T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUŞMALI KOMBİLERDE HİDROJEN TAKVİYELİ DOĞALGAZ KULLANIMI VE EXSERJİ ANALİZİ

DİLEK NUR ÖZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA - 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUŞMALI KOMBİLERDE DOĞALGAZA HİDROJEN İLAVESİNİN YANMA HIZINA ETKİSİ

DİLEK NUR ÖZEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez ...../..../2006 tarihinde jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

(Üye) (Üye)

Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK
(Danışman)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YOĞUŞMALI KOMBİLERDE HİDROJEN TAKVİYELİ DOĞALGAZ KULLANIMI VE EXSERJİ ANALİZİ

Dilek Nur ÖZEN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK

2006, 94 sayfa

Bu çalışmada, hidrojen ile takviye edilen doğalgazın yoğuşmalı kombilerde yakıt olarak kullanılmasının kombi verimini nasıl etkilediği incelenmiştir. Ayrıca bu sistem için maliyet ve ekserji analizi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, suyun elektrolizi için harcanan elektrik enerjisi nedeniyle sistemin verimli olmadığı görülmüştür. Alt ısıl değere göre bulunan verim değeri % 143 olmasına karşın sistemin genel verimi incelendiğinde elektroliz için harcanan elektrik nedeniyle bu değerin % 97,6 olduğu görülmüştür.

Yapılan analizinde, yakıtın ekserjisinin sadece yanma işlemindeki tersinmezlikler nedeniyle % 22 oranında azaldığı görülmüştür. Isıl enerji henüz kullanılmadın ekserjinin % 22 oranında azalması, yakıtın kimyasal enerjisinden daha etkili yollardan yararlanılması gerektiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen enerjisi, yoğuşmalı kombiler, elektroliz, ekserji.

ABSTRACT

MY THESIS

USE OF THE NATURAL GAS ASSISTED WITH HYDROGEN IN THE CONDENSING COMBI AND EXERGY ANALYSIS

Dilek Nur ÖZEN

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied

Sciences Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK

2006, 94 Pages

In this study, the effect to the efficiency of combi of the natural gas assisted with hydrogen was investigated. In addition to this the cost and exergy analysis were done.

From the obtained results, because of the expended electric energy, the efficiency of the system was obtained the low value. The efficient of the system without electrical energy according to low thermal value (LHV) is % 143, but the efficiency of the system with electrical energy according to general efficiency is % 97,6.

In Exergy analysis, because of reverssible in burning process the exergy of fuel % 22 is reduced. It has been realized that it is necessary to make use more the chemical energy of fuel.

Key Words : Hydrogen Energy, condensing combi, electrolysis, the natural gas

ÖNSÖZ

Öncelikle petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların çevreye verdiği zararın yıllık 5 trilyon dolar olduğunun açıklanması ve bu yakıtların bundan yaklaşık 50 yıl sonrası tükeneceği öngörüşü tüm dünya ülkelerinin hidrojen enerjisi konusundaki çalışmalarının hızlanmasında önemli rol oynamıştır.

Hidrojen çağının startı verildiği bu zamanda hidrojenden enerji elde edilmesi ile ilgili projeler ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada hidrojen ile takviye edilen doğalgazın yoğuşmalı kombilerde yakıt olarak kullanılmasının kombi verimini nasıl etkilediği teorik olarak incelenmiştir.

Bu çalışmamda tüm desteğini benden esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Kemal Altınışık ve çalışmamın hesaplamalar bölümünde yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Kürşat Ersoy hocama, ayrıca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Dilek Nur ÖZEN

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iv**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vii**
SİMGE VE KISALTMALAR ..... **viii**
BÖLÜM 1 HİDROJEN ENERJİSİ **1**
1.1 GİRİŞ 1
1.2 HİDROJEN ENERJİSİ 4
1.2.1 Hidrojenin Özellikleri 5
1.2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri 6
1.2.1.2 Hidrojenin Kimyasal Özellikleri 7
1.2.2 Hidrojenin Kullanılması 8
1.3 HİDROJENİN ELDESİ 10
1.3.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi 11
1.3.1.1 Hafif Hidrokarbonların Buhar 11
1.3.1.2 Ağır Hidrokarbonların Kısmi Oksidasyoıu 12
1.3.1.3 Kömürün Kısmi Oksidasyonu 12
1.3.1.4 Doğal Gazdan Elektrik İle Hidrojen Üretimi 12
1.3.2 Elektrokimyasal Yolla Hidrojen Üretimi 13
1.3.2.1 Suyun Elektrolizi 13
1.3.2.2 Yüksek Basınçlı Su Elektrolizi 14
1.3.2.3 Yüksek Sıcaklıkta Su Elektrolizi 14
1.3.3 Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması 14
1.4 HİDROJENİN SIVILAŞTIRILMASI 15
1.5 HİDROJENİN DEPOLANMASI 15
1.5.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanması 16
1.5.2 Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolanması 16
1.5.3 Hidrojenin Metal Hidritte Depolanması 18
1.5.4 Sıvı Hidrojenin Depolanması 19

1.6 HİDROJENİN TAŞINMASI 20
1.6.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Taşınması 20
1.6.2 Sıvı Hidrojenin Taşınması 20
1.6.3 Metal Hidritlerin Taşınması 21
1.6.4 Hidrojenin Taşıma Şekillerinin Karşılaştırması 21
1.7 KOMBİLER 23
1.7.1 Yoğuşmalı Kombiler 23
1.7.1.1 Yoğuşmalı Cihazlarda Verim 24
1.7.1.1.1 Üst Isıl Değer (Ho) 24
1.7.1.1.2 Alt Isıl Değer (Hu) 24
1.7.1.1.3. Yoğuşmalı Cihazlarda % 109 Verim 25
BÖLÜM 2 KAYNAK ARAŞTIRMASI 27
BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOD 29
3.1 MATERYAL 29
3.2. METOD 30
BÖLÜM 4 TEORİ 31
4.1 ALT ISIL DEĞERİN BULUNMASI 31
4.2 ÜST ISIL DEĞERİN BULUNMASI 32
4.3 YANMA SONU ÜRÜNLERİNİN ÇİĞ NOKTASI SICAKLIĞININ BULUNMASI 33
4.4 ELEKTROLİZ 33
4.5 HİDROJEN TAKVİYELİ METANIN YANMA REAKSİYONU 35
4.6 SİSTEM VERİMİNİN ALT ISIL DEĞERE GÖRE BULUNMASI 35
4.6 SİSTEMİN GENEL VERİMİNİN BULUNMASI 37
4.7 EKSERJİ ANALİZİ 37
4.7.1 Adyabatik Alev Sıcaklığının Bulunması (T_2) 38
4.7.2 Birinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 38
4.7.3. İkinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 39
4.7.4 Üçüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 41
4.7.5 Dördüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 41
4.7.6. Sistemin Ekserji Veriminin Bulunması 41
BÖLÜM 5 NÜMERİK DEĞERLENDİRME 42

5.1 ALT ISIL DEĞERİN BULUNMASI 42
5.2 ÜST ISIL DEĞERİN BULUNMASI 43
5.3 % 93,5 VERİME SAHİP KOMBİ 43
5.4 % 109 VERİME SAHİP YOĞUŞMALI KOMBİ 46
5.5 ELEKTROLİZ 49
5.7 EKSERJİ ANALİZİ 52
5.7.1 Adyabatik Alev Sıcaklığının Bulunması 53
5.7.2 Birinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 55
5.7.3 İkinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 57
5.7.3 Üçüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 60
5.7.4 Dördüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması 60
5.7.6 Sistemin Ekserji Veriminin Bulunması 61
BÖLÜM 6 MALİYET ANALİZİ 65
BÖLÜM 7 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 67
BÖLÜM 8 KAYNAKLAR 69
EKLER 71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Kazanlarda Enerji Dağılımı

Şekil 3.1 : Yoğuşmalı Kombinin Çalışma Prensibi

Şekil 3.2 : Elektroliz Kaplı Kombinin Çalışma Prensibi

Şekil 4.1 : % 90 Verime Sahip Bir Kombinin Enerji Dağılımı

Şekil 4.2 : Elektroliz Kaplı Kombi

Şekil 5.1 : Elektroliz Kaplı Kombi

Şekil 5.2 : Elektroliz Kaplı Kombinin Enerji Grafiği

Şekil 5.3 : Belirli Çıkış Basınçlarında T_3 Sıcaklığına Göre I_2 Tersinmezlik Değerinin Değişimi

Şekil 5.4 : Belirli Çıkış Basınçlarında T_3 Sıcaklığına Göre Isıtma Suyunun Ekserjisindeki artışın Değişimi

Şekil 5.5. : Belirli Çıkış Basınçlarında T_3 Sıcaklığa Göre ısıtma Suyuna Verilen Isının Değişimi

Şekil 5.6 : Belirli Çıkış Basınçlarında T_3 Sıcaklığına Göre Ekserji Veriminin Değişimi

SİMGE VE KISALTMALAR

$c_p^{\ h}$: Sabit basınçta molar ısı kapasitesi, kJ/(kmol.K)

$c_p^{\ \varepsilon}$: Sabit basınçta molar ekserji kapasitesi, kJ/(kmol.K)

E : Ekserji, kJ

E_{ph} : Fiziksel ekserji, kJ

E_o : Kimyasal ekserji, kJ

h : Özgül entalpi, kJ/kg

$\bar{h}_c$: Yanma entalpisi, kJ/kmol yakıt

$\bar{h}_f^{\ o}$: Oluşum (formasyon) entalpisi, kJ/kmol

$\bar{h}_{fg}$: Buharlaşma entalpisi, kJ/kmol

I : Elektrik akımı, A

I : Toplam tersinmezlik, kJ

m : Kütle, kg

$\dot{m}$: Kütle debisi, kg/h

M : Mol kütlesi, kg/kmol

P : Basınç, kPa

P_o : Çevre Basıncı, kPa

P_υ : Buhar basıncı, kPa

R : Gaz sabiti, kJ/kmol.K)

R_u : Üniversal gaz sabiti, kJ/kmol.K)

S : Özgül entropi, kJ/kg.K)

t : Zaman, s

T : Sıcaklık, K

T_o : Çevre sıcaklığı, K

V : Ayrışma gerilimi, V

W_{el} : Elektrik işi, kJ

Yunan Harfleri

ε : Spesifik ekserji, kJ/kmol

ε_{ph} : Spesifik fiziksel ekserji, kJ/kmol

ε^o : Standart kimyasal ekserji, kJ/kmol

q : Birim kütle için ısı geçişi, kJ/kg

Q : Toplam ısı geçişi, kJ

$\dot{Q}$: Birim zamanda ısı geçişi, kJ/h

υ : Özgül hacim, m^3/kg

η : Verim

ρ : Yoğunluk, kg/m^3

Alt İndisler

c : Yanma

el : Elektrik

f : Formasyon

fg : Özelliğin doymuş sıvı ile doymuş buhar arasındaki farkı

o : Çevre hali, ölü hal

ph : Fiziksel

u : Üniversal

υ : Su buharı

Üst İndisler

h : Isı

o : Standart referans hali

ε : Ekserji

- : Birim mol için

. : Birim zamanı

BÖLÜM 1

HİDROJEN ENERJİSİ

1.1 GİRİŞ

Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenecek olması ve tükenene kadar kullanımı sonucu ortaya çıkan atıklar yeryüzünde ciddi sorunlara yol açacaktır. Bunların başında küresel ısınma ve atıkların insan sağlığını direkt etkilemesi gelmektedir.Tüm bu şartlardan dolayı bilim çevreleri yeni bir enerji kaynağı bulmaya çalışmaktadırlar. Alternatif bir yakıt olarak hidrojen uzun sürelerden beri düşünülmektedir. Ancak elde edilmesindeki teknik ve mali zorluklar önemli bir engel teşkil ederek yaygınlaşmasını önlemiştir. Dünyada bol miktarda bulunan hidrojen serbest halde bulunmadığından dolayı eldesi için bir enerji ve maliyet söz konusudur. Ayrıca hafif bir element olan hidrojenin depolanması ve iletimi de teknik zorluklar ve ek maliyetler gerektirir. Bu çalışmada öncelikle hidrojen diğer enerji kaynakları ile karşılaştırılarak kullanım gerekliliği üzerinde durulmuş ve hidrojen eldesi yöntemleri incelenmiştir. Daha sonra depolama ve taşıma teknikleri açıklanmıştır.

Günümüzde kullanılan enerji kaynaklarının hızla tükenmekte oluşu yanında mevcut enerji kaynaklarının kullanımı sonucu ortaya çıkan hava kirliliği sorunu da giderek önem kazanmaktadır. Ayrıca dünya global sıcaklığının artması en önemli çevre sorunudur. Çevre kalitesinin ön plana geçtiği yeni dönemin çevre dostu yakıtı olarak hidrojen seçilmiştir. Bu durumun doğal sonucu olarak önümüzdeki yıllarda alternatif enerji kaynaklarından hidrojenin kullanımı zamanla artan oranda yaygınlaşacaktır.

Hidrojen enerjisi tüketiciye yakıt ve/veya elektrik biçiminde sunulan bir enerji kaynağıdır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, genel enerji tüketiminin % 60'ının ısı biçiminde kullanılıyor olması nedeniyle teknolojinin yalnızca elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da gerektiren biçimde gelişmiş olduğu bilinmektedir.

Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesi ile elde olunan ikincil enerjilere, enerji taşıyıcısı denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vuran bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen ise 21. yüzyıla damgasını vuracak bir diğer enerji taşıyıcısıdır.

Endüstri devrimi ile 1750 yılından bu yana, teknik yeniliklere dayalı olarak dünya genelinde ekonominin gelişmesi, peş peşe beş ayrı dalgalanma biçiminde sürmüştür:

1. 1750-1825 yılları arasındaki birinci dalgalanmanın başlıca enerji kaynağı kömürdür.

2. 1825-1860 yılları arasındaki ikinci dalgalanmada, ekonomiye ivme kazandıran elektrik olmuştur.

3. 1860-1910 yılları arasındaki üçüncü dalgalanmada elektrik etkisini sürdürmüş, ama yeni kaynak olarak petrol ortaya çıkmıştır.

4. 1910-1970 arasındaki dördüncü dalgalanmada ekonomiyi büyüten enerji kaynağı nükleer enerjidir.

5. 1970'lerde başlayan ve 21. yüzyılın neresinde biteceği henüz bilinmeyen yeni dalgalanmayı etkileyen enerji kaynağı da hidrojendir.

Enerji ihtiyacı, ilk çağlarda çok sınırlı ve düşük hissedilmesine karşın, insanlığın gelişimine paralel olarak ön plana çıkmakta ve çok daha fazla önem kazanmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamak amacı ile insanlık tarihi kadar eski geçmişe sahip olan fosil yakıt kullanımı, sınırlı rezervleri ve çevreye verdiği ciddi zararlar sonucunda doğada her geçen gün yeni bir problem gündeme getirmektedir. Doğal çevre ve tüm canlı organizmanın varlığını tehdit eden bu problemler onarılması zor ve hatta kalıcı hasarlar oluştur maktadır.

Yapılan tüm bilimsel araştırmalar doğal çevreye zarar vermeyecek, teknolojik gelişmeye paralel olarak tüm uygulama alanlarında maksimum enerji ihtiyacına cevap verecek, önceki enerji kaynaklarının ve çeşitli kirletici etkilerin doğaya verdiği kalıcı zararları yok etmeye yardımcı olabilecek ideal bir enerji kaynağının en kısa

zamanda tüm uygulama alanlarında kullanılması gerektiği sonucunda birleşmektedirler. İdeal enerji kaynağı arayışında aşağıdaki kıstaslar belirlenmiştir.

a- Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli,

b- Taşınırken enerji kaybı hiç olmamalı veya çok az olmalı,

c- Her yerde, örneğin endüstride, evlerde, taşıt araçlarında kullanılabilmeli,

d- Depolanabilmeli,

e- Tükenmez olmalı, kendini yenileyebilmeli,

f- Temiz olmalı,

g- Birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı,

h- Değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılabilmeli,

i- Güvenli olmalı,

j- Isı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüştürülebilmeli,

k- Çevreye hiç zarar vermemeli,

l- Dünyanın her yerinde ve her alanda hatta denizin ortasında bile elde edilebilmeli,

m- Çok hafif olmalı,

n- Çok yüksek verimle enerji üretebilmeli,

o- Karbon içermemeli,

p- Ekonomik olmalıdır.

Çevrenin doğallığının bozulmaması ve insanlığın kısıtlanmadan gelişimini sürdürebilmesi için buna benzer birçok parametrenin bir arada bulunması gerekir. Bu

özelliklerin çoğunu taşıyan en güçlü enerji taşıyıcılarından biri hidrojen enerjisidir. Hidrojen enerjisinin ideal bir yakıt ve enerji taşıyıcısı olmasının yanısıra diğer avantajları kısaca şu şekilde özetlenebilir (**1**):

- Üretilmesi kolaydır,

- Taşıma sektörü için uygun bir yakıttır,

- Elde edilen enerji diğer enerji formlarına kolayca dönüştürülebilir,

- Yüksek verimle yararlanılır,

- Çevreye zararsızdır.

1.2 HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen enerjisi önümüzdeki yüzyılın en önemli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu enerji, sudan elde edilebilmekte ve yüksek verimlilikle, çevre üzerinde hiçbir olumsuz etki yaratmadan yararlı bir enerjiye dönüştürülebilmektedir. Dünyanın enerji sorununu çözmek için kullanılacak hidrojen enerjisi ile milyarlarca yıl yetecek enerji devamlı olarak üretilebilecektir. Elektriksel kaynaklı olmayan enerji kaynakları için talep artmaya devam ettikçe, fosil kaynaklardan fosil olmayan sentetik kaynaklara bir geçiş yapılması zorunlu olacaktır. Yeni enerji kaynaklarının ideal enerji olma yolundaki eksikliklerini tamamlayacak ve bu kaynaklar ile tüketici arasında köprü görevi görecek sistemler oluşturmak ve bu sistemlerde hidrojen enerjisini kullanmak olanaklıdır.

Hidrojenin bir enerji olarak avantajlarından en önemlisi toksik olmayan ve korozyona neden olmayan bir element oluşudur. Bu yüzden gerekli önlemler alındığında hidrojenin kullanılması tehlikesiz ve çok basittir. Kirliliğe neden olmayan hidrojen geri dönüşümünde su üreterek doğal çevrime girer. Doğada bileşikler halinde bol miktarda bulunan hidrojen serbest olarak bulunmadığından doğal bir enerji kaynağı değildir. Bununla irlikte hidrojen birincil enerji kaynakları

ile değişik hammaddelerden üretilebilmekte ve üretiminde dönüştürme işlemleri kullanılmaktadır.

Değişik yöntemlerle suyun hidrojene ve oksijene ayrıştırılması ile oluşturulan gazlar toplanır, depolanır ve çeşitli yöntemlerle kullanım alanlarına nakledilir. Açığa çıkan oksijen ise genelde kullanım alanına hidrojen ile birlikte nakledildiği gibi atmosfere de bırakılıp, hava kirliliğinin giderilmesi, kirlenmiş göllerin, nehirlerin ve şehir atıklarının temizlenmesi gibi doğa temizliğine yardımcı olur. Hidrojen, doğada en çok bulunan element olmasına rağmen hafifliği sebebi ile atmosfere yükselip kaldığından yeryüzünde diğer elementlerle bileşik halde bulunur. Doğadaki miktarı sonsuz olup yanması ile çok yüksek verim elde edilir ve sonuçta su buharı meydana gelir. Atık madde olarak hidrojenin yanmasından su buharı oluşması doğal çevreye zarar vermemesinin yanında, diğer enerji atıklarının verdiği zararların giderilmesine yardımcı olabilmekte ve teknolojinin birçok alanında hidrojen atıklarından etkin bir şekilde doğal geri dönüşümlü olarak yararlanılabilmektedir **(1)**.

1.2.1 Hidrojenin Özellikleri

Atom Numarası : 1

Atom Kütlesi : 1.008

Erime Sıcaklığı : -259,14 °C

Kaynama Sıcaklığı : -252,87 °C

Yükseltgenme Derecesi : +1

Özgül Kütlesi : 0,071 g/cm^3

İzotopları : 1,2 ve 3

Doğal Hidrojen : ^{1}H :99,985 / ^{2}H :0,015

Hidrojen elementini ilk olarak 16. yüzyılda İsviçreli kimyacı Paracelsus, asitlerin bazı metaller üzerindeki etkisini araştırırken elde etmiştir. 1766'da İngiliz kimyacı Henry Cavendish ise hidrojenin öbür yanıcı gazlardan ayrı bir gaz olduğunu belirlemiş ve belirli miktardaki asitleri ve metalleri tepkimeye sokarak oluşan hidrojen miktarını ve yoğunluğunu ölçmüştür. Hidrojenin yanmasıyla su oluşumu 1776'da gözlenmiş, hidrojen adı ise 1781'de Fransız kimyacı Antoine-Laurent Lavoisier tarafından önerilmiştir.

Doğadaki en basit atom yapısına sahip hidrojen, evrenin temel enerji kaynağıdır. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u kadardır. Atmosfer basıncında -253 °C'ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10'u kadar olmaktadır. Hidrojen gazının ısıl değeri, metre küp başına yaklaşık 12 Mega Joule olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısıl değeri ise, metre küp başına 8400 Mega Joule veya kg başına 120 Mega Joule olarak belirlenmiştir.

Hidrojenin oksijenle yanması sonucunda yaklaşık 2600 °C'lik bir sıcaklık ortamı ortaya çıkar. Hidrojen moleküllerinin bir elektrik arkı ya da akkor bir tungsten teli yardımıyla ayrıştırılması sonucunda oluşan hidrojen atomlarının yeniden birleşmesiyle de 3400 °C'nin üzerinde sıcaklıklar elde edilebilir.

Hidrojenin yakıt olarak bazı özellikleri benzin, metan gibi yakıtlarla karşılaştırmalı olarak Tablo 1.1'de gösterilmiştir **(1)**.

1.2.1.1 Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Hidrojen molekülü, birbirinden 0,75 A uzaklıktaki iki atomun birleşmesinden oluşur. Aradaki bağ, iki elektronun ortaklaşa kullanılmasından meydana gelir ve çok yüksek olan ayrışma enerjisi, molekülün çok kararlı olduğunu gösterir. Hidrojen renksiz ve kokusuz bir gazdır. Havaya göre yoğunluğu 0,07'dir ve bu bakımdan cisimlerin en hafifidir. Dolayısıyla gözenekli çeperlerden diğer gazlara göre daha hızlı geçer. Aynı şekilde kızgın derecedeki demir, platin ve iridyum gibi metallerden de sızar. Hidrojen helyumdan sonra sıvılaştırılması en zor olan gazdır. Dönüşüm sıcaklığı -

240 °C olan hidrojen atmosfer basıncında -253 °C'de kaynar, -259 °C'ta katılaşır. Oldukça iyi bir ısı iletkenidir. Özellikle kendi hacminin bin kat fazlasını çözündürebilen paladyum gibi kimi metaller tarafından kolayca soğurulur.

Tablo 1.1 Hidrojen, benzin ve metanın yakıt özellikleri **(1)**

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk, kg/m^3	4,40	0,65	0,084
Hava içindeki difüzyonu, cm 2/s	0,05	0,16	0,61
Sabit basınçta özgül ısısı, J/gK	1,20	2,22	14,89
Havada ateşleme sınırı, % hacim	1,07-7,65	15,0	4,0-75,0
Havada ateşleme enerjisi, mJ	0,24	0,29	0,02
Ateşleme sıcaklığı, ^oC	228-471	540	585
Havada alev sıcaklığı, ^oC	2197	1875	2045
Patlama enerjisi, g TNT k/J	0,25	0,19	0,17
Alev yayılması, %	34-42	25-33	17-25

Olağan hidrojen, molekül yapıları bakımından birbirinden farklı ortohidrojen ile parahidrojen gibi iki izomerin karışımından oluşur. Ortohidrojen oda sıcaklığında gazın dörtte üçünü meydana getirir, parahidrojenin oranı ise sıcaklık düştükçe artar. Parahidrojen ayrıca ortohidrojene göre daha uçucudur. Öte yandan kusursuz bir elektrik iletkeni olması, karışımdaki niceliğini belirlemesini sağlar.

1.2.1.2 Hidrojenin Kimyasal Özellikleri

Hidrojen etkinleştirilmiş biçimleri dışında soğukta pek etkili değildir. Sıcakta ya da katalizörler eşliğinde pek çok tepkimeye girer. Değerli bir element olması nedeniyle çok belirgin elektropozitif bir özellik taşır. Orta kuvvette bir indirgendir, alkali metal oksitler (AL_2 O_3) gibi çok kararlı bileşikleri indirgeyemez. Bununla birlikte NiO, CuO, vb. pek çok metal oksidi indirger. Bu yolla katalizör olarak kullanılan çok ufaltılmış metaller elde edilir.

Hidrojen alkali ve toprak alkali metallerde olduğu gibi ametallerin çoğuyla da doğrudan birleşir. Halojenlerin dördüyle de tepkimeye girerek hidrasitleri verir. Fluordan iyoda doğru gittikçe hem tepkime hızında hem de açığa çıkan ısı miktarında azalma görülür. Oksijenle kızıl derecede ya da düşük sıcaklıkta bir katalizör eşliğinde birleşerek su verir. Mavi bir alevle yanar. Kükürtle 250 °C'de birleşir, azotla yüksek basınçta, bir katalizör eşliğinde birleşerek amonyak elde edilmesini sağlar.

Kurşun ve bakır gibi değerli metallerin oksitlerini indirger. Demir ve demire yakın metallerin oksitleriyle tersinir tepkimeler verir. Ayrıca karbonmonoksidi de indirger, işlemin gerçekleştirildiği koşullara uygun olarak (sıcaklık, basınç, katalizör) değişik ürünler oluşturur.

Katalitik hidrojenlenme tepkimeleri arasında taşkömürünün ya da taşkömürü yağlarının hidrojenlenmesinin yanı sıra doymamış organik bileşiklere hidrojenin bağlanması da sayılabilir. Özellikle hidrojen tepkimesinden sıvı yağların sertleştirilmesinde yararlanılır.

1.2.2 Hidrojenin Kullanılması

1970'li yıllara girilirken hidrojen enerji taşıyıcısı olarak göz önüne alınmamakta ve hidrojen enerjisi kavramına enerji literatüründe pek rastlanmamaktaydı. 18-20 Mart 1974 tarihlerinde Amerika Florida Miami Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma Enstitüsü'nde, Enstitü Direktörü Türk bilim adamı Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu'nun başkanlığında düzenlenen "Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı (THEME)", çağdaş boyutta hidrojen enerjisi kullanımı için bir başlangıç noktası olmuştur.

Hidrojen enerji sisteminin yanı sıra, birbirleri ile bağlantılı biçimde enerji ve çevre sorunlarının tartışıldığı bu uluslararası forumda, Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği (IHEA) kurulması kararlaştırılmıştır. 1974'te az bilinen hidrojen enerjisi, hidrojen ekonomisi ve hidrojen enerji sistemi 1997'de iyi bilinen ve kabul olunan kavramlar haline gelmiştir. Artık ABD, Almanya, Kanada, Rusya gibi ülkelerin

yanısıra Uluslararası Enerji Ajansı gibi kuruluşlar hidrojen araştırma ve geliştirme çalışmalarına bütçe ayırmaktadırlar. Birincisi 1974 yılında yine Miami'de yapılan "Dünya Hidrojen Enerjisi Konferanslarının (WHEC's)" onbirincisi 1996 yılında Almanya Stuttgart'ta yapılmıştır. Bugün dünyada hidrojenle ilgili onu aşkın sivil toplum kuruluşu vardır ve ona yakın periyodik yayın yayınlanmaktadır.

Hidrojen enerjisi alanında çeşitli ülkelerin işbirliği sonucu uluslararası programlar başlatılmıştır. Avrupa Topluluğu ile Kanada'nın EURO-QUEBEC (hidro-hidrojen) projesi, Norveç ve Almanya'nın NHEG projesi, Almanya ve Suudi Arabistan'ın HY- SOLAR projesi, İskandinav Ülkeleri ile Yunanistan'ın işbirliği, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) hidrojen enerjisi projeleri, Japonya'nın WE-NET programı, Birleşmiş Milletler UNIDO-ICHET hidrojen çalışmaları bunlara örnek gösterilebilir.

Endüstriyel olarak da kullanılan hidrojen temel olarak aşağıdaki katalitik hidrojenleme tepkimelerinde kullanılır:

1. Amonyak (NH_3) birleşimi,

2. Metanol (CH_3OH) birleşimi,

3. Bitkisel yağları doyurma,

4. Petrokimyada hidrojenle işleme,

5. Rafineride desülfürizasyon işlemlerinde,

6. Düz cam üretiminde,

7. Işıl işlemlerde koruyucu ve reaktif atmosfer bileşeni olarak,

8. Enerji santral ekipmanlarının soğutulmasında,

9. Bitkisel yağların katılaştırılmasında,

10. Roket yakıt karışımlarında.

Sıvı hidrojen genellikle uzay araçlarının fırlatıcılarını itmede yakıt olarak kullanılır. Bu durumda çoğu kez sıvı oksijen gibi bir yakıtla tepkimeye sokularak aracın olağanüstü bir hıza (4500m/sn'nin üzerinde) erişmesini sağlar. Nükleer ya da güneş kaynaklı elde edilen elektrikle suyun elektrolizi sonunda üretilen hidrojen, verimin artırılması ve fiyatların düşürülmesi durumunda geleceğin önemli bir enerji kaynağı olabilir.

