.6	P_3 pompasının şematik görünümü..... 101
Şekil 11.7	Isı değiştirgecinin şematik görünümü 103
Şekil 11.8	Karıştırma tankının şematik görünümü..... 105
Şekil 11.9	P_5 pompasının şematik görünümü 107
Şekil 11.10	Bekletme tankının şematik görünümü 109
Şekil 11.11	P_4 pompasının şematik görünümü..... 111
Şekil 11.12	Pişiricinin şematik görünümü 113
Şekil 11.13	Şurup tankının şematik görünümü 115
Şekil 12.1	Cihazların çıkışlarındaki noktaların ortalama birim ekserji maliyetleri 121
Şekil 12.2	Sistemde kullanılan cihazların tahrip olan ekserji maliyetleri 122
Şekil 12.3	Sistemde kullanılan cihazların kayıp ekserji maliyetleri 123

Şekil 12.4	Pişiricide tahrip olan ekserji maliyetinin kayıp ekserji maliyetine göre durumu.....	123
Şekil 12.5	Şurup tankında tahrip olan ekserji maliyetinin kayıp ekserji maliyetine göre durumu.....	124
Şekil 12.6	Sistemde kullanılan cihazların termoekonomik faktörleri	125
Şekil 12.7	Sistemde kullanılan cihazların parasal giderleri.....	126

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 8.1	Yakıt yağlarının sağlanması gereken değerler.....	47
Çizelge 8.2	Fuel-Oil (yakıt yağı) için karakteristik değerler	48
Çizelge 8.3	Yanma denklemleri	50
Çizelge 8.4	Çeşitli ocak tipleri için buhar kapasitesine göre duman miktarları.....	54
Çizelge 11.1	Likoriş ve şurubun ortalama özgül ısıları.....	68
Çizelge 11.2	Likoriş ve şurubun özkütlesi ve özgül hacimleri	68
Çizelge 11.3	Akış şemasındaki su içeren noktaların fiziksel özellikleri	69
Çizelge 11.4	Akış şemasındaki likoriş ve şurup içeren noktaların fiziksel özellikleri.....	69
Çizelge 11.5	Buhar kazanına giren fuel oilin bileşimi	85
Çizelge 11.6	Kuru ve külsüz fuel oil bileşimi.....	87
Çizelge 11.7	Sistemdeki noktaların ekserjileriyle beraber fiziksel değerleri	90
Çizelge 11.8	Likoriş üretim tesisinin her bir elemanı için hesaplanan termoekonomik değerler.....	118
Çizelge 11.9	Sistemdeki cihazların fiyatları	119
Çizelge 11.10	Sistemde bulunan cihazların hesaplamalarda kullanılan yıllık işletme maliyetleri.....	120

ÖNSÖZ

Enerji kavramı hakkındaki çalışmalar asırlar öncesinde başlamıştır. İnsanlığa getirdiği katkılardan ve geniş çalışma alanlarından dolayı zaman içerisinde elde edilen verilerle enerjinin sınırları çizilmiş ve yeni bir bilim dalı doğmuştur. Bu bilim dalı termodinamiktir. Termodinamiğin temelleri atılırken hep belirli bir sıra izlenilmiş ve ilk başta enerjinin dönüşümü hakkında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar yapılırken enerjinin niteliğiyle ilgilenilmemiştir. Ancak enerjinin elde edilmesindeki sürekli artan maliyet ve çevreye verilen zararlar zaman içerisinde enerjinin kalitesinin de sorgulanmasına sebep olmuştur. Bu çalışma bu kaygılar neticesinde yaratılan prensiplerin kullanılmasıyla oluşmuştur.

Bu çalışmada yararlanılan kullanılabilir enerji (ekserji) analizi yardımıyla bir likoriş üretim tesisinin faydalı ve kullanılmayan enerji maliyetleri çıkarılmış ve kullanılmayan ekserjinin nelere mal olduğu incelenmiştir. Hemen akabinde sistemin kullandığı enerjinin veriminin arttırılması için çözümler sunulmaktadır.

Çalışma boyunca desteğini ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof Dr. Galip Temir'e, hayatım boyunca bitmeyen destekleriyle bugünlere gelmemi sağlayan aileme ve her zaman yanımda olan nişanlım Havva Şanlı'ya teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Enerji maliyetlerindeki artış dolayısıyla enerji kalitesi hakkındaki çalışmalar en önemli termodinamik uygulamalarından biri olmuştur. Bu çalışmada suyun, likorişin ve şurubun değişik özelliklere haiz çeşitli noktalara göre ekserjileri üzerinde çalışılmış ve bu değerlerin bir sonucu olarak bu akışkanları kullanan makinelerin enerji verimleri hesaplanmıştır.

Her nokta için ekserji analizi termodinamik prensipler kullanılarak ayrı ayrı yapılmıştır. Ekserjinin sebep olduğu ekonomik çıktılar “Thermal Design and Optimization” (Bejan, Tsatsaronis ve Moran, 1996) kitabında sunulan prensiplere bağlı kalınarak hesaplanmıştır.

Bütün noktaların özelliklerine göre toplam ekserjileri hesaplandıktan sonra her bir cihaz için ekserji dengesi kurularak ortalama ekserji maliyetleri belirlenmiş, kayıp ve tahrip olan ekserjiler bulunmuş, yok olan ekserji oranı bulunarak exergoeconomik faktör çıkarılmıştır. Bütün bu verilerin doğrultusunda grafiksel olarak sonuçlar değerlendirilmiş ve cihazlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Düzeltme yapılabilecek noktalar ve çözüm önerileri belirtilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ekserji analizi, ikinci kanun analizi, termoekonomik analiz, üretim sistemleri, termodinamiksel prensipler

ABSTRACT

Because of increase at energy costs, studies about energy quality has become one of the most important thermodynamic applications. At this study, exergies of water, liquorice and syrup were studied according to various points including different properties, and as a result of these values, energy efficiencies of all machinery that uses these fluids were calculated.

Exergy analyse were made separately for each point, using thermodynamic principles. Economic outputs that exergy caused were calculated depending on the principles which were presented in Thermal Design and Optimization book (Bejan, Tsatsaronis and Moran, 1996) .

After total exergies of all points according to their properties were calculated, avarage exergy costs of each equipment was determined, destruction and loss exergies were found, finding exergy ratios exergoeconomic factor was calculated. At the direction of all these datas, results that were evaluated was illustrated as graphics and equipments were compared with each other. Points that can be corrected and solution suggestions were underlined.

Key words: Exergy analyse, second law analyse, thermoeconomic analyse, production systems, thermodynamical principles.

1.GİRİŞ

Termodinamik, enerjiyle ilgilenen temel bir bilimdir ve uzun zamandan beri mühendislik eğitiminin başlıca öğelerinden biri olmuştur. Değişikliklere yol açan etken olan enerjinin bilimi olarak adlandırılacak termodinamik, enerji ve enerji dönüşümlerinin tüm yönlerini kapsayan bir anlam taşımaktadır. Tüm mühendislik uygulamaları madde ile enerji arasında bir etkileşim içerir. Termodinamiğin uygulama alanları arasında güç üretimi, soğutma, maddenin özellikleri arasındaki ilişkiler ve benzerleri sayılabilir.

Bir etkileşim sırasında enerji bir biçimden başka bir biçime dönüşebilir fakat toplam miktarı sabit kalır. Bu ifadeye “enerjinin korunumu ilkesi” adı verilir. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesini ifade eder ve enerjinin termodinamik ile ilgili bir özellik olduğunu vurgular. Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin niceliğinin yanında niteliğinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koyar ve doğadaki değişimlerin enerjinin niteliğini azaltan yönde gerçekleştiğini belirtir. Örneğin masaya bırakılan sıcak su zamanla soğur, fakat hiçbir zaman kendiliğinden ısınmaz. Suyun yüksek sıcaklıktaki düşük sıcaklıkta daha az kullanılabilir bir biçime dönüşerek çevre havaya geçer. Ayrıca; ısının tamamının dönen mil işine dönüştürülmesinin mümkün olmayacağını, ısının bir kısmının dönen mil işine dönüşürken kalan kısmının daha düşük sıcaklıktaki bir ortama verilmesi gerektiği termodinamiğin ikinci kanununun bir sonucudur.

Bir maddenin molekül adı verilen çok sayıda parçacıktan oluştuğu bilinmektedir. Maddenin özellikleri doğal olarak bu parçacıkların davranışlarına bağlıdır. Örneğin bir kap içerisindeki gazın basıncı, gaz molekülleriyle kabın cidarları arasındaki momentum aktarımının bir sonucudur. Fakat basıncı belirlemek için, gaz moleküllerinin davranışlarını bilmek gerekmez. Bu, bir basınç göstergesiyle ölçülebilir. Termodinamik ile ilgili problemlerin çözümlenmesinde parçacıkların ayrı ayrı davranışlarının bilinmesine gerek göstermeyen, onları toplu olarak ele alan makroskopik yaklaşım, klasik termodinamik olarak bilinir. Klasik termodinamik, mühendislik problemlerinin çözümü için kolay ve doğrudan bir yöntem oluşturur. Tek tek parçacıklardan yola çıkarak bunların oluşturdukları kümelerin ortak davranışlarını göz önüne alan daha hassas bir yaklaşım ise istatistiksel termodinamik olarak bilinir.

Termodinamiğin yasaları evrenin yaradılışından beri yürürlükte, fakat termodinamiğin bir bilim olarak ortaya çıkması 1697'de Thomas Savery ve 1712'de Thomas Newcomen'in, İngiltere'de ilk başarılı atmosferik buhar makinelerini yapmalarıyla başlar. Bu makineler çok yavaş ve düşük verimli olmakla birlikte, yeni bir bilimin gelişmesinin öncüleri olmuşlardır.

Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasaları 1850'lerde öncelikle William Rankin, Rudolph Clausius ve Lord Kelvin (William Thomson) tarafından yapılan araştırmalar sonunda, birlikte ortaya konmuştur. Termodinamik terimi ilk olarak Lord Kelvin tarafından 1849'da yapılan bir yayında kullanılmıştır. İlk termodinamik kitabı ise 1859'da Glasgow Üniversitesi öğretim üyelerinden William Rankin tarafından yazılmıştır.

Termodinamik sistemlerin analizinde sadece birinci kanun analizi ile elde edilecek sonuçların değerlendirilmesi bazı hatalara neden olabilir. Bu nedenle birinci kanun analizi ile birlikte ikinci kanun analizi yapılması daha doğru sonuçlar verecektir.

İkinci kanun analizi entropiye dayalı (entropi analizi) veya kullanılabilir enerjiye dayalı (kullanılabilir enerji analizi) olabilir. Entropi analizinde, entropi değişimi ve entropi üretiminin hesaplanması karmaşık işlemler gerektirebilir, ayrıca entropi enerjinin sadece niteliğini ve kalitesini ifade eder, miktarı hakkında bilgi içermez. Kullanılabilir enerji analizinde ise kontrol hacmi sınırı uygun seçilirse işlemler çok basitleşebilir, ayrıca kullanılabilir enerji (ekserji), enerjinin niteliği ile birlikte miktarını da belirtir.

Burada yapılan çalışma tamamen kullanılabilir enerji analizine dayandırılacak olup, bu çalışmanın kullanılabilir enerji analizinin bir üretim tesisine uygulanması konusunda önemli bir örnek teşkil etmesi amaçlanmaktadır.

Kullanılabilir enerji analizi metodun temelleri ondokuzuncu yüzyılın ikinci yarısından sonra atılmaya başlanmıştır. 1871 yılında, Maxwell ilk olarak "kullanılabilir enerji" terimini kullanmıştır. 1873 yılında Gibbs, "mümkün olan en fazla net iş (dönen mil işi)" adı altında kullanılabilir enerji için analitik bir hesap yöntemi vermiştir. 1875 yılında yine Maxwell, kendisinin "Theory of Heat" adlı kitabının dördüncü baskısında "mümkün olan en yüksek brüt iş" ismi ile çok basit bir analiz yapmıştır. 1889 yılında Guoy'un akış olmayan sistemlerde kullanılabilirlikle ilgili çalışmaları yayımlanmıştır. Ancak, buradaki ifadeler Gibbs'in verdiği ifadelerden daha basitti. 1989 yılında Stodola, akış olmayan bir işlemde mümkün olan en

fazla brüt iş ile ilgili bir ifade vermiştir. Stodola, bu çalışmasında kayıp brüt iş potansiyeli ile entropi arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Ondokuzuncu yüzyıldan beri kullanılabilir enerji analizi prensipleri konusunda bir çok insanın çalışmalar yapmış olmasına rağmen, kullanılabilir enerji kavramı mühendislik uygulamalarına 1920 ve 1930'larda girmiştir. 1932 yılında J. Keenan, Gibbs'in vermiş olduğu sonuçları daha basit ve daha kullanışlı kavramlarla ifade etmiş ve mümkün olan en yüksek net iş (dönen mil işi) için "kullanılabilirlik" terimini kullanmıştır. 1956 yılında Rant, Bosnjaković'in daha önce kullandığı "iş yeteneği" terimi yerine "exergy" teriminin kullanılmasını önermiştir.

Kullanılabilir enerji analizi metodunda, özellikle 1970'lerdeki petrol krizinden sonra hızlı gelişmeler olmuştur. F. Bosnjakovic, J. Keenan, Z. Rant, J. Szargut ve R. Gaggioli kullanılabilir enerji analizleri metodunun gelişmesinde önemli roller oynamışlardır.

Kullanılabilir enerji analizinin gelişmesinin özetleri 1980'lerin son yıllarında Kotas (1985) ve Szargut (1988) tarafından ortaya konulmuştur. Geçen on yıl içerisinde ASME İleri Enerji Sistemleri Bölümü üyeleri gelişmelerde ön sıralarda olmuşlardır. Konuyla ilgili olarak anahtar niteliğindeki çalışmalar, 1990'lı yıllarda Tsatsaronis ve Moran tarafından yapılmıştır. Moran, kullanılabilir enerji analizinin termodinamik sistem analizinde kullanılan temel ifadeleri belirlemiş, Tsatsaronis de kullanılabilir enerji analizi metoduna dayanan termoeconomik optimizasyonu (exergoeconomic optimization) konularında çok önemli çalışmalar yapmıştır.

1992 yılında Boehm kullanılabilir enerji analizi yönteminin termodinamik sistem dizaynında uygulanabilirliğini göstermiştir. Kuremenos ve Tsatsaronis (1991) termal ve enerji sistemlerinin analizinde kullanılabilir enerji analizini kullanmışlardır. Stecco ve Moran (1992) kullanılabilir enerji analizi yöntemi ile Dünya enerji rezervlerinin gelecekteki durumlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Valero ve Tsatsaronis (1992) kullanılabilir enerji analizini kullanarak enerji sistemlerinde verimlilik ve maliyet optimizasyonu ve simülasyonu konularında bir çalışma yapmışlardır. 1994 yılında M. J. Moran ve E. Sciubba, ekserji analizlerinin temel prensiplerini açıklayarak, fiziksel ve kimyasal ekserji kavramlarını tanımlamış ve bunları formülize ederek güç sistemlerine nasıl uygulanabileceğini anlatmışlardır. Bunlardan başka; Aksel Öztürk (1998) Clasius eşitsizliği yerine entropiden bağımsız ısının ve işin kullanılabilirliğine dayanan yeni bir eşitsizlik tanımlamıştır. Öztürk bu yeni eşitsizliğe dayanarak entropi içermeyen bir kullanılabilir enerji dengesi ifadesi yaratmıştır.

Görüldüğü gibi kullanılabilir enerji kavramının çok eski bir tarihi olmasına rağmen, mühendislik uygulamalarında bugüne kadar çok kullanılmaması ilginçtir. Tarihsel süreç gösteriyor ki, kullanılabilir enerji analizi, enerjinin pahalı olduğu zamanlarda yapılmış, fakat ucuz ve bol olduğu zamanlarda yapılmamıştır.

2. GENEL KAVRAMLAR

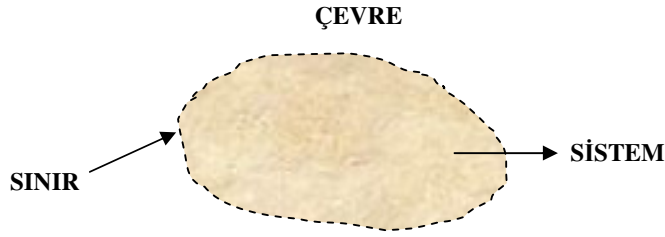
Termodinamik, ısı iş ve maddelerin özellikleriyle uğraşan ve bu maddeler ile ısı ve iş arasında ilişki kuran bir bilim olup hem mühendislik biliminin hem de fiziğin bir dalıdır. Bütün diğer bilim dalları gibi termodinamiğin de esasında deneysel gözlem bulunmaktadır. Termodinamikte bütün bu bulgular kesin temel yasalar şeklinde biçimlendirilmişlerdir. Bu bölümün amacı mühendislik termodinamiğinin anlaşılmasında kullanılan bazı genel kavram ve düşünceleri tanıtmaktır.

2.1 Termodinamik Sistemin Tanımı

Bir termodinamik sistem belirli bir miktar üzerinde çalışılan maddeyi içeren bir aygıt veya aygıtların kombinasyonundan oluşur. Sistem terimi analizlerin konusunu saptamakta kullanılır. Sistem bir kere tanımlandıktan ve diğer sistemler ile etkileşimler saptandıktan sonra, bir veya daha fazla fiziksel kanunlar veya ilişkiler uygulanabilir.

Sistem incelenmek istenen her şey olabilir. Sert duvarlı bir tankın içerdiği madde miktarı yada doğal gaz akışları boyunca uzanan bir boru içerisindeki madde miktarı incelenmek istenebilir. Sistem içerisindeki maddenin bileşimi kimyasal yada nükleer reaksiyonlar sonucu değişiyor olabilir. İncelenmek istenen sistemin hacmi bir silindir içerisindeki gazın bir piston vasıtasıyla sıkıştırılmasında olduğu gibi sabit olmayabilir.

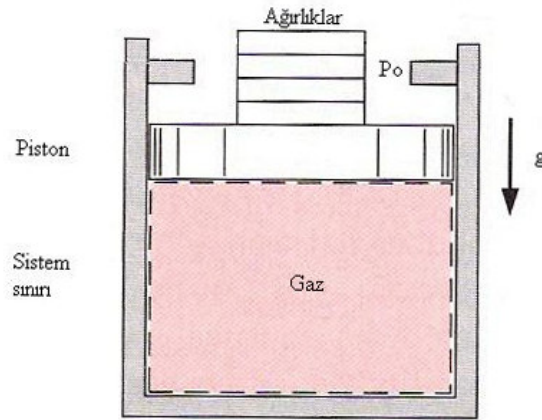
Sistemin dışında kalan her şey sistemin çevresinin bir parçası olarak düşünülür. Sistem çevresinden açıkça belirtilen bir sınır tarafından ayrılır. Bu terimler Şekil 1-12'de açıklanmıştır. Sistemin sınırları sabit veya hareketli olabilir. Sınırın, sistem ile çevresinin temas ettiği ortak yüzey olduğu vurgulanmalıdır. Matematiksel açıdan, sınırın kalınlığı sıfırdır, bu nedenle de kütlesi ve hacmi yoktur.



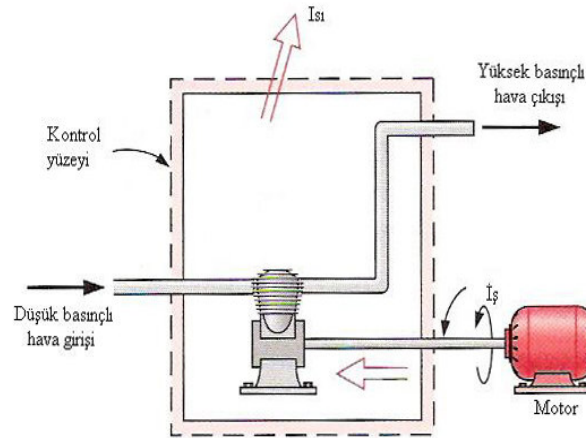
Şekil 2.1 Sistem, çevre ve sınırlar

2.1.1 Sistem Çeşitleri

Belirli bir kütlenin veya belirli bir bölgenin çözümlenmeye esas alınmasına göre, sistemler kapalı veya açık olarak nitelendirilir. Kapalı sistem veya diğer adıyla kontrol kütlesi, belirli bir miktar madde inceleme altındayken tanımlanır. Sınırlarından kütle transferi gerçekleşmez. Fakat enerji iş veya ısı şeklinde sistemin sınırlarından geçebilir. Açık sistem veya diğer adıyla kontrol hacmi, türbin, kompresör gibi içerisinde akış olan aygıtları içine alır. Kütle ve enerji, kontrol yüzeyi adı verilen kontrol hacminin sınırlarını geçebilir. İki sistem Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Kapalı sistem



Şekil 2.3 Açık sistem

2.2 Özellikler

Bir sistemi tanımlamak ve davranışlarını tahmin etmek, sistemin özelliklerini ve bu özelliklerin sistemle nasıl ilgili olduğunu bilmeyi gerektirir. Sistemi nitelendiren büyüklüklere özellik denir. Yakından bilinen özelliklerden bazıları kütle, hacim(V), sıcaklık(T) ve basınçtır(P). Özelliklerden bazıları bağımsız olmayıp diğer özellikler kullanılarak tanımlanır. Örneğin yoğunluk, birim hacmin kütlesi olarak tanımlanır:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.1)$$

Termodinamikte daha sık kullanılan bir özellik özgül hacim'dir. Özgül hacim, yoğunluğun tersi olup birim kütlenin hacmi olarak tanımlanmıştır:

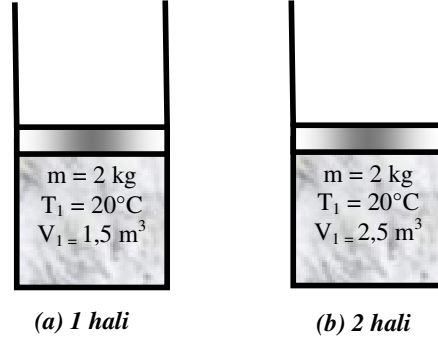
$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (2.2)$$

Özellikler yeğin ve yaygın olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yeğin özellikler sistemin kütesinden bağımsızdır (sıcaklık, basınç, yoğunluk). Yaygın özellikler ise sistemin kütlesi ve büyüklüğüyle doğru orantılıdır (kütle, hacim ve toplam enerji).

2.3 Hal ve Denge

Verilen bir anda özellikleri değişmeyen bir sistemi ele alalım. Sistemin her noktasında tüm özellikler ölçülebilir veya hesaplanabilir. Sistemin bu özellikler tarafından belirlenen durumuna sistemin hali denir. Verilen bir halde sistemin tüm özelliklerinin sabit değerleri vardır. Sadece bir özeliğin değerinin değişmesi bile sistemin halini değiştirecektir. Şekil 2.4-a,b' de bir sistemin iki farklı hali gösterilmiştir.

Termodinamik, denge halleri ile ilgilenir. Denge sözcüğü eşitlik kavramını çağırır. Denge halinde bulunan bir sistem içinde değişimi zorlayan eşitlenmemiş bir kuvvet yoktur. Denge halinde bir sistem, eğer çevresiyle etkileşimi yoksa, bulunduğu halde kalmayı sürdürür.



Şekil 2.4 İki farklı halde bulunan bir sistem

Değişik denge kıstasları vardır ve bir sistemin termodinamik dengede olması için, ilgili tüm denge kıstaslarının sağlanması gerekir. Örneğin ısı denge sistemin her noktasında sıcaklığın aynı olması anlamına gelir. Başka bir deyişle, sistemin ısı geçişine neden olacak sıcaklık farklılığı yoktur. Mekanik denge basınçla ilgilidir. Sistemin herhangi bir noktasında basıncın zamana göre değişmediği anlamına gelir. Basınç sistem içinde yerçekiminden dolayı yüksekliğe bağlı olarak değişebilir. Fakat en alt tabakadaki yüksek basınç, tabakanın fazladan taşınması gereken ağırlıkla dengelenmiştir; bu nedenle, dengelenmemiş bir kuvvetten söz edilemez. Bununla birlikte, termodinamik sistemlerin büyük çoğunluğunda basıncın yerçekimine bağlı olarak değişimi ihmal edilebilecek ölçüde küçüktür. İki fazlı bir sistemde faz dengesinin olması, her fazın kütlelerinin bir denge düzeyine erişip orada kalması anlamındadır. Son olarak, kimyasal denge, sistemin kimyasal bileşiminin zamanla değişmemesi, başka bir deyişle sistemde kimyasal reaksiyon olmaması anlamına gelir. Bir sistemin denge halinde olabilmesi için tüm denge kıstaslarının sağlanmış olması gerekir .

2.4 Enerji

Bir sistemin iş yapabilme kapasitesine enerji denir. Buna göre, iş yapan bir sistemin enerjisi azalırken iş alan bir sistemin enerjisi artar. Enerji; ısı, mekanik, kinetik, potansiyel, elektrik, manyetik, kimyasal, nükleer gibi değişik biçimler alabilir; bunların tümünün toplamı, sistemin toplam enerjisini (E) oluşturur. Sistemin birim kütlesi esas alınarak tanımlanan özgül enerji, e ile gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$e = \frac{E}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.3)$$

Yukarıda bahsedilen enerji türleri makroskopik ve mikroskopik olmak üzere ikiye ayrılabilir. Makroskopik enerji, sistemin tümünün bir dış referans noktasına göre sahip olduğu enerjidir. Kinetik ve potansiyel enerji bu enerji türüne örnektir. Mikroskopik enerji ise, sistemin moleküler yapısı ve hareketliliğiyle alakalıdır ve dış referans noktasından bağımsızdır. Bütün bu mikroskopik enerjilerin toplamı sistemin iç enerjisi diye adlandırılır ve U ile gösterilir.

Bir sistemin makroskopik enerjisi, hareket ile, yerçekimi, manyetizma, elektrik ve yüzey gerilmesi gibi bazı dış etkenlere bağlıdır. Sistemin bir referans noktasına göre hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye kinetik enerji (KE) denir ve,

$$KE = m \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ}) \quad (2.4)$$

bağıntısıyla elde edilir. Burada, sistemin sabit bir referans noktasına göre hızını gösterir.

Bir sistemin konumundan dolayı sahip olduğu enerjiye potansiyel enerji (PE) denir ve ağırlık merkezi herhangi bir referans noktasından z yüksekliği kadar çıkarılan, yer çekimi ivmesinin g olduğu bir yerdeki sistemin potansiyel enerjisi,

$$PE = mgz \quad (\text{kJ}) \quad (2.5)$$

bağıntısıyla elde edilir. Bir sistemin toplam enerjisi kinetik, potansiyel ve iç enerjisinin toplamından oluşur ve aşağıdaki şekilde ifade gösterilir.

$$E = U + KE + PE = U + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (\text{kJ}) \quad (2.6)$$

veya birim kütle için,

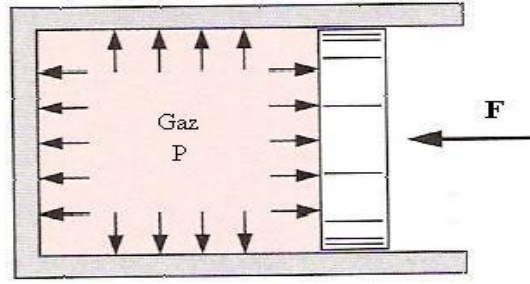
$$e = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.7)$$

ifadesi elde edilebilir.

2.5 Basınç

Basınç gaz ve sıvılarla uğraşırken bahsedilen bir olgudur. Katılar hakkında yapılan gözlemlerde basınç yerine gerilmeden bahsedilir. Hareketsiz bir akışkan içinde verilen bir noktadaki basınç, bütün yönlerde aynıdır. Basınç (P), birim kuvvete uygulanan kuvvet olarak adlandırılabilir. F kuvvet, A söz konusu alanı gösterdiğinde basıncı aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2 = \text{Pa})$$



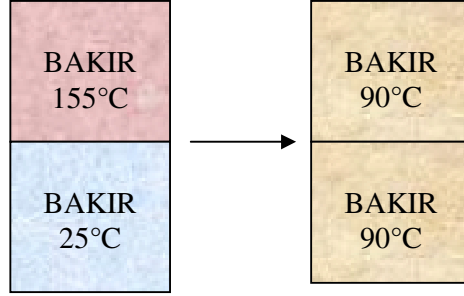
Şekil 2.5 Hareketli sınıra sahip olan bir sistemin denge konumu

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi hareket edebilen bir piston içerisinde bir gaz düşünelim. Gazın denge durumunda uyguladığı basınç bütün sınırları boyunca aynıdır. Bu basınç piston üzerine uygulanan harici bir kuvvet ile sabitlenebilir. Eğer harici kuvvet her iki yönde de değiştirilirse, buna göre içerideki gaz basıncı pistonun hareket etmesiyle yeni bir kuvvet dengesi ve denge hali kurar. Ayrıca, içerideki gazın, dışarıdan ısı verilmesi suretiyle sıcaklığı arttırılırsa, bu durum gaz üzerinde basıncı artırıcı bir etki yaptığından pistonun içerideki gazın dışarıdan uygulanan kuvvetle dengeye ulaşabilmesi için hareket ettiği gözlemlenebilir.

2.6 Sıcaklık ve Isıl Denge

Sıcaklık tanıdık bir özellik olmasına rağmen tanımlanması zordur. Sıcaklık kavramı his algılarından kaynaklanır. Dokunma hissi yüzeylerin sıcak yada soğuk olduklarını algılamada kullanılabilir. Fakat duylara dayanarak sıcaklıklara sayısal değerler verebilmek imkan dışıdır.

