

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞALGAZ YAKITLI KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ
SİSTEMİ İÇİN SABİT SICAKLIK BUHARLI YAKIT
DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

Süleyman KAVAS

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.05.00

Tezin Sunulduğu Tarih:12.06.2008

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN

Bornova-İZMİR

Süleyman KAVAS tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Doğalgaz yakıtlı katı oksitli yakıt pili sistemi için sabit sıcaklık buharlı yakıt dönüştürücü tasarımı” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 12.06.2008 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Turhan

ÇOBAN

.....

Raportör Üye: Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

Üye : Doç. Dr. Dilek KUMLUTAŞ

ÖZET

DOĞALGAZ YAKITLI KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMİ İÇİN SABİT SICAKLIK BUHARLI YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

KAVAS, Süleyman

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN

Haziran 2008, 169 sayfa

Günümüzde hızla artan enerji gereksinimi var olan kısıtlı kaynakların en doğru şekilde kullanılmasını ve yeni enerji kaynaklarının veya enerji dönüşüm sistemlerinin bulunmasını zorunlu hale getirmiştir.

Bu çalışmada, enerji üretim yöntemlerine farklı bir bakış açısı getiren yakıt pilleri üzerinde durulmuştur. Esas olarak, yakıt pili sistemlerinde kullanılan yakıt dönüştürücüler incelenmiş ve ısı değiştiricisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücünün ısı tasarımı yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda buharlı yakıt dönüştürücünün ısı tasarımı için bir bilgisayar programı yazılarak dönüştürücü farklı çalışma koşulları için incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Yakıt pili, ısı değiştiricisi ile entegre yakıt dönüştürücüsü,

ABSTRACT

**CONSTANT TEMPERATURE STEAM FUEL REFORMER
DESIGN FOR NATURAL GAS FUELED SOLID OXIDE FUEL
CELL SYSTEM**

KAVAS, Süleyman

M.Sc. in Mechanical Engineering

Supervisor: Assistant Professors Mustafa Turhan ÇOBAN

June 2008, 169 pages

Rapidly increasing energy demand makes us to use the limited energy resources most efficiently. It is getting an obligation to find a new energy resources or energy conversion system day by day.

This study, we dealt with the fuel cells which brings the different point of view on energy production methods. Principally, reformer, which used in fuel cell systems, are examined and heat exchanger integrated fuel reformer's thermal design was performed.

On the evidence of studies, the computer software for this heat exchanger integrated fuel reformer's thermal design was developed and reformer was investigated in different working conditions.

Keywords: Fuel cell, exchanger integrated fuel reformer

TEŞEKKÜR

Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Ali GÜNGÖR' e, yüksek lisans eğitimim boyunca, herhangi bir konuda, desteğini asla esirgemeyen, bu tez çalışmasının ortaya çıkmasını sağlayan, çalışmayı yönlendiren, kıymetli yorum ve değerlendirmeleriyle tezin biçimlendirilmesine büyük katkı sağlayan tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa Turhan ÇOBAN'a, tez jürime katılarak bu çalışmaya katkıda bulunan hocalarım Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA'a, ve Doç. Dr. Dilek KUMLUTAŞ'a, yüksek lisans çalışmalarım boyunca her türlü olanağı sağlayan 4M Teknik Yazılım Şirketine ve yöneticisi sayın Mahmut TAMERSOY'a ve eğitimimi her zaman destekleyen ve beni cesaretlendiren aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	V
ABSTRACT.....	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
ÇİZELGELER DİZİNİ	XVII
1. GİRİŞ	1
1.1. Ege Üniversitesinde Yakıt Pili Çalışmaları	2
1.2. Tezin Amacı.....	2
1.3. Tezin Önemi	2
2. YAKIT PİLLERİ VE KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMLERİ.....	4
2.1.Yakıt Pili Temelleri	4
2.2. Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri	4

İÇİNDEKİLER (Devam)

2.3. Yakıt Pili Türleri	7
2.3.1. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)	7
2.3.2. Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEMFC).....	8
2.3.3. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC).....	8
2.3.4. Alkali Yakıt Pili (AFC).....	8
2.3.5. Katı Oksitli Yakıt Pili (SOFC) ve Çalışma Prensipleri.....	10
3. YAKIT PİLİNDE KULLANILAN YAKITLAR VE YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	13
3.1. Yakıt Pillerinde Kullanılan Yakıtlar	13
3.1.1. Hidrojen ve Hidrojen Enerjisi	14
3.1.2. Hidrojenin Depolanması	15
3.1.3. Hidrojenin Taşınması	18
3.2. Yakıt Dönüşümü Teorisi	18
3.3. Yakıt Dönüştürücü Türleri	19

İÇİNDEKİLER (Devam)

3.3.1. Buharlı Yakıt Dönüştürücü	20
3.3.2. Kısmi Yanma	22
3.3.3. Ototermal Yakıt Dönüştürücü.....	24
3.3.4. Isı Değiştiricisi ile Entegre Buharlı Yakıt Dönüştürücü	26
3.3.5. Yakıt Dönüştürücülerinin Karşılaştırılması	27
4. FARKLI YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN KULLANILDIĞI KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	30
4.1. Giriş ve Sistem Modeli	30
4.2. Sistem Tasarımı ve Sistem Değişkenlerinin Oluşturulması	31
4.2.1. Ototermal Yakıt Dönüştürücünün Kullanıldığı Yakıt Pili Sistemi..	32
4.2.1.1. En Uygun Buhar Yakıt Oranının Bulunması.....	33
4.2.1.2. Yakıt Dönüştürücü İşlemleri.....	39
4.2.1.3. Düğüm Noktalarının Isıl Hesapları.....	40
4.2.1.4. Yakıt Hücresi Hesapları.....	44

İÇİNDEKİLER (Devam)

4.2.1.5. Sistemde Kullanılan Isı Değiştiricilerinin Hesapları.....	48
4.2.2. Buharlı Yakıt Dönüştürücünün Kullanıldığı Yakıt Pili Sistemi	54
4.2.2.1. En Uygun Buhar Yakıt Oranının Bulunması	55
4.2.2.2. Yakıt Dönüştürücü İşlemleri	60
4.2.2.3. Düğüm Noktalarının Isıl Hesapları	61
4.2.2.4. Yakıt Hücresi Hesapları	62
4.2.2.5. Sistemde Kullanılan Isı Değiştiricilerinin ve Yanma Odasının Hesapları	67
4.2.3. Isı Değiştiricisi İle Entegre Buharlı Yakıt Dönüştürücünün Kullanıldığı Yakıt Pili Sistemi	78
4.2.3.1. En Uygun Buhar Yakıt Oranının Bulunması	79
4.2.3.2. Yakıt Dönüştürücü İşlemleri	82
4.2.3.3. Düğüm Noktalarının Isıl Hesapları	84
4.2.3.4. Yakıt Hücresi Hesapları	84
4.2.3.5. Sistemde Kullanılan Isı Değiştiricilerinin Hesapları.....	88

İÇİNDEKİLER (Devam)

4.3. Sonuç	97
5. ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İLE ENTEGRE BUHARLI YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN MODELLENMESİ	98
5.1. Sistem Parametreleri Ve Kabuller	98
5.2. Sistem Modeli	99
5.3. Kimyasal reaksiyonların Comsol 3.3 analiz programı için matematiksel modelinin oluşturulması ve programda çözülmesi.....	102
5.4. Java programlama dilinde sistemin oluşturulması ve çözülmesi.....	109
5.4.1 Isı transfer modelinin çıkarılması	112
6. SONUÇLAR.....	128
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	130
EKLER.....	133
ÖZGEÇMİŞ	156

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Yakıt pili çalışma prensibi.....	5
Şekil 2.2 Çevre havası ve hidrojen kullanan yakıt pili.	6
Şekil 2.3 Katı oksitli yakıt pilinin çalışma prensibi.....	10
Şekil 2.4 Katı oksitli yakıt pilinde elektron akışı	11
Şekil 2.5 Borulu ve prizmatik katı oksitli yakıt pili.....	12
Şekil 3.1 Kısmi yanmanın gerçekleştiği dönüştürücü.	23
Şekil 3.2 Johnson Matthey’s modüler “HotSpot” yakıt dönüştürücüleri.	24
Şekil 3.3 Ototermal yakıt dönüştürücüleri.....	25
Şekil 4.1 ATR’de farklı reaksiyon şartları için yakıt dönüştürücü çıkış değerlerinin grafiksel gösterimi	33
Şekil 4.2 Adyabatik yakıt dönüştürücü çıkışında H ₂ miktarının farklı su-karbon oranına bağlı olarak değişimi	35
Şekil 4.3 Yakıtın hidrojene dönüşüm miktarları	36

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.4 ATR çıkışındaki gazların mol sayılarının çıkış sıcaklığına göre değişimleri.....	38
Şekil 4.5 Oksijen miktarındaki değişimin yakıt dönüştürücü çıkışındaki sıcaklığa etkisi.	39
Şekil 4.6 Gaz karışımlarının özelliklerinin bulunduğu java programının arayüzü.....	41
Şekil 4.7 Reaction.java programından bir kesit.	47
Şekil 4.8 Yakıt dönüştürücü öncesindeki ısı değiştiricisi akış şeması	49
Şekil 4.9 Kükürt arıtıcı önündeki ısı değiştirici akış şeması.....	50
Şekil 4.10 Havanın ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması	52
Şekil 4.11 Suyun ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması.....	53
Şekil 4.12 Farklı H ₂ O/C oranlarında yakıt dönüştürücüden çıkan H ₂ miktarları.....	56
Şekil 4.13 Su-karbon oranının 3 ve 3'den küçük olduğu durumlar için yakıt dönüşüm oranları	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.14 Su-karbon oranının 3'den büyük olduğu durumlar için yakıt dönüşüm oranları.....	58
Şekil 4.15 Farklı H_2O/C için yakıt dönüştürücü çıkışları.....	59
Şekil 4.16 Yakıt dönüştürücü çıkış sıcaklıkları.....	59
Şekil 4.17 Yakıt pili öncesindeki ısı değiştiricinin akış şeması.....	67
Şekil 4.18 Yakıt dönüştürücü öncesindeki ısı değiştiricinin akış şeması.	68
Şekil 4.19 Yakıtın ilk ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması.	70
Şekil 4.20 Havanın ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması.	72
Şekil 4.21 Katalitik yanma odasına gidecek havanın ısıtıldığı ısı değiştirici akış şeması.	74
Şekil 4.22 Farklı H_2O/C oranlarında yakıt dönüştürücüden çıkan H_2 miktarları..	80
Şekil 4.23 Hidrojen çıkışının su-karbon oranının 3'den küçük olduğu durum için genişletilmiş gösterimi.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.24 Yakıt dönüştürücü çıkışındaki gazların farklı su-karbon oranları için değerleri	81
Şekil 4.25 Metanın farklı su-karbon oranları için dönüşüm oranları.....	82
Şekil 4.26 Suyun yakıt dönüştürücüye girmeden önce ısıtıldığı son ısı değiştiricinin akış şeması	89
Şekil 4.27 Yakıt piline gidecek havanın ilk ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması.....	90
Şekil 4.28 Havanın pile girmeden önce ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması.....	91
Şekil 4.29 Yakıtın dönüştürücüye girmeden önce ısıtıldığı son ısı değiştiricinin akış şeması	92
Şekil 4.30 Yakıtta ilk ısıtma yapılan ısı değiştiricinin akış şeması.....	93
Şekil 4.31 Yakıtta ön ısıtma yapılan ısı değiştiricinin akış şeması.....	94
Şekil 4.32 Suyun ön ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması.....	95
Şekil 5.1 Isı değiştiricisi ile entegre yakıt dönüştürücüsü genel şeması	100

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.2 Zamana göre reaksiyon gazlarının derişimlerinin değişimi..	107
Şekil 5.3 Zamana göre reaksiyon hızlarının değişimi..	108
Şekil 5.4 Birim eleman üzerindeki akış.....	109
Şekil 5.5 Isı değiştiricideki sıcaklık dağılımı.....	110
Şekil 5.6 Yakıt dönüştürücü boyunca egsoz gazlarının sıcaklık değişimi.....	124
Şekil 5.7 Yakıt dönüştürücü boyunca transfer edilen ısı miktarı.....	125
Şekil 5.8 Yakıt dönüştürücü boyunca reformer gazlarının mol değişimi.....	126
Şekil 5.9 Yakıt dönüştürücü boyunca diğer reformer gazlarının mol değişimi.....	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri.	9
Çizelge 3.1 Methanolün farklı dönüştürücüler sonrası bileşimi	27
Çizelge 4.1 Hesaplarda kullanılan doğalgazın bileşimi	30
Çizelge 4.2 Yakıt dönüştürücünün adyabatik olması durumunda çıkış değerleri (700 °C).....	34
Çizelge 4.3 Yakıt dönüştürücüye giren ve dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları.	37
Çizelge 4.4 ATR çıkışındaki gaz miktarları.	40
Çizelge 4.5 Yakıt dönüştürücüye kadarki kısmı oluşturan noktaların hesap sonuçları.....	44
Çizelge 4.6 Pilin hesaplar sonucunda elde edilen özet performans değerleri	47
Çizelge 4.7 Pil kısmını oluşturan noktaların hesap sonuçları.....	49
Çizelge 4.8 Isı değiştirici çıkışındaki noktarın hesap sonuçları.	54
Çizelge 4.9 Farklı buhar karbon oranları için yakıt dönüştürücü çıkış değerleri	56

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.10 Yakıt dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları	60
Çizelge 4.11 Yakıt dönüştürücüye kadarki kısmı oluşturan noktaların hesap sonuçları.....	61
Çizelge 4.12 Hesaplar sonucunda elde edilen pil özet değerleri.....	62
Çizelge 4.13 Pil kısmını oluşturan noktaların hesap sonuçları.	66
Çizelge 4.14 Isı değiştirici çıkışındaki noktarın özet hesap sonuçları.	75
Çizelge 4.15 Katalitik yanma odası ile ilgili noktarın hesap sonuçları.	78
Çizelge 4.16 Farklı su karbon oranları için yakıt dönüştürücü çıkış değerleri	79
Çizelge 4.17 Yakıt dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları.	83
Çizelge 4.18 Hesaplar sonucunda elde edilen pil özet değerleri	85
Çizelge 4.19 Pil kısmını oluşturan noktaların hesap sonuçları	87
Çizelge 4.20 Isı değiştirici çıkışındaki noktarın hesap sonuçları.....	96

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.21 Sistem performanslarının karşılaştırılması	97
Çizelge 5.1 Yakıt dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları.	101
Çizelge 5.2 Isıl kapasitelerin bulunması için programda kullanılan katsayılar.....	103
Çizelge 5.3 Reaksiyonlar için kimyasal parametreler..	105
Çizelge 5.4 Reaksiyonun ilk adımında gibbs.java programı ile bulunan reaksiyon sonuçları..	105
Çizelge 5.5 Programın son adımda hesapladığı mol sayıları.....	114

1. GİRİŞ

Yıllardır artan nüfus, teknolojinin yoğun kullanımı ve kentlerdeki tüketim toplumunun artmasına bağlı olarak enerji gereksinimi sürekli ve büyük bir oranda artmaktadır. Bu artışın temelleri sanayi devrimine kadar gitmektedir. Artan sanayi işletmeleri ile birlikte enerji gereksinimi de artmıştır. 21. yy da ise enerji artık bir sorun ve stratejik unsur haline gelmiştir.

En küçük el aletinin kullanımından fabrikadaki makinelere, evlerde kullanılan ısıtma-soğutma cihazlarından taşıtlara kadar artık her yerde insanoğlu enerjiye muhtaç durumdadır. Özellikle elektrik enerjisinin olmadığı bir hayat artık düşünülememektedir.

Böyle bir ortamda enerji vazgeçilmez bir unsur olmakta ve enerjiye olan ilgi gün be gün artmaktadır. Artık varolan enerji kaynakları yetersiz kalmakta ve yeni kaynaklar bulunması konusunda sıkıntılar yaşanmaktadır. Dünyanın içinde bulunduğu enerji sıkıntısı insanları daha yoğun ve büyük miktarlardaki kaynaklara yöneltmektedir. Nükleer enerji bu tür bir kaynaktır. Fakat çevreye olan zararları ve önceden kestirilemeyen sonuçları göz önüne alındığında şüpheyile yaklaşılması gerekmektedir. Fosil yakıtlar ise rezervlerinin sınırlı olması ve çevreye olan zararları bakımından yakın zamanda ikinci plana düşecek ve gittikçe önemini yitirecek bir enerji kaynağıdır.

Günümüzde bilim adamları hem çevreyle dost hem de yoğun enerji kaynakları üzerinde çalışmaktadır. Yakıt pilleri bu ihtiyaca cevap verecek alternatif enerji kaynaklarından birisi bugün için değilse bile, dünya

genelinde yapılan yoğun çalışmalarla ileride adından sıkça söz ettirecek önemli bir seçenek olacaktır.

1.1 Ege Üniversitesi'nde Yakıt Pili Çalışmaları

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği ana bilim dalında 2005 yılından itibaren Yrd.Doç.Dr. M. Turhan ÇOBAN tarafından yakıt pili sistemleri dersi verilmektedir. Yakıt pili sistemleri ile ilgili olarak bilimsel çalışmalar yapılmakta, DPT projeleri ile yüksek lisans ve doktora tezleri yürütülmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Farklı yakıt dönüştürücülerinin kullanıldığı katı oksitli yakıt pili sistemlerinin verimlerinin incelenmesi ve en uygun yakıt dönüştürücünün tasarımının yapılmasıdır.

Bu amaçla üç farklı yakıt dönüştürücünün kullanıldığı katı oksitli yakıt pili sistemleri incelenecektir. Yakıt dönüştürücünün kimyasal ve ısı modeli çıkarılacak ve genel sistem üzerine etkileri incelenecektir.

1.3 Tezin Önemi

Günümüzde yaşanan enerji sıkıntısı insanları daha verimli enerji dönüşüm sistemlerine ihtiyaç duyar hale getirmiştir. Yakıt pili sistemleri için de bu kural geçerlidir. Yakıt dönüştürücüler, elektrokimyasal reaksiyonlar için gerekli olan hidrojenin oluşturulduğu kısımdır. Bu sistemlerde oluşan verim düşüşü yakıtın tam olarak hidrojene dönüşmemesi anlamına gelir. Bu bakımdan yakıt dönüştürücülerdeki

verim kaybı daha yakıtın enerjiye dönüşmeden kaybolması, daha doğrusu hiç kullanılmadan çevreye atılması demektir.

Bu amaçla bu tezde yakıttan hidrojene dönüşümü sağlayan yakıt dönüştürücüleri incelenmiş ve verimleri üzerinde çalışılmıştır.

BÖLÜM 2. YAKIT PİLLERİ VE KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMLERİ

2.1 Yakıt Pili Temelleri

Yakıt pilleri, temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir. Bir buhar kazanı veya türbin kullanılmadan, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. Hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elde edilen ve toplam verimlilikleri % 80'lere kadar ulaşabilen yakıt pilleri, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makinalar olarak da bilinir. (www.selimcetinkaya.tripod.com, 2007)

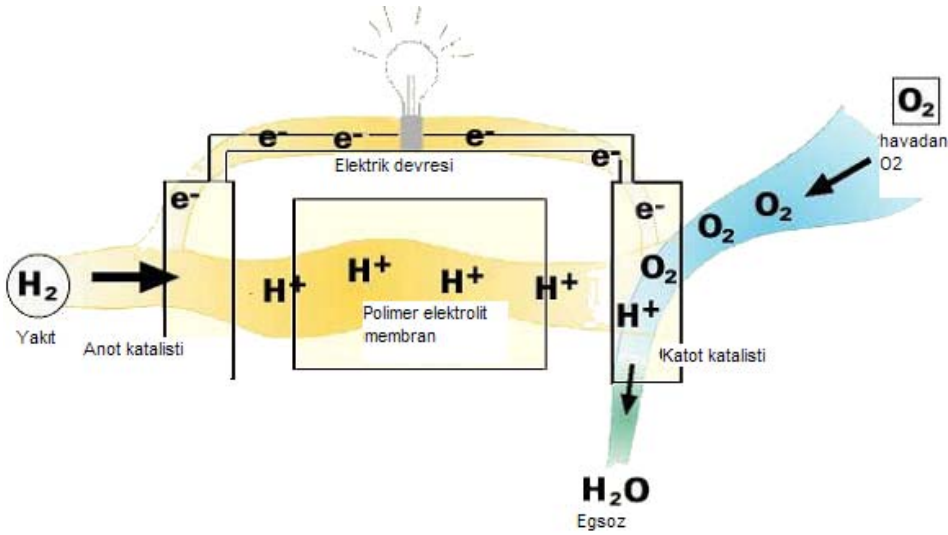
Atık olarak su ve ısı elde edilmesi ve özellikle minimum seviyedeki emisyonları yakıt pillerinin avantajlarıdır. İçten yanmalı motorlarda, toplam kontrol edilemeyen emisyonlar 2370 ppm, gaz türbinli sistemlerde 120 ppm olduğu halde, yakıt hücreli sistemlerde sadece 5 ppm'dir.

Yakıt pilleri, boyutlarının küçük olması, yüksek verimle çalışmaları ve atık ısılarının kullanılabilir olması yönünden tercih edilmeye başlanmıştır.

2.2 Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri

Yakıt pilinin çalışma prensibinin daha kolay anlaşılması için, kimya derslerinde anlatılan suyun elektrolizi deneyi hatırlanmalıdır. Bu deneyde H biçimli bir büretteki suya doğru akım uygulandığında, oransal hacimlerde oksijen ve hidrojene ayrılmaktadır. Elektrik enerjisi

uygulandığında su bileşenlerine ayrıştığına göre, mantıksal olarak işlemin ters yönde düzenlenmesi halinde, yani oksijen ve hidrojenin reaksiyonu sonucunda su elde edilirken, elektrik enerjisi alınmalıdır. Bu tür bir reaksiyon ilk defa 1839 yılında W. R. Grove tarafından platin elektrot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yakıt pilinin genel bir şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.

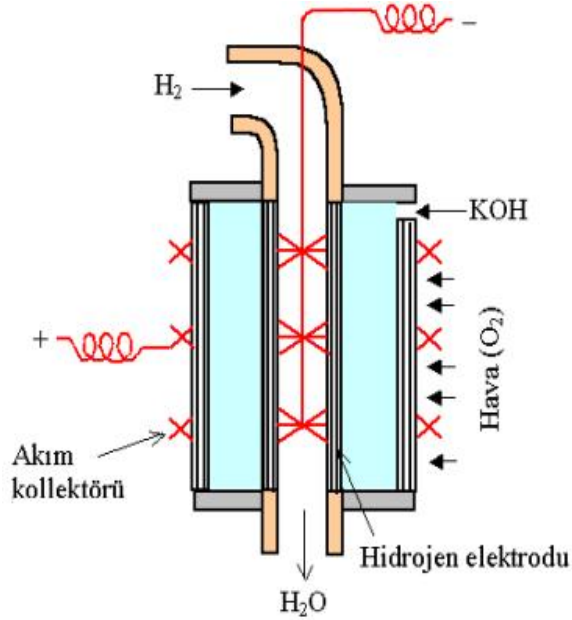


Şekil 2.1 Yakıt pili çalışma prensibi. (selimcetinkaya.tripod.com)

Bilinen ısı motorlarında hava ve yakıt sisteme girmekte, sistemden yanma ürünleri ve ısı çıkışı olurken iş yapılmaktadır. Bir güç ünitesinin esas amacı, yakıtın enerjisini fiyat, performans ve güvenlik seçeneklerini de dikkate alarak, en verimli yoldan işe dönüştürmektir. Büyük ölçüde tersinmez olan yanma işleminde, yakıtın kimyasal bağ enerjisi yanma ürünlerinin iç enerjisine dönüşmekte ve bu enerji bir ısı makinesinde

mekanik işe dönüştürülerek kullanılmaktadır. Bir ısı makinesi ile ulaşılacak maksimum verim Carnot çevriminin verimi ile sınırlanmış olmakla birlikte, malzemelerin mekanik ve termik gerilimleri ve tersinmezlikler nedeniyle, maksimum verimler gerçekte % 40'lar düzeyinde kalmaktadır.

Kimyasal enerjinin önce ısı, sonra mekanik enerjiye dönüştürülmesi yerine, daha yüksek verimle doğrudan doğruya elektrik enerjisine (ki bu da termodinamik açıdan mekanik enerjiye eşdeğerdir) dönüştürüldüğü yakıt pili ise Carnot çevriminin sınırlamalarından bağımsızdır. Hava ve saf hidrojenin kullanıldığı bir yakıt pili şeması Şekil 2.2'de verilmiştir ve böyle bir sistemin verimi ve % 60 'ın üzerindeki ısı verimlere ulaşılabilir.



Şekil 2.2 Çevre havası ve hidrojen kullanan yakıt pili. (www.llnl.gov,2008)

2.3 Yakıt Pili Türleri

Yakıt pilleri uygulamada, çalışma sıcaklığı, elektrolit tipi ve yakıt tipine göre sınıflandırılmaktadır. Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 150°C 'den düşükse, "düşük sıcaklık yakıt pili", 500 ile 1000°C arasında ise "yüksek sıcaklık yakıt pili" olarak adlandırılmaktadır. Düşük sıcaklık yakıt pillerinin hidrojen gibi basit yakıt ve platin gibi iyi ve pahalı katalist gerektirmelerine karşı, yüksek sıcaklık yakıt pilleri hidrokarbon yakıt ve daha ucuz katalist kullanabilme potansiyeline sahiptir. Kullanılan elektrolit asidik veya sıvı, katı veya sıvı-katı karışımı içerisinde alkalın biçiminde olabilir. Kullanılan yakıtlar genellikle hidrojen, doğal gaz (metan), metanol ve propandır. (Hoogers, 2003)

2.3.1 Fosforik asit yakıt pili (PAFC)

PAFC'de elektrolit yerine fosforik asit kullanılır. Bu ticari anlamda en çok gelişmiş yakıt pilidir. Bunlar bir çok uygulamalarda (örneğin hastaneler, oteller, ofisler, okullar vb.) kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca otobüs gibi büyük taşıtlarda da kullanılmaktadır. PAFC 'nin verimi % 40 ve işletme sıcaklığı yaklaşık 400°C dir. Bunun sebebi fosforik asitin düşük sıcaklıklarda kötü iyonik iletken olmasıdır. PAFC 'ler bu sıcaklık aralığının ötesindeki değerlerde verimli olarak çalışmazlar. Avantajları kararlı elektrot, yüksek oranda fosforik asit değişebilirliği, verimli anot performansdır. Dezavantajları verimsiz katot performansdır. (Hoogers, 2003)

2.3.2 Polimer elektrolit yakıt pili (PEMFC)

PEMFC yapısı PAFC 'ninkiyile aynıdır . Fakat PEMFC 'ler düşük sıcaklıklarda da nispeten çalışırlar. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık 100°C 'dir. Bu yakıt pili türü yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve güç taleplerinde değişiklikleri karşılamak için hızlı bir şekilde çıkışları değiştirilebilir. (Hoogers, 2003)

2.3.3 Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC)

MCFC'de elektrolit yerine alkali metal karbonat (Li, Na, K) kullanılır. Bununla beraber alkali metal karbonat, elektrolit gibi çalışması için sıvı fazda olmalıdır. Bu piller yaklaşık 700°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışırlar. Yüksek çalışma sıcaklığı elektrolitin yeterli iletkenliğini sağlaması için gereklidir.

MCFC'ler yüksek işleme sıcaklığından ve elektroltin yapısından dolayı PAFC' lerden farklıdır. MCFC'lerin yüksek işleme sıcaklığı mevcut yakıtların kullanılmasında ve tüm sistemde maksimum verimin elde edilmesi için önemli yararlar sağlar. Fakat bu yüksek sıcaklık uzun ömürlü çalışmalar için uygun malzemelerin seçiminde kısıtlamalar getirir. (Hoogers, 2003)

2.3.4 Alkali yakıt pili (AFC)

AFC'de elektrolit yerine alkalik potasyum hidroksit kullanılır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık 80°C 'dir ve verimleri % 70'lere ulaşabilmektedir. Alkali yakıt pilleri çoğunlukla uzay çalışmalarında kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1’de farklı yakıt pili türlerinin özellikleri listelenmiştir. Bu çalışmanın ana konusu katı oksitli yakıt pilleri olduğu için daha ayrıntılı incelenmiştir. (Hoogers, 2003)

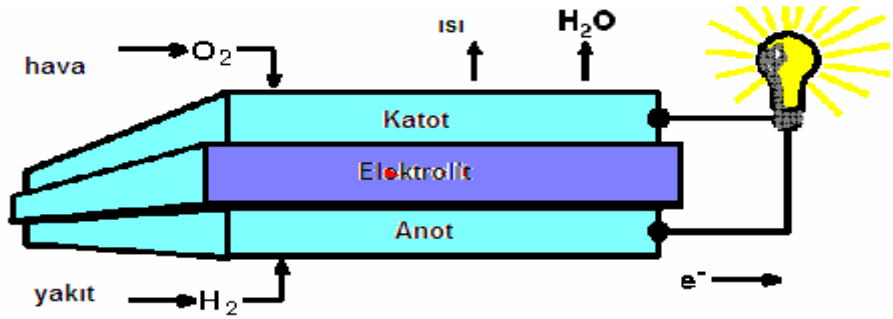
Çizelge 2.1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri. (www.eie.gov.tr)

	Fosforik Asit Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Polimer Elektrolit Yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili
Elektrolit	Fosforik Asit	Çinko üzerine tutturulmuş Yittria (YSZ)	Karbonat	Polimer iyon değişim filmi	Potasyum hidroksit
Elektrolitteki Taşıyıcı	H ⁺	O ₂ ⁻²	CO ₃ ⁻²	H ⁺	OH ⁻
Hücre Materyali	Karbon	Seramik vb.	Ni, Paslanmaz Çelik,vb.	Karbon	Karbon
Güç Yoğunluğu (W/kg)	120-180	15-20	30-40	350-1500	35-105
Yakıt Türü	H ₂ , Hidrokarbonlar, Fosil yakıtlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂
Sıcaklık	200 °C	1000 °C	600-700 °C	80 °C	80 °C
Güç Üretim Verimi	%37-42	%60-70	%45-60	%60	%42-73
Uygulama Alanları	Ticari Uyg. (Oteller, Hastaneler vs.)	Ticari Uyg., Sanayi Uyg., Elektrik Santralleri	Elektrik Santralleri	Ulaşım Araçları, Askeri Sistemler	Uzay Çalışmaları

2.3.5 Katı oksitli yakıt pili (SOFC) ve çalışma prensipleri

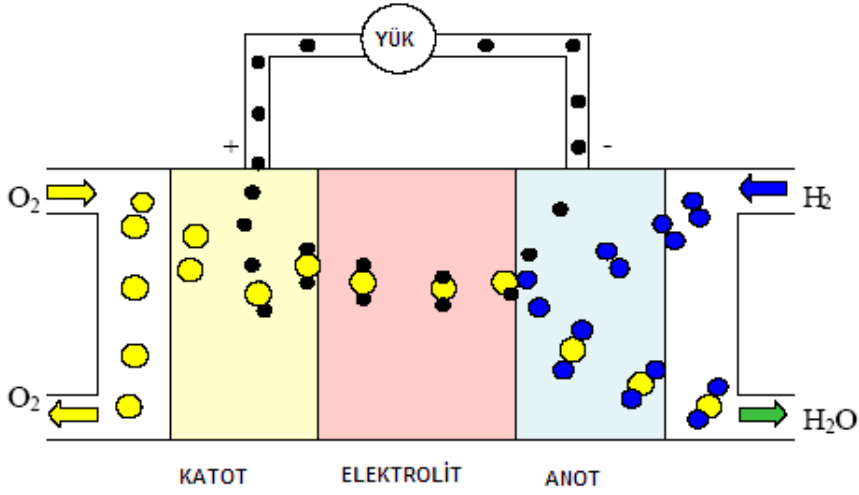
Katı oksitli yakıt pilleri yaklaşık 1000°C sıcaklıkta çalışırlar. Bu yüksek işletme sıcaklıkları kinetik enerjiyi destekler ve yüksek kaliteli ısı üretir. SOFC'lerin çalışma verimleri % 60'a yaklaşmaktadır.

Temel bir yakıt hücresinde, gaz yakıtlar anottan devamlı olarak beslenirken, oksitleyici gazlar da katottan sürekli gönderilir (Şekil 2.3). Sürekliliği olan bu işlemle reaksiyonun oluşması sağlanır.



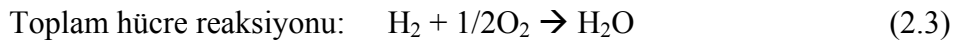
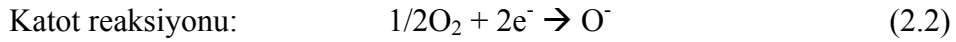
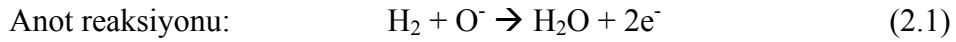
Şekil 2.3 Katı oksitli yakıt pilinin çalışma prensibi. (www.lead.ruhr-uni-bochum.de)

Katı oksitli yakıt pilinde oksijen iyonu elektrolitten geçmektedir. İyonize olan oksijen atomu olduğundan dolayı anot tarafında herhangi bir hidrokarbon yakıtı kullanılabilir. Katotta dış devreden gelen elektronla oksijen iyonlaştırılır. Oksijen iyonu seramik elektrolitten anot tarafına iletilir. Anotta yakıt, oksijen iyonu ile birleşir, yanma gazları ve elektron açığa çıkar. Elektron dış devreden katot tarafına aktarılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Katı oksitli yakıt pilinde elektron akışı.