Hidrojen alevli yanmaya olduğu kadar katalitik yanmaya, doğrudan buhar üretimine, kimyasal dönüşüme ve yakıt pilleri ile elektro-kimyasal dönüşüme uygun bir yakıttır. Fosil yakıtlarda alevli yanma dışında sıralanan özelliklerin bulunmayışı hidrojenin üstünlüğüdür. Hidrojenin alevli yanması içten yanmalı motorlarda, dizel motorlarında, gaz türbinlerinde, jet motorlarında, roket motorlarında, ısıtma ve pişirmede uygulanabilirliğini sağlamaktadır. Katalitik yanmasının uygulandığı yerler pişirme, su ısıtma, hacim ısıtma ve absorbsiyonlu soğutucular için ısı sağlamadır. Hidrojen den doğrudan buhar üretimiyle buhar türbinlerin de, endüstriyel buhar ve ısıtma buharı sağlanmasında kullanılmaktadır. Hidrojenin hidridleşmeye dayalı kimyasal dönüşümü, hidrojen depolamanın dışında hidrojen arıtma, döteryum ayrıştırılması, sıkıştırma, pompalama, ısı pompaları, soğutma, iklimlendirme ve elektrik üretiminde uygulanır **(1)**.

1.3 HİDROJENİN ELDESİ

Hidrojen bir doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak değişik hammaddelerden üretilebilen bir sentetik yakıttır. Hidrojen üretiminde tüm enerji kaynakları kullanılabilmektedir. Kullanılan hammaddeler ise su, fosil yakıtlar ve biokütle materyallerdir. Yakıt hidrojeninin sudan yenilenebilir enerjiyle üretilmesi temel ilkedir. Hidrojen üretim yöntemlerinin başında fosil yakıtlardan, hidroelektrik kaynaktan, jeotermal enerjiden, güneş ve rüzgar enerjilerinden yararlanmak gelir. Gelecek için en çok üzerinde durulan yöntem fotovoltaik güneş üreticilerinden yararlanmaktır.

Hidrojen üretimi için kullanılan alışılmış teknolojiler doğal gazın katalitik buhar reformasyonu, ağır petrolün kısmi oksidasyonu (pox), kömürün gazifikasyonu, buhar-demir işlemi ve suyun elektrolizi biçiminde sıralanabilir. Yan ürün olarak hidrojenin elde edildiği alışılmış teknolojiler ise klor-alkaliden karşıt klor üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve kimyasal dehidrojenasyon işlemleridir. Bunların yanı sıra, amonyağın ve methanolün parçalanması ile hidrojen elde olunabilirse de, bu iki işlem hidrojen üretimi için temel değildir.

Bunun yanı sıra geliştirilmekte olan teknolojiler de mevcuttur. Bunlar, buharın yüksek sıcaklıkta elektrolizi, gazlaştırılmış kömürün elektrokondüktif membran işlemi, kömür gazifikasyonu ile bütünleştirilmiş yüksek sıcaklık elektrolizi (CG-HTE) olarak sıralanabilir. Ayrıca suyun termokimyasal parçalanması, plazma-güneş ve radyasyon işlemleri, güneş fotovoltaik su elektrolizi diğer ileri yöntemlerdir.

Yakıt olarak kullanılacak hidrojenin üretimi için suyun direkt elektrolizi, termokimyasal üretim, fotobiyolojik üretim yöntemleri ağırlık kazanmıştır.

Hidrojen üretiminde güneş enerjisinden yararlanma istemiyle, elektrolizde kullanılacak elektrik enerjisinin fotovoltaik panellerden üretilmesine yönelik olarak, güneş fotovoltaik-hidrojen enerji sistemleri üzerinde önemle durulmaktadır.

1.3.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

Dünyada yakıt olarak kullanılan 500 Nm^3 hidrojenin tamamına yakın bir kısmı fosil yakıtlar kullanılarak üretilir. Ancak uzun vadede çevre sağlığı ve fosil yakıtların tükenecek olmasından dolayı daha temiz ve modern bir yöntem olan elektrik kullanılacaktır.

1.3.1.1 Hafif Hidrokarbonların Buhar Reformasyonu

Bu yöntem günümüzde uygulanan yöntemler arasındadır. Buhar reformasyonu, metan, benzin gibi hafif hidrokarbonların su buharı ile endotermik, katalitik

dönüşümüdür. Bu işlem genelde 850 °C sıcaklık ve 2.5 MPa basınç altında meydana gelir.

Çıkan karbonmonoksidin ekzotermik katalitik dönüşümünden saf hidrojen oluşur. İfadenin denklemi şöyledir:

Karışımdaki karbonmonoksit emme yoluyla temizlenir. Bu yöntemle hidrojen üretimi oldukça yaygındır. Bir buhar reformasyonu tesisinde saatte 100000 Nm^3 hidrojen üretimi yapılabilir. Bu yöntemde hafif hidrokarbon olarak en çok doğal gaz kullanılır.

1.3.1.2 Ağır Hidrokarbonların Kısmi Oksidasyoıu

Ham petrolün rafinasyonu işlemi sırasında açığa çıkan atıklara ağır hidrokarbon denir. Ağır hidrokarbonların oksijen ve buhar yardımıyla ekzotermik veya ototermal dönüşümü ile hidrojen elde edilebilir. Oksijen ve su buharı miktarı dışarıdan bir enerji girişine gerek duyulmadan ototermal biçimde kontrol edilebilir.

Günümüzde kullanılan bir yöntem olup, 100000 Nm^3/h hidrojen kapasitede üretim tesisleri kurulabilir.

1.3.1.3 Kömürün Kısmi Oksidasyonu

Proses açısından ağır hidrokarbonla kısmi oksidasyon yöntemine benzer. Ancak kullanılacak kömürün toz haline getirilip pompalanması gerekir. Bu yöntem daha çok zengin kömür rezervlerine sahip ülkelerde kullanılır.

1.3.1.4 Doğal Gazdan Elektrik İle Hidrojen Üretimi

Bu yöntem yaygın kullanımdan daha ziyade deneme aşamasında olan bir yöntemdir. Hidrokarbonlar önce, plazma - ark prosesi ile 1600 °C'de hidrojen ve saf karbona

ayrılırlar. Bu yöntem için birincil enerji kaynağı olarak doğal gaz veya fuel - oil kullanılır. Bunun dışında proses için soğutma suyu ve elektrik gereklidir. Bu konuda Norveç'te yapılan çalışmalarda 1000 Nm^3/h doğal gazdan 2100 kWh elektrik kullanılarak 2000 Nm^3/h hidrojen ve 500 kg/h saf karbon üretilmiştir. Proses sonucu yüksek sıcaklıkta buhar meydana gelir. Çıkan ürünlerin hepsi kullanım potansiyeline sahip olduğundan dolayı tesis tam verimle çalışır. Mobil uygulamalarda, yüksek enerji yoğunluğu ve depolama kolaylığı nedeniyle yakıt hücreleri için hidrojen temininde metanol ve motorin reformasyonu ve kısmi oksidasyonu önem kazanmaktadır.

1.3.2 Elektrokimyasal Yolla Hidrojen Üretimi

Elektokimya denince bu konuda aklımıza gelen ilk kavram elektrolizdir. Sudan hidrojen üretme yöntemleri arasında günümüzde en çok kullanılan ve en önemli yöntemdir. Ticari olarak 100 yıla yakın bir geçmişe sahip bu yöntemin gelecektede kullanılmasına devam edilecektir.

1.3.2.1 Suyun Elektrolizi

Elektroliz, elektrik enerjisi kullanarak suyun hidrojen ve oksijen atomlarına parçalanması prosesidir. İki hidrojen atomu ve bir oksijen atomu elektriksel çekim kuvveti ile bir araya gelerek su molekülünü oluştururlar. Sudan elektrik akımı geçirildiği zaman su molekülündeki kimyasal bağların parçalanması sonucu negatif yüklü OH^- ile pozitif yüklü H^+ oluşur. Ayrışma, iki elektrotta gerçekleşen iki kısmi reaksiyondan oluşur. Elektrotlar iyon geçirebilen bir elektrolit ile ayrılmıştır. Hidrojen negatif elektrotta, oksijen ise pozitif elektrotta meydana gelir. Yük değişimi iyonların hareketi ile sağlanır. Üretilen gazları ayırmak için iki reaksiyon bölgesi iyot geçirmeyen bir diyafram ile ayrılmıştır. Suyun ayrılması için gerekli enerji elektrik ile karşılanır.

Saf suyun elektrik direnci oldukça yüksektir (100 ohm/cm). Bu direnç bir takım kimyasal yöntemlerin uygulanmasıyla düşürülebilir. Bunlar:

• 700 - 1000 °C sıcaklık ortamları,

• Alkalin ya da asit kökenli elektrolitlerin kullanımı gibi yöntemlerdir.

Asit ve tuz elektrot metalini aşındırıcı özelliğe sahiptir. Pratikte potasyum hidroksitle birlikte nikel-demir elektrodların kullanımı maliyet ve performans açısından en iyi sonucu vermektedir.

1.3.2.2 Yüksek Basınçlı Su Elektrolizi

Özel malzeme seçim ve uygulamalarıyla, yüksek basınçlı su elektroliz yöntemiyle 5 Mpa basınca kadar üretim mümkündür. Ancak sistemi aksatan bir konu, değişken akım kaynağı ile çalışmamasıdır. Günümüzde kullanılan küçük güçte cihazların maliyeti 5000 $/kW civarındadır. Büyük güçlü cihazların ise birim maliyetinin 1100 $/kW civarında olması beklenmektedir.

1.3.2.3 Yüksek Sıcaklıkta Su Elektrolizi

Bu yöntemin en önemli avantajı, suyun ayrıştırılması için gerekli enerjinin dışardan alınarak elektroliz için gerekli enerjinin azaltılmasıdır. Bu amaçla güneş enerjisi veya santrallerdeki artık ısıların kullanılması düşünülmüştür. Ancak destek bulamaması nedeniyle bu yöntem üzerine araştırmalar diğer yöntemlere kaydırılmıştır.

1.3.3 Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Günümüzde en çok kullanılan hidrojen üretim yöntemi hidrokarbonların özel olarak da doğalgazın reformasyonu yöntemidir. Gelecekte ise yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilip elektriğin maliyetinin düşürülmesiyle şu anda pahalı olan elektroliz yöntemi önem kazanacaktır.

1.4 HİDROJENİN SIVILAŞTIRILMASI

Hidrojenin sıvılaştırılması gaz hidrojenin kompresörlerde yüksek basınçta sıkıştırılması, sıkıştırılmış gazın sıvı nitrojen ile soğutulması ve türbinlerde genişletilmesiyle olur. Sıvılaştırma işlemi, gazın sıvı hale gelene kadar soğutulması ile gerçekleştirilir ve istenilen soğutmayı sağlamak için kompresörlere, ısı değiştiricilere, türbin ve kısılma valfine ihtiyaç duyulur **(1)**.

1.5 HİDROJENİN DEPOLANMASI

Günümüzde hidrojen çok çeşitli şekillerde depolanabilmektedir. Tablo 1.2'de hidrojenin depolama yöntemleri ve bu yöntemlerin hidrojen kapasitesi, enerji kapasitesi ve uygulama alanları gösterilmektedir. Tablodaki veriler deneysel olarak hesaplanmış maksimum değerlerdir. Şu an için aktive edilmiş karbon, zeolitler ya da cam küreler için spesifik uygulama alanları ve pazar bulunmamaktadır. Bunun da temel nedeni pratik olmayan çalışma koşulları ve düşük hidrojen depolama kapasiteleridir.

Tablo 1.2 Hidrojen depolama yöntemleri **(1)**

Depolama Malzemesi	**Hidrojen Kapasitesi (%)**	**Enerji Kapasitesi (kW/kg)**	**Uygulama Alanları**
Gaz Hidrojen	11,3	5,0	Taşıma, güç üretimi
Sıvı hidrojen	25,9	13,8	Taşıma
Metal hidrit	2-5,5	0,8 – 2,3	Taşınabilir, taşıma
Karbon	5,2	2,2	-
Zeolit	0,8	0,3	-
Cam Küre	6	2,5	-
Kimyasal	8,9 – 15,1	3,8 - 7	Taşıma, güç üretimi

Hidrojenin depolama yöntemlerinden en önemlileri hidrojenin sıkıştırılmış gaz halde depolanması, sıvı halde depolanması ve metal hidritlerde depolanmasıdır. Bunların dışında hidrojenin yeraltında depolanması da sıkıştırılmış gaz halde depolamanın bir başka şeklidir. Her depolama yönteminin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örnek olarak hidrojenin sıvı halde depolanmasını ele alacak olursak, hidrojen sıvı halde diğer depolama yöntemlerine göre en yüksek depolama yoğunluğuna sahip olmaktadır, fakat bunun yanında izole edilmiş depolama konteynerleri ve enerji gerektiren bir sıvılaştırma prosesi gerektirmektedir.

1.5.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Depolanması

En basit ve şu an için en çok kullanılan yöntem olan hidrojenin sıkıştırılmış gaz halde depolanmasında gerekli olan tek ekipman bir kompresör ve basınç tankıdır. Bu yöntem, yer üstündeki tüm hidrojen depolama yöntemleri arasında en düşük maliyetli, kısa dönem uygulamalarda en elverişli ve uygun olanıdır.

Sıkıştırılmış gaz haldeki hidrojenin depolanmasındaki ana problem, depolama basıncına bağlı olan düşük depolama yoğunluğudur. Yüksek depolama basınçları, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gerektirmektedir. Gaz hidrojenin basınçlı tanklarda küçük miktarlarda depolanması çok kolay ve düşük maliyetli olabilmektedir fakat depolanacak hidrojen miktarı arttıkça maliyetler de miktarla beraber artmaktadır. Dolayısıyla bu yöntem büyük miktarlarda hidrojen için ekonomik olmamaktadır **(1)**.

1.5.2 Gaz Hidrojenin Yeraltında Depolanması

Hidrojenin yeraltında depolanması da sıkıştırılmış gaz halde depolamanın bir başka şeklidir. Hidrojenin yeraltında depolanması büyük miktarlardaki hidrojen için en düşük maliyetli depolama yöntemidir. Hidrojen yeraltında hem doğal, hem sonradan yapılan mağaralarda depolanabilmektedir. Yeraltındaki gaz depoları minimum

yatırım maliyeti gerektirirler. Fakat bu yöntemin bir dezavantajı depolanan basınçlı hidrojenin hacimce %5 oranında kayıplara uğramasıdır. Yeraltında depolamada maliyet arttırıcı nedenlerden biri depolama sistemi boşaltım çevriminin sonundayken oluşan gazdır. Bu gazın atılması ek bir maliyet gerektirmektedir. Yeraltında basınçlı hidrojen gazının depolanması için üç formasyon vardır.

Bunlar:

- Boşaltılmış petrol/gaz kuyuları,

- Çukur kaya mağaraları,

- Büyük tuz mağaraları.

Herhangi bir yeraltı depolama alanında bulunması gereken özellikler şunlardır:

- Yüzeyin altında (150-900 m) su geçiren yapıda gözenekli bir tabaka, genellikle kum ya da kumtaşı,

- Yeterli kalınlıkta hava geçirmeyen kaya başlık,

- Özellikle kubbe biçimli uygun jeolojik yapı.

Hidrojen gazı yeraltı deposuna sokulmadan önce katmanlarda oyuklar oluşturulur ve yüzey çimento veya benzeri kimyasallar ile kaplanır. Daha sonra hidrojen kompresör ile oyuklardan içeri enjekte edilir **(1)**.

1.5.3 Hidrojenin Metal Hidritte Depolanması

Hidrojenin metallerin içine emilme kapasitesi vardır ve bu şekilde metal hidritler oluşur. Hidrojenin bir metal tarafından emilme ve salıverilme işlemi birtakım parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin başlıcaları şunlardır:

- Hidrojenin basıncı,

- Metalin sıcaklığı,

- Hidrojenin akış oranı.

Bu yöntem hidrojenin kimyasal olarak metal, metaloid elementler ve alaşımlara bağlanması şeklinde depolanması yöntemidir. Metal hidritler, kafes yapısına sahip metal atomlarıyla bu kafes yapısı içinde ara yerlerde tutulmuş hidrojen atomlarından oluşmaktadır. Metal ve hidrojen genellikle iki farklı form oluşturur. Bu formlardan biri hidrojen depolamaya müsait iken diğeri tam dolu formdur. Doldurma aşamasında hidrojen tam dolu yüzeyden geçerek depolamaya uygun yüzeyi oluşturacak şekilde yayılır. Boşaltma sürecinde ise hidrojen tam dolu formdan depolama ya uygun formu oluşturacak şekilde dışarı difüze olarak H moleküllerini oluşturur.

Metal hidrit depolama sistemleri hidrojenin depolanması için en güvenli sistemlerdir. Metal hidritlerde genellikle 3 ile 6 MPa arası basınç altında hidrojen depolanabilir. Uygun metal alaşımları kafeslerinde hidrojen atomlarının yerleşebileceği boş yerler sağlarlar. Birçok metal alaşımı, metal hidrit oluştururken hidrojeni kimyasal dönüşümü mümkün olan ve çok güvenli bir şekilde depolayabilirler. Hidrojenin metallerle yaptığı kimyasal bağ ve reaksiyon ısısı birleşimiyle hidritler sadece hidrojeni değil aynı zamanda ısıyı da depolarlar. Hidritlerin hem sabit hem de hareketli teknik uygulamalarda kullanılabilmesi de bu ısı-hidrojen birleşimi sayesinde olmaktadır.

boşaltma

H_2 + Me hidrit + ısı

besleme

Metal hidritler hidrojeni ayrışabilir bir kimyasal bileşik halinde depolarlar. Gaz hidrojenle reaksiyona girerek metal hidrit oluşturabilen birçok element, metal ve alaşım bulunmaktadır. Bu tip reaksiyonlar genellikle aşağıdaki gibi gösterilir:

(2/x) Me + H_2 (2/x) MeH

Eğer bu reaksiyon uygun sıcaklık ve basınçlarda kolayca ve tekrar geri dönüşümlü olarak gerçekleşebiliyorsa, MeH şarj olabilen metal hidrit ve Me hidrojen depolama metal ya da alaşımı olarak adlandırılır. Bu şekilde gaz hidrojenin metal hidritte katı bir bileşik halinde depolanmasıyla, istenilen ve ihtiyaç duyulan anda tekrar gaz hidrojen elde edilebilir. Bu özelliğinin yanı sıra metal hidritlerin güvenliği ve özellikle sıvı hidrojene göre çok daha basit konteynerlerde saklanabilmeleri de diğer avantajlarıdır **(1)**.

1.5.4 Sıvı Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin atmosfer basıncında sıvılaşma sıcaklığı -253 °C gibi nispeten düşük bir sıcaklıktır. Bu yüzden sıvılaştırma işlemi yaklaşık olarak hidrojenin tutuşma enerjisinin %30'una yakın bir enerji gerektirir. Bu enerji elektrik enerjisi formunda olmalıdır. Buharlaşma kayıpları sıvı hidrojenin üretilme ve depolanmasındaki temel problemdir. Sıvılaştırma ünitesinden son kullanıma girene kadarki toplam kayıplar % 30-70 arasında olmaktadır. Sıvı hidrojenin depolandığı tank ne kadar büyük olursa kayıplar o kadar küçük bir yüzdede olacaktır. Sıvı hidrojenin depolandığı tanklar iç ve dış duvarları arasında vakum izolasyonludur. Günümüzde sıvı hidrojen hem büyük hem de küçük kapasitelerde depolanabilmektedir. Fakat sıvı hidrojen doğal gazın depolandığı silindirik tanklarda depolanamamaktadır. Bunun nedeni de yüksek buharlaşma kayıplarıdır. Ancak büyük miktarlarda gaz için ve uzun süreli depolamalarda sıvı hidrojenin depolanması en ekonomik metoddur.

1.6 HİDROJENİN TAŞINMASI

Hidrojen sıkıştırılmış gaz, sıvı ya da metal hidritlerle katı halde taşınabilir. En ucuz taşıma yöntemi, taşınacak hidrojenin miktarına ve taşıma yapılan yola bağlı olmaktadır. Hidrojenin taşınması için uygulanan ve burada incelenen metodlar, karayolu, demiryolu, denizyolu ve boru hatları olacaktır.

1.6.1 Sıkıştırılmış Gaz Hidrojenin Taşınması

Sıkıştırılmış gaz hidrojen yüksek basınçlı silindirler, tüp treylerler ve boru hatları kullanılarak taşınabilir. Hidrojen gaz halde taşınırken, tank kapasitelerini maksimize edebilmek için çok yüksek basınçlarla sıkıştırılmalıdır. 1.8 kg hidrojen kapasitesindeki yüksek basınçlı gaz silindirleri (40 MPa) taşıma ve iletim için çok pahalı olmaktadır. Çelik silindirlerden oluşan tüp treylerler, silindir sayısına bağlı olmak üzere 63-460 kg arası hidrojen taşıyabilirler ve çalışma basınçları 20-60 MPa'dır. Hidrojen Amerika, Kanada ve Avrupa'da boru hatlarıyla taşınmaktadır. Çalışma basınçları 1-3 MPa'dır. Dünyadaki en uzun hidrojen boru hattı kuzey Fransa ile Belçika arasındaki 400 km'lik Air Liquide firmasına ait boru hattıdır.

1.6.2 Sıvı Hidrojenin Taşınması

Sıvı hidrojen, özel çift duvarlı izoleli tanklarla, buharlaşmayı önleyebilecek şekilde taşınabilir. Isı transferini minimize edebilmek için sıvı hidrojen tankının dış yüzeyini soğutmak amacıyla bazı tankerlerde sıvı nitrojen ısı kalkanları kullanılır.

Tır tankları, 360-4300 kg sıvı hidrojen taşıyabilirken tren vagonlarıyla 2300-9100 kg mertebelerine ulaşan çok daha büyük miktarlarda sıvı hidrojen taşınabilmektedir. Her iki taşıma tipinde de buharlaşma kayıpları günlük %0.3-0.6 arasında olmaktadır. Gemi tankerleri uzun mesafeli taşımalar için kullanılmaktadır. Gemilerde buharlaşma kayıpları günlük %0.2-0.4 arasında olmaktadır.

Bir başka şekilde boru hatlarıyla sıvı hidrojen, süper iletken tel içeren izole edilmiş hatlarda taşınabilir. Sıvı hidrojen süper iletken için soğutucu görevi görür ve geleneksel güç hatlarının yüksek akım kayıpları olmadan elektriğin uzun mesafelere taşınmasını sağlar.

Sıvı hidrojenin taşınmasında ana problem özel izolasyon ihtiyacı ve sıvı hidrojenin pompalama ve soğutma kayıplarıdır.

1.6.3 Metal Hidritlerin Taşınması

Hidrojen metal hidrit tarafından absorbe edildikten sonra, metal hidrit tır ya da trene yüklenerek son kullanıcıya ulaştırılır ve boş hidrit konteyneri ile değiştirilir ya da konvensiyonel tanker olarak kullanılır. Metal hidritlerin taşınmasında maliyeti en çok etkileyen baş faktör ilk yatırım maliyeti olarak metal hidrit ve konteynerin maliyetidir. Bir kez doldurulduktan sonra hidrit konteynerleri herhangi bir kargo gibi mesafe ve ağırlığa bağlı olan maliyetle taşınırlar.

1.6.4 Hidrojenin Taşıma Şekillerinin Karşılaştırması

Hidrojenin taşınmasında seçimi etkileyecek ana faktörler uygulama, miktar ve üretim yerinden alıcıya olan mesafedir. Depolamada da bahsedildiği üzere, eğer hidrojen, uygulamada sıvı olarak gerekiyorsa sıvı halde uygulama alanına taşınmalıdır. Taşımada etkili olan faktörler ayrı ayrı incelenirse;

Miktar: Büyük miktarlardaki hidrojen için en ucuz taşıma yöntemi boru hatlarıyla taşımadır. Fakat okyanusların geçilmesi sözkonusu oluyorsa doğal olarak en ucuz yöntem sıvı hidrojenin tankerlerle taşınması olacaktır. Sıvı hidrojenin taşınması ikinci en ucuz iletim yöntemidir. Boru hattıyla taşımanın çalıştırma maliyetleri çok düşük olmasına rağmen ilk yatırım maliyeti çok yüksektir. Diğer tarafta sıvı hidrojenin de çalıştırma maliyetleri yüksek fakat ilk yatırım maliyetleri hidrojen miktarı ve taşıma yapılacak mesafeye bağlı olmak üzere daha düşüktür. Küçük miktarlardaki hidrojen için boru hattı karlı olmamaktadır. Çünkü boru hattına

yapılacak ilk yatırım maliyeti çok yüksek olacaktır. Bu durumda en uygun yöntem sıkıştırılmış gaz halde taşımadır. Sıvı hidrojenle kıyaslandığında sıkıştırılmış gaz hidrojenin enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyeti daha düşüktür. Her ne kadar aynı miktardaki hidrojen için daha fazla tüp treylere ihtiyaç duyulsa da ilk yatırım maliyeti çok daha aşağıda kalmaktadır. Bu ikisi arasında hangisinin ekonomik olarak tercih edileceği taşınacak mesafeye bağlı olmaktadır. Uzun mesafeler için sıvılaştırmanın yüksek enerji maliyeti dengeyi bozacaktır. Mesafe kısa ve miktar çok küçük ise sıkıştırılmış gaz hidrojen en uygun seçim olacaktır. Ayrıca kısa mesafeler için aynı tüp treyleri bir gün içersinde birden fazla defa kullanma söz konusu olabilmektedir. Metal hidrit taşıma maliyeti gaz ve sıvı hidrojenin arasında kalmaktadır. İlk yatırım maliyeti çok yüksek olmasına karşın metal hidrit sıkıştırılmış gaz hidrojene kıyasla çok daha fazla miktarlarda hidrojen taşıma kapasitesine sahip olduğundan tercih edilebilir.

Mesafe: Daha önce de değinildiği üzere mesafe taşıma maliyetleri üzerinde çok etkilidir. Kısa mesafeler için boru hatları çok ekonomik olmaktadır. Boru hattının ilk yatırım maliyeti tanker ya da tırların tüplerinin maliyetine yakın olmaktadır ve ek olarak taşıma ve sıvılaştırma maliyeti de bulunmamaktadır. Mesafe arttıkça boru hattının ilk yatırım maliyeti hızlı bir şekilde artmaktadır ve ekonomiklik taşınacak miktara bağlı kalmaktadır.

Mesafe sıvı ve sıkıştırılmış gaz hidrojen arasında bir karar faktörü olabilmektedir. Uzun mesafelerde aynı miktardaki gaz hidrojeni taşımak için gereken tır miktarı sıvı hidrojene gore çok daha fazla olacaktır. Yani uzun mesafedeki gaz hidrojeni taşıma maliyeti, sıvılaştırma maliyetleri eklenmiş sıvı hidrojeni taşıma maliyetinden daha fazla olmaktadır.

Güç Tedariği: Hidrojenle ilgili özel bir durum, enerjinin uzun mesafe iletimidir. Hidrojeni üretip boru hatlarıyla ısı ya da elektrik enerji ihtiyacı olan yere taşımak düşük enerji kayıplarından dolayı çok daha ucuz olmaktadır.

Hidrojenin taşınmasındaki yöntemleri kısaca en uygun koşullara göre özetleyecek olursak;

Boru hattı, büyük miktarlar ve uzun mesafelerdeki güç iletimi için,

Sıvı hidrojen, uzun mesafelere taşımada,

Sıkıştırılmış gaz, küçük miktarlar ve kısa mesafelerdeki taşımalarda,

Metal hidrit, kısa mesafelerde taşımada kullanılması en uygun yöntemlerdir.

1.7 KOMBİLER

Kombi; doğal gaz ve LPG yakan, doğal gazdan LPG'ye ve LPG'den doğal gaza çok kolaylıkla dönüştürülebilen konutun hem ısıtma, hem de kullanım sıcak suyu gereksinimi karşılayan, ilave bir şofbene ihtiyaç duyurmayan, Bu nedenle kısaca Kombi (İngilizcede Comined = Birleşik) olarak adlandırılan, 60-250m^2 kullanım alanı olan tek katlı, dubleks, tripleks konutlarda, lokantalarda, dükkanlarda, çeşitli iş yerlerinde rahatlıkla kullanabilen, hafif ve ufak boyutlu, kolaylıkla taşınabilen, duvara asılan, bu nedenle az yer kaplayan, kullanışlı, sessiz, kolay monte edilebilen, kullanıcıya bağımsız ısınma konforu sağlayan, içinde ısıtma sistemi için gereken pompa, genleşme tankı vb. diğer zorunlu sistem ve ekipmanları da sağlayan, paket tip bir cihazdır **(2)**.

1.7.1 Yoğuşmalı Kombiler

Baca gazından yararlanma durumuna göre yoğuşmalı kombiler.

Baca gazını yoğuşturarak baca gazından kaybedilen atık ısıyı (gizli ısı) geri kazanma sitemine göre çalışan cihazlarda yoğuşmalı cihaz, bunların aynı cihaz içinde hem ısıtma yapan, hem de sıcak kullanım suyu sağlayanlarına yoğuşmalı kombi denir.

1.7.1.1 Yoğuşmalı Cihazlarda Verim

Geleneksel kombi verimi (alt ısıl değer hesabına göre) hakkında bilgi verilmekten önce konunu net anlaşılması için aşağıda bazı tanımlamalar yapılmıştır.