Sıcaklığı tanımlamadaki bu zorluklardan dolayı, ısı denge diye bir kavram tanımlanabilir. Sıcaklıkları farklı ve her biri ayrı olarak civalı termometreye dokunan iki ayrı bakır çubuk düşünüldüğünde, bu iki çubuğa kendi aralarında termal bir iletişim uygulandığında, sıcak olanın elektriksel direncinin azaldığı görülürken soğuk olanınkinin ise arttığı gözlemlenir. Benzer bir örnekle, sıcak olan çubuğun zamanla boyu kısalırken diğerinin boyunun arttığı görülür. Bu iki gözlemde de bir süre sonra herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Aynı şekilde, çubuklara bağlı olan termometrelerden sıcak olanınkinin zamanla düştüğü görülürken soğuk olanın yükseldiği fark edilir. Bir müddet sonra sıcaklıklarda artış veya azalış gözlemlenmeyecektir. Böylece, iki cismin sıcak olandan soğuk olana doğru bir ısı geçişi ile ısı dengeye ulaştığı söylenebilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Ayrık bir ortamda bir araya getirilen iki cismin ısı dengeye ulaşması

2.7 Termodinamiğin Sıfıncı Yasası

Sıcaklıkları farklı iki bakır çubuk göz önüne alınsın. Herhangi bir tanesinin sıcaklığı ölçülmek istendiğinde bakır çubuğun belirli bir süre sonra termometre ile ısı dengeye geldiği ve sıcaklığın değişmediği görülür. Öteki bakır çubuk ölçüldüğünde aynı termometrenin gösterdiği sıcaklık değişmiyorsa iki bakır çubuk ısı dengededir.

Termodinamiğin sıfıncı yasa, iki ayrı cismin bir üçüncü cisimle ısı dengede olma durumunda, kendi aralarında da ısı dengede olacaklarını belirtir. Üçüncü cisim yukarıdaki örnekte olduğu gibi termometre olarak alınırsa bu ifade şu şekilde yazılabilir: Sıcaklıkları aynı değer olarak ölçülen iki cisim birbirleriyle temas etmeseler de termal dengededirler.

3. KAPALI SİSTEMLER İÇİN TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ YASASI

Enerji yoktan var edilemez ve var iken yok edilemez, sadece biçim değiştirebilir. Bu ifade termodinamiğin birinci yasası olarak adlandırılır. Birinci yasanın bir başka basit antılımı şöyledir: Sistem ile çevresinin etkileşimi sırasında, sistem tarafından kazanılan enerji, çevresi tarafından kaybedilen enerjiye eşit olmak zorundadır.

3.1 Isı

Bir cisim farklı sıcaklıkta bir ortama bırakıldığı zaman cisim ile onu çevreleyen ortam arasında ısı denge oluşuncaya kadar, başka bir deyişle her ikisi de aynı sıcaklığa erişinceye kadar, bir enerji geçişi olur. Bu enerji geçişinin yönü her zaman daha yüksek sıcaklıktaki cisimden daha düşük sıcaklıktaki cisime doğrudur.

Isı, yüksek sıcaklıktaki bir sistemin sınırlarından düşük sıcaklıktaki diğer sisteme aradaki sıcaklık farkından kaynaklanan enerjinin bir biçimi olarak tanımlanmaktadır. Isı, enerji geçişini vurgular, sadece sistem sınırlarını geçişi sırasında tanımlanabilir. Bir sisteme verilen ısı pozitif (+), sistemden çekilen ısı ise negatif (-) olarak düşünülebilir. +

Isının simgesi Q dur. 1 ve 2 halleri arasındaki hal değişimi için ısı geçişi Q_{12} veya sadece Q ile gösterilir ve

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{12} \quad (\text{kJ}) \quad (3.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Birim zamanda sisteme transfer edilen ısı \dot{Q} ile gösterilir ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} \quad (\text{kJ/s} = \text{kW}) \quad (3.2)$$

Sistem birim kütlesi için ısı geçişi q ile gösterilir ve

$$q = \frac{Q}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.3)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Isı transferi söz konusu olmayan hal değişimi adyabatik hal değişimi olarak tanımlanır. Bir hal değişimi iki şekilde adyabatik olabilir; ya sistem çok iyi yalıtılmıştır dolayısıyla sınırlarından ancak ihmal edilebilir ölçülerde ısı geçebilir, ya da sistem ve çevresi aynı sıcaklıktadır ve bu nedenle ısı geçişine etken olacak bir sıcaklık farkı yoktur.

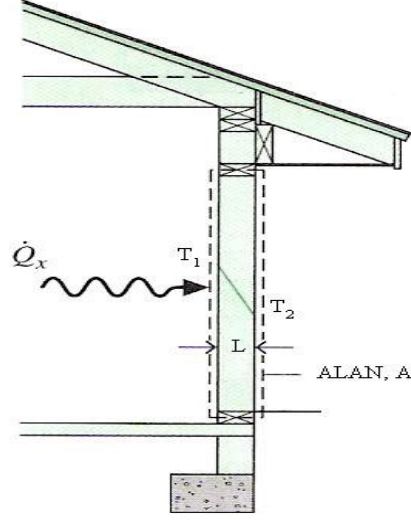
Isı geçişi üç farklı biçimde gerçekleşir. İletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon). Aşağıda bu ısı geçiş çeşitleriyle alakalı kısaca bilgi verilecektir.

3.1.1 İletimle Isı Geçişi

İletim ile ısı geçişi katı sıvı ve gazlarda mümkündür ve bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından, daha düşük enerjiye sahip bitişik parçacıklarına bu parçacıkların etkileşimi dolayısıyla olan enerji transferi olarak düşünülebilir. İletim ile ısı geçişinin zamana bağlı olarak makroskopik olarak ölçümünü Fourier'in ısı iletim yasası verir. Temel bir uygulama olarak, Şekil 3.1' de kalınlığı L olan ve x eksenini boyunca sıcaklığı $T(x)$ olarak lineer değişen düz bir duvar göz önüne alınsın. Fourier'in yasası ile birim zamanda iletimle geçen ısı,

$$\dot{Q}_x = -k_t A \frac{dt}{dx} \quad (\text{W}) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k_t maddenin iletim katsayısıdır. İletim katsayısı, maddenin ısı iletme kabiliyetinin ölçüsüdür. Denklemin başındaki (-) işareti artan x değerleri boyunca sıcaklık azaldığından ve ısı geçişi bu yöne olduğundan, ısı iletiminin (+) işaretine sahip olması içindir.



Şekil 3.1 Fourier ısı iletim yasası gösterimi

3.1.2 Radyasyonla Isı Geçişi

Işınım, maddenin atom veya moleküllerinin elektron düzeninde olan değişimler sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalar veya fotonlar aracılığıyla gerçekleşen enerji aktarımıdır. İletim ile ısı geçişinden farklı olarak cisimler arasında bir boşluğa gerek yoktur ve vakum ortamında bile radyasyonla ısı geçişi sağlanabilir. Katı yüzeyler, gazlar ve sıvılar radyasyonu değişik seviyelerde emer ve yayarlar. Stefan Boltzmann yasası ile T_S sıcaklığındaki bir A yüzeyinden birim zamanda yayılan ışınım aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir:

$$\dot{Q}_{\text{yayılan}} = \varepsilon \sigma T_S^4 \quad (\text{W}) \quad (3.5)$$

Burada ε yüzeyin yayma oranıdır. Yüzeyin verimli olarak ne kadarlık bir yayma kabiliyetine sahip olduğunun ölçüsüdür. Yayma oranının değeri, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ aralığındadır. σ ise Stefan Boltzmann sabiti olup değeri $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ dır.

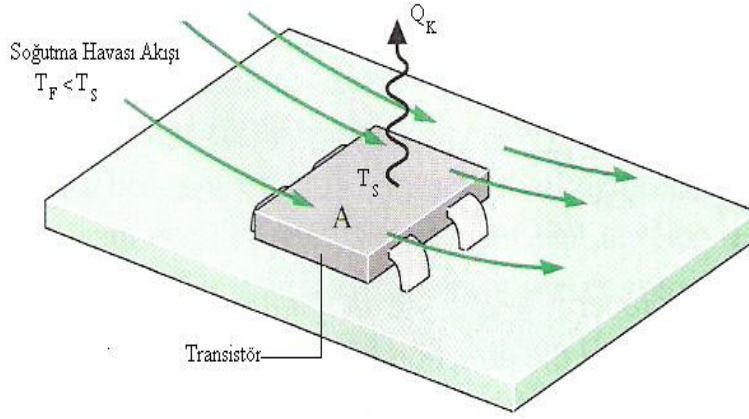
3.1.3 Taşınımınla Isı Geçişi

Taşınımınla ısı geçişi, katı bir yüzeyle onun temas ettiği akışkan bir ortam arasında gerçekleşen ısı geçiştir. Yüzey sıcaklığı T_S , akışkanın yüzeyden uzaktaki sıcaklığı T_F olan bir sistem ele

alınsın ve $T_S > T_F$ olduğu varsayalım. Bu durumda enerji hava içerisinde ve havanın hacimli hareketinden dolayı çeşitli iletim etkilerinden dolayı okla belirtilmiş yönde transfer edilir. Yüzeiden havaya geçen enerji şu ampirik formülle verilir:

$$\dot{Q}_K = \alpha A(T_S - T_F) \quad (\text{W}) \quad (3.6)$$

Bu yasa, Newton'un soğutma yasası olarak bilinir. Burada α , ısı taşınım katsayısıdır. α akışkanın bir özeliği değildir ve deneyler yoluyla bulunur. Değeri yüzey geometrisi, akışkan niteliği, akışkanın özellikleri ve akış hızına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.2 Taşınım ile ısı geçişi gösterimi

3.2 İş

İş bir F kuvvetinin x mesafesi boyunca etkide bulunması sonucu aktarılan enerjidir ve,

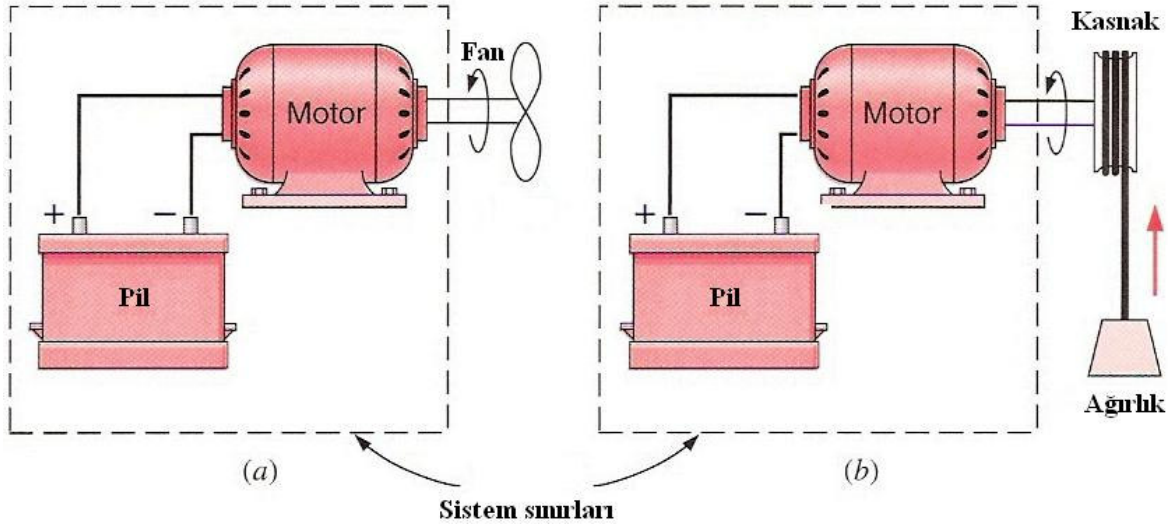
$$W = \int_1^2 F dx \quad (\text{kJ}) \quad (3.7)$$

bağıntısıyla bulunur. Sistemin birim kütlesi için yapılan iş w ile gösterilir ve,

$$w = \frac{W}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3.8)$$

şeklinde gösterilir. İş de ısı gibi sistemle çevresi arasında bir enerji alışverişidir. Sistem

tarafından yapılan iş (+), sisteme verilen iş de (-) kabul edilir.



Şekil 3.3 Bir sistemin sınırlarından çıkan iş

Şekil 3.3'te pilin ürettiği elektrik enerjisi ile çalışan motor vasıtasıyla döndürülen motorun ürettiği iş görülmektedir. Bu durumun sistemin ürettiği iş olarak incelenmesinin daha kolay anlaşılması için Şekil 3.3a'daki fanın yerine Şekil 3.3b' de kasnak vasıtasıyla bir ağırlık düşey doğrultuda hareket ettirilmektedir. Bu durum biraz önce bahsedilen işin tanımına uymaktadır. Dolayısıyla sistem sınırlarından dışarıya iş vermektedir. İşin birçok çeşidi vardır. Hareketli sınır işi, elektrik işi, yerçekimi işi, yay işi bunlardan başlıcalarıdır.

3.3 İş ve Isının Kapalı Sistemler İçin Termodinamiğin Birinci Yasası'ndaki Yeri

Bu noktaya kadar toplam enerji, iş ve ısı ayrı ayrı incelenmiştir. Enerjinin korunumu ilkesi olarak da adlandırabileceğimiz termodinamiğin birinci yasası bu kavramlarla doğrudan ilgilidir ve enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri, dolayısıyla da enerji etkileşimlerini incelemek için sağlam bir temel oluşturur. Bir kapalı sistemdeki hal değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$dE = \delta Q - \delta W \quad (\text{kJ}) \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 sınır koşulları başlangıç hali 1' den son hali 2' ye seçilirse,

$$E_2 - E_1 = Q_{12} - W_{12} \quad (\text{kJ}) \quad (3.10)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada E_1 ve E_2 kapalı sistemin enerjisi E ' nin sırasıyla başlangıç ve son değerleridir. Q_{12} , 1 halinden 2 haline gelene kadar proses boyunca kapalı sisteme verilen ısıdır. W_{12} ise kontrol kütlesi (kapalı sistem) tarafından proses boyunca yapılan iştir.

(2.6) denklemini (3.10) denklemine uygularsak;

$$Q_{12} - W_{12} = (U_2 - U_1) + (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) \quad (\text{kJ}) \quad (3.11)$$

$$Q_{12} - W_{12} = U_2 - U_1 + m(V_2^2 - V_1^2)/2 + mg(z_2 - z_1) \quad (\text{kJ}) \quad (3.12)$$

ifadeleri elde edilir.

3.4 Özgül Isılar ve Entalpi

Bu kısımda değişmez bileşimdeki bir maddenin homojen bir fazı alınacaktır. Bu faz belki bir sıvı, katı veya gaz olabilir ama fazda bir değişiklik olmayacaktır. Özgül ısı, bir birim kütleyi bir derece arttırmak için gerekli ısı enerjisi olarak tanımlanır. (3.9) ifadesini (2.6) ifadesindeki kinetik ve potansiyel enerjideki değişimleri ihmal ederek yazarsak:

$$\delta Q = dU + dW \quad (3.13)$$

ifadesi elde edilebilir. Buradaki dU terimi için (3.7) denkleminde faydalanarak:

$$\delta U = PdV \quad (3.14)$$

yazılabilir. Böylece (3.13) denklemini

$$\delta Q = dU + dW = dU + PdV \quad (3.15)$$

halini alır. Bu ifade iki ayrı özel durum için kullanılabilir:

a) Sabit hacimde;

İş terimi olan $P dV$ sıfır iken (hacim değişikliği yok) sabit hacimde özgül ısı tanımlanabilir:

$$C_v = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_v = \frac{1}{m} \left(\frac{dU}{dT} \right)_v = \left(\frac{du}{dT} \right)_v \quad (3.16)$$

b) Sabit basınçta;

İş terimi olan $P dV$ ve iç enerji U 'nun integre edilmesiyle sabit basınçta özgül ısı tanımlanabilir:

$$C_p = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (3.17)$$

Burada karşımıza entalpi (H) kavramı karşımıza çıkmaktadır. Hesaplamalarda kolaylık olması açısından her yerde karşımıza çıkan $U + PV$ terimi entalpi (H) olarak adlandırılmaktadır. Bu tanımlamadan faydalanılarak (3.17) ifadesi (3.15) denkleminde dQ ifadesi yerine;

$$dQ = dU + PdV = dH \quad (3.18)$$

yazılarak aşağıdaki şeklini alır:

$$C_p = \frac{1}{m} \left(\frac{dH}{dT} \right)_p = \left(\frac{dh}{dT} \right)_p \quad (3.19)$$

3.5 Katılar ve Sıvılarda İç Enerji, Özgül Isılar ve Entalpi

Özgül hacmi veya yoğunluğu sabit madde sıkıştırılmayan maddedir. Katı ve sıvılar bu türden maddeler olarak göz önüne alınabilir.

Sıkıştırılmayan maddeler için sabit hacimde ve sabit basınçta özgül ısılar eşittir. Bu nedenle katı ve sıvılar için C_p ve C_v indisleri atılabilir ve her iki özgül ısı C ile gösterilebilir:

$$C_p = C_v = C \quad (3.20)$$

(3.16) denkleminde yola çıkarak dU ifadesi için aşağıdaki denklem çıkarılabilir:

$$dU = C_v dT = C(T) dT \quad (3.21)$$

Bu integralin hesaplanabilmesi için C ' nin sıcaklıkla değişiminin bilinmesi gereklidir. Küçük sıcaklık aralıkları için, ortalama sıcaklıkta hesaplanan sabit bir C değeri alınabilir. Bu durumda,

$$\Delta u \cong C_{ort} (T_2 - T_1) \quad (3.22)$$

Sıkıştırılmayan bir maddenin hal değişimi sırasındaki entalpi değişimi, entalpinin tanımından ($h = u + P v$) belirlenebilir:

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P \quad (3.23)$$

Sıkıştırılmış sıvı için literatürde pek fazla bilgi yoktur. Bunun nedeni, sıkıştırılmış sıvı özelliklerinin basınçla değişiminin bir ölçüde bağımsız olmasından ileri gelir. Sıkıştırılmış sıvıya ilişkin bilgilerin yokluğunda, sıkıştırılmış sıvı özelliklerini doymuş sıvı özelliklerine eşit almak uygulamasına gidilebilir. Bunda etken olan nokta, sıkıştırılmış sıvı özelliklerinde basınçtan çok sıcaklığın etkili olmasıdır. Böylece, sıkıştırılmış sıvı için,

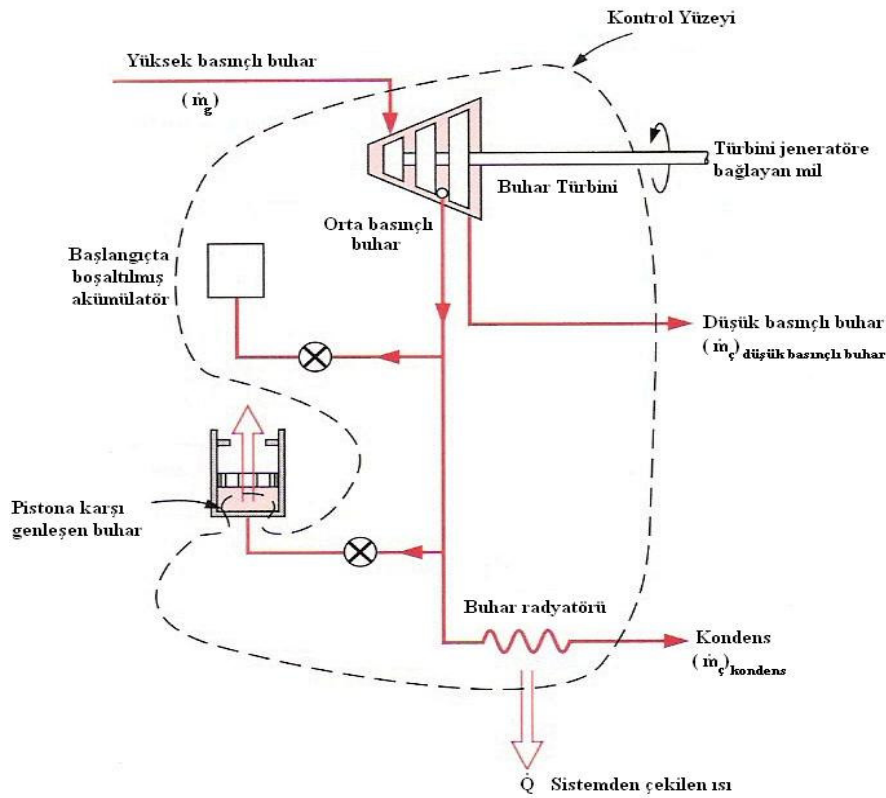
$$y \cong y_{f,T} \quad (3.24)$$

yazılabilir. Burada y , özgül hacim, iç enerji veya entalpi olabilir. Bundan dolayı ileride gösterilen sayısal uygulamada özellikle sıkıştırılmış suyun özellikleri doymuş buhar tablolarından bu ilkeye bağlı kalarak alınmıştır.

4. AÇIK SİSTEMLER İÇİN TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ YASASI

4.1 Kütlelin Korunumu ve Kontrol Hacmi

Açık sistemin (kontrol hacmi) tanımı 2. bölümde açıklanmıştı. Kütle ısı ve iş kadar kontrol yüzeyini geçebilir ve kontrol hacmi içindeki kütle bu kütlelin özellikleri gibi zamanla değişebilir. Şekil 4.1’de, ısı transferi , shaft işi, hareketli sistem işi, kontrol hacmi içerisinde kütle birikmesi ve çeşitli kütle akışlarını içeren bir kontrol hacminin şematik diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Bir kontrol hacminin enerji ve kütle geçişini gösteren şematik diyagramı

Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere kontrol hacminin sınırlarına giren ve çıkan kütle ve enerji vardır. Çeşitli akışlar için kütlelin korunumu şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{dm_{KH}}{dt} = \sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_ç \quad (\text{kg/s}) \quad (4.1)$$

4.2 Bir Kontrol Hacmi İçin Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasaasının genel ifadesi denklem (3.10)' da verilmiştir. Kontrol hacmine kütle girdiğinde veya kontrol hacminden çıktığında bu proseste gerçekleşen bir sınır hareketi oluşur.

Kontrol hacmine giren kütleinin arkasında çevre tarafından yaratılan ve kontrol hacmine girmeye zorlanan bir basınç vardır. Benzer şekilde kontrol hacminden çıkan kütleinin arkasında, kütleiyi kontrol hacmini terk etmeye zorlayan bir basınç vardır. Bu sayede akışkanın yaptığı birim zamanda yaptığı iş, akış işi olarak adlandırılır ve aşağıdaki ifadeyle verilir:

$$\dot{W}_{akik} = F V = \int P V dA = P V = P v \dot{m} \quad (4.2)$$

Burada, italik olarak yazılmayan V 'nin hızı, italik yazılan V 'nin hacmi gösterdiği gözden kaçmamalıdır. Kontrol hacmini terk eden kütleinin birim zamandaki akış işi kontrol hacmi tarafından yapılmaktadır ve $P_{\phi} v_{\phi} \dot{m}_{\phi}$ şeklinde elde edilir. kontrol hacmine giren kütleinin birim zamandaki akış işi çevre tarafından yapılmaktadır ve $P_g v_g \dot{m}_g$ şeklinde elde edilir. Böylece birim kütle için akış işi Pv olarak tanımlanabilir ve toplam enerjiiyle aralarında,

$$e + Pv = u + Pv + 1/2 V^2 + gZ = h + 1/2 V^2 + gZ \quad (4.3)$$

eşitliği bulunur. Buradaki $(u + Pv)$ terimi entalpidir ve h işaretiyle gösterilir.

(4.1) denkleminin (4.3) denklemi ile genişletilmesiyle aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\frac{dE_{KH}}{dt} = \dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum \dot{m}_g (h_g + 1/2 V_g^2 + gZ_g) - \sum \dot{m}_{\phi} (h_{\phi} + 1/2 V_{\phi}^2 + gZ_{\phi}) \quad (4.4)$$

Bu denklem açık sistemler için termodinamiğin birinci ifadesinin son şeklidir.

4.2.1 Sürekli Akışlı Açık Sistem

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanla değişmez ($m_{kh} = \text{sabit}$). Bu durumda, kütle korunumu ilkesi uyarınca kontrol hacmine giren toplam kütle, kontrol hacminden çıkan toplam kütleyle eşit olması gerekir. Bu ifade aşağıdaki gibidir:

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (4.5)$$

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacminin toplam enerjisi sabittir ($E = \text{sabit}$). Bu, kontrol hacminin toplam enerjisinde değişim olmadığı anlamına gelir. Böylece sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı olarak giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması zorunludur. Buna göre sürekli akışlı açık sistemlerde termodinamiğin birinci yasası şöyle yazılır:

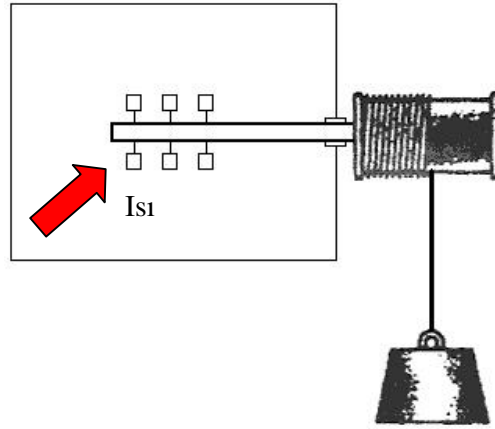
$$\frac{dE_{KH}}{dt} = \dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} + \sum \dot{m}_g (h_g + 1/2 V_g^2 + gZ_g) - \sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi + 1/2 V_\varphi^2 + gZ_\varphi) = 0 \quad (4.6)$$

$$\dot{Q}_{KH} - \dot{W}_{KH} = \sum \dot{m}_g (h_g + 1/2 V_g^2 + gZ_g) - \sum \dot{m}_\varphi (h_\varphi + 1/2 V_\varphi^2 + gZ_\varphi) \quad (4.7)$$

5. TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ KANUNU

Kapalı ve açık sistemler için termodinamiğin birinci kanunu diğer adıyla enerjinin korunumu ilkesinden 3. bölümde bahsedildi. Bir hal değişiminin saplanabilmesi için birinci yasanın sağlanması zorunludur fakat birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşmesi için yeterli değildir.

Hal değişimleri belirli yönde gerçekleşirken, tersi olan yönlerde gerçekleşmemektedir. Bir odanın elektrik direncinden geçen akımla ısıtılması mümkündür fakat odanın ısıtıldığında elektrik direncinden akım geçmesi beklenemez. Bir kütlenin aşağı inerken bağlı olduğu makara sisteminin döner kanatı çevirmesiyle yalıtılmış kap içerisinde duran sıvının iç enerjisini artırması mümkün, fakat tersi işlemi uygulandığında yani sıvının iç enerjisini arttırıldığında (sıvıya ısı verildiğinde) kanatın dönmesi mümkün olmamaktadır.



Şekil 5.1 Ağırlık etkisiyle dönen karıştırıcı sistemi

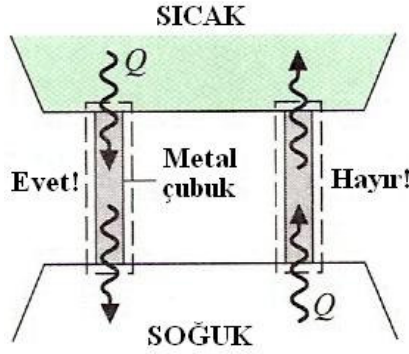
Birinci yasa hal değişimlerinin yönü üzerinde herhangi bir kısıtlama koymaz, fakat birinci yasanın gerçekleşmesi hal değişiminin olacağı anlamına gelmez. Bir hal değişiminin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği ile alakalı açık, termodinamiğin ikinci yasasıyla kapatılır. Buradan, bir hal değişimi termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını sağlamıyorsa, gerçekleşmez sonucu çıkarılabilir.

5.1 Termodinamiğin İkinci Kanununun İfadeleri

İkinci yasanın Clausius ifadeleri ve Kelvin-Planck olarak bilinen iki klasik anlatım şekli vardır.

5.1.1 Clausius İfadesi

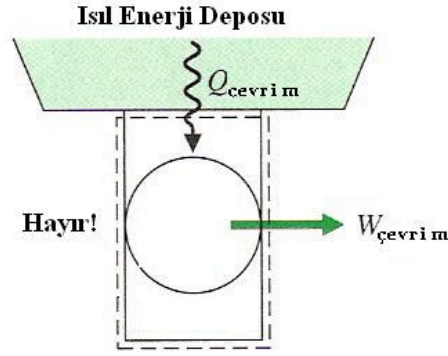
Termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinenin, başka hiçbir enerji etkileşiminde bulunmadan, düşük sıcaklıktaki bir cisimden ısı alıp yüksek sıcaklıktaki bir cisme ısı vermesi olanaksızdır. Bu tanım Clausius ifadesi olarak bilinir. Bu tanımdan, düşük sıcaklıktaki bir cisme yüksek sıcaklıktaki bir cisimden ısı verilmesi ancak çevrime dışarıdan iş verilmesiyle mümkün olur sonucu çıkarılabilir. Bu ifade Şekil 5.2’de örneklendirilmiştir.



Şekil 5.2 Clausius ifadesinin şematik şekli

5.1.2 Kelvin-Planck İfadesi

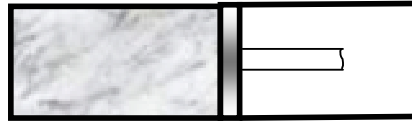
Kelvin-Planck ifadesi, termodinamik bir çevrim gerçekleştirerek çalışan bir makinenin sadece bir kaynaktan ısı alıp, net işi üretmesinin imkansız olduğunu belirtir. Başka bir deyişle bir ısı makinesi, sürekli çalışabilmek için hem yüksek sıcaklıktaki bir ısıl enerji deposuyla hem de düşük sıcaklıktaki bir ısıl enerji deposuyla ısı alışverişinde bulunmak zorundadır. Bu ifadeye göre hiçbir ısı makinesinin ısıl verimi yüzde 100 olamaz veya bir güç santralinin sürekli çalışabilmesi için, aracı akışkanın kazandıktan ısıl enerji almasının yanı sıra, çevre ortama da ısıl enerji aktarması gerekir. Bu ifade Şekil 5.3’de örneklendirilerek vurgulanmıştır.