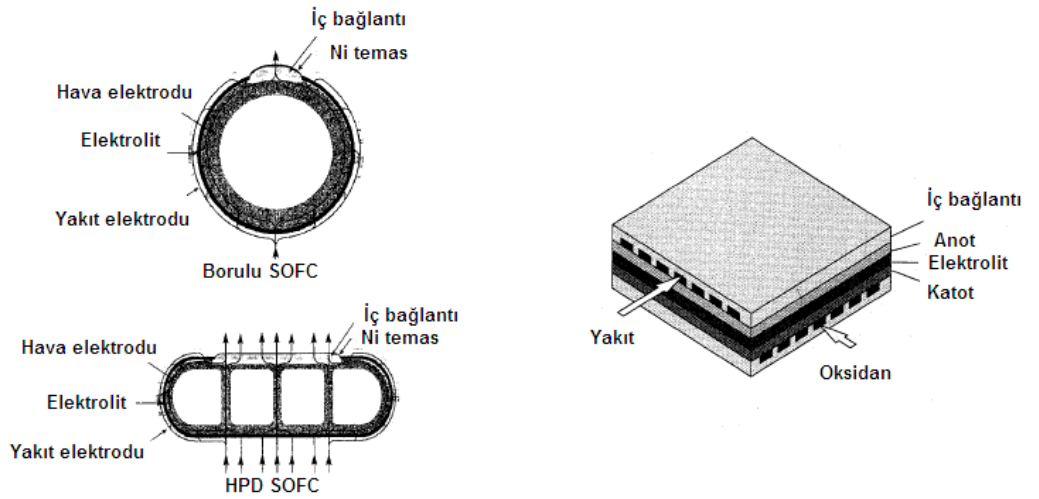
Katı oksitli yakıt pilinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar şu şekildedir:



Yakıt piline sadece hidrojen girmesi durumunda yukarıdaki reaksiyonlar oluşurken, eğer pile karbonmonoksit ve metan da girerse reaksiyonlar hidrojene benzer şekilde genişletilerek yazılır.



Şekil 2.5’de farklı yapıdaki yakıt pilleri verilmiştir. Yakıt pilleri prizmatik olabilecekleri gibi dairesel veya tüp şeklinde de olabilirler.



Şekil 2.5 Borulu ve prizmatik katı oksitli yakıt pili. (www.ntu.edu.sg)

3. YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

3.1 Yakıt Pillerinde Kullanılan Yakıtlar

Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır. Ancak her zaman için saf hidrojenin bulunması mümkün değildir. Bu yüzden hidrojen içeren kaynaklar kullanılarak yakıt pilleri beslenir. En önemli hidrojen kaynağı olarak günümüzde hidrokarbonlar görünmektedir. Bu çalışmada da hidrojen kaynağı olarak doğalgaz kullanılmıştır. Hidrojeni doğalgazdan elde etmenin dışında bugün için bilinen beş yöntem daha vardır:

- Sudaki hidrojenin elektrik enerjisiyle oksijenle ayrıştırılması (Elektroliz).
- Organik malzemelerden hidrojenin üretilmesi.
- Bazı alglerin ve bakterilerin atık olarak ürettikleri hidrojenin toplanması.
- Suyu 3100°C üzerine ısıtarak molekül bağlarının koparılıp element olarak hidrojen ve oksijen elde edilmesi.
- Güneş ışınlarından yararlanarak sudaki hidrojenin ayrıştırılması.

Saf hidrojenin bulunabilmesinin yanında hidrojenin depolanabilmesi ve taşınması da bir sorundur. Bunun için iki yöntem üzerinde durulmaktadır. Birincisi yüksek basınç altında sıkıştırılmış gaz

olarak depolanmasıdır. İkincisi de yine yüksek basınç altında ve düşük sıcaklıkta sıvılaştırılmış hidrojen biçimindedir.

3.1.1 Hidrojen ve hidrojen enerjisi

Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği ise sudur. Isı ve patlama enerjisi gerektiren her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharı olmaktadır. Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır. Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir.

Araştırmalar, mevcut koşullarda hidrojenin diğer yakıtlardan yaklaşık üç kat pahalı olduğunu ve yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanımının hidrojen üretiminde maaliyet düşürücü teknolojik gelişmelere bağlı olacağını göstermektedir. Bununla birlikte, günlük veya mevsimlik periyotlarda oluşan ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanması günümüz için de geçerli bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu tarzda depolanan enerjinin yaygın olarak kullanılabilmesi örneğin toplu taşıma amaçları için yakıt piline dayalı otomotiv teknolojilerinin geliştirilmesine bağlıdır.

Dünyanın giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu bugün bütün bilim adamlarınca kabul edilmektedir. Hidrojen enerjisinin insan ve çevre sağlığını tehdit edecek bir etkisi yoktur. Kömür, doğalgaz gibi fosil kaynakların yanısıra sudan ve

biyokütleden de elde edilen hidrojen, enerji kaynağından çok bir enerji taşıyıcısı olarak düşünülmektedir. Elektriğe 20. yüzyılın enerji taşıyıcısı, hidrojene 21. yüzyılın enerji taşıyıcısı diyen çevreler vardır. Hidrojen yerel olarak üretimi mümkün, kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınması sırasında az enerji kaybı olan, ulaşım araçlarından ısınmaya, sanayiden mutfaklarımıza kadar her alanda yararlanacağımız bir enerji sistemidir. Hidrojen içten yanmalı motorlarda doğrudan kullanımının yanı sıra katalitik yüzeylerde alevsiz yanmaya da uygun bir yakıttır. Ancak dünyadaki gelişim hidrojeninin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pili teknolojisi doğrultusundadır. 1950'lerin sonlarında, NASA tarafından uzay çalışmalarında kullanılmaya başlayan yakıt pilleri, son yıllarda özellikle ulaştırma sektörü başta olmak üzere sanayi ve hizmet sektörlerinde başarı ile kullanıma sunulmuştur. Yakıt pilleri, taşınabilir bilgisayarlar, cep telefonları gibi mobil uygulamalar için kullanılabildiği gibi elektrik santralleri için de uygun güç sağlayıcılardır. Yüksek verimlilikleri ve düşük emisyonları nedeniyle, ulaşım sektöründe de geniş kullanım alanı bulmuşlardır.

3.1.2 Hidrojenin depolanması

Hidrojenin belki de en önemli özelliği, depolanabilir olmasıdır. Bilindiği gibi, günümüzde büyük tutarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunmuş değildir. Eğer bugün hidroelektrik santrallerinden elde edilen enerjinin depolanması mümkün olsaydı, enerji sorununu bir ölçüde çözmek mümkün olabilirdi. Ancak, elektrik enerjisi için bilinen en iyi depolama yöntemi hala asitli akümülatörlerden başka bir şey değildir.

Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir.

Hidrojen uygun nitelikli çelik tanklarda gaz veya sıvı olarak depolanabilir. Ancak gaz olarak depolamada yüksek basınç nedeniyle tank ağırlıkları problem yaratmaktadır. Hidrojen gazını depolamanın belki de en ucuz yöntemi, doğal gaza benzer şekilde yer altında, tükenmiş petrol veya doğal gaz rezervuarlarında depolamaktır. Maliyeti biraz yüksek olan bir depolama şekli ise, maden ocaklarındaki mağaralarda saklamaktır.

Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kaplar; hidrojenin kapladığı hacmi küçültmek için hidrojeni sıvı halde depolamak gereklidir. Bunun için de yüksek basınç ve soğutma işlemine ihtiyaç vardır. Sıvılaştırılmış hidrojen yüksek basınç altında çelik tüpler içinde depolanabilir. Bu yöntem orta veya küçük ölçekte depolama için en çok kullanılan yöntemdir. Ancak büyük miktarlar için oldukça pahalı bir yöntemdir. Çünkü hidrojen enerjisinin yaklaşık $\frac{1}{4}$ 'ü sıvılaştırma işlemi için harcanmalıdır. Bir diğer pratik çözüm ise, sıvı hidrojenin düşük sıcaklıktaki tanklarda saklanmasıdır. Uzay programlarında, roket yakıtı olarak sürekli şekilde kullanılan sıvı hidrojen bu yöntemle depolanmaktadır. Dünyadaki en büyük sıvı hidrojen tankı, Kennedy Uzay Merkezinde olup 3400 m^3 sıvı hidrojen alabilmektedir. Bu miktar hidrojenin yakıt olarak değeri 29 milyon MegaJule veya 8 milyon kW-saat'e karşılık gelmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu hidrojen karbon nanotüplerde de depolanabilmektedir. Karbon nanotüpler kısaca grafit

tabakaların t p şekline d n  m    halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron seviyesindedir.

Hidrojen kimyasal olarak metallerde, alaşımlarda ve arametallerde hidrür olarak depolanabilmektedir. Metal hidrürler hidrojen depolamak için çok uygun bir yöntem olmasına karşın, kendi ağırlıkları ciddi sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle son 10 yıldır yüksek depolama kapasiteleri nedeniyle alüminyum ve bor içeren kompleks hidrürler yoğun olarak çalışılmaktadır. Bor içeren kompleks hidrürler sıvı koşullarda kullanılması nedeni ile de önem taşımaktadır. Bor esaslı sistemler ana olarak sodyum bor hidr r  esas almaktadır. NaBH₄, katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen içermektedir.

Çözelti halinde, sodyum bor hidrür, aşağıdaki reaksiyona göre hidrojenini vermekte ve sodyum metaborata dönüşmektedir.



H₂O ve NaOH ilavesi ile sodyum bor hidrürün sıvı içerisindeki miktarı ağırlıkça %20-35 arasında olabilmekte, bu da sistemde ağırlıkça % 4.4-7.7 arasında hidrojenin depolanmasına olanak vermektedir.

Sodyum bor hidr rde hidrojen depolamanın en önemli üstünlüğü depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesi ve geri alımın katalizör yardımı ile kolaylıkla kontrol edilebilmesidir. Sodyum bor hidrürün hidrojen amaçlı kullanımında en önemli darboğaz, oluşan metaboratın tekrar NaBH₄ dönüştürülmesidir. (Hoogers, 2003)

3.1.3 Hidrojenin taşınması

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Hidrojen boru ile taşınmasına, Texas'da petrol sanayi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğuna sahip boru şebekesi ile Almanya'da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün 15 atmosfer basınç altında hidrojen taşımaya devam eden 204 km'lik boru hattı örnek olarak gösterilebilir. Basınçlı hidrojenin, çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması, bu güne kadar geliştiren bir çok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem olmuştur. Burada görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil ortalama olarak 65 litre (47kg) benzin almakta olup, bu da enerji olarak 17 kg hidrojene karşılık gelmektedir. Hidrojeni sıvı olarak depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacmi ve maliyet artmaktadır. Diğer bir sorun ise, hidrojenin gaz haline geçmesi ile oluşan kayıplar ve yakıt ikmali zorluğudur.

3.2 Yakıt Dönüşümü Teorisi

Yakıt dönüşümü uygun gaz, sıvı ya da katı yakıtlardan anot reaksiyonu için elverişli gazların oluşturulması işlemidir. Yakıt dönüşümü yakıttan zararlı elemanların ayrıştırılması, yakıtın temizlenmesi, anot reaksiyonu için uygun hale getirilmesini kapsar. Bu işlemler şu şekilde örneklendirilebilirler;

- Yakıtın temizlenmesi – Yakıt dönüştürücüyü korumak ve katalist azalmasını engellemek için sülfür ve amonyağın uzaklaştırılması.

- Yakıt dönüşümü – Yakıtın (temel olarak hidrokarbonların) hidrojen zengin gaz karışımına dönüştürülmesi.
- Dönüştürücü gazlarının değişimi – Karbonmonoksit (CO) ve su (H_2O) ile reaksiyona sokularak hidrojen (H_2) ve karbondioksit (CO_2) elde edilmesi.

Yakıt dönüştürücü kullanılan yakıt piline bağlı olarak yukarıda bahsedilen işlemlerden bir veya birkaçını kapsayan cihazlardır. Tasarım uygulamaya bağlı olarak, yüksek ısı verim, yüksek hidrojen oluşumu (bazı sistemler için hidrojen ve karbonmonoksit oluşumu), kompakt yapı, hafiflik, hızlı devreye girme gibi koşulları içerebilir.

Bir çok yakıt dönüştürücü akışkanda kalan kimyasal ve ısı enerjisi kullanılabilir hale getirir ve bu sayede dönüştürücü verimi artırılmış olur. (Hoogers, 2003)

3.3 Yakıt Dönüştürücü Türleri

Yakıt dönüştürücüler, araçlarda, sabit yerleşimli sistemlerde ve askeri uygulamalarda geniş bir ticari uygulama şansı bulacak şekilde geliştirilmektedirler. Büyük kimyasal tesislerdeki teknoloji, küçük çaplı kompakt yakıt pillerine aktarılmış ve bu sayede boru hattından alınan doğalgaz küçük güç santrallerinin istediği yakıtı dönüştürülebilmektedir. Öte yandan yakıt dönüştürücü içeren birkaç yüz kW'lık ticari yakıt pili üniteleri de çalışmaktadır.

Yakıt dönüştürücüler için maliyet yakıt pillerinde olduğu gibi bir sorundur. Maliyetlerin zaman içinde düşeceği düşünülmektedir. Var olan yakıt dönüştürme teknolojilerini büyük çaplı yakıt pili santrallerine

uygun hale getirerek bu sistemlerde kullanılan yakıt dönüştürücü maliyetleri azaltılabilir.

Çalışmada yakıt dönüştürücü türleri olarak, buharlı yakıt dönüştürücü, kısmi yanma, ototermal yakıt dönüştürücü ve ısı değiştiricisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücü anlatılmıştır. Farklı yakıt dönüştürme işlemlerinin de olduğu unutulmamalıdır.

3.3.1 Buharlı yakıt dönüştürücü

Metanolün buharlı yakıt dönüşümü aşağıdaki 3.1 denklemi ile gösterilmektedir.



Metanol ve su buharlaştırılarak katalist ortamda reaksiyona sokularak CO_2 ve H_2 'e dönüştürülür. Metanol dönüşümü günümüzde 200 ile 300⁰C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilir. Bir mol metanolden üç mol hidrojen oluşmaktadır. Bu durum, oluşan hidrojen moleküllerinin bir kısmının sudan geldiği anlamına gelir. 3.2 denklemi ideal bir sistemi tarif eder. Uygulamada reaksiyon sonucu hidrojen, karbondioksit ve karbonmonoksit oluşmaktadır. Düşük sıcaklık dönüşümünü izleyen yüksek sıcaklık dönüşümü ile karbonmonoksit karbondioksite dönüştürülür ve elde edilen hidrojen miktarı arttırılır. Her iki durumda da su-gaz dönüşüm reaksiyonu;



oluşur.

Su-gaz dönüşüm reaksiyonu egzotermik bir reaksiyondur. Bu yüzden, eğer çok fazla ısı olursa reaksiyon tersine dönerek girenler tarafına doğru yönelir (Le Chatelier prensibi). Bundan korunmak için, reaksiyon bir kaç aşamada meydana getirilir ve uygulamada aşamalar arasında ara soğutma yapılır. Yüksek sıcaklık dönüşümü için en iyi katalist 400 ile 550⁰C sıcaklıkları arasında iyi bir etkinlik gösteren demir ve kromoksit(Fe₃O₄ ve Cr₂O₃) karışımıdır. Metanolün düşük sıcaklık dönüşümü içinde benzer işletme şartlarında bakır katalistler kullanılmaktadır.

Doğalgazdaki metandan buharlı yakıt dönüşümü ile hidrojen eldesi endüstride sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yüzden hidrojen ekonomisi bakımından önemli bir süreçtir. Ayrıca PEMFC ve PAFC'lerin gereksinim duyduğu hidrojenin elde edilebilmesi için küçük ölçekli, metan yakıtlı buharlı dönüştürücüler geliştirilmektedir.

Metanın buharlı yakıt dönüşümü reaksiyonu denklem 3.4 ile gösterilmektedir.



Bu reaksiyonu su-gaz dönüşümü reaksiyonu izler (Denklem 3.3). Metanın buharlı dönüşümünde çoğunlukla nikel katalistler kullanılır. Reaksiyon 750 ile 1000⁰C arasında karbon oluşmasını engellemek için fazla buhar vererek gerçekleştirilir.

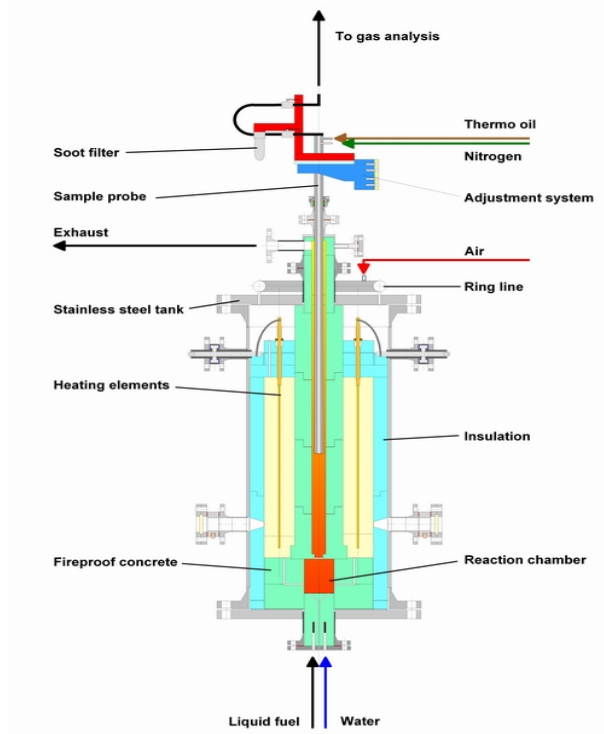
3.3.2 Kısmi yanma

Endüstriyel ölçekte kullanılan bir diğer önemli hidrojen üretim süreci kısmi yanmadır (POX). Bu işlem genelde ağır hidrokarbonlar için ya da özel gereksinimler olduğu zaman kullanılır. Örneğin saf oksijenin var olduğu durumlar için kısmi yanma uygun bir seçim olabilir. Denklem 3.5a ve 3.5b de görüldüğü gibi stokiyometrik miktarın altında oksijen kullanımında da, stokiyometrik miktarda oksijen kullanıldığı kadar hidrojen üretilmektedir.



ve/veya





Şekil 3.1 Kısmi yanmanın gerçekleştiği dönüştürücü.

DaimlerChrysler ve Toyota'nın tanıttığı metanol yakıtlı araçlar buharlı yakıt dönüşümü temelinde yapılmış olsalar dahi, Epyx ve Shell benzinin dönüşümü için kısmi yanma temelli sistemler geliştirmektedirler. Epyx'in amacı bir dizi alkolün ve hidrokarbonun dönüştürülebileceği katalistsiz reaktörler geliştirmektir. (FONTES)

Shell'in yöntemi ise özel olarak tasarlanmış rodyum katalistli dönüştürücülerdir. Kısmi yanma işleminin bu türü aynı zamanda katalitik kısmi yanma olarakta adlandırılmaktadır.

3.3.3 Ototermal yakıt dönüştürücü (ATR)

Amaç buharlı yakıt dönüştürümü ile kısmi yanma işleminin faydalarını bir arada tek bir yöntemde toplayabilmektir. İdeal olarak kararlı hal egzotermik reaksiyonlar ilk başlangıç için ve endotermik reaksiyonları beslemek için kullanılmaktadır. Reaksiyonlar çok iyi ısı bağlantı sağlanmış ayrı reaktörlerde oluşabileceği gibi tek bir katalitik reaktörde de olabilir. Bu kombine işlem ototermal yakıt dönüştürümü olarak bilinmektedir.



Şekil 3.2 Johnson Matthey's modüler “HotSpot” yakıt dönüştürücüleri. (SINGHAL, S.C, 2000)

Johnson Matthey, ilk zamanlar metanol için kullanılan Şekil 3.2’de görülen “HotSpot” yakıt dönüştürücüleri geliştirdi. İlk çalışma esnasındaki yüksek hızlı kısmi yanma ile “HotSpot” yakıt dönüştürücüler

maksimum hidrojen çıkış verimlerinin %75'ini yakalayabilmektedirler. Yaklaşık bir dakika içerisinde ise %100 verimle çalışır hale gelmektedir. Sonraki kararlı hal işlemi sırasında, bir adet 245 cm²'lik reaktör, saatte 750 litreden fazla hidrojen üretmektedir ve sistem 1 kW'lık bir yakıt pilini besleyebilmektedir. Sistemin kompakt hale getirilmesi reaktör içinde mikroskobik boyutta gerçekleşen endotermik ve egzotermik reaksiyonlar arasındaki çok yüksek verimli ısı değişimi sayesinde mümkün hale gelmiştir. Şekil 3.3'de ototermal yakıt pilleri görülmektedir.



Şekil 3.3 Ototermal yakıt dönüştürücüleri.

Her mol metanolden ortalama 2.4 mol hidrojen açığa çıkmaktadır. Denklem 3.4 ile 3.1 karşılaştırıldığında görülmektedir ki bu sayı sırasıyla kısmi yanma ve buharlı yakıt dönüşümü sonucu oluşan hidrojen miktarlarının yani 2 ve 3'ün, olması gerektiği gibi arasında kalmıştır

Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems düşük güçlü santraller için propan yakıtlı ototermal yakıt dönüştürücüler geliştirmektedir.

3.3.4 Isı değıştircisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücü

Bu tür yakıt dönüştürücüler adından da anlaşıldığı gibi buharlı yakıt dönüştürücüler sınıfına girmektedir. Ancak bu dönüştürücülerdeki reaksiyonlar aynı olmasına rağmen reaksiyonun oluşma şartları değıştirilmiştir. Reaksiyon oluşurken, dışarıdan bir ısı kaynağı aracılığıyla beslenmekte ve daha verimli bir yakıt dönüşümü sağlanmaktadır. Burada ihtiyaç duyulan ısı genellikle yakıt pili anodundan gelen egzoz gaz karışımıdır. Yüksek sıcaklıktaki bu karışım yakıt dönüştürücüye verilmekte ve reaksiyona sürekli bir ısı enerjisi girdisi sağlanmaktadır. Bu sistemlerde egzoz gaz karışımı ile yakıt dönüştürücü arasındaki ısı geçişini sağlayacak bir ısı değıştircisi kullanılmaktadır. Bu ısı değıştircisi ile buharlı yakıt dönüştürücü birlikte çalışmaktadır. Buradaki amaç reaksiyonu sabit sıcaklıkta ve en verimli şekilde gerçekleştirebilmektir.

Isı değıştircisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücüler yüksek verimli sistemler olmasına rağmen karmaşık yapıları ve tasarım zorlukları uygulamada güçlükler yaratmaktadır. Ancak son zamanlarda bu tür yakıt dönüştürücüler üzerindeki çalışmalar artarak devam etmektedir.

3.3.5 Yakıt dönüştürücülerinin karşılaştırılması

En iyi yakıt dönüştürücü hangisidir? En önemli üzerinde durulması gereken nokta, ilgili yöntemle yakıt dönüştürücüde hangi yakıtın dönüştürüleceğidir. Genellikle metanol düşük sıcaklıklarda ve herhangi bir yakıt dönüştürücü ile dönüştürülebilmektedir. Metan ve LPG ise daha yüksek sıcaklıklar istemektedir. Otomotiv sektöründe kullanılan büyük hidrokarbonlar çoğunlukla kısmi yanma ile dönüştürülmektedir. (Hoogers, 2003)

Çizelge 3.1 Methanolün farklı dönüştürücüler sonrası bileşimi

Çıkış bileşimi (%)	BYD	Kısmi yanma	ATR
H ₂	67	45	55
CO ₂	22	20	22
N ₂	—	22	21
CO	—	—	2

Çizelge 3.1 farklı yakıt dönüştürücülerin çıkış gaz karışımlarını göstermektedir. Buharlı yakıt dönüşümü en yüksek hidrojen konsantrasyonunu vermektedir. Aynı zamanda sistem, tamamen kararlı halde en iyi çalışan buharlı yakıt dönüşümü üzerine kurulmuştur. Çünkü sistem hızlı dinamik tepki vermek yerine kararlı halde çalışmaktadır. Bu ilk başlangıç içinde kullanılabilir.

Öte yandan kısmi yanma, düşük hidrojen üretimine rağmen kompaktlık, hızlı devreye girme ve hızlı dinamik tepki özellikleri

sunmaktadır. Buharlı yakıt dönüştürücü ile kısmi yanma arasındaki açığa çıkan hidrojen miktarlarındaki farklılıklara ek olarak kısmi yanma sonucu açığa çıkan karışımın azotu mutlaka seyreltilmelidir. Azot sisteme hava aracılığıyla girmektedir. Bunun sebebi çoğunlukla en ucuz yöntemin havanın içindeki oksijeni kullanmak olmasıdır. Havanın içindeki oksijeni kullanmak isterken oksijenle birlikte sisteme giren azotu da belli bir seviyenin altına indirmek gerekmektedir.

Yakıt dönüştürücüler tek başlarına düşünülemezler. Örneğin buharlı yakıt dönüşümü endotermik bir reaksiyondur. Dönüştürücüye ısı sağlanması gerekir. Bu ısı çoğunlukla ilave yakıtın yakılması ile elde edilir. Yakıt pili sistemlerinde, anottan alınan gaz karışımı gerekli ısı enerjisi için uygun bir seçenek olmaktadır. Sabit güç santrallerinde örneğin PAFC ve SOFC türü yakıt pillerinde anot çıkışındaki gaz karışımlarının sıcaklıkları bu tür bir işlem için uygun değerdedir. Anot çıkışındaki gaz karışımı ile suyun buharlaştırılması sağlanabilmekte ve yakıt dönüştürücü beslenebilmektedir. Buharlı yakıt dönüştürücü burada uygun olmasına rağmen ototermal yakıt dönüştürücü ise PEM türü düşük sıcaklıklı yakıt pilleri için uygun görünmektedir.

Yakıt verimliliği de önemle üzerinde durulması gereken bir noktadır. Sabit enerji santralleri için yakıt maliyetleri her zaman en önemli etken olmuştur. Bu yüzden yöntem, seçilen yakıttan en yüksek hidrojen verimini sağlamalıdır. Çoğunlukla bu yakıt doğalgaz olmaktadır. Buharlı yakıt dönüşümü en yüksek hidrojen verimini sağlamaktadır. Bu yüzden yüksek hidrojen oranlarında yakıt pili verimi buharlı yakıt dönüşümü için gerekli olan yüksek miktardaki yakıt gereksinimini dengeleyebilir. PEM türü yakıt pillerinin kullanıldığı sabit enerji santrallerinde buharlı yakıt dönüştürücülerinin doğal gazın dönüştürülmesinde kullanılmasının muhtemel nedeni budur.

Otomotiv uygulamalarında, yakıt dönüştürücü sistemin dinamik davranışı bütün tahrik sisteminin ana elemanı olmasını sağlar. Bunun yanında yedek bataryalar, superkapasitörler yada diğer yöntemler düşük yükleri karşılamak için kullanılmaktadır. Kısmi yanma bu tür dinamik davranışı ve ilk kalkışı sağlayabilecek özelliklere sahiptir. Aynı zamanda ağır hidrokarbonlar içinde en uygun seçenek olarak görünmektedir. Diğer yakıtlar için örneğin metanol düşünüldüğünde ototermal yakıt dönüşümü uygun bir yöntemdir. Yinede DaimlerChrysler'in yapmış olduğu NeCar 3 ve NeCar 5 araçlarında kullanılan yakıt dönüştürücüler buharlı yakıt dönüştürücülerdir. Bu ilginç seçim ilk kalkış anında yakıt dönüştürücüye oksijen sağlanarak kısmi yanmanın oluşturulmasıyla iyileştirilebilir. Aslında farklı yakıt dönüştürücüleri her zaman kalın çizgilerle ayırmak mümkün olmamaktadır. (FONTES)

4. FARKLI YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN KULLANILDIĞI KATI OKSİTLİ YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

4.1 Giriş ve Sistem Modeli

Çalışmanın bu kısmında üç farklı yakıt dönüştürücünün ayrı ayrı kullanıldığı doğalgaz yakıtlı katı oksitli yakıt pili sistemleri ele alınmıştır. Her üç sistem için 1 kmol birim yakıt için hesaplar yapılmış ve farklı durumlar için sistemin davranışları grafikler yardımı ile açıklanmaya çalışılmıştır. İncelenen sistemler: ototermal yakıt dönüştürücülü (ATR) sistem, buharlı yakıt dönüştürücülü sistem (BYD) ve ısı değıştiricisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücülü (IDYD) sistem.

Yakıt pili sisteminde yakıt olarak doğal gaz kullanılmıştır. Yakıtın bileşenleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Hesaplarda kullanılan doğalgazın bileşimi (ÇOBAN, 2007)

Bileşen	Doğalgaz içindeki yüzdesi
Metan	% 82
Etan	% 12
Propan	% 4
Bütan	% 2

Sistem şemaları her sistem için ayrı ayrı verilmiştir. Sistem kükürt arıtıcı, ısı değıştiriciler, yakıt dönüştürücü, katalitik yanma odası (buharlı yakıt dönüştürücünün kullanıldığı sistem için), fan ve yakıt pili kısımlarından oluşmaktadır.

4.2 Sistem Tasarımı ve Sistem Değişkenlerinin Oluşturulması

Sistemde üç farklı akışkan mevcuttur: su, yakıt ve egzoz gazları. Sisteme yakıt ve su 25 °C sıcaklıkta girmektedir.

Yakıtta ilk işlem kükürt arıtıcıda yapılmaktadır. Doğalgaza koku vermesi için ilave edilen kükürt, yakıt pili için tehlikeli olduğunda ayrıştırılması gerekmektedir. Bu işlem yakıtın 400°C civarına ısıtılmasından sonra yapılır.

Kükürt arıtıcıdan sonra yakıt artık yakıt dönüştürücüye gönderilecektir. Ancak bu işlemden önce 700°C'e kadar ısıtılması gerekir. Bir ısı değiştirici yardımı ile ısıtılan yakıt, yakıt dönüştürücüye girer.

Yakıt dönüştürücülerde yakıtta ilave edilecek buhar miktarı yakıt içerisindeki karbon miktarı ile ilgilidir. Bunun için sistemde kullanılan doğalgazdaki karbon miktarının bulunması gerekir.

Yakıtın 1 kmolündeki toplam C miktarı;

$$\text{CH}_4 \rightarrow 0.82 \times 1 = 0.82 \text{ kmol}$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow 0.12 \times 2 = 0.24 \text{ kmol}$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow 0.04 \times 3 = 0.12 \text{ kmol}$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} \rightarrow 0.02 \times 3 = 0.06 \text{ kmol}$$

Toplam C miktarı = $0.82+0.24+0.12+0.06=1.26$ kmol'dür.

İlave edilecek buhar miktarı karbon miktarının 2.5 ila 3 katı civarındadır.

Yakıt dönüştürücüye gelecek buhar ise bir su deposundan sağlanır. Su ısı değişiriciler aracılığıyla buhar haline getirilir. Gerekli buhar oranları her sistem için ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Buhar oranı hesapları her sistem başlığı altında bulunabilir.

Ototermal yakıt dönüştürücü için gerekli hava ise bir fan aracılığıyla sağlanmaktadır. Fan atmosfer basıncında havayı yakıt dönüştürücüye basmaktadır. Diğer sistemler için yakıt dönüştürücülerde havaya gerek yoktur. Ancak BYD'li sistemde katalitik yanma odasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu sistemde fan katalitik yanma odasına hava basmaktadır.

Yakıt dönüştürücü çıkışındaki hidrojen zengin gaz karışımı yakıt piline gönderilir. Pildeki reaksiyon sonucu anot ve katotta egzoz gazları oluşur. Egzoz gazları sistemdeki ısı değişiricilerde kullanılır. Bu sayede atık enerji geri kazanılarak sistemin verimi arttırılmıştır.

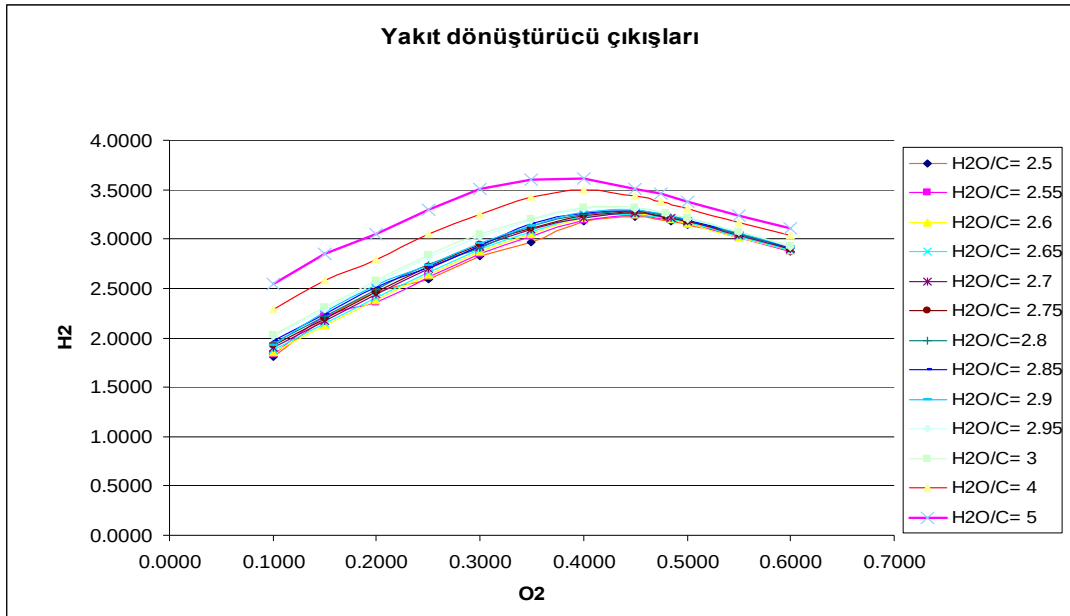
4.2.1 Ototermal yakıt dönüştürücünün kullanıldığı yakıt pili sistemi

Çalışmanın bu bölümünde yakıt dönüştürücü sistemi olarak ototermal yakıt dönüştürücü alınmıştır. ATR sisteminde yakıt su ve oksijen ilave edilerek yakıt içerisindeki hidrojenin açığa çıkması sağlanır.

ATR'li sistemlerin buharlı yakıt dönüştürücülerin kullanıldığı sistemlerden farkı yakıt dönüştürücülerde havanın kullanılmasıdır. Reaksiyonun oluşması için dönüştürücüde havaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gerekli hava miktarı ileriki bölümlerde ayrıntıları ile verilmiştir.