1.7.1.1.1 Üst Isıl Değer (Ho)

Belirli bir sıcaklıktaki 1Nm3 gaz; tam yanma için gerekli minimum havayla karıştırılıp herhangi bir ısı kaybı olmadan yakıldığında ve yanma ürünleri karışımındaki su buharı yoğuşturularak başlangıç sıcaklığına kadar soğutulduğunda açığa çıkan ısı miktarıdır.

1.7.1.1.2 Alt Isıl Değer (Hu)

Belirli bir sıcaklıktaki 1Nm3 gaz, tam yanma için gerekli minimum havayla karıştırılıp herhangi bir ısı kaybı olmadan yakıldığında ve yanma ürünleri karışımımdaki su buharı yoğuşturulmadan, başlangıç sıcaklığına kadar soğutulduğunda açığa çıkan ısı miktarıdır. Tablo 6.1'de çeşitli yakıtların üst ve alt ısıl değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 1.3 Üst ve alt ısıl değer karşılaştırması

Yakıt özellikleri	Yakıt				
	Doğalgaz LL	Doğalgaz E	Propan	Butan	Motorin
Üst Isıl D. H_o	10,30 kWh/m^3	12,18kWh/m^3	28,11 kWh/m^3	37,17 kWh/m^3	12,61 kWh/kg
Alt Isıl D. H_u	9,30 kWh/m^3	11,02 kWh/m^3	25,88 kWh/m^3	34,32 kWh/m^3	11,80 kWh/kg
Oran H_o / H_u	1,11	1,11	1,09	1,08	1,06
Baca gazı yoğuşma sıc.	56°C	56°C	53°C	52°C	47°C

1.7.1.1.3. Yoğuşmalı Cihazlarda % 109 Verim

Geleneksel kombi verimi alt ısıl değere göre yapılmaktadır.

Geleneksel kombi verimi (alt ısıl değer hesabına göre);

Giren enerji 100 kWh

Kayıp toplamı 2+8 kWh = 10 kWh

Elde edilen enerji 90 kWh

Verim 90/100 (%90) bulunur.

Kombi verimi (üst ısıl değer hesabına göre);

Giren enerji 111 kWh

Kayıp toplamı 2+8+11=21 kW/h

Elde edilen enerji 90 kWh

Verim 90/111 (%81) bulunur.

Yoğuşmalı kombi verimi (üst ısıl değer hesabına göre);

Giren enerji 111 kWh

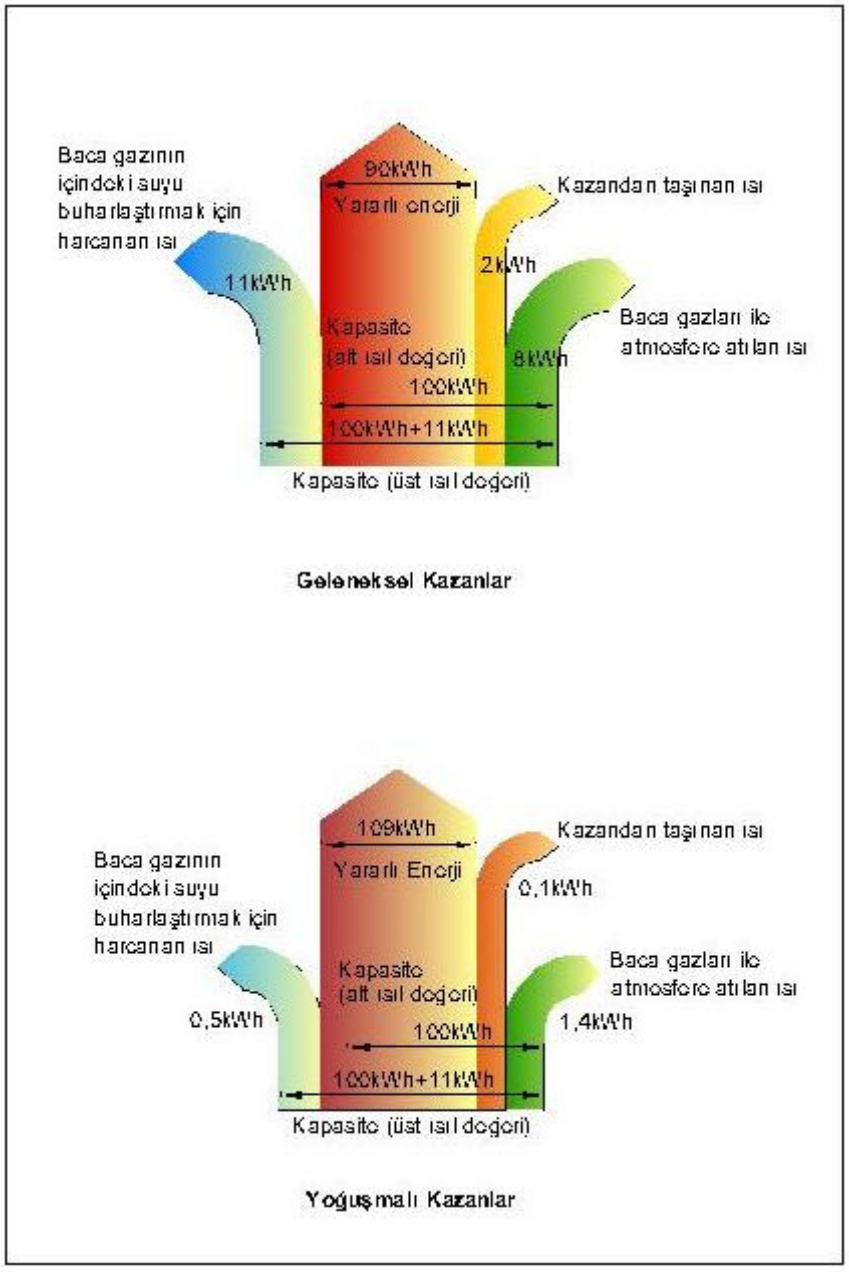
Elde edilen enerji 109 kWh

Verim 109/111 (%98) bulunur.

Yoğuşmalı kombi verimi (alt ısıl değer hesabına göre);

Kayıp Toplamı 0,1 +1,4+0,5=2 kWh

Verim 109/100 (%109) bulunur.



Şekil 1.1 Kazanlarda enerji dağılımı

BÖLÜM 2

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürde, yoğuşmalı kombilerde yoğuşma suyunun elektrolizi sonucunda elde edilen hidrojenin doğalgaza takviye edilerek yakılmasının sistem performansı üzerindeki etkilerini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Fakat suyun elektrolizi ve ekserji konusunda çok sayıda çalışma mevcuttur.

Rzayeva, M.P., Salamov, O.M ve Kerimov, M.K. **(3)**, basınç altında sudan hidrojen ve oksijen üretimi için bir matematik model vermişlerdir. Sistemin blok şeması ve buna uygun pratik ve uygulanabilir Software hazırlamışlardır.

Kato, T., Kubota, M., Kobayashi, N. ve Suzuoki, Y. **(4)**, Fosil yakıtların kullanımında sakınca olduğunu hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Kikuchi, K., Tanaka, Y., Saihara, Y., Maeda, M., Kawamura, M. ve Ogumi, Z. **(5)**, elektroliz edilen suda nano mertebesinde bulunan hidrojen konsantrasyonu üzerinde çalıştılar.

Kida, T., Guan, G., Yoshida, A. **(6)**, düşük ısıl ışınımı altında sudan hidrojen üretimi için yeni bir fotokatalist geliştirmişlerdir.

Martinez-Frias, J., Pham, A-Q., Aceves, S.M. **(7)**, yüksek verimli hidrojen üretimi için doğal gaz destekli buhar elektrolizine ait çalışma yapmışlardır.

Ohta ve Veziroğlu **(8)**, güneş enerjisinden yararlanarak hidrojen üretimi üzerinde çalışma yapmışlardır.

Ohta, Kamiya, Yamaguchi, Gotah, Otogawa ve Asakura **(9)**, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü üzerinde durmuşlardır.

Esteve, Ganibal, Steinmatz ve Viayanoh **(10)**, fotovoltaik elektrikli sistemin performansı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.

Koukouvinos, Lygerou-Koumoutsas **(11)**, suyun elektroliz yoluyla hidrojene ayrıştırılarak enerji depolama için sistem dizaynı üzerinde çalışmışlardır.

Carpetis **(12)**, fotovoltaik güneş enerji dönüşümü ile elde edilen elektrik enerjisini kullanarak suyun elektrolizini gerçekleştirmiştir.

Morner, Beckman ve Klein **(13)**, Schatz güneş hidrojen projesinden elde ettikleri sonuçları fotovoltaik hidrojen sisteminin simülasyon sonuçları ile karşılaştırmasını yapmışlardır.

Siegel ve Schatt **(14)**, fotovoltaik hidrojen üretiminin optimizasyonu ile ilgili çalışmışlardır.

Carpetis **(15)**, fotovoltaik enerji dönüşümü yardımıyla elektrolitik hidrojen üretimi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Gretz **(16)**, hidrojen ve diğer yakıtlara güneş enerji dönüşümün potansiyeli ile ilgili çalışma yapmıştır.

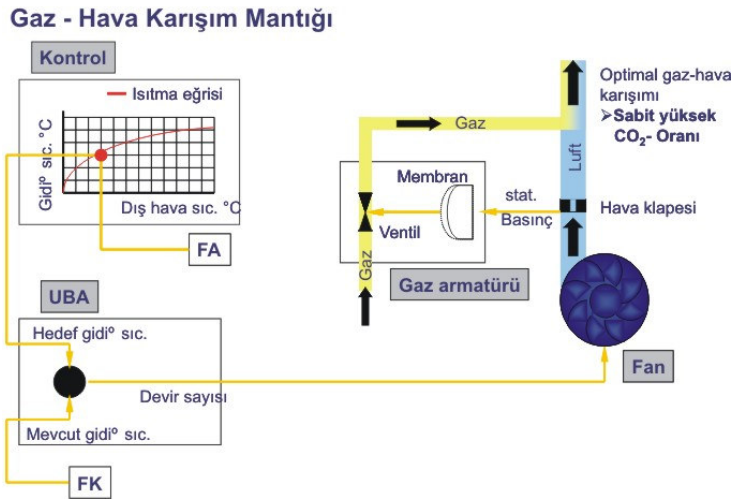
Tani, Sekiguchi, Jakai ve Ohta **(17)**, hidrojen üretim maliyetini esas alan güneş hidrojen sistemlerinin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada fotovoltaik modül ile elde ettikleri elektrik enerjisini hidrojen jeneratöründe kullanarak jeneratörün H_2 ve fotovoltaik sistemin akım/voltaj karakteristiklerini ölçmüş ve analiz etmişlerdir.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOD

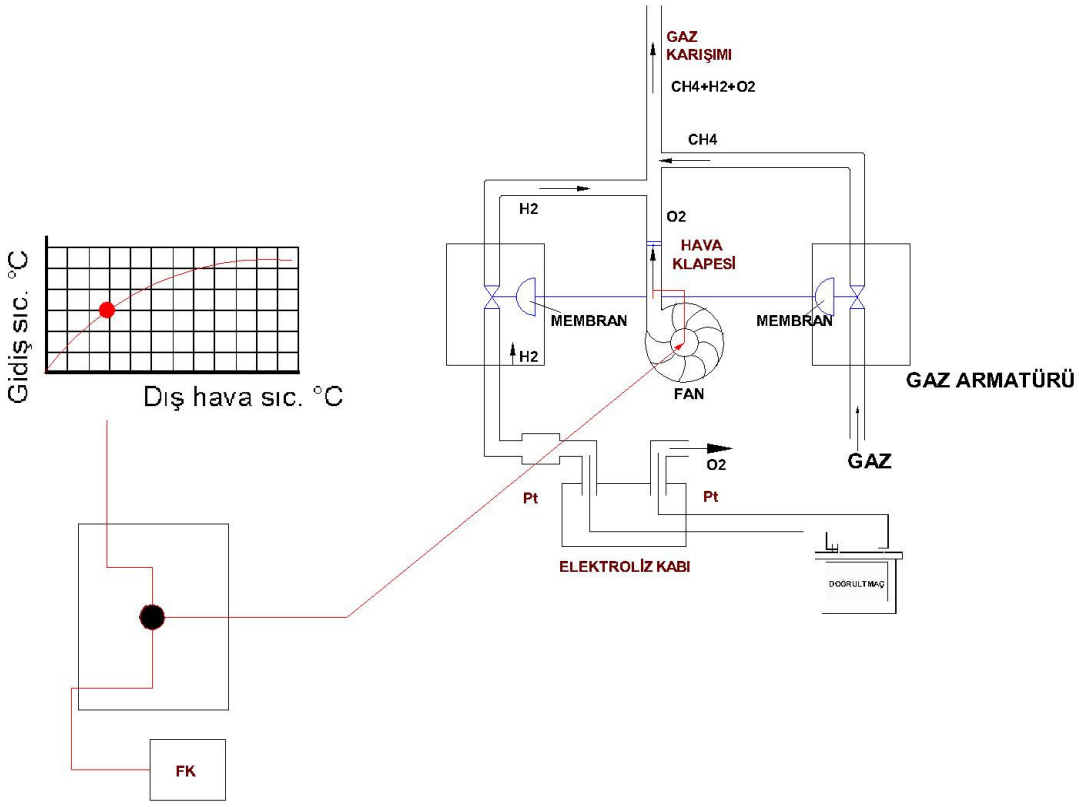
3.1 MATERYAL

Şekil 3.1'de yoğuşmalı bir kombinin çalışma prensibi gösterilmektedir. Oda sıcaklığı ve dış hava sıcaklığına göre hesaplanan bir eğri üzerinde, o anki dış hava sıcaklığına göre bir hedef gidiş suyu sıcaklığı belirlenir Bu bilgi UBA'ya gönderilir. UBA'ya kazan sensöründen de o anki kazan suyu sıcaklığı bilgisi gelir. UBA iki değeri karşılaştırır ve fana istediği kazan kapasitesi kadar bir gerilim gönderir. Kazan o kapasitede yanar. Yanma için gerekli olan gaz, fan ile kontrol edilen gaz armatürü vasıtasıyla ayarlanır.



Şekil 3.1 Yoğuşmalı kombinin çalışma prensibi

Şekil 3.2'de elektroliz kaplı kombinin çalışma prensibi gösterilmektedir. Bu kombide hidrojeni yakıt olarak doğalgaza takviye etmek için ikinci bir gaz armatürü kullanılacaktır. Doğalgaz ve hidrojen için ayrı ayrı kullanılacak gaz armatürleri bir fan vasıtasıyla kontrol edilecektir. Yakıtların yanması sonucu oluşan baca gazı içindeki su buharından yoğuşan su, elektroliz kabında toplanacak ve bu sudan elektroliz yöntemiyle hidrojen elde edilecektir. Suyun elektrolizinin gerçekleşmesi için kullanılan elektrik akımı, alternatif akımı doğru akıma çeviren bir doğrultmaçtan elde edilecektir.



Şekil 3.2 Elektroliz kaplı kombinin çalışma prensibi

3.2. METOD

Sistemin verim hesabı ve ekserji analizi; kütlenin ve enerjinin korunumu ilkeleri, termodinamiğin ikinci yasası ile mükemmel (ideal) gaz hal denkleminden faydalanılarak yapılmıştır.

Bir kimyasal reaksiyon sırasında moleküllerin atomları arasındaki bağlar bozulur ve yerlerine yenileri oluşur. Bu bağlarla ilişkili olan kimyasal enerji genellikle yanma işlemine giren ve yanma işleminden çıkan maddeler için farklıdır. Bu nedenle, içinde bir kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği hal değişiminde, enerji korunumunda gözönüne alınması gereken kimyasal enerjiler söz konusu olur. belirli bir halde bulunan bir maddenin, kimyasal bileşiminden kaynaklanan entalpisi oluşum entalpisidir.

Enerjinin korunumu bağıntısında oluşum entalpileri de dikkate alınmıştır.

BÖLÜM 4

TEORİ

T_o sıcaklık ve P_o basınçtaki n kmol yakıtın sürekli akışlı adyabatik bir yanma odasında aynı halde bulunan oksijenle stokiometrik olarak yandığı kabul edilmiştir.

Bir yakıtın tam olarak yanması için gerekli en az hava miktarına, stokiometrik veya teorik hava adı verilir. Böylece bir yakıt teorik havayla tam olarak yandığı zaman yanma sonu ürünleri arasında serbest oksijen bulunmaz. Yakıtın teorik havayla tam olarak yandığı ideal bir yanma işlemi, yakıtın stokiometrik veya teorik yanması diye bilinir.

4.1 ALT ISIL DEĞERİN BULUNMASI

Yanma işlemine girenler ve yanma işleminden çıkanlar aynı halde oldukları zaman bu işlem sırasında olan entalpi değişimi sadece sistemin kimyasal bileşiminde olan değişikliklerin sonucudur. Bu entalpi değişimi değişik reaksiyonlar için farklıdır, bu nedenle bir reaksiyon sırasında gerçekleşen kimyasal enerji değişimini ifade eden bir büyüklüğün tanımlanmasında yarar vardır. Bu büyüklük reaksiyon entalpisi olup, yanma işlemleri için yanma entalpisi diye adlandırılır (hc).

Bir yakıtın ısıl değeri, yakıtın yanma entalpisinin mutlak değerine eşittir. Isıl değer = |hc| (kJ/kmol yakıt).

Isıl değer, yanma sonu ürünleri içindeki H_2O'nun bulunduğu faza bağlıdır. Yanma sonu ürünleri içindeki H_2O buhar fazındaysa alt ısıl değer adını alır (Low Heat Value (LHV))

Alt ısıl değer hesaplanırken, yanma sonu ürünlerinin ve yanma işlemine girenlerin hali standart referans hali olan 25 ^oC sıcaklık ve 1 atmosfer basınç olarak kabul edilir.

Kuru havayı oluşturan karışanların mol oranları yaklaşık % 21 O_2 ve % 79 N_2 olarak kabul edilir. Böylece yanma işlemine giren her mol oksijenin yanında 0,79/0,21 = 3,76 mol azot bulunur. Başka bir anlatımla **(18)**;

1 kmol O_2 + 3,76 kmol N_2 = 4,76 kmol hava olur. Buna göre yanma denklemi aşağıda gösterildiği gibi yazılır;

$$CH_4 + 2\,(O_2 + 3{,}76\,N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}52\,N_2 \qquad (4.1)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildiği zaman, kimyasal reaksiyonun olduğu sürekli akışlı açık bir sistemde enerjinin korunumu bağıntısı, iş etkileşimi olmadığı için aşağıda gösterildiği gibi yazılır.

$$Q = \sum n_{ç}\,(\bar{h}_f^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_{ç} - \sum n_g\,(\bar{h}_f^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_g \qquad (4.2.)$$

$\bar{h}_f^{\,o}$, standart referans halinde bulunan bir maddenin, kimyasal bileşiminden kaynaklanan entalpisi olarak açıklanabilir (oluşum entalpisi). $(\bar{h} - \bar{h}^{o})$, standart referans haline göre duyulur entalpiyi göstermektedir.

Yanma işlemine girenlerin ve yanma işleminden çıkanların standart referans halinde (25 ^oC sıcaklık ve 1 atmosfer basınç) oldukları ve O_2 ile N_2 kararlı elementlerinin oluşum entalpilerinin sıfır olduğu gözönüne alınırsa (4.2) bağıntısı aşağıdaki hale gelir.

$$Q = \sum n_{ç}\,\bar{h}_{f^o_{ç}} - \sum n_g\,\bar{h}_{f^o_g} \qquad (4.3)$$

Alt ısıl değer LHV = $|Q|$ ifadesine eşittir.

(4.3) bağıntısında yanma sonu ürünleri içindeki su buhar fazındadır.

4.2 ÜST ISIL DEĞERİN BULUNMASI

Isıl değer, yanma sonu ürünleri arasındaki H_2O sıvı fazında olduğu zaman üst ısıl değer adını alır (High Heat Value (HHV)).

İki ısıl değer arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıyla verilmiştir.

$$HHV = LHV + (n\bar{h}_{fg})_{H_2O} \quad (4.4)$$

burada n, 1 kmol yakıt için H2O'nun yanma sonu ürünleri içindeki mol miktarı, $\bar{h}_{fg}$ ise suyun 25 ^{o}C sıcaklıktaki buharlaşma entalpisidir.

4.3 YANMA SONU ÜRÜNLERİNİN ÇİĞ NOKTASI SICAKLIĞININ BULUNMASI

Yanma sonu ürünlerinin çiğ noktası sıcaklığı, yanma sonu ürünlerinin sabit basınçta soğutulması durumunda yoğuşmanın başlayacağı sıcaklıktır.

Bir gaz-buhar karışımının çiğ noktası, karışımdaki su buharının kısmi basıncına karşı gelen doyma sıcaklığıdır. Bu nedenle öncelikle yanma sonu ürünleri içindeki su buharının kısmi basıncı P_υ'nin bulunması gerekir.

Yanma sonu gazların mükemmel bir gaz karışımı gibi ele alınırsa,

$$P_\upsilon = \left(\frac{n_\upsilon}{n_ç} \right) \cdot P_ç \quad (4.5)$$

bağıntısı yazılabilir.

Ek 1'den P_υ basınç değerine karşılık gelen T_{doyma} sıcaklığı bulunur.

4.4 ELEKTROLİZ

Elektroliz, bir bileşiğin elektrik akımı ile daha basit maddelere ayrıştırılmasıdır.

2 su melokülü, 4 pozitif yüklü hidrojen ve 2 negatif yüklü oksijen iyonuna ayrılırlar. Her bir oksijen iyonu bir hidrojen iyonu ile birleşerek 2 hidroksit iyonu oluşturur. 2 hidrojen iyonu ise kalır ve herbiri 2 hidrojen atomunu oluşturmak için katotta 2 elektrona bağlanırlar. Hidrojen çift atomlu bir molekül olduğu için 2

hidrojen atomu 1 adet hidrojen molekülüne dönüşür. Elektrik suyun iletkenliğini arttırarak, iyonların anoda doğru çekilmesine izin verir ve 2 negatif hidroksit iyonu da anoda gider **(19)**.

Bir elektrolizde, elektrik reaksiyonlarının başlaması için gerekli olan minimum potansiyele ayrışma gerilimi denir. Teorik ayrışma gerilimi anot ve katodun denge haline karşı gelen elektron potansiyelleri Nernst denklemi ile hesaplanarak bulunabilir.

$$V_{AG} = V_{Katot} - V_{Anot} \qquad (4.6)$$

Suyun elektroliz ile ayrışma reaksiyonu $2H_2O=2H^+ + 2OH^-$ denklemi göz önüne alındığında;

Katotta hidrojen çıkışı : $2H^+ + 2e^- = H_2$

Anotta oksijen çıkışı : $2OH^- = 1/2O_2 + H_2O + 2e^-$

Toplam reaksiyon : $2H^+ + 2OH^- = H_2 + 1/2O_2 + H_2O$

şeklinde yürür. Suyun elektrolizinde ayrışma gerilimi şöyle hesaplanır;

Katot potansiyeli;

$$V_{Katot} = V^o - 0{,}059/2.\log(10^{-7})2 \qquad (4.7)$$

$V_{Katot} = 0{,}413$ Volt

Anot Potansiyeli;

$$V_{Anot} = V^o - 0{,}059/2.\log(1/10^{-7})2 \qquad (4.8)$$

$V_{Anod} = -0{,}814$ Volt

Suyun teorik ayrışma gerilimi (4.6) bağıntısına göre

$E_{AG} = V_{Katot} - V_{Anot}$

E_{AG} = 0,413 - (-0,814) = 1,227 Volt bulunur. Bu değer suyun teorik ayrışma gerilimidir. Gerçekte suyun ayrışması için her iki elektrotta oluşan aşırı gerilimlerin de yenilmesi gerekir. Suyun gerçek ayrışma gerilimi 1,7 Volt'tan daha yüksektir.

1 kmol e^- yükü = 96500.10^3 Coulumb'dur.

Bir elektroliz devresinden, t zamanda I akım şiddetiyle geçen yük miktarı (4.9) bağıntısıyla bulunur.

$$Q = I \cdot t \qquad (4.9)$$

$Q \rightarrow$ Yük miktarı (Coulumb)

$I \rightarrow$ Akım şiddeti (Amper)

$t \rightarrow$ Zaman (Saniye)

elektroliz işleminde yapılan elektrik işi,

$$W_{el} = V \cdot I \cdot \Delta t \qquad (4.10)$$

bağıntısıyla bulunur.

4.5 HİDROJEN TAKVİYELİ METANIN YANMA REAKSİYONU

Elektroliz ile elde edilen H_2 gazı CH_4 gazı ile birlikte reaksiyona girecektir. Bu gaz karışımının yanma reaksiyonu aşağıda gösterildiği gibi yazılır.

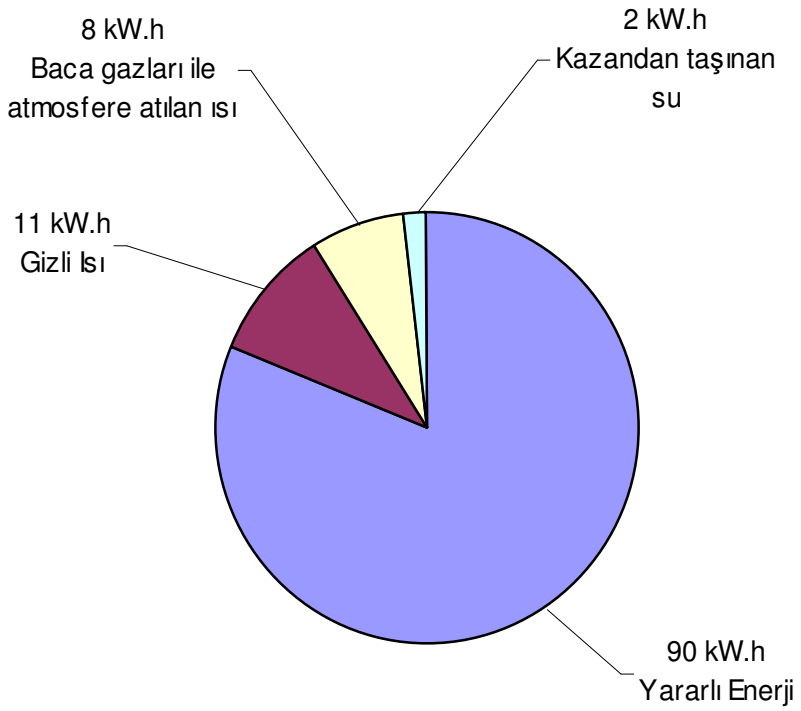
$$CH_4 + H_2 + 2{,}5\,(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 3H_2O + 9{,}4N_2 \qquad (4.11)$$

4.6 SİSTEM VERİMİNİN ALT ISIL DEĞERE GÖRE BULUNMASI

Isısan Buderis, Vaillant ve Alarko Carrier gibi kombi üreten firmalar, kombi verimini alt ısıl değere göre hesaplamaktadırlar.

Bu hesap yönteminde sisteme giren enerji sadece yakıtın alt ısıl değeri olmakta ve bu değer % 111 bir enerjide % 100'lük bir bölümü kaplamaktadır.

Örneğin % 90 verime sahip bir kombinin üretici firma tarafından hazırlanan kataloglarında belirtilen enerji dağılımı Şekil 4.1'deki gibidir **(2)**.



Şekil 4.1 % 90 Verime sahip bir kombinin enerji dağılımı

% 100 → Alt Isıl Değer

% 111 → Üst Isıl Değer

Yukarıda belirtilen enerji dağılımından da anlaşıldığı gibi verim hesabı suya verilen ısı baz alınarak yapılmaktadır **(2)**.

Alt ısıl değere göre verim aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$\eta = \frac{\text{Yararlı Enerji}}{\text{Yakıtın Alt Isıl Değeri}} = \frac{Q_{\text{çıkan}}}{\text{LHV}} \qquad (4.12)$$

4.6 SİSTEMİN GENEL VERİMİNİN BULUNMASI

Bir elektrik alanında, bir tel içindeki elektronlar elektromotor kuvvetlerin etkisi altında hareket ederler ve iş yaparlar. Bu iş elektrik işi olarak tanımlanır.

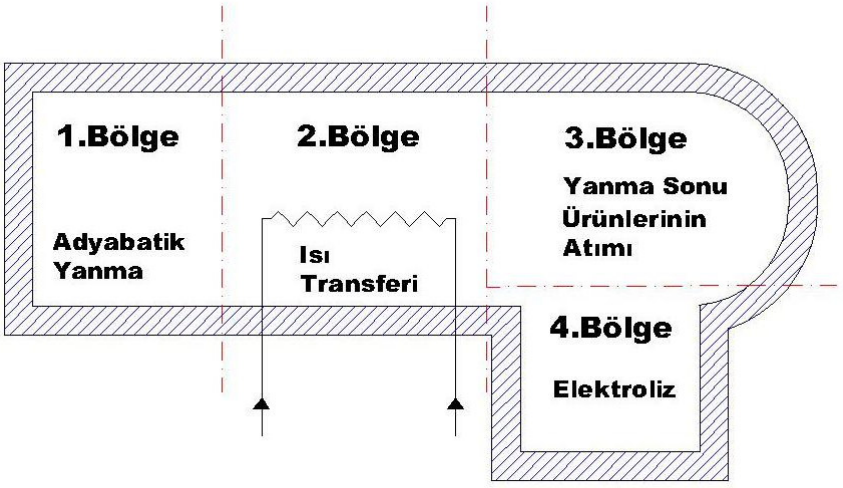
Suyun elektrolizinde elektrik işi kullanılır. Bu durumda sistemin genel verimi aşağıdaki bağıntıyla bulunur.

$$\eta = \frac{\text{Sistemden Alınan Enerji}}{\text{Sisteme Giren Enerji}} = \frac{Q_{\text{çıkan}}}{Q_{\text{giren}} + W_{\text{elk}}} \tag{4.13}$$

4.7 EKSERJİ ANALİZİ

Bir sistemden elde edilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimiyle ($S_{\text{üretim}} = 0$) çevrenin bulunduğu hale (ölü hale) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyelini veya iş yapma olanağını göstermektedir ve ekserji diye adlandırılır.