Şekil 5.3 Kelvin-Planck ifadesinin şematik şekli

5.2 Tersinir ve Tersinmez Hal Değişimleri

Hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşmektedir. Bu hal değişimleri gerçekleştikten sonra, sistemin çevreyle aynı etkileşimleri ters yönde gerçekleştirerek yeniden ilk haline dönmesi olanaksızdır. Bu tür hal değişimlerine “tersinmez hal değişimi” denir.



Şekil 5.4 Bir gazın sanki-dengeli genişletilmesi ve sıkıştırılması

Bir yönde gerçekleştikten sonra, çevre üzerinde hiçbir iz bırakmadan ters yönde de gerçekleşebilen hal değişimine “tersinir hal değişimi” denir. Bir başka deyişle, ters yöndeki hal değişiminden sonra hem sistem hem de çevre ilk hallerine geri dönerler. Bu ancak, her iki yöndeki hal değişimi birlikte ele alındığı zaman, net ısı geçişi ve net iş sıfır olursa mümkündür.

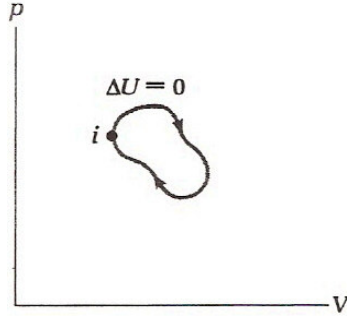
Bir sistem, ister tersinir ister tersinmez olsun, bir dizi hal değişiminden geçerek yeniden ilk haline dönebilir. Vurgulanması gereken husus, çevrimin tersinir hal değişimlerinden oluşması durumunda, çevrede net bir değişimin olmamasıdır. Tersinmez hal değişimlerindeyse, çevre sistem üzerinde bir miktar net iş yapar ve bu nedenle ilk haline geri dönmez.

Doğada tersinir hal değişimlerine rastlanmaz. Tersinir hal değişimleri, gerçek hal değişimlerinin kurumsal benzerleridir. Bazı gerçek hal değişimleri, tersinir hal değişimlerine yaklaşabilir, fakat hiçbir zaman tersinir olamaz. Bir başka deyişle, doğadaki tüm hal değişimleri tersinmezdir.

5.3 Entropi

Denge durumundaki bir sistemin durum değişkenleriyle nitelendirilebildiğinden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bahsedilen durum değişkenleri P , V , T , n , U simgeleriyle gösterilenlerdir. Şekil 5.5 'teki kapalı eğriyle gösterildiği gibi bir çevrim boyunca durum değişkenlerindeki değişiklik, sistem bir tam çevrimde başlangıçtaki durumuna döndüğünden sıfırdır. Sonuç olarak,

$$\Delta U = 0 \quad (\text{herhangi bir çevrim için}) \quad (5.1)$$



Şekil 5.5 Bir çevrim boyunca iç enerji gibi durum değişkenlerindeki değişiklik

Bu sonuç U iç enerjisinin bir durum değişkeni olduğu gerçeğinden gelir. Benzeri bir bağıntı, herhangi bir çevrimde herhangi bir durum değişkeni için geçerlidir. Örneğin

$$\Delta P = 0 \quad \Delta T = 0 \quad \Delta V = 0 \quad (\text{herhangi bir çevrim için}) \quad (5.2)$$

yazabiliriz. Buna karşılık bir çevrimdeki net ısı ve net iş katkıları genellikle sıfır değildir:

$$Q \neq 0 \quad W \neq 0 \quad (\text{herhangi bir çevrim için}) \quad (5.3)$$

Herhangi bir çevrim boyunca bir nicelik (5.1) denklemindeki gibi bir bağıntıya uyarsa o nicelik söz konusu sistemin bir durum değişkenidir.

Herhangi bir sistemin, sisteme dQ ısısının tersinir olarak katıldığı, T sıcaklığında sonsuz küçük bir süreçten geçtiği düşünölsün.

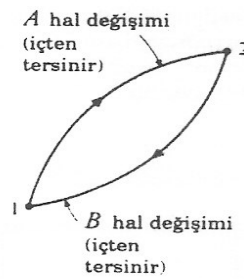
S ile gösterilen entropi bir durum değişkenidir. olup, bundaki dS değışikliği, tersinir olarak katılan dQ ısısının, aktarmanın yapıldığı T sıcaklığına bölümüdüdür.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (5.4)$$

Sistemde ve tersinir makinede herhangi bir tersinmezlik yoksa, bileşik sistem tarafından gerçekleştirilen çevrim içten tersinir olacaktır. Bu durumda çevrim ters yönde gerçekleşebilir. Çevrim ters yönde gerçekleştiği zaman tüm büyüklükler sadece işaret değıştireceklerdir. A ve B ile gösterilen iki içten tersinir hal değışiminden oluşan bir çevrim (Şekil 5.6) incelendiğinde (5.4) denklemi için:

$$dS = \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = 0 \quad \text{ve,} \quad (5.5)$$

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B \quad (5.6)$$



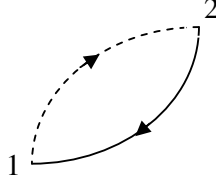
Şekil 5.6 İki içten tersinir hal değışiminde oluşan çevrim

Bir hal değişimi sırasında sistemin entropi değişimi (5.4) numaralı denklemleri ilk ve son halleri arasında integre ederek bulunabilir:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (5.7)$$

5.3.1 Entropinin Artışı

İki hal değişiminden oluşan bir çevrimde (Şekil 5.7), 1-2 hal değişimi tersinir veya tersinmez herhangi bir hal değişimi, 2-1 hal değişimi ise tersinirdir.



Şekil 5.7 Tersinir ve tersinmez hal değişimlerinden oluşan bir çevrim

Bu durumda (5.7) ifadesi, (5.8) haline dönüşür;

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (5.8)$$

(5.8) ifadesindeki eşitsizlik denklem haline getirilmelidir. Tersinmez hal değişimi sırasında bir miktar entropi üretilir veya var edilir, entropi üretimi tamamen tersinmezlikle ilgilidir. Bir hal sırasında üretilen veya var edilen entropi, “entropi üretimi” olarak adlandırılır ve $S_{\text{üretim}}$ ile gösterilir. Bu durumda (5.8) ifadesi denklem olarak yazılabilir;

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} + S_{\text{üretim}} \quad (5.9)$$

$$S_{\text{üretim}} = (S_2 - S_1) - \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (5.10)$$

Yukarıdaki ifadelerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Tersinir işlemlerde entropi üretimi sıfırdır.
- Tersinmez işlemlerde entropi üretimi sıfırdan büyüktür.
- Bir işlemde entropi üretimi ne kadar büyükse, işlemin tersinmezliği o kadar fazladır.
- Entropi üretimi hal değişimi sırasında izlenen yola bağlıdır ve termodinamik bir özellik değildir. Entropi değişimi ise yoldan bağımsızdır ve termodinamik bir özellik olup entropi üretimi ile karıştırılmamalıdır.
- Entropi üretimi sıfırdan küçük olamaz.
- Verimi en yüksek çevrimler tersinir hal değişimlerinden oluşan çevrimlerdir. Dolayısıyla, bir çevrimin verimini yükseltmek için çevrimdeki tersinmezliklerin azaltılması, yani entropi üretiminin minimize edilmesi gereklidir.
- Termodinamiğin birinci kanunundan “enerji yok edilemez ve yoktan var edilemez” sonucu çıkarken, termodinamiğin ikinci kanunundan “entropi yoktan var edilebilir ama asla yok edilemez” sonucu çıkar.

5.3.2 Sıvı ve Katıların Entropi Değişimleri

sıvı ve katılar sıkıştırılmaz madde olarak kabul edilirler. Bunun nedeni sıvı ve katıların hacimlerinin bir hal değişimi sırasında sabit kalmalarıdır. Böylece katı ve sıvılar için, $dv = 0$ alınabilir. Ayrıca sıkıştırılmaz maddeler için $C_p = C_v = C_p$ olduğu göz önüne alınır ve $du = C dT$ bağıntısı kullanılırsa, aşağıdaki ifadeye erişilebilir.

$$ds = \frac{du}{T} = C \frac{dT}{T} \quad (5.11)$$

Bir hal değişimi sırasındaki entropi değişimi bu denklemi integre ederek bulunabilir:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C(T) \frac{dT}{T} \quad (5.12)$$

Sıvı ve katıların özgül ısıları C genellikle sıcaklığa bağlıdır, bu nedenle integrasyonu yapabilmek için özgül ısının sıcaklıkla değişimini veren fonksiyonun bilinmesi gerekir. Bununla birlikte, birçok durumda C sabit kabul edilip verilen sıcaklık aralığında ortalama bir değeri alınabilir. Bu kabul yapılırsa, (5.12) numaralı denklem integrale edilerek aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$s_2 - s_1 = C_{ort} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (5.13)$$

Sıkıştırılmaz bir maddenin entropi değişimi sadece sıcaklığın fonksiyonudur. (5.13) numaralı denklemi kullanarak, katı ve sıvı maddelerin entropi değişimleri oldukça hassas bir biçimde hesaplanabilir*.

* Çengel ve Boles, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık, 1996

6. KULLANILABİLİR ENERJİ

Bir sistem, içinde bulunduğu çevre ile termodinamik dengede ise çevre ile sistem arasında herhangi bir ısı ve iş etkileşimi olamaz. Bu hale “ölü hal” adı verilir. Ölü haldeki sistem iş üretemez. Ölü haldeki özellikler 0 (sıfır) indisi ile gösterilir (T_0, P_0, S_0 gibi).

Bütün işlemlerin tersinir olduğu ideal hal değişimleri ile elde edilen işe tersinir iş adı verilir. Güç üretme sistemlerinde tersinir iş, bir sistemin ilk halden son hale geçerken yaptığı maksimum işler. Soğutma sistemlerinde tersinir iş ise belirli bir miktar soğutmayı yapabilmek için gerekli minimum iştir.

Bir sistemin hareketli sınır işinin bir kısmı civara karşı yapıldığından; sistemin ilk halden son hale geçerken yaptığı maksimum işten (tersinir iş), civara karşı yapılan iş çıkarılarak “maksimum faydalı iş” bulunur. Verilen bir haldeki sistemin sadece çevresi ile etkileşimde bulunarak ölü hale geçmesi sonucu elde edilebilecek maksimum faydalı işe; sistemin kullanılabilir enerjisi, kullanılabilirliği veya ekserjisi denir. Bu durumda, faydalı işin maksimum olması için sistemdeki bütün işlemlerin tersinir olması gerektiği görülür.

Enerji ile kullanılabilir enerji (ekserji) arasında bazı farklar vardır:

- Enerji yok edilemez, kullanılabilir enerji ise yok edilebilir.
- Kullanılabilir enerji, sistemin bütün halleri için sıfırdan büyük veya sıfıra eşit olur.
- Kullanılabilir enerji, sistemin bulunduğu halin ölü hale göre sapmasını gösterir.
- Kullanılabilir enerji, sistemler arasında transfer edilebilir ve içlerindeki tersinmezliklerde yok edilebilir.

6.1 Kapalı Sistemlerde Kullanılabilir Enerji

Sadece çevresi ile ısı alışverişinde bulunan akışsız bir kapalı sistemde termodinamiğin birinci kanunu (3.9) denklemiyle daha önce verilmişti. Tersinir işlemlerde ısı ifadesi için

$$\delta Q = T.dS \quad (6.1)$$

yazılabilir. Böylece iki denklem kullanılarak,

$$T.dS - \partial W = dE \quad (6.2)$$

ede edilir. Sistem sadece çevre ile ısı alışverişinde bulunduğundan;

$$\partial W = T_0 dS - dE \quad (6.3)$$

Yukarıdaki ifadede verilen halden ölü hale geçişte sağlanacak maksimum tersinir işi bulmak için integral alınırsa, maksimum tersinir iş:

$$W_{tr,max} = (E - E_0) - T_0(S - S_0) \quad (6.4)$$

olarak bulunur.

Sistemin çevreye karşı yaptığı iş:

$$W_{\text{çev}} = \int p dV = p_0 \int_V^{V_0} dV = p_0(V_0 - V) \quad (6.5)$$

Çevreye karşı yapılan iş, maksimum tersinir işten çıkarılırsa, akışsız kapalı sistemlerde kullanılabilirlik;

$$K = \underbrace{(E - E_0) - T_0(S - S_0)}_{W_{tr,max}} - \underbrace{p_0(V_0 - V)}_{W_{\text{çev}}} \quad (6.6)$$

şeklinde bulunur.

Özgül kütle için kullanılabilirlik:

$$k = (e - e_0) - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v) \quad (6.7)$$

olur. Burada $e = u + V^2/2 + gz$ 'dir. Böylece (6.6) denklemi şu şekli alır:

$$k = (u - u_0) - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v) + V^2/2 + gz \quad (6.8)$$

Kullanılabilirlik, kapalı sistemler için termodinamik bir özelliktir.

Sadece çevre ile ısı alışverişinde bulunan bir kapalı sistemde iki hal arasındaki kullanılabilir enerji değişimi ise aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$K_2 - K_1 = (E_2 - E_1) - T_0(S_2 - S_1) - p_0(V_1 - V_2) \quad (6.9)$$

6.2 Açık Sistemlerde Kullanılabilir Enerji

Akışsız durumda maddenin kullanılabilirliği (k);

$$k = (e - e_0) - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v) \quad (6.10)$$

Akış halindeki maddenin özgül kullanılabilirliği (k_a);

$$k_a = k + (pv - p_0v) \quad (6.11)$$

$$k_a = (e - u_0) - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v) + (pv - p_0v) \quad (6.12)$$

$$k_a = (u + V^2/2 + gz - u_0) - T_0(s - s_0) + (pv - p_0v) \quad (6.13)$$

$h = u + pv$ ve $h_0 = u_0 + p_0v_0$ denklemleri (6.12)'de yerine konulursa;

$$k_a = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (6.14)$$

Ölü halde Gibbs fonksiyonu;

$$g_0 = u_0 + P_0v_0 - T_0s_0 \quad (6.15)$$

böylece;

$$k_a = h - T_0 s - g_0 + \frac{V^2}{2} + gz \quad (6.16)$$

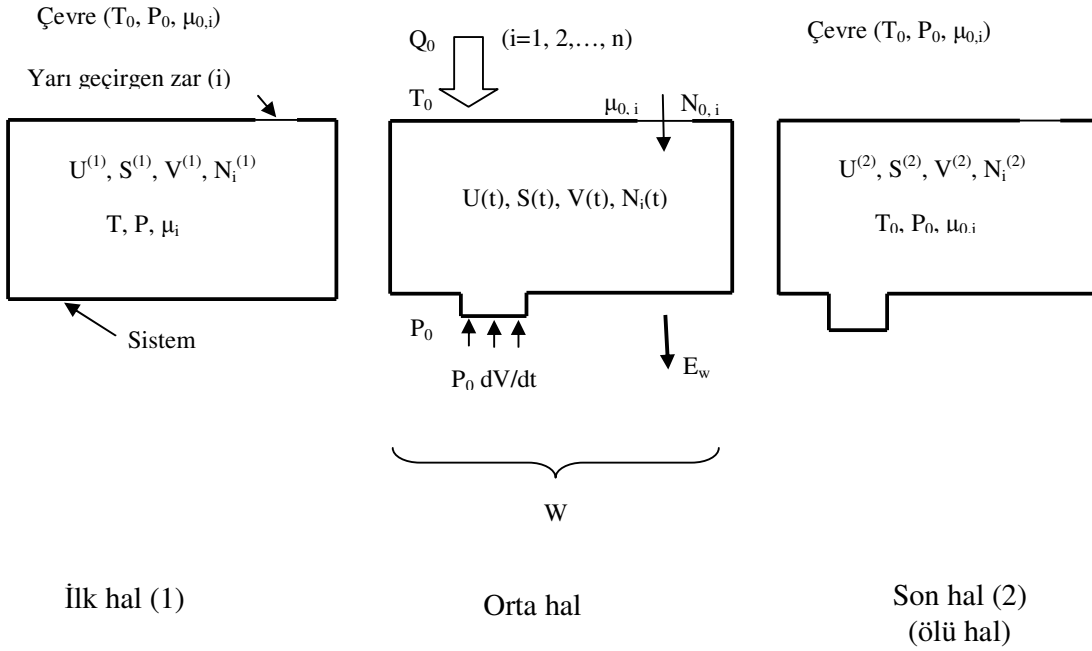
olur. Açık sistemlerde iki hal arasındaki kullanılabilir enerji değişim ifadesi;

$$k_{a1} - k_{a2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (6.17)$$

7. EKSERJİ ANALİZLERİ

7.1 Akışsız Sistemler

N_1, N_2, \dots, N_n 'e kadar n adet molün karmaşık karma yığını göz önünde bulunduralım. Bu yığını karma sistem olarak ele alacağız. Sistemin başlangıç denge durumunda çevrenin yerini tutan yoğunluğundan farklı olarak $(T_0, P_0, \mu_{0,1}, \mu_{0,2}, \dots, \mu_{0,n})$, sıcaklık (T), basınç (P) ve n tane kimyasal potansiyel (μ) karakterize edilir. Başka bir deyişle, bu yığın sistemi ve çevre karşılıklı olarak termal, mekanik ve kimyasal dengede değildir.



Şekil 7.1 Akışkan olmayan sistemlerin çevre ile ulaştığı termik, mekanik ve kimyasal denge

Şekil 7.1'de gösterilen başlangıç ve bitiş hali prosesleri, bizim orijinal sistemimizle çevreyi denge haline getirmek için tasarlanmıştır. Burada son halde çevre şartıyla sistem şartları arasındaki eşitliğe dikkat etmek gerekir. Aynı zamanda bütün ekstensif özelliklerin 1 halinden 2 haline değiştiğine dikkat edilmelidir. Bu özellikleri mol sayıları da kapsar N_i ($i=1, 2, \dots, n$). Bu n bileşenli değişen sayılar sistem ile çevre arasındaki yarı geçirgen zardan yayılırlar. Akışsız cihaz olmasına rağmen, 1. halden 2. hale kütle transfer etkileşimleri olduğundan sistem açık sistemdir.

Her bileşen için kütle korunumunu veren denklemler;

$$\frac{dN_i}{dt} = \dot{N}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7.1)$$

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_0 - \dot{W} + \sum_{i=1}^n \dot{N}_i \bar{h}_{0,i} \quad (7.2)$$

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS}{dt} - \frac{\dot{Q}_0}{T_0} - \sum_{i=1}^n \dot{N}_i \bar{s}_{0,i} \geq 0 \quad (7.3)$$

Bu denklemlerde, $\bar{h}_{0,i}$ ve $\bar{s}_{0,i}$ karışımın çevre sınırından geçen i 'inci bileşenin molar entalpisi ve entropisidir. Zaman içinde 1. halden 2. hale integre edilen ve bölüştürülen işe (\dot{W}) karşılık çevrede yapılan iş ($P_0 dV/dt$) artı kullanılabilen unsuru \dot{E}_w 'yi (ekserji olarak adlandırılır) verir.

$$N_i^{(2)} - N_i^{(1)} = \int_1^2 \dot{N}_i dt \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7.4)$$

$$U^{(2)} - U^{(1)} = Q_0 - E_w - P_0(V^{(2)} - V^{(1)}) + \sum_{i=1}^n \bar{h}_{0,i} \int_1^2 \dot{N}_i dt \quad (7.5)$$

$$\dot{S}_{gen} = S^{(2)} - S^{(1)} - \frac{\dot{Q}_0}{T_0} - \sum_{i=1}^n \bar{s}_{0,i} \int_1^2 \dot{N}_i dt \quad (7.6)$$

Q_0 'ı ihmal edip, $\int \dot{N}_i dt$ integralini çözersek;

$$E_w = U^{(1)} - T_0 S^{(1)} + P_0 V^{(1)} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i^{(1)} - \left[U^{(2)} - T_0 S^{(2)} + P_0 V^{(2)} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i^{(2)} \right] - T_0 S_{gen} \quad (7.7)$$

Burada $\mu_{0,i} = \bar{g}_{0,i} = \bar{h}_{0,i} - T_0 \bar{s}_{0,i}$ 'dir. Sonuç olarak, T_0 , P_0 ve $\mu_{0,i}$ gibi karışımın intensif özelliklerinin son durum halinde olduğuna dikkat edilmelidir (Şekil 7.1). Euler eşitsizliğinden, (7.7) denkleminin parantez içindeki ifadesi sıfıra gider. Yani;

$$\left[U^{(2)} - T_0 S^{(2)} + P_0 V^{(2)} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i^{(2)} \right] = 0 \quad (7.8)$$

(7.7) denkleminin ilk dört terimi maksimum kullanılabilir işi göstermektedir. Çünkü, karışım ve çevre tersinir prosesin en sonunda dengeye gelir. Yani;

$$(E_W)_{rev} = U - T_0 S + P_0 V - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i \quad (7.9)$$

Buradaki $(U, S, V, N_1, N_2, \dots, N_n)$ karışım sisteminin orijinal ekstensif özellikleridir.

Kapalı sistemden alınacak maksimum iş miktarı sadece termal ve mekanik eşitliklen sağlanan akızsız ekserji (Ξ) kadardır.

$$\Xi = U - U^* - T_0 (S - S^*) + P_0 (V - V^*) \quad (7.10)$$

Bu yeni rotasyonla (*) işaretlenen özellikler, sadece uygun çevresel değerlerle uygunluk gösteren basınç ve sıcaklığın karışım sisteminin sınırlandırılmış ölü haline benzetilir. Sınırlandırılmış ölü bölgedeki Euler teoremi;

$$U^* = T_0 S^* - P_0 V^* + \sum_{i=1}^n \mu_i^* N_i \quad (7.11)$$

Çevre termal, mekanik ve kimyasal olarak dengede olduğunda, sınırlandırılmış ölü bölgedeki kimyasal potansiyel $\mu_i^*(T_0, P_0)$ nihai ölü bölgedeki karışıma yakın kimyasal potansiyele ($\mu_{0,i}$) eşit olmak zorunda değildir. (7.9) denkleminde (7.11) denklemini çıkartırsak;

$$(E_W)_{rev} = U - U^* - T_0 (S - S^*) + P_0 (V - V^*) + \sum_1^2 (\mu_i^* - \mu_{0,i}) N_i \quad (7.12)$$

veya (7.10) denklemine bakarsak;

$$(E_W)_{rev} = \Xi + \Xi_{ch} \quad (7.13)$$

Ξ_{ch} akışsız kimyasal ekserji olarak tanımlanır ve şu şekilde gösterilir;

$$\Xi_{ch} = \sum_1^2 (\mu_i^* - \mu_{0,i}) N_i \quad (7.14)$$

Son prostenen önce ve sonra sabitleşmiş olan T_0 ve P_0 , sıcaklık ve basınç süresince akışsız sistemden alınacak maksimum iş miktarı iki bileşenden oluşur. Bunlar Ξ ile gösterilen akışsız ekserji (sınırlandırılmış ölü bölgedeki) ile Ξ_{ch} ile gösterilen kimyasal ekserjidir.

Ξ 'den Ξ_{ch} 'ı ayırırsak, orijinal sabit kütle ve sabit bileşen sistemi $(U, S, V, N_1, N_2, \dots, N_n)$ için akışsız termomekanik ekserji (akışsız fiziksel ekserji) olarak tanımlanır (Bejan vd., 1996; Moran., 1989; Kotas, 1995; Szargut vd., 1988). Dikkat edilmelidir ki, formüle edilmiş maksimum boyutun kullanılabilir işi Ξ olarak tanımlanan sistem ve çevre, termal ve mekanik dengeye ancak ulaşabiliyor. Bu bakış altında, denklem (3.36)'da gösterilen akışsız termomekanik ve kimyasal ekserji kısaca orijinal karışım yığınının toplam ekserjisi Ξ_t olarak tanımlanır;

$$\Xi_t = \Xi + \Xi_{ch} \quad (7.15)$$

Profesör Evans'ın doktora tezi olan ekserji ve uygunluğun genelleştirilmiş kavramlarından sonra, bu eşitsizlik karışımın akışkan olmayan ekserjisi olarak tanımlanır (Evans, 1969). Sonuç olarak toplam akışkan olmayan ekserji denklem (7.9)'da tanımlanan $(E_W)_{rev}$ 'ye eşittir.

$$\Xi_t = U - T_0 S + P_0 V - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i \quad (7.16)$$

7.2 Akışlı Sistemler

Çevre ile termal, mekanik ve kimyasal dengeye ulaşan düzgün akıştan çıkartılacak maksimum kullanılabilir gücü inceleyeceğiz. Kontrol hacmi içinde akan akışkan, (N_1, N_2, \dots, N_n) olan başlangıç akışkan yığınlarına sahiptir. Şekil 7.2'de iç akışın miktarı ile molar akışkanına olan süperpozisyonu gösterilmiştir $\dot{N}_{i,giriş}$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Kontrol hacmi içinde, çevre ile karışım

$$E_W = \sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{h}_i - T_0 \bar{s}_i \right)_{giriş} - \mu_{0,i} \right] \dot{N}_{i,giriş} - \sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{h}_i - T_0 \bar{s}_i \right)_{çıkı} - \mu_{0,i} \right] \dot{N}_{i,çıkı} - T_0 \dot{S}_{gen} \quad (7.19)$$

Çevre ile termal, mekanik ve kimyasal dengede olan dışakış karışımı;

$$\left(\bar{h}_i - T_0 \bar{s}_i \right)_{çıkı} = \bar{g}_{0,i} = \mu_{0,i} \quad (7.20)$$

Böylece, (7.19) denklemindeki ikinci eşitlikteki bütün terimler kaybolur. Sonuç olarak, akış cihaz fonksiyonları tersinir olduğunda maksimum ekserji dağıtım oranı oluşur.

$$\left(\dot{E}_W \right)_{rev} = \bar{h} \dot{N} - T_0 \bar{s} \dot{N} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} \dot{N}_{i,giriş} \quad (7.21)$$

Burada \dot{N} girişteki ölçülen toplam akış oranıdır.

$$\dot{N} = \sum_{i=1}^n \dot{N}_{i,giriş} \quad (7.22)$$

Ayrıca \bar{h} ve \bar{s} içerdeki karışım için toplam molar entalpi ve entropidir.

$$\bar{h} = \frac{1}{\dot{N}} \sum_{i=1}^n \bar{h}_{i,giriş} \dot{N}_{i,giriş}, \quad \bar{s} = \frac{1}{\dot{N}} \sum_{i=1}^n \bar{s}_{i,giriş} \dot{N}_{i,giriş} \quad (7.23)$$

Maksimum ekserji dağıtım oranı (7.21), her ünitenin esas toplam akış oranı için aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{\left(\dot{E}_{rev} \right)}{\dot{N}} = \sum_{i=1}^n \left(\bar{h}_{i,giriş} - T_0 \bar{s}_{i,giriş} - \mu_{0,i} \right) x_i = \bar{h} - T_0 \bar{s} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} x_i \quad (7.24)$$

Burada x_i içerdeki karışımındaki i'inci bileşenin mol kesridir ve $\dot{N}_{i,giriş}/\dot{N}$ ile ifade edilir.

Denklem (7.24)'ün sağ tarafı, karışım akışının \dot{N} 'sinin toplam molar akış ekserjisi \bar{e}_t ;

$$\bar{e}_t = \bar{h} - T_0 \bar{s} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} x_i \quad (7.25)$$

Buradan, her ünitenin esas toplam akış oranı için sınırlandırılmış ölü bölgeden şu sonuç çıkar;

$$\bar{e}_x = \bar{h} - \bar{h}^* - T_0 \left(\bar{s} - \bar{s}^* \right) \quad (7.26)$$

Burada, \bar{h}^* ve \bar{s}^* sırasıyla ölü bölgedeki toplam molar entalpi ve entropiyi ifade eder ve aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\bar{h}^* = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i^* x_i, \quad \bar{s}^* = \sum_{i=1}^n \bar{s}_i^* x_i \quad (7.27)$$

Denklem (7.24) ve (7.25)'den, toplam ya da termoekonomik ve kimyasal akış ekserjisinin toplamını buluruz.

$$\bar{e}_t = \bar{e}_x + \bar{e}_{ch} \quad (7.28)$$

Burada \bar{e}_{ch} , sınırlandırılmış ölü bölgeden ölü bölgeye kadar olan akış değişiminin molar akış ekserjisidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\bar{e}_{ch} = \sum_{i=1}^n (\mu_i^* - \mu_{0,i}) x_i \quad (7.29)$$

Sınırlandırılmış ölü hal için Euler denklemi;

$$\bar{u}^* = T_0 \bar{s}^* - P_0 \bar{v}^* + \sum_{i=1}^n \mu_i^* x_i \quad (7.30)$$

Sonuç olarak, $\left(\bar{h}^* - T_0 \bar{s}_i^* \right)$ için kısaltılmış olan sınırlı ölü hal kimyasal potansiyellerinin μ_i^* , (7.11) denklemindeki gibi aynı anlama sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Kimyasal akış ekserjisi \bar{e}_{ch} , denklem (7.14)'deki akış olmayan kimyasal ekserjinin molar kopyasına eşittir.