4.2.1.1 En uygun buhar yakıt oranının bulunması

Farklı reaksiyon şartlarında yakıt dönüştürücü çıkışı inceleyebilmek için oksijen miktarı 0.1 kmol'den başlanarak 0.6 kmol'e kadar, su karbon oranı ise (H_2O/C) da 2.5'den 5'e kadar değiştirilmiştir. Elde edilen H_2 miktarları çizelgede listelenmiş ve Şekil 4.1'de grafik olarak gösterilmiştir. Elde edilen en yüksek değerler Ek Çizelge 1 üzerinde yeşile boyanmıştır.

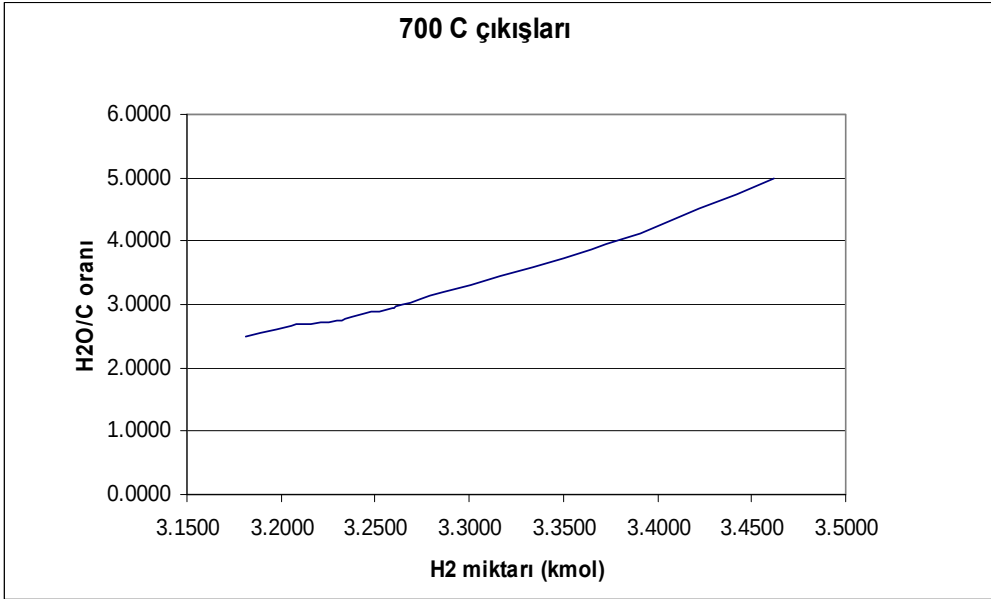


Şekil 4.1 ATR'de farklı reaksiyon şartları için yakıt dönüştürücü çıkış değerlerinin grafiksel gösterimi

Ekteki çizelge incelenirse maksimum değerlerin 0.45 kmol O₂ miktarı ile elde edildiği görülmektedir. Ancak bu değerler adyabatik çıkış değerleri değildir. Sistemin adyabatik olması düşünüldüğü için adyabatik çıkış değerleri araştırılmış, en iyi çıkış değerinin yaklaşık 0.48 kmol O₂ ile mümkün olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de liste halinde, Şekil 4.2’de grafik olarak verilmiştir.

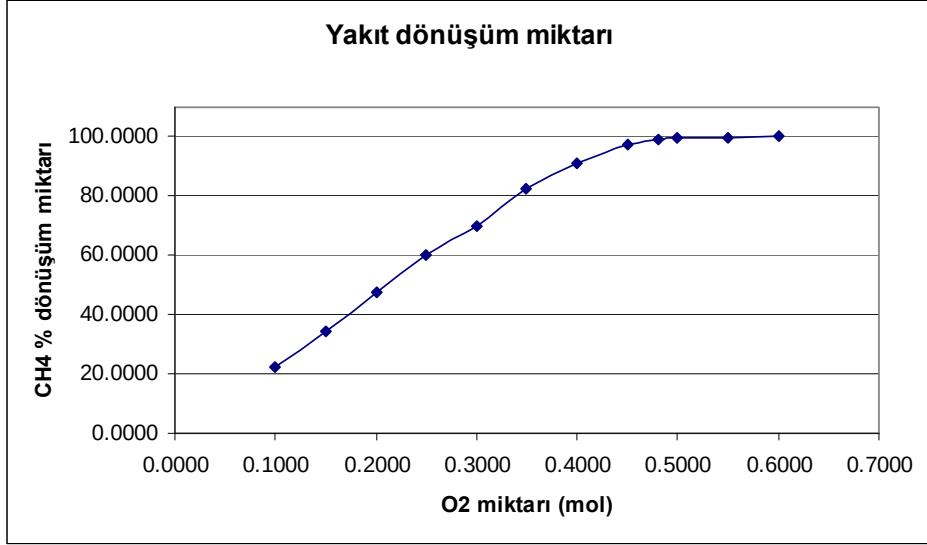
Çizelge 4.2 Yakıt dönüştürücünün adyabatik olması durumunda çıkış değerleri (700 °C)

H ₂ O/C	O ₂	H ₂
2.5000	0.4850	3.1811
2.5500	0.4850	3.1894
2.6000	0.4850	3.1975
2.6500	0.4850	3.2054
2.7000	0.4850	3.2121
2.7500	0.4800	3.2301
2.8000	0.4800	3.2376
2.8500	0.4800	3.2448
2.9000	0.4800	3.2519
2.9500	0.4800	3.2588
3.0000	0.4800	3.2644
4.0000	0.4750	3.3790
5.0000	0.4700	3.4623



Şekil 4.2 Adyabatik yakıt dönüştürücü çıkışında H_2 miktarının farklı su-karbon oranına bağlı olarak değişimi

Öte yandan yakıt dönüştürücü sisteminde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda yakıtın ne kadarının dönüştüğü de gözlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.3’de grafik olarak verilmiştir. Kullanılan doğalgaz büyük miktarda metandan oluştuğu için diğer hidrokarbonların değişimi incelenmemiş sadece metanın oksijen miktarı ile değişimine bakılmıştır.



Şekil 4.3 Yakıtın hidrojene dönüşüm miktarları

Grafikler ve tablolar incelendiğinde buhar-karbon oranı arttıkça elde edilen hidrojen miktarıda artmaktadır. Ancak bu durumda, yakıt dönüştürücü için gerekli olan buhar miktarıda orantılı olarak artmaktadır. Artan buhar miktarı ise suyun ısıtılması için gerekli olan enerji miktarını arttırmaktadır. Bu durumda en uygun buhar-karbon oranının seçilmesi gerekmektedir.

En optimum sonuca ulaşmak için tasarımı yapılacak sistemin özellikleri: 2.8 buhar karbon oranı ile 0.48 kmol O₂ olarak alınmıştır. Yakıtın 1 kmol'ünde 1.26 kmol karbon vardır. Su karbon oranının 2.8 olduğu hatırlanırsa, kullanılması gereken su miktarının 3.528 (1.26 x 2.8) kmol olması gerekir.

Yakıt, yakıt dönüştürücü sistemine girmeden önce 700 °C sıcaklığa ısıtılmıştır. Bu işlem için gerekli hesaplar ısı hesaplamalar bölümünde

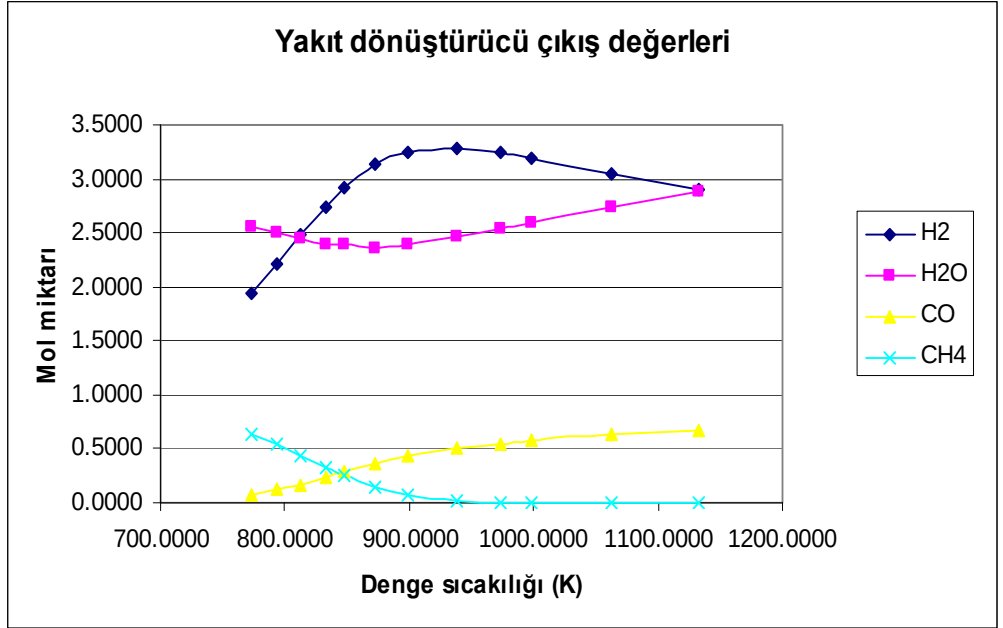
verilmiştir. Yakıt dönüştürücüsündeki reaksiyon ve elde edilen değerler incelenmiş ve farklı grafikler yardımı ile sonuçlar görselleştirilmiştir.

- Öncelikle sisteme giren ve sistemden çıkan gazlar Çizelge 4.3’de listelenmiştir. Çizelgede de gösterildiği gibi metan hariç diğer bütün hidrokarbonlar tamamen yanmıştır. Öte yandan pilde yakıt olarak kullanılacak hidrojen ve karbonmonoksit oluşmuştur.

Çizelge 4.3 Yakıt dönüştürücüye giren ve dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları.

Gaz	Giriş molü	Çıkış molü
H ₂ O	3.528	2.5341
H ₂	0	3.2376
CH ₄	0.82	0.0082
C ₂ H ₆	0.12	0
C ₃ H ₈	0.04	0
C ₄ H ₁₀	0.02	0
CO ₂	0	0.7021
CO	0	0.5496
N ₂	1.8050	1.8050
O ₂	0.48	0

- 2.8 buhar-karbon oranı için yakıt dönüştürücü çıkışındaki gazların sıcaklıklara göre değişimi incelenmiştir. Çizelge 4.3’dekine benzer olarak farklı sıcaklıklardaki sonuçlar alınmış ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 ATR çıkışındaki gazların mol sayılarının çıkış sıcaklığına göre değişimleri.

- Aynı buhar karbon oranında (2.8) farklı O_2 miktarlarının çıkış sıcaklığına etkisi gözlenmiş ve Şekil 4.5’deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Oksijen miktarındaki değişimin yakıt dönüştürücü çıkışındaki sıcaklığa etkisi.

4.2.1.2 Yakıt dönüştürücü işlemleri

Yakıt dönüştürücüde oluşan kimyasal reaksiyonlar HSC paket programı ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4’de listelenmiştir.

Çizelge 4.4 ATR çıkışındaki gaz miktarları.

Gaz	Çıkış molü
H ₂ O	2.5341
H ₂	3.2376
CH ₄	0.0082
C ₂ H ₆	0
C ₃ H ₈	0
C ₄ H ₁₀	0
CO ₂	0.7021
CO	0.5496
N ₂	1.8050
O ₂	0

Yakıt dönüştürücü çıkışındaki toplam gaz miktarı 8.8366 kmoldür. Gaz karışımının birim entalpisi 28376.2550 kJ/kmol ve toplam entalpisi 250749.6149 kJ olarak bulunmuştur.

Yakıt dönüştürücüdeki reaksiyonların ardından yakıt hücresi ve sistemin genel ısı hesaplarına geçilmiştir.

4.2.1.3 Düğüm noktalarının ısı hesapları

Sistemin genel akış şeması Ek Şekil 1’de verilmiştir. Şema üzerinde her nokta numaralandırılmıştır. Bütün noktaların özellikleri hesaplanmış ve ayrıca ilgili çizelgelerle özetlenmiştir.

Yakıt hücresi hesapları ve ısı hesapları için farklı bilgisayar programlarından yararlanılmıştır. Her noktadaki maddelerin özelliklerinin bulunabilmesi için java programlama dilinde yazılmış programlar kullanılmıştır. Örneğin gaz karışımlarının özelliklerinin bulunabilmesi için Şekil 4.6'da arayüzü görülen Gmix.java programı kullanılmıştır. Bu programa karışımda bulunan gazların mol sayıları, sıcaklığı ve basıncı verildiğinde karışımla ilgili bütün özellikler alınabilmektedir.

Properties of Perfect Gas Mixtures

unit system: SI
mass/mole: mole
gas Name: Atr_cikisi
temperature: 700.0
pressure: 1.0

additional data can be added to Gas.txt file
Dr. Turhan Çoban,
Ulusal Metroloji Enstitüsü, (UME) TÜBİTAK
phone : 90(262)6466355-525 email : turhan.coban@ume.tubitak.gov.tr
Gas Formula : H2 3.2376
CO 0.5496
H2O 2.5341
N2 1.805
CO2 0.7021
CH4 0.0082

P, pressure	1.0	bars
T, temperature	973.0	deg K
v, specific volume	80.90008499999999	m^3/kmole
density	0.012360926444020426	kmole/m^3
h, enthalpy	28376.255049921754	KJ/kmole
u, internal energy	20286.246549921747	KJ/kmole
s, entropy	38.856447292742345	KJ/kmole K
g, gibbs free energy	-9431.06816591655	KJ/kmole
ht, chemical entropy	-85075.94717717914	KJ/kmole
gt, chemical gibbs f.e.	-116989.12352657564	KJ/kmole
Cp, specific heat at const P	35.83156837918639	KJ/kmole K
Cv, specific heat at const v	27.517068379186394	KJ/kmole K
Cp/Cv, adiabatic constant	1.30215791469592	
c, speed of sound	789.9687259986204	m/s
viscosity	3.738927756502786E-5	Ns/m^2
thermal conductivity	0.0920191644590526	W/m K
M, molecular weight	16.880792679084717	kg/kmol
Prandtl number	0.8624655765887266	

Şekil 4.6 Gaz karışımlarının özelliklerinin bulunduğu java programının arayüzü

Yakıt pili sistemindeki her nokta için, o noktadaki gazların mol sayıları ve entalpileri hesaplanmış ve yakıt dönüştürücüsü ile ilgili olan kısımlar Çizelge 4.5’de verilmiştir. Doğalgaz öncelikle 25 °C’de sisteme girmiş ve belirli işlemlerden geçtikten sonra yakıt hücresine ulaşmıştır. İlk ısı değiştiricinin ardından sıcaklığı 400 °C’e çıkartılmış ve kükürt arıtıcı sonrasında sıcaklığı 700 °C’e yükseltilerek yakıt dönüştürücüye verilmiştir. Bu işlemlerin tamamı Çizelge 4.6’da özetlenmiştir.

Yakıt girişi (1 noktası)

Yakıt, yakıt pili sistemine 25 °C sıcaklıkta girmiştir.

$$h = -1.6783 \text{ kJ/kmol}$$

$$n \text{ (mol sayısı)} = 1 \text{ kmol}$$

1. Isı değiştirici çıkışı (kükürt arıtıcı çıkışı 2-3 noktası)

Yakıt 400 °C sıcaklığa ısıtılmıştır.

$$h = 20144.4585 \text{ kJ/kmol}$$

$$n = 1 \text{ kmol}$$

2. Isı değiştirici çıkışı (4 noktası)

Yakıt ATR’e girmeden önce 700 °C sıcaklığa ısıtılmıştır.

$$h = 42925.0986 \text{ kJ/kmol}$$

$$n = 1 \text{ kmol}$$

ATR girişi (8 noktası)

700 °C de yakıt dönüştürücüye girecek buharın entalpisi

$$h = 34799.2231 \text{ kJ/kmol}$$

$$n = 3.528 \text{ kmol}$$

$$H = 34799.2231 \times 3.528 = 122771.6591 \text{ kJ}$$

25 °C'deki suyun entalpisi (17 noktası)

$$h = 1889.5446 \text{ kJ/kmol}$$

$$n = 3.528 \text{ kmol}$$

$$H = 6666.3133 \text{ kJ}$$

Çizelge 4.5 Yakıt dönüştürücüye kadarki kısmı oluşturan noktaların hesap sonuçları.

Nokta	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (Mol sayısı)	H (Entalpi)
Yakıt girişi (1 noktası)	Yakıt, yakıt pili sistemine 25 °C sıcaklıkta girmiştir.	-1.6783 kJ/kmol	1 kmol	-1.6783 kJ
1. Isı değiştirici çıkışı (kükürt arıtıcı çıkışı) (2 ve 3 noktası)	Yakıt 400 °C sıcaklığa ısıtılmıştır.	20144.4585 kJ/kmol	1 kmol	20144.4585 kJ
2. Isı değiştirici çıkışı (4 noktası)	Yakıt ATR'e girmeden önce 700 °C sıcaklığa ısıtılmıştır.	42925.0986 kJ/kmol	1 kmol	42925.0986 kJ
ATR girişi (8 noktası)	Yakıt, 700 °C de yakıt dönüştürücüye girecektir.	34799.2231 kJ/kmol	3.528 kmol	122771.6591 kJ
Su (17 noktası)	25 °C	1889.5446 kJ/kmol	3.528 kmol	6666.3133 kJ

4.2.1.4 Yakıt hücresi hesapları

Pilde yakıt olarak kullanılan gazlar H_2 , CH_4 ve CO 'dur. Pilde H_2 ve CO 'ın % 85'i, CH_4 'ün ise % 15'nin reaksiyona girdiği kabul edilmiştir. Pilde gerçekleşen reaksiyon için % 50 fazla hava verilmiştir.

H₂ ve CO'in % 85'i

$$\text{H}_2 \rightarrow 3.2376 * 0.85 = 2.7519 \text{ kmol}$$

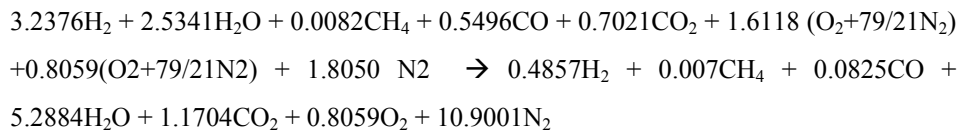
$$\text{CO} \rightarrow 0.5496 * 0.85 = 0.4671 \text{ kmol'dür.}$$

CH₄'ün % 15'i

$$\text{CH}_4 \rightarrow 0.0082 * 0.15 = 0.0012 \text{ kmol'dür.}$$

Yakıt piliinde gerçekleşen reaksiyonun denklemi denklem 3.1 ile verilmiştir.

Denklem 3.1



Anot çıkışı (7 noktası)

$$0.4857 \text{ kmol H}_2$$

$$5.2884 \text{ kmol H}_2\text{O}$$

46

0.0825 kmol CO

1.1704 kmol CO₂

0.007 kmol CH₄

Toplam mol sayısı n= 7.034 kmol

$h = 43480.3516 \text{ kJ/kmol}$

$H = 305840.7932 \text{ kJ}$

Katot çıkışı (10 noktası)

0.8059 kmol O₂

10.9001 kmol N₂

n= 11.7060 kmol

$h = 36000.5158 \text{ kJ/kmol}$

$H = 421422.038 \text{ kJ}$

Hesaplar sonucunda sistemde oluşan reaksiyonun entalpisi, elde edilen gerilim değeri ve pil verimi Çizelge 4.6’da verilmiştir. Hesaplar

Reaction.java programıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de Reaction.java programından bir kesit görülmektedir.

Çizelge 4.6 Pilin, hesaplar sonucunda elde edilen özet performans değerleri

Reaksiyon Entalpisi	Gerilim	Verim
-814555.7780 KJ/kmol yakıt	0.9688 V	0.739

Thermodynamics of Reaction

unit system: SI
mass/mole: mole
gas Name: hidrojen
Reactant temperature: 25.0
Product temperature: 25.0

1.01325

Dr. Turhan Çoban,
Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina müh.,
Bornova İzmir Turkey,
phone : 90(232)3434000-5387
email : turhan.coban@mail.ege.edu.tr
Reaction name : hidrojen

Reaction formula : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0.5 \text{O}_2$
Reaction composition : $\text{H}_2 \text{O}$
Reaction enthalpy : 241818.00686400785 KJ/kmol fuel
Reaction entropy : 7.938445578430816 KJ/kmol fuel K
Reaction gibbs energy : 226230.31358163548 KJ/kmol fuel K
Reaction gibbs energy 0 state : 211108.00685660786 KJ/kmol fuel K
Adiabatic flame temperature : 2726.999979868531 C
 $V_i = -1.172335721815558 \text{ V}$
 $V_{i0} = -1.0939712440878453 \text{ V}$
fuel cell efficiency : 0.935539567609047
fuel cell efficiency 0 state : 0.8730036674867206

Şekil 4.7 Reaction.java programından bir kesit.

Sistemin pil kısmını oluşturan noktaların termodinamik hesapları sonuçunda elde edilen değerler izelge 4.7 de özetlenmiştir.

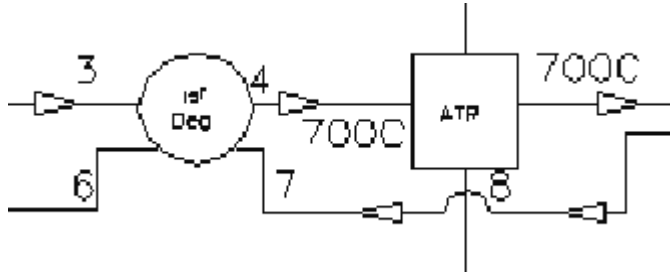
Çizelge 4.7 Pil kısmını oluşturan noktaların hesap sonuçları.

Nokta	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (Mol sayısı)	H (Entalpi)
Anot ıkışı (7 noktası)	0.4857 kmol H ₂ 5.2884 kmol H ₂ O 0.0825 kmol CO 1.1704 kmol CO ₂ 0.007 kmol CH ₄	43480.3516 kJ/kmol	7.034 kmol	305840.7932 kJ
Katot ıkışı (10 noktası)	0.8059 kmol O ₂ 10.9001 kmol N ₂	36000.5158 kJ/kmol	11.7060 kmol	421422.038 kJ
Fan ıkışı (12 noktası)	2.8977 kmol O ₂ (2.4177 kmol (Yakıt piline gidecek + 0.48 kmol ATR'e gidecek) 10.9008 kmol N ₂	8671.73 kJ/kmol	13.7985 kmol	119656.8664 kJ
Fan ıkışı (13 noktası)	2.8977 kmol O ₂ 10.9008 kmol N ₂	29503.0802 kJ/kmol	13.7985 kmol	407098.2521 kJ

4.2.1.5 Sistemde kullanılan ısı değiştircilerinin hesapları

3-4, 6-7 Isı Değiştircisi

Bu bölümde yakıt dönüştürücüye girmeden önce yakıtın ısıtıldığı ısı değiştircisinin hesabı verilmiştir. Isı değiştircisinin genel sistem şemasındaki yeri şekil 4.8'de verilmiştir. Isı değiştirciye giren ve çıkan akışkanların entalpi farklarının eşitliğinden bilinmeyen bir entalpi değeri bulununur.



Şekil 4.8 Yakıt dönüştürücü öncesindeki ısı değiştiricisi akış şeması

$$H_7 - H_6 = H_4 - H_3$$

$$305840.7932 - H_6 = 42925.0986 - 20144.4585$$

$$H_6 = 283060.1531$$

$$h_6 = H_6 / 7.034 \text{ (anot çıkışı mol sayısı)}$$

$$h_6 = 40241.7050 \text{ kJ/kmol}$$

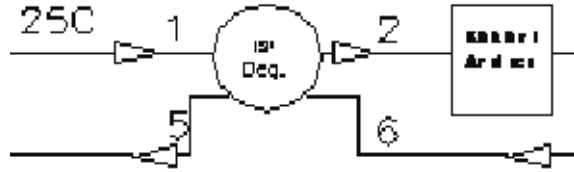
$$T_6 = 826.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Isı değiştirici sonunda anot çıkışındaki gaz karışımının sıcaklığı 826.7 °C olarak bulunmuştur.

1-2, 5-6 Isı Değiştiricisi

Bu bölümde yakıtın kükürt artııcıya girmeden önce ısıtıldığı ısı değiştiricisinin hesabı verilmiştir. Isı değiştiricinin genel sistem

şemasındaki yeri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Yakıt kükürt arıtıcıya girmeden önce 400 °C’e ısıtılmıştır.



Şekil 4.9 Kükürt arıtıcı önündeki ısı değişirici akış şeması

$$H_6 - H_5 = H_2 - H_1$$

$$283060.153 - H_5 = 20144.4585 - (-1.6783)$$

$$H_5 = 262914.0162 \text{ kJ}$$

$$h_5 = H_5 / 7.034 = 37377.5968 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_5 = 760.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Isı değişirici sonunda anot çıkışındaki gaz karışımının sıcaklığı 760.7 °C olarak bulunmuştur.

Fan çıkışı (12 noktası)

Gaz karışımı

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 2.4177 \text{ kmol (Yakıt pilinden gelen)} + 0.48 \text{ (ATR'den gelen)} = \\ &= 2.8977 \text{ kmol} \end{aligned}$$

$$\text{N}_2 = 10.9008 \text{ kmol}$$

$$\text{Toplam mol sayısı } n = 13.7985 \text{ kmol}$$

$$H_{12} = 119656.8664 \text{ kJ}$$

Yakıt pili ve ATR'e giden hava (13 noktası)

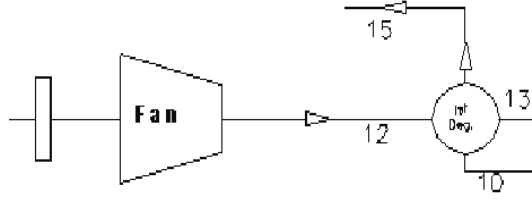
$$h_{13} = 29503.0802 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{13} = 407098.2521 \text{ kJ}$$

$$n = 13.7985 \text{ kmol}$$

12-13, 10-15 Isı Değiştiricisi

Bu bölümde havanın ısıtıldığı ısı değiştirici hesabı verilmiştir. Hava sisteme verilmeden önce katot çıkışındaki gaz karışımıyla ısıtılmaktadır. Isı değiştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Havanın ısıtıldığı ısı değıştiricinin akış şeması

$$H_{13} - H_{12} = H_{10} - H_{15}$$

$$407098.2521 - 119656.8664 = 421422.038 - H_{15}$$

$$h_{15} = H_{15} / 11.706 \text{ (katot çıkışı mol sayısı)}$$

$$h_{15} = 11445.4683 \text{ kJ/kmol}$$

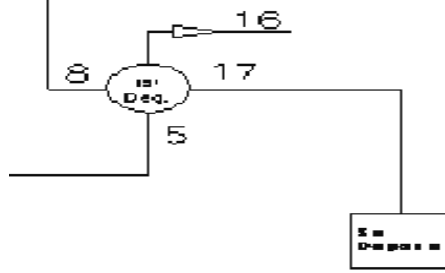
$$T_{15} = 120.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Katot çıkışındaki gaz karışımı havayı ısıttıktan sonra 120.2 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sistemi terk etmiştir.

8-17, 5-16 Isı Değıştiricisi

Bu bölümde suyun ısıtıldığı ve buhar haline getirildiği ısı değıştiricisinin hesabı verilmiştir. Isı değıştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Su yakıt dönüştürücüye

girmeden önce 700 °C'e ısıtılmaktadır. Isıtma işlemi için anot çıkışındaki gaz karışımı kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Suyun ısıtıldığı ısı değişiricinin akış şeması

$$H_5 - H_{16} = H_8 - H_{17}$$

$$262914.0162 - H_{16} = 122771.6591 - 6666.3133$$

$$H_{16} = 146808.6704 \text{ kJ}$$

$$h_{16} = H_{16} / 7.034 \text{ (anot çıkışı mol sayısı)}$$

$$h_{16} = 20871.2923 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{16} = 353.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Anot çıkışındaki gaz karışımı son olarak yakıt dönüştürücüye girecek olan suyu ısıttıktan sonra sistemi 353.3 °C sıcaklıkta terk etmiştir.

Yapılan ısı hesapların ardından bulunan değerlerin özeti Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Isı değiştirici çıkışındaki noktaların hesap sonuçları.

Nokta	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (mol sayısı)	H (Entalpi)
Anot çıkışı (5 noktası)	760.7 °C de ısı değiştiriciden çıkıp suyun ısıtılması için diğer ısı değiştiriciye gönderilmiştir.	37377.5968 kj/kmol	7.034 kmol	262914.0162 kj
Anot çıkışı (6 noktası)	826.7 °C de külğrt arıtıcı öncesindeki ısı değiştiriciye gönderilmiştir.	40241.7050 kj/kmol	7.034 kmol	283060.1531 kj
Katot çıkışı (15 noktası)	Katot çıkışındaki karışım sistemi 120.2 °C sıcaklıkta terk etmiştir.	11445.4683 kj/kmol	11.706 kmol	133980.6519 kj
Anot çıkışı (16 noktası)	Anot çıkışındaki karışım sistemi 353.3 °C sıcaklıkta terk etmiştir.	20871.2923kj/kmol	7.034 kmol	146808.6704 kj

4.2.2 Buharlı yakıt dönüştürücünün kullanıldığı yakıt pili sistemi

Bu sistemde ototermal yakıt dönüştürücülü sisteme benzer olarak tasarlanmıştır. Diğer sistemden farkı, yakıt dönüştürücü sisteminin farklı yapısı ve bu nedenle kaynaklanan ısı hesapların farklılığıdır. Ayrıca katalitik yanma odasında kullanılarak egsoz gazları yakılmış ve elde

edilen enerji ile yakıt dönüştürücünün ihtiyaç duyduğu buharın oluşturulması sağlanmıştır.

Katalitik yanma odasının ihtiyaç duyduğu hava katottan ve fanın bastığı havadan sağlanmıştır.

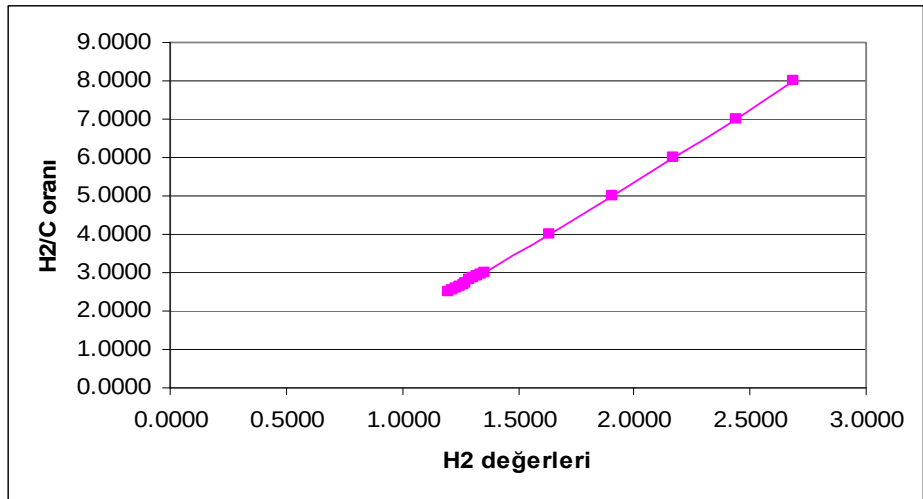
Buharlı yakıt dönüştürücü çıkışında sıcaklık 445°C 'e düştüğü için dönüştürücü ile pil arasına bir ısı değiştirici daha ilave edilmiştir. Bu sayede hidrojen zengin karışımın sıcaklığı 700°C kadar çıkarılmıştır.

4.2.2.1 En uygun buhar-yakıt oranının bulunması

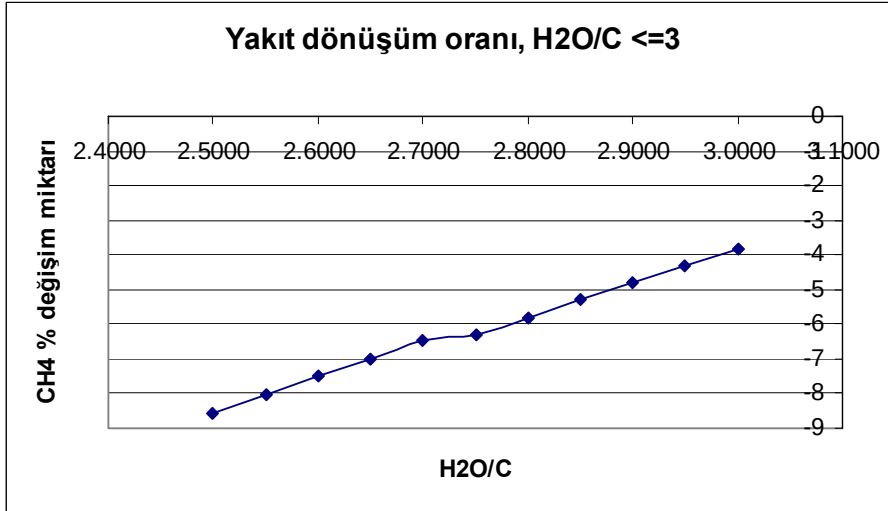
Buharlı yakıt dönüştürücü sisteminde de öncelikle farklı buhar-karbon oranlarındaki hidrojen çıkışları incelenmiş ve en uygun sistemin seçilmesi sağlanmıştır. Bunun için buhar karbon oranı 2.5'den 8'e kadar değiştirilmiştir. Yapılan hesapların sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.9'da listelenmiş ve ayrıca Şekil 4.12'de grafik olarak gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi buhar-karbon oranı arttıkça elde edilen hidrojen miktarı artmaktadır. Ancak bu durumda yakıt dönüştürücü sistemine girecek olan buhar miktarı büyük oranda artmaktadır. Bunun anlamı suyu buharlaştırmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç olduğudur. Bu yüzden buhar-karbon oranının 2.8 olması uygun görülmüştür. Bu seçim sayesinde ototermal yakıt dönüştürücü sistemdeki buhar-karbon oranı kullanılmış ve sistemlerin birbirleriyle karşılaştırılması kolaylaştırılmıştır.