Şekil 4.2'de elektroliz kaplı kombi dört bölüm halinde gösterilmiştir. Her bir bölge için tersinmezlik (yitirilen iş yapma olanağı) bulunmuştur.



Şekil 4.2 Elektroliz kaplı kombinin bölümleri

4.7.1 Adyabatik Alev Sıcaklığının Bulunması (T_2)

İş etkileşimleri, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri olmadığı zaman, bir yanma işlemi sırasında açığa çıkan kimyasal enerji ya ısı geçişiyle çevreye verilir ya da sistemin içinde kalıp yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarının yükselmesini sağlar. Çevreye ısı geçişi ne kadar az olursa, sıcaklık yükseklemesi de o kadar fazla olur. Bir uç durum olarak, çevreye ısı geçişi olmazsa (Q = 0), yanma sonu ürünlerinin sıcaklığı en yüksek değere ulaşır. Bu değere, reaksiyonun adyabatik alev veya adyabatik yanma sıcaklığı denir **(18)**.

Sürekli akışlı bir yanma işleminin adyabatik alev sıcaklığı;

$$H_{yiç} = H_{yig} \tag{4.14}$$

veya

$$\sum n_{ç} (\bar{h}_f^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_{ç} = \sum n_g (\bar{h}_f^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_g \tag{4.15}$$

bağıntısıyla belirlenir.

Yanma işlemine girenlerin tümünün standart referans halinde oldukları ve O_2, N_2 ile H_2 için $\bar{h}_f^{\,o} = 0$ olduğu göz önüne alınırsa (4.15) denklemi aşağıda yazıldığı şekilde sadeleşebilir.

$$\sum n_{ç} (\bar{h}_f^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_{ç} = \sum n_g \bar{h}_{f\,g}^{\,o} \tag{4.16}$$

4.7.2 Birinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

Birinci bölge için tersinmezlik (yitirilen iş yapma olanağı) (4.17) denklemiyle bulunur **(20)**.

$$E_I = E_F - E_2 \tag{4.17}$$

E_F, yakıtın ekserjisi olup (4.18) denklemiyle bulunur.

$$E_F = n_{CH_4} \cdot \varepsilon^{o}_{CH_4} \tag{4.18}$$

Yanma sonu ürünlerinin ikinci bölgeye girişteki ekserjisi (E_2),

$$E_2 = n_{P2} \cdot \varepsilon^{o}_{P_2} + \sum_k n_k \varepsilon_{ph,k} \tag{4.19}$$

denklemiyle bulunur.

İkinci bölgeye girişte, yanma sonu ürünlerinin kimyasal ekserjisi ($\varepsilon^{o}_{P_2}$),

$$\varepsilon^{o}_{P_2} = \sum_k X_k \cdot \varepsilon^{o}_k + R_u . T^o . \sum_k X_k \, \mathrm{In} X_k \tag{4.20}$$

denklemiyle bulunur.

Yanma sonu ürünlerinin ikinci bölgeye girişte fiziksel ekserjisi $\left(\sum_k n_k . \varepsilon_{ph,k} \right)$,

$$\sum_k n_k \varepsilon_{ph,k} = (T_2 - T_o) \sum_k n_k . c_p{}^{\varepsilon}{}_{,k} + R_u . T_o \, \mathrm{In}(P/P_o) \tag{4.21}$$

denklemiyle bulunur.

$P = P_o$ olduğu zaman (4.20) bağıntısı aşağıda yazıldığı gibi sadeleşebilir.

$$\sum_k n_k \varepsilon_{ph,k} = (T_2 - T_o) \sum_k n_k . c_p{}^{\varepsilon}{}_{,k} \tag{4.22}$$

4.7.3. İkinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

İkinci bölge için tersinmezlik (yitirilen iş yapma olanağı) (4.23) denklemiyle bulunur.

$$I_{II} = [E_2 - (E_3 + E_4)] - (E_{s2} - E_{s1}) \tag{4.23}$$

Isıtılan su miktarı, (4.24) denklemiyle bulunur.

$$m_s = \frac{(H_2 - H_3 + Q_{gizli})}{(h_2 - h_1)} \qquad (4.24)$$

(H_2), yanma sonu ürünlerinin ikinci bölgeye girişte sahip olduğu entalpi olup, (4.25) denklemiyle bulunur.

$$H_2 = (T_2 - T_o) \sum_k \; n_k \; c_p{}^{h}{}_{,k} \qquad (4.25)$$

(H_3), yanma sonu ürünlerinin üçüncü bölgeye girişte sahip olduğu entalpi olup, (4.26) denklemiyle bulunur.

$$H_3 = (T_3 - T_o) \sum_k \; n_k \; c_p{}^{h}{}_{,k} \qquad (4.26)$$

Q_{gizli}, yanma sonu ürünleri içindeki su buharının yoğuşurken verdiği ısı olup, (4.27) denklemiyle bulunur.

$$Q_{gizli} = n_{H_2O} . \bar{h}_{fg} \qquad (4.27)$$

$(E_{s_2} - E_{s_1})$,ısıtılan suyun ekserjisindeki artış olup (4.28) denklemiyle bulunur.

$$E_{s_2} - E_{s_1} = m_s \left[(h_2 - h_1) - T_o (s_2 - s_1) \right] \qquad (4.28)$$

(E_3), yanma sonu ürünlerinin üçüncü bölgeye girişte sahip olduğu ekserji olup, (4.29) denklemiyle bulunur.

$$E_3 = E_3{}^{o} + (E_{ph})_3 \qquad (4.29)$$

$E_3{}^{o}$, yanma sonu ürünlerinin üçüncü bölgeye girişte sahip olduğu kimyasal ekserji olup, (4.30) denklemiyle bulunur.

$$E_3{}^{o} = n_{p_3} \left[(\sum_k \; X_k \cdot \varepsilon_k^{o}) + (R_u . T_o . \sum_k \; X_k \; \mathrm{In}\, X_k) \right] \qquad (4.30)$$

$(E_{ph})_3$, Üçüncü bölgeye girişte yanma sonu ürünlerinin sahip olduğu fiziksel ekserji olup, (4.31) denklemiyle bulunur.

$$(E_{ph})_3 = (T_3 - T_o)\sum_k n_k \bar{c}^{\varepsilon}_{p,k} R_u T_o \, In(P/P_o) \quad (4.31)$$

P = P^o olduğu zaman (4.31) denklemi, (4.32) denklemine sadeleşebilir.

$$(E_{ph})_3 = (T_3 - T_o)\sum_k n_k \bar{c}^{\varepsilon}_{p,k} \quad (4.32)$$

E_4, sıvı haldeki suyun (su buharının yoğuşması sonucunda elde edilen su) dördüncü bölgeye girişte sahip olduğu ekserji olup, (4.33) denlemiyle bulunur.

$$E_4 = n_{H_2O}\left[\bar{\varepsilon}^{o}_{H_2O} + (\bar{h}_f - \bar{h}_{f_o}) - T_o(\bar{s}_f - \bar{s}_{f_o})\right] \quad (4.33)$$

4.7.4 Üçüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

Üçüncü bölgede yanma sonu ürünleri kullanılmadan dışarı atıldığı için tersinmezlik $I_{III} = E_3$ değerine eşittir.

4.7.5 Dördüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

Dördüncü bölge için tersinmezlik (yitirilen iş yapma olanağı), (4.34) denklemiyle bulunur.

$$I_{IV} = (E_4 + W_{elk}) - (E_{H_2} + E_{O_2}) \quad (4.34)$$

Dördüncü bölgeden çıkışta standart referans halinde bulunan H_2 ve O_2'nin ekserjilerinin toplamı $(E_{H_2} + E_{O_2})$,

$$E_{H_2} + E_{O_2} = n_{H_2} \cdot \bar{\varepsilon}^{o}_{H_2} + n_{O_2} \cdot \bar{\varepsilon}^{o}_{O_2} \quad (4.35)$$

denklemiyle bulunur.

4.7.6. Sistemin Ekserji Veriminin Bulunması

Bu sistem için ekserji verimi (4.36) denklemiyle bulunur.

$$\eta = \frac{E_{s_2} - E_{s_1}}{E_{CH_4} + W_e} \quad (4.36)$$

BÖLÜM 5

NÜMERİK DEĞERLENDİRME

Nümerik değerlendirmede aşağıdaki kabullerden faydalanılmıştır.

25 ^{o}C sıcaklık ve 1 atmosfer basınçtaki 1 kmol CH_4 gazının sürekli akışlı adyabatik bir yanma odasında aynı halde bulunan oksijenle stokiometrik olarak yandığı kabul edilmiştir.

Normal bir kombinin bir saatte 2,5 m^3 CH_4 gazı yaktığı kabul edilmiştir.

Yanma sonu ürünlerinin 1 atm toplam basınçta sistemden çıktığı kabul edilmiştir.

5.1 ALT ISIL DEĞERİN BULUNMASI

$$CH_4 + 2(O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}52\ N_2 \qquad (4.1)$$

$$Q = LHV = \sum n_ç . \bar{h}_{f_ç}^{\ o} - \sum n_g . \bar{h}_{f_g}^{\ o} \qquad (4.3)$$

$\bar{h}_{f_g}^{\ o}$ değerleri Ek 1'den bulunur.

Tablo 5.1 Bazı maddelerin oluşum entalpisi ve entalpi değerleri

Madde	$\bar{h}_f^{\ o}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298K}$ kJ/kmol
CH_4	-74850	-
O_2	0	-
N_2	0	-
$H_2O_{(gaz)}$	-241820	-
CO_2	-393520	-

1 kmol CH_4 gazı için Q değeri;

Q = (1kmol CO_2) (-393520 kJ/kmol CO_2)

+ (2 kmol H_2O) (-241820 kJ/kmol H_2O)

- (1 kmol CH_4) (-74850 kJ/kmol CH_4)

Q = -802310 kJ/kmol CH_4 bulunur.

1 kmol CH_4 gazı yandığı zaman açığa çıkan ısı 802310 kJ olmaktadır. Bu değer altısıl değere eşittir.

LHV = 802310 kJ

5.2 ÜST ISIL DEĞERİN BULUNMASI

$$HHV = LHV + (n\bar{h}_{fg})\ H_2O \qquad (4.4)$$

1 kmol CH_4 gazı için $n_{H_2O} = 2$ kmol'dür.

25 ^oC için Ek1'den, $\bar{h}_{fg} = 43998{,}03$ kJ/kmol bulunur.

HHV = (802310 kJ/kmol CH_4) + [(2 kmol H_2O/kmol CH_4) . (43998,03 kJ/kmol) H_2O]

HHV = 890306,06 kJ/kmol CH_4 bulunur.

5.3 % 93,5 VERİME SAHİP KOMBİ

% 93,5 verime sahip kombide baca gazı sıcaklığı 79 ^oC'dir.

$$Q = \sum n_ç (\bar{h}_f{}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_ç - \sum n_g (\bar{h}_f{}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_g \qquad (4.2)$$

Yanma işlemine girenlerin tümünün standart referans halinde oldukları ve O_2 ile N_2 için $\bar{h}_f^{\,o} = 0$ olduğu göz önüne alınırsa (4.2) bağıntısı aşağıdaki yazıldığı gibi sadeleşebilir.

$$Q = \sum n_ç (\bar{h}_f^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_ç - \sum n_g \bar{h}_f^{\,o}{}_g \qquad (5.1)$$

$\bar{h}_f^{\,o}$ değerleri Ek7'den, $\bar{h}$ değerleri Ek2, Ek4 ve Ek6'dan bulunur.

Tablo 5.2 Bazı maddelerin oluşum entalpisi ve entalpi değerleri

Madde	$\bar{h}_f^{\,o}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298K}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{393K}$ kJ/kmol
CH_4	-74850	-	-
O_2	0	-	-
N_2	0	8669	11435
$H_2O_{(gaz)}$	-241820	9904	13117
CO_2	-393520	9364	13084

1 kmol CH_4 gazı için Q değeri;

Q = (1 kmol CO_2) [(-393520 + 13084 - 9364) kJ/kmol CO_2]

+ (2 kmol H_2O) [(-241820 + 13117 - 9904) kJ/kmol H_2O]

+ (7,52 kmol N_2) [(0 + 11435 - 8669) kJ/kmol N_2]

- (1 kmol CH_4) (-74850 kJ/kmol CH_4)

Q = -771363,68 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Kombinin saatte 2,5 m^3/h CH_4 gazı yaktığı kabul edilmiştir.

25 ^oC CH_4 gazı için υ (özgül hacim) mükemmel gaz denkleminden bulunur.

$$\upsilon = \frac{R.T}{P} \qquad (5.2)$$

$R \rightarrow 0{,}5182$ kJ/kg.K

$T \rightarrow 298$ K

$P \rightarrow 101{,}325$ kPa

$$\upsilon = \frac{(0{,}5182\,kJ/kg.K)}{(101{,}325\,kPa)} = 1{,}52 m^3/kg$$

Yoğunluk (ρ);

$$\rho = \frac{1}{\upsilon} \qquad (5.3)$$

$$\rho = \frac{1}{(1{,}52 m^3/kg)} = 0{,}66 kg/m^3$$

Hacimsel debi $(\dot{V})$ 2,5 m^3/h olduğuna göre kütlesel debi;

$$\dot{m} = \rho . \dot{V} \qquad (5.4)$$

$\dot{m}$ = (0,66 kg/m^3) . (2,5 m^3/h)

$\dot{m}$ = 1,65 kg/h bulunur.

1 kg CH_4 gazı yandığı zaman açığa çıkan ısı aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$q = \frac{Q}{m} \qquad (5.5)$$

$$q = \frac{-771363{,}68\,kJ/kmol}{16\,kg/kmol} = -48210{,}23\,kJ/kg\,CH_4$$

1 kmol CH_4 gazının ağırlığı 16 kg'dır. (M_{CH_4} = 16 kg/kmol)

Birim zamanda açığa çıkan ısı aşağıdaki bağıntıyla bulunur.

$\dot{Q} = \dot{m}.q$

$\dot{Q}$= (1,65kg/h) (-48210,23 kJ/kg CH_4)

$\dot{Q}$= -79546,88 kJ/h = -22,09 kW bulunur.

Kazanda % 2'lik bir ısı kaybı olduğu düşünülürse 1 kmol CH_4 gazı için Q değeri;

Q = 771363,68 kJ/kmol CH_4 . 0,98

Q = 755936,40 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Alt ısıl değere göre verim;

$$\eta = \frac{\text{Yararlı Enerji}}{\text{Yakıtın Alt Isıl Değeri}} = \frac{Q_{\text{çıkan}}}{\text{LHV}} \qquad (4.12)$$

$$\eta = \frac{(755936{,}40\,\text{kJ/kmol}\,CH_4)}{(802310\,\text{kJ/kmol}\,CH_4)} = 0{,}94$$

Verim değeri % 94 bulunur.

5.4 % 109 VERİME SAHİP YOĞUŞMALI KOMBİ

% 109 verime sahip yoğuşmalı kombide baca gazı sıcaklığı 45 ^oC'dir.

$$Q = \sum n_ç (\bar{h}_f{}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_ç - \sum n_g \bar{h}_f{}^o{}_g \qquad (5.1)$$

$\bar{h}_f{}^o$ değerleri Ek7'den, $\bar{h}$ değerleri Ek2, Ek4 ve Ek6'dan bulunur.

Tablo 5.3 Bazı maddelerin $\bar{h}_f^{\,o}$ ve $\bar{h}$ değerleri

Madde	$\bar{h}_f^{\,o}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298K}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{318K}$ kJ/kmol
CH_4	-74850	-	-
O_2	0	-	-
N_2	0	8669	9248
$H_2O_{(gaz)}$	-241820	9904	10572
CO_2	-393520	9364	10110

1 kmol CH_4 gazı için Q değeri;

Q = (1 kmol CO_2) [(-393520 + 10110 - 9364) kJ/kmol CO_2]

+ (2 kmol H_2O) [(-241820 + 10572 - 9904) kJ/kmol H_2O]

+ (7,52 kmol N_2) [(0 + 9248 - 8669) kJ/kmol N_2]

- (1 kmol CH_4) (-74850 kJ/kmol CH_4)

Q = -795873,92 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Çiğ noktası sıcaklığı;

$$P_{\upsilon} = \left(\frac{n_{\upsilon}}{n_{ç}}\right) \cdot P_{ç} \qquad (4.5)$$

$$P_{\upsilon_{H_2O}} = \left(\frac{2\,\text{kmol}}{10{,}5\,\text{kmol}}\right) \cdot (101{,}325\,\text{kPa})$$

$P_{\upsilon_{H_2O}} = 19{,}26\,\text{kPa}$ bulunur. Ek1'den bu basınç değerine karşılık gelen doyma sıcaklığı;

$T_{çn} = T_{doyma} = 59\ ^oC$ olarak bulunur.

Yanma sonu ürünlerinin içindeki su buharının tamamen yoğuştuğu kabul edilirse gizli ısı

$$Q_{gizli} = n_{H_2O} . \bar{h}_{fg} \quad (4.27)$$

Ek1'den h_{fg} = 43106,4 kJ/kmol H_2O bulunur.

Q_{gizli} = (2 kmol H_2O/kmol CH_4) (43106,4 kJ/kmol H_2O)

Q_{gizli} = 86212,8 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Gizli ısıyla birlikte açığa çıkan toplam ısı;

$Q_{Toplam} = Q + Q_{gizli}$

Q_{Toplam} = 795873,92 + 86212,8

Q_{Toplam} = 882086,72 kJ/kmol CH_4 bulunur.

% 0,6'lık bir kayıp kazandan ısı taşınması ve yoğuşmanın tam olarak gerçekleşmediği düşünülerek hesaba katılacaktır. Böylelikle elde edilen gerçek ısı değeri;

Q = (882086,72 kJ/kmol CH_4) . 0,994

Q = 876794,2 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Alt ısıl değere göre verim;

$$\eta = \frac{Q_{çıkan}}{LHV} \quad (4.12)$$

$$\eta = \frac{(876794{,}2\,kJ/kmol\,CH_4)}{(802310\,kJ/kmol\,CH_4)} = 1{,}09$$

Verim değeri % 109 olarak bulunur.

5.5 ELEKTROLİZ

Katotta;

$2H_2O \rightarrow 2O^{-2} + 4H^+$

$2O^{-2} + 4H^+ \rightarrow 2OH^- + 2H^+$

$2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2$

Anotta;

$2OH^- \rightarrow 1/2O_2 + H_2O + 2e^-$

1 kmol CH_4 gazı yakıldığı zaman 2 kmol H_2O açığa çıkar. 2 kmol H_2O elektroliz edildiğinde 1 kmol H_2 gazı açığa çıkar.

1 kmol H_2 elde edebilmek için devreden 2 kmol e^- geçirmek gereklidir. Bu miktarı elde edebilmek için;

$$Q = I \,.\, t \qquad (4.9)$$

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{(96500.10^3.2)}{3753} = 51425{,}5 sn$$

elektroliz yapılır (14 saat)

Elektroliz işlemi için kullanılan elektrik işi;

$$W_{el} = V \,.\, I \,.\, \Delta t \qquad (4.10)$$

Suyun ayrışma gerilimi 2 Volt kabul edilmiştir.

$$W_{el} = (2 \,.\, 3753 \,.\, 51425{,}5)\ J \cdot \frac{kJ}{1000J}$$

W_{el} = 385999,8 kJ bulunur.

5.6 HİDROJEN TAKVİYELİ METANIN YAKIT OLARAK KULLANILMASI

$$CH_4 + H_2 + 2{,}5\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow CO_2 + 3H_2O + 9{,}4\ NO_2 \qquad (4.11)$$

Baca gazı sıcaklığı 45 ^oC'dir.

$$Q = \sum n_ç\ (\bar{h}_f{}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_ç - \sum n_g\ \bar{h}_f{}^o{}_g \qquad (5.1)$$

$\bar{h}_f{}^o$ değerleri Ek7'den, $\bar{h}$ değerleri Ek2, Ek4 ve Ek6'dan bulunur.

Tablo 5.4 Bazı maddelerin $\bar{h}_f{}^o$ ve $\bar{h}$ değerleri

Madde	$\bar{h}_f{}^o$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298K}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{318K}$ kJ/kmol
CH_4	-74850	-	-
O_2	0	-	-
N_2	0	8669	9248
$H_2O_{(gaz)}$	-241820	9904	10572
CO_2	-393520	9364	10110

1 kmol CH_4 gazı için Q değeri;

Q = (1 kmol CO_2) [(-393520 + 10110 - 9364) kJ/kmol CO_2]

+ (3 kmol H_2O) [(-241820 + 10572 - 9904) kJ/kmol H_2O]

+ (9,4 kmol N_2) [(0 + 9248 - 8669) kJ/kmol N_2]

- (1 kmol CH_4) (-74850 kJ/kmol CH_4)

Q = -795873,92 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Çiğ noktası sıcaklığı;

$$P_{\upsilon} = \left(\frac{n_{\upsilon}}{n_{ç}} \right) \cdot P_{ç} \qquad (4.5)$$

$$P_{\upsilon_{H_2O}} = \left(13{,}4 \frac{3\,\text{kmol}}{10{,}5\,\text{kmol}} \right) \cdot (101{,}325\,\text{kPa})$$

$P_{\upsilon_{H_2O}} = 22{,}68\,\text{kPa}$ bulunur. Ek1'den bu basınç değerine karşılık gelen doyma sıcaklığı;

$T_{çn} = T_{doyma} = 62{,}69\ ^{o}C$ bulunur.

Yanma sonu ürünlerinin içindeki su buharının tamamen yoğuştuğu kabul edilirse gizli ısı;

$$Q_{gizli} = n_{H_2O} \,.\, \bar{h}_{fg} \qquad (4.27)$$

Ek1'den $\bar{h}_{fg}$ = 43106,4 kJ/kmol H_2O bulunur.

Q_{gizli} = (3 kmol H_2O / kmol CH_4) , (43106,4 kJ/kmol H_2O)

Q_{gizli} = 129319,2 kJ/kmol CH_4 bulunur.

Gizli ısıyla birlikte açığa çıkan toplam ısı;

$$Q_{Toplam} = Q + Q_{gizli} \qquad (5.7)$$

Q_{Toplam} = 1035937,4 + 129319,2

QT_{oplam} = 1165256,6 kJ/kmol CH_4 bulunur.

%1'lik bir kayıp kazandan ısı taşınması ve yoğuşmasının tam olarak gerçekleşmediği düşünülerek hesaba katılacaktır. Böylelikle elde edilen gerçek ısı değeri;

Q = (1165256,6 kJ/kmol CH4) , 0,99

Q = 1153604,03 kJ/kmol CH4 bulunur.

Alt ısıl değere göre verim;

$$\eta = \frac{Q_{çıkan}}{LHV} \tag{4.12}$$

$$\eta = \frac{(1153604{,}03\,kJ/kmol\,CH_4)}{(802310\,kJ/kmol\,CH_4)} = 1{,}43$$

Verim değeri %143 olarak bulunmuştur.

Sistemin genel verimi;

$$\eta = \frac{Sistemden\,Alınan\,Enerji}{Sisteme\,Giren\,Enerji} = \frac{Q_{çıkan}}{Q_{giren} + Welk} \tag{4.13}$$

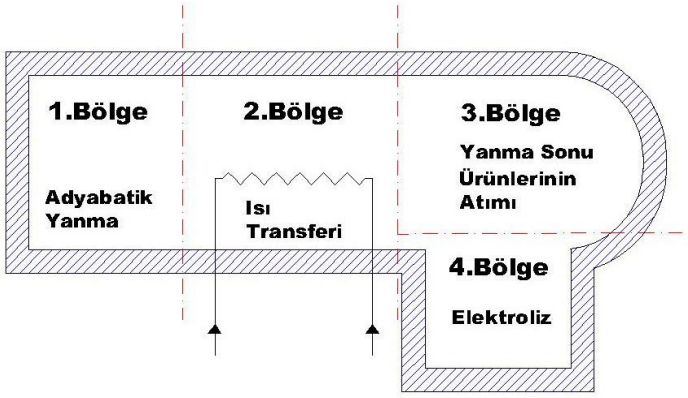
CH_4 gazının yakılması ve yanma sonu ürünlerinin yoğuşma olmadan 45˚C soğutulması durumunda açığa çıkan ısı 799873,92 kJ/kmol CH_4 olarak bulunmuştu. Dolayısıyla

Q_{giren} = 795873,92 kJ/kmol CH_4 değerini alır.

$$\eta = \frac{1153604{,}03}{795873{,}92 + 385999{,}8)} = 0{,}976$$

Sistemin genel verimi %97,6 bulunur.

5.7 EKSERJİ ANALİZİ



Şekil 5.1 Elektroliz kaplı kombinin bölümleri

5.7.1 Adyabatik Alev Sıcaklığının Bulunması

$$\sum n_{ç} (\bar{h}_{f}^{\,o} + \bar{h} - \bar{h}^{o})_{ç} = \sum n_{g} \bar{h}_{f}^{\,o}{}_{g} \qquad (4.16)$$

$\bar{h}_{f}^{\,o}$ değerleri Ek7'den, $\bar{h}$ değerleri Ek2, Ek4 ve Ek6'dan bulunur.

Tablo 5.5 Bazı maddelerin $\bar{h}_{f}^{o}$ ve $\bar{h}$ değerleri

Madde	$\bar{h}_{f}^{o}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298k}$ kJ/kmol
CH_4	-74850	-
O_2	0	-
N_2	0	8669
H_2	0	-
$H_2O_{(gaz)}$	-241820	9904
CO_2	-393520	9364

Bu değerler (4.16) bağıntısında yerine konulursa;

(1 kmol CO_2) [(0393520 + $\bar{h}_{CO_2}$ - 9364) kJ/kmol CO_2]

+ (3kmol H_2O) [(-241820 + $\bar{h}_{H_2O}$ - 9904) kJ/kmol H_2O]

+ (9,4 kmol N_2) [(O + $\bar{h}_{N_2}$ - 8669) kJ/kmol N_2]

= (1kmol CH_4) [(-74850) kJ/kmol CH_4]

denklemi elde edilir. Sadeleştirme yapılırsa

$$\bar{h}_{CO_2} + 3\,\bar{h}_{H_2O} + 9{,}4\,\bar{h}_{N_2} = 1164694{,}6 \text{ kJ}$$

bulunur. Görünüşte bir denklem ve üç bilinmeyen vardır. Fakat yanma sonu ürünlerin entalpileri sıcaklığın fonksiyonu oldukları -mükemmel gazlar için h = h(T)-, bilinmeyen sadece yanma sonu ürünlerinin sıcaklığıdır. Entalpi sıcaklık ilişkisi

için analitik bağıntılar olmadığından, sıcaklığın deneme yanılma yöntemiyle belirlenmesi gerekecektir.

Önce denklemin sağ tarafı, yanma sonu ürünlerinin toplam mol miktarı ile bölünür.

1164694,6 / (1 + 3 + 9,4) = 86917 kJ/kmol

Bu entalpi değeri, N_2 için 2607 K sıcaklığa, H_2O için 2100K sıcaklığa ve CO_2 için 1780 K sıcaklığa karşılık gelmektedir.

Yanma sonu ürünlerinin çoğunun N_2 olduğu göz önüne alınırsa, sıcaklığın 2607 K'ye yakın, fakat biraz altında olacağı anlaşılır. Deneme değeri olarak 2400 K alınırsa,

$$\bar{h}_{CO_2} + 3\,\bar{h}_{H_2O} + 9{,}4\,\bar{h}_{N_2} = 125152 + 3\,.\,103508 + 9{,}4\,.\,79320$$

$$= 1181284 \text{ kJ}$$

bulunur.

Bu değer 1164694,6 kJ değerinin üzerindedir. Bu nedenle sıcaklık 2400K'nın altında olacaktır. İkinci deneme değeri olarak 2350 K seçilirse toplam entalpi;

$$\bar{h}_{CO_2} + 3\,\bar{h}_{H_2O} + 9{,}4\,\bar{h}_{N_2} = 122091 + 3\,.\,100846 + 9{,}4\,.\,77496$$

$$= 1153091 \text{ kJ}$$

bulunur. Bu değer 1164694,6 kJ değerinin altındadır. Böylece adyabatik alev sıcaklığının 2350K ile 2400K arasında olduğu anlaşılır. Doğrusal oranlamayla aşağıdaki sonuç bulunur.