Buradan;

$$\bar{\xi}_{ch} = \frac{\bar{E}_{ch}}{N} = \bar{e}_{ch} \quad (7.31)$$

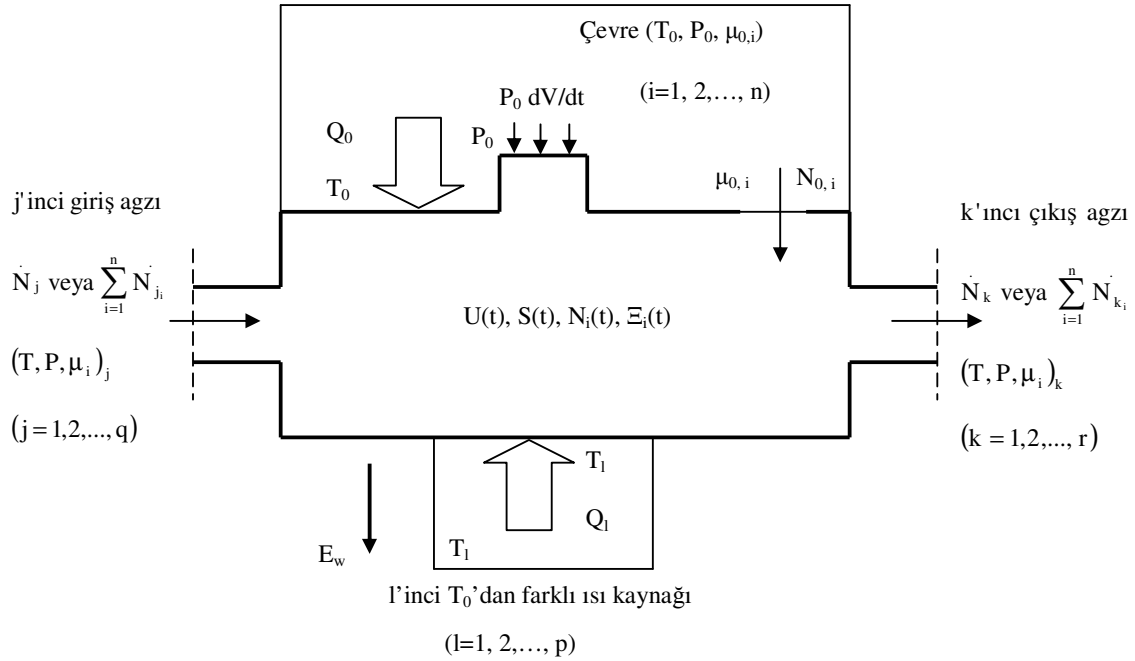
N şekil 3.3'deki akış olmayan sistemin başlangıç halindeki toplam mol sayısıdır.

7.3 Genelleştirilmiş Ekserji Analizleri

Bu bölümde bilinen ekserji analizleri genelleştirilecektir. Şekil 7.3' ün birinci ve ikinci yasa analizlerini ispat etmek zor değildir.

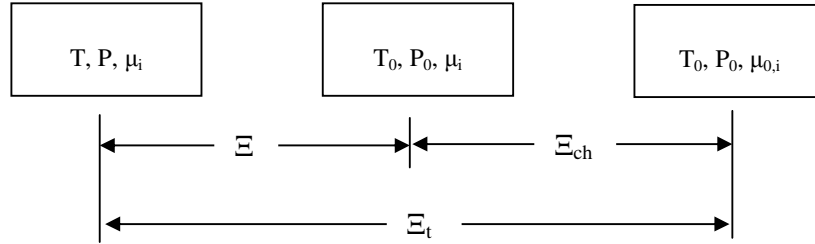
$$\dot{E}_w = -\frac{d\bar{E}_t}{dt} + \sum_{l=1}^p (\dot{E}_Q)_l + \sum_{j=1}^q (\dot{N} \bar{e}_t)_j - \sum_{k=1}^r (\dot{N} \bar{e}_t)_k - T_0 \dot{S}_{gen} \quad (7.32)$$

Her ısı transferi etkileşimiyle ilişkilendirilmiş ekserji bundan önce tanımlanmıştır. Akış olmayan durum ve akış sonuçları (7.13) ve (7.28)'de, sıraya göre yukarıda listelenen genel sonucun iki özel durumu olarak ortaya çıkar.

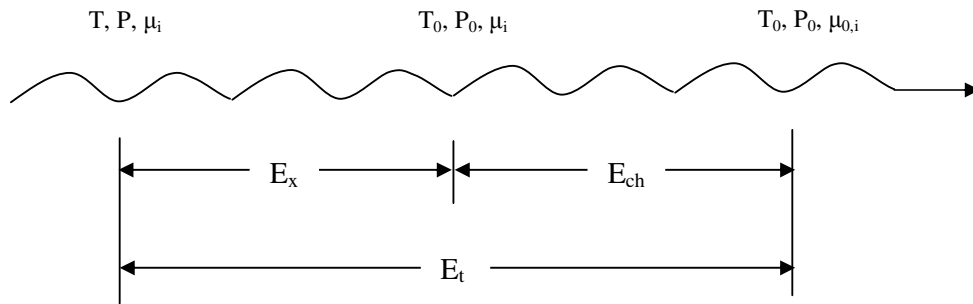


Şekil 7.3 Çevreyle ısı, iş ve kütle değişimi yapan genel açık sistem

Ekserji terminolojisinin akım çizgilendirilmesi ayrıca Lucca tarafından tartışılmıştır (Lucca, 1991). Lewins nemli hava için ölü hal durumlarında $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $P_0 = 1\text{bar}$ ve $\phi_0 = 1$ olarak önermiştir (Lewins, 1989).



Şekil 7.4 Akışsız toplam, kimyasal ve fiziksel ekserjiler arasındaki ilişki



Şekil 7.5 Akışlı toplam, fiziksel ve kimyasal ekserjiler arasındaki ilişki

Toplam, kimyasal ve fiziksel ekserjiler arasındaki bağlantı Şekil 7.4'de akış olmayan sistemler için, Şekil 7.5'de akış olan sistemler için örneklerle gösterilmiştir. Her iki grafikte de işaretlemenin eğer karışım içerisinde iki veya daha fazla bileşen bulunuyorsa, yani $n \geq 2$ ise doğru olduğuna dikkat edilmelidir. Tek bileşenli kütle durumunda sadece kimyasal potansiyel T ve P 'den bağımsız olarak değişmez.

7.4 Sıvı Haldeki Suyun Toplam Akış Ekserjisi

Su buharı içeren çöğü proseste bir veya daha fazla akıntı yoğuşmuş su taşır. tek bir bileşen madde olarak su için (7.23) eşitliğiyle (Wepfer vd., 1979);

$$\bar{e}_{t,w} = \bar{h}_w(T, P) - T_0 \bar{s}_w(T, P) - \mu_{0,w} \quad (7.33)$$

$$\mu_{0,w} = \bar{h}_0(T_0, P_{0,w}) - T_0 \bar{s}_0(T_0, P_{0,w}) \quad (7.34)$$

$P_{0,w}$ basıncı, suyun ortamdaki kısmi basıncıdır. Bundan dolayı;

$$P_{0,w} = x_{0,w} P_0 = \frac{w_0}{1 + w_0} P_0 \quad (7.35)$$

(7.33) ve (7.34) denklemlerini sadeleştirerek ve sonucu her birim kütle üzerine koyarak (örneğin, suyun her kilogramı için);

$$e_{t,w} = h_w(T, P) - h_0(T_0, P_{w,0}) - T_0 s_w(T, P) + T_0 s_0(T_0, P_{0,w}) \quad (7.36)$$

Burada;

$$h_w(T, P) \cong h_f(T) + [P - P_{sat}(T)] v_f(T) \quad (7.37)$$

$$h_0(T_0, P_{w,0}) \cong h_g(T_0) \quad (7.38)$$

$$s_w(T, P) \cong s_f(T) \quad (7.39)$$

$$s_0(T_0, P_{0,w}) \cong s_g(T_0) - R_v \ln \frac{P_{w,0}}{P_{sat}(T_0)} \quad (7.40)$$

Ayrıca $P_{w,0}/P_{sat}(T_0) = \phi_0$ olduğuna dikkat ederek, denklemler (7.36) ve (7.40) kendi aralarında türetilerek;

$$e_{t,w} \cong h_f(T) - h_g(T_0) - T_0 s_f(T) + T_0 s_{gf}(T_0) + [P - P_{sat}(T)] v_f(T) - R T_0 \ln \phi \quad (7.41)$$

İlk sırada gösterilen ürünler sıvı haldeki su akışı çevreyle ısı dengedeysen sıfır olmaktadır ($T=T_0$). İkinci sırada, ilk terim ikinci terimle karşılaştırıldığında genellikle ihmal edilir.

8.YANMA

Bir buhar kazanı, buhar üretebilmek için yeterli sıcaklık seviyesinde bir ısı kaynağına ihtiyaç gösterir. Bu amaçla genellikle buhar kazanlarının ocaklarında fosil yakıtların yakılması ile oluşan enerjiden yararlanır. Bu bölümde kömür, yakıt yağı veya doğal gaz gibi fosil yakacakların yanması üzerinde durulacaktır.

Yanma, yakıt içerisindeki yanabilir elemanların havanın oksijeni ile hızlı kimyasal birleşmeleri olayı şeklinde tarif edilebilir. Yakıt içerisindeki temel yanabilir elemanlar karbon, hidrojen ve bunların bileşikleridir. Yanma işleminde bu yanabilen elemanlar ve bileşikler karbondioksit ve su buharına dönüşürler. Yakıtların çoğunda az oranda kükürt bulunur. Her ne kadar kükürt yanabilen bir madde olarak yakıtın ısı değerine belirli ölçüde katkıda bulunsa da, bileşiklerinin korozyon karakteri dolayısı ile zararlıdır.

Kazanlarda, yanma için gerekli oksijenin kaynağı havadır. Hava; oksijen, azot ve az miktarda su buharı, karbondioksit, argon ve diğer elemanların karışımı olmakla beraber; yanma alanında hacimsel olarak % 21 oksijen, % 79 azot olarak kabul edilir.

İdeal durumda, yanma olayı, oksijen ve yakıt elemanlarının teoride istenen tam oranlarda (stokiyometrik oran) karıştırılması ile meydana gelir. Ancak bir buhar kazanını fazladan oksijen göndermeksizin teorik seviyede oksijenle istenilen biçimde çalıştırmak mümkün değildir. Pratikte iyi yanma şartlarına, atmosferden alınan fazla hava şeklinde, ocağa fazladan oksijen beslenmesi ile ulaşılır. Bu fazla havanın miktarı yakıtın ve yakma elemanlarının cinsine göre değişir.

İyi bir yanmanın amacı, yanmadaki verimsizlikler ve fazla hava sebebi ile olan kayıpları en aza indirerek yakacakta mevcut bütün ısı enerjisinin tamamının açığa çıkarılmasıdır. Yanabilen elemanlarla oksijenin birleşmesi, tutuşma için yeteri kadar yüksek sıcaklığa, çok iyi bir karışıma veya türbülansa ve yanmanın tamamlanması için yeterli bir zamana gerek gösterir. Bu üç faktör yani sıcaklık, türbülans ve zaman iyi bir yanmanın temel şartlarıdır.

8.1 Sıvı Yakıtlar

Buhar üretimi amacı ile en yaygın biçimde kullanılan sıvı yakıt, yakıt yağı (fuel oil)dir. Yakıt yağı petrolden hafif ürünlerin alınmasından sonra geri kalan sıvı artıklar olarak tanımlanır. Bu bölümde yakıt olarak sayısal uygulamadaki buhar kazanında fuel oil kullanıldığından yakıt yağları üzerinde durulacaktır.

Yakıt yağları terimi petrol ürünlerinin geniş aralığını kapsar. Bu terim gaz yağı gibi hafif petrol fraksiyonlarına uygulanabildiği gibi, ağır damıtım artığı ürünlere de uygulanmaktadır. TS 2177 standart olarak yakıt yağlarının sınıflandırılmasını düzenlemektedir. Çizelge 8.1'de ASTM tarafından hazırlanan çeşitli derecedeki yakıt yağlarının özellikleri, Çizelge 8.2'de ise bu yakıt yağlarının tipik analiz değerleri verilmiştir. Yakıt yağları bu tabloda görüldüğü gibi yoğunluklarına ve viskozitelerine göre 1 numaradan 6 numaraya kadar numaralandırılmışlardır. 1 numara en hafif 6 numara ise en ağır yakıt yağlarına karşı gelmektedir. Genellikle 5 ve 6 numaralı yakıtlara istenilen pompalama ve yanma özeliği kazandırılabilmesi için ısıtılmaları gereklidir.

Çizelge 8.1 Yakıt yağlarının sağlaması gereken değerler

Yakıt yağının numarası	Parlama Noktası (°C)		Su ve Çökelti (%)	Külün kütleli oranı (%)	Damıtma Sıcaklığı (°C)		38 (°C)'de Saybolt Ünersal Viskozitesi (s)		38 (°C)'de Kinematik Viskozite (C St)		Yoğunluk (15°C)'deki suya göre	Kükürt (%)
	Min	Mak			Min	Mak	Min	Mak	Min	Mak		
1	38	-18	0,05			288			1,4	2,2	0,8499	0,5
2	38	-6	0,05		282	338	32,6	37,9	2,0	3,6	0,8762	0,5
4	55	-6	0,50	0,10			45	125	5,8	26,4		
5	55		1,00	0,10			>125	300	>26,4	65		
5*	55		1,00	0,10			>300	900	>65	194		
6	60		2,00				>900	9000	>92	638		

Kaynak: Prof Dr. Kemal O., Prof Dr. Osman F.G., Prof Dr. Ahmet A., Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları Genişletilmiş 3. Baskı,1998, s.25, Tablo 3

Çizelge 8.2 Fuel-Oil (yakıt yağı) için karakteristik değerler

Numarası	No.1	No.2	No.4	No.5	No.6
Tip	Damıtılmış (Gaz Yağı)	Damıtılmış	Çok Hafif Artıklar	Hafif Artıklar	Artıklar
Renk	Açık	Amber	Siyah	Siyah	Siyah
API gravitesi (15°C)	40	32	21	17	12
Yoğunluk (15°C) (g/cm ³)	0,8251	0,8654	0,9279	0,9529	0,9861
Viskozite (38°C'de) C st (Santistok)	1,6	2,68	15,0	50,0	360,0
Viskozite (38°C'de) Saybolt Üniv.	31	35	77	232	
Akma Noktası (°C)	-18	-18	-12	0	18
Pompalama Sıcaklığı (°C)	Atmosferik	Atmosferik	-9	1	38
Atomizasyon Sıcaklığı (°C)	Atmosferik	Atmosferik	-4	54	93
Karbon Artıklar	Eser	Eser	2,5	5,0	12,0
Kükürt (%)	0,1	0,4-0,7	0,4-1,5	mak 2,0	mak 2,8
Oksijen ve Azot (%)	0,2	0,2	0,48	0,7	0,92
Hidrojen (%)	13,2	12,7	11,9	11,7	10,5
Karbon (%)	86,5	86,4	86,10	85,55	85,70
Su ve çökelti (%)	Eser	Eser	mak 0,5	mak 1,0	mak 2,0
Kül (%)	Eser	Eser	0,02	0,05	0,08
Isıl Değer (kJ/l)	38125	39240	40630	41185	41740

Kaynak: Prof Dr. Kemal O., Prof Dr. Osman F.G., Prof Dr. Ahmet A., Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları

Genişletilmiş 3. Baskı, 1998, s.306, Ek B1-4

Bazı yerlerde 1 ve 2 numaralı yağlara hafif ve orta ev yakıt yağları denilmektedir ve birbirlerinden esas olarak damıtım aralığı sıcaklığı ile ayrılırlar. 6 numaralı yakıt ise ağır endüstriyel yakıt yağı olarak isimlendirilir ve esas olarak viskozite değeri ile tanımlanır. Çizelge 8.1'de 4, 5 ve 6 numaralı yakıt yağlarının yoğunlukları belirtilmemiştir. Çünkü ham petrol kaynağına göre çok değişken değerler alabilmektedirler.

Taşıma ve özellikle yakma elemanları daha çok en yüksek yağ viskozitesine göre tasarlandığından kullanılacak yakıt yağlarının viskozite karakteristiklerini bilmek gerekmektedir. Yakıt yağlarının viskozitesi artan sıcaklıkla düşer. Ancak 120 °C sıcaklık değerinin üzerinde bu değişim çok yavaşlamaktadır. Yakıt yağları yakıcıda, iyi bir atomizasyon sağlamak için, ısıtılarak viskoziteleri düşürülür. Öte yandan yağ sıcaklığındaki değişimler sebebi ile brülör stabilizesinin bozulmaması için viskozitenin sıcaklık değişimlerinden etkilenmediği bölgede çalışmakta fayda vardır.

Parlama noktası yakıt yağının yüzeyine alev yaklaştırıldığında bir anlık parlamaya yetecek kadar buharın oluştuğu en düşük sıcaklık değeridir. Çeşitli yakıtlar için bu değer Çizelge 1'de verilmiştir.

Kükürt, yakıt yağlarında hiç istenmeyen bir elemandır, çünkü kömürde olduğu gibi yanma ürünleri asit karakterdedir ve çeşitli elemanlarda korozyona neden olurlar. Yakıt yağındaki yüksek orandaki hidrojen içeriği ve bunun sonucu yanma ürünlerindeki yüksek su buharı sebebi ile aynı miktarda bir kükürt içeriği sıvı yakıtlarda, kömüre göre çok daha fazla hasar yapma potansiyeline sahiptir.

Yakıt yağları ham petrolde orijinal olarak mevcut bütün katı yabancı maddeleri taşır. Eğer bu katı maddeler arasında fazla miktarda tuz bulunuyorsa, bu tuzlar kazanda önemli ölçüde korozyona ve dolayısı ile hasara neden olurlar.

8.2 Yanma Denklemleri

Yanma hesaplarında yanma reaksiyonu denklemlerinde teorik oksijen ihtiyacı esas alınır. Çizelge 3'de yanma denklemlerinin kısmi bir listesi verilmiştir. Bu denklemlerde ayrıca, ifade edilen reaksiyon sonunda açığa çıkan ısı enerjisi de belirtilmiştir.

Bu çalışmadaki bütün yanma hesapları Çizelge 8.3'de verilen temel kimyasal denklemlere dayandırılacaktır. Bu denklemler sadece reaksiyona hangi elemanların katıldığını göstermekle kalmaz aynı zamanda hangi moleküler oranlarda katıldıklarını da gösterir.

Çizelge 8.3 Yanma Denklemleri

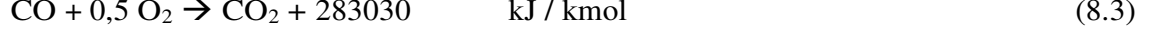
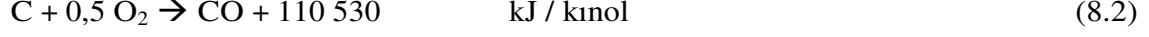
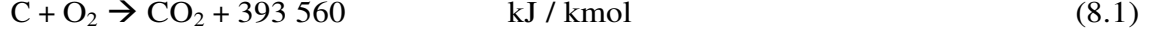
Yakıt	Mol. Küt.	Reaksiyon	Reaksiyon Isısı	
			kJ/kg	kJ/Nm ³
Karbon	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	32 796	-
Hidrojen	2	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	141 886	12 109
Kükürt	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	9 300	-
Metan	16	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	55 590	37 743
Etan	30	$C_2H_6 + 3,5 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 3 H_2O$	51 870	66 768
Propan	44	$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$	50 000	96 500
Bütan	58	$C_4H_{10} + 6,5 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 5 H_2O$	49 540	125 562
Karbonmonoksit	28	$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	10 108	11 990

Kaynak: Prof Dr. Kemal O., Prof Dr. Osman F.G., Prof Dr. Ahmet A., Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları Genişletilmiş 3. Baskı, 1998, s.29, Tablo 1

8.3 Yanma Isısı

Bir buhar kazanının ocağında yanabilen elemanların oksijenle birleşmesi sonucu açığa çıkan ısı enerjisi, sadece yanma sonucu oluşan son ürünlere bağlıdır. Yanma reaksiyonu sırasında oluşan ve sonuçta son ürünlere dönüşen ara ürünler, yanma ısısının miktarı açısından önemli değildir.

Bu kanun basitçe karbon ile oksijen arasındaki reaksiyonlarda gösterilebilir.



Eğer reaksiyon (8.1) bağıntısında olduğu gibi tek adımda meydana geliyorsa ortaya çıkan ısı 393560 kJ / kmol olup, bu değer reaksiyonun iki adımda olması, yani önce karbon ve yarım kmol oksijenin karbon monoksit oluşturması; sonra bu karbon monoksitin tekrar yarım kmol oksijenle birleşerek CO₂ meydana getirmesi, halindeki açığa çıkan toplam ısı enerjisine eşittir.

Bu örnekte görülen çok önemli bir husus da karbonun oksijenle iki biçimde reaksiyona girebilme ihtimalinin olmasıdır. Yakma elemanının tasarımı ve yakma yöntemi, yakıt-oksijen karışımındaki karbonun yanmasında son ürünün tamamen CO₂ olmasının gerçekleştirilmesini sağlamalıdır. Aksi takdirde yanma veriminde ve açığa çıkan ısıda önemli kayıplar meydana gelir. Görüldüğü gibi son ürünün CO₂ yerine CO olması halinde yaklaşık % 28 oranında daha az ısı üretilebilmektedir.

8.4 Yakıt Isıl Değerinin Ölçülmesi

Yakıt ısı değeri veya yanma ısı, buhar kazanları pratiğinde, 1 kg (veya 1 Nm³) yakıtın tam yanması sonucunda, üretilen ısı enerjisi olarak ifade edilir. Yakıtın ısı değeri yakıt cinsine bağlıdır ve yakıtın tam yakılması şartı ile yanma şekline göre değişmez.

Yakıt ısı değeri genellikle kalorimetrede yanma sırasında ortaya çıkan ısının doğrudan ölçülmesi ile belirlenir. Katı ve sıvı yakıtlar için çoğunlukla bomba kalorimetresi kullanılır ve yanma sabit hacim de meydana gelir. Gaz yakıt kalorimetreleri ise daha ziyade sürekli akış biçimindedir ve yanma sabit basınçta olur. Pratikte buhar kazanlarındaki yanma da sabit atmosferik basınçta meydana gelir. Ancak pratikte kullanılan yakıtlar için, sabit basınçta ve

sabit hacimdeki ısı değerleri arasındaki fark ihmal edilecek kadar küçük olduğundan, kalorimetre ile ölçülen ısı değerleri buhar kazanlarındaki yanmalar için de geçerli sayılabilir.

8.5 Alt ve Üst Isıl Değerler

Hidrojen ve nem içeren bütün yakıtlarda yanma ürünleri içinde su buharı bulunur. Yakıtın ısı değeri bu su buharının buhar fazında mı, yoksa yoğunlaşmış olarak sıvı fazında mı bulunduğuyla ilgili olarak değişir. Kalorimetre deneylerinde yanma ürünleri başlangıç sıcaklığına kadar soğutulduğundan bütün su buharı yoğunlaşmış haldedir. Bu durumda suyun gizli buharlaşma ısısını da içeren yakıtın üst ısı değeri ölçülmüş olur. Halbuki buhar kazanlarında olduğu gibi bütün yanma ürünleri gaz fazında ise alt ısı değeri söz konusudur ve bu değer, üst ısı değerinden, mevcut su buharının gizli buharlaşma ısısı kadar düşük olacaktır. Yanma ürünlerinin tamamının gaz fazında olması halinde tarif edilen bu ısı değeri ile üst ısı değeri arasında,

$$H_u = H_o - 2440 w_r \quad (8.4)$$

şeklinde bir bağıntı vardır (Onat vd, 1998). Burada H_u (kJ/kg) alt ısı değeri, H_o (kJ/kg) Üst ısı değeri ve w_r (kg/kg) 1 kg yakıttan oluşan toplam su buharı miktarıdır. 2440 değeri ise suyun 25 °C sıcaklıktaki gizli buharlaşma ısısıdır.

8.6 Yakıtın Elemansal Analizine Göre Isıl Değer Hesabı

Yakıtın elemansal analizi biliniyorsa ısı değeri kolaylıkla hesaplanabilir. Katı veya sıvı yakıt analizi,

$$C + H + O + S + N + W + A = 1 \text{ kg}$$

şeklinde verildiğine göre Çizelge 8.3'deki yanma denklemlerinden yanabilen elemanlar olarak karbon, hidrojen ve kükürt göz önüne alınırsa,

$$H_o = 32796C + 141886 (H - O/8) + 9300 S \quad (\text{kJ/kg}) \quad (8.5)$$

Yazılabilir. Bu ifadedeki $O/8$ terimi, yakıt içerisindeki oksijenin hidrojenle daha önce H_2O olarak birleşik halde bulunduğu kabulünden gelir. Yakıtın kendi oksijeni ile bağlı bulunan bu hidrojen miktarı, yakıtın toplam hidrojen içeriğinden çıkarılarak reaksiyona girebilecek serbest hidrojen miktarı bulunur. Alt ısı değeri ise,

$$H_u = H_o - 2440 (W + 9H) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (8.6)$$

şeklinde hesaplanır (Onat vd, 1998).

8.7 Yanma Ürünleri Miktarlarının Bulunması

Yanma ürünleri de Çizelge 8.3' de verilen yanma denklemleri ve yakacağın elemansal analizi ile bulunabilir. Katı ve sıvı yakacaklar için teorik tam yanma halinde yanma ürünleri içindeki gaz bileşenleri CO_2 , SO_2 , H_2O ve N_2 olacaktır. Yakacağın elemansal analizi bilindiğine göre yanma ürünleri hacimleri:

$$v_{CO_2} = \frac{22,4}{12} C \quad (8.7)$$

$$v_{SO_2} = \frac{22,4}{32} S \quad (8.8)$$

$$v_{H_2O} = \frac{22,4}{2} H + \frac{22,4}{18} W \quad (8.9)$$

$$v_{N_2} = 0,79 v_{H_2O} + \frac{22,4}{28} N \quad (8.10)$$

Yukandaki bağıntılarda v değerleri 1 kg yakacağın yakılması sonucunda ortaya çıkan gaz hacimlerini Nm^3 cinsinden ifade eden özgül gaz miktarlarıdır. İndisler özgül gaz miktarlarının ait oldukları gazları göstermektedir.

Buhar kazanından çıkan duman miktarının hesaplanabilmesi için bir yaklaşım Onat vd, (1998) tarafından verilmektedir. Aşağıda çeşitli ocak tipleri için buhar kapasitesine göre yaklaşık duman miktarları verilmiştir (Çizelge8.4).

Çizelge 8.4 Çeşitli ocak tipleri için buhar kapasitesine göre duman miktarları

Ocak Tipi	Yaklaşık (duman / buhar) kütlesel oranları
Sıvı veya gaz yakıt ocakları	1,15
Toz kömür ocakları	1,25
Stokerli ocaklar	1,50

Kaynak: Prof Dr. Kemal O., Prof Dr. Osman F.G., Prof Dr. Ahmet A., Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları Genişletilmiş 3. Baskı,1998, s.218

Sayısal uygulamadaki buhar kazanından yanma sonucu çıkan dumanın debisi sıvı veya gaz yakıt ocakları için Çizelge 8.4'te verilen 1,15 katsayısının, buhar kazanından çıkan buhar debisiyle çarpılmasından elde edilmiştir.

8.8 Yakacak Miktarının Bulunması

Isıl verimi bilinen bir kazanın yakacak debisi şu şekilde hesaplanır:

$$B = \frac{m_b(h_s - h_{bs})}{H_u \eta} \quad (8.11)$$

Burada B yakacak debisidir m_b buhar debisi, h_s ve h_{bs} ise buhar entalpisi ve besi suyu entalpisini göstermektedir.

9. TERMOEKONOMİK ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ

Termoekonomik çözümlene yöntemi iki adımda gerçekleşir. Bu adımlar, ekserji analiz ve exergoekonomik analizdir. Birinci adımda termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılır. Kullanılan bu yasalarla ele alınan sistemde, tersinmezlikler nedeniyle kaybolan ekserji miktarları ve yerleri belirlenir. Ekserji bir sistemin çevre haline gelirken yapabileceği en fazla yararlı iştir [1]. Enerjinin tersine ekserji korunmaz. Ekserjinin verim kaybının gerçek ölçüsü proste kaybolan ekserji miktarı ve yeridir. Bu bölümde ilk olarak ekserji analizi yapılırken ve devamında da ekonomik analizde yararlanılacak terimler ve formüller açıklanmıştır.

9.1 Ekserji Analizi

Bu kısımda, 7. bölümde bahsedilen ve genel haliyle tanımları çıkarılıp denklemleri verilen ekserji analizinde faydalanılacak tanım ve denklemlerden bahsedilmiştir.

Nükleer, manyetik, elektriksel ve yüzey gerilme etkilerinin yokluğunda bir sistemin toplam ekserjisi E dört ayrı bileşene bölünebilir: fiziksel ekserji E^{PH} , kinetik ekserji E^{KN} , potansiyel ekserji E^{PT} ve kimyasal ekserji E^{CH} .

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + E^{CH} \quad (9.1)$$

Fiziksel, kimyasal ve potansiyel ekserjinin toplamının literatürde termoekonomik ekserji olarak bahsedildiği bölüm 7.1'de anlatılmış ve genel ifadeleriyle ispatları yapılmıştır.