Çizelge 4.9 Farklı buhar karbon oranları için yakıt dönüştürücü çıkış değerleri

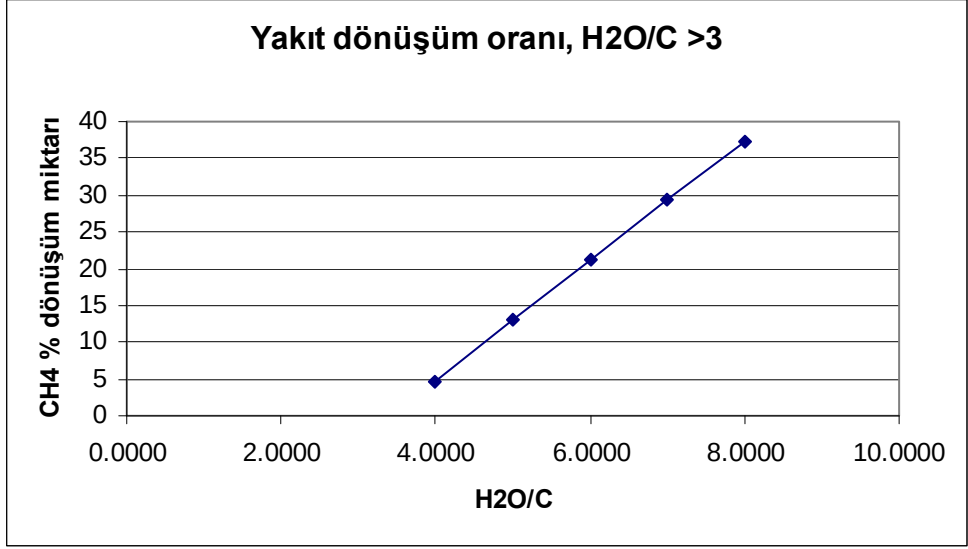
H ₂ O/C	H ₂ (mol)
2.5000	1.1977
2.5500	1.2140
2.6000	1.2317
2.6500	1.2485
2.7000	1.2653
2.7500	1.2717
2.8000	1.2881
2.8500	1.3044
2.9000	1.3207
2.9500	1.3368
3.0000	1.3529
4.0000	1.6316
5.0000	1.9040
6.0000	2.1706
7.0000	2.4373
8.0000	2.6900

Şekil 4.12 Farklı H₂O/C oranlarında yakıt dönüştürücüden çıkan H₂ miktarları

Yapılan hesaplar sonucunda buharlı yakıt dönüştürücüdeki yakıt dönüşüm oranları alınmış ve iki ayrı grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.13 ve 4.14). Birinci grafikte değerlerin eksi çıkmasının sebebi düşük buhar-karbon oranlarında metanın hidrojene dönüşeceği yerde buharın karbon ile reaksiyona girerek metana dönüşmesidir. Bu nedenle metandan tam olarak yararlanılamamaktadır. Bu durum hidrojen üretiminin düşük kalmasına sebep olmakta ve sistemin verimini düşürmektedir. Bu sistemde daha yüksek buhar-karbon oranları alanabileceği halde 2.8 tutularak daha öncede bahsedildiği gibi sistmlerin birbirleri ile daha kolay karşılaştırılması sağlanmıştır.

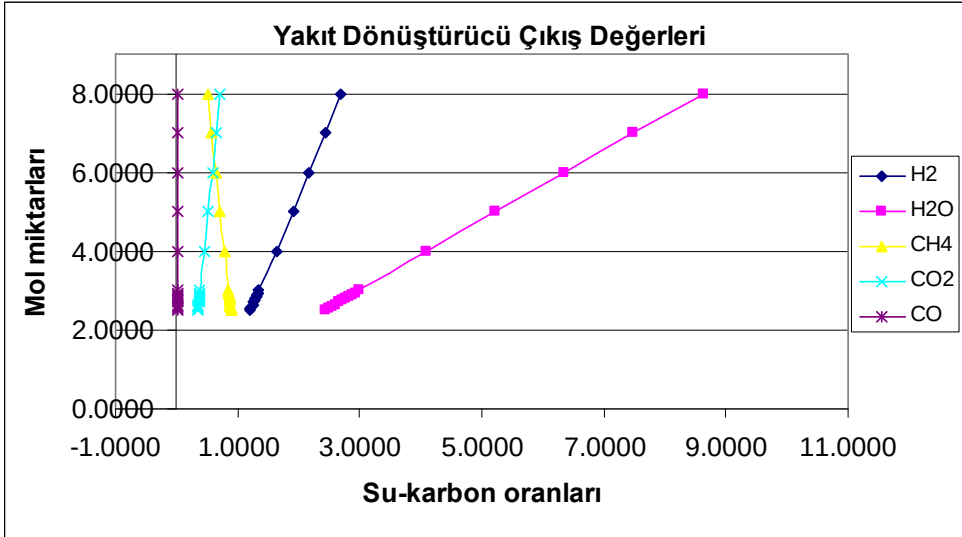


Şekil 4.13 Su-karbon oranının 3 ve 3'den küçük olduğu durumlar için yakıt dönüşüm oranları

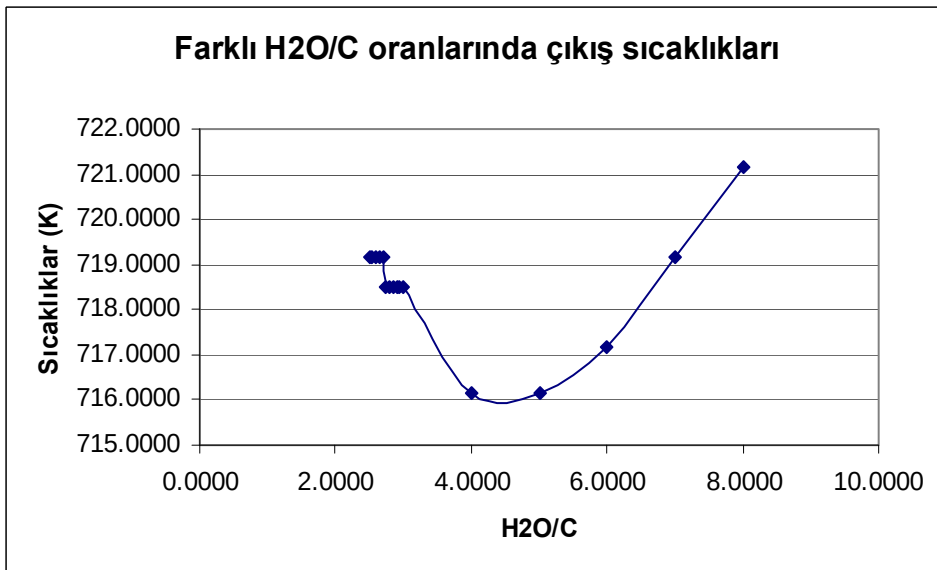


Şekil 4.14 Su-karbon oranının 3'den büyük olduğu durumlar için yakıt dönüşüm oranları

Ayrıca farklı buhar-karbon oranları için yakıt dönüştürücü çıkışındaki gazların miktarları bulunmuş ve Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Buhar-karbon oranının çıkış sıcaklığına etkisi de incelenmiştir. Şekil 4.16'dan da görüldüğü gibi buhar-karbon oranının değişmesinin çıkış sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi görülmemektedir.



Şekil 4.15 Farklı H_2O/C için yakıt dönüştürücü çıkışları.



Şekil 4.16 Yakıt dönüştürücü çıkış sıcaklıkları.

4.2.2.2 Yakıt dönüştürücü işlemleri

Yapılan hesaplar ve elde edilen grafikler yardımı ile ve diğer sistemlerle karşılaştırılmasındaki kolaylık bakımından buhar-karbon oranı 2.8 olarak alınmıştır.

2.8 buhar-karbon oranında yakıt dönüştürücü girişindeki ve çıkışındaki gazların miktarları Çizelge 4.10’da listelenmiştir.

Çizelge 4.10 Yakıt dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları

Gaz	Giriş molü	Çıkış molü
H ₂ O	3.528	2.7647
H ₂	0	1.2881
CH ₄	0.82	0.8676
C ₂ H ₆	0.12	0
C ₃ H ₈	0.04	0
C ₄ H ₁₀	0.02	0
CO ₂	0	0.3709
CO	0	0.0214

Yakıt dönüştürücü çıkışındaki gaz karışımının sıcaklığı 445 °C olarak bulunmuştur. Karışımın toplam mol sayısı 5.3127 kmol ve entalpisi 21124.9855 kJ/kmol’dür.

Toplam entalpisi ise $H = h \times n$

$$= 112230.7105 \text{ KJ'dür.}$$

4.2.2.3 Düğüm noktalarının ısı hesapları

Sistemin genel akış şeması Ek Şekil 2’de verilmiştir. Şema üzerinde her nokta numaralandırılmıştır. Bütün noktaların özellikleri hesaplanmış ve ayrıca ilgili çizelgelerde özetlenmiştir.

Yakıtın, yakıt dönüştürücüye girene kadar olan hesapları ototermal yakıt dönüştürücülü sistemle aynı olduğu için tekrar verilmemiştir. Çizelge 4.11’de buharlı yakıt dönüştürücülü sistemin, dönüştürücüye kadar olan kısmında belirlenen noktaların hesap sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.11 Yakıt dönüştürücüye kadarki kısmı oluşturan noktaların hesap sonuçları.

Düğüm Noktası	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (Mol sayısı)	H (Entalpi)
Yakıt girişi (1 noktası)	Yakıt, yakıt pili sistemine 25 °C sıcaklıkta girmiştir.	-1.6783 kj/kmol	1 kmol	-1.6783 kj
1. Isı değiştirici çıkışı (kükürt arıtıcı çıkışı) (2-3 noktası)	Yakıt 400 °C sıcaklığa ısıtılmıştır.	20144.4585 kj/kmol	1 kmol	20144.4585 kj
2. Isı değiştirici çıkışı (4 noktası)	Yakıt BYD’e girmeden önce 700 °C sıcaklığa ısıtılmıştır.	42925.0986 kj/kmol	1 kmol	42925.0986 kj
Su (21 noktası)	25 °C	1889.5446 kj/kmol	3.528 kmol	6666.3133 kj

Sistemde suyun ısıtılması için gereken enerji kullanılan katalitik yanma odası ile sağlanmıştır. Bu işlem için gerekli hesaplar ileriki bölümlerde verilecektir.

4.2.2.4 Yakıt hücresi hesapları

Pilde yakıt olarak kullanılan gazlar H_2 , CH_4 ve CO 'dur. Pilde H_2 ve CO 'in % 85'i, CH_4 'ün ise % 15'nin reaksiyona girdiği kabul edilmiştir. Pilde gerçekleşen reaksiyon için % 50 fazla hava verilmiştir.

H_2 ve CO 'in % 85'i

$$H_2 \rightarrow 1.2881 * 0.85 = 1.0948 \text{ kmol}$$

$$CO \rightarrow 0.0214 * 0.85 = 0.0181 \text{ kmol}$$

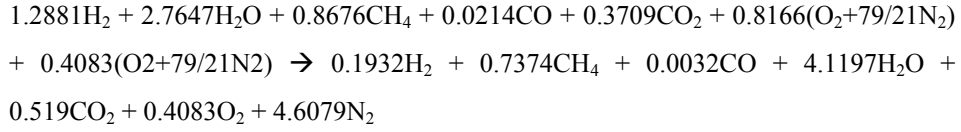
CH_4 'ün % 15'i

$$CH_4 \rightarrow 0.8676 * 0.15 = 0.1301 \text{ kmol}$$

Anot çıkışındaki gaz karışımı yakıt dönüştürücü öncesi ve sonrasındaki ısı değiştiricilere gidecek şekilde ayrılmıştır.

Yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyon denklem 3.2 ile verilmiştir.

Denklem 3.2



Hesaplar sonucunda sistemde oluşan reaksiyonun entalpisi, elde edilen gerilim değeri ve pil verimi Çizelge 4.12’de verilmiştir. Hesaplar Reaction.java programıyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.12 Hesaplar sonucunda elde edilen pil özet değerleri

Reaksiyon Entalpisi	Gerilim	Verim
-380386.0205 KJ/kmol yakıt	0.729 V	0.811

Anot çıkışı (11 noktası)0.1932 kmol H₂4.1197 kmol H₂O

0.0032 kmol CO

0.519 kmol CO₂0.7374 kmol CH₄

Toplam mol sayısı n= 5.5725 kmol

64

$$h = 44531.8839 \text{ kJ/kmol}$$

$$H = 248153.923 \text{ kJ}$$

Katot çıkışı (12 noktası)

$$0.4083 \text{ kmol O}_2$$

$$4.6079 \text{ kmol N}_2$$

$$n = 5.0162 \text{ kmol}$$

$$h = 360001.0392 \text{ kJ/kmol}$$

$$H = 180588.4128 \text{ kJ}$$

Anot çıkışındaki gaz karışımı yakıt dönüştürücü öncesi ve sonrasındaki ısı değiştiricilere gidecek şekilde ayrılmıştır.

Yakıt dönüştürücü sonrasındaki ısı değiştirici çıkışı (7 noktası)

Isı değiştirici çıkışındaki sıcaklık 550°C olarak kabul edilmiştir.

$$h_7 = 26271.1933 \text{ kJ/kmol}$$

Buharlı yakıt dönüştürücü çıkışı (9 noktası)

Yakıt dönüştürücü çıkışı 445°C 'dir.

1.2881 kmol H_2

2.7647 kmol H_2O

0.0214 kmol CO

0.3709 kmol CO_2

0.8676 kmol CH_4

Toplam mol sayısı $n = 5.3127$ kmol

$h_9 = 21124.9855$ kJ/kmol

$H_9 = 112230.7105$ kJ

Pile gidecek olan yakıtın özellikleri (10 noktası)

Yakıt pile 700°C sıcaklıkta girecektir.

$h = 31849.7116$ kJ/kmol

$n = 5.3127$ kmol

$H_{10} = 169207.9628$ kJ

Yakıt pilini oluşturan kısımların hesap sonuçları Çizelge 4.13 ile verilmiştir.

Çizelge 4.13 Pil kısmını oluşturan noktaların hesap sonuçları.

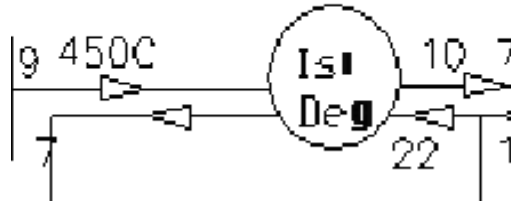
Düğüm Noktası	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (Mol sayısı)	H (Entalpi)
Anot çıkışı (7 noktası)	Isı değiştirici çıkışındaki sıcaklık 550 C olarak kabul edilmiştir.	26271.1933 kJ/kmol	5.5725 kmol	146396.2247 kJ
Buharlı yakıt dönüştürücü çıkışındaki yakıt (9 noktası)	Yakıt dönüştürücü çıkışı 445 °C'dir. 1.2881 kmol H ₂ 2.7647 kmol H ₂ O 0.0214 kmol CO 0.3709 kmol CO ₂ 0.8676 kmol CH ₄	21124.9855 kJ/kmol	5.3127 kmol	112230.7105 kJ
Pile gidecek olan yakıt (10 noktası)	Yakıt pile 700 °C sıcaklıkta girecektir.	31849.7116 kJ/kmol	5.3127 kmol	169207.9628 kJ
Anot çıkışı (11 noktası)	0.1932 kmol H ₂ 4.1197 kmol H ₂ O 0.0032 kmol CO 0.519 kmol CO ₂ 0.7374 kmol CH ₄	44531.8839 kJ/kmol	5.5725 kmol	248153.923 kJ
Katot çıkışı (12 noktası)	0.4083 kmol O ₂ 4.6079 kmol N ₂	360001.0392 kJ/kmol	5.0162 kmol	180588.4128 kJ

4.2.2.5 Sistemde kullanılan ısı değıştircilerinin hesapları

Yakıt dönüştürücüye kadar olan hesaplar ototermal yakıt dönüştürücülü sistemle aynı olduğu için tekrar yapılmamış o sistemde elde edilen sonuçlar burada da kullanılmıştır.

9-10, 22-7 Isı değıştircisi

Bu bölümde yakıt pili öncesinde yakıtın ısıtıldığı ısı değıştircisinin hesapları yapılmıştır. Isı değıştircisinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Isı değıştirci çıkışında sıcaklık 700 °C’nin altına düştüğu için yakıt dönüştürücü öncesindeki ısı değıştirciye gaz karışımının giriş sıcaklığı yeterli gelmemektedir. Bu yüzden akım ısı değıştirciye girmeden önce ikiye bölünmüştür. Isı değıştirci çıkışında sıcaklık 550 °C olarak alınmış ve kollara ayrılan mol sayıları bulunmuştur. Anot çıkışındaki gaz karışımının mol sayısı 5.5725 kmol’dür.



Şekil 4.17 Yakıt pili öncesindeki ısı değıştircisinin akış şeması

$$H_{22} - H_7 = H_{10} - H_9$$

$$nx(44531.8839 - 28409.4439) = 169207.9628 - 112230.7105$$

68

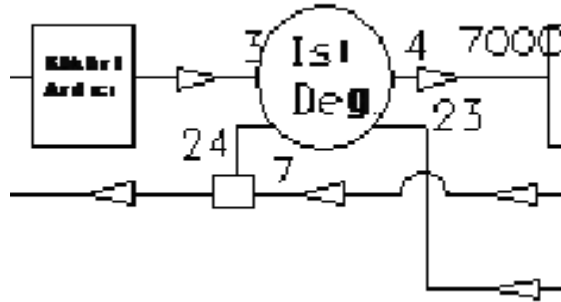
$$n = 3.534 \text{ kmol}$$

Bu durumda diğer hattan,

$$5.5725 - 3.534 = 2.0385 \text{ kmol akışkan geçecektir.}$$

3-4, 23-24 Isı değişiricisi

Bu bölümde yakıtın, dönüştürücüye girmeden önce ısıtıldığı ısı değişiricisinin hesabı yapılmıştır. Isı değişiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Yakıt dönüştürücü öncesindeki ısı değişiricinin akış şeması

$$H_4 - H_3 = H_{23} - H_{24}$$

$$42925.0986 - 20144.4585 = 2.0385 (44531.8839 - h_{24})$$

$$h_{24} = 33356.6864 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{24} = 662 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Gaz karışımının ısı değiştiriciden çıkış sıcaklığı 662 $^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur.

İki kola ayrılan gaz karışımın tekrar birleştirilmesi

Sıcaklığın çok düşmesinden dolayı 3-4, 23-24 ısı değiştiricisine yeterli sıcaklık kalmadığı için ikiye ayrılan akım bu noktada tekrar birleştirilmiştir ve karışımın son sıcaklığı bulunmuştur.

$$h_6 = \frac{h_{24} \times n_{24} + h_7 \times n_7}{n_{24} + n_7}$$

$$= \frac{33356.6864 \times 2.0385 + 28409.4439 \times 3.534}{(2.0385 + 3.534)}$$

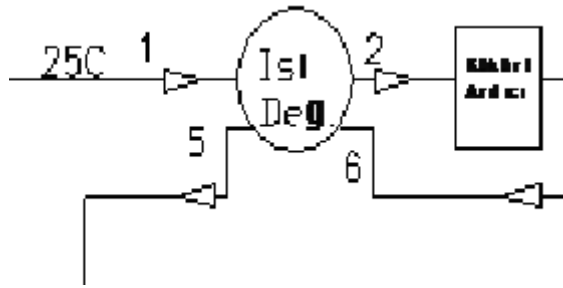
$$h_6 = 30219.2157 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_6 = 591.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

İki akışkan karışıktan sonra 591.5 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta yakıtın kükürt artıciya girmeden önce ısıtılacağı ısı değiştiriciye gitmektedir.

2-1, 6-5 Isı değiştiricisi

Bu bölümde yakıtın ilk ısıtıldığı ısı değiştiricisinin hesabı yapılmıştır. Isı değiştiricinin genel sistem şemasındaki yeri şekil 4.19’da gösterilmiştir.



şekil 4.19 Yakıtın ilk ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması

$$H_2 - H_1 = H_6 - H_5$$

$$20144.4585 - (-1.6783) = 5.5725 \times (30219.2157 - h_5)$$

$$h_5 = 26603.9376 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_5 = 507.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_5 = 148250.4423 \text{ kJ}$$

Fan çıkışındaki havanın özellikleri (15 noktası)

Havadaki gazların mol sayıları;

$$1.2249 \text{ kmol O}_2$$

$$4.6079 \text{ kmol N}_2$$

$$\text{Toplam mol sayısı } n = 5.8328 \text{ kmol}$$

$$h_{15} = 8671.7300 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{15} = 50580.4667 \text{ kJ}$$

Yakıt piline gidecek havanın özellikleri (13 noktası)

Pile gidecek havanın sıcaklığının 700 C olması kararlaştırılmıştır.
Havadaki gazların mol sayıları;

$$1.2249 \text{ kmol O}_2$$

$$4.6079 \text{ kmol N}_2$$

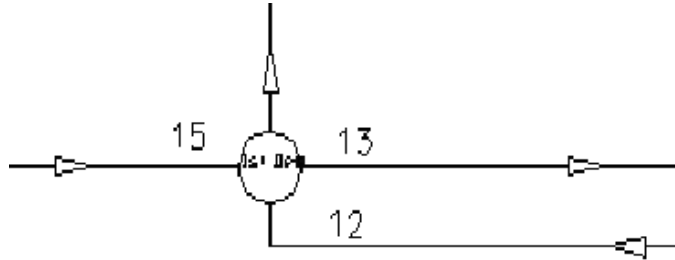
$$\text{Toplam mol sayısı } n = 5.8328 \text{ kmol}$$

$$h_{13} = 29503.0826 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{13} = 172085.5802 \text{ kJ}$$

13-15, 14-12 Isı değıştiricisi

Bu bölümde pile gidecek havanın ısıtılacağı ısı değıştiricisinin hesapları yapılmıştır. Isı değıştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Havanın ısıtıldığı ısı değıştiricinin akış şeması

$$H_{13} - H_{15} = H_{12} - H_{14}$$

$$172085.5802 - 50580.4667 = 180588.4128 - H_{14}$$

$$H_{14} = 59083.2993 \text{ kJ}$$

$$h_{14} = H_{14}/5.0162$$

$$h_{14} = 11778.4975 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{14} = 131.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Katottan gelen gaz karışımı pile gidecek havayı ısıttıktan sonra sistemi 131.5 °C sıcaklıkta terk etmiştir.

Katalitik yanma odasına gidecek olan havanın özellikleri (18 noktası)

Isı değiştirici sonunda yanma odasına gidecek olan hava 131.5 C'e ısıtılmıştır.

$$0.4083 \text{ kmol O}_2$$

$$1.5359 \text{ kmol N}_2$$

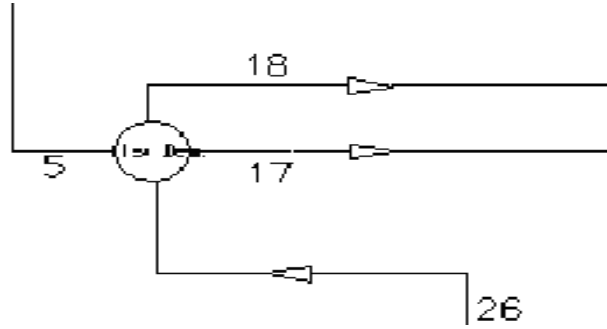
$$\text{Toplam mol sayısı } n = 1.9442 \text{ kmol}$$

$$h_{18} = 11788.1570 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{18} = 22918.4348 \text{ kJ}$$

5-17, 18-26 Isı değiştiricisinin hesabı

Bu bölümde katalitik yanma odasına gidecek olan havanın ısıtıldığı ısı değiştiricisinin hesabı yapılmıştır. Isı değiştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.21'da gösterilmiştir.



Şekil 4.21 Katalitik yanma odasına gidecek havanın ısıtıldığı ısı değıştirici akış şeması

$$H_5 - H_{17} = H_{18} - H_{26}$$

$$148250.4423 - H_{17} = 22918.5348 - 16859.5776$$

$$H_{17} = 142191.4851 \text{ kJ}$$

$$h_{17} = H_{17}/n (5.5725)$$

$$h_{17} = 25516.6415 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{17} = 482.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Yanma odasına gidecek olan havayı ısıttıktan sonra anot çıkışındaki gaz karışımı 482.1 °C sıcaklıkta yanma odasına girmiştir. Yapılan ısı değıştirici hesaplarının ardından elde edilen sonuçların özetleri Çizelge 4.14’de verilmiştir.

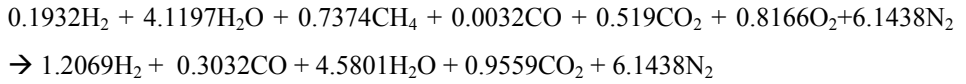
Çizelge 4.14 Isı değıştirici çıkışındaki noktaların özet hesap sonuçları.

Düğüm Noktası	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (mol sayısı)	H (Entalpi)
Anot çıkışı (5 noktası)	Yakıtın ilk ısı değıştiriciden çıkışındaki anot gazlarının durumu. (507.8 °C)	26603.9376 kJ/kmol	5.5725 kmol	148250.4423 kJ
Anot çıkışı (6 noktası)	Anot çıkışında ikiye ayrılan karışının tekrar birleştikten sonraki durumu. (591.5 °C)	30219.2157 kJ/kmol	5.5725 kmol	168396.5795 kJ
Yakıt piline gidecek hava (13 noktası)	Pile gidecek havanın sıcaklığının 700 °C olması kararlaştırılmıştır. 1.2249 kmol O ₂ 4.6079 kmol N ₂	29503.0826 kJ/kmol	5.8328 kmol	172085.5802 kJ
Katot çıkışı (14 noktası)	Katot çıkışındaki karışım 131.5 °C sıcaklıkta yanma odasına girmiştir.	11778.4975 kJ/kmol		59083.2993 kJ
Yakıt piline gidecek hava (15 noktası)	1.2249 kmol O ₂ 4.6079 kmol N ₂	8671.7300 kJ/kmol	5.8328 kmol	50580.4667 kJ
Anot çıkışı (17 noktası)	Anot çıkışındaki gaz karışımı 482.1 °C sıcaklıkta yanma odasına girmiştir.	25516.6415 kJ/kmol	5.5725 kmol	142191.4848 kJ
Anot çıkışı (24 noktası)	Anot çıkışındaki gaz karışımı (662 °C)	33356.6864 kJ/kmol	2.0385 kmol	67997.6052 kJ
Yanma odasına gidecek hava (26 noktası)	Havanın sisteme 25 °C de girdiği kabul edilmiştir. 0.4083 kmol O ₂ 1.5359 kmol N ₂	8671.7306 kJ/kmol	1.9442 kmol	16859.5776 kJ

Katalitik yanma odası hesabı

Yanma odasında meydana gelen reaksiyon denklem 3.3 ile verilmiştir.

Denklem 3.3



Kullanılan taze hava miktarı;

$$0.8166 \text{ (gerekli O}_2 \text{ miktarı)} - 0.4083 \text{ (katottan gelen O}_2 \text{ miktarı)} = 0.4083 \\ \text{kmol O}_2$$

$$0.4083 \text{ O}_2 + 1.5359 \text{ N}_2$$

Yanma odası çıkışındaki gazın özellikleri (19 noktası)

Yanma odası çıkışı 880 C sıcaklığındadır.

Toplam mol sayısı $n = 13.1899 \text{ kmol}$

$$h_{19} = 37953.3000 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{19} = 500600.2317 \text{ kJ}$$

8-21, 19-25 Isı Değiştiricisi

Suyun ısıtıldığı ısı değiştiricisinin hesabı. Isıtılacak suyun miktarı = 3.5280 kmol'dür.

Suyun özellikleri (21 noktası) 25⁰C

$$h_{21} = 1889.5446 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{21} = h_{21} \times 3.528$$

$$H_{21} = 6666.3133 \text{ kJ}$$

Yakıt dönüştürücüye gidecek olan suyun özellikleri:

$$h_8 = 34799.2231 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_8 = 122771.6591 \text{ kJ}$$

$$H_8 - H_{21} = H_{19} - H_{25}$$

$$122771.6591 - 6666.3133 = 500600.2317 - H_{25}$$

$$h_{25} = H_{25}/13.1899 \text{ (yanma odası çıkışındaki karışımın mol sayısı)}$$

$$h_{25} = 29150.7051 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{25} = 644^0\text{C}$$

Katalitik yanma odası çıkışındaki gaz karışımı suyu ısıtıttıktan sonra sistemi 644 °C de terk etmiştir. Katalitik yanma odası çıkışında elde edilen özet değerler Çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.15 Katalitik yanma odası ile ilgili noktaların hesap sonuçları.

Düğüm Noktası	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (mol sayısı)	H (Entalpi)
Yanma odasına gidecek hava (18 noktası)	Isı değiştirici sonunda yanma odasına gidecek olan hava 131.5 °C’e ısıtılmıştır. 0.4083 kmol O ₂ 1.5359 kmol N ₂	11788.1570 kJ/kmol	1.9442 kmol	22918.4348 kJ
Yanma odası çıkışı (19 noktası)	Yanma odası çıkışı 880 °C sıcaklığındadır.	37953.3000 kJ/kmol	13.1899 kmol	500600.2317 kJ
Su (21 noktası)	25 °C	1889.5446 kJ/kmol	3.528 kmol	6666.3133 kJ
Yanma odası çıkışı (25 noktası)	Karışım 644 °C sıcaklıkta sistemi terk etmiştir.	29150.7051 kJ/kmol	13.1899 kmol	384494.8852 kJ
Yakıt dönüştürücüye gidecek su (8 noktası)	700 °C	34799.2231 kJ/kmol	3.528 kmol	122771.6591 kJ

4.2.3 Isı değiştiricisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücünün kullanıldığı yakıt pili sistemi

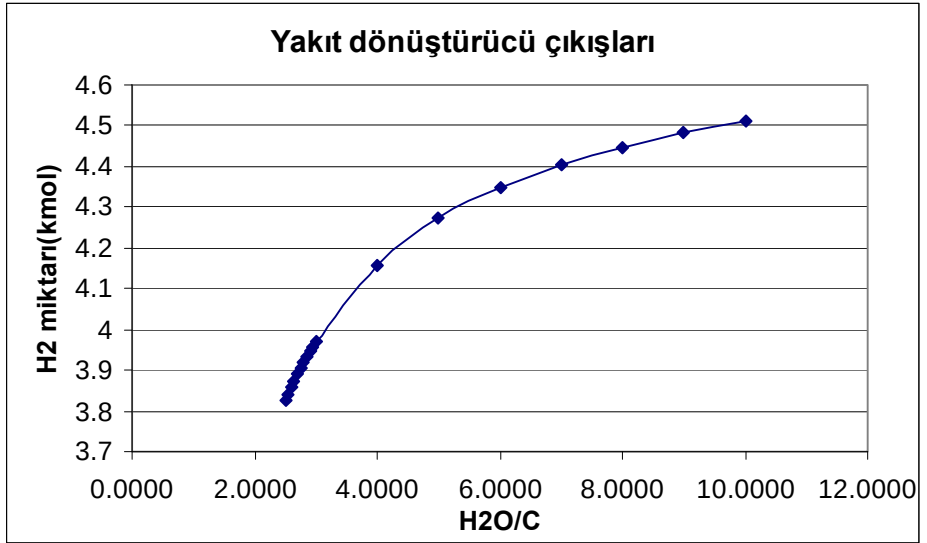
Çalışmanın bu bölümünde ısı değiştirgeci ile entegre yakıt dönüştürücülü sistem üzerinde çalışılmıştır.

4.2.3.1 En uygun buhar-karbon oranının bulunması

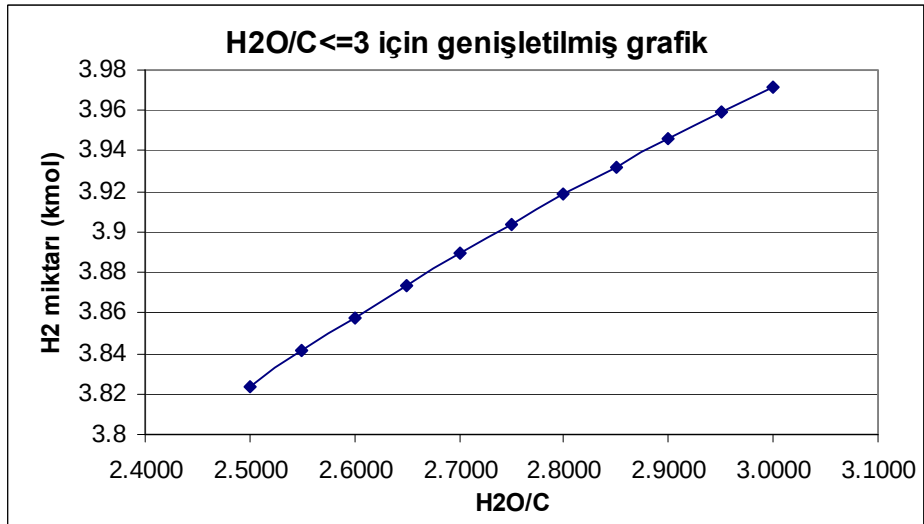
Diğer sistemlerde olduğu gibi bu sistem içinde farklı su-karbon oranları için hesaplar yapılmış ve uygun değerler alınmaya çalışılmıştır. Hesapları yapılan buhar-karbon oranları ve yakıt dönüştürücü çıkışında elde edilen hidrojen miktarları Çizelge 4.16’da verilmiştir. Ayrıca veriler grafik haline getirilmiş ve Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 Farklı su karbon oranları için yakıt dönüştürücü çıkış değerleri

H ₂ O/C	H ₂
2.5000	3.824
2.5500	3.841
2.6000	3.858
2.6500	3.874
2.7000	3.889
2.7500	3.904
2.8000	3.919
2.8500	3.932
2.9000	3.946
2.9500	3.959
3.0000	3.971
4.0000	4.158
5.0000	4.272
6.0000	4.349
7.0000	4.405
8.0000	4.448
9.0000	4.482
10.0000	4.51

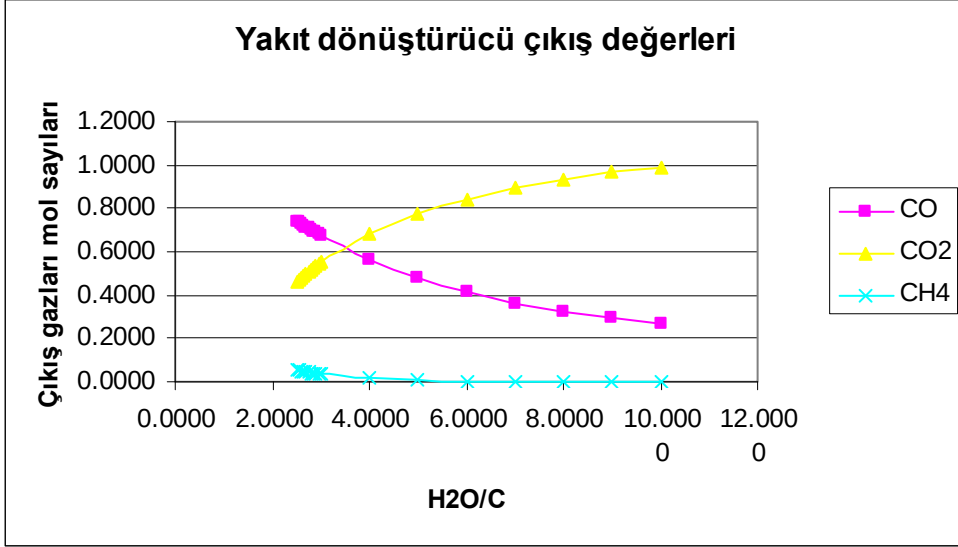


Şekil 4.22 Farklı H₂O/C oranlarında yakıt dönüştürücüden çıkan H₂ miktarları.