$T_2 = 2371$ K

5.7.2 Birinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

$$I_I = E_F - E_2 \tag{4.17}$$

Tablo 5.6 Yanma sonu ürünlerinin mol değerleri mol oranları

	CO_2	H_2O	N_2	Toplam
n_k [kmol / kmol CH_4]	1	3	9,4	13,4
X_k	0,0746	0,2239	0,7015	1

$$E_F = n_{CH_4} . \varepsilon^o{}_{CH_4} + n_{H_2} . \varepsilon^o{}_{H_2} \tag{4.18}$$

Ek9'dan ε^o değerleri bulunur.

Tablo 5.7 CH_4 ve H_2 İçin ε^o değerleri

	CH_4	H_2
ε^o [kJ /kmol]	836570	238490

$n_{CH_4} = n_{h_2}$ = 1 kmol

E_F = (1,836510) + (1,238490)

EF = 1075000 kJ bulunur.

$$E_2 = n_{p_2}\ \varepsilon^o_{p_2} + \sum_k n_k\ \varepsilon_{ph,k} \tag{4.19}$$

$$\varepsilon^o_{p_2} = \sum_k X_k\ \varepsilon^o_k + R_u T^o \sum_k X_k\ In\ X_k \tag{4.20}$$

Ek9'den ε^o değerleri bulunur.

Tablo 5.8 CO_2, H_2O ve N_2 İçin ε^o değerleri

	CO_2	H_2O	N_2
ε^o [kJ / kmol]	20140	11710	720

$\varepsilon^o_{p_2}$ = [0,0746 . 20140) + (0,2239 . 11710) + (0,7015 . 720)]

+ [8,314 . 298 . [(0,0746 . In 0,0746) + (0,2239 . In 0,2239)

+ (0,7015 . In 0,7015)]]

$\varepsilon^o_{p_2}$ = 2703,3 kJ / kmol bulunur.

$$\sum_k n_k E_{ph,k} = (T_2 - T_0) \sum_k n_k . c_p^{\varepsilon} . k \qquad (4.22)$$

T_2 = 2371 K için Ek11'den c_p^{ε} değerleri bulunur.

Tablo 5.9 CO_2 , H_2O ve N_2 için c_p^{ε} değerleri

	CO_2	H_2O	N_2
C_p^{ε} [kJ / kmol . K]	46,95	32,87	25,74

$\sum_k n_k E_{ph,k}$ = (2371 – 298) . [(1.46,95) + (3.32,87)

+ (9,4 . 25,74)]

= 803320,67 kJ bulunur,

E_2 = (13,4 . 2703,3) + 803320,67

E_2 = 839544,89 kJ bulunur.

I_I = 1075000 – 839544,89

I_I = 235455,11 kJ / kmol CH_4 bulunur.

5.7.3 İkinci Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

$$I_{II} = [E_2 - (E_3 + E_4)] - (E_{j_2} - E_{j_1}) \quad (4.23)$$

$$H_2 = (T_2 - T_o) \sum_k nk \, . \, c_{p,k}^{\,h} \quad (4.25)$$

T_2 = 2371 K için Ek10'dan $c_p^{\,h}$ değerleri bulunur.

Tablo 5.10 CO_2 , H_2O ve N_2 için $c_p^{\,h}$ değerleri

	CO_2	H_2O	N_2
$c_p^{\,h}$ [kJ / kmol . K]	55,42	43,35	33,85

$H_2 = (2371 - 298)\,[(1.55{,}42) + (3.43{,}35) + (9{,}4 \, . \, 33{,}85)]$

H_2 = 1044087,18 kJ bulunur.

$$H_3 = (T_3 - T_o) \sum_k n_k \, . \, c_p^{\,h} \, , k \quad (4.26)$$

T_3 = 318K için Ek10'dan $c_p^{\,h}$ değerleri bulunur.

Tablo 5.11 CO_2 , H_2O ve N_2 için $c_p{}^h$ değerleri

	CO_2	H_2O	N_2
$c_p{}^h$ [kJ / kmol . K]	37,74	33,03	29,16

$H_3 = (318 – 298)\ [(1.37,74) + (3.33,03) + (9,4\ .\ 29,16)]$

$H_3 = 8218,68$ kJ bulunur.

$$Q_{gizli} = n_{H_2O} . \bar{h}_{fg} \qquad (4.27)$$

$Q_{gizli} = 3\ .\ 43106,4$

$Q_{gizli} = 129319,2$ kJ bulunur.

$$m_s = \frac{(H_2 - H_2 + Q_{gizli})}{(h_2 - h_1)} \qquad (4.24)$$

Ek1'den , 30˚C için h_1 = 125,79 kJ / kg ve 40˚C için h_2 = 167,57 kJ/kg bulunur.

$$m_s = \frac{(1044087,18 - 8218,68 + 129319,2)}{(167,57 - 125,79)}$$

$m_s = 27888,65$ kg bulunur.

$$E_{s_2} - E_{s_1} = m_s\ [(h_2 - h_1) - T_o\ (s_2 - s_1)] \qquad (4.28)$$

Ek1'den 30˚C için s_1 = 0,4369 kJ/(kg.K) ve 40˚C için s_2 = 0,5725 kJ/kg.K bulunur.

$E_{s_2} - E_{s_1} = 27888,65\ .\ [(167,57 – 125,79)$

$- 298\ .\ (0,5725 – 0,4369)]$

$E_{s_2} - E_{s_1}$ = 38240,92 kJ bulunur.

$$E_3 = E_3^{o} + (E_{ph})_3 \qquad (4.29)$$

$$(E_{ph})_3 = (T_3 - T_o) \cdot \sum_k n_k \cdot c_{p,k}^{\varepsilon} \qquad (4.32)$$

T_3 = 318 K için Ek11'den c_p^{ε} değerleri bulunur.

Tablo 5.12 CO_2 ve N_2 için c_p^{ε} değerleri

	CO_2	N_2
c_p^{ε} [kJ / kmol . K]	1,23	0,93

$(E_{ph})_3 = (318 - 298)\ [(1 \cdot 1{,}23) + (9{,}4 \cdot 0{,}93)]$

= 199,44 kJ bulunur.

$$E_3^{o} = n_{p_3} \left[(\Sigma_k X_k . \varepsilon_k^{o}) + (R_u . T_o . \Sigma_k X_k \ln X_k \right] \qquad (4.30)$$

Tablo 5.13 Yanma sonu ürünlerinin mol miktarları ve yoğuşmadan sonraki mol oranları

	Co_2	N_2	Toplam
n_k [kmol / kmol CH_4]	1	9,4	10,4
X_k	0,0962	0,9038	1

E_3^{o} = 10,4 [(0,0962 . 20140) + (0,9038 . 720)

+ 8,314 . 298 . [(0,0962 . In 0,0962) + (0,9038 . In 0,9038)]]

E_3^o = 18758,22 kJ bulunur.

E_3 = 18758,22 + 199,4

E_3 = 19857,66 kJ bulunur.

$$E_4 = n_{H_2O}[\varepsilon^o_{H_2O} + (h_f - h_{f_o}) - T_o(s_f - s_{f_o})] \quad (4.33)$$

318 K için H_2O (sıvı)'sının entalpi ve entropi değerleri Ek1'den okunmuştur.

h_f = 188,45 kJ/kg s_f = 0,6387 kJ/kg.K

298 K için H_2O (sıvı)'nun entalpi ve entropi değerleri Ek1'den okunmuştur.

h_{f_0} = 104,89 kJ/kg s_{f_0} = 0,3674 kJ/kg.K

Ek9'dan H_2O (sv ı) için ε^o = 3120 kJ/kmol okunur.

$E_4 = 3 . [3120 + 18 . [(188,45 – 104,89) – 298 (0,6287 – 0,3674)]]$

E_4 = 9506,48 kJ bulunur.

I_{II} = [839544,89 – (18957,66 + 9506,48)] – 38240,92

I_{II} = 772839,83 kJ bulunur.

5.7.3 Üçüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

$I_{III} = E_3$ = 18957,66 kJ değerini alır.

5.7.4 Dördüncü Bölge İçin Tersinmezliğin Bulunması

$$I_{IV} = (E_4 + W_{el}) - (E_{H_2} + E_{0_2}) \quad (4.34)$$

$$E_{H_2} + E_{0_2} = n_{H_2} . \varepsilon^o_{H_2} + n_{0_2} . \varepsilon^o_{0_2} \quad (4.35)$$

ε^o değerleri Ek9'dan okunur.

Tablo 5.14 H_2 ve O_2 için ε^o değerleri

	H_2	O_2
ε^o (kJ/kmol)	238490	3970

$E_{H_2} + E_{0_2} = 1,238490 + 0,5 \,.\, 3970$

$E_{H_2} + E_{0_2} = 240475$ kJ bulunur.

$I_{IV} = 9506,48 + 385999,5 - 240475$

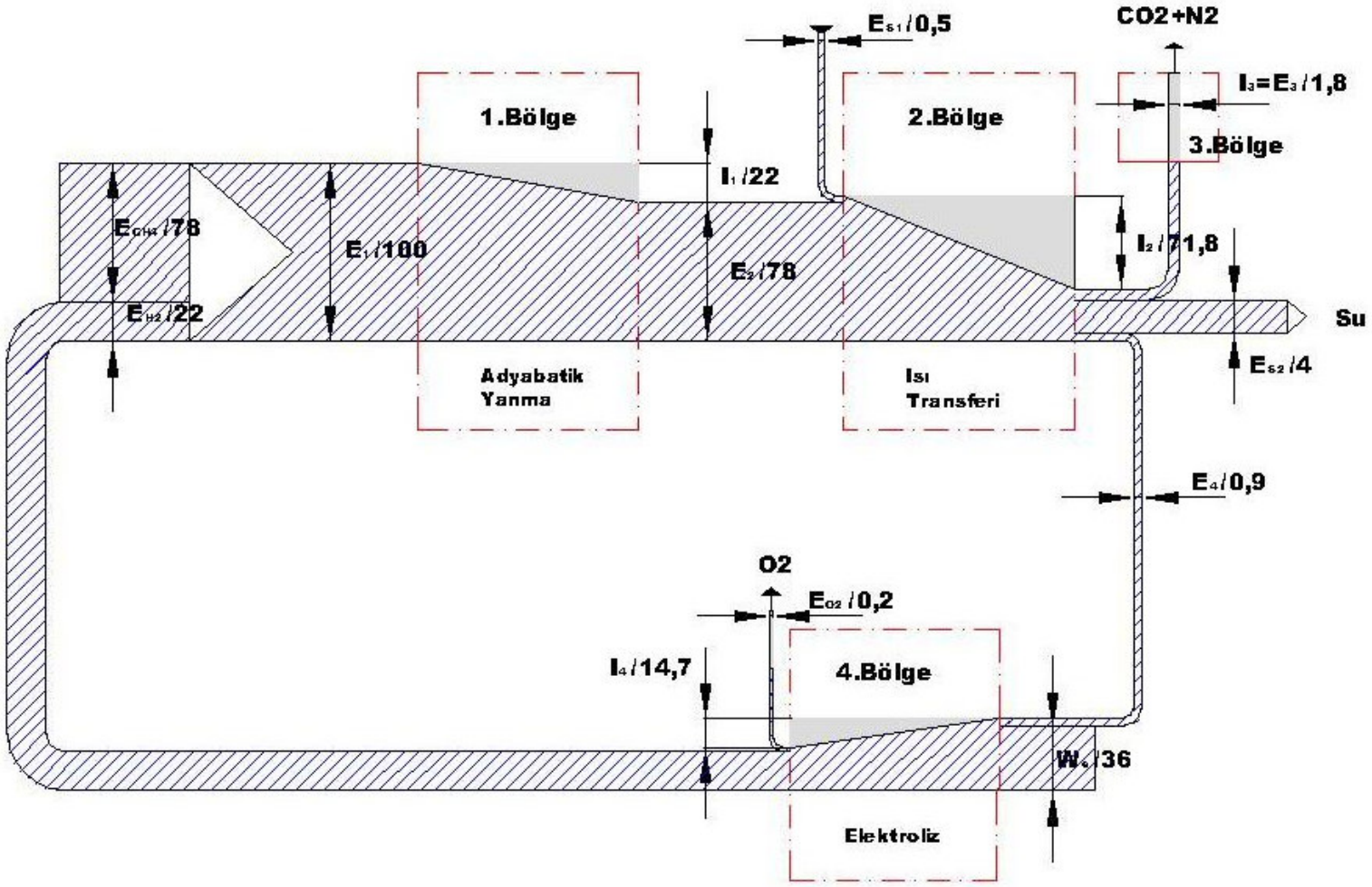
$I_{IV} = 155031$ kJ bulunur.

5.7.6 Sistemin Ekserji Veriminin Bulunması

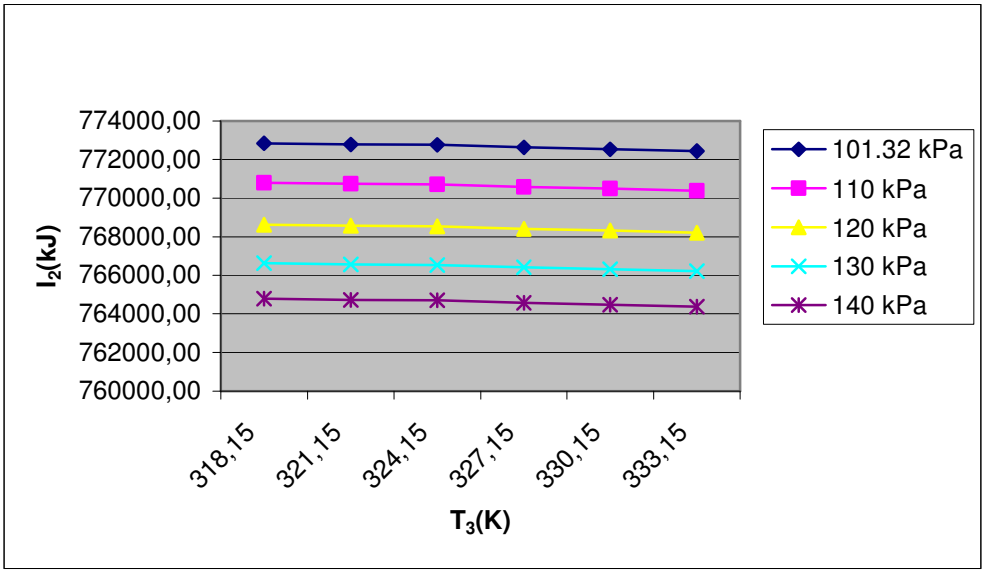
$$\eta_e = \frac{E_{s_2} - E_{s_1}}{E_{CH_4} + W_e} \qquad (4,36)$$

$$\eta_e = \frac{38240,92}{(836510 + 385999,8} = 0,03$$

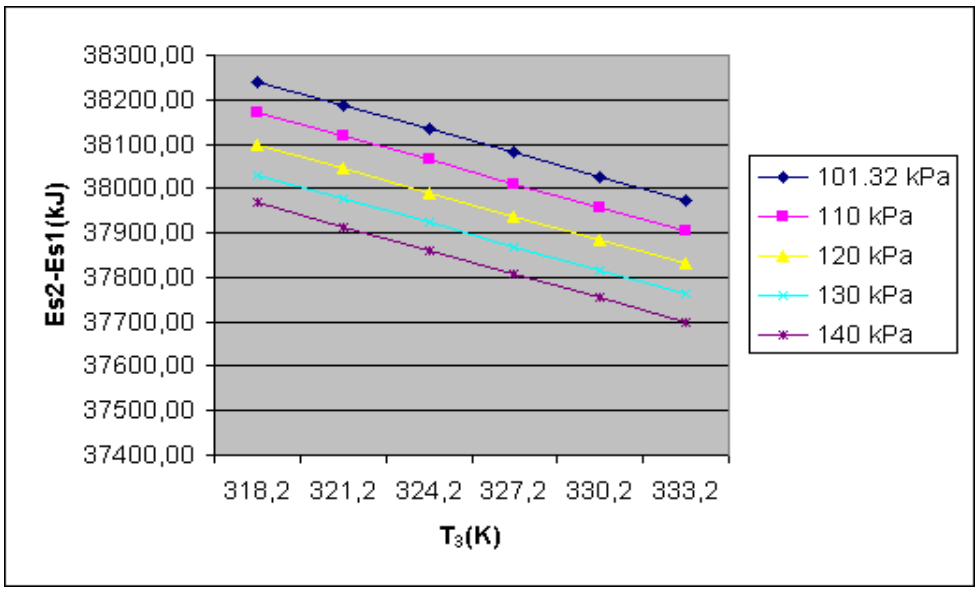
Ekserji verimi %3 bulunur.



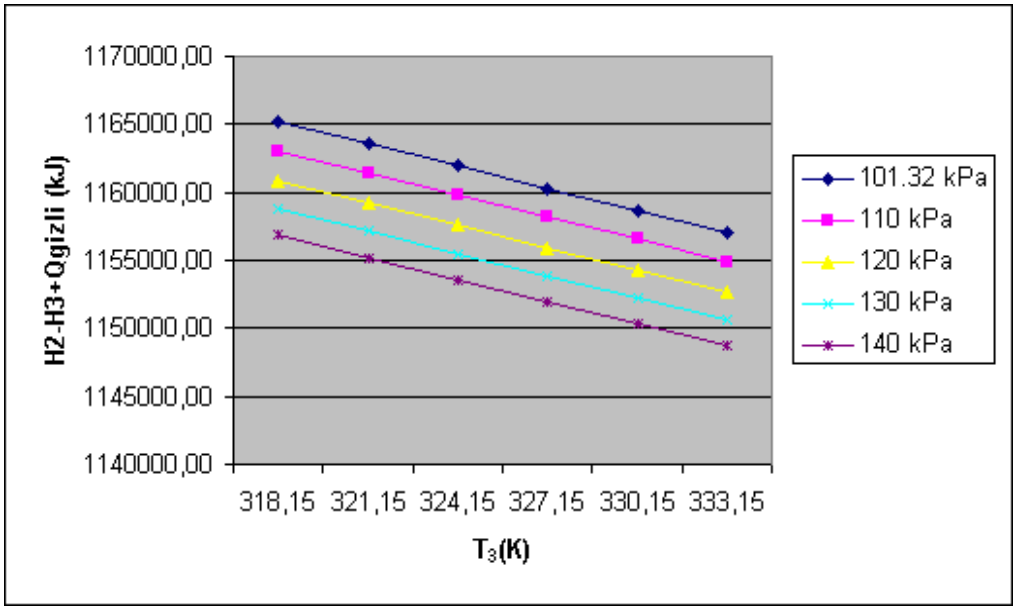
Şekil 5.2 Elektroliz kaplı kombinin ekserji grafiği



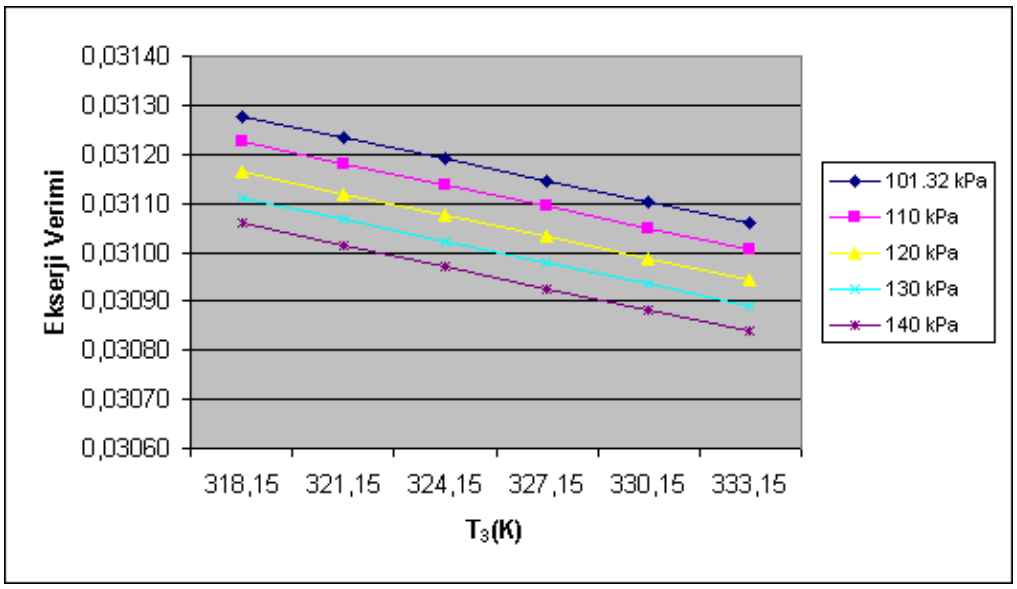
Şekil 5.3 Belirli çıkış basınçlarında T_3 sıcaklığına göre I_2 tersinmezlik değerinin değişimi



Şekil 5.4 Belirli çıkış basınçlarında T_3 sıcaklığına göre ısıtma suyunun ekserjisindeki artışın değişimi



Şekil 5.5 Belirli çıkış basınçlarında T_3 sıcaklığına göre ısıtma suyuna verilen ısının değişimi



Şekil 5.6 Belirli çıkış basınçlarında T_3 sıcaklığına göre ekserji veriminin değişimi

BÖLÜM 6

MALİYET ANALİZİ

Normal bir kombide saatte 1,65 kg CH_4 gazı yakıt olarak kullanıldığında açığa çıkan ısı 79546,88 kJ/h değerindedir.

Bu ısı değerini elde etmek için hidrojen takviyeli CH_4 gazını yakıt olarak kullanan kombide,

$$\dot{m} = \frac{(79546{,}88\,\text{kJ/h})}{\left[(1165256{,}6\,\text{kJ/kmol}\,CH_4).\left(\frac{1}{16\,\text{kg/kmol}\,CH_4}\right)\right]}$$

$\dot{m}$ = 1,09 kg/h CH_4 gazı yakılmalıdır.

$$\dot{n} = \frac{\dot{m}}{M} \qquad (6.1)$$

$$\dot{n} = \frac{(1{,}09\,\text{kg/h})}{16\,\text{kg/kmol})} = 0{,}07 \text{ kmol/h}$$

Sistemin işleyebilmesi için katotta1 saatte 0,07 kmol H_2 birikmesi gerekmektedir. Bu miktarı elde edebilmek için devreden 0,14 kmol $\bar{e}$ geçirmek lazımdır.

Devreden geçen akım şiddeti,

$$Q = I \,.\, t \qquad (4.9)$$

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{(96500.10^3 .0{,}14}{(1{,}60.60)} = 3753\,\text{Amper}$$

Elektroliz işleminde 1 saatte yapılan elektrik işi,

$$W_{el} = V \,.\, I \,.\, \Delta t \qquad (4.10)$$

V = 2 Volt olarak alınmıştı.

W_{el} = 2 . 3753 . 3600/1000

W_{el} = 27021,6 kJ/h = 7,5 kW.h bulunur.

Doğalgazın birim fiyatı 48 YKR/m^3 değerindedir.

Elektriğin birim fiyatı 17 YKR/kW.h değerindedir.

Elektroliz kaplı kombide,

1,65 – 1,09 = 0,56 kg/h miktarında yakıttan tasarruf edilmektedir.

ρ = 0,66 kg/m^3 olarak daha önce bulunmuştu.

$$\dot{m} = \rho . \dot{V} \qquad (5.4)$$

$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,56}{0,66}$ = 0,85 m^3/h bulunur.

(0,85 m^3/h) . (0,48 YTL/m^3) = 0,408 YTL/h miktarında sistemden geri kazanım olur.

Harcanan elektrik işi için kaybedilen miktar

(7,5 kW.h) . (0,17 YTL/kW.h) = 1,275 bulunur.

1,275 – 0,408 = 0,867 YTL

Bulunan bu değer sistemin kendi kendini amorti edemediğini aksine maliyet fiyatına ek olarak alıcıyı saatte 0,867 YTL zarara uğrattığını göstermektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, hidrojen ile takviye edilen doğalgazın yoğuşmalı kombilerde yakıt olarak kullanılmasının kombi verimini nasıl etkilediği incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda alt ısıl değere göre verim % 143 bulunmuştur. Bu verim, normal bir kombiye göre sisteme saatte 0,408 YTL kazandırır.

Sistemin genel verimi % 97,6 olarak elde edilmiştir. Suyun elektrolizi için harcanan elektrik işi, bu işlem sonucunda elde edilen hidrojenin alt ısıl değerinden daha yüksek bir değere sahiptir. Harcanan elektrik işinin maliyeti göz önüne alındığı zaman, sistem normal bir kombiye göre saatte 0,876 YTL zarar etmektedir. Bulunan bu değer sistemin kendi kendini amorti edemeyeceğini göstermektedir.

Sistem için yapılan ekserji analizinde, yanma işlemine girenlerin kullanılabilirliğinin, sadece yanma işlemindeki tersinmezlikler nedeniyle % 22 oranında azaldığı görülür. İş potansiyelinin % 22'si, hidrojen takviyeli doğalgazın yanması sırasında, ısıl enerji henüz kullanılmadan önce yitirilmektedir.

Termodinamiğin ikinci yasası, kimyasal enerjiyi işe dönüştürmenin daha etkili yolları olabileceğini belirtmektedir. Kuşkusuz daha etkili yol, tersinmezliğin daha az olduğu yoldur. Kimyasal reaksiyonlarda tersinmezlik, reaksiyona giren maddeler arasındaki denetimsiz elektron alışverişinden kaynaklanır. Elektron alışverişi, yanma odasını elektrolitik hücre (pil) ile değiştirerek denetim altına alınabilir. Elektrolitik hücrelerde elektron alışverişi, yüke bağlı olan iletken teller aracılığıyla (yakıt hücrelerinde olduğu gibi) gerçekleşir ve kimyasal enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüşür.

Şekil 5.2'den anlaşıldığı gibi ikinci bölgede ısı transferi sırasında tersinmezlikler nedeniyle iş potansiyelinin % 71,8'i yitirilmektedir. Bu durum sistemin ekserji verimine yansımış ve ekserji verimi % 3 olarak bulunmuştur. % 3 gibi düşük bir değerin elde edilmesinin nedeni, ısıtılan suyun gidiş-dönüş sıcaklıkları arasındaki fark 10 ^{o}C'dir. Yanma sonu ürünlerindeki su buharının verimli bir şekilde yoğuşabilmesi için bu değere ihtiyaç vardır.

Şekil 5.3 incelendiğinde, yanma sonu ürünlerinin üçüncü bölgeye giriş sıcaklığı (T_3) arttıkça, ikinci bölgedeki tersinmezlik değerinin (I_2) azaldığı görülür. bunun nedeni, sıcaklık artışının fiziksel ekserji değerini arttırmasıdır. Belirli bir T_3 sıcaklığında, çıkış basıncı arttıkça I_2 tersinmezlik değerinin azalması da aynı nedene dayanır.

Şekil 5.4'de, T_3 sıcaklığı arttıkça, ısıtılan suyun ekserjisindeki artış değerinin azaldığı görülür. Ekserjideki artış değerinin azalma nedeni, suya verilen ısının Şekil 5.5'de görüldüğü gibi T_3 sıcaklığı arttıkça azalmasıdır. Belirli bir T_3 sıcaklığında çıkış basıncı arttıkça, E_{s_1} - E_{s_2} değerinin azalmasının nedeni, Şekil 5.5'de görüldüğü gibi suya verilen ısının çıkış basıncının artmasına bağlı olarak azalmasıdır.

Şekil 5.6 incelendiğinde, T_3 sıcaklığı arttıkça ekserji veriminin azaldığı görülür. Ekserji verimi, ısıtılan suyun ekserjisindeki artışla orantılıdır.

Sonuç olarak, hidrojen takviyeli doğalgazın yoğuşmalı kombilerde yakıt olarak kullanılmasının, yoğuşma suyunun elektrolizi için harcanan elektrik maliyetinin yüksek olması nedeniyle verimli olmadığı görülür.

Sistemin verimli bir şekilde kullanılması elektroliz için harcanan elektrik maliyetinin düşürülmesine bağlıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (su gücü, güneş, rüzgar) elde edilen elektriğin, yoğuşma suyunun elektrolizinde kullanılması hidrojen üretim maliyetini düşürür. Ayrıca hidrojen takviyeli doğalgazın yakıt pilinde yakılması, yanma işlemindeki tersinmezliklerin azalması nedeniyle sistem verimini arttırır.

BÖLÜM 8

KAYNAKLAR

(1) Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N., Akaryıldız, E., Hidrojen Enerjisi Kullanımında Temel Kriterler. http://www.mmoistanbul.org/yayin/tesisat/72/4/

(2) Buderus, Isıtma Tesisatı, 2000.

(3) Rzayeva, M.P., Salamov, O.M., Kerimov, M.K., Modeling To Get Hydrogen And Oxygen By Solar Water Electrolysis. Int. J. Hydrogen Energy, 26; 195-201, 2001.

(4) Kato, T., Kubota, M., Kobayashi, N., Suzuoki, Y., Effective Utilization Of By-Product Oxygen From Electrolysis Hydrogen Production. Energy, 30; 2580-2595, 2005.

(5) Kikuchi, K., Tanaka, Y., Saihara, Y., Maeda, M., Kawamura, M., Ogumi, Z., Concentration Of Hydrogen Nanobubbles In Electrolyzed Water. Journal Of Colloid And Interface Science, 298; 914-919, 2006.

(6) Kida, T., Guan, G., Yoshida, A., $LaMnO_3$/CdS Nanocomposite: A New Photocatalyst For Hydrogen Production From Water under Visible Light ırradiation. Chemical Physics Letters, 371; 563-567, 2003.

(7) Martinez-Frias, J., Pham, A-Q., Aceves, S.M., A Natural Gas-Assisted Steam Electrolyzer For High-Efficiency Production Of Hydrogen. Int. J. Hydrogen Energy, 28; 483-490, 2003.