Ekserji yaygın bir özellik olmasına rağmen özgül ekserji ile çalışmak daha faydalı olmaktadır. Özgül ekserji aşağıdaki biçimde tanımlanır (Bejan vd, 1996).

$$e = e^{PH} + e^{KN} + e^{PT} + e^{CH} \quad (9.2)$$

Bir sistemin basıncı, sıcaklığı, hızı veya seviyesi çevreden farklı olduğu zaman işin ortaya çıkması için iyi bir fırsat vardır. Sistem çevre koşullarına doğru değişirken bu fırsat azalır, ikisi dengeye gelirken bu imkan biter. Sistemin bu hali ölü hal olarak adlandırılır. Sistem ve

çevre ile başka çeşit denge tanımlanabilir. Bu, sadece mekanik ve ısı denge sağlandığı dengenin sınırlı biçimidir. Sistemin bu hali sınırlı ölü hal olarak adlandırılır.

Çevreye göre göreceli ve dinlenme halinde olan bir sistem göz önüne alındığında ($e^{KN} = e^{PT} = 0$), fiziksel ekserji sistem başlangıç halinden (sıcaklık: T basınç: p) sınırlı hale geçerken çıkarılabilen maksimum teorik kullanılabilir iştir. Kimyasal ekserji ise çevreyle tamamıyla dengede olan sistemin sınırlı ölü halden ölü hale geçerken çıkarılabilen maksimum teorik kullanılabilir iştir.

9.1.1 Fiziksel Ekserji

Burada sistemde dolaşan sıvı haldeki su ve su buharı için hesap yöntemi gösterilmiş olup sıvı likoriş ve şurup için hesap yöntemi Bölüm 11.2’de gösterilmektedir.

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (9.3)$$

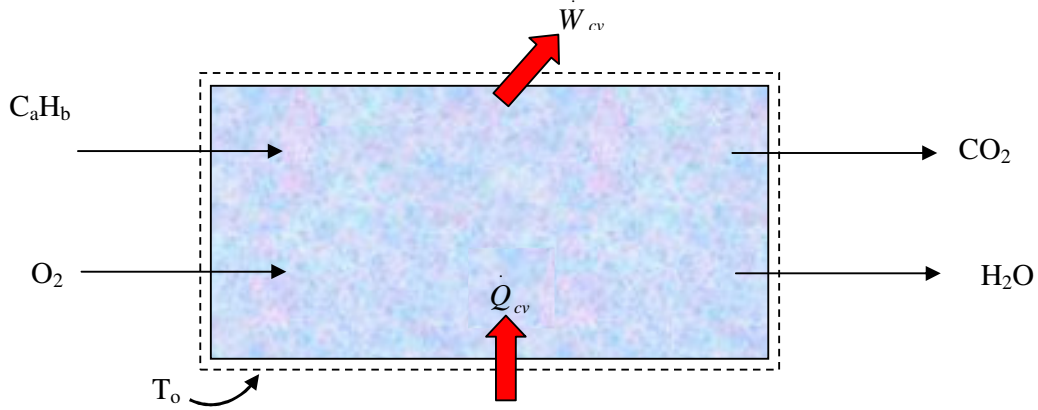
Birim kütle için,

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (9.4)$$

9.1.2 Kimyasal Ekserji

Sayısal örnekte kullanılan buhar kazanından görüleceği üzere sistemde sadece fuel oil yakmaktan kaynaklanan bir kimyasal ekserji mevcuttur. Bundan dolayı bu bölümde gazlar ve gaz karışımlarından ziyade sadece yakıtların standart kimyasal ekserjisi üzerine yoğunlaşmıştır.

Saf hidrokarbon yakıt olan C_aH_b ’nin T_0 , p_0 şartlarında Şekil 9.1’de gösterilen sisteme girdiği varsayalım. Bu sistemde yakıt oksijen ile reaksiyona girmekte ve karbondioksit ve suya dönüşmektedir. Bütün maddelerin girdiği ve karışmamış olarak T_0 , p_0 şartlarında çıktığı ve ısı transferinin sadece T_0 sıcaklığında gerçekleştiği varsayılmıştır.



Şekil 9.1 Hidrokarbon yakıt olan C_aH_b ' nin ekserjisini değerlendiren bir aygıt

Tersinmezliğin olmadığını varsayarak, sistemin ekserji dengesi için aşağıdaki ifade yazılabilir (Bejan vd., 1996):

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \frac{\dot{Q}_j}{\eta_f} - \left(\frac{\dot{W}_{cv}}{\eta_f}\right)_{int rev} + \bar{e}_F^{CH} + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{e}_{O_2}^{CH} - a \bar{e}_{CO_2}^{CH} - \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH} - \dot{E}_D \quad (9.5)$$

Burada, alt yazı olarak gösterilen F yakıtı göstermektedir. Böylece yakıtın kimyasal ekserjisi:

$$\bar{e}_F^{CH} = \left(\frac{\dot{W}_{cv}}{\eta_f}\right)_{int rev} - \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{e}_{O_2}^{CH} + a \bar{e}_{CO_2}^{CH} + \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH} \quad (9.6)$$

bu denklemin ilk terimi için,

$$\left(\frac{\dot{W}_{cv}}{\eta_f}\right)_{int rev} = -\bar{h}_{RP}(T, p) - T \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{1}{4}b\right) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} - \frac{1}{2}b \bar{s}_{H_2O} \right] (T, p) \quad (9.7)$$

(9.8) ve (9.9) denklemlerinin yardımı ve $-\bar{h}_{RP}(T, p)$ teriminin üst ısı değer olarak tanımlanmasıyla aşağıdaki bağıntı elde edilir (Bejan vd, 1996):

$$\begin{aligned} \bar{e}_F^{CH} = & HHV(T_0, p_0) - T_0 \left[\bar{s}_F + \left(a + \frac{1}{4}b\right) \bar{s}_{O_2} - a \bar{s}_{CO_2} - \frac{1}{2}b \bar{s}_{H_2O} \right] (T_0, p_0) \\ & + \left[a \bar{e}_{CO_2}^{CH} + \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH} - \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{e}_{O_2}^{CH} \right] \end{aligned} \quad (9.8)$$

9.2 Ekonomik Analiz

Termoekonomik analizin ikinci kısmı, ilk kısmı olan ekserji analizinin kullanılmasıyla sistemin ekonomik incelemesinin yapılmasıdır. İlk bölümde ekserji analizinin nasıl yapılacağı anlatılmıştı. Bu bölümde ekonomik analiz yaparken kullanılması gereken tanımlar ve formüller açıklanmıştır.

Parasal giderler için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir (Bejan vd., 1996).

Bir değere getirilmiş düzeltme faktörü k ;

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}} \quad (9.9)$$

Anapara geri kazanım faktörü CRF ;

$$CRF = \frac{i_{eff} (1 + i_{eff})^n}{(1 + i_{eff})^n - 1} \quad (9.10)$$

Eskalasyon düzeltme faktörü $CELF$;

$$CELF = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} CRF \quad (9.11)$$

Bir değere getirilme faktörü M ;

$$M = \frac{CELF}{1 + r_i} \quad (9.12)$$

Bir değere getirilmiş parasal gider Z ;

$$Z = (Z_{yat} + Z_{i\dot{s}})M \quad (9.13)$$

Çevresiyle ısı, iş veya madde alışverişinde bulunan sistemlerde yok edilen ekserji verim kaybına yol açar. Bu kaybın parasal olarak ne kadar olacağını bulmalıyız.

Ekserji akısının fiyatı C , birim ekserji fiyatı ile ekserji akısının çarpımıdır.

$$C = c \times E = c \times m \times e \quad (9.14)$$

Herhangi bir komponent için maliyet denge denklemi;

$$\sum C_{\dot{c}ıktı} + C_w = C_q + \sum C_{giriş} + Z_{giriş} \quad (9.15)$$

yazılabilir (Bejan vd., 1996).

Sistemin herhangi bir elemanı için birim zamanda yok edilen ekserji miktarı E_k ;

$$E_k = E_{giriş} - E_{\dot{c}ıktı} \quad (9.16)$$

$$E_k = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q - W + \sum_{giriş} m_{giriş} e_{giriş} - \sum_{\dot{c}ıktı} m_{\dot{c}ıktı} e_{\dot{c}ıktı} \quad (9.17)$$

Ayrıca E_k ;

$$E_k = E_D + E_L \quad (9.18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada E_L sıcaklık kaybı olan elemandaki kayıp ekserji akısını, E_D tersinmezlikler nedeniyle tüketilen ve başka hiçbir yerde kullanılmayan tahrip olan ekserjiyi ifade eder. E_D üniteye giren ekserjinin çıkan ekserjiye olan farkıdır. E_L ise üniteadaki kütleli debinin ekserji akısıyla çarpımıdır.

$$E_D = E_{giriş} - E_{\dot{c}ıktı} \quad (9.19)$$

$$E_L = m \times e \quad (9.20)$$

Tahrip olan ve kayıp ekserji akısının fiyatları sırasıyla C_D ve C_L ;

$$C_D = c_D \times E_D \quad (9.21)$$

$$C_L = c_L \times E_L \quad (9.22)$$

şeklinde ifade edilir. Burada c_D tahrip olan ekserjinin birim ekserji fiyatını, c_L ise kayıp ekserjinin birim ekserji fiyatını ifade eder.

Tahrip olan ekserji (E_D) genellikle sistemin bütün ünitelerinde bulunur. Diğer tarafta, kayıp ekserji (E_L) sadece sıcaklığın değiştiği ünitelerde bulunur. Tahrip olan ekserjinin oranı y_D ve kayıp ekserji oranı y_L bu değerler yardımıyla hesaplanır.

$$y_D = \frac{E_D}{E_k} \quad (9.23)$$

$$y_L = \frac{E_L}{E_k} \quad (9.24)$$

Parasal giderler iki grup altında toplanabilir. Birincisi, ekserji harici (yatırım, işletme, bakım onarım) masrafları, ikincisi ise yok edilen ekserjinin parasal gideridir. Bir üniteyi değerlendirirken bunlardan hangisinin daha ağırlıklı olduğunu bilmek, o ünitenin iyileştirilebilmesi için nereye odaklanılması gerektiğini gösterir. Bu değerlendirme kriteri termoekonomik (exergoekonomik) faktördür. f ile gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır (Bejan vd., 1996);

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)} \quad (9.25)$$

Termoekonomik faktörün nispeten büyük değerleri, ele alınan ünitenin parasal giderlerinin ağırlıklı olarak yatırım, işletme masraflarından kaynaklandığını gösterir. Ünitenin veriminin yükseltilmeye çalışılması pek de gerçekçi olmayacaktır. Küçük f değerleri ise bunun tersini gösterir. Yatırım ve işletme masraflarını arttırmak pahasına da olsa yüksek verimli ekipmanlar seçilmelidir.

10. LİKORİŞ ŞEKERİ ÜRETİM TESİSİ

Daha önceki bölümlerde 11. bölümde verilen sayısal uygulamada kullanılacak tanımlar ve denklemler çıkarılmıştı. Bütün bu tanımların ve denklemlerin amacı bu bölümde bahsedilecek likoriş üretim tesisinin termoekonomik analizini yapabilmek amacını taşımaktadır.

10.1 Likoriş

Günümüzde likoriş özellikle Avrupa ülkeleri tarafından üretilen ve ülkemizde de yeni üretimine başlanan bir şeker türüdür. Likorişin şeker olarak bilinmesine karşın gerçekte bezelye ailesine üye olan bir bitkidir (Şekil 10.1).



Şekil 10.1 Likoriş bitkisi

Likoriş daha sonraları ilaçların ham maddelerini oluşturmuş ayrıca üretilen bazı şeker türlerinin esansı olarak kullanılmaya başlanmıştır. 200 yılı aşkın süredir üretimi yapılan likoriş şekeri belirli şekillerde üretildiğinden (Şekil 10.2) söz konusu şekillerde üretilen ama likoriş ham maddesini ihtiva etmeyen diğer şeker türlerine de adını vermiştir. Günümüzde Avrupa başta olmak üzere likoriş adı altında çok çeşitli şekerler üretilmektedir. Aynen bu çalışmada da likoriş kelimesi, üretilen likoriş şekerini tanımlayacaktır.



Şekil 10.2 Çeşitli likoriş şekerleri

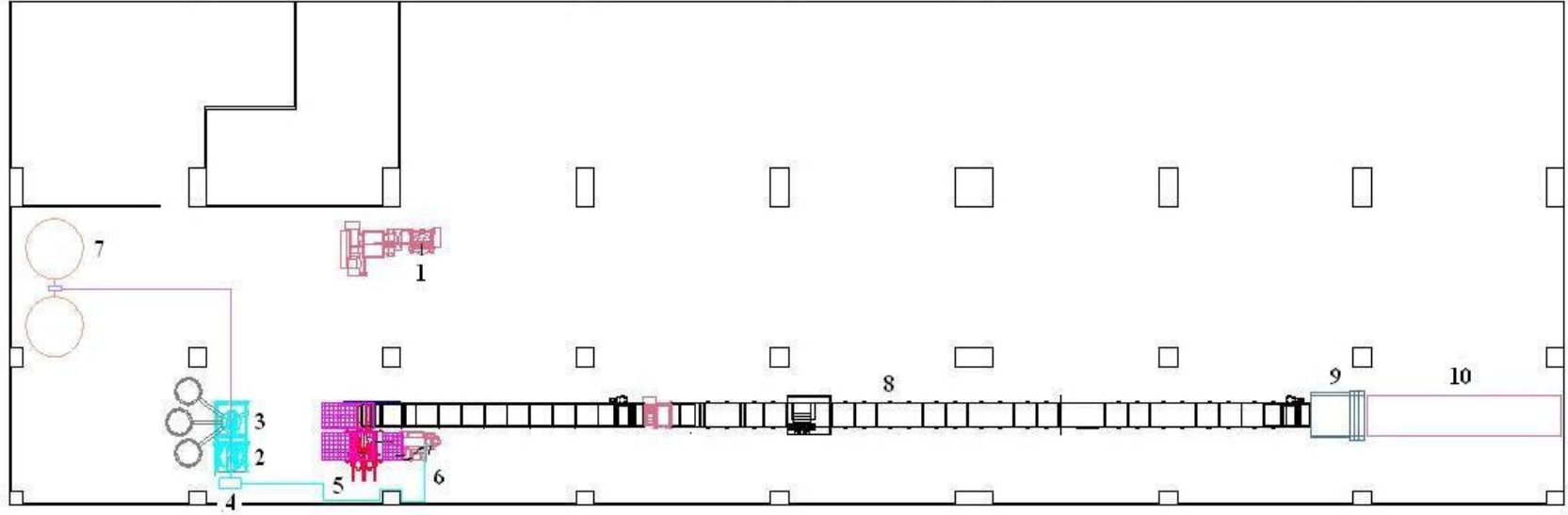
10.2 Üretim Prosesi

Dünya genelinde özellikle Avrupa ve Amerika kökenli belli başlı likoriş üretim tesisi tasarlayan ve tedarik eden firmalar vardır.

Bu firmaların dizaynları doğal olarak farklılık göstermesine karşılık prensipleri aynıdır. Bu bölümde bu prensip ve sistemin akışının nasıl sağlandığı vurgulanarak ana cihazlar hakkında bilgi verilecektir.

Ana prensip likoriş ürününü oluşturan hammaddelerin belirli sıcaklık ve sürelerde karıştırılması sonucunda, pompalar vasıtasıyla bu karışımın pişiriciye iletilip yüksek basınçta (5-6 bar) yüksek sıcaklıklara (125-135°C) pişirilip ekstruderlere iletilmesi ve buradan da ürünün soğutulmak üzere taşıyıcı bantların üzerlerine aktarılmasıdır. Sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için likoriş üretimi yapan bir işletmenin planı aşağıda gösterilmiştir (Şekil 10.3).

Şekil 10.3'te bulunan karıştırma tankının (3) içerisinde likorişin hammaddesini oluşturan su, glikoz, nişasta, şeker vb. eklentiler karıştırılır ve cidarlarında dolaşan sıcak su vasıtasıyla sıcaklığı belli bir seviyeye getirildikten sonra bu karışım sisteme gönderilmek için bekletme tankına (2) aktarılır. Bekletme tankının cidarlarında da hazırlanan karışımın soğumaması için yüksek sıcaklıkta su bulunmaktadır. Likoriş, bekletme tankından bir transfer pompası (4) yardımıyla yüksek sıcaklıkta pişirilmesi için cidarlarında buhar dolaşan pişiricinin içerisinden geçer. Yüksek sıcaklık ve basınçtan dolayı katılaşmış olan likoriş homojen ve pürüzsüz bir yapı elde edilmesi için ekstruderlere (5) iletilir. Ekstruderlerin içerisindeki bodinoz vida sistemiyle sıkıştırılıp ötelenmesiyle likoriş pürüzsüz ve homojen bir yapı alır ve istenilen şekiller çıkış ağızlarında verilerek transfer konveyörüne (8) aktarılırlar. Bu konveyörler üzerinde soğuyarak yol alan likoriş en sonunda giyotin makinasına gelir ve istenilen uzunlukta kesilerek paketleme makinesine gitmesi için başka bir konveyörün üzerine dökülürler. Bu arada istenilen farklı ürün türleri için (1) numarayla gösterilen şurup hazırlama tankında eklentiler eklenerek ve sıcaklığı cidarlarında dolaşan sıcak su yardımıyla artırılarak imal edilen şurup da likoriş üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 10.3 Bir likoriş üretim sistemi prosesi

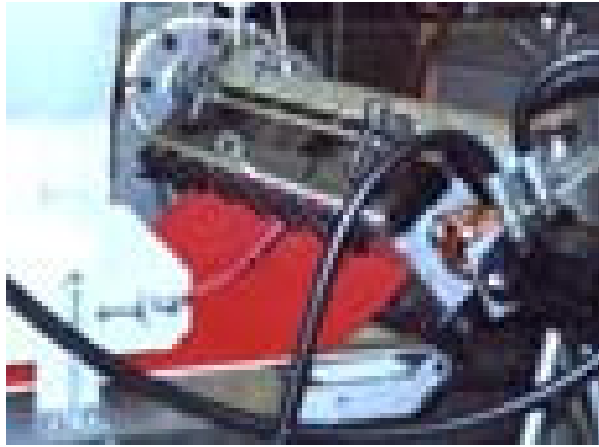
- | | |
|--------------------------|-----------------|
| 1. Şurup hazırlama tankı | 6. Pişirici |
| 2. Bekletme tankı | 7. Glikoz tankı |
| 3. Karıştırma tankı | 8. Konveyör |
| 4. Transfer pompası | 9. Giyotin |
| 5. Ekstruder | 10. Konveyör |



Şekil 10.4 Karıştırma tankının görünümü



Şekil 10.5 Pişirici ve ekstruderin görünümleri



Şekil 10.6 Ekstruderin çıkış ağızlarından likoriş ürününün taşıyıcı bantlara döküldüğü an

11. BİR LİKORİŞ ÜRETİM TESİSİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Geçmiş bölümlerde anlatılan bütün konular bu çalışmada sözü geçen üretim tesisinin termoeconomik analizi için yapılmıştır. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasından gelen bağıntılar ile kullanılabilir enerjinin tanımlanmasıyla elde edilen bağıntılar ışığında 7. bölümde ekserji analizleri yapılmıştır. 9. bölümde ise 7. bölümde çıkarılan denklemler sonucunda bu çalışmada yararlanılacak formüller çıkarılmış ayrıca ekonomik analiz için gerekli bağıntılar verilmiştir. 8. bölümde ise bu sayısal uygulamada bulunan buhar kazanında meydana gelen yanma reaksiyonlarının incelenmesi ve kullanılabilir ekserjinin çıkarılabilmesi için gerekli bağıntılar ve tanımlamalar verilmiştir. Bütün bu verilerin ışığında termoeconomik analize geçilecektir.

11.1 Prosesin Akış Şeması

Sayısal uygulamaya geçmeden önce 10. bölümde anlatılan üretim prosesinin anlaşılabilmesi için akış şeması Şekil 11.1’de verilmiştir. Sistemin işleyiş prensibi 10. bölümde anlatıldığı için burada üzerinde durulacak nokta sistemin işleyişi için gerekli cihazların içerdiği maddeler ve fiziksel özellikleridir.

Şekil 11.1’ den görüleceği üzere sistemde sıcak akışkan olarak su buharı ve su bulunmaktadır ve bu akışkanların amaçları boyler, ısı değiştirgeci ve tanklardaki akışkanları istenilen sıcaklıklara getirmektir. Su buharının üretilmesi için skoç tipi buhar kazanı bulunmaktadır. Üretilen buharla boylerden geçen ürün suyunun, ısı değiştirgecinden geçen ve kazanların cidarında dolaşarak sıvı likorişi ısıtmaya yarayan şebeke suyunun ve pişiriciye gelen yüksek basınçtaki sıvı likorişin ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır.

Akış şemasında cihazlara giren ve çıkan her akışkanın noktaları Şekil 11.1’de gösterilmiştir. Bu noktalardan buhar ve sıvı haldeki suyu içeren noktaların fiziksel özellikleri bir sonraki kısımda likoriş ve şurup için kabullerin ve özelliklerin belirtilmesini takiben buhar kazanı için yakacak miktarının bulunmasından sonra Çizelge 11.3’de tablo halinde sunulmuştur.

11.2 Likoriş ve Şurup İçin Bazı Kabuller ve Özellikler:

Sistemde dolaşan sıvı ve buhar halindeki suyun fiziksel özelliklerine göre entalpi ve entropi gibi değerleri, birçok termodinamik kitabının arkasındaki özellik tablolarından kolayca alınabilmektedir. Özellikle maddelere ait entropi değerlerinin bilinebilmesi için entropi bağıntılarının kullanılması gerekmektedir. Bu bağıntıların kullanılabilmesi, madde için T ile dU ve dh arasındaki özellik bağıntılarının bilinmesine bağlıdır. Saf maddeler için bile bu bağıntılar çok karmaşıktır ve entropi değişimlerinin bu yolla hesaplanması çok zordur. Bu nedenle s değerleri ölçülebilen özellik değerlerinden yola çıkılarak oldukça uzun hesaplardan sonra belirlenir. Elimizde sistemde üretilen şurup ve likoriş için ölçülmüş ve hesaplanmış entropi değerleri olmadığından dolayı özellikle likoriş ve şurup içeren noktalarda farklı bir hesap yöntemi kullanma ihtiyacını doğurmuştur.

Bu hesap yönteminde de diğer fiziksel ekserji hesaplarında kullanılan (9.4) denklemine bağlı kalınacaktır. Yalnız buradaki entalpi (h) ve entropi (s) değerleri ayrı ayrı yerine konmayacak, bu ifadeler yerine Bölüm 3.5'te gösterilen iç enerji farkı denklemi (3.22) yardımıyla katı ve sıvılarda entalpi farkı denklemi olan (3.23) ve Bölüm (5.3.2)'de gösterilen sıvı ve katıların entropi değişimlerini veren (5.13) denklemlerinden faydalanılacaktır. Bölüm 11.2'de yapılan ekserji analizinde 23 noktasından itibaren likoriş ve şurup maddeleri için bu hesap yöntemine gidilmiştir.

(3.23) denklemini tekrar ele alalım:

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P$$

Buradaki Δu iç enerji farkını, (3.22) denklemi verir. Bu denklem yardımıyla aşağıdaki eşitliğe ulaşabiliriz:

$$\Delta h = C_{ort}(T_2 - T_1) + v\Delta P \quad (11.1)$$

Bu ifadedeki C_{ort} değerleri deneysel olarak ölçülmüş olup Çizelge 11.1'de verilmiştir.

Çizelge 11.1 Likoriş ve şurubun ortalama özgül ısıları

	Likoriş	Şurup
C_{ort} (kJ/kgK)	2,51	3,8

Ayrıca deneysel olarak beher kaplarında ölçülmüş olan likoriş ve şurubun özkütleleri ve buna bağlı olarak (11.1) denkleminde kullanılacak özgül hacimleri Çizelge 11.2’de verilmiştir.

Çizelge 11.2 Likoriş ve şurubun özkütlesi ve özgül hacimleri

	Likoriş	Şurup
Özkütle ρ (kg/m ³)	1410	1120
Özgül hacim v (m ³ /kg)	0,0007092	0,000893

Daha önce de belirtildiği gibi Çizelge 11.3’de akış şemasında bulunan noktalardan sadece sıvı ya da buhar halindeki suyu içeren noktaların özellikleri verilecektir. Bu özelliklerden entalpi ve entropi, su için ekserji analizi yapılırken denklem (9.4)’te yerlerine konacaktır. Likoriş ve şurup için entalpi ve entropi değerleri mevcut olmadığından Çizelge 11.4’de bu maddeleri içeren noktaların Çizelge 11.3’den farklı olarak entropi ve entalpi hariç diğer özellikleri verilmiştir ve ekserji analizi bu değerlerin (11.1) dekleminde yerine konmasıyla yapılacaktır.

11.3 Buhar Kazanı İçin Yakıt Miktarının Hesaplanması

Buhar kazanı için yakacak miktarı (8.11) denklemi yardımıyla hesaplanır. Giren besi suyunun ve çıkan buharın fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$h_b = 2769,10 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{bs} = 376,92 \text{ kJ / kg}$$

$$\dot{m}_b = 600 \text{ kg / s}$$

$$\eta = \%86$$

$$\rho = 0,9861 \text{ kg / l}$$

$$Hu = 41740 \text{ kJ / l} = \frac{41740}{0,9861} \text{ kJ / kg} = 42328,36 \text{ kJ / kg}$$

Bu değerler (8.11) denkleminde yerine konursa yakacak debisi bulunur:

$$\dot{m}_y = \frac{600(2769,10 - 376,92)}{42328,36 \times 0,86} = 39,43 \text{ kJ / kg}$$

Akış şemasındaki noktaların fiziksel değerleri Çizelge 11.3 ve 11.4’te verilmiştir.

Çizelge 11.3 Akış şemasındaki su içeren noktaların fiziksel özellikleri

No:	Sıcaklık °C	Sıcaklık(K)	Entalpi(kj/kg)	Entropi(kj/kgK)	Basınç(Bar)	m(kg/s)	Madde
1	170,43	443,43	2769,10	6,66	8,00	0,17	Doymuş Buhar
2	133,55	406,55	2725,30	6,99	3,00	0,03	Doymuş Buhar
3	95,00	368,00	397,96	1,25	3,00	0,03	Su
4	151,86	424,86	2748,70	6,82	5,00	0,01	Doymuş Buhar
5	125,00	398,00	524,99	1,58	5,00	0,01	Doymuş Buhar
6	164,97	437,97	2760,30	6,73	6,50	0,13	Doymuş Buhar
7	115,00	388,00	482,48	1,47	6,50	0,13	Su
8	95,00	368,00	397,96	1,25	1,01	0,17	Su
9	90,00	363,00	376,92	1,19	1,50	0,17	Su
10	90,00	363,00	376,92	1,19	8,00	0,17	Su
11	90,00	363,00	376,92	1,19	4,00	0,36	Su
12	90,00	363,00	376,92	1,19	4,00	0,27	Su
13	70,00	343,00	292,98	0,95	4,00	0,27	Su
14	90,00	363,00	376,92	1,19	4,00	0,05	Su
15	70,00	343,00	292,98	0,95	4,00	0,05	Su
16	90,00	363,00	376,92	1,19	4,00	0,04	Su
17	70,00	343,00	292,98	0,95	4,00	0,04	Su
18	70,00	343,00	292,98	0,95	3,50	0,36	Su
19	70,00	343,00	292,98	0,95	4,00	0,36	Su
20	10,00	283,00	42,01	0,15	1,20	0,28	Su
21	10,00	283,00	42,01	0,15	3,25	0,28	Su
22	65,00	338,00	272,06	0,89	1,01	0,28	Su

Çizelge 11.4 Akış şemasındaki likoriş ve şurup içeren noktaların fiziksel özellikleri

No:	Sıcaklık(K)	Basınç(Bar)	m(kg/h)	Madde
23	328,00	1,01	1300,00	Likoriş
24	353,00	1,15	1300,00	Likoriş
25	353,00	1,01	1300,00	Likoriş
26	358,00	1,20	1300,00	Likoriş
27	333,00	1,01	150,00	Şurup
28	353,00	1,10	150,00	Şurup
29	358,00	8,00	2593,00	Likoriş
30	400,00	5,00	2593,00	Likoriş

11.4 Ekserji Analizi

Bu bölümde daha önce verilmiş olan yöntemlere göre, her noktanın ekserjisi hesaplanacaktır. Sadece buhar kazanında kimyasal ekserji söz konusu olduğundan Şekil 11.1' deki 31 ve 32 noktalarına kadar hesaplanan ekserjiler fiziksel ekserjidir ve o noktaların toplam ekserjilerine eşittir.