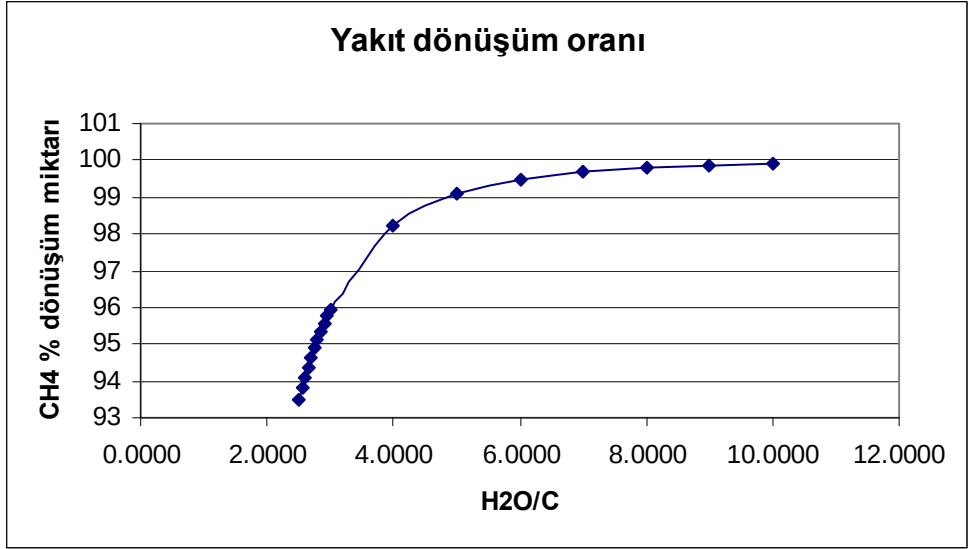
Şekil 4.23 Hidrojen çıkışının su-karbon oranının 3'den küçük olduğu durum için genişletilmiş gösterimi.

Benzer olarak farklı buhar-karbon oranları için yakıt dönüştürücü çıkışındaki gazların dağılımı da Şekil 4.24’de verilmiştir.



Şekil 4.24 Yakıt dönüştürücü çıkışındaki gazların farklı su-karbon oranları için değerleri

Çıkış değerleri ile birlikte yakıt dönüşüm miktarı da gözlenmiş ve elde edilen değerler Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Doğalgazın büyük bir kısmını metan oluşturduğu için yalnızca metanın değişimi verilmiştir.



Şekil 4.25 Metanın farklı su-karbon oranları için dönüşüm oranları

4.2.3.2 Yakıt dönüştürücü işlemleri

Elde edilen değerler ve diğer sistemlerle uygun olması için yakıt dönüştürücüye giriş özelliği olarak 2.8 H₂O/C alınmıştır. Yapılan hesaplar sonucunda yakıt dönüştürücü çıkış değerleri Çizelge 4.17’de listelenmiştir.

Çizelge 4.17 Yakıt dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları

Gaz	Giriş Molü	Çıkış molü
H ₂	0	3.9185
CO	0	0.7017
CO ₂	0	0.5183
CH ₄	0.82	0.0399
H ₂ O	3.528	1.7896
C ₂ H ₆	0.12	0
C ₃ H ₈	0.04	0
C ₄ H ₁₀	0.02	0

Yakıt dönüştürücü çıkışında elde edilen sıcaklık sistemin giriş ve çıkış değerleri aynı olduğu için 700 °C ve toplam mol sayısı $n = 6.9697$ kmoldür. Reaksiyon endotermik olduğundan reaksiyonun oluşması için enerjiye gereksinim duymaktadır. Gerekli enerji 237927.33352 kJ'dür.

Bu enerji anot gazlarından ve yanma odasından elde edilen yanma gazlarından karşılanacaktır. Yakıt dönüştürücüye enerjiyi iki ayrı sistemden sağlandığı için iki kademeeli bir ısı değişimi düşünülmüştür. İlk kademede anot gazlarından sağlanan ısı kullanılacak, ikinci adımda ise yanma odası çıkışındaki gazlar kullanılacaktır. Bu iki enerji kaynağı ile ilgili hesaplar düğüm noktalarının ısı hesapları bölümünde verilmiştir. Yakıt dönüştürücü hesaplarının ardından yakıt pili ve ısı hesaplarına geçilmiştir.

4.2.3.3 Düğüm noktalarının ısı hesapları

Sistemin genel akış şeması Ek Şekil 3’de verilmiştir. Şema üzerinde her nokta numaralandırılmıştır. Bütün noktaların özellikleri hesaplanmış ve ayrıca ilgili çizelgelerde özetlenmiştir.

Yakıt dönüştürücüye kadar olan hesaplar ototermal yakıt dönüştürücülü sistemle aynı olduğu için tekrar yapılmamış o sistemde elde edilen sonuçlar burada da kullanılmıştır.

4.2.3.4 Yakıt hücresi hesapları

Pilde yakıt olarak kullanılan gazlar H_2 , CH_4 ve CO ’dur. Pilde H_2 ve CO ’in % 85’i, CH_4 ’ün ise % 15’nin reaksiyona girdiği kabul edilmiştir. Pilde gerçekleşen reaksiyon için % 50 fazla hava verilmiştir.

H_2 ve CO ’in % 85’i

$$H_2 \rightarrow 3.9185 * 0.85 = 3.3307 \text{ kmol}$$

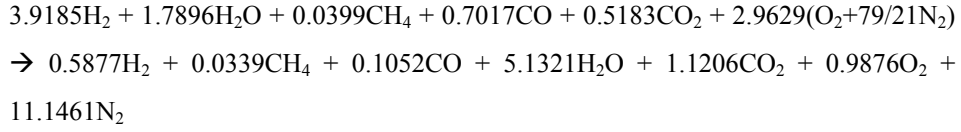
$$CO \rightarrow 0.7017 * 0.85 = 0.5964 \text{ kmol}$$

CH_4 ’ün % 15’i

$$CH_4 \rightarrow 0.0399 * 0.15 = 0.0059 \text{ kmol}$$

Yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyon denklem 3.4 ile verilmiştir.

Denklem 3.4



Hesaplar sonucunda sistemde oluşan reaksiyonun entalpisi, elde edilen gerilim değeri ve pil verimi Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18 Hesaplar sonucunda elde edilen pil özet değerleri

Reaksiyon Entalpisi	Gerilim	Verim
-1052106.3348 KJ/kmol yakıt	1.1133 V	0.806

Anot çıkışı (7 noktası)

0.5877 kmol H₂

5.1321 kmol H₂O

0.1052 kmol CO

1.1206 kmol CO₂

0.0339 kmol CH₄

Toplam mol sayısı n= 6.9795 kmol

Anot gazları yakıt dönüştürücüde sistemin sabit sıcaklıkta tutulmasını sağlamak için kullanılacaktır. Gazların sıcaklıklarının 900°C 'den 720°C 'e kadar düşürülemsi planlanmaktadır. Gazların 900°C 'de entalpileri $43172.5303 \text{ kJ/kmol}$ ve 720°C 'de entalpileri $35356.9541 \text{ kJ/kmol}$ 'dür. Bu durumda yakıt dönüştürücüye aktarılan toplam enerji;

$$6.9795 \times (43172.5303 - 35356.9541) = 238271.9568 \text{ kJ'dür.}$$

Katot çıkışı (20 noktası)

$$0.9876 \text{ kmol O}_2$$

$$11.1461 \text{ kmol N}_2$$

$$n = 12.1337 \text{ kmol}$$

$$h = 36001.0341 \text{ kJ/kmol}$$

$$H = 436825.7475 \text{ kJ}$$

Çizelge 4.19 Pil kısmını oluşturan noktaların hesap sonuçları.

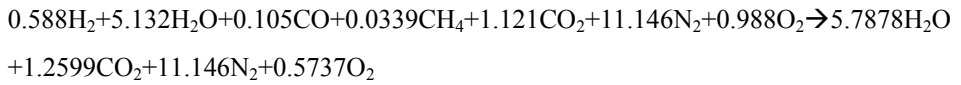
Düğüm Noktası	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (Mol sayısı)	H (Entalpi)
Anot çıkışı (7 noktası)	825.9 °C	39908.5944 kJ/kmol	6.9795 kmol	278542.0351 kJ
Anot çıkışı (8 noktası)	0.5877 kmol H ₂ 5.1321 kmol H ₂ O 0.1052 kmol CO 1.1206 kmol CO ₂ 0.0339 kmol CH ₄	35356.9541 kJ/kmol	6.9795 kmol	246773.8611 kJ
Katot çıkışı (20 noktası)	0.9876 kmol O ₂ 11.1461 kmol N ₂	36001.0341 kJ/kmol	12.1337 kmol	436825.7475 kJ
Fan çıkışı (17 noktası)	2.9629 kmol O ₂ 11.1461 kmol N ₂	8671.7300 kJ/kmol	14.109 kmol	122349.4386 kJ

Yanma odası hesabı

Yakıt dönüştürücünün istenilen şekilde çalışabilmesi için sürekli 700⁰C’de tutulması gerekmektedir. Bunun için sisteme enerji vermek gerekmektedir. Bunun için iki kademeli bir sistem düşünülmüştür. Birinci kademede yakıt pilinin anodundan çıkan gazlar kullanılacaktır. Ancak anot gazları sistemi 700⁰C’de tutmaya yetmemektedir. Enerji gereksinimi için yakıtın ilk ısıtmasını yapan anot gazları ile pile gidecek havayı ısıtan pilin katodundan çıkan gaz karışımı bir yanma odasında yakılarak enerji elde edilmiştir.

Pilin anot çıkışındaki toplam 5.9795 kmol gaz son olarak 600⁰C’de, katot gazları ise toplam 12.1337 kmol ve 7152.4⁰C’de yanma odasına girmiştir. Yanma odasında oluşan reaksiyon denklem 3.5 ile verilmiştir.

Denklem 3.5



Reaksiyon sonucunda oluşan toplam mol sayısı 18.76 kmoldür ve yanma gazları 979⁰C sıcaklıktadır. Oluşan yanma gazları, yakıt dönüştürücüde reaksiyonun sabit sıcaklıkta oluşması için kullanılacaktır ve sıcaklığı 979⁰C’den 720⁰C’e kadar düşmesi planlanmıştır. 979⁰C’de yanma gazlarının entalpileri 42336.9440 kJ/kmol ve 720⁰C’de 32543.5995 kJ/kmol’dür. Bu durumda yanma odasından çıkan gazlardan yakıt dönüştürücüye aktarılabacak toplam enerji;

$$18.76 \times (42336.9440 - 32543.5995)$$

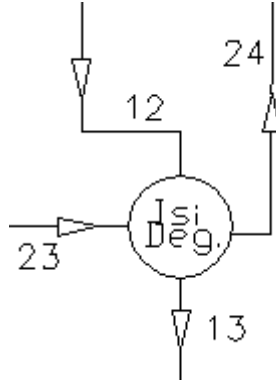
$$= 183723.1428 \text{ kJ olarak hesaplanmıştır.}$$

4.2.3.5 Sistemde kullanılan ısı değıştircilerinin hesapları

12-13, 23-24 Isı Değıştircisi

Bu bölümde suyun yakıt dönüştürücüye girmeden önce 700⁰C’e kadar ısıtıldığı ısı değıştircisinin hesabı verilmiştir. Isı değıştircisinin

genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Su, bir önceki ısı değiştirici ile 95°C ’e ısıtıldığı kabul edilmiştir. Suyu ısıtmak için yanma odasından çıkan gaz karışımı kullanılmıştır. Gaz karışımının sıcaklığı 720°C ’dir.



Şekil 4.26 Suyun yakıt dönüştürücüye girmeden önce ısıtıldığı son ısı değiştiricinin akış şeması

$$H_{12} - H_{13} = H_{24} - H_{23}$$

$$3.528 \times (h_{12} - h_{13}) = 18.76 \times (h_{24} - h_{23})$$

$$3.528 \times (34799.2231 - 7163.64) = 18.76 \times (32543.5995 - h_{23})$$

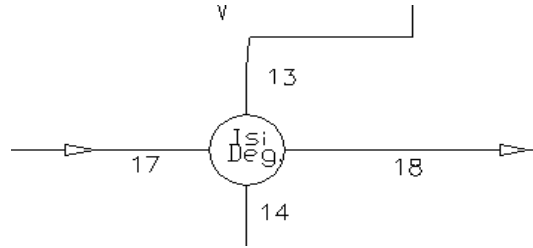
$$h_{23} = 27346.4599 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{23} = 576.4^{\circ}\text{C}$$

Gaz karışımı suyu ısıtıktan sonra yakıt piline gidecek havayı ısıtacaktır.

13-14, 17-18 Isı Değiştiricisi

Bu bölümde yakıt piline gidecek havanın yanma odasından çıkan gaz karışımı ile ilk ısıtıldığı ısı değiştiricinin hesabı verilmiştir. Isı değiştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Hava sisteme 25⁰C ‘de girmiş ve ilk olarak bu ısı değiştiricide ısıtılmıştır. Hava ısı değiştirici ile 570⁰C’e kadar ısıtılacaktır.



Şekil 4.27 Yakıt piline gidecek havanın ilk ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması

$$H_{13} - H_{14} = H_{18} - H_{17}$$

$$18.76 \times (27346.4599 - h_{14}) = 14.109 (25263.6760 - 8671.173)$$

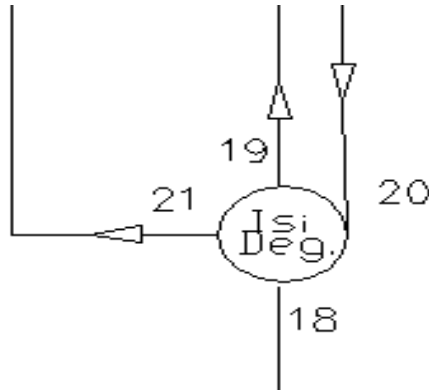
$$H_{14} = 14868.0075 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{14} = 207.8^{\circ}\text{C}$$

Yanma odası çıkışındaki gaz karışı havayı ısıtıttıktan sonra yakıtın ilk ısıtmasını yapacaktır.

20-21, 18-19 Isı değıştiricisi

Hava bu ısı değıştirici ile 700°C 'e ısıtılarak yakıt pilene gönderilecektir. Isı değıştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Bu işlem için katot gazları kullanılmaktadır. Katot gazlarının mol sayısı 14.109 kmol ve sıcaklığı 900°C 'dir. Hava bir önceki ısı değıştirici ile 570°C 'e ısıtılmıştır.



Şekil 4.28 Havanın pile girmeden önce ısıtıldığı ısı değıştiricinin akış şeması

$$H_{20} - H_{21} = H_{19} - H_{18}$$

$$12.1337 \times (36001.0341 - h_{21}) = 14.109 \times (29503.0810 - 25263.6760)$$

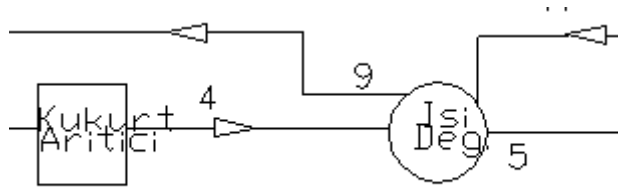
$$h_{21}=31071.4771 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{21}=752.4^{\circ}\text{C}$$

Katot gazları havayı ısıttıktan sonra 752.4°C 'de yanma odasına girecektir.

8-9, 5-4 Isı değıştiricisi

Anot gazları 720°C 'de yakıt dönüştürücüden çıktıktan sonra yakıtın, dönüştürücüye girmeden önce 700°C 'e ısıtılması için kullanılacaktır. Isı değıştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Yakıt bir önceki ısı değıştirici ile 400°C 'e ısıtılmıştır.



Şekil 4.29 Yakıtın dönüştürücüye girmeden önce ısıtıldığı son ısı değıştiricinin akış şeması

$$H_8 - H_9 = H_5 - H_4$$

$$6.9795 \times (35356.9541 - h_9) = 1 \times (42925.0986 - 20144.4584)$$

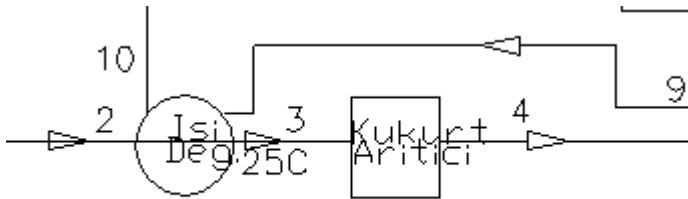
$$h_9 = 32093.0182 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_9 = 642.3^\circ\text{C}$$

Anot gazları 642.3°C 'de ısı değiştiriciden çıktıktan sonra yakıtın ilk ısıtmasını yapmak için kükürt arıtıcı öncesindeki ısı değiştiriciye girecektir.

9-10, 3-2 Isı değiştiricisi

Anot gazları son olarak yakıtın ilk ısıtmasını yaptıktan sonra yanma odasına gidecektir. Isı değiştiricinin genel sistem şemasındaki yeri Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Anot gazlarının yanma odasına 600°C 'de girmesi düşünülmüştür.



Şekil 4.30 Yakıtın ilk ısıtma yapılan ısı değiştiricinin akış şeması

94

$$H_9 - H_{10} = H_3 - H_2$$

$$6.9795 \times (32093.0182 - 30358.7174) = 1 \times (20144.4584 - h_2)$$

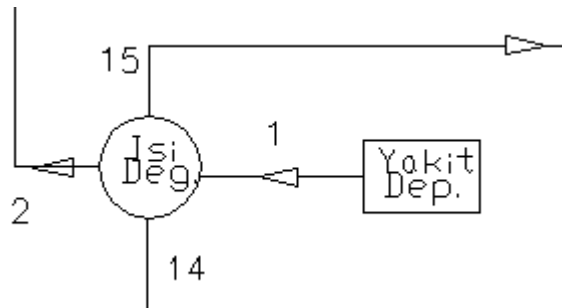
$$h_2 = 8039.9060 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_2 = 198.3^\circ\text{C}$$

Yakıt bu ısı değıştirici ile 198.3°C sıcaklığa ısıtılmıştır.

2-1, 14-15 Isı değıştiricisi

Yanma odasından çıkan gaz karışımı pile gidecek havayı ısıttıktan sonra 207.8°C 'de yakıtın ön ısıtmasını yapacaktır. Yakıt ise 25°C 'den 198.3°C 'e ısıtılacaktır. Bu ısı değıştirici ile ilgili sistem şeması Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31 Yakıtı ön ısıtma yapılan ısı değıştiricinin akış şeması

$$H_2 - H_1 = H_{14} - H_{15}$$

$$18.76 \times (14868.0075 - h_1) = 1 \times (8039.9060 - 1.6783)$$

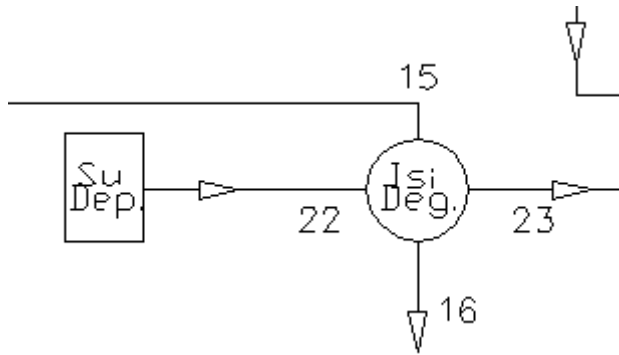
$$h_1 = 14439.3516 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_1 = 194.5^\circ\text{C}$$

Gaz karışımı ısı değiştiriciyi 194.5°C 'de terk ederek suyun ön ısıtmasını yapacaktır.

23-22,16-15 Isı değiştiricisi

Su, bu ısı değiştirici ile 25°C 'den 95°C 'e ısıtılacaktır. Bu işlem için yanma odası gazları kullanılacaktır. Gaz karışımının son sıcaklığı 194.5°C 'dir.



Şekil 4.32 Suyun ön ısıtıldığı ısı değiştiricinin akış şeması

$$H_{23} - H_{22} = H_{16} - H_{15}$$

$$3.528 \times (34799.2231 - 7163.64) = 18.76 \times (32543.5995 - h_{15})$$

$$h_{15} = 27346.4599 \text{ kJ/kmol}$$

$$T_{15} = 576.4^\circ\text{C}$$

Çizelge 4.20 Isı değıştirici çıkışındaki noktarın hesap sonuçları.

Düğüm Noktası	Açıklama	h (Birim entalpi)	n (mol sayısı)	H (Entalpi)
Anot çıkışı (9 noktası)	642.3 °C	32093.0182 kJ/kmol	6.9795 kmol	223993.2205 kJ
Yakıt piline gidecek olan hava (19 noktası)	2.9629 kmol O ₂ 11.1461 kmol N ₂	29503.0810 kJ/kmol	14.109 kmol	416258.9698 kJ
Katot çıkışı (21 noktası)	Katot çıkışındaki karışım yanma odasına 752.4 °C sıcaklığında girmiştir.	31071.4771 kJ/kmol	12.1337 kmol	377011.9817 kJ
Anot çıkışı (10 noktası)	Anot çıkışındaki karışım yanma odasına 600 °C sıcaklığında girmiştir.	30358.7174 kJ/kmol	6.9795 kmol	211888.6681 kJ

Sonuç

Çalışmanın bu kısmında üç farklı yakıt dönüştürücünün katı oksitli yakıt pili sistemlerindeki davranışları ve etkileri incelenmiştir. Buharlı yakıt dönüştürücülü sistemde 1 kmol yakıttan elde edilen hidrojen miktarı 1.2881 kmol, ototermal yakıt dönüştürücülü sistemden elde edilen hidrojen miktarı 3.2376 kmoldür. Öte yandan ısı değıştircisi ile entegre yakıt dönüştürücülü sistemden elde edilen hidrojen miktarı ise 3.9185 kmoldür. Sırasıyla elde edilen gerilim değeri ise 0.729, 0.9688 ve 1.1133 V'dur. Çizelge 4.21'den de görüleceğı gibi en uygun sistem ısı değıştircisi ile entegre yakıt dönüştürücülü sistemdir. Bundan sonraki bölümde ısı değıştircisi ile entegre yakıt dönüştürücü sistemin ısı tasarımı yapılacaktır.

Çizelge 4.21 Sistem performanslarının karşılaştırılması.

	H ₂ miktarı	Reaksiyon entalpisi	Gerilim	Verim
ATR içeren sistem	3.2376	-814555.7780 KJ/kmol yakıt	0.9688V	0.739
Buharlı yak. dönüş. içeren sistem	1.2881	-380386.0205 KJ/kmol yakıt	0.729 V	0.811
Isı değıştircisi ile entegre yak. dön. içeren sistem	3.9185	-1052106.3348 KJ/kmol yakıt	1.1133 V	0.806

5. ISI DEĞİŞTİRİCİSİ İLE ENTEGRE BUHARLI YAKIT DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN MODELLENMESİ

5.1 Sistem Parametreleri ve Kabuller

Bu bölümde ısı değiştirici ile entegre yakıt dönüştürücünün modellenmesi yapılacaktır. Öncelikle yakıt dönüştürücüde oluşan kimyasal reaksiyonlar modellenenecektir. Daha sonra reaksiyonlar ile ısı transferi entegre olarak çözülecektir. Reaksiyon modellenmesi Comsol 3.3 analiz programı ile yapılmıştır. Reaksiyon modellenmesinden sonra Java programlama dili ile sistemde oluşan ısı transferi ve reaksiyonlar biraraya getirilmiştir.

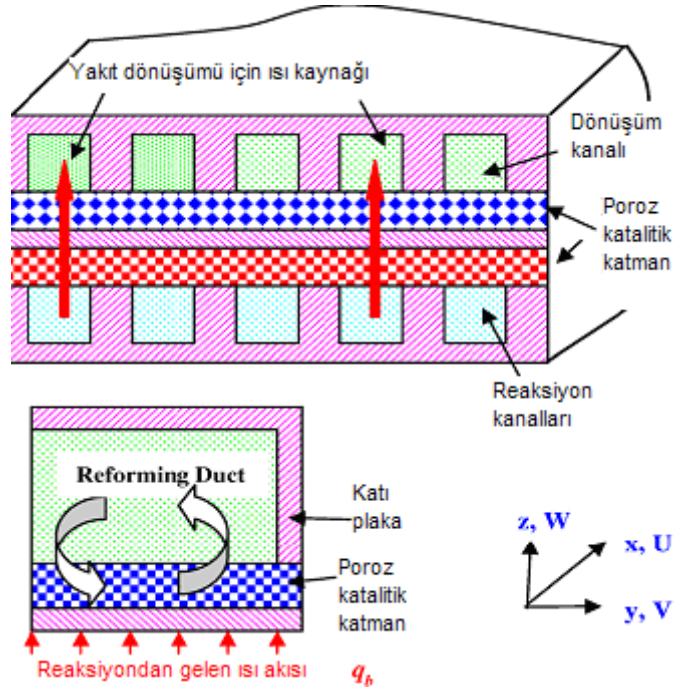
Kabuller:

- Sistem basıncı. 101.3 Kpa.
- Yakıt dönüşümü 700 °C sabit sıcaklıkta gerçekleşmektedir.
- İşlemler sadece metan için yapılmıştır. (Sadece Comsol programı için) Bilgisayar programında bütün bilşenler dikkate alınarak işlem yapılmıştır.
- Metan ve su buharı hariç diğer gazların(hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit) mol sayıları girişte sıfırdır.

5.2 Sistem Modeli

Yakıt dönüştürücü doğalgazın suyla reaksiyona girerek hidrojene dönüştüğü sistemlerdir. Bu çalışmada yakıt dönüştürücü olarak ısı değiştiricisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücüsü kullanılacaktır. Bu sistemin en önemli özelliği yüksek verimli olmasıdır. Aynı şartlarda 1 kmol doğalgazdan buharlı yakıt dönüştürücü ile elde edilen hidrojen miktarı 1.2881 kmol ve ototermal yakıt dönüştürücü ile elde edilen hidrojen miktarı 3.2376 kmoldür. Isı değiştiricisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücüsünden elde edilen hidrojen miktarı ise 3.9185 kmoldür. Buharlı yakıt dönüştürücüye göre % 205, ototermal yakıt dönüştürücüye göre ise % 21 daha verimli görünmektedir. Ancak yapısı karmaşık ve modellemesi zordur.

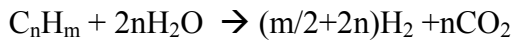
Bu tür yakıt dönüştürücülerinin genel şeması Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistemin bir tarafındaki kanallardan dönüştürülecek gazlar geçerken diğer taraftaki kanallardan sisteme ısı verilmektedir. Bu sayede kimyasal reaksiyonlar için gerekli olan enerji elde edilir ve reaksiyonlar sabit sıcaklıkta meydana gelir. Bu işlem sistemin verimini arttırmaktadır.



Şekil 5.1 Isı değiştiricisi ile entegre yakıt dönüştürücüsü genel şeması (Jinliang , 2006)

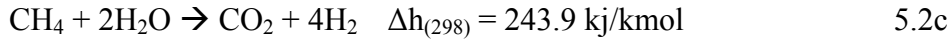
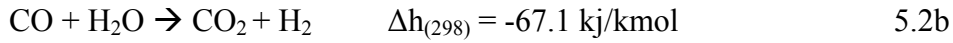
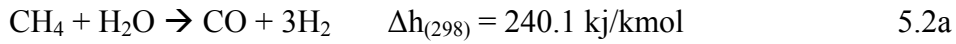
Bu çalışmada ısı kaynağı olarak anot ve yanma odası çıkışındaki gaz karışımı kullanılmıştır. Buradaki şekle benzetilecek olursa reaksiyonlara ısı kaynağı görevi gören alttaki kanallardan anot ve yanma odası çıkışındaki gaz karışımı geçmekte ve karışım, ısınıp reaksiyonun olduğu üstteki kanallara devretmektedir. Burada oluşan ısı transferi de ayrıca incelenmiştir.

Sistemde gerçekleşen reaksiyon genel biçimde denklem 5.1 ile ifade edilebilir:



5.1

Buharlı yakıt dönüşümü işlemi genel olarak hidrokarbonların suyla reaksiyona girerek hidrojene ve karbondioksite dönüşmesidir. Doğalgazın içinde büyük miktarda metan olduğundan bu çalışmanın Comsol analiz programında çözümlenmesinde sadece metan için hesaplamalar yapılmıştır. Metanın dönüşümü ise 5.2 denklem takımı ile ifade edilmiştir. (Jinliang, 2006)



Dördüncü bölümde yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen yakıt dönüştürücü çıkışları Çizelge 5.1’de tekrar verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında bu değerlere yakın sonuçların çıkması beklenmiştir.

Çizelge 5.1 Yakıt dönüştürücüden çıkan gazların mol sayıları.

Gaz	Giriş Molü	Çıkış molü
H ₂	0	3.9185
CO	0	0.7017
CO ₂	0	0.5183
CH ₄	0.82	0.0399
H ₂ O	3.528	1.7896

5.3 Kimyasal reaksiyonların Comsol 3.3 analiz programı için matematiksel modelinin oluşturulması ve programda çözülmesi

Sistemde oluşan reaksiyonların modellenebilmesi için programa giriş gazlarının derişimleri ve reaksiyon sabitleri verilmiştir. Derişimlerin hesaplanması bir sonraki bölümde verilecektir. Bu bölümde gerekli katsayıların hesaplanması ve temel denklemlerin oluşturulması anlatılacaktır.

Reaksiyonda var olan gazların ısı kapasiteleri ve diğer özelliklerinin program tarafından bulunabilmesi için gerekli değerler aşağıda verilmiştir.

Isıl kapasitelerin hesabı için NASA'nın önerdiği denklem 5.3 kullanılmıştır. Denklemden kullanılan katsayılar ise Çizelge 5.2'de verilmiştir. C_p ile gazların ısıl kapasiteleri (J/kg.K), R_g ile ideal gaz sabiti (J/mol.K), M ile de molar kütle (kg/mol) ifade edilmiştir. (Comsol, 2006)

$$C_p = \frac{R_g}{M} (a_1 + a_2 \times T + a_3 \times T^2 + a_4 \times T^3 + a_5 \times T^4) \quad 5.3$$

Her gazın C_p değerleri bulunduğundan sonra gaz karışımının C_p değeri bulunur. Bu işlem denklem 5.4 ile verilmiştir. W_i ile ifade edilen karışımda bulunan her gazın mol oranlarıdır. (Comsol, 2006)

$$C_p = \sum_i w_i C_{p,i} \quad 5.4$$

Çizelge 5.2 Isıl kapasitelerin bulunması için programda kullanılan katsayılar.