(8) Ohta, T., Veziroğlu, T.N., Hydrogen Production Using Solar Radiation. Int. J. Hydrogen Energy, 1,3,255, 63,1976.

(9) Ohta, T., Kamiya, N., Yamaguchi, M., Gotah, N., Gtagawa, T., Asakura, S., System Efficiency Of A Water-Splitting System Synthesized by Photochemical And Thermoelectric Conversion Of Solar Energy. Int. J. Hydrogen Energy, 1978; 3(2): 203-8.

(10) Esteve, O., Ganibal, C., Stejnmetz, D., Vialaron, A., Performance Of Photovoltaic Electrolysis System. Int. J. Hydrogen Energy, 1982; 7(9): 711-6.

(11) Koukouvinos A., Lygerou, Koumoutsos, N., Design Of A System For Energy Storage Via Water Electrolysis, Int. J. Hydrogen Energy 1982; (7(8): 645-50.

(12) Carpetis, C., A Study Of Water Electrolysis With Photo-Voltaic Solar Energy Conversion. Int. J. Hydrogen Energy, 1982; 7(4): 287-310.

(13) Morner, S., Beckman, W., Klein, S., Comparison Of Simulations Of A Photovoltaic Hydrogen System With Measurements From The Schatz Solar-Hydrogen Project. Department Of Keating And Ventilation, University Of Trondheim. 7034 Trondheim, Norway. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, 1500 Johnson Dr, Madison, WI537G6-1687 USA, 1992.

(14) Siegel, A., Schott T., Optimization Of Photovoltaic Hydrogen Production. Int. J. Hydrogen Energy, 1988; 13(11): 659-75.

(15) Carpetics, C., An Assesment Of Electrolytic Hydrogen Production By Means Of Photovoltaic Energy Conversions. Int. J. Hydrogen Energy 1984; 9(12): 583-95.

(16) Gertz, J., On The Potential Of Solar Energy Conversion Into Hydrogen And/Or Other Fuels. Direction Of Energies Programe, Commission Of The Ueropean Communities, Joint Research Centre-Ispra, Italy, 1979.

(17) Tani, T., Sekiguchi, N., Saka, N., And Ohta, D., Optimization Of Solar Hydrogen Systems On Hydrogen Production Cost, PII: SOO38-092X(99)00061-4.

(18) Çengel, Y.A., Boles, M.A., Termodinamik, McGraw-Hill, NewYork, 1996.

(19) Tekin, A., Kimya, Ekin, Ankara, 1992.

(20) Kotas, T.J., The Exergy Method Of Thermal Plant Analysis, Butterworths, London, 1985.

(21) Altınışık, K., Uygulamalarla Isı Transferi, Nobel, Ankara, 2003.

EKLER

EK 1 : Doymuş su sıcaklık tablosu

EK 2 : Azot, N_2'nin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

EK 3 : O_2, Oksijenin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

EK 4 : CO_2, Karbondioksitin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

EK 5 : H_2, Hidrojenin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

EK 6 : H_2O, Su buharının mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

EK 7 : 25 ^oC sıcaklık ve 1 atm. basınçta formasyon entalpisi, formasyon Gibbs fonksiyonu ve mutlak entropi (k: katı, s: sıvı, g: gaz)

EK 8 : 25 ^oC sıcaklık ve 1 atm. basınçta entalpisi ve buharlaşma entalpisi.

EK 9 : Bazı maddelerin standart entalpi ve kimyasal ekserji değerleri

EK 10 : Bazı gazlar için sabit basınçta molar ısı kapasiteleri

EK 11 : Bazı gazlar için sabit basınçta molar ekserji kapasitesi

EK 12 : Delta kombinin teknik özellikleri

EK 13 : Yoğuşmalı kombinin teknik özellikleri

EK 1 : Doymuş su sıcaklık tablosu

Doymuş su - Sıcaklık tablosu

Sıcak. °C	Doyma basıncı kPa	Özgül hacim m^3/kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi kj/(kg . K)		
		Doymuş sıvı	Doymuş buhar	Doymuş sıvı		Doymuş buhar	Doymuş sıvı		Doymuş buhar	Doymuş sıvı		Doymuş buhar
T_{doyma}	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	Doyma basıncı MPa											
100	0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

EK'1'in devamı

Sıcak. °C	Doyma basıncı MPa	Özgül hacim m³/kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi kJ/(kg · K)		
		Doymuş sıvı	Doymuş buhar	Doymuş sıvı		Doymuş buhar	Doymuş sıvı		Doymuş buhar	Doymuş sıvı		Doymuş buhar
T	P_{doyma}	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
200	1.5538	0.001 157	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001 164	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001 173	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001 181	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001 190	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001 199	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001 209	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001 219	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001 229	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001 240	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001 251	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001 263	0.045 98	1104.28	1596.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001 276	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001 289	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001 302	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001 317	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001 332	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001 348	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001 366	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001 384	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001 404	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001 425	0.019 948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001 447	0.018 350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001 472	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001 499	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001 561	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001 638	0.010 797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001 740	0.008 813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001 893	0.006 945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002 213	0.004 925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Kaynak: A4 ile A8 arasındaki tablolar, Gordon J. Van Wylen ve Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, İngilizce/SI 3. düzenleme, Wiley, New York, 1986, s. 635-651'den alınmıştır. Bu tablolar ilk olarak, Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill ve Joan G. Moore, *Steam Tables*, SI Birimleri, Wiley, New York, 1978 adlı yayında yer almıştır.

EK 2 : Azot, N_2'nin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

Azot, N_2'nin mükemmel gaz varsayımıyla özelikleri

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

EK 2'nin devamı

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
1000	30,129	21,815	228.057	1760	56,227	41,594	247.396
1020	30,784	22,304	228.706	1780	56,938	42,139	247.798
1040	31,442	22,795	229.344	1800	57,651	42,685	248.195
1060	32,101	23,288	229.973	1820	58,363	43,231	248.589
1080	32,762	23,782	230.591	1840	59,075	43,777	248.979
1100	33,426	24,280	231.199	1860	59,790	44,324	249.365
1120	34,092	24,780	231.799	1880	60,504	44,873	249.748
1140	34,760	25,282	232.391	1900	61,220	45,423	250.128
1160	35,430	25,786	232.973	1920	61,936	45,973	250.502
1180	36,104	26,291	233.549	1940	62,654	46,524	250.874
1200	36,777	26,799	234.115	1960	63,381	47,075	251.242
1220	37,452	27,308	234.673	1980	64,090	47,627	251.607
1240	38,129	27,819	235.223	2000	64,810	48,181	251.969
1260	38,807	28,331	235.766	2050	66,612	49,567	252.858
1280	39,488	28,845	236.302	2100	68,417	50,957	253.726
1300	40,170	29,361	236.831	2150	70,226	52,351	254.578
1320	40,853	29,378	237.353	2200	72,040	53,749	255.412
1340	41,539	30,398	237.867	2250	73,856	55,149	256.227
1360	42,227	30,919	238.376	2300	75,676	56,553	257.027
1380	42,915	31,441	238.878	2350	77,496	57,958	257.810
1400	43,605	31,964	239.375	2400	79,320	59,366	258.580
1420	44,295	32,489	239.865	2450	81,149	60,779	259.332
1440	44,988	33,014	240.350	2500	82,981	62,195	260.073
1460	45,682	33,543	240.827	2550	84,814	63,613	260.799
1480	46,377	34,071	241.301	2600	86,650	65,033	261.512
1500	47,073	34,601	241.768	2650	88,488	66,455	262.213
1520	47,771	35,133	242.228	2700	90,328	67,880	262.902
1540	48,470	35,665	242.685	2750	92,171	69,306	263.577
1560	49,168	36,197	243.137	2800	94,014	70,734	264.241
1580	49,869	36,732	243.585	2850	95,859	72,163	264.895
1600	50,571	37,268	244.028	2900	97,705	73,593	265.538
1620	51,275	37,806	244.464	2950	99,556	75,028	266.170
1640	51,980	38,344	244.896	3000	101,407	76,464	266.793
1660	52,686	38,884	245.324	3050	103,260	77,902	267.404
1680	53,393	39,424	245.747	3100	105,115	79,341	268.007
1700	54,099	39,965	246.166	3150	106,972	80,782	268.601
1720	54,807	40,507	246.580	3200	108,830	82,224	269.186
1740	55,516	41,049	246.990	3250	110,690	83,668	269.763

Kaynak: A-18 ile A-25 arasındaki tablolar, Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4. düzenleme, McGraw-Hill, New York, 1983, s. 787-798'den uyarlanmıştır. Tablolar ilk olarak JANAF, *Thermochemical Tables*, NSRDS-NBS-37, 1971 adlı yayında yer almıştır.

EK 3 : O_2, Oksijenin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

O_2, Oksijen'in mükemmel gaz varsayımıyla özelikleri

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	600	17,929	12,940	226.346
220	6,404	4,575	196.171	610	18,250	13,178	226.877
230	6,694	4,782	197.461	620	18,572	13,417	227.400
240	6,984	4,989	198.696	630	18,895	13,657	227.918
250	7,275	5,197	199.885	640	19,219	13,898	228.429
260	7,566	5,405	201.027	650	19,544	14,140	228.932
270	7,858	5,613	202.128	660	19,870	14,383	229.430
280	8,150	5,822	203.191	670	20,197	14,626	229.920
290	8,443	6,032	204.218	680	20,524	14,871	230.405
298	8,682	6,203	205.033	690	20,854	15,116	230.885
300	8,736	6,242	205.213	700	21,184	15,364	231.358
310	9,030	6,453	206.177	710	21,514	15,611	231.827
320	9,325	6,664	207.112	720	21,845	15,859	232.291
330	9,620	6,877	208.020	730	22,177	16,107	232.748
340	9,916	7,090	208.904	740	22,510	16,357	233.201
350	10,213	7,303	209.765	750	22,844	16,607	233.649
360	10,511	7,518	210.604	760	23,178	16,859	234.091
370	10,809	7,733	211.423	770	23,513	17,111	234.528
380	11,109	7,949	212.222	780	23,850	17,364	234.960
390	11,409	8,166	213.002	790	24,186	17,618	235.387
400	11,711	8,384	213.765	800	24,523	17,872	235.810
410	12,012	8,603	214.510	810	24,861	18,126	236.230
420	12,314	8,822	215.241	820	25,199	18,382	236.644
430	12,618	9,043	215.955	830	25,537	18,637	237.055
440	12,923	9,264	216.656	840	25,877	18,893	237.462
450	13,228	9,487	217.342	850	26,218	19,150	237.864
460	13,525	9,710	218.016	860	26,559	19,408	238.264
470	13,842	9,935	218.676	870	26,899	19,666	238.660
480	14,151	10,160	219.326	880	27,242	19,925	239.051
490	14,460	10,386	219.963	890	27,584	20,185	239.439
500	14,770	10,614	220.589	900	27,928	20,445	239.823
510	15,082	10,842	221.206	910	28,272	20,706	240.203
520	15,395	11,071	221.812	920	28,616	20,967	240.580
530	15,708	11,301	222.409	930	28,960	21,228	240.953
540	16,022	11,533	222.997	940	29,306	21,491	241.323
550	16,338	11,765	223.576	950	29,652	21,754	241.689
560	16,654	11,998	224.146	960	29,999	22,017	242.052
570	16,971	12,232	224.708	970	30,345	22,280	242.411
580	17,290	12,467	225.262	980	30,692	22,544	242.768
590	17,609	12,703	225.808	990	31,041	22,809	243.120

EK 3'ün devamı

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
1000	31,389	23,075	243.471	1760	58,880	44,247	263.861
1020	32,088	23,607	244.164	1780	59,624	44,825	264.283
1040	32,789	24,142	244.844	1800	60,371	45,405	264.701
1060	33,490	24,677	245.513	1820	61,118	45,986	265.113
1080	34,194	25,214	246.171	1840	61,866	46,568	265.521
1100	34,899	25,753	246.818	1860	62,616	47,151	265.925
1120	35,606	26,294	247.454	1880	63,365	47,734	266.326
1140	36,314	26,836	248.081	1900	64,116	48,319	266.722
1160	37,023	27,379	248.698	1920	64,868	48,904	267.115
1180	37,734	27,923	249.307	1940	65,620	49,490	267.505
1200	38,447	28,469	249.906	1960	66,374	50,078	267.891
1220	39,162	29,018	250.497	1980	67,127	50,665	268.275
1240	39,877	29,568	251.079	2000	67,881	51,253	268.655
1260	40,594	30,118	251.653	2050	69,772	52,727	269.588
1280	41,312	30,670	252.219	2100	71,668	54,208	270.504
1300	42,033	31,224	252.776	2150	73,573	55,697	271.399
1320	42,753	31,778	253.325	2200	75,484	57,192	272.278
1340	43,475	32,334	253.868	2250	77,397	58,690	273.136
1360	44,198	32,891	254.404	2300	79,316	60,193	273.891
1380	44,923	33,449	254.932	2350	81,243	61,704	274.809
1400	45,648	34,008	255.454	2400	83,174	63,219	275.625
1420	46,374	34,567	255.968	2450	85,112	64,742	276.424
1440	47,102	35,129	256.475	2500	87,057	66,271	277.207
1460	47,831	35,692	256.978	2550	89,004	67,802	277.979
1480	48,561	36,256	257.474	2600	90,956	69,339	278.738
1500	49,292	36,821	257.965	2650	92,916	70,883	279.485
1520	50,024	37,387	258.450	2700	94,881	72,433	280.219
1540	50,756	37,952	258.928	2750	96,852	73,987	280.942
1560	51,490	38,520	259.402	2800	98,826	75,546	281.654
1580	52,224	39,088	259.870	2850	100,808	77,112	282.357
1600	52,961	39,658	260.333	2900	102,793	78,682	283.048
1620	53,696	40,227	260.791	2950	104,785	80,258	283.728
1640	54,434	40,799	261.242	3000	106,780	81,837	284.399
1660	55,172	41,370	261.690	3050	108,778	83,419	285.060
1680	55,912	41,944	262.132	3100	110,784	85,009	285.713
1700	56,652	42,517	262.571	3150	112,795	86,601	286.355
1720	57,394	43,093	263.005	3200	114,809	88,203	286.989
1740	58,136	43,669	263.435	3250	116,827	89,804	287.614

EK 4 : CO_2, Karbondioksitin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

CO_2, Karbon dioksit'in mükemmel gaz varsayımıyla özelikleri

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
*250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,552	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	20,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

EK 4'ün devamı

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
1000	42,769	34,455	269.215	1760	86,420	71,787	301.543
1020	43,859	35,378	270.293	1780	87,612	72,812	302.217
1040	44,953	36,306	271.354	1800	88,806	73,840	302.884
1060	46,051	37,238	272.400	1820	90,000	74,868	303.544
1080	47,153	38,174	273.430	1840	91,196	75,897	304.198
1100	48,258	39,112	274.445	1860	92,394	76,929	304.845
1120	49,369	40,057	275.444	1880	93,593	77,962	305.487
1140	50,484	41,006	276.430	1900	94,793	78,996	306.122
1160	51,602	41,957	277.403	1920	95,995	80,031	306.751
1180	52,724	42,913	278.361	1940	97,197	81,067	307.374
1200	53,848	43,871	279.307	1960	98,401	82,105	307.992
1220	54,977	44,834	280.238	1980	99,606	83,144	308.604
1240	56,108	45,799	281.158	2000	100,804	84,185	309.210
1260	57,244	46,768	282.066	2050	103,835	86,791	310.701
1280	58,381	47,739	282.962	2100	106,864	89,404	312.160
1300	59,522	48,713	283.847	2150	109,898	92,023	313.589
1320	60,666	49.691	284.722	2200	112,939	94,648	314.988
1340	61,813	50,672	285.586	2250	115,984	97,277	316.356
1360	62,963	51,656	286.439	2300	119,035	99,912	317.695
1380	64,116	52,643	287.283	2350	122,091	102,552	319.011
1400	65,271	53,631	288.106	2400	125,152	105,197	320.302
1420	66,427	54,621	288.934	2450	128,219	107,849	321.566
1440	67,586	55,614	289.743	2500	131,290	110,504	322.808
1460	68,748	56,609	290.542	2550	134,368	113,166	324.026
1480	66,911	57,606	291.333	2600	137,449	115,832	325.222
1500	71,078	58,606	292.114	2650	140,533	118,500	326.396
1520	72,246	59,609	292.888	2700	143,620	121,172	327.549
1540	73,417	60,613	292.654	2750	146,713	123,849	328.684
1560	74,590	61,620	294.411	2800	149,808	126,528	329.800
1580	76,767	62,630	295.161	2850	152,908	129,212	330.896
1600	76,944	63,741	295.901	2900	156,009	131,898	331.975
1620	78,123	64,653	296.632	2950	159,117	134,589	333.037
1640	79,303	65,668	297.356	3000	162,226	137,283	334.084
1660	80,486	66,592	298.072	3050	165,341	139,982	335.114
1680	81,670	67,702	298.781	3100	168,456	142,681	336.126
1700	82,856	68,721	299.482	3150	171,576	145,385	337.124
1720	84,043	69,742	300.177	3200	174,695	148,089	338.109
1740	85,231	70,764	300.863	3250	177,822	150,801	339.069

EK 5 : H_2, Hidrojenin mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

H_2, Hidrojen'in mükemmel gaz varsayımıyla özelikleri

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	1440	42,808	30,835	177.410
260	7,370	5,209	126.636	1480	44,091	31,786	178.291
270	7,657	5,412	127.719	1520	45,384	32,746	179.153
280	7,945	5,617	128.765	1560	46,683	33,713	179.995
290	8,233	5,822	129.775	1600	47,990	34,687	180.820
298	8,468	5,989	130.574	1640	49,303	35,668	181.632
300	8,522	6,027	130.754	1680	50,622	36,654	182.428
320	9,100	6,440	132.621	1720	51,947	37,646	183.208
340	9,680	6,853	134.378	1760	53,279	38,645	183.973
360	10,262	7,268	136.039	1800	54,618	39,652	184.724
380	10,843	7,684	137.612	1840	55,962	40,663	185.463
400	11,426	8,100	139.106	1880	57,311	41,680	186.190
420	12,010	8,518	140.529	1920	58,668	42,705	186.904
440	12,594	8,936	141.888	1960	60,031	43,735	187.607
460	13,179	9,355	143.187	2000	61,400	44,771	188.297
480	13,764	9,773	144.432	2050	63,119	46,074	189.148
500	14,350	10,193	145.628	2100	64,847	47,386	189.979
520	14,935	10,611	146.775	2150	66,584	48,708	190.796
560	16,107	11,451	148.945	2200	68,328	50,037	191.598
600	17,280	12,291	150.968	2250	70,080	51,373	192.385
640	18,453	13,133	152.863	2300	71,839	52,716	193.159
680	19,630	13,976	154.645	2350	73,608	54,069	193.921
720	20,807	14,821	156.328	2400	75,383	55,429	194.669
760	21,988	15,669	157.923	2450	77,168	56,798	195.403
800	23,171	16,520	159.440	2500	78,960	58,175	196.125
840	24,359	17,375	160.891	2550	80,755	59,554	196.837
880	25,551	18,235	162.277	2600	82,558	60,941	197.539
920	26,747	19,098	163.607	2650	84,368	62,335	198.229
960	27,948	19,966	164.884	2700	86,186	63,737	198.907
1000	29,154	20,839	166.114	2750	88,008	65,144	199.575
1040	30,364	21,717	167.300	2800	89,838	66,558	200.234
1080	31,580	22,601	168.449	2850	91,671	67,976	200.885
1120	32,802	23,490	169.560	2900	93,512	69,401	201.527
1160	34,028	24,384	170.636	2950	95,358	70,831	202.157
1200	35,262	25,284	171.682	3000	97,211	72,268	202.778
1240	36,502	26,192	172.698	3050	99,065	73,707	203.391
1280	37,749	27,106	173.687	3100	100,926	75,152	203.995
1320	39,002	28,027	174.652	3150	102,793	76,604	204.592
1360	40,263	28,955	175.593	3200	104,667	78,061	205.181
1400	41,530	29,889	176.510	3250	106,545	79,523	205.765

EK 6 : H_2O, Su buharının mükemmel gaz varsayımıyla özellikleri

H_2O, su buharının mükemmel gaz varsayımıyla özelikleri

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
0	0	0	0	600	20,402	15,413	212.920
220	7,295	5,466	178.576	610	20,765	15,693	213.529
230	7,628	5,715	180.054	620	21,130	15,975	214.122
240	7,961	5,965	181.471	630	21,495	16,257	214.707
250	8,294	6,215	182.831	640	21,862	16,541	215.285
260	8,627	6,466	184.139	650	22,230	16,826	215.856
270	8,961	6,716	185.399	660	22,600	17,112	216.419
280	9,296	6,968	186.616	670	22,970	17,399	216.976
290	9,631	7,219	187.791	680	23,342	17,688	217.527
298	9,904	7,425	188.720	690	23,714	17,978	218.071
300	9,966	7,472	188.928	700	24,088	18,268	218.610
310	10,302	7,725	190.030	710	24,464	18,561	219.142
320	10,639	7,978	191.098	720	24,840	18,854	219.668
330	10,976	8,232	192.136	730	25,218	19,148	220.189
340	11,314	8,487	193.144	740	25,597	19,444	220.707
350	11,652	8,742	194.125	750	25,977	19,741	221.215
360	11,992	8,998	195.081	760	26,358	20,039	221.720
370	12,331	9,255	196.012	770	26,741	20,339	222.221
380	12,672	9,513	196.920	780	27,125	20,639	222.717
390	13.014	9,771	197.807	790	27,510	20,941	223.207
400	13,356	10,030	198.673	800	27,896	21,245	223.693
410	13,699	10,290	199.521	810	28,284	21,549	224.174
420	14,043	10,551	200.350	820	28,672	21,855	224.651
430	14,388	10,813	201.160	830	29,062	22,162	225.123
440	14,734	11,075	201.955	840	29,454	22,470	225.592
450	15,080	11,339	202.734	850	29,846	22,779	226.057
460	15,428	11,603	203.497	860	30,240	23,090	226.517
470	15,777	11,869	204.247	870	30,635	23,402	226.973
480	16,126	12,135	204.982	880	31,032	23,715	227.426
490	16,477	12,403	205.705	890	31,429	24,029	227.875
500	16,828	12,671	206.413	900	31,828	24,345	228.321
510	17,181	12,940	207.112	910	32,228	24,662	228.763
520	17,534	13,211	207.799	920	32,629	24,980	229.202
530	17,889	13,482	208.475	930	33,032	25,300	229.637
540	18,245	13,755	209.139	940	33,436	25,621	230.070
550	18,601	14,028	209.795	950	33,841	25,943	230.499
560	18,959	14,303	210.440	960	34,247	26,265	230.924
570	19,318	14,579	211.075	970	34,653	26,588	231.347
580	19,678	14,856	211.702	980	35,061	26,913	231.767
590	20,039	15,134	212.320	990	35,472	27,240	232.184

EK 6'nın devamı

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
1000	35,882	27,568	232.597	1760	70,535	55,902	258.151
1020	36,709	28,228	233.415	1780	71,523	56,723	258.708
1040	37,542	28,895	234.223	1800	72,513	57,547	259.262
1060	38,380	29,567	235.020	1820	73,507	58,375	259.811
1080	39,223	30,243	235.806	1840	74,506	59,207	260.357
1100	40,071	30,925	236.584	1860	75,506	60,042	260.898
1120	40,923	31,611	237.352	1880	76,511	60,880	261.436
1140	41,780	32,301	238.110	1900	77,517	61,720	261.969
1160	42,642	32,997	238.859	1920	78,527	62,564	262.497
1180	43,509	33,698	239.600	1940	79,540	63,411	263.022
1200	44,380	34,403	240.333	1960	80,555	64,259	263.542
1220	45,256	35,112	241.057	1980	81,573	65,111	264.059
1240	46,137	35,827	241.773	2000	82,593	65,965	264.571
1260	47,022	36,546	242.482	2050	85,156	68,111	265.838
1280	47,912	37,270	243.183	2100	87,735	70,275	267.081
1300	48,807	38,000	243.877	2150	90,330	72,454	268.301
1320	49,707	38,732	244.564	2200	92,940	74,649	269.500
1340	50,612	39,470	245.243	2250	95,562	76,855	270.679
1360	51,521	40,213	245.915	2300	98,199	79,076	271.839
1380	52,434	40,960	246.582	2350	100,846	81,308	272.978
1400	53,351	41,711	247.241	2400	103,508	83,553	274.098
1420	54,273	42,466	247.895	2450	106,183	85,811	275.201
1440	55,198	43,226	248.543	2500	108,868	88,082	276.286
1460	56,128	43,989	249.185	2550	111,565	90,364	277.354
1480	57,062	44,756	249.820	2600	114,273	92,656	278.407
1500	57,999	45,528	250.450	2650	116,991	94,958	279.441
1520	58,942	46,304	251.074	2700	119,717	97,269	280.462
1540	59,888	47,084	251.693	2750	122,453	99,588	281.464
1560	60,838	47,868	252.305	2800	125,198	101,917	282.453
1580	61,792	48,655	252.912	2850	127,952	104,256	283.429
1600	62,748	49,445	253.513	2900	130,717	106,605	284.390
1620	63,709	50,240	254.111	2950	133,486	108,959	285.338
1640	64,675	51,039	254.703	3000	136,264	111,321	286.273
1660	65,643	51,841	255.290	3050	139,051	113,692	287.194
1680	66,614	52,646	255.873	3100	141,846	116,072	288.102
1700	67,589	53,455	256.450	3150	144,648	118,458	288.999
1720	68,567	54,267	257.022	3200	147,457	120,851	289.884
1740	69,550	55,083	257.589	3250	150,272	123,250	290.756

EK 7 : 25 °C sıcaklık ve 1 atm. basınçta formasyon entalpisi, formasyon Gibbs fonksiyonu ve mutlak entropi (k: katı, s: sıvı, g: gaz)

25 °C sıcaklık ve 1 atm basınçta formasyon entalpisi, formasyon Gibbs fonksiyonu ve mutlak entropi (*k:* katı, *s:* sıvı, *g:* gaz)

Madde	Kimyasal formülü	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{g}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/(kmol · K)
Karbon	$C(k)$	0	0	5.74
Hidrojen	$H_2(g)$	0	0	130.68
Azot	$N_2(g)$	0	0	191.61
Oksijen	$O_2(g)$	0	0	205.04
Karbon monoksit	$CO(g)$	−110,530	−137,150	197.65
Karbon dioksit	$CO_2(g)$	−393,520	−394,360	213.80
Su buharı	$H_2O(g)$	−241,820	−228,590	188.83
Su	$H_2O(s)$	−285,830	−237,180	69.92
Hidrojen peroksit	$H_2O_2(g)$	−136,310	−105,600	232.63
Amonyak	$NH_3(g)$	−46,190	−16,590	192.33
Metan	$CH_4(g)$	−74,850	−50,790	186.16
Asetilen	$C_2H_2(g)$	+226,730	+209,170	200.85
Etilen	$C_2H_4(g)$	+52,280	+68,120	219.83
Etan	$C_2H_6(g)$	−84,680	−32,890	229.49
Propilen	$C_3H_6(g)$	+20,410	+62,720	266.94
Propan	$C_3H_8(g)$	−103,850	−23,490	269.91
n-Bütan	$C_4H_{10}(g)$	−126,150	−15,710	310.12
n-Oktan	$C_8H_{18}(g)$	−208,450	+16,530	466.73
n-Oktan	$C_8H_{18}(s)$	−249,950	+6,610	360.79
n-Dodekan	$C_{12}H_{26}(g)$	−291,010	+50,150	622.83
Benzen	$C_6H_6(g)$	+82,930	+129,660	269.20
Metil alkol	$CH_3OH(g)$	−200,670	−162,000	239.70
Metil alkol	$CH_3OH(s)$	−238,660	−166,360	126.80
Etil alkol	$C_2H_5OH(g)$	−235,310	−168,570	282.59
Etil alkol	$C_2H_5OH(s)$	−277,690	−174,890	160.70
Oksijen	$O(g)$	+249,190	+231,770	161.06
Hidrojen	$H(g)$	+218,000	+203,290	114.72
Azot	$N(g)$	+472,650	+455,510	153.30
Hidroksil	$OH(g)$	+39,460	+34,280	183.70

Kaynak: JANAF, *Thermochemical Tables*, Dow Chemical Co., 1971; *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Technical Note 270-3, 1968; ve *API Research Project 44*, Carnegie Press, 1953.

EK 8 : 25 °C sıcaklık ve 1 atm. basınçta entalpisi ve buharlaşma entalpisi.

25 °C sıcaklık ve 1 atm basınçta yanma entalpisi ve buharlaşma entalpisi (yanma sonu ürünleri içindeki su sıvı alınmıştır).