1.Noktası İçin

1 noktası buharın kazanı terk ettiği noktadır ve su buharının fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{ll} T_1 = 443,43 \text{ K} & T_0 = 298 \text{ K} \\ h_1 = 2769,10 \text{ kJ/kg} & h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 6,663 \text{ kJ/kgK} & s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_1 = 800 \text{ kPa} & P_0 = 101,30 \text{ kPa} \end{array}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_1 &= (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) \\ e_1 &= (2769,10 - 104,89) - 298 (6,663 - 0,3674) \\ e_1 &= 788,181 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

2 Noktası İçin

2 noktası buharın boylere girdiği noktadır ve su buharının fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{ll} T_2 = 406,55 \text{ K} & T_0 = 298 \text{ K} \\ h_2 = 2725,30 \text{ kJ/kg} & h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_2 = 6,992 \text{ kJ/kgK} & s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_2 = 300 \text{ kPa} & P_0 = 101,30 \text{ kPa} \end{array}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$e_2 = (h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0)$$

$$e_2 = (2725,30 - 104,89) - 298 (6,992 - 0,3674)$$

$$e_2 = 646,309 \text{ kJ/kg}$$

3 Noktası İçin

3 noktası suyun sıvı olarak boylerden çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_3 = 368,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$h_3 = 397,960 \text{ kJ/kg}$$

$$h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 1,250 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK}$$

$$P_3 = 300 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$e_3 = (h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0)$$

$$e_3 = (397,960 - 104,89) - 298 (1,250 - 0,3674)$$

$$e_3 = 30,055 \text{ kJ/kg}$$

4 Noktası İçin

4 noktası buharın ısı değiştirgecine girdiği noktadır ve su buharının fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_4 = 151,860 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$h_4 = 2748,70 \text{ kJ/kg}$$

$$h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg}$$

$$s_4 = 6,821 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK}$$

$$P_4 = 500 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$e_4 = (h_4 - h_0) - T_0 (s_4 - s_0)$$

$$e_2 = (2748,70 - 104,89) - 298 (6,821 - 0,3674)$$

$$e_2 = 720,548 \text{ kJ/kg}$$

5 Noktası İçin

5 noktası suyun boylerden çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_5 = 398,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$h_5 = 524,99 \text{ kJ/kg}$$

$$h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg}$$

$$s_5 = 1,581 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK}$$

$$P_5 = 500 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$e_5 = (h_5 - h_0) - T_0 (s_5 - s_0)$$

$$e_5 = (524,99 - 104,89) - 298 (1,581 - 0,3674)$$

$$e_5 = 58,358 \text{ kJ/kg}$$

6 Noktası İçin

6 noktası buharın pişiriciye girdiği noktadır ve su buharının fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_6 = 437,970 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$h_6 = 2760,30 \text{ kJ/kg}$$

$$h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg}$$

$$s_6 = 6,733 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK}$$

$$P_6 = 650 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$e_6 = (h_6 - h_0) - T_0 (s_6 - s_0)$$

$$e_6 = (2760,30 - 104,89) - 298 (6,733 - 0,3674)$$

$$e_6 = 758,431 \text{ kJ/kg}$$

7 Noktası İçin

7 noktası suyun pişiriciden çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_7 &= 388,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_7 &= 482,48 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_7 &= 1,4734 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_7 &= 650 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_7 &= (h_7 - h_0) - T_0 (s_7 - s_0) \\ e_7 &= (482,48 - 104,89) - 298 (1,4734 - 0,3674) \\ e_7 &= 48,002 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

8 Noktası İçin

8 noktası kondens suyunun kondens tankına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_8 &= 368,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_8 &= 397,960 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_8 &= 1,250 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_8 &= 101,3 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_8 &= (h_8 - h_0) - T_0 (s_8 - s_0) \\ e_8 &= (397,960 - 104,89) - 298 (1,250 - 0,3674) \\ e_8 &= 30,055 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

9 Noktası İçin

9 noktası suyun P₁ pompasına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{ll} T_9 = 363,00 \text{ K} & T_0 = 298 \text{ K} \\ h_9 = 376,920 \text{ kJ/kg} & h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_9 = 1,193 \text{ kJ/kgK} & s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_9 = 150 \text{ kPa} & P_0 = 101,30 \text{ kPa} \end{array}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_9 &= (h_9 - h_0) - T_0 (s_9 - s_0) \\ e_9 &= (376,920 - 104,89) - 298 (1,193 - 0,3674) \\ e_9 &= 26,150 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

10 Noktası İçin

10 noktası suyun pompadan çıkıp buhar kazanına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{ll} T_{10} = 363,00 \text{ K} & T_0 = 298 \text{ K} \\ h_{10} = 376,920 \text{ kJ/kg} & h_0 = 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{10} = 1,193 \text{ kJ/kgK} & s_0 = 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{10} = 800 \text{ kPa} & P_0 = 101,30 \text{ kPa} \end{array}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{10} &= (h_{10} - h_0) - T_0 (s_{10} - s_0) \\ e_{10} &= (376,920 - 104,89) - 298 (1,193 - 0,3674) \\ e_{10} &= 26,150 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

11 Noktası İçin

11 noktası suyun ısı değıştirgecinden çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{11} &= 363,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{11} &= 376,920 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{11} &= 1,193 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{11} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{11} &= (h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0) \\ e_{11} &= (376,920 - 104,89) - 298 (1,193 - 0,3674) \\ e_{11} &= 26,150 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

12 Noktası İçin

12 noktası suyun karıştırma tankına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{12} &= 363,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{12} &= 376,920 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{12} &= 1,193 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{12} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{12} &= (h_{12} - h_0) - T_0 (s_{12} - s_0) \\ e_{12} &= (376,920 - 104,89) - 298 (1,193 - 0,3674) \\ e_{12} &= 26,150 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

13 Noktası İçin

13 noktası suyun karıştırma tankından çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{13} &= 343,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{13} &= 292,980 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{13} &= 0,955 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{13} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{13} &= (h_{13} - h_0) - T_0 (s_{13} - s_0) \\ e_{13} &= (292,980 - 104,89) - 298 (0,955 - 0,3674) \\ e_{13} &= 13,015 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

14 Noktası İçin

14 noktası suyun bekletme tankına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{14} &= 363,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{14} &= 376,920 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{14} &= 1,193 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{14} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{14} &= (h_{14} - h_0) - T_0 (s_{14} - s_0) \\ e_{14} &= (376,920 - 104,89) - 298 (1,193 - 0,3674) \\ e_{14} &= 26,150 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

15 Noktası İçin

15 noktası suyun bekletme tankından çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{15} &= 343,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{15} &= 292,980 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{15} &= 0,955 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{15} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{15} &= (h_{15} - h_0) - T_0 (s_{15} - s_0) \\ e_{15} &= (292,980 - 104,89) - 298 (0,955 - 0,3674) \\ e_{15} &= 13,015 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

16 Noktası İçin

16 noktası suyun şurup tankına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{16} &= 363,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{16} &= 376,920 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{16} &= 1,193 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{16} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{16} &= (h_{16} - h_0) - T_0 (s_{16} - s_0) \\ e_{16} &= (376,920 - 104,89) - 298 (1,193 - 0,3674) \\ e_{16} &= 26,150 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

17 Noktası İçin

17 noktası suyun şurup tankından çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{17} &= 343,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{17} &= 292,980 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{17} &= 0,955 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{17} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{17} &= (h_{17} - h_0) - T_0 (s_{17} - s_0) \\ e_{17} &= (292,980 - 104,89) - 298 (0,955 - 0,3674) \\ e_{17} &= 13,015 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

18 Noktası İçin

18 noktası suyun P₃ pompasına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{18} &= 343,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{18} &= 292,980 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{18} &= 0,955 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{18} &= 350 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{18} &= (h_{18} - h_0) - T_0 (s_{18} - s_0) \\ e_{18} &= (292,980 - 104,89) - 298 (0,955 - 0,3674) \\ e_{18} &= 13,015 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

19 Noktası İçin

19 noktası suyun P₃ pompasından çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{19} &= 343,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{19} &= 292,980 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{19} &= 0,955 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{19} &= 400 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{19} &= (h_{19} - h_0) - T_0 (s_{18} - s_0) \\ e_{19} &= (292,980 - 104,89) - 298 (0,955 - 0,3674) \\ e_{19} &= 13,015 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

20 Noktası İçin

20 noktası suyun temiz su deposundan çıkıp P₂ pompasına girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{20} &= 283,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{20} &= 42,010 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{20} &= 0,151 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{20} &= 120 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{20} &= (h_{20} - h_0) - T_0 (s_{20} - s_0) \\ e_{20} &= (42,010 - 104,89) - 298 (0,151 - 0,3674) \\ e_{20} &= 1,607 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

21 Noktası İçin

21 noktası suyun P₂ pompasından çıkıp boylere girdiği noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{21} &= 283,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{21} &= 42,010 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{21} &= 0,151 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{21} &= 325 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9.4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{21} &= (h_{21} - h_0) - T_0 (s_{21} - s_0) \\ e_{21} &= (42,010 - 104,89) - 298 (0,151 - 0,3674) \\ e_{21} &= 1,607 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

22 Noktası İçin

22 noktası suyun boylardan çıktığı noktadır ve suyun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} T_{22} &= 338,00 \text{ K} & T_0 &= 298 \text{ K} \\ h_{22} &= 272,060 \text{ kJ/kg} & h_0 &= 104,89 \text{ kJ/kg} \\ s_{22} &= 0,894 \text{ kJ/kgK} & s_0 &= 0,3674 \text{ kJ/kgK} \\ P_{22} &= 101,3 \text{ kPa} & P_0 &= 101,30 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(9. m4) denklemindeki değerleri yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} e_{22} &= (h_{22} - h_0) - T_0 (s_{22} - s_0) \\ e_{22} &= (272,060 - 104,89) - 298 (0,894 - 0,3674) \\ e_{22} &= 10,392 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

23 Noktası İçin

23 noktası likorişin karıştırma tankına girdiği noktadır ve likorişin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{23} = 328,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{23} = 101,3 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,0007092 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,lik}} = 2,51 \text{ kJ / kgK}$$

(9.4) denklemine (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{23} = (h_{23} - h_0) - T_0 (s_{23} - s_0)$$

$$e_{23} = [C_{\text{ort,lik}} (T_{23} - T_0) + v (P_{23} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,lik}} \ln (T_{23} / T_0)]$$

$$e_{23} = [2,51 (328 - 298) + 0,0007092 (101,3 - 101,3)] - [298 \times 2,51 \ln (328 / 298)]$$

$$e_{23} = 3,55 \text{ kJ/kg}$$

24 Noktası İçin

24 noktası likorişin karıştırma tankından çıkıp P₅ pompasına girdiği noktadır ve likorişin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{24} = 353,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{24} = 115 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,0007092 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,lik}} = 2,51 \text{ kJ / kgK}$$

(9.4) denklemine (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{24} = (h_{24} - h_0) - T_0 (s_{24} - s_0)$$

$$e_{24} = [C_{\text{ort,lik}} (T_{24} - T_0) + v (P_{24} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,lik}} \ln (T_{24} / T_0)]$$

$$e_{24} = [2,51 (353 - 298) + 0,0007092 (115 - 101,3)] - [298 \times 2,51 \ln (353 / 298)]$$

$$e_{24} = 11,376 \text{ kJ/kg}$$

25 Noktası İçin

25 noktası likorişin P₅ pompasından çıkıp bekletme tankına girdiği noktadır ve likorişin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{25} = 353,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{25} = 101,3 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,0007092 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,lik}} = 2,51 \text{ kJ / kgK}$$

(9.4) denklemine (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{25} = (h_{25} - h_0) - T_0 (s_{25} - s_0)$$

$$e_{25} = [C_{\text{ort,lik}} (T_{25} - T_0) + v (P_{25} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,lik}} \ln (T_{25} / T_0)]$$

$$e_{25} = [2,51 (353 - 298) + 0,0007092 (101,3 - 101,3)] - [298 \times 2,51 \ln (353 / 298)]$$

$$e_{25} = 11,363 \text{ kJ/kg}$$

26 Noktası İçin

26 noktası likorişin bekletme tankından çıkıp P4 pompasına girdiği noktadır ve likorişin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{26} = 353,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{26} = 120 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,0007092 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,lik}} = 2,51 \text{ kJ / kgK}$$

(9.4) denklemine (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{26} = (h_{26} - h_0) - T_0 (s_{26} - s_0)$$

$$e_{26} = [C_{\text{ort,lik}} (T_{26} - T_0) + v (P_{26} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,lik}} \ln (T_{26} / T_0)]$$

$$e_{26} = [2,51 (358 - 298) + 0,0007092 (120 - 101,3)] - [298 \times 2,51 \ln (358 / 298)]$$

$$e_{26} = 13,419 \text{ kJ/kg}$$

27 Noktası İçin

27 noktası şurubun şurup tankına girdiği noktadır ve şurubun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{27} = 333,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{27} = 101,30 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,000893 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,şur}} = 3,80 \text{ kJ / kgK}$$

(9.4) denklemine (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{27} = (h_{27} - h_0) - T_0 (s_{27} - s_0)$$

$$e_{27} = [C_{\text{ort,şur}} (T_{27} - T_0) + v (P_{27} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,şur}} \ln (T_{27} / T_0)]$$

$$e_{27} = [3,80 (333 - 298) + 0,000893 (101,3 - 101,3)] - [298 \times 3,80 \ln (333 / 298)]$$

$$e_{27} = 7,248 \text{ kJ/kg}$$

28 Noktası İçin

28 noktası şurubun şurup tankından çıktığı noktadır ve şurubun fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{28} = 353,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{28} = 110,00 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,000893 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,şur}} = 3,80 \text{ kJ / kgK}$$

(9.4) denklemine (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{28} = (h_{28} - h_0) - T_0 (s_{28} - s_0)$$

$$e_{28} = [C_{\text{ort,şur}} (T_{28} - T_0) + v (P_{28} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,şur}} \ln (T_{28} / T_0)]$$

$$e_{28} = [3,80 (353 - 298) + 0,000893 (110,0 - 101,3)] - [298 \times 3,80 \ln (353 / 298)]$$

$$e_{28} = 17,205 \text{ kJ/kg}$$

29 Noktası İçin

29 noktası likorişin P₄ pompasından çıkıp pişiriciye girdiği noktadır ve likorişin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{29} = 358,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{29} = 800 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,0007092 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,lik}} = 2,51 \text{ kJ} / \text{kgK}$$

(9.4) denkleminin (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{29} = (h_{29} - h_0) - T_0 (s_{29} - s_0)$$

$$e_{29} = [C_{\text{ort,lik}} (T_{29} - T_0) + v (P_{29} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,lik}} \ln (T_{29} / T_0)]$$

$$e_{29} = [2,51 (358 - 298) + 0,0007092 (800 - 101,3)] - [298 \times 2,51 \ln (358 / 298)]$$

$$e_{29} = 13,889 \text{ kJ/kg}$$

30 Noktası İçin

30 noktası likorişin pişiriciden çıktığı noktadır ve likorişin fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$T_{30} = 400,00 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_{30} = 500 \text{ kPa}$$

$$P_0 = 101,30 \text{ kPa}$$

$$v = 0,0007092 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$C_{\text{ort,lik}} = 2,51 \text{ kJ} / \text{kgK}$$

(9.4) denkleminin (11.1) ve (5.13) denklemlerinin uygulanmasıyla;

$$e_{30} = (h_{30} - h_0) - T_0 (s_{30} - s_0)$$

$$e_{30} = [C_{\text{ort,lik}} (T_{30} - T_0) + v (P_{30} - P_0)] - [T_0 C_{\text{ort,lik}} \ln (T_{30} / T_0)]$$

$$e_{30} = [2,51 (400 - 298) + 0,0007092 (500 - 101,3)] - [298 \times 2,51 \ln (400 / 298)]$$

$$e_{30} = 36,338 \text{ kJ/kg}$$

31 Noktası İçin

a) Kimyasal ekserji

31 noktası fuel oilin buhar kazanına girdiği noktadır. Kullanılan fuel oil 6 numaradır ve içerdiği bileşenler Çizelge 11.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 11.5 Buhar kazanına giren fuel oilin bileşimi

Madde	C	H	O	N	S	W(kül)	H ₂ O	Toplam
Kütle oranı (%)	85,7	10,5	0,7268	0,1932	2	0,08	0,8	100

Kimyasal ekserji hesabına başlamadan önce yakıtın her bileşeni için kuru ve külden bağımsız kütle oranlarını bulmak gerekir. Su (H₂O) ve külü (W) çıkardığımızda yeni yüzdelikli toplam aşağıdaki gibi olacaktır:

Fuel oilin kuru ve külsüz olarak toplam kütle oranı = 85,7 + 10,5 + 0,7268 + 0,1932 + 2

Fuel oilin kuru ve külsüz olarak toplam kütle oranı = 99,12

Her maddenin kuru ve külsüz yeni karışımdaki kütle oranları aşağıda hesaplanmıştır.

C için kuru ve külsüz kütle oranı:

$$100 \quad 85,7$$

$$99,12 \quad x$$

Ters Orantı

$$x_c = (100 \times 85,7) / 99,12$$

$$x_c = 86,46$$

H için kuru ve külsüz kütle oranı:

$$100 \quad 10,5$$

$$10,5 \quad x$$

Ters Orantı

$$x_h = (100 \times 10,5) / 99,12$$

$$x_h = 10,593$$

O için kuru ve külsüz kütle oranı:

$$\begin{array}{r} 100 \qquad 85,7 \\ \hline 0,7268 \qquad x \end{array}$$

Ters Orantı

$$x_o = (100 \times 0,7268) / 99,12$$

$$x_o = 0,734$$

N için kuru ve külsüz kütle oranı:

$$\begin{array}{r} 101 \qquad 85,7 \\ \hline 0,1932 \qquad x \end{array}$$

Ters Orantı

$$x_n = (100 \times 0,1932) / 99,12$$

$$x_n = 0,195$$

S için kuru ve külsüz kütle oranı:

$$\begin{array}{r} 100 \qquad 85,7 \\ \hline 2 \qquad x \end{array}$$

Ters Orantı

$$x_o = (100 \times 2) / 99,12$$

$$x_o = 2,018$$

Her maddenin mol ağırlığı bilindiğinden karışımdaki maddelerin birim kütleleri başına göre molları yeni kütle oranları yardımıyla bulunabilir. (Çizelge 11.5)

Çizelge 11.6 Kuru ve külsüz fuel oil bileşimi

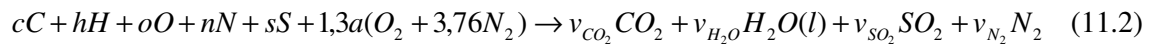
Madde	Mol kütlesi	Kuru ve külsüz (KK)	
		Kütle oranı (%)	kmol/kg
C	12,011	86,46	0,072
H	1,008	10,593	0,105
O	15,9995	0,734	0,000458
N	14,0065	0,195	0,000139
S	32,064	2,018	0,00063
W	-	-	-
H ₂ O	18,015	-	-

Fuel oil hesapları yapılırken Çizelge 11.6'dan faydalanılacaktır. Çevre koşulları;

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_0 = 101,3 \text{ kPa}$$

Fuel oil buhar kazanına T_0 , P_0 şartlarında girmekte, hava fazlalık katsayısı 1,3 (% 30 fazla hava) olan oksijenle T_0 , P_0 şartlarında reaksiyona girmekte ve reaksiyonun sonunda CO_2 , SO_2 , ve H_2O (s)' ya dönüşerek buhar kazanını T_0 , P_0 şartlarında terk etmektedir. Azot reaksiyona girmeden buhar kazanını T_0 , P_0 şartlarında N_2 olarak terk etmektedir. Bütün ısı transferi T_0 sıcaklığında gerçekleştiği kabulü yapılmıştır. Buhar kazanına giren 1 kg kuru vw külsüz fuel oil için yanma reaksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:



Burada c , h , o , n ve s kmol / kg olarak Çizelge 11.5'te verilmiştir.

(11.2) reaksiyon denkleminde katsayıların dengesi kurulduğunda bilinmeyenler ortaya çıkar:

$$H: \quad v_{H_2O} = \frac{1}{2}h = \frac{1}{2}0,105 = 0,0525$$

$$SO_2: \quad v_{SO_2} = s = 0,00063$$

$$C: \quad v_{CO_2} = c = 0,072$$

$$O: \quad o + 1,3a \times 2 = v_{CO_2} \times 2 + v_{H_2O} + v_{SO_2} \times 2 \Rightarrow a = \frac{0,072 \times 2 + 0,0525 + 0,00063 - 0,000458 \times 2}{2,6}$$

$$a = 0,07546$$

$$v_{O_2} = 1,3 \times a = 1,3 \times 0,07546 = 0,0981$$

$$N_2: \quad \frac{n}{2} + 1,3a \times 3,76 = v_{N_2} \Rightarrow v_{N_2} = \frac{0,000139}{2} + 4,888 \times 0,07546 = 0,37$$

Bu durum için (9.8) denklemi aşağıdaki hali alır:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{KK}^{CH} = (HHV)_{KK} - T_0 & \left[s_{KK} + v_{O_2} \bar{s}_{O_2} - v_{CO_2} \bar{s}_{CO_2} - v_{H_2O} \bar{s}_{H_2O} - v_{SO_2} \bar{s}_{SO_2} - v_{N_2} \bar{s}_{N_2} \right] + \\ & + \left[v_{CO_2} \bar{e}_{CO_2}^{CH} + v_{H_2O} \bar{e}_{H_2O}^{CH} + v_{SO_2} \bar{e}_{SO_2}^{CH} + v_{N_2} \bar{e}_{N_2}^{CH} - v_{O_2} \bar{e}_{O_2}^{CH} \right] \end{aligned} \quad (11.3)$$

$$s_{O_2} = 0,20515 \quad \text{mJ/kgK}$$

$$s_{CO_2} = 0,21379 \quad \text{mJ/kgK}$$

$$s_{H_2O} = 0,06995 \quad \text{mJ/kgK}$$

$$s_{SO_2} = 0,24809 \quad \text{mJ/kgK}$$

$$s_{N_2} = 0,639 \quad \text{mJ/kgK}^*$$

$$\bar{e}_{O_2}^{CH} = 3,951 \quad \text{mJ/kg}$$

$$\bar{e}_{CO_2}^{CH} = 0,21379 \quad \text{mJ/kg}$$

$$\bar{e}_{H_2O}^{CH} = 0,045 \quad \text{mJ/kg}$$

$$\bar{e}_{SO_2}^{CH} = 301,939 \quad \text{mJ/kg}$$

$$\bar{e}_{N_2}^{CH} = 0,639 \quad \text{mJ/kg}^*$$

Üst ısıl değer olan HHV terimi (8.5) denklemiyle hesaplanır.

$$(HHV)_{KK} = 32796C + 141886(H - O/8) + 9300S$$

Buradaki C, H, O ve S terimleri Çizelge 11.5'te kütle oranları olarak yüzdesel biçimde verilmiştir. Buna göre,

$$\begin{aligned} (\text{HHV})_{\text{KK}} &= 32796 \times 0,8646 + 141886 (0,10593 - 0,00734 / 8) + 9300 \times 0,02018 \\ &= 43440 \text{ kJ / kg} = 43,44 \text{ mJ/kg} \end{aligned}$$

kuru ve külsüz fuel oil için mutlak entropy aşağıdaki denklemden çıkarılabilir.
(Bejan vd,1996)

$$s_{\text{KK}} = c \left[37,1653 - 31,4767 \exp\left(-0,564682 \frac{h}{c+n}\right) + 20,1445 \frac{o}{c+n} + 54,311 \frac{n}{c+n} + 44,6712 \frac{s}{c+n} \right] \quad (11.4)$$

buradaki c, h, o, n değerleri Çizelge 11.5'te verilmiştir.

$$s_{\text{KK}} = 0,072 \left[\begin{aligned} &37,1653 - 31,4767 \exp\left(-564682 \frac{0,105}{0,072 + 0,000139}\right) + 20,1445 \frac{0,000458}{0,072 + 0,000139} \\ &+ 54,311 \frac{0,000139}{0,072 + 0,000139} + 44,6712 \frac{0,00063}{0,072 + 0,000139} \end{aligned} \right]$$

$$s_{\text{KK}} = 0,001072947 \text{ mJ/kg(KK).K}$$

Böylece (11.3) denkleminde bilinmeyen bir terim kalmamıştır. Tüm terimlerin yerine konulmasıyla;

$$\begin{aligned} \bar{e}_{\text{KK}31}^{\text{CH}} &= 43,44 - 298 \left[\begin{aligned} &0,001072947 + 0,981 \times 0,20515 - 0,072 \times 0,21379 - 0,0525 \times 0,06995 - \\ &0,00063 \times 0,24809 - 0,37 \times 0,639 \end{aligned} \right] \\ &+ [0,072 \times 0,21379 + 0,0525 \times 0,045 + 0,00063 \times 301,939 + 0,37 \times 0,639 - 0,0981 \times 3,951] \end{aligned}$$

$$\bar{e}_{\text{KK}31}^{\text{CH}} = 59,39 \text{ mJ/kg}$$

Çizelge 11.4 yardımıyla fuel oilin özgül kimyasal ekserjisi için:

$$\bar{e}_{31}^{\text{CH}} = 0,9912 \bar{e}_{\text{KK}31}^{\text{CH}} + \frac{0,008}{18,015} \bar{e}_{\text{H}_2\text{O}(l)}^{\text{CH}} = 0,9912 \times 59,39 + 0,00044 \times 0,045 = 58,87 \text{ mJ/kg}$$

b) Fiziksel ekserji

31 noktasının buraya kadar yapılan hesaplamaları kimyasal ekserjisi içindi. Dikkat edilirse yapılan hesaplamalarda giriş ve çıkış şartlarında hep atmosfer şartları mevcuttur. Şartların çevre ile aynı olmasından dolayı 31 noktasının birim kütle başına fiziksel ekserjisi 0'dır

$$(e_{31}^{-PH} = 0)$$

Bundan dolayı 31 noktasının birim kütle başına toplam ekserjisi sadece kimyasal ekserjiye bağlıdır.

$$e_{31} = e_{31}^{-PH} + e_{31}^{-CH} = 0 + 58,87 = 58,87 \text{ mJ/kg}$$

32 Noktası

32 noktasının kimyasal ekserjisi 31 noktasınıninkine eşittir. Yanma ürünleri buhar kazanını atmosfer şartlarında terk ettiğinden fiziksel ekserjisi 31 noktası gibi 0 olmaktadır. Dolayısıyla 32 noktasının birim kütle başına ekserjisi 32 noktasına eşittir.

$$e_{32} = e_{31} = 58,87 \text{ mJ/kg}$$

Birim kütle başına ekserjileri hesaplanan bütün bu noktaların sıcaklık, basınç, birim kütle başına ekserji, debi ve toplam ekserjileri ayrı ayrı Çizelge 11.6'da sunulmuştur.

Çizelge 11.7 Sistemdeki noktaların ekserjileriyle beraber fiziksel değerleri

No:	Sıcaklık °C	Sıcaklık(K)	Basınç(Bar)	e(kj/kg)	m(kg/s)	E(kj/s)	Madde
1	170,430	443,430	8,000	788,181	0,166	131,178	Doymuş Buhar
2	133,550	406,550	3,000	646,309	0,028	17,953	Doymuş Buhar
3	95,000	368,000	3,000	30,055	0,028	0,835	Su
4	151,860	424,860	5,000	720,548	0,014	9,838	Doymuş Buhar
5	125,000	398,000	5,000	58,358	0,014	0,797	Doymuş Buhar
6	164,970	437,970	6,500	758,431	0,033	25,281	Doymuş Buhar
7	115,000	388,000	6,500	48,002	0,033	1,600	Su
8	95,000	368,000	1,013	30,055	0,167	5,009	Su
9	90,000	363,000	1,500	26,150	0,167	4,358	Su
10	90,000	363,000	8,000	26,150	0,167	4,358	Su

Çizelge 11.7 Sistemdeki noktaların ekserjileriyle beraber fiziksel değerleri (Devam)

11	90,000	363,000	4,000	26,150	0,362	9,459	Su
12	90,000	363,000	4,000	26,150	0,270	7,060	Su
13	70,000	343,00000	4,00000	13,015	0,270	3,514	Su
14	90,000	363,000	4,000	26,150	0,054	1,412	Su
15	70,000	343,000	4,000	13,015	0,054	0,703	Su
16	90,000	363,000	4,000	26,150	0,038	0,987	Su
17	70,000	343,000	4,000	13,015	0,038	0,491	Su
18	70,000	343,000	3,500	13,015	1,567	20,394	Su
19	70,000	343,000	4,000	13,015	0,362	4,708	Su
20	10,000	283,000	1,200	1,607	0,280	0,450	Su
21	10,000	283,000	3,250	1,607	0,280	0,450	Su
22	65,000	338,000	1,013	10,392	0,280	2,908	Su
23	55,000	328,000	1,013	3,550	0,361	1,283	Likoriş
24	80,000	353,000	1,200	11,376	0,361	4,108	Likoriş
25	80,000	353,000	1,013	11,363	0,361	4,103	Likoriş
26	85,000	358,000	1,375	13,419	0,361	4,846	Likoriş
27	60,000	333,000	1,013	7,248	0,042	0,302	Şurup
28	80,000	353,000	1,013	17,205	0,042	0,717	Şurup
29	85,000	358,000	8,000	13,889	0,720	10,002	Likoriş
30	127,000	400,000	8,000	36,338	0,720	26,170	Likoriş
31	25,000	298,000	1,013	58,870	0,009	0,559	Yakıt
32	25,000	298,000	1,013	58,870	0,086	5,062	Yakıt

11.5 Eksergekonomik Analiz

Tesis ömrü $n = 20$ yıl, günlük çalışma saati 16, faiz oranı (r_i) %3, eskalasyon oranı (r_n) %4, geri ödeme oranı (i_{eff}) %6, ayda çalışma olarak 26 gün kabul edilirse parasal giderler için Bejan vd., (1996)'ın kitabından yararlanılarak hesaplama yapılır.

Bu likoriş üretim sistemi için değerleri hesaplırsak,

$$CRF = \frac{0.06(1+0.06)^{20}}{(1+0.06)^{20} - 1} = 0.0871$$

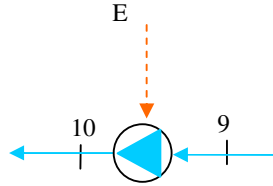
$$k = \frac{1+0.04}{1+0.06} = 0.981$$

$$CELFF = \frac{0.981(1-0.981^{20})}{1-0.981} \cdot 0.0871 = 1,436$$

$$M = \frac{1,436}{1+0.03} = 1,394 \text{ olarak bulunur.}$$

İncelenen likoriş üretim prosesi 13 elemandan oluşmaktadır. Bunlar; buhar kazanı, boyler, pişirici, kondens tankı, şurup tankı, bekletme tankı, karıştırma tankı, ısı değiştirgeci, P₁ pompası, P₂ pompası, P₃ pompası, P₄ pompası ve P₅ pompasıdır.