Katsayı	CH ₄	H ₂ O	H ₂	CO	CO ₂
$a_{low,1}$	7.4851e-2	3.0339	3.3372	2.7151	3.8574
$a_{low,2}$	1.3390e-2	2.1769e-3	-4.9402e-5	2.0625e-3	4.4143e-3
$a_{low,3}$	-5.7328e-6	-1.6407e-7	4.9945e-7	-9.9882e-7	-2.2148e-6
$a_{low,4}$	1.2229e-9	-9.7041e 11	-1.7956e-10	2.3005e-10	5.2349e-10
$a_{low,5}$	-1.0181e-13	1.6820e-14	2.0025e-14	-2.0364e-14	-4.7208e-14
$a_{low,6}$	-9.4683e3	-3.0004e4	-9.5015e2	-1.4151e4	-4.8759e4
$a_{low,7}$	1.8437e1	4.9667	3.2050	7.8186	2.2716
$a_{high,1}$	7.4851e-2	4.1986	2.3443	3.5795	2.3567
$a_{high,1}$	1.3390e-2	-2.0364e-3	7.9805e-3	-6.1035e-4	8.9845e-3
$a_{high,3}$	-5.7328e-6	6.5204e-6	-1.9478e-5	1.0168e-6	-7.1235e-6
$a_{high,4}$	1.2229e-9	-5.4879e-9	2.0157e-8	9.0700e-10	2.4591e-9
$a_{high,5}$	-1.0181e-13	1.7719e-12	-7.3761e-12	-9.0442e-13	-1.4369e-13
$a_{high,6}$	-9.4683e3	-3.0293e4	-9.1793e2	-1.4344e4	-4.8371e4
$a_{high,7}$	1.8437e1	-8.4903e-1	6.8301e-1	3.5084	9.9010

Her gazın ısı kapasiteleri bulunduktan sonra ısı iletim katsayıları bulunacaktır. Isı iletim katsayılarının bulunması için denklem 5.5 kullanılmıştır. Bu denklmede η ile dinamik viskozite (N.s/m²) gösterilmiştir. (Comsol, 2006)

$$k = \eta(1.15 C_p + 0.88 \frac{R_g}{M}) \quad 5.5$$

Dinamik viskozitenin hesabı için denklem 5.6 kullanılmıştır. Bu denklemde Ω_v ile kollizyon integrali ifade edilmiştir. (Comsol, 2006)

$$\eta_i = 2.669 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{T(M_i \cdot 10^3)}}{\sigma_i^2 \Omega_v} \quad 5.6$$

Her gazın iletim katsayıları bulunduğundan sonra gaz karışımının iletim katsayısına geçilmiştir. Bu işlem için denklem 5.7 kullanılmıştır. Denklemde x_i ile gazların mol oranları verilmiştir. (Comsol, 2006)

$$k = \frac{1}{2} \left[\sum_i x_i k_i + \left(\sum_i \frac{x_i}{k_i} \right)^{-1} \right] \quad 5.7$$

Sıcaklığa bağlı olarak her gazın entalpisi ise denklem 5.8 ile verilmiştir. (Comsol, 2006)

$$h_i = \frac{R_g}{M_i} (a_{1i} T + \frac{a_{2i}}{2} T^2 + \frac{a_{3i}}{3} T^3 + \frac{a_{4i}}{4} T^4 + \frac{a_{5i}}{5} T^5 + a_{6i}) \quad 5.8$$

Gazların her biri için yapılan hesaplardan sonra reaksiyonlar için yapılan hesaplara geçilmiştir.

Yakıt dönüştürücüde oluşan kimyasal reaksiyonların k katsayılarını bulurken 5.9 denklemi kullanılmıştır. Denklemden kullanılan değerler her reaksiyon için Çizelge 5.3’de verilmiştir. (Comsol, 2006)

$$k = A.T^n \exp\left(-\frac{E}{R.T}\right) \quad 5.9$$

Çizelge 5.3 Reaksiyonlar için kimyasal parametreler. (Jinliang, 2006)

Reaksiyon	A Katsayısı	E (Aktivasyon enerjisi) kj/kmol
1	1.955×10^6	240.1
2	1.02×10^{15}	67.1
3	4.225×10^{15}	243.9

K katsayılarının elde edilmesinden sonra reaksiyon hızları bulunmuştur. Reaksiyon hızları denklem 5.10 ile ifade edilmiştir. Denklemden c_i gazların konsantrasyonlarını (mol/m^3) ifade etmektedir. İleri ve geri doğru reaksiyon hız sabitleri ise sırasıyla k^f ve k^r ile simgelenmektedir. (Comsol, 2006)

$$r_j = k_j^f \prod_{i \in \text{giren}} c_i^{-v_{i,j}} - k_j^r \prod_{i \in \text{çıkta}} c_i^{v_{i,j}} \quad 5.10$$

Yakıt dönüştürücüdeki reaksiyonlar ileri yönde reaksiyonlar oldukları için denklem 5.10'nin ikinci kısmı atılmıştır. Oluşan yeni ifade denklem 5.11'de verilmiştir. (Comsol, 2006)

$$r_j = k_j^f \prod_{i \in \text{giren}} c_i^{-v_{i,j}} \quad 5.11$$

Her reaksiyon için hesaplanacak hızlar ise 5.12 denklem takımı ile gösterilmiştir. (Comsol, 2006)

$$r_1 = k_1 * C_{CH_4} * C_{H_2O} \quad 5.12 \text{ a}$$

$$r_2 = k_2 * C_{H_2O} * C_{CO} \quad 5.12 \text{ b}$$

$$r_3 = k_3 * C_{CH_4} * (C_{H_2O})^2 \quad 5.12 \text{ c}$$

Elde edilen k katsayısı ve reaksiyon hızları ile birlikte program reaksiyon entalpilerini ve reaksiyon ısılarını bulmaktadır. Reaksiyon entalpileri 5.13 denklem takımı ile ifade edilmiştir. (Comsol, 2006)

$$\text{Reaksiyon 1-} \quad h_1 = 3 * h_{H_2} + h_{CO} - h_{CH_4} - h_{H_2O} \quad 5.13 \text{ a}$$

$$\text{Reaksiyon 2-} \quad h_2 = h_{CO_2} + h_{H_2} - h_{CO} - h_{H_2O} \quad 5.13 \text{ b}$$

$$\text{Reaksiyon 3-} \quad h_3 = h_{CO_2} + 4h_{H_2} - h_{CH_4} - 2h_{H_2O} \quad 5.13 \text{ c}$$

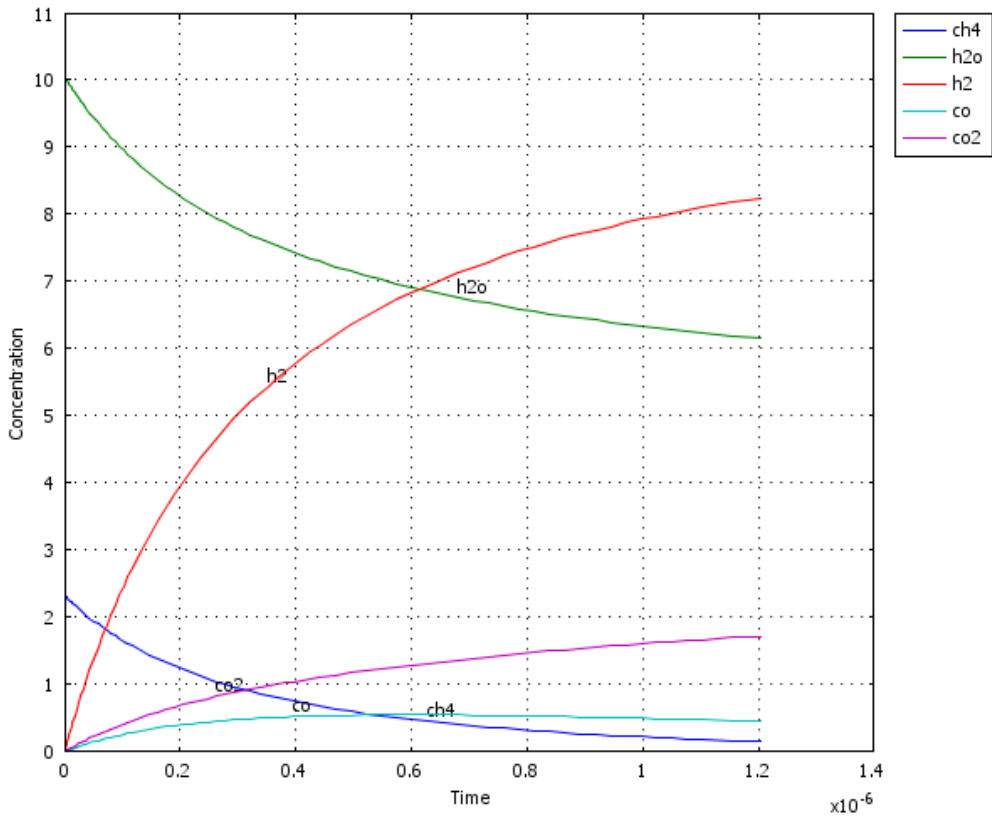
Reaksiyon ısıları ise 5.14 denklem takımı ile gösterilmiştir.

Reaksiyon 1- $q_1 = -h_1 \cdot r_1$ 5.14 a

Reaksiyon 2- $q_2 = -h_2 \cdot r_2$ 5.14 b

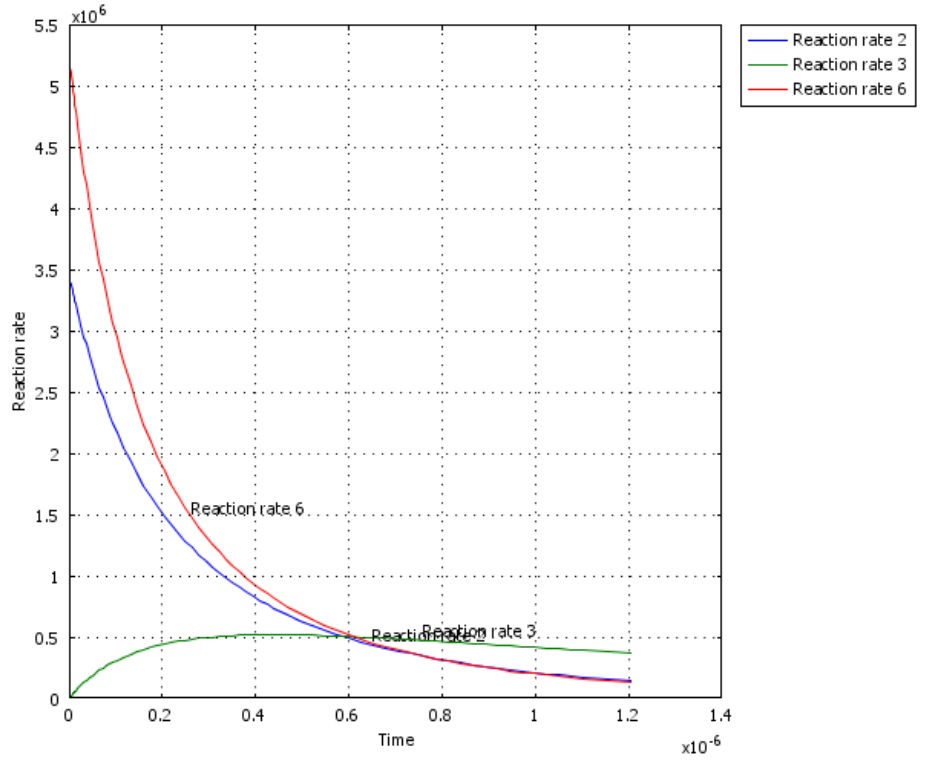
Reaksiyon 3- $q_3 = -h_3 \cdot r_3$ 5.14 c

Comsol analiz programında 700°C sıcaklık ve 1 bar basınçta reaksiyonlar çözdürülmüştür. Yapılan hesaplar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.2 ve 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Zamana göre reaksiyon gazlarının derişimlerinin değışimi.

Şekil 5.2'den de görüldüğü gibi reaksiyonlar çok kısa bir süre içinde dengeye ulaşmaktadırlar. Bu durumda reaksiyonlar hep dengedeymiş gibi kabul edilip sistem tasarımı yapılabilir. Bir sonraki bölümde bu kabul ile birlikte birim kmol yakıt için ısı değıştiricisi ile entegre bir yakıt dönüştürücünün ısı tasarımı yapılmıştır. Şekil 5.3 ile de reaksiyon hızlarının zamana göre değışimi verilmiştir.

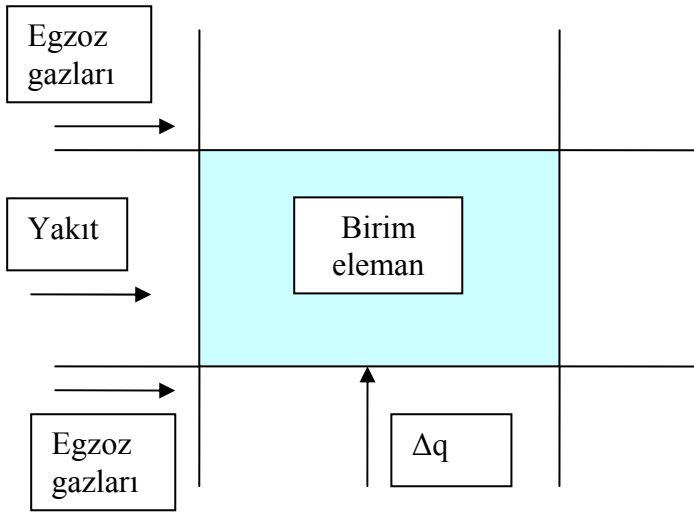


Şekil 5.3 Zamana göre reaksiyon hızlarının değışimi.

5.4 Java programlama dilinde sistemin oluşturulması ve çözülmesi

Yakıt dönüştürücü iki borulu bir ısı değiştirici olarak düşünülmüştür. İç boruda yakıt akarken dış boru ile iç boru arasında egzoz gazları akmaktadır. Yakıt dönüştürücünün hesabı yapılırken model çok küçük elemanlara bölünmüş ve her bir elemanın hesabı yaptırılmıştır.

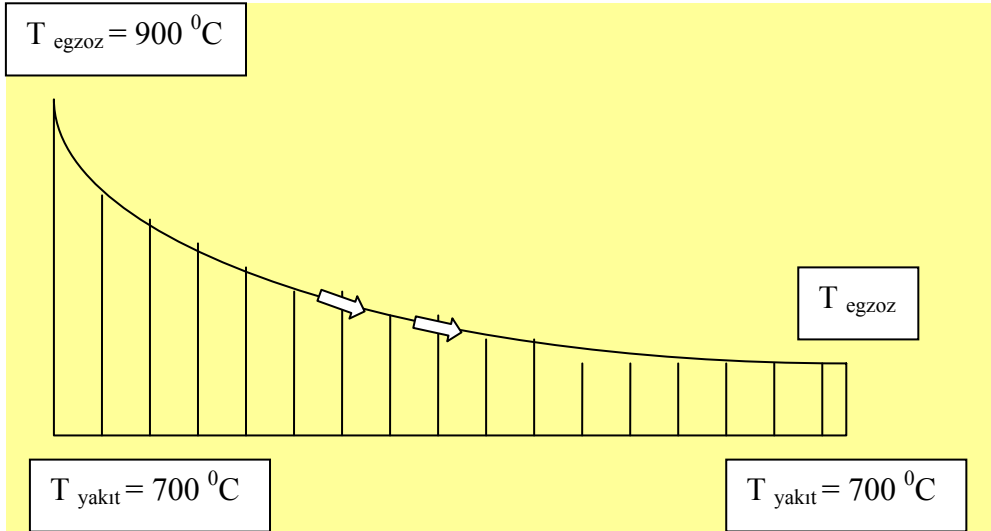
Sistemin daha kolay anlaşılabilmesi için Şekil 5.4'deki model incelenebilir. Şekilde birim elemanın çevresinden egzoz gazları geçmekte ve bir ısı transferi oluşmaktadır. Öte yandan birim elemana yakıt buhar karışımı girmekte ve elemanın içinde kimyasal reaksiyon oluşmaktadır. Çalışmanın bu kısmında bu olay incelenmiştir.



Şekil 5.4 Birim eleman üzerindeki akış.

Isı değiştirici ile entegre yakıt dönüştürücü tasarımı yapılırken iki kademeli bir sistem düşünülmüştür. Birinci kademede yakıt pilinin anodundan çıkan gaz karışımı dönüştürücüde reaksiyonun sabit sıcaklıkta oluşması için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. İkinci kademede ise yanma odasından çıkan gaz karışımı ihtiyaç duyulan enerjinin geri kalan kısmını sağlamaktadır.

Egzoz gazları yakıt pilinden 900°C sıcaklıkta çıkmaktadırlar. Bu sıcaklıkta yakıt dönüştürücüye girdikleri kabul edilmiştir. Yakıt buhar karışımı ise dönüştürücüye 700°C sıcaklıkta girmektedirler. Burada 900°C sıcaklıktaki anot gazları ile 700°C sıcaklıktaki yakıt buhar karışımı arasında bir ısı transferi oluşmaktadır. Bu sistem ile ilgili sıcaklık düşümü şekil 5.5’de verilmiştir. Gerçekleşen ısı transferi kimyasal reaksiyonların oluşmasında kullanılan enerjidir. Yani, yakıt dönüştürücüde ısı transferi ile aynı anda kimyasal reaksiyon oluşmaktadır.



şekil 5.5 Isı değiştiricideki sıcaklık dağılımı.

İkinci kademedede ise yanma odası çıkışındaki 979⁰C deki gaz karışımı kullanılacaktır. Anot çıkışındaki karışımın enerjisi yakıt dönüştürücüde reaksiyonların gerçekleşmesi için yeterli olmadığı için sisteme ilave bir yanma odası konulmuş ve yakıt dönüştürücüye ek enerji sağlanmıştır.

Anot gazları yakıt dönüştürücüye 900⁰C’de girmiş ve 720⁰C’de çıkmıştır. Anot gazlarından sisteme verilen enerji;

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{anot}} &= n \times (h_{900} - h_{720}) \\ &= 6.9795 \times (43172.5303 - 35356.9541) \\ &= 54548.8140 \text{ Kj'dür.}\end{aligned}$$

Yanma odası çıkışındaki gaz karışımının yakıt dönüştürücüye giriş sıcaklığı 979⁰C ve çıkış sıcaklığı 720⁰C’dir. Yakıt dönüştürücüye aktarılan enerji;

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{yn. odası}} &= n \times (h_{979} - h_{720}) \\ &= 18.76 \times (42336.9440 - 32543.5995) \\ &= 183723.1428 \text{ Kj'dür.}\end{aligned}$$

Egsoz gazlarından yakıt dönüştürücüye aktarılan toplam enerji;

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{toplam}} &= \Delta H_{\text{anot}} + \Delta H_{\text{yn. odası}} \\ &= 54548.8140 + 183723.1428\end{aligned}$$

$$= 238271.9568 \text{ Kj'dür.}$$

Reaksiyonların oluşması için gerekli enerji bölüm 4.2.3.2’de verildiği gibi 237927.33352 kj’dür.

5.4.1 Isı transfer modelinin çıkarılması

Yakıt dönüştürücü daha öncede bahsedildiği gibi iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde yakıt reaksiyonu için gerekli enerji anot gazlarından sağlanmaktadır. İkinci bölümde ise enerji yanma odası gazlarından sağlanmaktadır.

Yakıt dönüştürücüye ilk olarak anot gazları girecektir. Anot gazları, yakıtın belli bir kısmını dönüştürmek için gerekli enerjiyi aktardıktan sonra 720°C ’de dönüştürücüyü terk etmektedir. Daha sonraki adımda ise yanma odası çıkışında elde edilen gazlar girecektir. Yanma odası gazları dönüştürücüye 979°C ’de girip 720°C ’de çıkmaktadırlar.

Kimyasal reaksiyonların dönüşümü için gibbs.java programından yararlanılmıştır. Gibbs.java programına yakıtı oluşturan gazların isimleri, mol miktarları, sıcaklıkları, basıncı ve çıkış sıcaklığı verilmektedir. Program bu değerlerle, reaksiyon çıkışındaki gazların mol miktarlarını ve reaksiyon ısını hesaplamaktadır. Gibbs.java programı dengeye ulaşan kimyasal reaksiyonlar için kullanılabilir. Bu yüzden programda, her adımın kendi içinde dengeye ulaştığı kabulü yapılmıştır. Bu sayede küçük adımlar toplanarak gerçek sistem modellenecektir.

Her adımda yakıtın belli bir bölümü dönüşerek bir sonraki adıma geçilmektedir. Bunun için kimyasal reaksiyonların ihtiyaç duyduğu enerji ile egsoz gazlarından aktarılan ısı karşılaştırılmıştır. Reaksiyon ısıları ile aktarılan ısıların oranına göre reaksiyonların oluşum oranları bulunmuştur ve her adımda bu oran kadar yakıt dönüşmüştür. Reaksiyon oluşum oranı olarak adlandırılan bu oran denklem 5.15 ile verilmiştir.

$$x=dq/Q \quad 5.15$$

Denklemden x yakıt dönüşüm oranını dq egsoz gazlarından transfer edilen ısı miktarını, Q ise yakıtı dönüştürücüde gerçekleşen reaksiyonun tam olarak gerçekleştiğinde gereksinim duyduğu ısı miktarını göstermektedir.

Çalışmanın bu kısmında yakıt dönüştürücüde oluşan ilk adımın hesapları verilmiştir.

Dönüştürücüye giren yakıt 3.528 kmol H_2O , 0.82 kmol CH_4 , 0.12 kmol C_2H_6 , 0.04 kmol C_3H_8 ve 0.02 kmol C_4H_{10} 'den oluşmaktadır. Gazların giriş sıcaklıkları 973K (700°C) ve basınç 1 bardır. Reaksiyon sabit sıcaklıkta oluşmaktadır.

Gibbs programıyla sadece dengeye ulaşan reaksiyonların değerleri bulunabildiği için reaksiyon adım adım çözülmüş ve her adımın kendi içinde dengeye ulaştığı kabul edilmiştir. Dengeye ulaşan adımlar toplanarak toplam sistem modeli meydana gelmiştir. Bu yüzden her adımda reaksiyon sonucu oluşan karışımın mol miktarları ve reaksiyon ısıları hesaplanır.

İlk adım için program ile bulunan değerler Çizelge 5.4 ile verilmiştir. Reaksiyon ısısı program tarafından 236289.39 kj olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4 Reaksiyonun ilk adımında gibbs.java programı ile bulunan reaksiyon sonuçları

Gaz	Çıkış molü
CH ₄	0.0483
C ₂ H ₆	9.2669 E-8
C ₃ H ₈	4.9090 E-13
C ₄ H ₁₀	6.0693 E-168
H ₂	3.8871
H ₂ O	1.8040
CO	0.6992
CO ₂	0.5123

Anot gazlarından gelecek ısı transferi de hesaplandıktan sonra reaksiyon oluşum oranı bulunacaktır. İlk adım için bulunan ısı transfer miktarı 16888.58 kj'dür. Bulunan bu değer ilerleyen bölümde ayrıntılı şekilde verilecektir.

Reaksiyon oluşum oranı reaksiyon ısısının transfer edilen ısıya oranıdır. İlk adım için bu oran;

$$x = 16888.58/236289.39$$

$$= 0.0714\text{'dür.}$$

Bu oran her adımda reaksiyonun ne kadar oluştuğunun bir ifadesidir. İlk adım için reaksiyonun 0.0714'ü oluşmuştur. Bu durumda

ilk adımda dengeye ulaşan reaksiyon için bulunan çıkış değerlerinin 0.0714'ü alınarak gerçek reaksiyon çıkışı hesaplanacaktır. Çünkü reaksiyona ancak ihtiyaç duyduğu enerjinin 0.0714'ü verilmiştir. Adım sonunda bulunan değerlerin 0.0714'ü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

CH_4	$= 0.0483 \times 0.0714$	$= 0.0034 \text{ kmol}$
C_2H_6	$= 9.2669 \text{ E-8} \times 0.0714$	$= 0.661 \text{ E-8 kmol}$
C_3H_8	$= 4.9090 \text{ E-13} \times 0.0714$	$= 0.350 \text{ E-13 kmol}$
C_4H_{10}	$= 6.0693 \text{ E-168} \times 0.0714$	$= 0.4326 \text{ E-1698 kmol}$
H_2	$= 3.8871 \times 0.0714$	$= 0.2775 \text{ kmol}$
H_2O	$= 1.8040 \times 0.0714$	$= 0.128 \text{ kmol}$
CO	$= 0.6992 \times 0.0714$	$= 0.0499 \text{ kmol}$
CO_2	$= 0.5123 \times 0.0714$	$= 0.0365 \text{ kmol}$

Reaksiyonun 0.0714'ü oluşurken geri kalanı ise reaksiyona girmeden bir sonraki adıma aktarılmıştır. Bir sonraki adıma aktarılacak gaz miktarı reaksiyona hiç girmeyen gazlar ile reaksiyon sonucu oluşan gazların toplamıdır. Aktarılacak gazları bulmak için ilk önce gazların reaksiyona girmeyen miktarları bulunmalıdır. Bunun için gazların girişteki değerlerinden reaksiyona giren miktarları çıkarılır. Reaksiyona gazların başlangıçtaki değerlerinin 0.0714'ü girmiştir.

CH_4	$= 0.82 - 0.0714 \times 0.82$	$= 0.7614 \text{ kmol}$
C_2H_6	$= 0.12 - 0.0714 \times 0.12$	$= 0.1114 \text{ kmol}$
C_3H_8	$= 0.04 - 0.0714 \times 0.04$	$= 0.0371 \text{ kmol}$
C_4H_{10}	$= 0.02 - 0.0714 \times 0.02$	$= 0.0185 \text{ kmol}$
H_2	$= 0 - 0.0714 \times 0$	$= 0 \text{ kmol}$
H_2O	$= 3.528 - 0.0714 \times 3.528$	$= 3.2761 \text{ kmol}$
CO	$= 0 - 0.0714 \times 0$	$= 0 \text{ kmol}$
CO_2	$= 0 - 0.0714 \times 0$	$= 0 \text{ kmol}$

Bu adımın sonundaki gaz karışımı, adımda reaksiyona girmeyen gazlar ile başlangıçtaki gazların 0.0714'ünün reaksiyona girerek oluşturduğu gazların toplamıdır. Elde edilen gaz karışımı bu adımın çıkışında şu şekilde olmuştur:

CH_4	$= 0.7614 + 0.0034$	$= 0.7648 \text{ kmol}$
C_2H_6	$= 0.1114 + 0.661 \text{ E-}8$	$= 0.1114 \text{ kmol}$
C_3H_8	$= 0.0371 + 0.350 \text{ E-}13$	$= 0.0371 \text{ kmol}$
C_4H_{10}	$= 0.0185 + 0.4326 \text{ E-}1698$	$= 0.0185 \text{ kmol}$
H_2	$= 0 + 0.2775$	$= 0.2775 \text{ kmol}$

$$\begin{array}{lll}
\text{H}_2\text{O} & = 3.2761 + 0.128 & = 3.4041 \text{ kmol} \\
\text{CO} & = 0 + 0.0499 & = 0.0499 \text{ kmol} \\
\text{CO}_2 & = 0 + 0.0365 & = 0.0365 \text{ kmol}
\end{array}$$

Bulunan bu sonuçlar birinci adımda gerçekleşen reaksiyon sonucunda bulunmuş değerlerdir ve aynı zamanda bir sonraki adımın giriş değerleridir. Her adımda bu işlem tekrarlanarak sonuca ulaşılmıştır.

Reaksiyonların ihtiyaç duyduğu ısı için egsoz gazları kullanılacaktır. Daha öncede bahsedildiği gibi iki adımda gerçekleşen bu sistem ile reaksiyon beslenmektedir. İlk kısımda anot gazları, ikinci kısımda ise yanma odası çıkışında elde edilen gazlar kullanılmıştır.

Birinci adımda yakıt dönüştürücüye verilen ısı 16888.58 kJ olarak hesaplanmıştır. Egsoz gazlarının, ilk adımda gerçekleşen bu ısı transferi sonucunda, sıcaklıkları belli bir değere düşmüştür. Sıcaklık düşümünü hesaplamak için denklem 5.16 kullanılmıştır. (INCROPERA, 2003)

$$T_1 = T_0 - \frac{dq}{Nc_p} \quad 5.16$$

Bu denklemde T_1 ile çıkış sıcaklığı T_0 ile giriş sıcaklığı, dq ile transfer edilen ısı miktarı, N ile gazların mol sayıları ve c_p ile de gazların özgül ısıları belirtilmiştir.

İlk adım için denklemde değerleri yerlerine koyarsak;

$$T_1 = 900 - \frac{16888.58}{6.9795 \times 44.44}$$

$$T_1 = 845.55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

T_1 sıcaklığı 845.55°C olarak bulunur. Bir sonraki adımda artık bu sıcaklık değeri kullanılacaktır.

16888.58 kJ transfer edilen ısı miktarını bulmak için ise aşağıdaki denklemler kullanılacaktır. Isı transferi için geliştirilen sistem aşağıdaki gibidir:

Program öncelikle akışın laminar yada türbülanslı olduğunu bulacaktır.

Laminar akış için Nu sayısı 4,36 alınarak ısı transfer katsayısı hesaplamasına geçilecektir. Isı taşınım katsayısı ise denklem 5.17 ile bulunacaktır. (GENCELİ, 1999)

$$h = k \cdot \frac{Nu}{de} \quad 5.17$$

Eğer akış türbülanslı ise denklem 5.18 ile ısı taşınım katsayısı bulunacaktır. (GENCELİ, 1999)

$$h = 6,85 \cdot c_p^{0.81} k^{0.19} \frac{w_0^{0.75}}{d^{0.25}} \quad 5.18$$

Denklem 5.18’de yer alan w_0 değeri normal şartlara indirgenmiş hızdır. İndirgenmiş hız, denklem 5.19 ile verilmektedir ve birimi Nm/s’dir. (GENCELİ, 1999)

$$w_0 = \frac{264 \, pw}{(273 + t_m)} \quad 5.19$$

Akışkan hızı olarak hesaplarda 20 m/s alınmıştır.

Program ısı taşınım katsayısını bulduktan sonra toplam ısı transfer katsayısını bulmakta ve buradan her adım için oluşan ısı transferi miktarını hesaplanmaktadır. Toplam ısı transferi değeri için 5.20 denklemi kullanılmıştır. (SHAH, 2003)

$$U = \frac{1}{\ln((d_2)/(d_1)) * ((d_2/2) * k) + \frac{1}{h_2}} \quad 5.20$$

Birinci adım için ısı transfer hesapları program tarafından şu şekilde yapılmıştır:

Egsoz gazlarının geçtiği iki boru arasındaki alanın çapı dış borunun iç çapından içteki borunun dış çapı çıkarılarak bulunur. Dış borunun iç çapı 0.3 m, içteki borunun dış çapı ise 0.25 m’dir. Hidrolik çap:

$$D_h = 0.3 - 0.25$$

$$= 0.05 \, m$$

olarak bulunur. Hidrolik çapın hesaplanmasının ardından Reynold sayısının bulunmasına geçilmiştir. Reynold sayısı denklem 5.21 ile hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{V \times D_h}{\mu} \quad 5.21$$

Denklemde değerler yerine koyulursa Re sayısı;

$$Re = \frac{20 \times 0.05}{4.4735 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 22353.7627$$

olarak bulunur. İlk adımda bulunan Re sayısı 2300'den küçük olduğu için akış türbülanslıdır. (GENCELİ, 1999)

Re sayısı bulunduğundan sonra ısı taşınım katsayısı bulunmuştur. Isı taşınım katsayısının hesabı için denklem 5.18 kullanılmıştır. Denklemde kullanılan indirgenmiş hız değerini için ise denklem 5.19 kullanılmıştır.

İndirgenmiş hız denkleminde değerler yerine konulursa;

$$w_o = \frac{264 \times 1.1 \times 20}{(273 + 800)}$$

$$w_o = 5.41 \text{ Nm/s}$$

olarak bulunur. Denklemdaki t_m değeri giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalamasıdır. Ortalama sıcaklık;

$$T_m = \frac{900}{700}$$

$$T_m = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

olarak bulunur. Bulunan değeri Kelvin cinsine çevirmek için değer 273 ile toplanmıştır. Bu işlemin ardından bütün değerler ısı taşınım katsayısının bulunacağı denklemden yerlerine konulacaktır. Isı taşınım katsayısı;

$$h = 6.85 \times 44.44^{0.81} \times 0.113^{0.19} \times \frac{5.41^{0.75}}{0.05^{0.25}}$$

$$h = 733.88 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

olarak bulunur. Isı taşınım katsayısı hesabından sonra toplam ısı transferi katsayısı hesabına geçilmiştir. Toplam ısı transfer katsayısının bulunması için denklem 5.20 kullanılmıştır. Değerler denklemden yerine konursa toplam ısı transfer katsayısı $537.8530 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ olarak bulunur. Toplam ısı transfer katsayısının ardından ısı geçişi hesaplanacaktır. Isı geçiş miktarı denklem 5.22 ile hesaplanacaktır.

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

5.22

Birinci adımda gerçekleşen ısı geçişi;

$$= 537.830 \times 0.157 \times (1173 - 1118.55)$$

$$= 16888.5854 \text{ kJ}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değer reaksiyon oluşum oranı için kullanılan ısı transfer miktarıdır.

Program, bu döngüyü anot gazlarının sıcaklığı 720°C 'e düşünceye kadar devam edecektir. Ardından benzer bir döngüye yanma odası çıkışındaki gazlarla devam edecek ve döngü yanma odası gazlarının sıcaklığı 720°C 'e düşünce bitecektir.

Program tarafından son adımda bulunan mol sayıları Çizelge 5.5'de verilmiştir. Toplam reformer boyu olarak 3 m hesaplanmıştır.

Çizelge 5.5 Programın son adımda hesapladığı mol sayıları.