Madde	Kimyasal formülü	$\Delta\bar{h}_c^\circ = -$HHV kJ/kmol	$\bar{h}_{fg}$ kJ/kmol
Hidrojen	$H_2(g)$	−285,840	
Karbon	$C(k)$	−393,520	
Karbon monoksit	$CO(g)$	−282,990	
Metan	$CH_4(g)$	−890,360	
Asetilen	$C_2H_2(g)$	−1,299,600	
Etilen	$C_2H_4(g)$	−1,410,970	
Etan	$C_2H_6(g)$	−1,559,900	
Propilen	$C_3H_6(g)$	−2,058,500	
Propan	$C_3H_8(g)$	−2,220,000	15,060
n- Bütan	$C_4H_{10}(g)$	−2,877,100	21,060
n- Pentan	$C_5H_{12}(g)$	−3,536,100	26,410
n- Heksan	$C_6H_{14}(g)$	−4,194,800	31,530
n- Heptan	$C_7H_{16}(g)$	−4,853,500	36,520
n- Oktan	$C_8H_{18}(g)$	−5,512,200	41,460
Benzen	$C_6H_6(g)$	−3,301,500	33,830
Toluen	$C_7H_8(g)$	−3,947,900	39,920
Metil alkol	$CH_3OH(g)$	−764,540	37,900
Etil alkol	$C_2H_5OH(g)$	−1,409,300	42,340

Kaynak: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 3. düzenleme, McGraw-Hill, 1977, s. 834-835, Tablo A-23M.

Not: HHV, üst ısıl değer anlamındadır.

EK 9 : Bazı maddelerin standart entalpi ve kimyasal ekserji değerleri

Table A.3 Standard enthalpy of devaluation and standard chemical exergy of inorganic substances. Reproduced from Ref [6.31], by permission. ($T^0 = 298.15$ K, $p^0 = 1.013\ 25$ bar.)

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\bar{h}_d^0$/[kJ/kmol]	Standard chemical exergy, $\bar{e}^0$/[kJ/kmol]
1	2	3	4	5
Ag	s	107.870	46 260	73 730
Ag_2CO_3	s	275.749	−20 180	121 940
AgCl	s	143.323	0	23 420
AgF	s	126.868	43 950	120 810
$AgNO_3$	s	169.875	−76 960	46 580
Ag_2O	s	231.739	61 910	64 540
Ag_2O_2	s	247.739	67 620	179 036
Ag_2S	s, α	247.804	785 280	714 060
Ag_2SO_4	s	311.802	103 250	144 220
Al	s	26.981 5	927 800	887 890
Al_4C_3	s	143.959	4 763 080	4 661 880
$AlCl_3$	s	133.340 5	474 510	426 940
Al_2O_3	s, corundum	101.961 2	184 690	204 270
$Al_2O_3 \cdot H_2O$	s	119.976 5	125 520	199 450
$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	s, gibbsite	156.007 2	12 160	209 210
Al_2S_3	s	150.155	3 520 230	3 079 540
$Al_2(SO_4)_3$	s	342.148	592 060	502 100
Al_2SiO_5	s, andalusite	162.046	28 030	45 940
Al_2SiO_5	s, cyanite	162.046	25 940	49 200
Al_2SiO_5	s, sillimanite	162.046	0	15 400
Ar	g	39.948	0	11 690
Au	s	196.967	0	18 920
AuCl	s	232.42	46 100	63 410
$AuCl_3$	s	303.326	124 070	152 110
AuF_3	s	253.962	253 490	437 260
Au_2O_3	s	441,932	−80 810	121 550
Ba	s, II	137.34	741 640	760 050
$BaCO_3$	s, II, witherite	197.35	−84 190	37 170
$BaCl_2$	s	208.25	42 710	63 610
BaF_2	s	175.34	−58 050	61 470
BaO	s	153.34	183 120	244 880
BaO_2	s	169.34	111 530	175 770
$Ba(OH)_2$	s	171.36	36 590	145 520
BaS	s	169.40	1 022 420	896 670
$BaSO_3$	s	217.40	282 750	257 450
$BaSO_4$	s, barite	233.40	0	13 470
Bi	s	208.980	288 680	271 370
BiO	s	224.979	81 240	92 440
Bi_2O_3	s	465.958	0	52 260
Bi_2S_3	s	514.152	2 567 720	2 165 480
C	s, graphite	12.011 15	393 780	410 820
C	s, diamond	12.011 15	395 680	413 690
CCl_4	l	153.823	584 270	583 180
CO	g	28.010 5	283 150	275 430
CO_2	g	44.009 5	0	20 140
CS_2	l	76.139	1 932 410	1 673 670
Ca	s, II	40.08	813 930	717 400
CaC_2	s	64.10	1 538 670	1 471 210
$CaCO_3$	s, calcite	100.09	0	5 050
$CaCO_3$	s, aragonite	100.09	−170	6 100
$CaCl_2$	s	110.99	180 130	84 910
$CaCl_2 \cdot H_2O$	s	129.00	107 700	63 610
$CaFe_2O_4$	s	215.77	104 600	56 480
$Ca_2Fe_2O_5$	s	271.85	324 680	213 620
$Ca(NO_3)_2$	s	164.089 8	−123 290	−11 970
$Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	s	200.120 5	−241 790	−17 020
$Ca(NO_3)_2 \cdot H_2O$	s	218.135 8	−289 290	−8 740
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	s	236.151 2	−349 290	−8 870
CaO	s	56.08	177 940	119 620
$CaO \cdot Al_2O_3$	s	158.04	388 690	326 780
$2CaO \cdot Al_2O_3$	s	214.12	105 760	339 540
$4CaO \cdot Al_2O_3$	s	326.28	—	485 420
$12CaO \cdot 7Al_2O_3$	s	1 386.68	3 362 640	2 211 220
$Ca(OH)_2$	s	74.09	68 660	62 500
$Ca_3(PO_4)_2$	s, α	310.18	0	31 910
CaS	s	72.14	1 055 750	838 880
$CaSO_4$	s, anhydrite	136.14	104 950	4 300
$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$	s, α	145.15	83 260	4 350
$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$	s, β	145.15	85 350	5 310
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	s, gypsum	172.17	0	2 760
$CaSiO_3$	s	116.16	93 780	27 590
Ca_2SiO_4	s	172.24	235 290	116 680
Ca_3SiO_5	s	228.32	419 240	250 770
Cd	s, α	112.40	354 410	290 920
$CdCO_3$	s	172.41	0	36 960
$CdCl_2$	s	183.31	126 750	65 810
CdO	s	128.40	99 600	65 980
$Cd(OH)_2$	s	146.41	38 480	61 370
CdS	s	144.46	934 550	749 050
$CdSO_4$	s	208.46	152 200	81 290
$CdSO_4 \cdot H_2O$	s	226.48	88 520	63 070
Cl_2	g	70.906	161 710	117 520
Cl	g	35.453	201 850	163 940
Co	s, III	58.933 2	293 080	260 520
Co_3C	s	188.810 75	1 312 790	1 222 110
$CoCO_3$	s	118.942 6	−36 200	29 630
$CoCl_2$	s	129.839	129 060	103 800
CoO	s	74.932 6	53 600	51 070
Co_3O_4	s	240.797 2	0	37 560
$Co(OH)_2$	s	92.947 9	−14 230	47 120
$Co(OH)_3$	s	109.955 3	−83 310	27 240
CoS	s	90.997	933 090	765 580
Co_2S_3	s	214.058	2 590 640	2 108 250
$CoSO_4$	s	154.995	148 900	103 220
Cr	s	51.996	564 590	539 260
Cr_3C_2	s	180.010	2 393 410	2 348 290
Cr_4C	s	219.995	2 583 480	2 494 900
Cr_7C_3	s	400.005	4 955 530	4 819 010
$CrCl_2$	s	122.902	330 400	306 000
$CrCl_3$	s	158.355	243 610	221 120

EK 9'un devamı

Table A.3—*continued*

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\tilde{h}_0^0$/[kJ/kmol]	Standard chemical exergy, $\tilde{e}^0$/[kJ/kmol]
1	2	3	4	5
CrO_3	s	99.994	−14 850	42 910
Cr_2O_3	s	151.990	0	36 510
Cs	s	132.905	352 480	408 530
CsCl	s	168.358	0	62 850
$CsNO_3$	s	194.910	−141 980	22 310
Cs_2O	s	281.809	387 180	544 370
CsOH	s	149.912	66 520	164 090
Cs_2S	s	297.874	1 089 990	1 091 020
Cs_2SO_4	s	361.872	8 590	123 020
Cu	s	63.54	201 590	134 400
$CuCO_3$	s	123.55	0	33 210
CuCl	s	98.99	146 370	77 050
$CuCl_2$	s	134.45	157 310	120 450
$CuFe_2O_4$	s	239.23	36 580	22 790
CuO	s	79.54	46 260	6 590
Cu_2O	s	143.08	236 380	123 500
$Cu(OH)_2$	s	97.55	−5 230	19 770
CuS	s	95.60	877 600	668 020
Cu_2S	s, II	159.14	1 048 210	773 000
$CuSO_4$	s	159.60	155 800	80 940
Cu_2SO_4	s	223.14	377 490	222 450
D_2	g	4.029 46	249 370	266 220
D_2O	g	20.028 86	0	33 450
D_2O	l	20.028 86	−45 430	24 520
F_2	g	37.996 8	401 500	448 820
Fe	s	55.847	411 350	377 740
Fe_3C	s, cementite	179.552	1 648 760	1 558 570
$FeCO_3$	s, siderite	115.856	56 950	120 410
$FeCl_2$	s	126.753	231 840	193 130
$FeCl_3$	s	162.206	248 630	225 600
$FeCr_2O_4$	s	223.837	108 990	133 490
FeO	s	71.846	140 800	133 750
Fe_2O_3	s, hematite	159.692	0	20 370
Fe_3O_4	s, magnetite	231.539	116 170	126 960
$Fe(OH)_3$	s	106.869	−50 450	46 530
FeS	s, α	87.911	1 040 810	879 000
FeS	s, β	87.911	1 046 540	890 180
FeS_2	s, pyrite	119.975	1 682 480	1 447 410
$FeSO_4$	s	151.909	212 740	170 240
FeSi	s	83.933	1 190 140	1 099 080
$FeSiO_3$	s	131,931	115 690	111 260
Fe_2SiO_4	s	203.778	243 670	228 310
$FeTiO_3$	s	151.75	86 870	99 530
H_2	g	2.015 94	242 000	238 490
H	g	1.007 97	360 860	322 410
HCl	g	36.461	109 490	85 950
HF	g	20.006 4	52 960	71 840
HNO_3	l	63.012 9	−52 330	45 650
H_2O	l	18.015 34	−44 030	3 120
H_2O	g	18.015 34	0	11 710
H_3PO_4	s	98.001 3	−75 360	98 850
H_2S	g	34.080	946 420	804 770
H_2SO_4	l	98.077	154 720	161 010
He	g	4.002 6	0	30 290
Hg	l	200.59	68 560	122 700
$HgCO_3$	s	260.60	−89 390	193 550
$HgCl_2$	s	271.50	0	63 100
Hg_2Cl_2	s	472.09	33 720	153 740
HgO	s, red	216.59	−22 210	64 240
HgS	s, red	232.65	734 940	679 430
$HgSO_4$	s	296.65	88 500	150 580
Hg_2SO_4	s	497.24	119 210	234 880
K	s	39.102	355 330	371 520
K_2CO_3	s	138.213	−42 450	90 110
KCl	s	74,555	0	21 390
$KClO_4$	s	138.553	2 430	125 900
KF	s	58.100	−6 880	59 760
$KMnO_4$	s	158.038	62 680	148 840
KNO_3	s	101.106 9	−137 380	−15 290
K_2O	s	94.203	348 820	425 540
KOH	s	56.109	50 200	101 320
K_2S	s	110.268	1 016 560	928 230
K_2SO_3	s	158.266	317 780	384 910
K_2SO_4	s, II	174.266	590	38 470
K_2SiO_3	s	154.288	1 308 010	1 565 320
Kr	g	83.80	0	34 280
Li	s	6.939	328 200	396 170
Li_2CO_3	s	73.887	−166 250	77 180
LiCl	s	42.392	0	70 160
$LiNO_3$	s	68.934	−154 450	12 700
Li_2O	s	29.877	60 200	233 460
LiOH	s	23.946	−38 350	75 620
Li_2SO_4	s	109.940	−54 380	76 520
Mg	s	24.312	719 920	626 710
$MgCO_3$	s	84.321	0	13 700
$MgCl_2$	s	95.218	239 370	151 860
$MgFe_2O_4$	s	200.004	76 640	38 230
MgO	s	40.311	117 690	59 170
$Mg(OH)_2$	s	58.327	36 610	33 830
$Mg(NO_3)_2$	s	148.321 8	−69 680	50 950
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	s	256.413 8	−440 400	29 400
MgS	s	56.376	1 097 000	875 550
$MgSO_3$	s	104.374	438 730	305 400
$MgSO_4$	s	120.374	165 430	67 480
$MgSiO_3$	s	100.396	81 430	25 060
Mg_2SiO_4	s	140.708	255 810	140 770
Mg_2TiO_4	s	160.52	185 980	92 200
Mn	s, α, IV	54.938 1	521 260	483 240
Mn_3C	s, II	176.825 45	1 953 370	1 856 770
$MnCO_3$	s	114.947 5	19 480	35 360
$MnCl_2$	s	125.844	200 230	159 340

EK 9'un devamı

Table A.3—*continued*

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\bar{h}^{o}_{d}$/[kJ/kmol]	Standard chemical exergy, $\bar{e}^{o}$/[kJ/kmol]
1	2	3	4	5
$MnFe_2O_4$	s	230.630	118 430	131 730
MnO	s, I	70.937 5	136 070	122 390
MnO_2	s, I	86.936 9	0	21 110
Mn_2O_3	s, II	157.874 4	70 760	79 110
Mn_3O_4	s, I	228.811 9	176 270	177 600
$Mn(OH)_2$	s	88.952 8	78 620	110 810
$Mn(OH)_3$	s, green	105.960 2	−41 630	89 130
MnS	s, I	87.002	1 041 520	873 540
$MnSO_4$	s	151.000	181 390	137 540
$MnSO_4 \cdot H_2O$	s	169.015	127 400	115 130
$MnSiO_3$	s	131.022	114 720	106 800
Mo	s	95.94	755 010	715 540
Mo_2C	s	203.89	1 921 800	1 853 700
MoO_2	s	127.94	210 730	228 310
MoO_3	s	143.94	0	43 940
Mo_2S_3	s	288.07	3 256 710	2 811 400
N_2	g	28.013 4	0	720
N_2 (air)	g	28.953 4	0	690
NH_3	g	17.030 5	316 780	341 250
NH_4Cl	s	53.491	249 260	331 150
NH_4NO_3	s	80.043 48	118 320	300 020
$(NH_4)_2SO_4$	s	132.138	513 240	660 470
NO	g	30.006 1	90 430	89 040
NO_2	g	46.005 5	33 870	56 220
N_2O	g	44.012 8	81 600	106 220
N_2O_4	g	92.011 0	9 670	107 040
Na	s	22.989 8	330 410	343 830
$NaAlO_2$	s	81.970 1	114 050	120 280
$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	s	220 055	5 730	95 250
Na_2CO_3	s	105.989 1	−77 090	53 130
$Na_2CO_3 \cdot H_2O$	s	124.004 3	−138 710	52 790
$Na_2CO_3 \cdot 7H_2O$	s	232.096 3	−457 330	69 640
NaCl	s	58.443	0	22 200
$NaHCO_3$	s	84.007 1	−103 120	224 370
$NaNO_3$	s	84.994 7	−94 430	−15 745
Na_2O	s	61.979 0	244 650	313 260
NaOH	s, II	39.997 2	23 100	84 490
Na_2S	s	78.044	1 011 940	930 340
Na_2SO_3	s	126.042	294 320	82 840
Na_2SO_4	s, II	142.041	0	35 000
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	s	322.195	−521 570	54 380
Na_2SiO_3	s	122.064	980	71 660
$Na_2Si_2O_5$	s	182.149	−8 620	61 190
Na_4SiO_4	s	184.043	175 640	312 120
Ne	g	20.183	0	27 120
Ni	s, II	58.71	244 510	252 800
Ni_3C	s	188.14	1 173 370	1 209 430
$NiCO_3$	s	118.72	−42 890	42 980
$NiCl_2$	s	129.62	90 120	111 150
$Ni(NO_3)_2$	s	182.72	−183 380	25 110
NiO	s	74.71	0	38 460
$Ni(OH)_2$	s	92.72	−51 910	49 160
$Ni(OH)_3$	s	109.73	−71 170	74 370
NiS	s, I	90.77	895 820	775 450
Ni_3S_2	s	240.26	1 999 700	1 774 810
$NiSO_4$	s	154.77	77 300	76 080
$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	s, green	262.86	−279 310	72 830
O_2	g	31.998 8	0	3 970
O	g	15.999 4	247 520	232 110
O_3	g	47.998 2	142 350	169 100
P	s, III, white	30.973 8	843 640	859 600
PCl_3	l	137.333	764 650	744 060
P_2O_5	s	141.944 6	574 430	319 540
Pb	s	207.19	306 680	226 940
$PbCO_3$	s	267.20	0	17 090
$PbCl_2$	s	278.10	108 950	30 410
PbO	s, I, yellow	223.19	88 670	40 020
PbO	s, II, red	223.19	87 290	39 400
PbO_2	s	239.19	29 850	17 380
Pb_3O_4	s	685.57	184 840	71 510
$Pb(OH)_2$	s	241.20	33 700	41 560
PbS	s	239.25	936 890	724 390
$PbSO_4$	s, II	303.25	112 260	21 660
$PbSiO_3$	s	283.27	83 110	36 120
Pb_2SiO_4	s	506.46	164 120	69 530
Rb	s	85.47	349 370	398 800
Rb_2CO_3	s	230.95	−36 240	170 630
RbCl	s	120.92	0	51 440
$RbNO_3$	s	147.47	−140 650	14 490
Rb_2O	s	186.94	368 400	608 590
RbOH	s	102.48	56 300	147 840
Rb_2S	s	203.00	1 074 980	1 052 290
Rb_2SO_4	s	267.00	−2 290	92 110
S	s, II, rhombic	32.064	724 580	598 850
S	s, I, monoclinic	32.064	724 880	598 950
SO_2	g	64.062 8	427 480	303 500
SO_3	g	80.062 2	329 140	225 070
Sb	s, III	121.75	490 690	359 190
Sb_2O_3	s	291.50	270 040	269 730
Sb_2O_4	s	307.50	85 400	104 530
Sb_2O_5	s	323.60	0	52 250
Si	s	28.086	859 970	803 010
SiC	s	40.097	1 141 960	1 104 220
$SiCl_4$	l	169.898	542 810	465 010
SiO_2	s, II, quartz	60.085	0	1 860
SiO_2	s, II	60.085	1 680	3 280
SiS_2	s, white	92.214	2 102 470	996 740
Sn	s, II, white	118.69	581 130	542 660
Sn	s, III, grey	118.69	583 640	547 180
$SnCl_2$	s	189.60	392 810	355 630
SnO	s	134.69	294 380	287 550

Table A.3—*continued*

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\bar{h}_d^0$/[kJ/kmol]	Standard chemical exergy, $\bar{\varepsilon}^0$/[kJ/kmol]
1	2	3	4	5
SnO_2	s	150.69	0	26 820
SnS	s	150.75	1 227 840	1 059 060
SnS_2	s	182.82	1 862 820	1 581 260
Sr	s	87.62	825 430	737 650
$SrCO_3$	s, III, strontianite	147.63	0	16 570
$SrCl_2$	s	158.53	158 150	74 480
$SrCl_2 \cdot 6H_2O$	s	266.62	−186 400	66 330
SrO	s	103.62	234 670	165 750
SrO_2	s	119.62	182 340	153 800
$Sr(OH)_2$	s	121.68	107 400	109 310
SrS	s	119.68	1 097 420	988 710
$SrSO_4$	s	183.68	104 310	9 170
Ti	s, II	47.90	912 720	876 000
TiC	s	59.91	1 080 410	1 064 120
TiO	s, II	63.90	393 710	388 840
TiO_2	s, III, rutile	79.90	0	23 090
Ti_2O_3	s, II	143.80	306 050	325 100
Ti_3O_5	s, II	223.70	281 760	322 200
TiS_2	s	112.03	2 026 940	1 743 640
U	s, III	238.03	1 264 400	1 224 180
UCl_3	s	344.39	615 170	534 850
UCl_4	s	379.84	536 100	483 790
UCl_5	s	415.30	571 310	508 710
UO_2	s	270.03	179 180	151 450
UO_3	s	286.03	0	43 940
V	s	50.942	780 840	725 880
VC	s	62.953	1 121 520	1 086 170
VO	s	66.941	355 550	328 880
VO_2	s	82.940	164 850	68 990
V_2O_3	s	149.882	330 760	324 280
V_2O_5	s	181.881	0	32 530
W	s	183.85	840 880	799 680
WC	s	195.86	1 196 600	1 173 270
WO_2	s	215.85	270 220	284 540
WO_3	s, yellow	231.85	0	42 220
WS_2	s	249.98	2 096 190	1 803 920
Xe	g	131.30	0	40 250
Zn	s	65.37	419 310	353 160
$ZnCO_3$	s	125.38	0	38 080
$ZnCl_2$	s	136.28	164 850	101 340
$ZnFe_2O_4$	s	241.06	40 830	27 630
ZnO	s	81.37	71 090	37 080
$Zn(OH)_2$	s	99.38	18 640	34 260
ZnS	s, II, sphalerite	97.43	940 830	764 860
$ZnSO_4$	s	161.43	164 680	93 280
$ZnSiO_3$	s	141.45	45 810	12 590
Zn_2SiO_4	s	222.82	187 860	121 280

Table A.4 Standard enthalpy of devaluation and standard chemical exergy of organic substances. Reproduced from Ref [3.3], by permission. ($T^0 = 298.15$ K, $P^0 = 1.01325$ bar.)

No.	Substance		State	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\bar{h}_d^0$	Standard chemical exergy, $\bar{\varepsilon}^0$
					kJ/kmol	kJ/kmol
1	2		3	4	5	6
1	CH_4	methane	g	16.042	802 320	836 510
2	C_2H_6	ethane	g	30.068	1 428 780	1 504 360
3	C_3H_8	propane	g	44.094	2 045 380	2 163 190
4	C_4H_{10}	butane	g	58.120	2 658 830	2 818 930
5	C_5H_{12}	pentane	g	72.146	3 274 290	3 477 050
			l	72.146	3 247 240	3 475 590
6	C_6H_{14}	hexane	g	86.172	3 889 280	4 134 590
			l	86.172	3 857 630	4 130 570
7	C_7H_{16}	heptane	l	100.198	4 467 820	4 786 300
8	C_8H_{18}	octane	l	114.224	5 078 000	5 440 030
9	C_9H_{20}	nonane	l	128.250	5 688 230	6 093 550
10	$C_{10}H_{22}$	decane	l	142.276	6 298 410	6 749 750
11	$C_{11}H_{24}$	undecane	l	156.302	6 908 600	7 404 520
12	$C_{12}H_{26}$	dodecane	l	170.328	7 518 820	8 059 340
13	$C_{13}H_{28}$	tridecane	l	184.354	8 129 010	8 714 200
14	$C_{14}H_{30}$	tetradecane	l	198.380	8 739 190	9 368 970
15	$C_{15}H_{32}$	pentadecane	l	212.406	9 349 370	10 023 870
16	$C_{16}H_{34}$	hexadecane	l	226.432	9 959 640	10 678 810
17	C_3H_6	cyclopropane	g	42.078	1 960 640	2 052 490
18	C_4H_8	cyclobutane	g	56.104	2 569 770	2 707 730
19	C_6H_{12}	cyclohexane	g	84.156	3 691 380	3 928 100
			l	84.156	3 658 260	3 922 990
20	C_7H_{14}	methylcyclo-hexane	g	98.182	4 295 490	4 573 030
			l	98.182	4 260 070	4 566 080
21	C_8H_{16}	ethylcyclo-hexane	g	112.208	4 914 260	5 246 900
			l	112.208	4 873 770	5 224 290
22	C_9H_{18}	propylcyclo-hexane	l	126.234	5 483 330	5 878 430
23	$C_{10}H_{20}$	butylcyclo-hexane	l	140.260	6 094 260	6 534 510
24	C_2H_4	ethylene	g	28.052	1 323 870	1 366 610
25	C_3H_6	propene	g	42.078	1 927 730	2 010 840
26	C_4H_8	1-butene	g	56.104	2 542 940	2 668 920
27	C_6H_{12}	1-hexene	g	84.156	3 772 890	3 984 330
			l	84.156	3 742 240	3 981 650
28	C_7H_{14}	1-heptene	g	98.182	4 387 970	4 641 570
			l	98.182	4 338 490	4 620 680
29	C_2H_2	acetylene	g	26.036	1 256 460	1 269 310
30	C_3H_4	propyne	g	40.062	1 850 860	1 904 070
31	C_4H_6	1-butyne	g	54.088	2 466 360	2 561 190
32	C_6H_{10}	1-hexyne	g	82.140	3 696 320	3 876 600
33	C_7H_{12}	1-heptyne	g	96.166	4 311 440	4 534 300
34	C_6H_6	benzene	g	78.108	3 171 630	3 310 540
			l	78.108	3 137 670	3 305 350

EK 9'un devamı

Table A.4—*continued*

No.	Substance		State	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\bar{h}_d^0$ kJ/kmol	Standard chemical exergy, $\bar{e}^0$ kJ/kmol
1	2		3	4	5	6
35	C_7H_8	toluene	g	92.134	3 774 440	3 952 550
			l	92.134	3 736 420	3 940 240
36	C_8H_{10}	ethylbenzene	g	106.160	4 389 980	4 610 250
			l	106.160	4 347 700	4 599 370
37	C_9H_{12}	propylbenzene	l	120.186	4 957 510	5 262 930
38	$C_{10}H_{14}$	butylbenzene	l	134.212	5 567 730	5 908 120
39	$C_{16}H_{26}$	decylbenzene	l	218.368	9 198 310	9 730 670
40	$C_{10}H_8$	naphthalene	s	128.164	4 984 220	5 264 190
41	$C_{10}H_{14}$	1,2,4,5-tetra-methylbenzene	s	134.212	5 532 980	5 896 060
42	$C_{11}H_{10}$	2-methylnaphthalene	s	142.190	5 574 930	5 892 920
43	$C_{11}H_{16}$	pentamethylbenzene	s	148.238	6 131 610	6 534 420
44	$C_{12}H_{18}$	hexamethylbenzene	s	162.264	6 739 110	7 191 670
45	$C_{14}H_{10}$	anthracene	s	178.220	6 850 940	7 229 600
46	$C_{14}H_{10}$	phenanthrene	s	178.220	6 835 870	7 213 270
47	$C_{14}H_{14}$	1,1-diphenylethane	s	182.252	7 250 910	7 682 020
48	$C_{18}H_{38}$	octadecane	s	254.484	11 116 710	11 981 110
49	$C_{19}H_{16}$	triphenylmethane	s	244.318	9 579 730	10 127 620
50	$C_{24}H_{18}$	1,3,5-triphenylbenzene	s	246.384	11 850 110	12 510 990
51	$C_{25}H_{20}$	tetraphenylmethane	s	320.410	12 544 110	13 254 570
52	CH_2O	formaldehyde	g	30.026	519 870	541 650
53	CH_2O_2	formic acid	g	46.026	259 080	303 580
			l	46.026	212 980	294 040
54	C_2H_6O	ethanol	g	46.068	1 278 230	1 370 800
			l	46.068	1 235 940	1 364 560
55	C_2H_6O	dimethylether	g	46.068	1 328 140	1 426 440
56	C_2H_4O	acetaldehyde	g	44.052	1 105 520	1 167 860
57	C_2H_4O	ethylene oxide	g	44.052	1 220 530	1 288 990
58	$C_2H_6O_2$	ethylene glycol	l	62.068	1 058 630	1 214 210
59	$C_2H_4O_2$	acetic acid	g	60.052	834 140	923 570
			l	60.052	786 610	912 640
60	C_3H_8O	propan-2-ol	l	60.094	1 830 590	2 007 820
61	C_3H_6O	acetone	g	58.078	1 690 880	1 798 440
			l	58.078	1 659 600	1 795 380
62	C_4H_8O	butanol	l	72.104	2 296 460	2 472 470
63	C_4H_8O	butan-2-one	l	72.104	2 264 050	2 441 780
64	C_4H_4O	furan	g	68.072	2 024 360	2 123 420
			l	68.072	1 996 730	2 122 750
65	$C_4H_8O_2$	butyric acid	l	88.104	2 018 750	2 224 950
66	$C_4H_8O_2$	ethyl acetate	l	88.104	2 073 550	2 278 750
67	$C_5H_{12}O$	pentan-1-ol	l	88.146	3 060 720	3 325 530
68	$C_5H_{12}O$	2-methylbutan-2-ol	l	88.146	3 017 220	3 289 530
69	$C_5H_{10}O$	cyclopentanol	l	86.130	2 878 680	3 121 220
70	$C_5H_6O_2$	furfuryl alcohol	l	98.098	2 418 550	2 694 580
71	$C_6H_{14}O$	hexan-1-ol	l	102.172	3 668 890	3 977 170
72	$C_6H_{12}O$	cyclohexanol	l	100.156	3 465 410	3 764 560
73	$C_7H_{16}O$	heptan-1-ol	l	116.198	4 285 570	4 637 550
74	C_7H_8O	benzyl alcohol	l	108.134	3 563 430	3 804 960
75	$C_4H_{10}O_4$	erithritol	s	122.124	1 874 680	2 204 470
76	$C_4H_6O_4$	succinic acid	s	118.092	1 356 860	1 616 310
77	$C_4H_4O_4$	maleic acid	s	116.076	1 271 280	1 500 300
78	$C_4H_4O_4$	fumaric acid	s	116.076	1 249 090	1 476 100
79	C_6H_6O	phenol	s	94.114	2 925 860	3 135 370
80	$C_6H_{14}O_6$	galactitol	s	182.178	2 729 580	3 212 360
81	$C_6H_{14}O_6$	mannitol	s	182.178	2 739 590	3 220 860
82	$C_6H_{12}O_6$	α-D-galactose	s	180.162	2 529 580	2 942 570
83	$C_6H_{12}O_6$	L-sorbose	s	180.162	2 544 610	2 952 820
84	$C_7H_6O_2$	benzoic acid	s	138.125	3 097 230	3 350 440
85	$C_7H_6O_3$	O-hydroxybenzoic acid	s	154.125	2 888 100	3 158 140
86	$C_8H_4O_3$	phthalic anhydride	s	148.120	3 173 800	3 439 410
87	$C_8H_6O_4$	phthalic acid	s	166.136	3 094 300	3 419 530
88	$C_{12}H_{10}O$	diphenyl ether	s	170.212	5 903 140	6 293 850
89	$C_{12}H_{22}O_{11}$	β-lactose	s	342.308	5 154 200	6 013 420
90	$C_{12}H_{22}O_{11}$	sucrose	s	342.308	5 166 180	6 033 090
91	$C_{12}H_{24}O_{12}$	α-lactose monohydrate	s	360.324	5 152 190	6 070 860
92	$C_{12}H_{24}O_{12}$	β-maltose monohydrate	s	360.324	5 173 210	6 091 000
93	$C_{16}H_{34}O$	hexadecan-1-ol	s	242.448	9 731 250	10 532 980
94	$C_{16}H_{32}O_2$	palmitic acid	s	256.432	9 290 260	10 089 060
95	$C_2H_2O_4$	oxalic acid	s	90.038	202 720	370 950
96	$C_2H_4N_4$	cyanoguanidine	s	84.084	1 296 480	1 481 960
97	$C_3H_6N_6$	melamine	s	126.124	1 835 620	2 127 400
98	$C_5H_5N_5$	adenine	s	135.130	2 664 860	2 946 840
99	$C_6H_4N_2$	2-cyanopyridine	s	104.108	3 106 060	3 251 510
100	$C_{12}H_{11}N$	diphenyl amine	s	169.216	6 188 050	6 553 430
101	CH_4ON_2	urea	s	60.058	544 660	693 580
102	$CH_6O_2N_2$	ammonium carbonate	s	78.074	474 780	673 570
103	$C_2H_5O_2N$	gylcine	s	75.068	867 630	1 055 280
104	$C_3H_7O_2N$	(±)alanine	s	89.094	1 462 410	1 697 540
105	$C_4H_7O_4N$	L-aspartic acid	s	133.104	1 445 160	1 751 920
106	$C_4H_8O_3N_2$	L-asparagine	s	132.120	1 749 870	2 070 500
107	$C_4H_2O_4N_2$	alloxan	s	142.072	813 120	1 056 120
108	$C_4H_7ON_3$	creatinine	s	113.120	2 179 650	2 448 730
109	$C_4H_9O_2N_3$	creatine	s	131.136	2 123 080	2 453 170
110	$C_4H_6O_3N_4$	allantoin	s	158.120	1 579 970	1 916 760
111	$C_5H_9O_4N$	D-glutamic acid	s	147.130	2 047 850	2 403 600
112	$C_5H_4ON_4$	hypoxanthine	s	136.114	2 337 280	2 606 950
113	$C_5H_4O_2N_4$	xanthine	s	152.114	2 068 780	2 366 340
114	$C_5H_5O_3N_4$	uric acid	s	169.122	1 950 590	2 294 870
115	$C_5H_5ON_5$	guanine	s	151.130	2 385 180	2 697 010
116	$C_9H_9O_3N$	hippuric acid	s	179.170	4 014 340	4 398 530
117	$C_{12}H_5O_{12}N_7$	bis(1,3,5-trinitrophenyl)-amine	s	439.216	5 397 200	6 173 640
118	C_2H_6S	ethanethiol	l	62.136	2 163 610	2 139 620
119	C_2H_6S	dimethyl sulphide	l	62.136	2 171 860	2 150 970
120	C_3H_8S	propane-1-thiol	l	76.163	2 782 970	2 802 640
121	C_3H_8S	methyl ethyl sulphide	l	76.163	2 782 250	2 802 940
122	$C_4H_{10}S$	butane-1-thiol	l	90.190	3 384 940	3 448 920
123	$C_4H_{10}S$	2-methyl propane-1-thiol	l	90.190	3 377 620	3 444 480
124	$C_4H_{10}S$	diethyl sulphide	l	90.190	3 391 560	3 456 540