P₁ Pompası



Şekil 11.2 P₁ pompasının şematik şekli

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{pompa} + Z_{nakil} + Z_{işç} + Z_{tes}$$

$$Z_{yat} = 2440 + 47 + 45 + 30$$

$$Z_{yat} = 2562 \$$$

$$Z_{iş} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{iş} = 187 + 30 + 380 + 239$$

$$Z_{iş} = 836 \$ / \text{yıl}$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{iş}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{2562}{20 \times 24 \times 365} + \frac{836}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 0,22 \$ / \text{h}$$

P₁ pompası için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_9 E_9 + c_E E_E + Z = c_{10} E_{10} \quad (11.5)$$

c₁₀, 10 noktasındaki suyun birim fiyat başına enerji maliyetidir. Şekil 11.2'den de görüleceği üzere bu noktadaki su P₁ pompası tarafından basılmaktadır ve suyun enerji maliyeti için bu pompada harcanan elektrik miktarının parasal değerinin bilinmesi gerekir.

2005 yılı ortalama elektrik maliyeti 0,11 \$ / kWh' dir. 2006 yılı için de bu değer, değişmeyeceği varsayılarak alınmıştır. Elektrik enerjisinin maliyeti için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$c_E = 0,11 \frac{\$}{\text{kWh}} = 0,11 \frac{\$}{\frac{\text{kJ}}{\text{h}}} = 0,11 \frac{\$}{10^{-6} \frac{\text{gJ}}{\text{s}} 3600 \text{ s}} = 30,56 \$ / \text{Gj}$$

Burada 9 noktasındaki su kondens tankından geldiğinden birim enerji maliyeti yoktur (c₉ = 0). Pompanın çalışabilmesi için 3 HP = 2,24 kW = 0,0081 gJ / h gücünde bir motor kullanılmaktadır. (11.5) denklemine bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$0 \times 0,0016 + 30,56 \times 0,0081 + 0,22 = c_{10} \times 0,0016$$

$$c_{10} = 292,2 \$ / \text{gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D P_1} = E_9 + E_E - E_{10}$$

$$E_{D P_1} = 4,36 + 2,24 - 4,36$$

$$E_{D P_1} = 2,24 \text{ kW} = 0,0081 \text{ gJ} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D P_1} = c_D \times E_{D P_1}$$

$$C_{DP2} = 15,57 (\$ / \text{gJ}) \times 0,0081 (\text{gJ} / \text{h})$$

$$C_{DP2} = 0,246 \$ / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{DPI} = \frac{E_{DPI}}{E_{top}} = \frac{0,0081}{0,0081} = 1$$

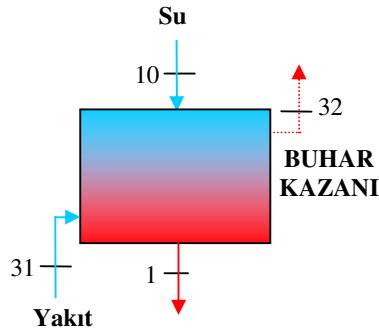
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{0,22}{0,22 + 30,56(0,0081)}$$

$$f = 0,47$$

Buhar Kazanı:



Şekil 11.3 Buhar kazanının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{kazan} + Z_{nakil} + Z_{işç} + Z_{tank} + Z_{tes} + Z_{filtre}$$

$$Z_{yat} = 8.983 + 330 + 135 + 1.850 + 225 + 300$$

$$Z_{yat} = 11.822 \$$$

$$Z_{i\text{ş}} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{su} + Z_{katkımad} + Z_{yakıt} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{i\text{ş}} = 200 + 300 + 380 + 1.248 + 360 + 131.449 + 240$$

$$Z_{i\text{ş}} = 134.177 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{i\text{ş}}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{11.822}{20 \times 24 \times 365} + \frac{134.177}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 32,12 \$ / h$$

Buhar kazanı için maliyet denklemini yazılırsa;

$$C_{31} + C_{10} + Z = C_1 + C_{32}$$

$$c_{31}E_{31} + c_{10}E_{10} + Z = c_1E_1 + c_{32}E_{32} \quad (11.6)$$

c_{31} 'i bulabilmek için yakıtla (6 nolu fuel oil) alakalı bazı değerlerin bilinmesi gerekir. Burada yakıtın kazana girişte birim enerji maliyeti bulunmaması ve yakmak için oksijenin dışarıdan alınması dolayısıyla 31 noktasında bir birim enerji maliyeti yoktur ($c_{31} = 0$). Diğer noktaların birim enerji maliyetlerinin bilinmesi için üretilen enerjiyi maliyete dönüştüren bir takım hesaplamalar yapılmalıdır ve bu hesaplar aşağıda gösterilmiştir.

1 litre yakıt 41740 kJ enerji üretmektedir (Çizelge 8.2).

Fuel oilin yoğunluğu 0,9861 kg / l'dir (Çizelge 8.2).

Nisan 2006 itibarı ile ortalama dolar kuru: 1,3359 ytl / \$

Nisan 2006 itibarı ile İstanbul'da fuel oilin pompa fiyatı ortalama olarak: 0,88 ytl / kg'dır.

Böylece 1 litre yakıtın fiyatı: $0,9861 \times 0,88 = 0,868$ ytl / l'dir.

Bu değer aynı zamanda 0,868 ytl lik yakıtın 41740 kJ enerji vermesi anlamına gelir. c_{31} 'i ytl / gJ cinsinden bulabilmek için oran yapmak gerekir.

$$\frac{0,868 \text{ ytl}}{x} = \frac{41740 \text{ kJ}}{10^6 \text{ kJ}}$$

Doğru orantı

$$x = \frac{10^6 \times 0,868}{41740} = 20,795 \text{ ytl}$$

Buradan da görüleceği üzere bu yakıttan 1 gJ'lk enerji elde etmek için 20,795 ytl'lik harcama gerekir. Bu değeri dolar cinsinden yazarsak;

$$c_{32} = 20,795 \text{ ytl} / \text{gJ} = \frac{20,795}{1,3359} = 15,57 \text{ \$} / \text{gJ}$$

(11.6) denkleminde bulunan bu değerlerin ve izelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$0 \times 0,002 + 292,2 \times 0,016 + 32,12 = 20,795 \times 0,0406 + c_1 \times 0,472$$

$$c_1 = 69,47 \text{ \$} / \text{gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D \text{ kazan}} = E_{10} + E_{31} - E_1 - E_{32}$$

$$E_{D \text{ kazan}} = 4,358 + 0,636 - 131,178 - 11,27$$

$$E_{D \text{ kazan}} = -137,454 \text{ kW} = -0,494 \text{ gJ} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D \text{ kazan}} = c_D \times E_{D \text{ kazan}}$$

$$C_{D \text{ kazan}} = 15,57 \text{ (\$ / gJ)} \times 0,494 \text{ (gJ / h)}$$

$$C_{D \text{ kazan}} = 7,70 \text{ \$} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D_{kazan}} = \frac{E_{D_{kazan}}}{E_{top}} = \frac{0,494}{0,494} = 1$$

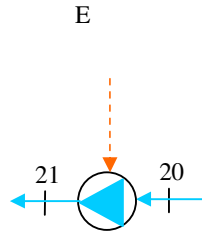
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{32,12}{32,12 + 32,12(0,494)}$$

$$f = 0,67$$

P₂ pompası



Şekil 11.4 P₂ pompasının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{pompa} + Z_{nakil} + Z_{işç} + Z_{tank} + Z_{tes}$$

$$Z_{yat} = 2691,07 + 150 + 155 + 299 + 336,85$$

$$Z_{yat} = 3631,92 \$$$

$$Z_{işç} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{su} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{işç} = 187,139 + 30 + 380 + 183 + 598$$

$$Z_{i\text{ş}} = 4855 \text{ \$ / yıl}$$

$$Z = (Z_{\text{yat}} + Z_{i\text{ş}}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{3621,92}{20 \times 24 \times 365} + \frac{1378,14}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 0,358 \text{ \$ / h}$$

Buhar kazanı için maliyet denklemleri yazılırsa;

$$c_{20}E_{20} + c_E E_E + Z = c_{21}E_{21} \quad (11.7)$$

Burada 20 noktasındaki temiz su dışarıdan depoya getirildiğinden depolama için bir enerji maliyeti yoktur. Dolayısıyla $c_{20} = 0$ 'dır. Ayrıca pompanın motorunu çalıştırabilmek için 2,5 HP = 1,864 kW = 0,0067 gj / h'lık bir güce ihtiyaç vardır. (11.7) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$0 \times 0,0016 + 30,56 \times 0,0067 + 0,358 = c_{21} \times 0,0016$$

$$c_{21} = 351,72 \text{ \$ / gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D P_2} = E_{20} + E_E - E_{21}$$

$$E_{D P_2} = 0,45 + 1,864 - 0,45$$

$$E_{D P_2} = 1,864 \text{ kW} = 0,0067 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D P_2} = c_D \times E_{D P_2}$$

$$C_{D P_2} = 15,57 (\$ / gJ) \times 0,0067 (gJ / h)$$

$$C_{D P_2} = 0,01 \text{ \$ / h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{DP_2} = \frac{E_{DP_2}}{E_{top}} = \frac{0,0067}{0,0067} = 1$$

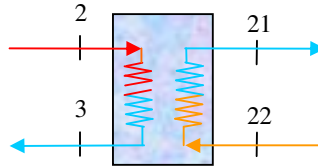
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{0,358}{0,358 + 30,56(0,0067)}$$

$$f = 0,64$$

Boyer



Şekil 11.5 Boylerin şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{boyler} + Z_{nakil} + Z_{tes}$$

$$Z_{yat} = 4866 + 47 + 75$$

$$Z_{yat} = 4988 \$$$

$$Z_{iş} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{katkımad}$$

$$Z_{iş} = 100 + 200 + 380 + 5464$$

$$Z_{iş} = 6144 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{iş}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{4988}{20 \times 24 \times 365} + \frac{6144}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 1,51 \text{ \$ / h}$$

Boylar için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{21}E_{21} + c_2E_2 + Z = c_{22}E_{22} + c_3E_3 \quad (11.8)$$

Burada 2 noktasıyla 3 noktasının enerji başına maliyeti birbirine eşit olup buhar kazanı termoekonomik analizinde hesaplanan 1 noktasıyla aynı değerdedir ($c_2 = c_3 = c_1 = 62,46 \text{ \$ / gJ}$). (11.8) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$351,72 \times 0,0016 + 69,47 \times 0,0646 + 1,51 = c_{22} \times 0,0105 + 69,47 \times 0,0030$$

$$c_{22} = 606,87 \text{ \$ / gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D \text{ boyler}} = E_{21} + E_2 - E_{22} - E_3$$

$$E_{D \text{ boyler}} = 0,45 + 17,95 - 2,9 - 0,83$$

$$E_{D \text{ boyler}} = 14,67 \text{ kW} = 0,0528 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D \text{ boyler}} = c_D \times E_{D \text{ boyler}}$$

$$C_{D \text{ boyler}} = 46,13 (\text{ \$ / gJ }) \times 0,0528 (\text{ gJ / h })$$

$$C_{D \text{ boyler}} = 2,436 \text{ \$ / h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D_{\text{boyler}}} = \frac{E_{D_{\text{boyler}}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,0528}{0,0528} = 1$$

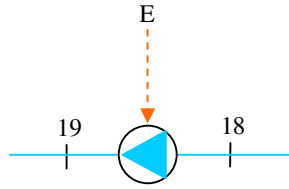
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F (E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{1,51}{1,51 + 46,13(0,0528)}$$

$$f = 0,38$$

P₃ Pompası



Şekil 11.6 P₃ pompasının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{\text{yat}} = Z_{\text{pompa}} + Z_{\text{nakil}} + Z_{\text{işç}} + Z_{\text{tes}}$$

$$Z_{\text{yat}} = 2257 + 56 + 100 + 49$$

$$Z_{\text{yat}} = 2462 \$$$

$$Z_{\text{iş}} = Z_{\text{servis}} + Z_{\text{bakım}} + Z_{\text{ver}} + Z_{\text{elektrik}}$$

$$Z_{\text{iş}} = 120 + 149,7 + 380 + 472$$

$$Z_{\text{iş}} = 1121,7 \$ / \text{yıl}$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{i\dot{s}}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{2462}{20 \times 24 \times 365} + \frac{1121,7}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 0,287 \text{ \$ / h}$$

P₃ pompası için maliyet denklemi yazılırsa;

$$C_{18}E_{18} + c_E E_E + Z = c_{19}E_{19} \quad (11.9)$$

Burada 18 noktasındaki su depodan geldiği için birim enerji maliyeti bulunmamaktadır (c₃₁ = 0) Pompanın motorunu çalıştırabilmek için 2,5 HP = 1,864 kW = 0,00671 gj / h'lık bir güce ihtiyaç vardır. (11.9) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$0 \times 0,0169 + 30,56 \times 0,00671 + 0,287 = c_{19} \times 0,0169$$

$$c_{19} = 29,11 \text{ \$ / gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D P_3} = E_{18} + E_E - E_{19}$$

$$E_{D P_3} = 4,71 + 1,864 - 4,71$$

$$E_{D P_3} = 4,71 \text{ kW} = 0,017 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D P_3} = c_D \times E_{D P_3}$$

$$C_{D P_3} = 15,57 (\text{ \$ / gJ }) \times 0,017 (\text{ gJ / h })$$

$$C_{D P_3} = 0,264 \text{ \$ / h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D P_2} = \frac{E_{D P_2}}{E_{top}} = \frac{0,02}{0,02} = 1$$

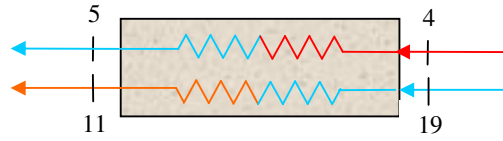
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{0,287}{0,287 + 30,56(0,017)}$$

$$f = 0,356$$

Isı Değiştirgeci



Şekil 11.7 Isı değiştirgecinin şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{ısıdeğ} + Z_{nakil} + Z_{tes} + Z_{işç}$$

$$Z_{yat} = 3369 + 60 + 90 + 47$$

$$Z_{yat} = 3566 \$$$

$$Z_{iş} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{su}$$

$$Z_{iş} = 150 + 50 + 380 + 1809$$

$$Z_{iş} = 2389 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{iş}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{3566}{20 \times 24 \times 365} + \frac{2389}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 0,6 \$ / h$$

Isı değiştirgeci için maliyet denklemini yazılırsa;

$$c_4E_4 + c_{19}E_{19} + Z = c_5E_5 + c_{11}E_{11} \quad (11.10)$$

Burada 4 noktasıyla 5 noktasının enerji başına maliyeti birbirine eşit olup buhar kazanı termoekonomik analizinde hesaplanan 1 noktasıyla aynı değerdedir. ($c_4 = c_5 = c_{11} = 62,46 \text{ \$ / gJ}$). Ayrıca benzer şekilde 19 ve 11 noktalarından giren akışkanın da kapalı çevrim oluşturmasından dolayı bu noktaların da birim enerji başına maliyetleri birbirine eşittir. (11.10) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$62,46 \times 0,0354 + 29,11 \times 0,0169 + 0,6 = 62,46 \times 0,0029 + c_{11} \times 0,0341$$

$$c_{11} = 91,55 \text{ \$ / gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D_{\text{sideğ}}} = E_4 + E_{19} - E_5 - E_{11}$$

$$E_{D_{\text{sideğ}}} = 9,83 + 4,70 - 0,80 - 9,46$$

$$E_{D_{\text{sideğ}}} = 4,27 \text{ kW} = 0,0151 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D_{\text{sideğ}}} = c_D \times E_{D_{\text{sideğ}}}$$

$$C_{D_{\text{sideğ}}} = 46,13 (\text{ \$ / gJ }) \times 0,0151 (\text{ gJ / h })$$

$$C_{D_{\text{sideğ}}} = 0,71 \text{ \$ / h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D_{\text{sideğ}}} = \frac{E_{D_{\text{sideğ}}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,528}{0,528} = 1$$

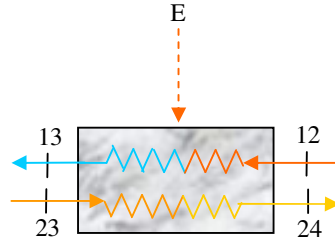
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{0,6}{0,6 + 46,13(0,0151)}$$

$$f = 0,46$$

Karıştırma Tankı



Şekil 11.8 Karıştırma tankının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{kartank} + Z_{nakil} + Z_{sig} + Z_{tes} + Z_{işç}$$

$$Z_{yat} = 94318 + 2893 + 1826 + 65 + 70$$

$$Z_{yat} = 99172 \$$$

$$Z_{iş} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{ürün} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{iş} = 200 + 1825 + 380 + 92.000 + 1597$$

$$Z_{iş} = 129.002 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{iş}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{99172}{20 \times 24 \times 365} + \frac{129.002}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 30,6 \$ / h$$

Karışım tankı için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{12}E_{12} + c_{23}E_{23} + c_E E_E + Z = c_{13}E_{13} + c_{24}E_{24} \quad (11.11)$$

Burada 23 noktasının birim enerji maliyetiyle 22 noktasının birim enerji maliyeti birbirine eşit olduğu akış şeması izlendiğinde görülebilir ($c_{22} = c_{23}$). Ayrıca kapalı sistem olarak sirküle olan ceket suyu için de 12 noktasının birim enerji maliyeti ile 13 noktasınıki birbirine eşittir ve akış şemasından da 11 noktasınıki ile aynı olduğu görülebilir ($c_{11} = c_{12} = c_{13}$). Karıştırma tankının içinde dönen karıştırma milinin motorunu çalıştırabilmek için $7,5 \text{ HP} = 5,59 \text{ kW} = 0,02 \text{ gj} / \text{h}$ 'lık bir güce ihtiyaç vardır. (11.11) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$91,55 \times 0,0254 + 606,87 \times 0,0046 + 30,56 \times 0,02 + 30,6 = 91,55 \times 0,0127 + c_{24} \times 0,0148$$

$$c_{24} = 2378 \text{ \$} / \text{gJ}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D \text{ kartank}} = E_{12} + E_{23} + E_E - E_{13} - E_{24}$$

$$E_{D \text{ kartank}} = 7,06 + 1,283 + 5,59 - 3,51 - 4,108$$

$$E_{D \text{ kartank}} = 6,315 \text{ kW} = 0,023 \text{ gj} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D \text{ kartank}} = c_D \times E_{D \text{ kartank}}$$

$$C_{D \text{ kartank}} = 46,13 (\text{ \$} / \text{gJ}) \times 0,023 (\text{ gj} / \text{h})$$

$$C_{D \text{ kartank}} = 1,06 \text{ \$} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D \text{ kartank}} = \frac{E_{D \text{ kartank}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,023}{0,023} = 1$$

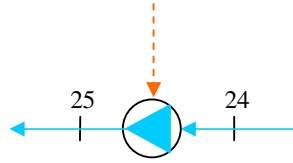
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{30,6}{30,6 + 30,56(0,023)}$$

$$f = 0,977$$

P₅ Pompası



Şekil 11.9 P₅ pompasının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{pompa} + Z_{nakil} + Z_{sig} + Z_{işç}$$

$$Z_{yat} = 2867 + 88 + 100 + 30$$

$$Z_{yat} = 3085 \$$$

$$Z_{iş} = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{iş} = 486 + 778 + 380 + 958$$

$$Z_{iş} = 2602 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{iş}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{3085}{20 \times 24 \times 365} + \frac{2602}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 0,646 \$ / h$$

P₅ pompası için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{24}E_{24} + c_E E_E + Z = c_{25}E_{25} \quad (11.12)$$

Pompada 2,3 kW = 0,0083 gJ / h gücünde motor kullanılmaktadır. (11.12) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$2378 \times 0,0148 + 30,56 \times 0,0083 + 0,646 = c_{25} \times 0,0148$$

$$c_{25} = 2439 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D P_5} = E_{24} + E_E - E_{25}$$

$$E_{D P_5} = 4,108 + 2,3 - 4,108$$

$$E_{D P_5} = 2,3 \text{ kW} = 0,0083 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D P_5} = c_D \times E_{D P_5}$$

$$C_{D P_5} = 30,56 (\$ / \text{gJ}) \times 0,0083 (\text{gJ} / \text{h})$$

$$C_{D P_5} = 0,253 \$ / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D P_5} = \frac{E_{D P_5}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,0083}{0,0083} = 1$$

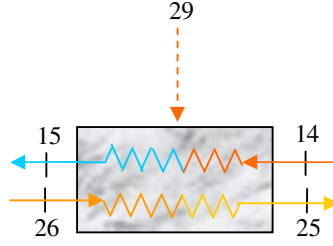
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F (E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{0,646}{0,646 + 30,56(0,0083)}$$

$$f = 0,72$$

Bekletme Tankı



Şekil 11.10 Bekletme tankının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{bektank} + Z_{nakil} + Z_{sig} + Z_{tes} + Z_{i\dot{s}\dot{c}}$$

$$Z_{yat} = 125757 + 3857 + 3772 + 337 + 70$$

$$Z_{yat} = 133.793 \$$$

$$Z_{i\dot{s}} = Z_{servis} + Z_{bakim} + Z_{ver} + Z_{sıyırıcı} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{i\dot{s}} = 500 + 1825 + 380 + 224 + 1597$$

$$Z_{i\dot{s}} = 4526 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{i\dot{s}}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{133.793}{20 \times 24 \times 365} + \frac{4526}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 2,15 \$ / h$$

Tutma tankı için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{14}E_{14} + c_{25}E_{25} + c_E E_E + Z = c_{15}E_{15} + c_{26}E_{26} \quad (11.13)$$

Burada 26 noktasının birim enerji maliyetiyle 22 noktasının birim enerji maliyeti birbirine eşit olduğu akış şeması izlendiğinde görülebilir ($c_{22} = c_{26}$). Ayrıca kapalı sistem olarak sirküle olan ceket suyu için de 14 noktasının birim enerji maliyeti ile 15 noktasınınki birbirine eşittir ve akış şemasından da 11 noktasınınki ile aynı olduğu görülebilir ($c_{11} = c_{14} = c_{15}$). Bekletme tankının içinde dönen karıştırma milinin motorunu çalıştırabilmek için $7,5 \text{ HP} = 5,59 \text{ kW} = 0,02 \text{ gj / h}$ 'lık bir güce ihtiyaç vardır. (11.13) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$91,55 \times 0,0051 + 2439 \times 0,0148 + 30,56 \times 0,02 + 2,15 = 91,55 \times 0,0025 + c_{26} \times 0,0174$$

$$c_{26} = 2247 \text{ gj / h}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{\text{Dbektank}} = E_{25} + E_{14} + E_E - E_{26} - E_{15}$$

$$E_{\text{Dbektank}} = 4,10 + 1,41 + 5,59 - 4,85 - 0,70$$

$$E_{\text{Dbektank}} = 5,55 \text{ kW} = 0,02 \text{ gj / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{\text{Dbektank}} = c_D \times E_{\text{Dbektank}}$$

$$C_{\text{Dbektank}} = 30,56 (\text{ \$ / gj }) \times 0,02 (\text{ gj / h })$$

$$C_{\text{Dbektank}} = 0,61 \text{ \$ / h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{\text{Dbektank}} = \frac{E_{\text{Dbektank}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,02}{0,02} = 1$$

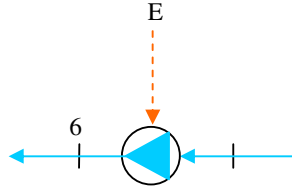
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{2,15}{2,15 + 30,56(0,02)}$$

$$f = 0,78$$

P₄ Pompası



Şekil 11.11 P₄ pompasının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{yat} = Z_{pompa} + Z_{nakil} + Z_{sig} + Z_{i\dot{s}\dot{s}}$$

$$Z_{yat} = 3144 + 97 + 110 + 187 + 30$$

$$Z_{yat} = 3568 \$$$

$$Z_{i\dot{s}} = Z_{servis} + Z_{bakim} + Z_{ver} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{i\dot{s}} = 1500 + 779 + 380 + 1413$$

$$Z_{i\dot{s}} = 4072 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{i\dot{s}}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{3568}{20 \times 24 \times 365} + \frac{4072}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 1,00 \$ / h$$

P₅ pompası için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{26}E_{26} + c_E E_E + Z = c_{29}E_{29} \quad (11.14)$$

Pompada 3,3 kW = 0,012 gJ / h gücünde motor kullanılmaktadır. (11.14) denkleminde bulunan bu değerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$2247 \times 0,0174 + 30,56 \times 0,012 + 1,00 = c_{29} \times 0,0181$$

$$c_{29} = 2237 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D P_4} = E_{26} + E_E - E_{29}$$

$$E_{D P_4} = 4,85 + 3,3 - 5,02$$

$$E_{D P_4} = 3,13 \text{ kW} = 0,011 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D P_4} = c_D \times E_{D P_4}$$

$$C_{D P_4} = 30,56 (\$ / \text{gJ}) \times 0,011 (\text{gJ} / \text{h})$$

$$C_{D P_4} = 0,345 \$ / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D P_4} = \frac{E_{D P_4}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,011}{0,011} = 1$$

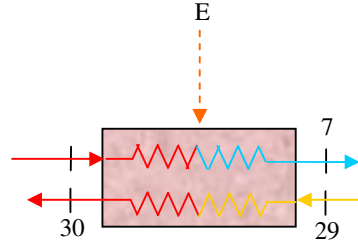
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F (E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{1,00}{1,00 + 30,56(0,011)}$$

$$f = 0,748$$

Pişirici



Şekil 11.12 Pişiricinin şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değeri:

$$Z_{yat} = Z_{pişirici} + Z_{nakil} + Z_{sig} + Z_{tes} + Z_{iş}ç$$

$$Z_{yat} = 48.207 + 1478 + 1446 + 75 + 83$$

$$Z_{yat} = 51.289 \$$$

$$Z_{iş}ç = Z_{servis} + Z_{bakım} + Z_{ver} + Z_{sıyırıcı} + Z_{elektrik}$$

$$Z_{iş}ç = 886 + 2350 + 380 + 538 + 3250$$

$$Z_{iş}ç = 7404 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{iş}ç) \times M$$

$$Z = \left[\frac{51.288}{20 \times 24 \times 365} + \frac{7404}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 2,18 \$ / h$$

Pişirici için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{29}E_{29} + c_6E_6 + c_E E_E + Z = c_7E_7 + c_{30}E_{30} \quad (11.15)$$

Burada 6 ve 7 noktalarının birim enerji maliyetiyle 1 noktasının birim enerji maliyeti birbirine eşit olduğu akış şeması izlendiğinde görülebilir ($c_1 = c_6 = c_7$). Pişiricinin içinde dönen şaftın motorunu çalıştırabilmek için 8,54 HP = 6,37 kW = 0,023 gj / h'lık bir güce ihtiyaç vardır. (11.15) denkleminde bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$2237 \times 0,0181 + 69,47 \times 0,3413 + 30,56 \times 0,023 + 2,18 = 69,47 \times 0,0216 + c_{30} \times 0,0472$$

$$c_{30} = 1389,45 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D\text{pişirici}} = E_{29} + E_6 + E_E - E_{30} - E_7$$

$$E_{D\text{pişirici}} = 5,02 + 94,80 + 6,37 - 13,12 - 6$$

$$E_{D\text{pişirici}} = 87,1 \text{ kW} = 0,313 \text{ gJ / h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D\text{pişirici}} = c_D \times E_{D\text{pişirici}}$$

$$C_{D\text{pişirici}} = 30,56 (\text{ $ / gJ }) \times 0,313 (\text{ gJ / h })$$

$$C_{D\text{pişirici}} = 9,58 \text{ $ / h}$$

Kayıp Ekserji;

$$E_{L\text{pişirici}} = m_{29} \times (e_{30} - e_{29})$$

$$E_{L\text{pişirici}} = 0,361 \times (36,33 - 13,89)$$

$$E_{L\text{pişirici}} = 8,1 \text{ kW} = 0,029 (\text{ gJ / h })$$

Kayıp ekserjinin maliyeti;

$$C_{L\text{pişirici}} = c_L \times E_{L\text{pişirici}}$$

$$C_{L\text{pişirici}} = 30,56 \times 0,029$$

$$C_{L\text{pişirici}} = 0,89 \text{ $ / h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{\text{Dbektank}} = \frac{E_{\text{Dpisirici}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,313}{0,342} = 0,92$$

Kayıp ekserji oranı;

$$y_{\text{Dpişpişir}} = \frac{E_{\text{Lpisirici}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,029}{0,342} = 0,08$$

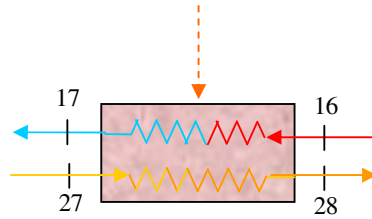
Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F(E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{2,18}{2,18 + 30,56(0,342)}$$

$$f = 0,17$$

Şurup Tankı



Şekil 11.13 Şurup tankının şematik görünümü

Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer:

$$Z_{\text{yat}} = Z_{\text{tank}} + Z_{\text{nakil}} + Z_{\text{sig}} + Z_{\text{tes}} + Z_{\text{işç}}$$

$$Z_{\text{yat}} = 31.439 + 964 + 1100 + 113 + 65$$

$$Z_{yat} = 33.681 \$$$

$$Z_{i\dot{s}} = Z_{servis} + Z_{bakim} + Z_{ver} + Z_{elektrik} + Z_{ürün}$$

$$Z_{i\dot{s}} = 200 + 1825 + 380 + 882 + 12.000$$

$$Z_{i\dot{s}} = 15287 \$ / yıl$$

$$Z = (Z_{yat} + Z_{i\dot{s}}) \times M$$

$$Z = \left[\frac{33.681}{20 \times 24 \times 365} + \frac{15.287}{16 \times 365} \right] \times 1,394$$

$$Z = 3,92 \$ / h$$

Şurup tankı için maliyet denklemi yazılırsa;

$$c_{16}E_{16} + c_{27}E_{27} + c_E E_E + Z = c_{17}E_{17} + c_{28}E_{28} \quad (11.16)$$