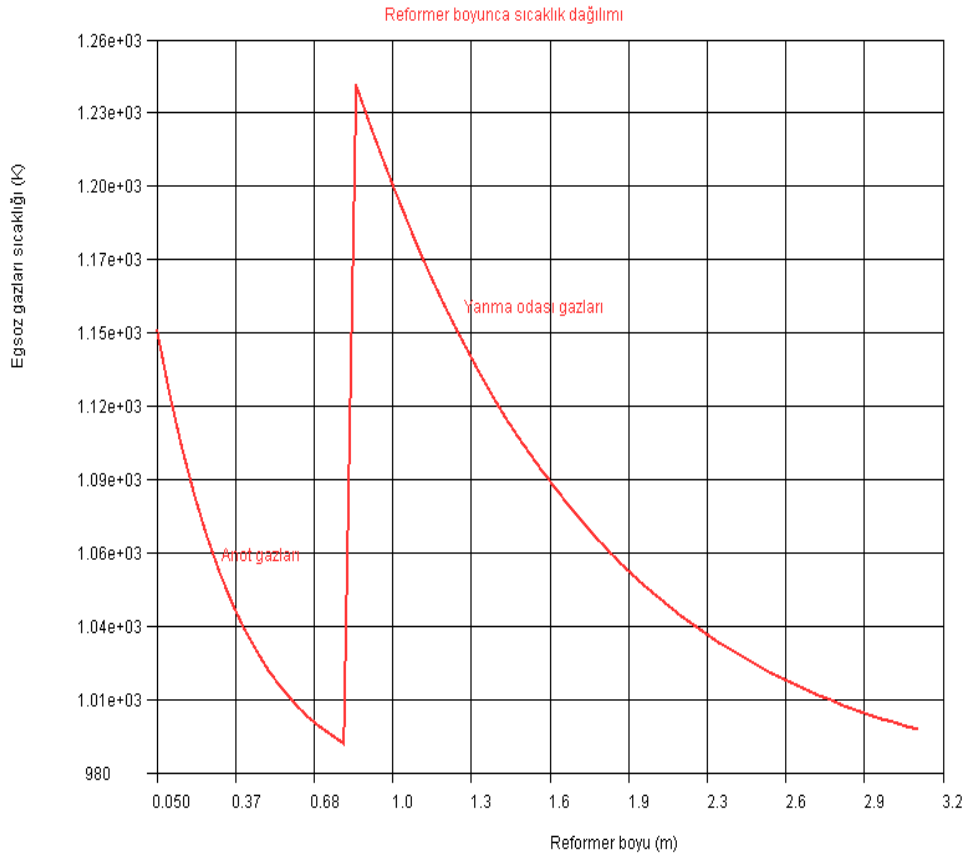
Gaz	Mol sayısı (kmol)
C H ₄	0.0506
C ₂ H ₆	3.5115 E-4
C H ₈	1.1702E-4
C H ₁₀	5.8510E-5
C H ₁₀	5.8510E-5
H	3.8757

$\frac{2}{2}$	
$\frac{H}{O_2}$	1.8091
$\frac{C}{O}$	0.6972
$\frac{C}{O_2}$	0.5108

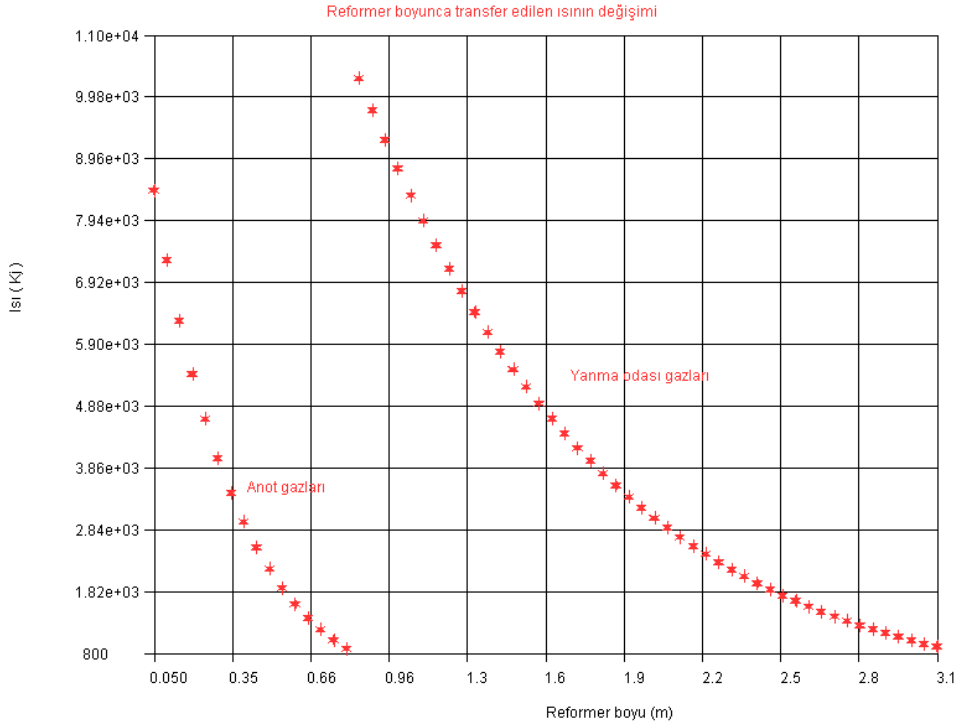
Yazılan program ile yakıt dönüştürücünün 0.1 m birim boyu için hesaplar tekrarlamış ve reformer boyu ve dolayısıyla ısı değiştirici boyu bulunmuştur.

Program ile elde edilen sonuçlar grafiksel olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 5.6'da reformer boyunca sıcaklık düşümü görülmektedir. Grafikteki değerler Kelvin cinsindendir ve grafikte sistemin iki adımı açıkça görülmektedir. Grafikte y eksenini sıcaklığı x eksenini yakıt dönüştürücü boyunu göstermektedir.

Şekil 5.7'de reformer boyunca reaksiyonlara aktarılan ısı miktarları görülmektedir. Birinci eğri anot gazlarından ikinci eğri ise yanma odası çıkışındaki egsoz gazlarından aktarılan ısıları belirtmektedir. Garfğin y eksenini ısı değiştiriciden yakıt dönüştürücüye aktarılan ısıyı, x eksenini ise yakıt dönüştürücü boyunu göstermektedir.

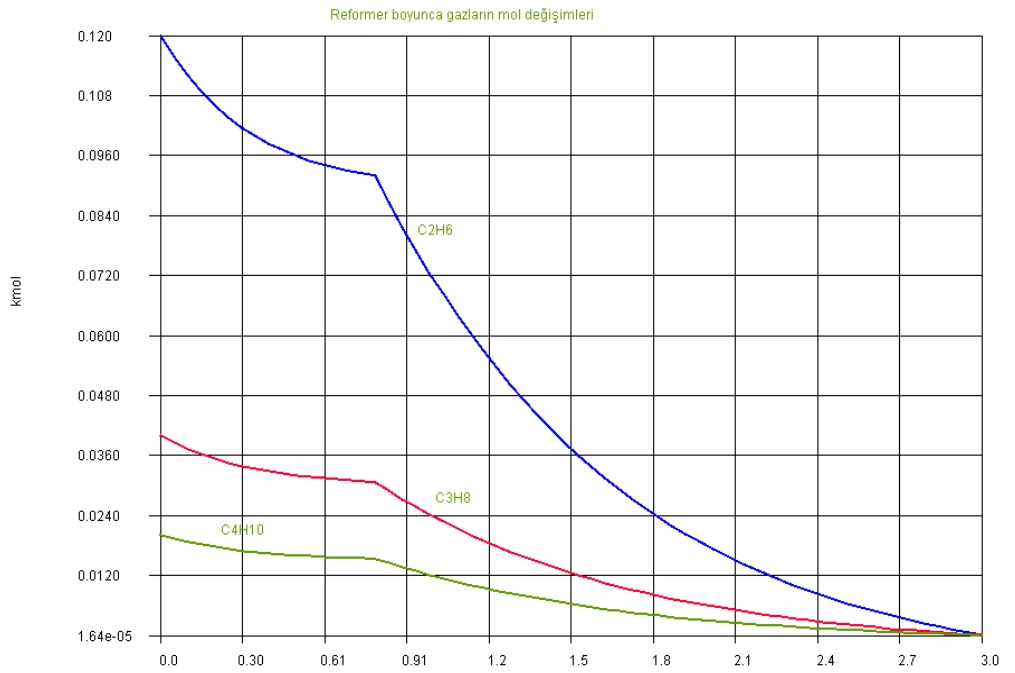


Şekil 5.6 Yakıt dönüştürücü boyunca egzoz gazlarının sıcaklık değişimi.

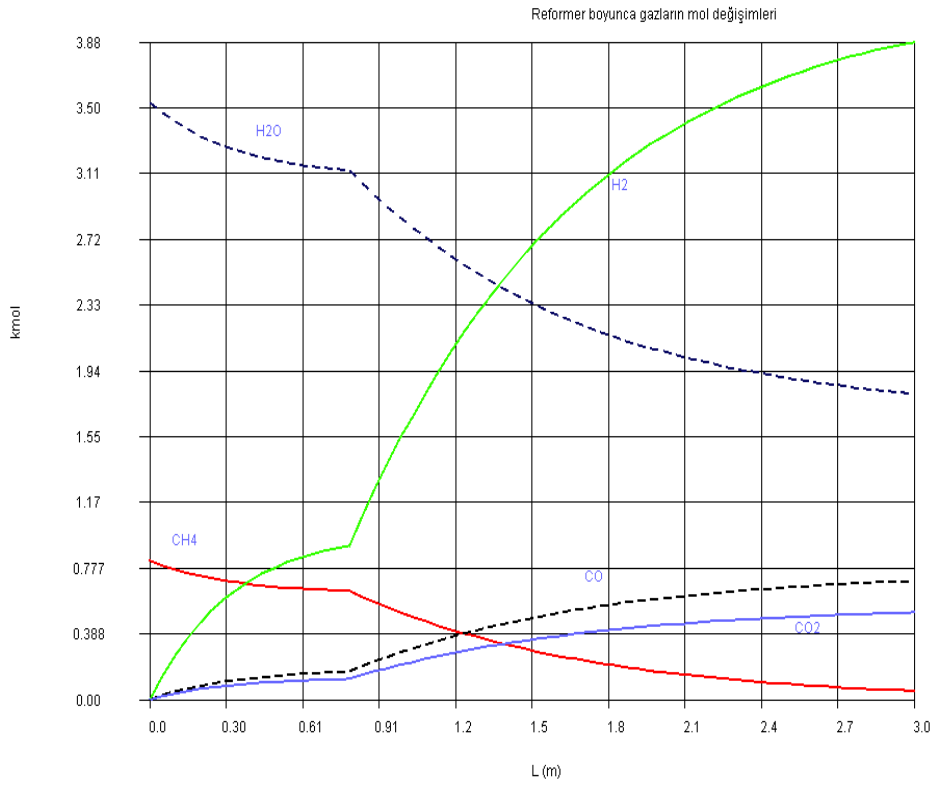


Şekil 5.7 Yakıt dönüştürücü boyunca transfer edilen ısı miktarı.

Şekil 5.8’de reformerde oluşan reaksiyonlar sonucu her adımdaki gazların değişimi verilmiştir. Bu grafikte metan hariç diğer hidrokarbonların değişimi gösterilmiştir. Çünkü bu gazların miktarları diğerlerine göre çok azdır ve eğrilerin rahat görülmesi için gazlar iki ayrı grafikte gösterilmiştir. Şekil 5.9’da ise hidrojen, su, karbonmonoksit, karbondioksit ve metanın değişimi verilmiştir.



Şekil 5.8 Yakıt dönüştürücü boyunca reformer gazlarının mol değişimi.



Şekil 5.9 Yakıt dönüştürücü boyunca diğer reformer gazlarının mol değişimi

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı yakıt dönüştürücünün, doğalgazla çalışan katı oksitli yakıt pili sistemindeki davranışları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler en uygun yakıt dönüştürücünün ısı değıştircisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücü olduğunu göstermiştir.

İkinci aşamada ise ısı değıştircisi ile entegre buharlı yakıt dönüştürücünün ısı tasarımını yapılmıştır. Bu işlem için java programlama dilinde program yazılmıştır.

Yapılan hesaplar sonucunda 1 kmol yakıtın dönüşümü için gerekli ısı değıştirici boyu 3 m olarak bulunmuştur. Bulunan boy, ısı değıştircisi olarak kullanılan boruların çaplarıyla, ısı transferine etki eden diğer parametrelere sıkı sıkıya bağlıdır.

Yapılan çalışmalar sonucunda egsoz gazlarının yakıt dönüştürücü boyuncaki sıcaklık düşümleri de bulunmuştur.

Sonuç olarak, 1 kmol doğalgazdan bu tür bir sistemle yakıt pilinde kullanılmak üzere 3.8757 kmol H_2 elde edilmiştir. Ayrıca sistem dışarıdan herhangi bir ek enerjiye gereksinim duymadan alt sistemlerini (ısı değıştiriciler ve yakıt dönüştürücü için gerekli olan enerji) besleyebilmektedir.

Bu çalışmada ısı kaynağı olarak kullanılan anot gazları ve yanma odası çıkışındaki gazlar sisteme sırasıyla verilmiştir. Benzer bir çalışmada bu gazlar önceden karıştırılarak da verilebilir ve sistemin nasıl tepki verdiği araştırılabilir.

Bu çalışmada paralel akışlı çift borulu ısı değıştirici kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda diğerk akış türleri içinde çalışma tekrarlanarak genişletilebilir.

Teorik hesaplar ve modellemeler yapılan bu çalışmanın bir sonraki adımında, yapılan modellemelere bağılı olarak gerçek sistem oluşturulabilir ve deneyleri yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

ÇOBAN, M.Turhan, 2007, 20 KW çıkışlı doğalgaz yakıtlı, katı oksitli yakıt pili sistemi dizayn parametrelerinin oluşturulması ve sistem performanslarının hesabı, (6):1-6.

SINGHAL, S.C, 2000, Advances in solid oxide fuel cell technology, (6):1-6.

FONTES, Ed and NILSSON, Eva, Fuel cells in the automotive industry, (13):5-6.

KAMARUDIN, S.K., DAUD, W.R.W. and SOM, A. Md., 2004, The conceptual design of PEMFC system via simulation, (15):1-15. www.sciencedirect.com

ETHAN S. HECHT, GAURAV K. GUPTA, HUAYANG ZHU, 2005, Methane reforming kinetics within a Ni-YSZ SOFC anode support, www.sciencedirect.com

HOOGERS, G. 2003, Fuel Cell Technology Handbook

PRAUSNİTZ, R. C., 1987, The Properties of Gases and Liquids (4 ed.): McGraw-Hill.

GENCELİ, F. OSMAN, 1999, Isı Değiştiricileri, İstanbul, ISBN:975-511-218-9

F. A. N. FERNANDES AND A. B. SOARES JR. 2006, Modeling of methane steam reforming in a palladium membrane reactor

JINLIANG YUAN, FUAN RENAND BENGT SUNDÉN, 2006, Analysis of chemical-reaction-coupled mass and heat transport phenomena in a methane reformer duct for PEMFCs, www.sciencedirect.com

COMSOL, 2005, Heat Transfer Module, User's Guide,

COMSOL, 2006, Reaction Engineering Lab, User's Guide,

ÇENGEL, A. YUNUS, MICHAEL A. BOLES, 2002, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, İstanbul, ISBN:975-8431-91-9

SHAH, K. RAMESH, SEKULIC, P. DUSAN, 2003, Fundamentals of Heat Exchanger Design, New Jersey, ISBN: 0-471-32171-0

INCROPERA, P. FRANK, DEWITT, P. DAVID, 2003, Isı ve K tle Geişinin Temelleri, İstanbul, ISBN:975-04-0106-9

Ege  niversitesi yakıt pilleri doktora dersi notları, 2005-2006

http://selimcetinkaya.tripod.com/guncel/yakit_pili.htm, 2007

http://www.eie.gov.tr/hidrojen/yakit_pilleri.html, 2008

<http://www.llnl.gov/str/September02/Pham.html>, 2008

http://www.lead.ruhr-unibochum.de/~english/Forschung/Forschung/experimentell/reformer_en.htm, 2008

<http://www.ntu.edu.sg/mae/Research/Programmes/Fuelcell/laboratory.htm>, 2008

ÇOBAN, M. TURHAN, Java programlama dilinde yazılmış bilgisayar kodları (Ayrıntıları ekte 1’de verilmiştir.)

EKLER

Program kodları ve oluşturduğu çıktılar

1- Tezde kullanılan, M. Turhan Çoban tarafından yazılmış, bilgisayar programlarının listesi ve tanımları

Atom.java	Bir elementin atomsal özelliklerini saklayan sınıf
BasicWindowMonitor.java	MS Windows ortamında arayüzlerin istene şekilde gösterilmesine yardımcı sınıf
complex.java	Kompleks sayılarla gerçekleştirilen işlemleri sağlayan sınıf
Gas1.java	İdeal gazların özelliklerini hesaplayan sınıf
Gas1Model.java	İdeal gaz özelliklerini kullanıcıya ulaştıran arayüze yardımcı sınıf
Gas1Table.java	İdeal gaz özelliklerini kullanıcıya ulaştıran arayüz programı
GasData.java	İdeal gazla ait denklem katsayılarını saklayan sınıf
genelModel.java	Diğer sınıflara girdi çıktı fonksiyonlarına ulaşma imkânı veren yardımcı sınıf
Gibbs.java	Kimyasal reaksiyonları hesaplayan sınıf
girdi.java	Girdi çıktı fonksiyonlarını barındıran sınıf
girdi1.java	Girdi çıktı fonksiyonlarını barındıran sınıfa yardımcı sınıf
Gmix.java	İdeal gaz karışımlarının özelliklerini hesaplayan sınıf
GmixModel.java	İdeal gaz karışımı özelliklerini kullanıcıya sunan arayüze yardımcı sınıf

GmixTable.java	İdeal gaz karışımlarının özelliklerini kullanıcıya sunan arayüz sınıfı
steam.java	Suyun özelliklerini hesaplayan sınıf
Text.java	Dosyadan girdi çıktı sağlayan sınıf
İnteghexref.java	Reformer analizini yapan sınıf
İnteghexreftest.java	Reformer analizini çalıştıran sınıf

2- Yakıt dönüştürücü hesaplamaları için yazılmış ana programın kodları

integhexref.java

```

import java.util.*;
import java.io.*;
import java.math.*;
import java.io.IOException;

public class integhexref
{
    String[] Fuel;                                //Fuel
name
    String[] Anot;                                //Anot gases
name
    String[] Exhaust;                            //Exhaust
gases name
    double[][] NFuel;                            //Fuel mole
kmol
    //double[][] NXFuel;
    double[] NAnot;                              //Anot gases mole
kmol
    double[] NExhaust;                          //Exhaust
gases mole kmol
    double[] TFuel;                              //Fuel
Temperature Kelvin
    double Tex;                                  //Exhaust gases
Temperature Kelvin
    double Q;
//Heat from the whole chemical reaciton Kj/kmol
    double dq;
//Transferred heat, from exhaust gases Kj/kmol
    double Tout;
    //Egsoz gazları çıkış sıcaklığı Kelvin
    double P=1.1;
    //Pressure bar
    double nratio=10;                            //Iteration
number

```

```

        double Tg;           //Anot gazları sıcaklığı Kelvin
        double Tsat=973;     //Reformer sıcaklığı Kelvin
        double At=0;         //Isı transfer alanı m2
        int nmax=50;         //Gibbs
iteration number
        //double h1;         //inner convection coefficient
        double h2;           //outer convection coefficient
        double d1=0.25;      //İçteki
borunun dış çapı m
        double d2=0.3;       //Dıştaki
borunun iç çapı m
        double L=0;
//Reformer boyu m
        double dL;
//finite element lenght m
        double v;
//exhaust gases velocity m/s
        double mu;
//exhaust gases kinematic viscosity
        double k=55;
//İçteki borunun ısı iletim katsayısı
        double ilk;
        gibbs gb;
        Gmix g1;
        Gmix g2;
        Gmix g3;
        double x=0;

        public integhexref (String Fuel[],double[][] NFuel,double[]
TFuel,String[] Anot,double[] NAnot,String[] Exhaust,double[]
NExhaust,double Tg,double Tex,double vi,double dLi )
        {
                v=vi;
                dL=dLi;
                ilk=NFuel[0][0]; //Ch4's first value
                //System.out.println("ilk= "+ilk); //kontrol
                //System.out.println("NFuel= "+NFuel[0][0]); //kontrol

```

```

        try{
            g1=new Gmix("Anot");
            //System.out.println(g1.gasList[0]);
            //System.out.println(g1.gasList[1]);
            //System.out.println(g1.gasList[2]);

            //System.out.println("visco= "+viscosity);
            //System.out.println("cp= "+g1.Cp(Tg));
            //System.out.println("k= "+g1.k(Tg));

            //System.out.println("CH4 mol sayısı= "+g1.gasList[0].N);
            //g1.gasList[i].N

        } catch(IOException ioe1)
        {System.out.println("IOException");}

        /*//////////////////////////////////// */

        try{
            g2=new Gmix("Exhaust");
            //System.out.println(g2.gasList[0]);
            //System.out.println(g2.gasList[1]);
            //System.out.println(g2.gasList[2]);

            //System.out.println("visco= "+viscosity);
            //System.out.println("cp= "+g1.Cp(Tg));
            //System.out.println("k= "+g1.k(Tg));

            // System.out.println("CH4 mol sayısı= "+g1.gasList[0].N);
            //g1.gasList[i].N

        } catch(IOException ioe1)
        {System.out.println("IOException");}

```

```

/*//////////////////////////////////// */

gb=new gibbs(Fuel,NFuel,TFuel,Tsat,P,nmax);
gb.getEq();
Q=gb.delQ();

// System.out.println("Q denge= "+gb.delQ());
System.out.println("-----Isı değiştirci ile entegre buharlı yakıt
dönüştürücü programı-----");
System.out.println("Giriş değerleri");
System.out.println("Yakıt sıcaklığı= "+Tsat+" K");
for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+" "+NFuel[i][0]+" kmol");
System.out.println("Egsoz gazları hızı = "+v+" m/s");
System.out.println("Sistem basıncı = "+P+" bar");

int a=0; int b=0;

double[][] NFuelDepo=new double[NFuel.length][1];

while(x<=1.0) // this loop performs while CH4's current
value is big equal from its first value*0.04.
{

    if((Tg-Tsat)>20.0 && a==0)
    {
        System.out.println("-----birinci adım iterasyonu---
-----");

        //System.out.println("v= "+v);
        System.out.println("Anot gazı giriş sıcaklığı=
"+Tg+" K");

        //System.out.println("d2= "+d2);
        //System.out.println("d1= "+d1);
        //System.out.println("Tsat= "+Tsat);
    }
}

```

```

//System.out.println("Exhaust= "+Exhaust[0]);
//System.out.println("NExhaust=
"+NExhaust[0]);

//System.out.println("Exhaust2= "+Exhaust[1]);
//System.out.println("NExhaust2=
"+NExhaust[1]);

dq=heat_transfer(v,Tg,Tsat,g1,dL);
//System.out.println("dq= "+dq);
//System.out.println("P= "+P);
//System.out.println("nmax= "+nmax);
//System.out.println("TFuel= "+TFuel[0]);
//System.out.println("Fuel= "+Fuel[0]);
//System.out.println("NFuel=
"+NFuel[0][0]);

//for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+" "+gb.n0[i][0]);
//for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(" "+NFuel[i][0]);
//gb=new gibbs(Fuel,NFuel,TFuel,Tsat,P,nmax);
gb.setgibbs(Fuel,NFuel,Tsat,P);

gb.getEq();

//for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+" "+gb.n0[i][0]);
for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+= " "+gb.n[i][0]);

Q=gb.delQ();
System.out.println("Reaksiyon ısısı= "+Q+" KJ");

x=dq/Q;

System.out.println("Reaksiyon oluşum oranı = "+x);

for (int i=0;i<Fuel.length;i++)
{

```

```
//System.out.println("L="+Fuel.length+"i="+i+"NF="+NFuel.lengt
h+"*"+NFuel[0].length);
```

```
//System.out.println("L="+Fuel.length+"i="+i+"NFuel["+i+"]
["+0]="+NFuel[i][0]+" "+gb.n["+i+"]["+0]="+gb.n[i][0]);
```

```
        NFuel[i][0]=(1.0-x)*NFuel[i][0]+gb.n[i][0]*x;
    }
```

```
        // gb.n[i][0] gibbs sınıfında reaksiyon sonucu oluşan
mol sayıları
```

```
        System.out.println("Reaksiyon
sonucu oluşan gaz karışımı");
```

```
        for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+" "+NFuel[i][0]+" kmol");
```

```
        //System.out.println("Metan= "+NFuel[1][0]);
```

```
L=L+dL;
```

```
System.out.println("Reformer boyu = "+L+" m");
```

```
//System.out.println("Tgilk= "+Tg);
```

```
Tg=equation(Tg,g1);
```

```
System.out.println("Anot gazı çıkış sıcaklığı = "+Tg+"
K");
```

```
System.out.println("-----");
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
else if(Tex-Tsat>20.0 )
{
```

```

System.out.println("-----ikinci adım
iterasyonu-----");
        a=1;
        if(b==0){Tg=Tex; b=1;}

        //System.out.println("v= "+v);
        System.out.println("Yanma odası gazı giriş
sıcaklığı = "+Tex+" K");
        //System.out.println("d2= "+d2);
        //System.out.println("d1= "+d1);
        //System.out.println("Tsat= "+Tsat);
        //System.out.println("Exhaust= "+Exhaust[0]);
        //System.out.println("NExhaust=
"+NExhaust[0]);
        //System.out.println("Exhaust2= "+Exhaust[1]);
        //System.out.println("NExhaust2=
"+NExhaust[1]);

        dq=heat_transfer(v, Tex, Tsat, g2, dL);
        //System.out.println("dq= "+dq);
        //System.out.println("P= "+P);
        //System.out.println("nmax= "+nmax);
        //System.out.println("TFuel= "+TFuel[0]);
        //System.out.println("Fuel= "+Fuel[0]);
        //System.out.println("NFuel=
"+NFuel[0][0]);
        //for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
        System.out.println(gb.gs[i].Formula+" =/t  "+gb.n0[i][0]+" Te["+i+"]=
"+gb.Te[i]);
        //gb=new gibbs(Fuel,NFuel,TFuel,Tsat,P,nmax);
        //for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
        System.out.println("  "+NFuel[i][0]);

        NFuelDepo=new double[NFuel.length][1];

        for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
        {

            NFuelDepo[i][0]=NFuel[i][0];

```



```

        //System.out.println(" "+NFuel[i][0]);

    }

    gb.setgibbs(Fuel,NFuel,Tsat,P);
    gb.getEq();

    //for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
    System.out.println(gb.gs[i].Formula+" =\t "+gb.n0[i][0]+" Te["+i+"]="+
    "+gb.Te[i]);
    //for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
    System.out.println(gb.gs[i].Formula+" =\t "+gb.n[i][0]);

    Q=gb.delQ();
    System.out.println("Reaksiyon ısısı= "+Q +" Kj");

    x=dq/Q;

    System.out.println("Reaksiyon oluşum oranı= "+x);

    for (int i=0;i<Fuel.length;i++)
    {

        //System.out.println("L="+Fuel.length+"i="+i+"NFuel["+i+"]=[0]=
        "+NFuel[i][0]+" "+"gb.n["+i+"]=[0]= "+gb.n[i][0]);

        //NFuel[i][0]=NFuel[i][0]-
        x*NFuel[i][0]+gb.n[i][0]*x;
        NFuel[i][0]=(1.0-x)*NFuel[i][0]+gb.n[i][0]*x;
    }

    // gb.n[i][0] gibbs sınıfında reaksiyon sonucu oluşan
    mol sayıları

    System.out.println("Reaksiyon sonucu
    oluşan gaz karışımı");

```

```

        for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+" "+NFuel[i][0]+" "+" kmol");

        //System.out.println("Metan= "+NFuel[1][0]);

L=L+dL;
System.out.println("Reformer boyu= "+L+" m");

//System.out.println("Texilk= "+Tex);

Tex=equation(Tex,g2);

System.out.println("Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı =
"+Tex+" K");
System.out.println("-----");
}

////////////////////////////////////

        else break;
    }

        for(int i=0;i<gb.n.length;i++)
System.out.println(gb.gs[i].Formula+" "+NFuelDepo[i][0]+" kmol");

}

public double heat_transfer(double vi, double Tgi, double Tsati, Gmix gi,
double dLi)

{

v=vi;
Tg=Tgi;

```

```

Tsati=Tsati;
dL=dLi;
g3=gi;

double U;// Toplam ısı transfer katsayısı
double h_alan=Math.PI*(Math.pow(d2,2)-
Math.pow(d1,2))/4; // halkasal bölgenin alanı
//System.out.println("h_alan= "+h_alan);
//System.out.println("Tg= "+Tg);

double d_hyd=d2-d1; //hidrolik çap
//System.out.println("d_hyd= "+d_hyd);
//System.out.println("v= "+v);

double Re=v*d_hyd/g3.vis(Tg);

//System.out.println("Re= "+Re);
//System.out.println("vis= "+g3.vis(Tg));

if(Re>2300)
{
double Tm=(Tsati+Tg)/2; //????????????????????
double v0=(264*P*v)/(Tm);

double viscosity=g3.vis(Tg); //????????????????????
//System.out.println("visco= "+viscosity);
//System.out.println("cp= "+g3.Cp(Tg));
//System.out.println("k= "+g3.k(Tg));

h2=6.85*Math.pow(g3.Cp(Tg),0.81)*Math.pow(g3.k(Tg),0.19)*M
ath.pow(v0,0.75)/Math.pow(d_hyd,0.25);
//System.out.println("Isı taşınım katsayısı=
"+h2+);
}

else

```

```

    {
        double de=(Math.pow(d2,2)-Math.pow(d1,2))/d2;
        double Nu=4.36;// kitaplara bak daha farklı bir
formül varsa onuda kullanabilirsin.
        h2=g3.k(Tg)*Nu/de ;
        //System.out.println("h2= "+h2);
    }

    U=1/((Math.log((d2/2)/(d1/2)))*((d2/2)/k)+1/h2);

    //System.out.println("h2= "+h2);

    At=dL*2*3.14*d1;    //İçteki borunun birim boyunun
yüzey alanı
    //System.out.println("dL= "+dL);
    //System.out.println("At= "+At);
    System.out.println("Toplam ısı transfer katsayısı=
"+U+" Kj/m2K");
    System.out.println("Transfer edilen ısı miktarı=
"+U*At*(Tg-Tsat)+" Kj");

    return (U*At*(Tg-Tsat));    //Egsoz gazlarından
transfer edilen ısı
}

public double equation(double Tgi,Gmix gi)    //egsoz gazlarındaki
sıcaklık düşümünü bulur.
    {
        double Tc=Tgi;
        g3=gi;

        //double z=heat_transfer(v,Tg,Tsat,Exhaust,dL);
        //System.out.println("dq eq= "+dq);
        //System.out.println("z= "+z);
        double x=(Tc-(dq/(g3.N*g3.Cp(Tc)))); // tout
döndürüyor
        //System.out.println("Tçıkış= "+x);

```

```

//System.out.println("Toplam mol= "+g3.N);
//System.out.println("Cp= "+g3.Cp(Tc));
return x;
} }

```

3- Yakıt dönüştürücü hesaplamaları için yazılmış ana programı çalıştıran test programı kodları

integhexretest.java

```

public class integhexreftest {
    public static void main(String[] arg) throws Exception
    {
        String[]
        Fuel={"CH4","C2H6","C3H8","C4H10","H2","H2O","CO","CO2"};
        double[][]
        NFuel={{0.82,0},{0.12,0},{0.04,0},{0.02,0},{0,0},{3.528,0},{0,0},{0,0}
        }};
        double[] TFuel={973,973,973,973,973,973,973,973};
        //double P=1.1;
        double Tg=1173; //Anot gazlarının Kelvin cinsinden sıcaklığı
        String[] Anot={"CH4","H2","H2O","CO","CO2"};
        double[] NAnot={0.0339,0.5877,5.1321,0.1052,1.1206};

        double Tex=1252; //Yanma odası çıkışı gaz karışımının
        Kelvin cinsinden sıcaklığı
        String[] Exhaust={"H2O","CO2","N2","O2"};
        double[] NExhaust={5.7878,1.2599,11.146,0.5737};
        double v=20;
        double dL=0.1;
        integhexref in=new
        integhexref(Fuel,NFuel,TFuel,Anot,NAnot,Exhaust,NExhaust,Tg,Tex,v,
        dL);
        //in.calc(Fuel,NFuel,TFuel,Exhaust,NExhaust,Tg,v,dL);
    }
}

```

4- Program tarafından oluşturulan hesap çıktıları

-----Isı değıştirci ile entegre buharlı yakıt dönüştürücü programı-----

Giriş değeri

Yakıt sıcaklığı= 973.0 K

CH₄ 0.82 kmol

C₂H₆ 0.12 kmol

C₃H₈ 0.04 kmol

C₄H₁₀ 0.02 kmol

H₂ 0.0 kmol

H₂O 3.528 kmol

CO 0.0 kmol

CO₂ 0.0 kmol

Egsoz gazları hızı = 20.0 m/s

Sistem basıncı = 1.1 bar

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1173.0 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 537.8530383243929 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 16888.585403385936 KJ

CH₄ 0.0483939715528369

C₂H₆ 9.266969427582045E-8

C₃H₈ 4.909017428591583E-13

C₄H₁₀ 6.069344139406191E-168

H₂ 3.8871533406761154

H₂O 1.8040584382071578

CO 0.6992701244197671

CO₂ 0.5123357186865422

Reaksiyon ısısı= 236289.3923812111 KJ

Reaksiyon oluşum oranı = 0.07147415816338971

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.0483939715528369 0.7648501086829423 kmol

C₂H₆ 9.266969427582045E-8 0.11142310764388161 kmol
 C₃H₈ 4.909017428591583E-13 0.0371410336734995 kmol
 C₄H₁₀ 6.069344139406191E-168 0.018570516836732207 kmol
 H₂ 3.8871533406761154 0.27783101267683336 kmol
 H₂O 1.8040584382071578 3.4047827281479774 kmol
 CO 0.6992701244197671 0.049979743471711635 kmol
 CO₂ 0.5123357186865422 0.036618764190155854 kmol

Reformer boyu = 0.1 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 1118.5504288127686 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1118.5504288127686 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 536.9013145597678 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 12268.9560005972 KJ

CH₄ 0.04839397155283602
 C₂H₆ 9.266969427581836E-8
 C₃H₈ 4.909017428591333E-13
 C₄H₁₀ 9.926385446514091E-168
 H₂ 3.8871533406761047
 H₂O 1.804058438207153
 CO 0.6992701244197647
 CO₂ 0.5123357186865317

Reaksiyon ısısı= 219400.80697783004 KJ

Reaksiyon oluşum oranı = 0.05592028657322555

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.04839397155283602 0.7247856761774807 kmol
 C₂H₆ 9.266969427581836E-8 0.10519230071567225 kmol
 C₃H₈ 4.909017428591333E-13 0.03506409642687904 kmol
 C₄H₁₀ 9.926385446514091E-168 0.017532048213409233 kmol
 H₂ 3.8871533406761047 0.4796653515936942 kmol
 H₂O 1.804058438207153 3.3152697671297635 kmol
 CO 0.6992701244197647 0.08628824764356555 kmol
 CO₂ 0.5123357186865317 0.06322099261333529 kmol

Reformer boyu = 0.2 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 1078.4455760062172 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1078.4455760062172 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 536.0012669288461 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 8873.477086025772 Kj