EK 10 : Bazı gazlar için sabit basınçta molar ısı kapasiteleri

Table D.1 Mean isobaric heat capacity *for enthalpy* of some gases, $\bar{c}_P^h$. $T^0 = 298.15$ K, $P^0 = 0.101\,325$ MPa, $\theta = T - 273.15$ K.

T	θ	$\bar{c}_P^h$, kJ/kmol K									
K		N_2	O_2	Air	H_2	CO	CO_2	CH_4	SO_2	SO_3	H_2O
273.15	0.00	29.04	25.31	29.01	28.69	29.07	36.29	35.02	39.42	49.67	32.77
298.15	25.00	29.11	26.07	29.07	28.73	29.13	37.10	35.71	39.89	50.77	32.92
323.15	50.00	29.18	26.83	29.12	28.77	29.19	37.90	36.39	40.35	51.86	33.06
349.15	75.00	29.25	27.43	29.18	28.81	29.26	38.61	37.08	40.81	52.91	33.21
373.15	100.00	29.32	27.95	29.23	28.85	29.32	39.27	37.76	41.24	53.92	33.35
398.15	125.00	29.39	28.41	29.29	28.90	29.38	39.88	38.45	41.67	54.90	33.50
423.15	150.00	29.46	28.81	29.35	28.94	29.44	40.46	39.14	42.08	55.85	33.64
448.15	175.00	29.53	29.17	29.41	28.98	29.51	41.00	39.83	42.49	56.77	33.79
473.15	200.00	29.59	29.50	29.47	29.02	29.57	41.52	40.52	42.88	57.65	33.93
498.15	225.00	29.66	29.79	29.53	29.07	29.63	42.00	41.20	43.26	58.51	34.07
523.15	250.00	29.73	30.06	29.60	29.11	29.70	42.46	41.89	43.63	59.34	34.22
548.15	275.00	29.80	30.30	29.66	29.15	29.76	42.89	42.58	43.98	60.15	34.36
573.15	300.00	29.86	30.52	29.73	29.19	29.82	43.31	43.26	44.33	60.92	34.50
598.15	325.00	29.93	30.73	29.79	29.24	29.88	43.70	43.94	44.67	61.67	34.64
623.15	350.00	30.00	30.92	29.86	29.28	29.95	44.08	44.62	44.99	62.39	34.78
648.15	375.00	30.06	31.09	29.92	29.32	30.01	44.44	45.30	45.31	63.09	34.92
673.15	400.00	30.13	31.26	29.99	29.36	30.07	44.79	45.98	45.62	63.77	35.06
698.15	425.00	30.19	31.41	30.06	29.41	30.14	45.12	46.65	45.91	64.42	35.19
723.15	450.00	30.26	31.56	30.13	29.45	30.20	45.44	47.32	46.20	65.05	35.33
748.15	475.00	30.32	31.69	30.20	29.49	30.26	45.75	47.99	46.48	65.66	35.47
773.15	500.00	30.38	31.82	30.27	29.53	30.32	46.04	48.65	46.75	66.25	35.60
798.15	525.00	30.45	31.94	30.34	29.58	30.39	46.33	49.31	47.01	66.81	35.74
823.15	550.00	30.51	32.05	30.41	29.62	30.45	46.61	49.97	47.26	67.36	35.87
848.15	575.00	30.57	32.16	30.48	29.66	30.51	46.87	50.62	47.50	67.89	36.01
873.15	600.00	30.63	32.26	30.55	29.70	30.58	47.13	51.26	47.74	68.40	36.14
898.15	625.00	30.69	32.36	30.62	29.74	30.64	47.38	51.91	47.97	68.89	36.28
923.15	650.00	30.75	32.45	30.69	29.79	30.70	47.62	52.54	48.19	69.37	36.41
948.15	675.00	30.82	32.54	30.76	29.83	30.76	47.85	53.18	48.40	69.83	36.54

EK 10'un devamı

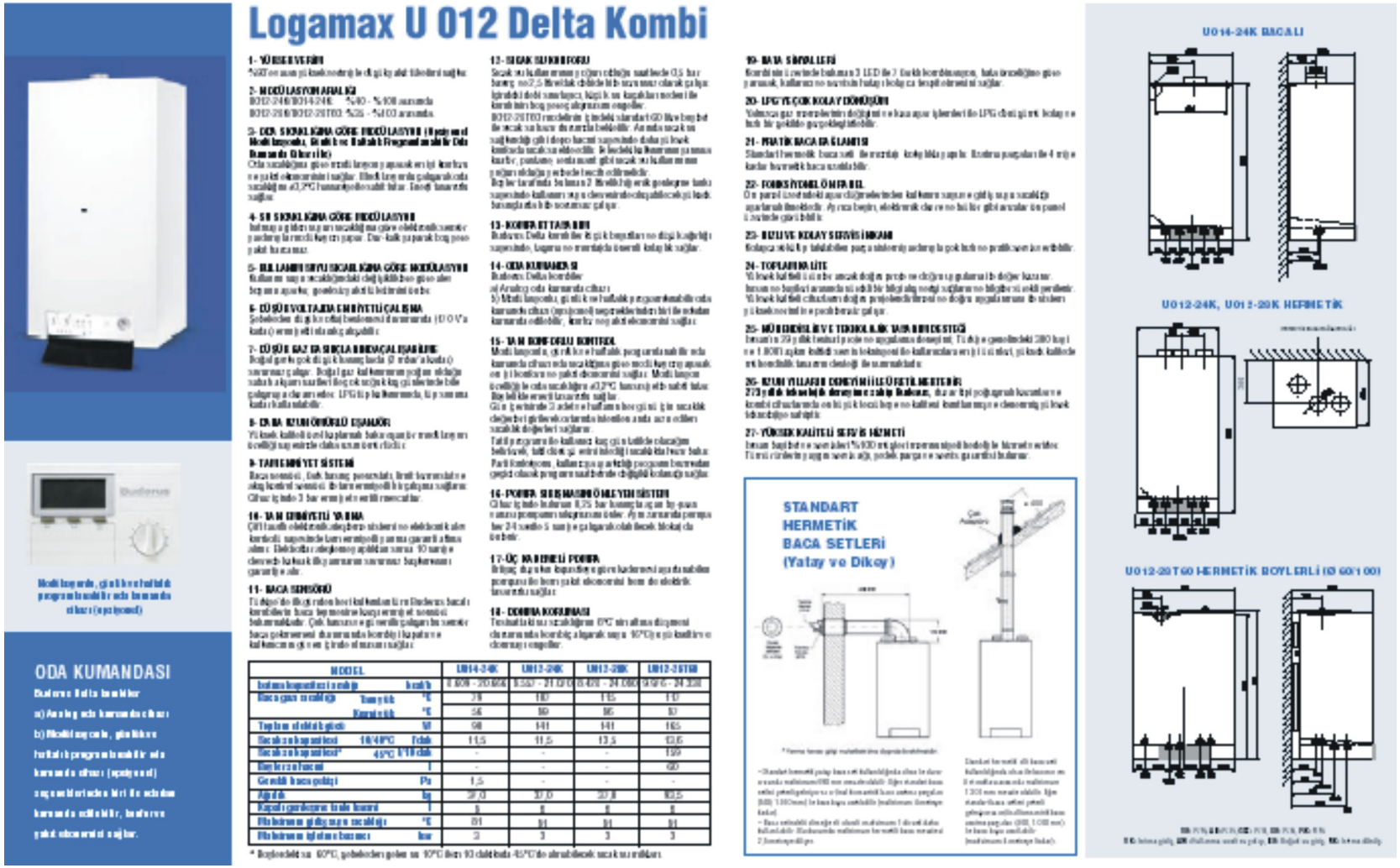
T	θ	$\bar{c}_P^0$, kJ/kmol K									
K		N_2	O_2	Air	H_2	CO	CO_2	CH_4	SO_2	SO_3	H_2O
973.15	700.00	30.88	32.63	30.83	29.87	30.83	48.08	53.80	48.60	70.28	36.67
998.15	725.00	30.94	32.71	30.90	29.91	30.89	48.30	54.42	48.80	70.71	36.80
1 023.15	750.00	31.00	32.79	30.97	29.96	30.95	48.51	55.04	48.99	71.13	36.93
1 048.15	775.00	31.05	32.86	31.05	30.00	31.01	48.72	55.65	49.17	71.54	37.06
1 073.15	800.00	31.11	32.93	31.12	30.04	31.08	48.92	56.25	49.35	71.93	37.19
1 098.15	825.00	31.17	33.00	31.19	30.08	31.14	49.12	56.84	49.52	72.32	37.32
1 123.15	850.00	31.23	33.07	31.26	30.13	31.20	49.31	57.43	49.68	72.69	37.45
1 148.15	875.00	31.29	33.14	31.33	30.17	31.27	49.50	58.01	49.84	73.06	37.57
1 173.15	900.00	31.34	33.20	31.40	30.21	31.33	49.68	58.58	49.99	73.41	37.70
1 198.15	925.00	31.40	33.26	31.47	30.25	31.39	49.86	59.15	50.14	73.76	27.83
1 223.15	950.00	31.46	33.32	31.54	30.30	31.45	50.03	59.71	50.28	74.10	37.95
1 248.15	975.00	31.51	33.37	31.61	30.34	31.52	50.20	60.25	50.41	74.43	38.08
1 273.15	1 000.00	31.57	33.43	31.68	30.38	31.58	50.37	60.79	50.55	74.76	38.20
1 298.15	1 025.00	31.62	33.48	31.74	30.42	31.64	50.53	61.33	50.67	75.09	38.33
1 323.15	1 050.00	31.68	33.53	31.81	30.47	31.71	50.68	61.85	50.79		38.45
1 348.15	1 075.00	31.73	33.58	31.88	30.51	31.77	50.84	62.36	50.91		38.57
1 373.15	1 100.00	31.79	33.63	31.94	30.55	31.83	50.99	62.86	51.02		38.69
1 398.15	1 125.00	31.84	33.68	32.01	30.59	31.89	51.14	63.36	51.13		38.81
1 423.15	1 150.00	31.89	33.73	32.07	30.63	31.96	51.28	63.84	51.24		38.93
1 448.15	1 175.00	31.95	33.77	32.14	30.68	32.02	51.42	64.31	51.34		39.05
1 473.15	1 200.00	32.00	33.82	32.20	30.72	32.08	51.56	64.77	51.44		39.17
1 498.15	1 225.00	32.05	33.86	32.26	30.76	32.15	51.70	65.22	51.53		39.29
1 523.15	1 250.00	32.10	33.90	32.32	30.80	32.21	51.83		51.62		39.41
1 548.15	1 275.00	32.15	33.94	32.38	30.85	32.27	51.96		51.71		39.53
1 573.15	1 300.00	32.20	33.99	32.44	30.89	32.33	52.09		51.80		39.64
1 598.15	1 325.00	32.25	34.02	32.50	30.93	32.40	52.21		51.88		39.76
1 623.15	1 350.00	32.30	34.06	32.56	30.97	32.46	52.33		51.96		39.88
1 648.15	1 375.00	32.35	34.10	32.61	31.02	32.52	52.45		52.04		39.99
1 673.15	1 400.00	32.40	34.14	32.67	31.06	32.58	52.57		52.12		40.11
1 698.15	1 425.00	32.45	34.18	32.72	31.10	32.65	52.69		52.20		40.22
1 723.15	1 450.00	32.50	34.21	32.77	31.14	32.71	52.80		52.28		40.33
1 748.15	1 475.00	32.55	34.25	32.82	31.19	32.77	52.92		52.35		40.45
1 773.15	1 500.00	32.60	34.28	32.87	31.23	32.84	53.03		52.42		40.56
1 798.15	1 525.00	32.64	34.32	32.92	31.27	32.90	53.13		52.49		40.67
1 823.15	1 550.00	32.69	34.35		31.31	32.96	53.24		52.57		40.78
1 848.15	1 575.00	32.74	34.38		31.35	33.02	53.34		52.64		40.89
1 873.15	1 600.00	32.78	34.42		31.40	33.09	53.45		52.71		41.00
1 898.15	1 625.00	32.83	34.45		31.44	33.15	53.55		52.78		41.11
1 923.15	1 650.00	32.87	34.48		31.48	33.21	53.65		52.85		41.22
1 948.15	1 675.00	32.92	34.51		31.52	33.28	53.75		52.92		41.33
1 973.15	1 700.00	32.96	34.54		31.57	33.34	53.84		53.00		41.43
1 998.15	1 725.00	33.01	34.57		31.61	33.40	53.94		53.07		41.54
2 023.15	1 750.00	33.05	34.60		31.65	33.46	54.03		53.15		41.65
2 048.15	1 775.00	33.09	34.63		31.69	33.53	54.12		53.22		41.75
2 073.15	1 800.00	33.14	34.66		31.74	33.59	54.21		53.30		41.86
2 098.15	1 825.00	33.18	34.69		31.78	33.65	54.30		53.38		41.96
2 123.15	1 850.00	33.22	34.72		31.82	33.72	54.39		53.46		42.06
2 148.15	1 875.00	33.26	34.74		31.86	33.78	54.48		53.54		42.17
2 173.15	1 900.00	33.30	34.77		31.91	33.84	54.56		53.63		42.27
2 198.15	1 925.00	33.34	34.80		31.95	33.90	54.65		53.71		42.37
2 223.15	1 950.00	33.39	34.83		31.99	33.97	54.73		53.80		42.47
2 248.15	1 975.00	33.43	34.85		32.03	34.03	54.81		53.90		42.57
2 273.15	2 000.00	33.46	34.88		32.08	34.09	54.89		53.99		42.67
2 298.15	2 025.00	33.50	34.91		32.12	34.15	54.97		54.09		42.77

EK 11 : Bazı gazlar için sabit basınçta molar ekserji kapasitesi

Table D.3 Mean isobaric exergy capacity of some gases, $\bar{c}_P^{\varepsilon}$. $T^0 = 298.15$ K, $P^0 = 0.101\,325$ MPa, $\theta = T - 273.15$ K.

T	θ	$\bar{c}_P^{\varepsilon}$, kJ/kmol K									
K		N_2	O_2	Air	H_2	CO	CO_2	CH_4	SO_2	SO_3	H_2O
273.15	0.00	−1.29	−1.11	−1.29	−1.27	−1.29	−1.60	−1.55	−1.74	−2.19	−1.51
298.15	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
323.15	50.00	1.16	1.07	1.16	1.14	1.16	1.52	1.45	1.61	2.07	1.26
348.15	75.00	2.21	2.10	2.21	2.18	2.21	2.95	2.83	3.10	4.05	2.45
373.15	100.00	3.17	3.07	3.16	3.12	3.17	4.31	4.15	4.50	5.93	3.55
398.15	125.00	4.06	3.99	4.04	3.98	4.06	5.60	5.41	5.81	7.72	4.57
423.15	150.00	4.87	4.86	4.85	4.78	4.87	6.82	6.62	7.04	9.45	5.52
448.15	175.00	5.63	5.68	5.61	5.52	5.63	7.98	7.79	8.21	11.10	6.40
473.15	200.00	6.34	6.45	6.31	6.21	6.33	9.09	8.93	9.31	12.69	7.22
498.15	225.00	7.00	7.18	6.97	6.85	6.99	10.14	10.03	10.36	14.21	8.00
523.15	250.00	7.62	7.87	7.58	7.45	7.61	11.15	11.11	11.37	15.68	8.74
548.15	275.00	8.21	8.52	8.17	8.01	8.19	12.11	12.16	12.32	17.10	9.43
573.15	300.00	8.76	9.14	8.72	8.54	8.74	13.03	13.19	13.24	18.47	10.09
598.15	325.00	9.28	9.73	9.24	9.05	9.27	13.91	14.19	14.11	19.79	10.72
623.15	350.00	9.78	10.29	9.73	9.52	9.76	14.75	15.18	14.95	21.07	11.32
648.15	375.00	10.26	10.82	10.21	9.98	10.23	15.56	16.15	15.76	22.30	11.90
673.15	400.00	10.71	11.33	10.66	10.41	10.68	16.34	17.10	16.53	23.49	12.45
698.15	425.00	11.14	11.81	11.09	10.82	11.11	17.09	18.03	17.28	24.64	12.98
723.15	450.00	11.55	12.27	11.50	11.21	11.52	17.81	18.95	18.00	25.76	13.49
748.15	475.00	11.95	12.71	11.90	11.58	11.92	18.50	19.86	18.69	26.84	13.98
773.15	500.00	12.33	13.13	12.28	11.94	12.30	19.17	20.75	19.36	27.88	14.46
798.15	525.00	12.69	13.54	12.65	12.29	12.66	19.82	21.64	20.00	28.90	14.92
823.15	550.00	13.04	13.93	13.00	12.62	13.02	20.45	22.50	20.62	29.88	15.36
848.15	575.00	13.38	14.30	13.35	12.94	13.35	21.05	23.36	21.22	30.83	15.79
873.15	600.00	13.71	14.66	13.68	13.25	13.68	21.63	24.21	21.80	31.75	16.21
898.15	625.00	14.03	15.01	14.00	13.55	14.00	22.20	25.04	22.37	32.65	16.61
923.15	650.00	14.33	15.34	14.31	13.83	14.30	22.75	25.86	22.91	33.52	17.01
948.15	675.00	14.63	15.66	14.61	14.11	14.60	23.28	26.68	23.43	34.36	17.39

EK 12 : Delta kombinin teknik özellikleri



Logamax U 012 Delta Kombi

1- YÜKSEK VERİM

2- MODÜLASYON ARALIĞI

3- DCN SICAKLIĞINA GÖRE MODÜLASYON (Opsiyonel Modül Gerçekte, Gömlek ve Radyatör Programlanabilir Oda Kumandası Olarak)

4- SU SICAKLIĞINA GÖRE MODÜLASYON

5- BULANIKMANTIKLI SICAKLIĞINA GÖRE MODÜLASYON

6- GÜÇLÜ VOLTAJDA EMNİYETLİ ÇALIŞMA

7- GÜÇLÜ GAZ BASINCI ARAÇSAL İŞARETİ

8- ÇOK İŞLEVLİ KONTROL

9- TAMPONLAMA SİSTEMİ

10- YAZ ÇEMİŞİTLİ YAKMA

11- BACA SENSÖRÜ

12- SICAK SU KONFORU

13- KOMBİ ETİKETİ

14- ODA KUMANDASI

15- YAZ KONFORLU KONTROL

16- YAZ ÇEMİŞİTLİ YAKMA

17- ÇİFT POMPA

18- DONMA KORUMASI

MODEL			U014-24K	U012-24K	U012-28K	U012-28TGO
Isıtma kapasitesi (min-maks)		kcal/h	8.600 - 20.600	8.600 - 21.070	8.600 - 24.080	8.600 - 24.080
Baca gazı sıcaklığı	Tam yük	°C	78	80	85	80
	Kısmi yük	°C	56	59	65	50
Toplam ısıl güç girişi		kW	98	141	141	165
Baca gazı kütlesel debisi	80/60°C	g/sn	11,5	11,5	13,5	13,5
Baca gazı kütlesel debisi*	45°C	g/sn	-	-	-	139
Bindirme basıncı		T	-	-	-	60
Gerekli baca çekişi		Pa	1,5	-	-	-
Ağırlık		kg	29,0	30,0	30,0	30,5
Kapalı yanmalı hava bağlantısı		T	0	0	0	0
Yıllık konfor gidiş suyu sıcaklığı		°C	61	61	61	61
Yıllık konfor işletme basıncı		bar	2	3	3	3

* Boyler debisi için 60°C, gaz debisinden gelen için 10°C'den 93 cihaz debisinde 45°C'de alınabilecek sıcak su miktarları.

19- DATA SİNYALLERİ

20- LPG'YE ÇOK KOLAY DÖNÜŞÜM

21- PRATİK BACA BAĞLANTISI

22- FONKSİYONEL ÖN PANEL

23- BAKIMI VE KOLAY SERVİSİ İMKANI

24- TOPLARDA LİTE

25- MÜKEMMEL BİR TEKNOLOJİK TASARIM ÖRNEĞİ

26- UZUN YILLARDIR EMNİYETİNİ İLE ÜRETİLMEKTEDİR!

27- YÜKSEK KALİTELİ SERVİS HİZMETİ

STANDART HERMETİK BACA SETLERİ (Yatay ve Dikey)

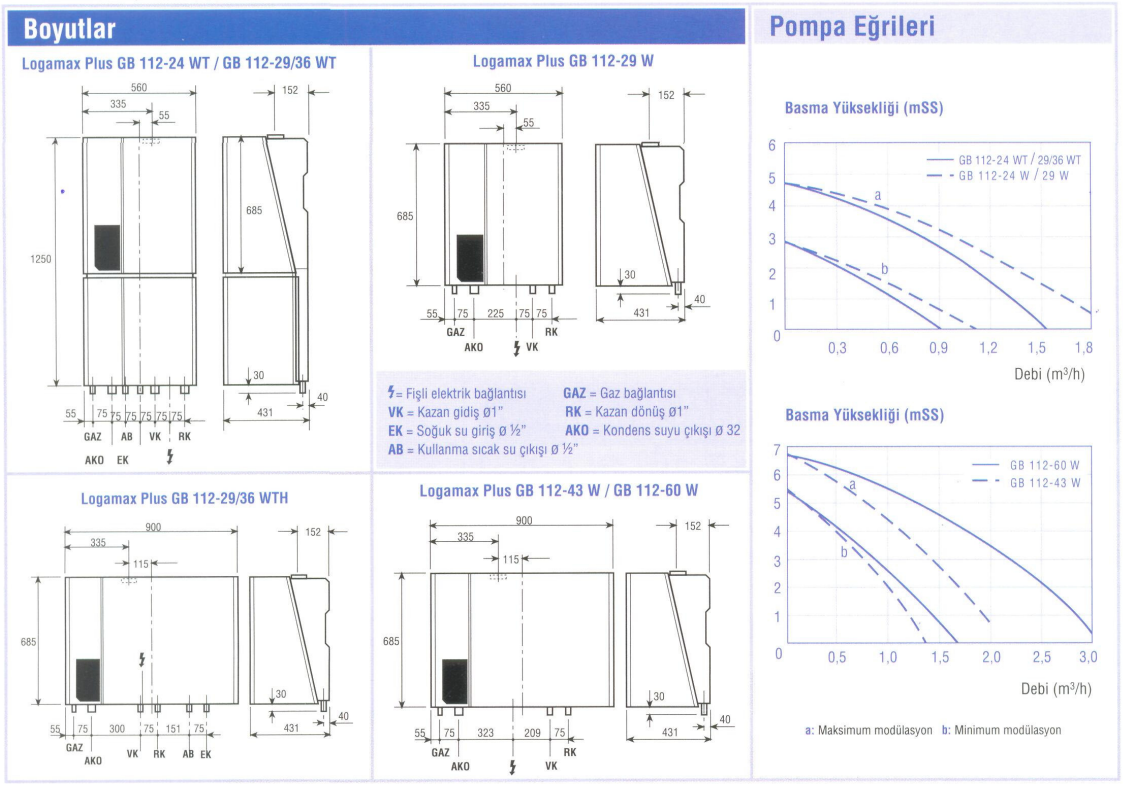
U014-24K BACALI

U012-24K, U012-28K HERMETİK

U012-28TGO HERMETİK BOYLERLİ (Ø 60/100)

ODA KUMANDASI

EK 13 : Yoğuşmalı kombinin teknik özellikleri



TEKNİK BİLGİLER			GB 112-24 WT	GB 112-29 W	GB 112-29 / 36 WT-WTH	GB 112-43 W	GB 112-60 W
Isıtma Kapasitesi	40/30°C	kcal/h	20.000	25.700	26.700	37.000	52.000
	75/60°C	kcal/h	18.500	23.500	24.400	34.000	47.500
Norm Kullanma Verimi	40/30°C	%	109	109	109	109	109
	75/60°C	%	105	105	105	105	105
Kapasite aralığı*			%0-%100	%0-%100	%0-%100	%0-%100	%0-%100
Sıcak Su Miktarı (10/45°C)		litre/h	515	-	800	-	-
Boyler Su Hacmi		litre	25	-	25	-	-
Baca Gazı Sıcaklığı (Tam Yükte)	40/30°C	°C	45	45	45	45	45
	75/60°C	°C	65	65	65	65	65
NOx Emisyon Değerleri		mg/kWh	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
CO Emisyon Değerleri		mg/kWh	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Eşanjör Su Hacmi		litre	2,6	3,3	3,3	4,7	7,1
Toplam Elektrik Gücü		W	120	130	130	180	200
Ağırlık		kg	86	60	95-92	72	75
Gaz Giriş Basıncı Sınırları (Maks- Min)		mbar	50-8	50-8	50-8	50-8	50-8
Gaz Bağlantısı		inç	R ½"	R ½"	R ½"	R ½"	R ¾"
Kondens Suyunun pH Değeri		litre/h	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Maksimum İşletme Basıncı		bar	3	3	3	4	4

*%30-%100 kapasite aralığında brülör ile modülasyon, %0-%30 kapasite aralığında pompa kontrolü ile kapasite kontrolü yapar.