Burada 16 ve 17 noktalarının birim enerji maliyetiyle 11 noktasının birim enerji maliyeti birbirine eşit olduğu akış şeması izlendiğinde görülebilir ($c_{11} = c_{16} = c_{17}$). Ayrıca 27 noktasının enerji birim maliyeti 22 noktasınıniki ile aynıdır ($c_{27} = c_{22}$). Şurup tankının içindeki şurubu karıştırmak amacıyla kullanılan motoru çalıştırabilmek için $4,38 \text{ HP} = 3,27 \text{ kW} = 0,012 \text{ gj} / \text{h}$ 'lık bir güce ihtiyaç vardır. (11.16) denklemine bulunan bu değerlerin ve Çizelge 11.6'daki ekserji değerlerinin birimlerinin eşitlenerek yazılmasıyla;

$$91,55 \times 0,0036 + 606,87 \times 0,0011 + 30,56 \times 0,012 + 3,92 = 91,55 \times 0,0018 + c_{28} \times 0,0026$$

$$c_{28} = 1968,9 \text{ gj} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji;

$$E_{D\text{şurtank}} = E_{27} + E_{16} + E_E - E_{28} - E_{17}$$

$$E_{D\text{şurtank}} = 0,302 + 0,987 + 3,27 - 0,717 - 0,491$$

$$E_{D\text{şurtank}} = 3,351 \text{ kW} = 0,012 \text{ gj} / \text{h}$$

Tahrip olan ekserjinin maliyeti;

$$C_{D\text{surtank}} = c_D \times E_{D\text{surtank}}$$

$$C_{D\text{surtank}} = 30,56 (\$ / \text{gJ}) \times 0,012 (\text{gJ} / \text{h})$$

$$C_{D\text{surtank}} = 0,369 \$ / \text{h}$$

Kayıp Ekserji;

$$E_{L\text{surtank}} = m_{27} \times (e_{28} - e_{27})$$

$$E_{L\text{surtank}} = 0,042 \times (17,2 - 7,25)$$

$$E_{L\text{surtank}} = 0,4179 \text{ kW} = 0,0015 (\text{gJ} / \text{h})$$

Kayıp ekserjinin maliyeti;

$$C_{L\text{surtank}} = c_L \times E_{L\text{pişirici}}$$

$$C_{L\text{surtank}} = 30,56 \times 0,0015$$

$$C_{L\text{surtank}} = 0,046 \$ / \text{h}$$

Tahrip olan ekserji oranı;

$$y_{D\text{surtank}} = \frac{E_{D\text{surtank}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,012}{0,0135} = 0,89$$

Kayıp ekserji oranı;

$$y_{L\text{surtank}} = \frac{E_{L\text{surtank}}}{E_{\text{top}}} = \frac{0,0015}{0,0135} = 0,11$$

Termoekonomik faktör;

$$f = \frac{Z}{Z + c_F (E_D + E_L)}$$

$$f = \frac{3,92}{3,92 + 30,56(0,0135)}$$

$$f = 0,90$$

Çizelge 11.8 Likoriş üretim tesisinin her bir elemanı için hesaplanan Termoekonomik değerler

	Tahrip olan ekserji	Kayıp ekserji	Tahrip olan ekserji oranı	Kayıp ekserji oranı	Bir değere getirilmiş yıllık toplam değer	Tahrip olan ekserjinin maliyeti	Kayıp ekserjinin maliyeti	Termo-ekonomik faktör
	E_D (kW)	E_L (kW)	Y_D (%)	Y_L (%)	Z (\$/h)	C_D (\$/h)	C_L (\$/h)	f (%)
P1 pompası	2,24	-	100	-	0,22	0,246	-	0,47
Buhar kazanı	0,4394	-	100	-	32,12	7,7	-	0,67
Boylar	14,67	-	100	-	1,51	2,436	-	0,62
P2 pompası	1,864	-	100	-	0,358	0,1	-	0,38
Isı değiştirgeci	4,27	-	100	-	0,6	0,71	-	0,46
P3 pompası	4,71	-	100	-	0,287	0,264	-	0,356
Karıştırma tankı	6,315	-	100	-	30,6	1,06	-	0,977
Bekletme tankı	5,55	-	100	-	2,15	0,61	-	0,78
şurup tankı	3,351	0,4179	89	11	3,92	0,369	0,046	0,9
P5 pompası	2,3	-	100	-	0,646	0,253	-	0,72
P4 pompası	3,13	-	100	-	1	0,345	-	0,75
Pişirici	87,1	8,1	92	8	2,18	9,58	0,89	0,17

11.6 Maliyet

Sistem günde 16 saat çalışmaktadır. Yılda 365 gün çalışıldığı gözönüne alındığında sistem yılda: $365 \times 16 = 5840$ saat çalışmaktadır.

Sistemde kullanılan cihazların maliyetleri Çizelge 11.8' de, işletme maliyetleri Çizelge 11.9'da verilmiştir.

Çizelge 11.9 Sistemdeki cihazların fiyatları

Cihaz	Maliyet (\$)
P1 pompası	2.440
Buhar kazanı	8.983
Boyer	4.866
P2 pompası	2.692
Isı değiştirgeci	3.369
P3 pompası	2.257
Karıştırmaya tankı	94.318
Bekletme tankı	125.757
şurup tankı	31.439
P5 pompası	2.867
P4 pompası	3.144
Pişirici	48.207

Tablo 11.10 Sistemde bulunan cihazların hesaplamalarda kullanılan yıllık işletme maliyetleri

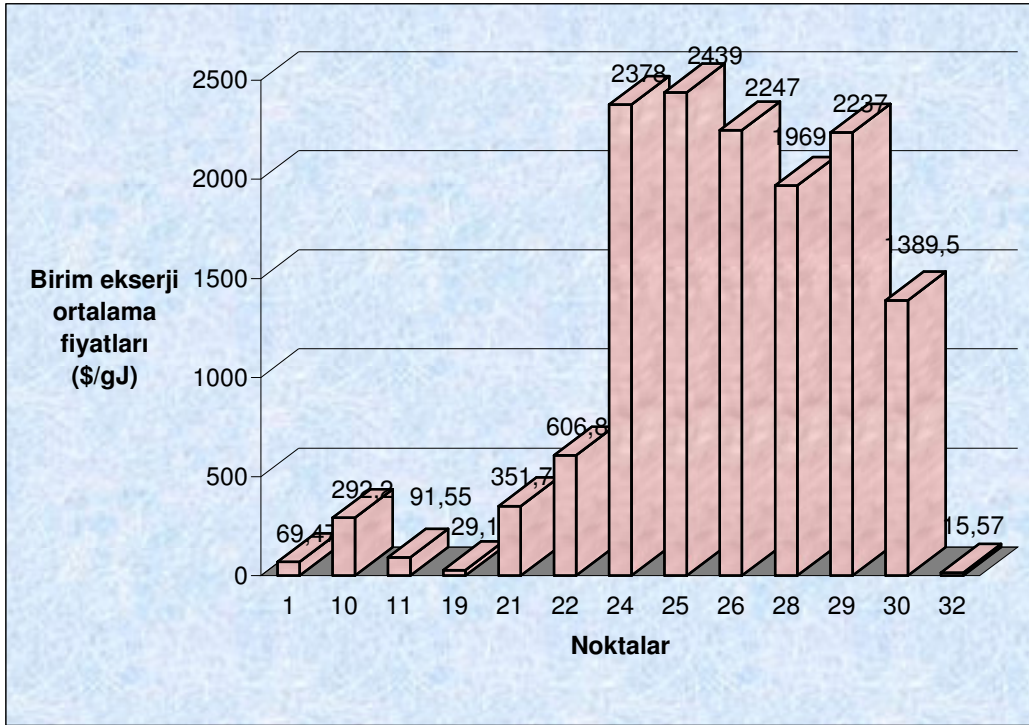
Cihaz	Servis	Bakım	Ortalama Vergi	Elektrik	Katkı maddesi	Sıyırıcı	Su	Yakıt	Ürün	Toplam
P1 pompası	187	30	380	239	-		-	-		836
Buhar kazanı	200	300	380	240	360	-	1.248	131.449		134.177
Boylar	100	200	380	-	5.464	-	-	-		6.144
P2 pompası	187	30	380	598	-	-	183	-		1.378
Isı değiştirgeci	150	50	380	-	-	-	1.809	-		2.389
P3 pompası	120	150	380	472	-	-	-	-		1.122
Karıştırma tankı	200	1.825	380	1.597	-	-	-	-	92.000	96.002
Bekletme tankı	500	1.825	380	1.597	-	224	-	-		4.526
şurup tankı	200	1.825	380	882	-		-	-	12.000	15.287
P5 pompası	486	778	380	958	-		-	-		2.602
P4 pompası	1.500	779	380	1.413	-		-	-		4.072
Pişirici	886	2.350	380	3.250	-	538	-	-		7.404

12. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

12.1 Ortalama Birim Ekserji Maliyetlerine Göre Değerlendirme

Şekil 12.1'e göre 24, 25, 26, 28, 29 ve 30 noktalarının ortalama birim ekserji maliyetlerinin diğer noktalara göre önemli derecede büyük olduğu görülmektedir. Bu noktalar akışkan olarak likoriş ihtiva etmektedir. Bu maliyetlerin bu kadar yüksek çıkmasının sebebi karıştırma tankındaki denge denklemi (11.11) incelenerek anlaşılabilir. Buradaki parasal gider (Z) çok büyük olduğundan 24 noktasının ortalama birim ekserji maliyetini arttırmış ve bu değer kendinden sonra gelen noktalara etki ederek bu maliyetin fazla olmasına sebep olmuştur. Z 'nin fazla olmasının nedeni, karıştırma tankına eklenen likoriş ürününün maliyetinin yıllık bazda çok yüksek olmasından ileri gelmektedir. Ürünün maliyetinin düşürülmesiyle bu fark önemli ölçüde azalacaktır.

Şekil 12.1 Cihazların çıkışlarındaki noktaların ortalama birim ekserji maliyetleri (c)



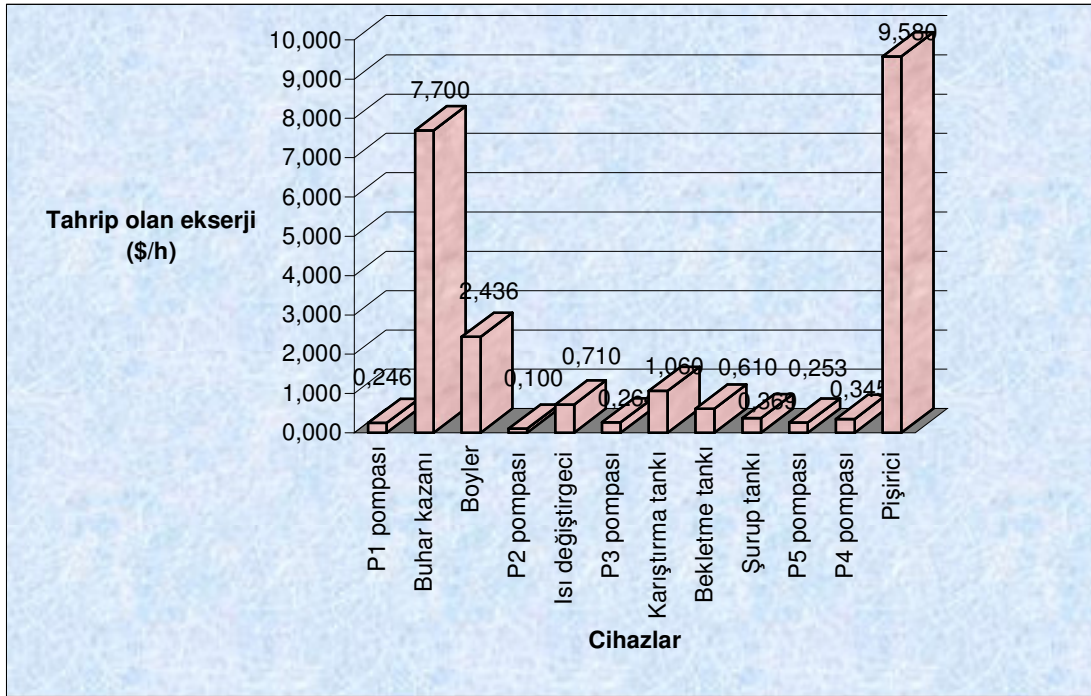
12.2 Kayıp ve Tahrip Olan Ekserji Maliyetlerine Göre Değerlendirme

Şekil 12.2’de sistemde kullanılan her bir cihaz için ayrı ayrı tahrip olan ekserjinin maliyetleri görülmektedir. Pişirici ve buhar kazanında diğer komponentlere kıyasla daha fazla bir kayıp göze çarpmaktadır.

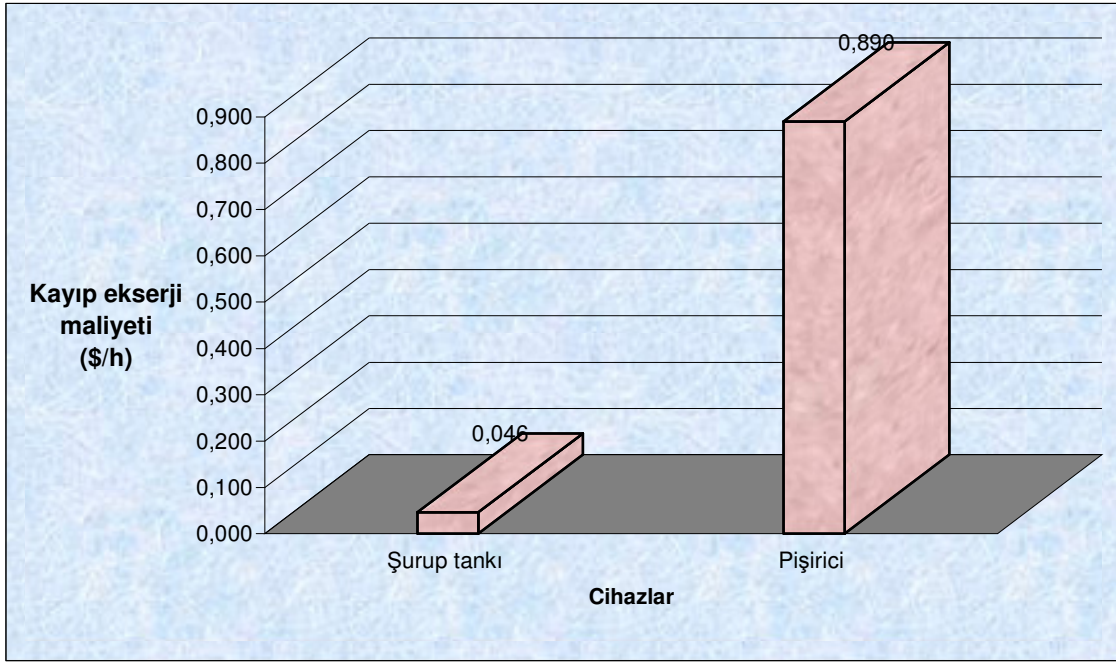
Buhar kazanında tahrip olan ekserjinin yüksek olma sebebi, 1 noktasında kazandan çıkan buharın çevreye karşı ekserjisinin büyük olmasından ileri gelir. ısı transferinden dolayı oluşan bu ekserji kaybını dolayısıyla maliyetini azaltmanın yolu buhar kazanında izolasyonun iyi yapılmasıdır.

Tahrip olan ekserji maliyetinin diğer yüksek olduğu cihaz pişiricidir. Burada pişiriciye giren buhar ısısını likorişe vermektedir. Isı transferinin tam olarak yapılması durumunda tahrip olan ekserji kaybı önemli ölçüde düşecektir. Bu yüzden ısı transferini arttıracak çözümler (ısı ileten yüzeylerin iyileştirilmesi, pişiricinin dışarıya karşı izolasyonunun iyi yapılması vb) bu kaybı önemli ölçüde telafi edecektir.

Şekil 12.2 Sistemde kullanılan cihazların tahrip olan ekserji maliyetleri

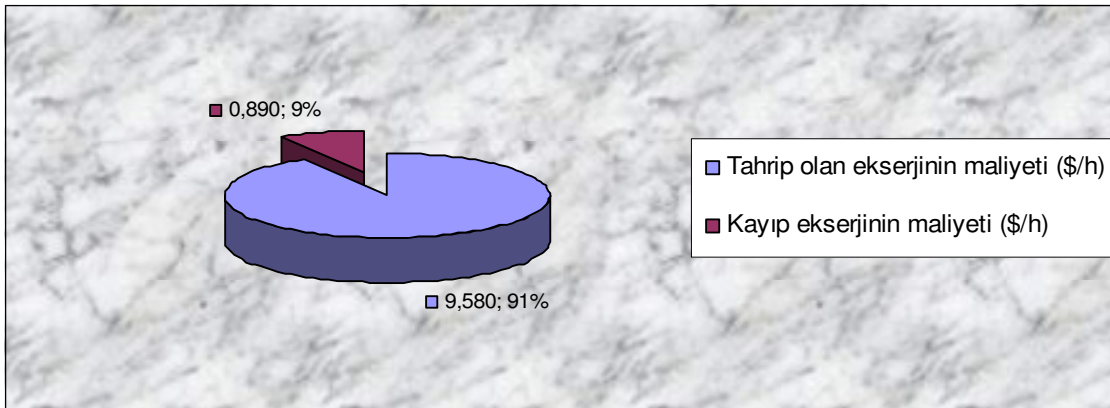


Şekil 12.3 Sistemde kullanılan cihazların kayıp ekserji maliyetleri

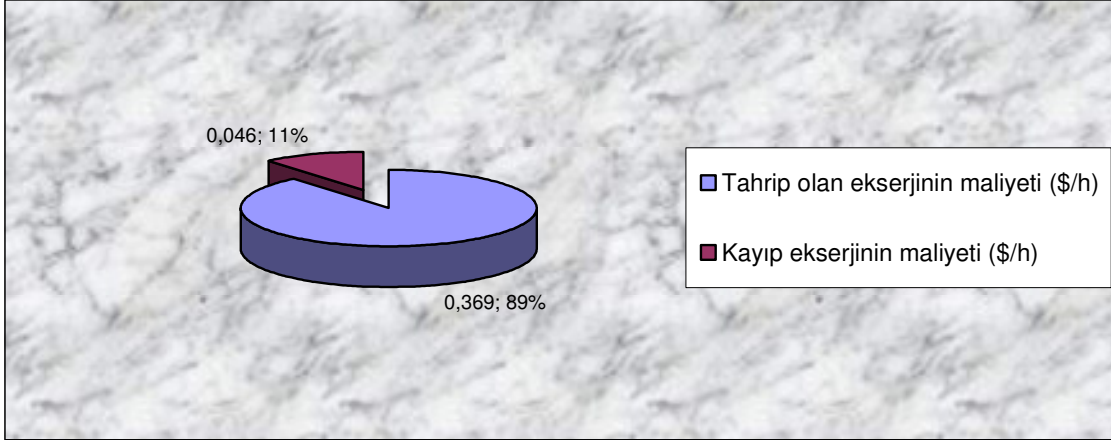


Kayıp ekserjisi olan iki tane cihaz vardır ve bunlar; şurup tankı ve pişiricidir. Bu cihazlarda hazırlanan ürünler dışarı verilmekte ve bir daha başka cihazlarda kullanılmamaktadırlar. Şekil 12.3’de kayıp ekserjisi olan cihazların kayıp ekserji maliyetleri görülmektedir. Şurup tankındaki maliyet pişiriciyle kıyaslanamayacak kadar düşüktür çünkü pişiricide dışarıya verilen ürün şurup tankından çok daha fazladır. Pişiriciden dışarıya verilen ürün direk paketlenmek için soğumaya bırakıldığından buradaki ekserji kaybının geri kazanılması mümkün görülmemektedir. Ayrıca bu değerler tahrip olan ekserji maliyetlerine göre önemsenmeyecek kadar düşüktür. Bu durum her iki cihaz için Şekil 12.4 ve Şekil 12.5’te ayrı ayrı gösterilmiştir.

Şekil 12.4 Pişiricide tahrip olan ekserji maliyetinin kayıp ekserji maliyetine göre durumu



Şekil 12.5 Şurup tankında tahrip olan ekserji maliyetinin kayıp ekserji maliyetine göre durumu



12.3 Termoekonomik Faktöre (f) Göre Değerlendirme

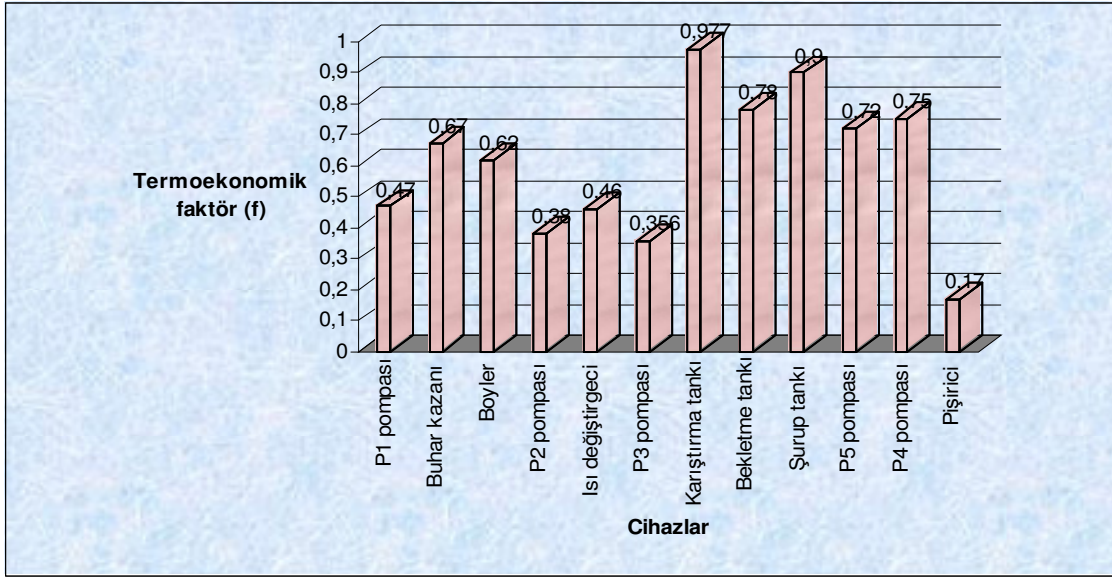
Sistemin kullanılan temel bir cihazı için hesaplanan termoekonomik faktörün küçük değerleri, bu cihaz için sermaye yatırımı artsa bile tahrip olan ekserjisinin azaltılması yoluyla verimliliğinin artırılması sayesinde tüm sistem için maliyet tasarrufunu öngörür. Öteki taraftan bu faktörün yüksek olması cihazın yatırım maliyetlerinin düşürülmesini gerektirmektedir. Termoekonomik faktörün değerleri cihaz tipine göre çeşitlilik gösterir. Bu değer genellikle, ısı değiştirgeçleri için %55'den daha düşük, kompresörler ve türbinler için %35-75 arasında, pompalar için de %70'in üzerindedir (Bejan vd.,1996)

Yukarıdaki tanımlamaya göre pompalara bakılacak olursa P_1 , P_2 ve P_3 pompalarının termoekonomik faktörlerinin önerilen aralıkta olmadıkları, istenilenden daha düşük oldukları görülmekte. f faktörünün yükseltilebilmesi için tahrip olan ekserjiyi düşürmek gerekmektedir. Bunun için de giriş ve çıkış ekserji farklarının düşürülmesi lazımdır. Pompalarda sıvı akışkan kullanıldığından dolayı akışkanın giriş ve çıkıştaki ekserjisi birbirine eşittir. Burada farkı yaratan pompanın çektiği güçtür. Pompa sayıları artırılmak kaydıyla kapasiteleri dolayısıyla çektikleri güç önemli ölçüde azaltılmalı ve ekserji tahribatına engel olunmalıdır.

Pişiricinin termoekonomik faktörünün de olması gerekenden düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni motorun çektiği elektrikten dolayı ekserji girişiyle beraber sıcak akışkan olan buharın tam olarak içerideki soğuk akışkan olan likorişle ısı iletimini verimli olarak yapamamasından kaynaklanmaktadır. Böylece giren ekserji ile çıkan ekserji arasındaki fark

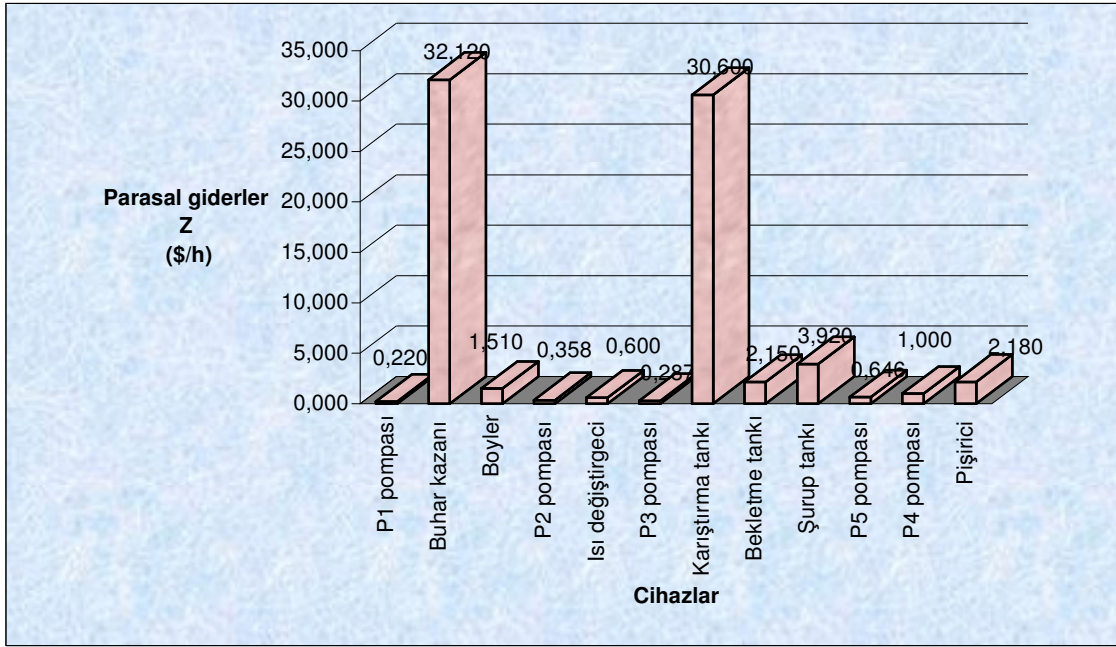
artmakta ve termoekonomik faktörün azalmasına neden olmaktadır. Bunun temel nedeni pişiricinin etrafının izolesinin yapılmaması ve bunun sonucunda buharın çevreyle de büyük oranda ısı transferine girmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca izolasyonsuz durumda izolasyonlu halden çok daha fazla buhar gönderildiğinden hem buhar kazanına daha fazla yük binmesine hem de yakacak maliyetine dolayısıyla buhar kazanının parasal giderinin artmasına neden olmaktadır. Pişiriciye izolasyon yapılması sorunu önemli ölçüde halledecektir.

Şekil 12.6 Sistemde kullanılan cihazların termoekonomik faktörleri



Dikkati çeken diğer nokta da karıştırma, bekletme ve şurup tanklarında termoekonomik faktörün yüksek oluşudur. Bunun başlıca sebebi bu tanklar için yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Özellikle karıştırma ve şurup tanklarının yüksek maliyetlerinin yanında içlerinde kullanılan ürün maliyetinin fazla oluşu bu faktörü arttırmaktadır. Burada yapılması gereken likoriş ve şurubun hammadde maliyetlerini indirmektir. Ayrıca bekletme ve karıştırma tanklarının yüksek kapasiteleri içerlerindeki karışımları karıştırabilmek için yüksek elektrik güçlerini gerektirir. Kapasiteleri düşürmek elektrik gücünü dolayısıyla işletme maliyetlerini düşürmek anlamına geldiğinden ihtiyaçtan fazla ürünün bu tanklarda uzun süre karıştırılmamasına yarayacağı gibi elektrik maliyetlerini azaltacaktır. Şekil 12.7’de de görüleceği üzere buhar kazanından sonra en yüksek parasal giderin karıştırma tankında olduğu dikkat edilirse tüm sistemin maliyet tasarrufu için özellikle karıştırma tankının işletme ve yatırım maliyetlerinin aşağı çekilmesinin önemi görülmüş olur.

Şekil 12.7 Sistemde kullanılan cihazların parasal giderleri



12.4 Sonuç

Yapılan incelemelerden de grldği üzere sistem üzerindeki herhangi bir cihazda kullanılabilir enerji verimliliğinin arttırılması diğer cihazları da müspet doğrultuda etkilemektedir. Kullanılabilir enerjinin (ekserji) tahrip olmadan ya da kaybedilmeden kullanılabilmesi sistem maliyetini direk olarak azaltmaktadır. Son kısımda yapılan düzeltme önerilerinin uygulanması sadece önerilen cihazda değil sistemdeki diğer tüm cihazlarda da parasal giderin azalmasıyla sonuçlanacaktır. Tüm önermelerin uygulanmasıyla sistemin ekonomik giderlerinin katlanarak azalacağı aşıkardır.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 05.12.1979

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996 Namık Kemal Lisesi-Kıbrıs

Lisans 1997-2001 Trakya Üniversitesi Mühendislik Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2002-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

Çalıştığı kurumlar

2004-2005 Horizon Şek. ve Gıda End. A.Ş.

2005-2006 Volvotürk Otom. Ltd. Şti.