CH4 0.048393971552839005

C2H6 9.266969427582867E-8

C3H8 4.909017428592142E-13

C4H10 1.379177325824847E-167

H2 3.887153340676139

H2O 1.8040584382071223

CO 0.6992701244197742

CO2 0.5123357186865242

Reaksiyon ısısı= 207131.85097724196 Kj

Reaksiyon oluşum oranı = 0.042839751801381436

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH4 0.048393971552839005 0.6958092234308477 kmol

C2H6 9.266969427582867E-8 0.10068589263154328 kmol

C3H8 4.909017428592142E-13 0.03356195923883287 kmol

C4H10 1.379177325824847E-167 0.01678097961937693 kmol

H2 3.887153340676139 0.6256412913121745 kmol

H2O 1.8040584382071223 3.2505298488792818 kmol

CO 0.6992701244197742 0.11254823910340331 kmol

CO2 0.5123357186865242 0.0824609560086561 kmol

Reformer boyu = 0.30000000000000004 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 1049.1338994522869 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1049.1338994522869 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 535.231500052826 Kj/m2K

Transfer edilen ısı miktarı= 6397.634009768811 Kj

CH4 0.04839397155283598

C2H6 9.266969427581828E-8

C3H8 4.909017428591363E-13

C4H10 1.7259215242260962E-167

H2 3.8871533406761154

H2O 1.8040584382071612

CO 0.699270124419768

CO2 0.5123357186865386

Reaksiyon ısısı= 198258.3738912027 Kj

Reaksiyon oluşum oranı = 0.03226917423059068

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH4 0.04839397155283598 0.6749176678684543 kmol

C₂H₆ 9.266969427581828E-8 0.09743684501002796 kmol
 C₃H₈ 4.909017428591363E-13 0.032478942528650835 kmol
 C₄H₁₀ 1.7259215242260962E-167 0.016239471264279264 kmol
 H₂ 3.8871533406761154 0.7308875918882703 kmol
 H₂O 1.8040584382071612 3.2038534109087347 kmol
 CO 0.699270124419768 0.13148126984557773 kmol
 CO₂ 0.5123357186865386 0.09633265962284251 kmol

Reformer boyu = 0.4 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 1027.8340451317883 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1027.8340451317883 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 534.6110415977322 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 4602.437099318821 KJ

CH₄ 0.04839397155283833
 C₂H₆ 9.266969427582749E-8
 C₃H₈ 4.909017428592043E-13
 C₄H₁₀ 2.0154636506196442E-167
 H₂ 3.887153340676088
 H₂O 1.8040584382071174
 CO 0.6992701244197727
 CO₂ 0.5123357186865307

Reaksiyon ısısı= 191860.7398814452 KJ

Reaksiyon oluşum oranı = 0.023988425678764528

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.04839397155283833 0.6598883507434022 kmol
 C₂H₆ 9.266969427582749E-8 0.09509949071813167 kmol
 C₃H₈ 4.909017428592043E-13 0.0316998238296892 kmol
 C₄H₁₀ 2.0154636506196442E-167 0.015849911914793666 kmol
 H₂ 3.887153340676088 0.806601438225497 kmol
 H₂O 1.8040584382071174 3.1702745332405735 kmol
 CO 0.6992701244197727 0.14510163058476164 kmol
 CO₂ 0.5123357186865307 0.10631191808733048 kmol

Reformer boyu = 0.5 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 1012.4218124318622 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1012.4218124318622 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 534.1293947574159 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 3305.8467638719394 Kj

CH4 0.04839397155283566

C2H6 9.266969427581776E-8

C3H8 4.909017428591336E-13

C4H10 2.2460104550394406E-167

H2 3.8871533406761087

H2O 1.8040584382071558

CO 0.6992701244197701

CO2 0.5123357186865288

Reaksiyon ısısı= 187258.30278211946 Kj

Reaksiyon oluşum oranı = 0.017653939583754476

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH4 0.04839397155283566 0.6490930659173666 kmol

C2H6 9.266969427581776E-8 0.09342061169053313 kmol

C3H8 4.909017428591336E-13 0.031140197054992873 kmol

C4H10 2.2460104550394406E-167 0.015570098527442068 kmol

H2 3.8871533406761087 0.86098531539598 kmol

H2O 1.8040584382071558 3.1461554368405005 kmol

CO 0.6992701244197701 0.1548848876941451 kmol

CO2 0.5123357186865288 0.1134798377326751 kmol

Reformer boyu = 0.6 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 1001.3043327111973 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 1001.3043327111973 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 533.7646985755703 Kj/m2K

Transfer edilen ısı miktarı= 2371.9330180220545 Kj

CH4 0.04839397155283641

C2H6 9.266969427581935E-8

C3H8 4.909017428591455E-13

C4H10 2.423763676272966E-167

H2 3.887153340676104

H2O 1.8040584382071507

CO 0.6992701244197694

CO2 0.5123357186865317

Reaksiyon ısısı= 183952.45601824738 Kj

Reaksiyon oluşum oranı = 0.012894272081840363

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH4 0.04839397155283641 0.6413474883553152 kmol

C₂H₆ 9.266969427581935E-8 0.09221602210025169 kmol
 C₃H₈ 4.909017428591455E-13 0.03073866688149 kmol
 C₄H₁₀ 2.423763676272966E-167 0.015369333440688169 kmol
 H₂ 3.887153340676104 0.9000055492793074 kmol
 H₂O 1.8040584382071507 3.1288500729799007 kmol
 CO 0.6992701244197694 0.16190433905382237 kmol
 CO₂ 0.5123357186865317 0.11862279398313626 kmol

Reformer boyu = 0.7 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 993.3028744394685 K

-----birinci adım iterasyonu-----

Anot gazı giriş sıcaklığı= 993.3028744394685 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 533.4950395003198 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 1700.542799765522 KJ

CH₄ 0.04839397155283602
 C₂H₆ 9.266969427581854E-8
 C₃H₈ 4.909017428591412E-13
 C₄H₁₀ 2.5578113880902016E-167
 H₂ 3.887153340676108
 H₂O 1.8040584382071485
 CO 0.6992701244197679
 CO₂ 0.5123357186865338

Reaksiyon ısısı= 181580.52300022525 KJ

Reaksiyon oluşum oranı = 0.009365226906871573

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.04839397155283602 0.6357943441252325 kmol
 C₂H₆ 9.266969427581854E-8 0.09135239899670647 kmol
 C₃H₈ 4.909017428591412E-13 0.030450792291334704 kmol
 C₄H₁₀ 2.5578113880902016E-167 0.015225396145608755 kmol
 H₂ 3.887153340676108 0.9279808661500987 kmol
 H₂O 1.8040584382071485 3.1164430987159286 kmol
 CO 0.6992701244197679 0.1669368915657637 kmol
 CO₂ 0.5123357186865338 0.12231000485915161 kmol

Reformer boyu = 0.7999999999999999 m

Anot gazı çıkış sıcaklığı = 987.5534497169232 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1252.0 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 469.6013204562504 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 20569.94663994514 Kj
 Reaksiyon ısısı= 179879.9802004574 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.11435372973146923
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.5686229206759242 kmol
 C₂H₆ 0.08090592204864094 kmol
 C₃H₈ 0.026968630619598446 kmol
 C₄H₁₀ 0.013484315309719259 kmol
 H₂ 1.2663732755308472 kmol
 H₂O 2.966367017944384 kmol
 CO 0.22781118220262908 kmol
 CO₂ 0.166910899926491 kmol
 Reformer boyu= 0.8999999999999999 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1223.7174855238143 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1223.7174855238143 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 470.11866085321293 Kj/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 18505.11406186964 Kj
 Reaksiyon ısısı= 159310.03356051035 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.11615786933370326
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.5081942343800748 kmol
 C₂H₆ 0.07150807329130637 kmol
 C₃H₈ 0.023836011948035245 kmol
 C₄H₁₀ 0.011918005973918434 kmol
 H₂ 1.5707975038903637 kmol
 H₂O 2.8313557298138257 kmol
 CO 0.28257484840889247 kmol
 CO₂ 0.20703471088863884 kmol
 Reformer boyu= 0.9999999999999999 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1198.1446015083216 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1198.1446015083216 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 470.5684440229911 Kj/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 16633.51333547572 Kj
 Reaksiyon ısısı= 140804.9194986488 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.11813162064721283

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.4538772841582788 kmol

C₂H₆ 0.06306071965126585 kmol

C₃H₈ 0.021020225226905505 kmol

C₄H₁₀ 0.010510112613336285 kmol

H₂ 1.8444323728854972 kmol

H₂O 2.7099994358698347 kmol

CO 0.33179973668009555 kmol

CO₂ 0.2431004137250315 kmol

Reformer boyu= 1.0999999999999999 m

Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1175.0519152698944 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1175.0519152698944 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 470.9283241183384 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 14938.859265343446 KJ

Reaksiyon ısısı= 124171.40616317056 KJ

Reaksiyon oluşum oranı= 0.1203083683027046

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.4050942484447425 kmol

C₂H₆ 0.05547399851496746 kmol

C₃H₈ 0.018491316228560213 kmol

C₄H₁₀ 0.009245658114148122 kmol

H₂ 2.090188799418108 kmol

H₂O 2.6010071526625125 kmol

CO 0.3760094994286175 kmol

CO₂ 0.27549167395443047 kmol

Reformer boyu= 1.2 m

Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1154.2227571947549 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1154.2227571947549 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 471.2189268528741 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 13407.108127161126 KJ

Reaksiyon ısısı= 109232.54689782414 KJ

Reaksiyon oluşum oranı= 0.12273913323381631

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.36131316563476756 kmol

C₂H₆ 0.04866517939442429 kmol

C3H8 0.016221708102374586 kmol
 C4H10 0.00811085405104138 kmol
 H2 2.310746669664017 kmol
 H2O 2.5031903582184576 kmol
 CO 0.41568622834865254 kmol
 CO2 0.30456170671644056 kmol
 Reformers boyu= 1.3 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1135.454994510626 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1135.454994510626 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 471.4548971432011 KJ/m2K
 Transfer edilen ısı miktarı= 12024.661828202816 KJ
 Reaksiyon ısısı= 95825.43877067327 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.12548506933508435
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH4 0.322046478869118 kmol
 C2H6 0.04255843761257365 kmol
 C3H8 0.01418612593647621 kmol
 C4H10 0.007093062968079702 kmol
 H2 2.5085621700762624 kmol
 H2O 2.4154597407614644 kmol
 CO 0.45127177320945017 kmol
 CO2 0.3306342430145353 kmol
 Reformers boyu= 1.4000000000000001 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1118.560819060953 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1118.560819060953 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 471.64787392333096 KJ/m2K
 Transfer edilen ısı miktarı= 10778.591781352035 KJ
 Reaksiyon ısısı= 83800.77694246174 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.12862162111877196
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH4 0.28684884975488123 kmol
 C2H6 0.037084514293888614 kmol
 C3H8 0.012361483421194723 kmol
 C4H10 0.006180741710427763 kmol
 H2 2.6858788012988435 kmol

H₂O 2.3368203140728006 kmol
 CO 0.4831697231769036 kmol
 CO₂ 0.3540049813751404 kmol
 Reformer boyu= 1.5000000000000002 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1103.3664665286317 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1103.3664665286317 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 471.80690289971284 Kj/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 9656.724413931892 Kj
 Reaksiyon ısı= 73022.185161113 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.13224370638355606
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.2553146928562034 kmol
 C₂H₆ 0.03218033292921466 kmol
 C₃H₈ 0.01072675503724197 kmol
 C₄H₁₀ 0.005363377518441356 kmol
 H₂ 2.8447397987702927 kmol
 H₂O 2.2663659089884702 kmol
 CO 0.5117476411882342 kmol
 CO₂ 0.37494322491163906 kmol
 Reformer boyu= 1.6000000000000003 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1089.7117721163272 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1089.7117721163272 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 471.9389504637467 Kj/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 8647.690504576922 Kj
 Reaksiyon ısı= 63365.46074717821 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.13647325218829126
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.22707554907478578 kmol
 C₂H₆ 0.027788590884797338 kmol
 C₃H₈ 0.009262839891949417 kmol
 C₄H₁₀ 0.004631419945786097 kmol
 H₂ 2.9870013649592972 kmol
 H₂O 2.2032733049400015 kmol
 CO 0.5373394443332656 kmol
 CO₂ 0.3936936253633576 kmol

Reformer boyu= 1.7000000000000004 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1077.4496001515377 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1077.4496001515377 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.04937644469413 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 7740.942873564664 KJ
 Reaksiyon ısısı= 54717.7702426015 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.1414703640013791
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.20179740126241488 kmol
 C₂H₆ 0.023857341927255034 kmol
 C₃H₈ 0.007952422560818287 kmol
 C₄H₁₀ 0.003976211280212491 kmol
 H₂ 3.114346192620511 kmol
 H₂O 2.1467962324285423 kmol
 CO 0.5602478365880939 kmol
 CO₂ 0.41047796549167276 kmol
 Reformer boyu= 1.8000000000000005 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1066.4451860565932 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1066.4451860565932 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.1423219645213 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 6926.750058023164 KJ
 Reaksiyon ısısı= 46976.82736904014 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.1474503589526824
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.17917801048716506 kmol
 C₂H₆ 0.02033958196060408 kmol
 C₃H₈ 0.006779834999754604 kmol
 C₄H₁₀ 0.0033899174996734538 kmol
 H₂ 3.2282968840025106 kmol
 H₂O 2.0962594216439454 kmol
 CO 0.580746722831298 kmol
 CO₂ 0.4254969277623682 kmol
 Reformer boyu= 1.9000000000000006 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1056.5754235830618 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1056.5754235830618 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.22101022615476 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 6196.173139852144 KJ
 Reaksiyon ısısı= 40050.07731101058 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.15471064117393576
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.15894432796831812 kmol
 C₂H₆ 0.017192846531257026 kmol
 C₃H₈ 0.005730922379965027 kmol
 C₄H₁₀ 0.0028654611897722285 kmol
 H₂ 3.3302289888560694 kmol
 H₂O 2.051052820144785 kmol
 CO 0.5990835542851654 kmol
 CO₂ 0.438931812785016 kmol
 Reformer boyu= 2.0000000000000004 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1047.7281235276594 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1047.7281235276594 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.28797295604625 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 5541.0314554389015 KJ
 Reaksiyon ısısı= 33853.90417116255 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.16367481361747535
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.14085001898666857 kmol
 C₂H₆ 0.014378825747394613 kmol
 C₃H₈ 0.0047929147276483805 kmol
 C₄H₁₀ 0.0023964573636081495 kmol
 H₂ 3.421383478339248 kmol
 H₂O 2.0106260607165796 kmol
 CO 0.61548157247892 kmol
 CO₂ 0.4509461834022404 kmol
 Reformer boyu= 2.1000000000000005 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1039.8012641268974 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1039.8012641268974 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.34521838108265 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 4953.861457667826 Kj
 Reaksiyon ısısı= 28312.87271572427 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.1749685207646405
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.12467312113142545 kmol
 C₂H₆ 0.011863000090319778 kmol
 C₃H₈ 0.003954305527686576 kmol
 C₄H₁₀ 0.001977152763622101 kmol
 H₂ 3.5028785421690767 kmol
 H₂O 1.974483229368236 kmol
 CO 0.6301419314690191 kmol
 CO₂ 0.46168741958136117 kmol
 Reformer boyu= 2.2000000000000006 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1032.7022483823805 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1032.7022483823805 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.39435518378025 Kj/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 4427.871805035795 Kj
 Reaksiyon ısısı= 23359.011258059887 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.1895573299793665
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.1102138492042118 kmol
 C₂H₆ 0.009614299033873595 kmol
 C₃H₈ 0.003204737930028713 kmol
 C₄H₁₀ 0.00160236896478857 kmol
 H₂ 3.575720646952431 kmol
 H₂O 1.9421779609934484 kmol
 CO 0.6432456871510606 kmol
 CO₂ 0.47128817592773187 kmol
 Reformer boyu= 2.3000000000000007 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1026.3471796332517 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1026.3471796332517 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.4366840852463 Kj/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 3956.8968502436473 Kj
 Reaksiyon ısısı= 18931.139453011478 Kj
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.20901525024761267

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.097292552006632 kmol

C₂H₆ 0.007604783284732464 kmol

C₃H₈ 0.002534898829708351 kmol

C₄H₁₀ 0.001267449414624279 kmol

H₂ 3.6408148293663665 kmol

H₂O 1.9133088743741957 kmol

CO 0.6549556489267576 kmol

CO₂ 0.479867738349513 kmol

Reformer boyu= 2.400000000000001 m

Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1020.6601635841379 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1020.6601635841379 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 472.4732658979271 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 3535.3500432668516 KJ

Reaksiyon ısısı= 14974.24260278518 KJ

Reaksiyon oluşum oranı= 0.23609541644592316

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.08574782129077907 kmol

C₂H₆ 0.005809350687032619 kmol

C₃H₈ 0.0019364208349759743 kmol

C₄H₁₀ 9.682104172544184E-4 kmol

H₂ 3.698974222780716 kmol

H₂O 1.8875153471504316 kmol

CO 0.6654180934728627 kmol

CO₂ 0.4875332796883373 kmol

Reformer boyu= 2.500000000000001 m

Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1015.5726425389906 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1015.5726425389906 K

Toplam ısı transfer katsayısı= 472.50497253604834 KJ/m²K

Transfer edilen ısı miktarı= 3158.1782911066257 KJ

Reaksiyon ısısı= 11438.892559501564 KJ

Reaksiyon oluşum oranı= 0.2760912627405812

Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı

CH₄ 0.07543474974840764 kmol

C₂H₆ 0.004205465305439831 kmol

C_3H_8 0.0014017919615858208 kmol
 C_4H_{10} 7.00895980556061E-4 kmol
 H_2 3.7509288330618493 kmol
 H_2O 1.8644736237758623 kmol
 CO 0.6747643434433237 kmol
 CO_2 0.49438101639039633 kmol
 Reformer boyu= 2.6000000000000001 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1011.0227656430468 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1011.0227656430468 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.5325256556754 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 2820.817976630471 KJ
 Reaksiyon ısısı= 8280.714268400516 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.3406491137358534
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH_4 0.06622333262135807 kmol
 C_2H_6 0.0027729088441440976 kmol
 C_3H_8 9.242727723967929E-4 kmol
 C_4H_{10} 4.6213638595861694E-4 kmol
 H_2 3.797333590849733 kmol
 H_2O 1.8438932443556937 kmol
 CO 0.6831122160143502 kmol
 CO_2 0.500497269814967 kmol
 Reformer boyu= 2.7000000000000001 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1006.9547973921372 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1006.9547973921372 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.5565262584081 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 2519.153093553513 KJ
 Reaksiyon ısısı= 5459.896291771163 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.4613921142330548
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH_4 0.057997006022528 kmol
 C_2H_6 0.0014935533270350834 kmol
 C_3H_8 4.978206040390877E-4 kmol
 C_4H_{10} 2.489103017771476E-4 kmol
 H_2 3.8387757151219963 kmol

H₂O 1.825513778926754 kmol
 CO 0.6905673475351044 kmol
 CO₂ 0.5059594367690586 kmol
 Reformer boyu= 2.800000000000001 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1003.3185654531694 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1003.3185654531694 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.57747763270925 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 2249.4757764062574 KJ
 Reaksiyon ısı= 2940.7431982083217 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 0.7649344484675757
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.050651314146836664 kmol
 C₂H₆ 3.511538228040696E-4 kmol
 C₃H₈ 1.1702047522816039E-4 kmol
 C₄H₁₀ 5.851023736934737E-5 kmol
 H₂ 3.8757814274433584 kmol
 H₂O 1.8091018497067484 kmol
 CO 0.6972244013714933 kmol
 CO₂ 0.5108368744608797 kmol
 Reformer boyu= 2.9000000000000012 m
 Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 1000.0689478926794 K

-----ikinci adım iterasyonu-----

Yanma odası gazı giriş sıcaklığı = 1000.0689478926794 K
 Toplam ısı transfer katsayısı= 472.5958033283496 KJ/m²K
 Transfer edilen ısı miktarı= 2008.4493744112656 KJ
 Reaksiyon ısı= 691.2674218081397 KJ
 Reaksiyon oluşum oranı= 2.905459321600589
 Reaksiyon sonucu oluşan gaz karışımı
 CH₄ 0.044092697065044595 kmol
 C₂H₆ -6.688400769506324E-4 kmol
 C₃H₈ -2.2297775391533396E-4 kmol
 C₄H₁₀ -1.1148887720448607E-4 kmol
 H₂ 3.9088220587496574 kmol
 H₂O 1.7944484227526307 kmol
 CO 0.703168166471442 kmol
 CO₂ 0.5151917053879262 kmol

Reformer boyu= 3.0000000000000013 m

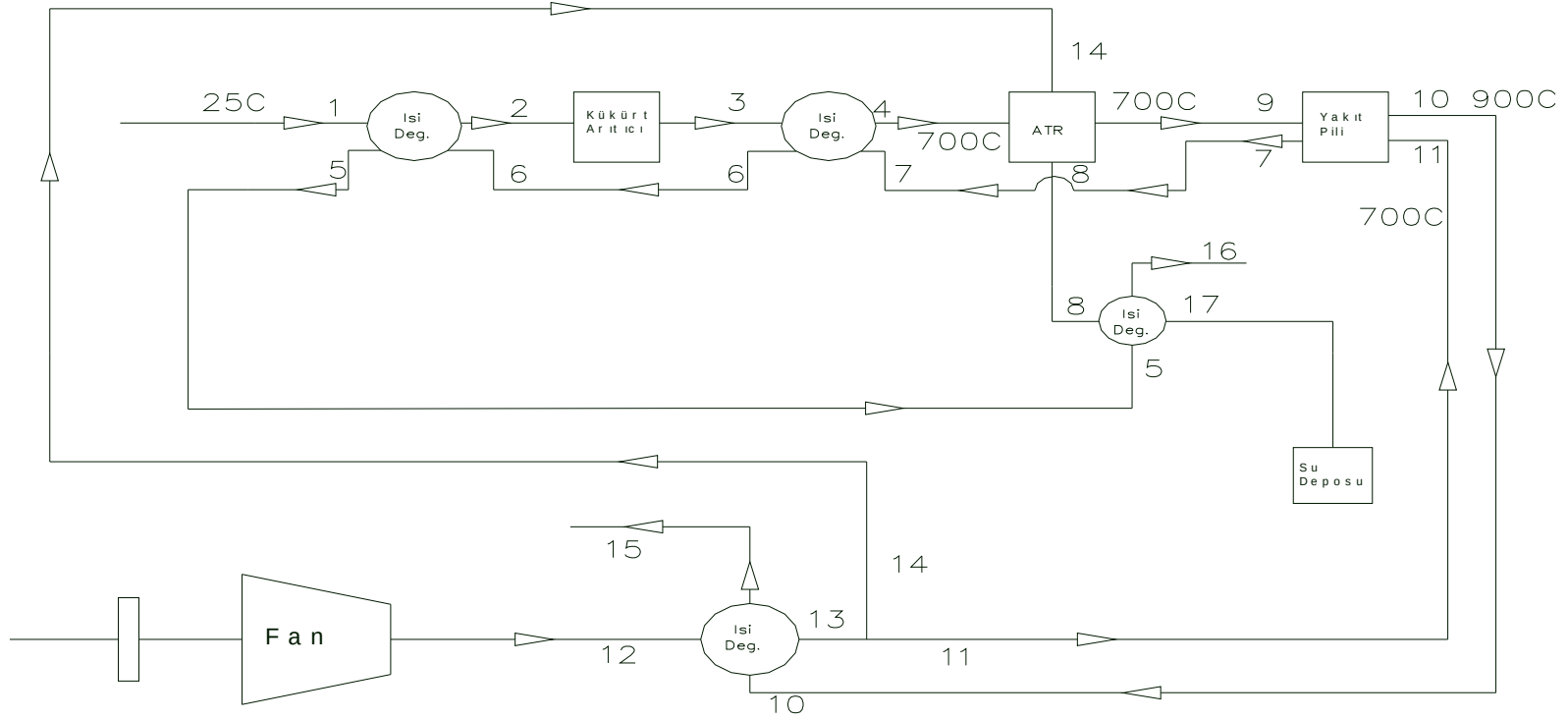
Yanma odası gazı çıkış sıcaklığı = 997.165399185043 K

CH4 0.050651314146836664 kmol
C2H6 3.511538228040696E-4 kmol
C3H8 1.1702047522816039E-4 kmol
C4H10 5.851023736934737E-5 kmol
H2 3.8757814274433584 kmol
H2O 1.8091018497067484 kmol
CO 0.6972244013714933 kmol
CO2 0.5108368744608797 kmol

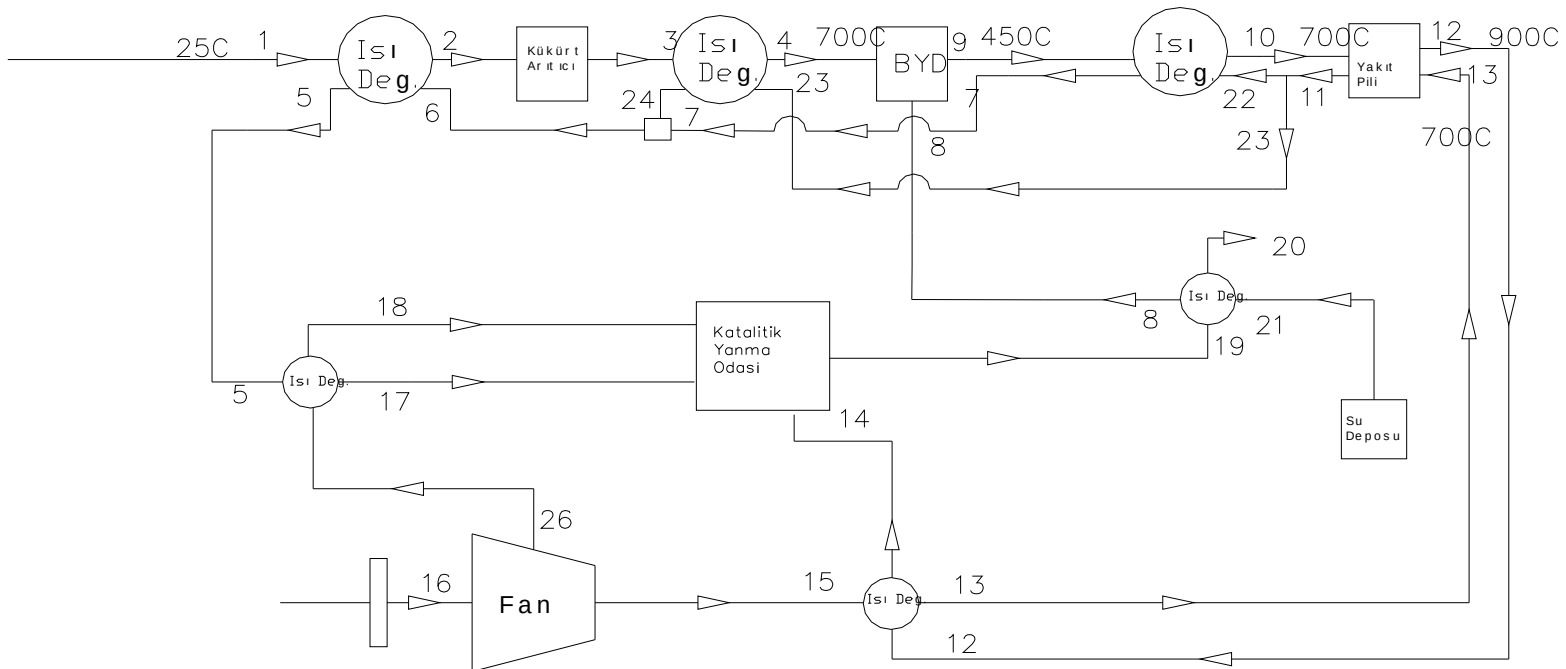
Çizelge 1 ATR sistemindeki farklı reaksiyon şartları için yakıt dönüştürücü çıkışındaki H₂ değerleri

H ₂ O/C→	2.5000	2.5500	2.6000	2.6500	2.7000	2.7500	2.8000	2.8500	2.9000	2.9500	3.0000	4.0000	5.0000
O ₂ (kmol)	H ₂ miktarı (kmol)												
0.1000	1.8092	1.8325	1.8556	1.8785	1.9012	1.9237	1.9461	1.9682	1.9262	2.0120	2.0337	2.2867	2.5415
0.1500	2.1938	2.2198	2.1179	2.1424	2.1668	2.1909	2.2147	2.2384	2.2618	2.2850	2.3079	2.5794	2.8452
0.2000	2.4587	2.3586	2.3844	2.4100	2.4352	2.4602	2.4848	2.5092	2.5333	2.5571	2.5806	2.7908	3.0537
0.2500	2.5901	2.6163	2.6421	2.6676	2.6926	2.7173	2.7417	2.7039	2.7275	2.8126	2.8355	3.0478	3.2952
0.3000	2.8229	2.8477	2.8721	2.8960	2.9194	2.9424	2.9110	2.9333	2.9555	3.0301	3.0510	3.2536	3.5105
0.3500	2.9700	3.0301	3.0514	3.0722	3.0924	3.1122	3.1315	3.1504	3.1285	3.1876	3.2041	3.4195	3.6051
0.4000	3.1787	3.1949	3.2106	3.2259	3.2184	3.2334	3.2479	3.2621	3.2758	3.3080	3.3202	3.4952	3.6116
0.4500	3.2257	3.2362	3.2463	3.2501	3.2620	3.2715	3.2808	3.2899	3.2986	3.3093	3.3173	3.4382	3.5119
0.5000	3.1421	3.1496	3.1569	3.1679	3.1750	3.1819	3.1887	3.1953	3.2017	3.2039	3.2101	3.3102	3.3804
0.5500	3.0310	3.0098	3.0163	3.0298	3.0379	3.0441	3.0502	3.0561	3.0620	3.0677	3.0734	3.1677	3.2413
0.6000	2.8721	2.8783	2.8844	2.8904	2.8963	2.9021	2.9078	2.9134	2.9189	2.9244	2.9297	3.0332	3.1098

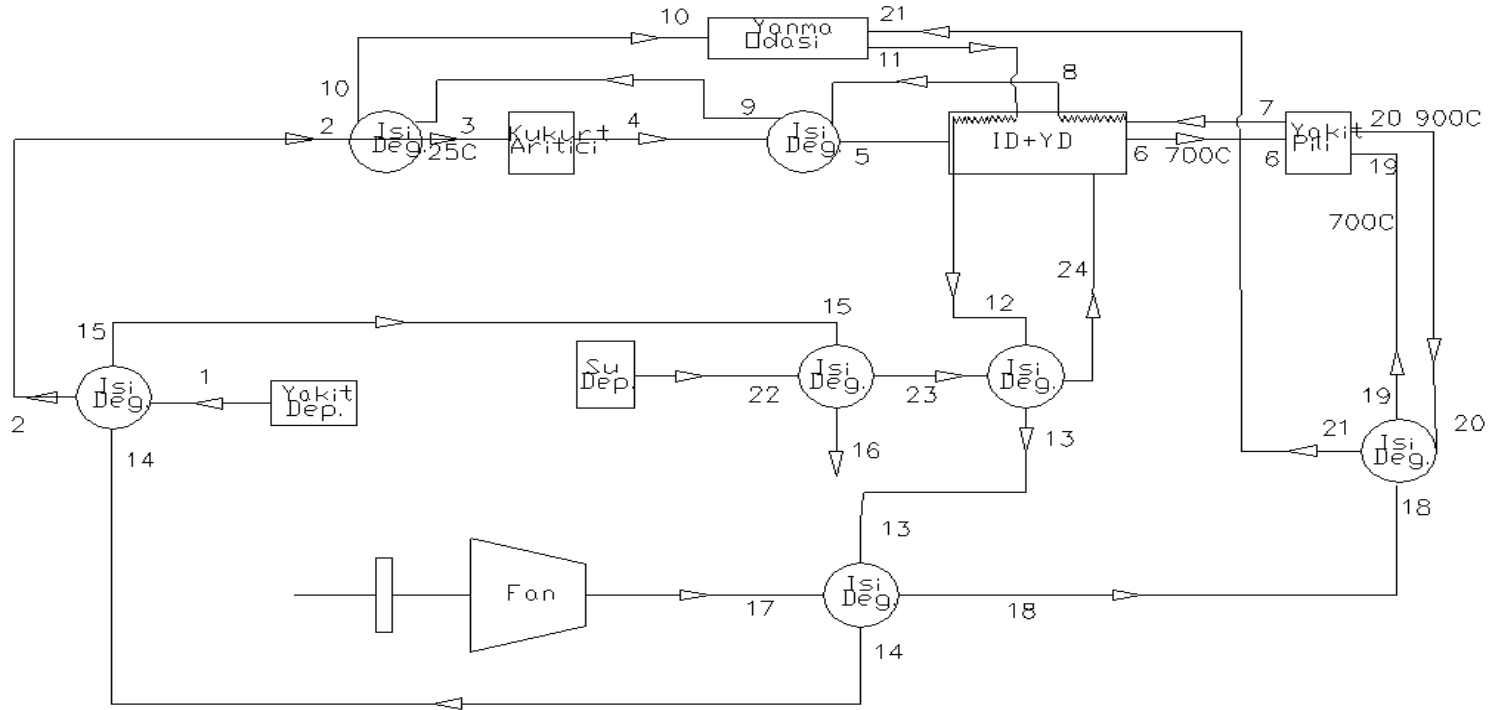
Şekil 1 Ototermal yakıt dönüştürücü içeren sistemin genel akış şeması



Şekil 2 Buharlı yakıt dönüştürücü içeren sistemin genel akış şeması



Şekil 3 Isı değiştiricisi ile entegre yakıt dönüştürücüsünün kullanıldığı sistemin genel akış şeması



ÖZGEÇMİŞ

Süleyman KAVAS, 1 Ağustos 1982’de Aydın Ortaklar’da doğmuştur. İlköğretimini Ortaklarda tamamladıktan sonra, orta ve lise eğitimini Söke’de tamamlayan KAVAS, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun olmuştur. 2005 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans çalışmalarına başlamıştır.s

2005 yılında 4M Teknik Yazılım firmasında, ürün uzmanı olarak işe başlamıştır. 2008 yılına kadar bu görevi yürüttükten sonra, aynı firmada yönetici olarak iş hayatına devam etmektedir.